

# de la **PH** **Y**reflets **SIOU****QUE**

n°12  
décembre 2008 - janvier 2009

Revue de la Société Française de Physique

- ▶ Les milieux aléatoires macroscopiques
- ▶ Sur la piste de l'énergie noire
- ▶ La vie de Wolfgang Pauli
- ▶ Un parcours à l'interface physique-biologie



## Vers une fédération des sociétés scientifiques autour des sciences physiques

Un constat s'impose : la SFP est une société savante héritière d'une tradition prestigieuse, mais qui a toujours été et demeure petite, malgré les efforts divers de ses directions successives. Il est clair qu'elle n'atteint pas la taille critique pour faire entendre son point de vue dans un monde universitaire en profonde mutation où, de plus, la recherche et l'innovation vont maintenant de pair. C'est d'ailleurs pour cette raison que la SFP s'est récemment rapprochée des sociétés de mathématiques et de chimie pour apporter des contributions aux débats suscités autour des réformes ministérielles. Aujourd'hui, il paraît important de tenter un regroupement de la SFP avec d'autres sociétés savantes dans les domaines faisant partie ou proches des sciences physiques (l'optique, l'électronique, la mécanique, le vide, l'acoustique, etc). Ces sociétés sont nombreuses et rassemblent des chercheurs et surtout des ingénieurs.

C'est ainsi qu'est née l'idée de créer une Fédération Française des Sociétés Scientifiques (FS2), suivant en cela l'exemple de la Fédération Française pour les Sciences de la Chimie (FFC). Au départ, elle devrait regrouper la SFP, la SFO (Société Française d'Optique) et la SEE (Société de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication). Clairement, d'autres sociétés savantes pourraient rapidement rallier la FS2, de façon à rassembler la large communauté qui travaille dans le domaine des sciences exactes, depuis la recherche la plus fondamentale jusqu'aux applications industrielles. Des statuts, impliquant un minimum d'administration, sont en cours d'élaboration. Le budget de cette fédération, au départ modeste et fourni par les sociétés constituantes, devrait rapidement augmenter en fonction de l'aide de mécènes qui seront sollicités.

Les trois sociétés fondatrices souhaitent, en se fédérant, mettre en commun leur vision pour devenir une force de proposition écoutée dans la société de la connaissance d'aujourd'hui. Elles sont, en effet, directement concernées par les défis majeurs de notre temps, tels la raréfaction de l'énergie, la sécurité des citoyens, le réchauffement de la Terre, l'hyperdéveloppement des plateformes urbaines ou l'avènement de la société de l'immatériel. Face à ces questions, la fédération, forte de ses compétences complémentaires, devrait pouvoir apporter des éléments de solution utiles en multipliant les éclairages et les avis, tout en fournissant des espaces d'échange.

Plusieurs types d'actions communes dans différents domaines sont envisagés : création de prix communs, organisation de colloques à haute visibilité sur des sujets de société, contacts avec les médias, analyses et prises de position communes auprès des instances décisionnelles, promotion de l'enseignement des sciences et des carrières techniques. Il reste donc à convaincre les mécènes de l'intérêt d'une telle fédération, de façon à pouvoir la faire vivre à long terme, sans diminuer l'influence de chaque société constituante sur le milieu qu'elle représente traditionnellement. La SFP doit trouver son équilibre dans ce nouveau contexte. Les enjeux justifient, me semble-t-il, cet effort d'adaptation au monde actuel.

Michèle Leduc

## Éditorial

- 2 Vers une fédération des sociétés scientifiques autour des sciences physiques  
M. Leduc

## Avancées de la recherche

- 5 Les MIAMs, ou l'histoire d'une communauté scientifique ouverte  
E. Guyon et D. Bideau
- 8 Des particules qui se la coulent douce...  
B. Metzger et É. Guazzelli
- 12 Structure multiéchelles et propriétés des matériaux du pneu  
M. Couty
- 16 Le télescope Canada-France-Hawaï sur la piste de l'énergie noire  
V. Ruhlmann-Kleider

## Science et société

- 20 La vie de Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958)  
J.C. Boudenot

## Au sein et autour de la SFP

- 24 Vie de la SFP
- 25 Prix scientifiques
- 26 L'école d'été e2phy 2008, « Physique et Sport », à Dijon
- 27 Vie d'EDP Sciences

## Reflets de la physique et ses lecteurs

- 28 Matthieu Piel  
Un parcours à l'interface de la physique et de la biologie
- 30 Note de lecture
- 31 Courrier des lecteurs

## Comité de rédaction

**Président :** Jean-Pierre HULIN

**Membres :** Patricia BASSEREAU - Michel BELAKHOVSKY - Fabienne CASOLI - Jacques CHOMILLIER - Anne DAVAILLE - Étienne GUYON - Pascale HENNEQUIN - Georges LANDA - Roland LEHOUCQ - Jérôme MARGUERON - Charles de NOVION - Sophie REMY - Claude SÉBENNE - José TEIXEIRA - Jean VANNIMENUS - Christophe YÉCHE

**Directeur de la publication :** Sylvie MAGNIER

**Rédacteur en chef :** Charles de NOVION

**Conception :** Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR

**Réalisation graphique :** Lætitia MORIN

**Suivi de rédaction :** Agathe CYMER

**Service publicité :** Aurélie LEFEBVRE

Tél. : 01 69 18 92 40 - e-mail : aurelie.lefebvre@edpsciences.org

Dépôt légal 1<sup>er</sup> trimestre 2009 - Commission Paritaire 0310 G 86176 - ISSN 1953-793 X

© SFP - Édité à 3300 exemplaires

IMP Graphic - 14, rue La Fayette - 58204 Cosne-sur-Loire - Tél. : 03 86 39 59 59

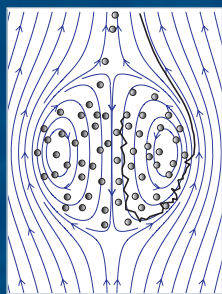
Société française de physique, 33, rue Croulebarbe, 75013 Paris

Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19

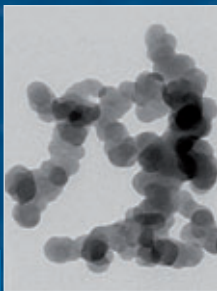
e-mail : sfp@sfpnet.org - Serveur : www.sfpnet.fr

SFP Bulletin, Institut Henri-Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris

e-mail : sfp-bulletin@ihp.jussieu.fr



page 10



page 14



page 17



page 20



En couverture :  
Coulée de sable en avalanche sur  
la face arrière d'une dune barkhane  
(plage de Tarfaya, Sahara Atlantique),  
exemple de phénomène dynamique  
au sein d'un milieu aléatoire  
macroscopique. Voir article p. 5.



Depuis 1970, le groupe Français Quantel conçoit, produit et commercialise des lasers pour les applications scientifiques, industrielles, médicales et militaires.

Notre savoir-faire est reconnu à travers le monde. Nous sommes spécialistes des lasers Nd:YAG pulsés pompés par lampes et pompés par diodes, des lasers à colorants pulsés, des lasers à fibre Ytterbium, des diodes laser de puissance...

# Quantel, votre solution laser

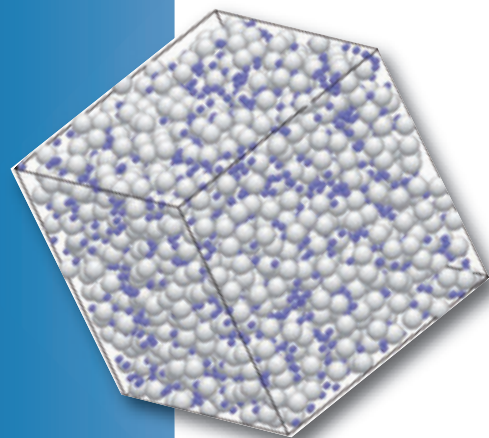
Scientifique | Industriel | Médical | Militaire

De la spectroscopie au LIDAR, en passant par les mesures de diffusion ou de fluorescence, nos solutions laser répondent quotidiennement aux besoins des chercheurs.

Nos équipes sont également spécialisées dans la conception de lasers sur mesure, répondant aux caractéristiques propres à votre expérimentation (énergie par impulsion, cadence, taux de polarisation...).

N'hésitez pas à contacter nos ingénieurs commerciaux pour en savoir plus.

Quantel - 2 bis Avenue du Pacifique - ZA de Courtaboeuf - BP23 - 91941 Les Ulis Cedex  
e-mail: [quantel@quantel.fr](mailto:quantel@quantel.fr) - Site web: [www.quantel-laser.Com](http://www.quantel-laser.Com)



# Les MIAMs, ou l'histoire d'une communauté scientifique ouverte

Étienne Guyon<sup>1</sup> (guyon@pmmh.espci.fr) et Daniel Bideau<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Professeur émérite, PMMH, ESPCI. <sup>2</sup> - Professeur émérite, Université de Rennes 1.

Les méthodes de la physique statistique ont rencontré la physique du solide dans ce que l'on a qualifié de matière mal condensée. Les résultats obtenus ont trouvé un prolongement dans des situations de désordre à plus grande échelle : matériaux granulaires ou poreux, colloïdes et suspensions, gels... Les deux encarts de cet article, ainsi que les deux articles suivants de ce numéro, en donnent des exemples.

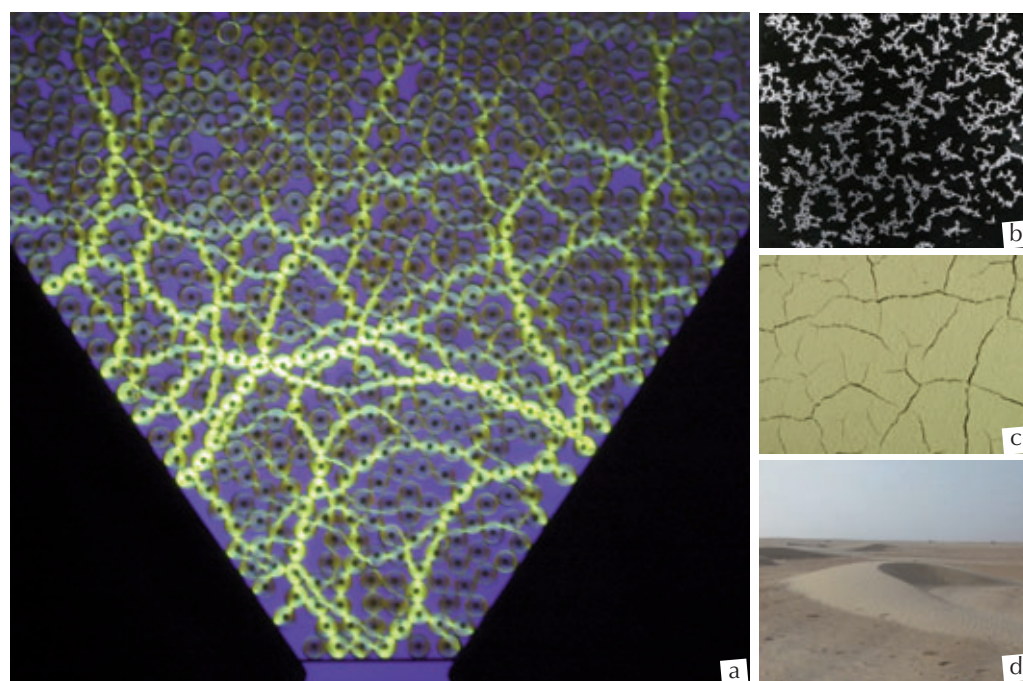
Une communauté ouverte s'est constituée autour des MIAMs (milieux aléatoires macroscopiques) il y a une trentaine d'années et reste bien vivante et renouvelée dans la diversité des thèmes traités. Son histoire montre l'impact de structures légères et ouvertes.

La physique des solides a connu après-guerre un accroissement considérable. Dans les années 1970, plusieurs rapports de prospective accompagnent ses développements, en recommandant aussi bien des actions tournées vers les applications des matériaux (J. P. Causse) que des études fondamentales (J. Friedel). L'utilisation de l'ultravide et de spectroscopies fines permet alors de mieux connaître les solides « propres » (monocristaux, surfaces propres à l'échelle atomique). Dans le même temps, le développement d'études sur les amorphes et les verres, la découverte de la localisation quantique, l'utilisation de la percolation et des fractals ouvrent la physique vers les milieux désordonnés. De Gennes, qui fut un des inventeurs de la percolation, écrit alors : « Le désordre à l'échelle microscopique est aujourd'hui un animal bien

apprivoisé ; ce n'est pas le cas du désordre à l'échelle macroscopique. » Des Écoles des Houches sur *la matière mal condensée* (1978) et sur *la physique des défauts* (1980) contribuent à ouvrir cette porte.

C'est avec la complicité de Pierre-Gilles et profitant d'une réorganisation engagée à la suite d'une crise universitaire à Marseille (1973) que, avec notre laboratoire de l'ESPCI puis avec le Groupe Matière Condensée et Matériaux de l'Université de Rennes, nous avons mis en place cette communauté des Milieux Aléatoires Macroscopiques (ou, plus brièvement, MIAM), très active depuis près de trente ans. Nous avons profité, récemment, de la fin du GDR MIDI (milieux dispersés) en 2008 – héritier direct des premières structures – pour faire un point détaillé sur ces trente ans d'histoire

>>>



**1. Quelques exemples de milieux aléatoires macroscopiques.** (a) Visualisation par élasticimétrie des chaînes de forces dans un empilement de cylindres transparents sous contrainte. (Document F. Melo.) (b) Agrégat formé par des particules de cire flottant sur une surface liquide. (Document M. Cloitre, C. Allain.) (c) Fissures produites par le séchage d'une couche d'argile. (Document K.J. Maloy.) (d) Dune en croissant (barkhane). (Document F. Rioual.) (Voir aussi en couverture l'image d'une coulée de sable en avalanche.) En haut de la page : Simulation numérique de la structure d'un empilement de sphères de deux diamètres différents. (Document P. Richard.) Deux autres exemples sont les particules en suspension dans un liquide (article pp. 8-11) et les polymères renforcés par des particules (article pp. 12-15).



2. Réunion, pendant la rencontre de juin 1998 à Carry-le-Rouet, de plusieurs responsables de l'action MIAM à l'occasion d'un cadeau remis à Robert Blanc (professeur à l'IUSTI) qui l'a pilotée à Marseille. De gauche à droite : Étienne Guyon, Robert Blanc, Pierre-Gilles de Gennes, Daniel Bideau et Jeanne Pullino.

>>>

dans *La revue pour l'histoire du CNRS* [1]. Nous en avons profité pour rassembler et classer au laboratoire IUSTI (Université de Provence) l'ensemble des archives scientifiques et administratives complètes de cette aventure.

Les thématiques ont bien évolué au cours de ces années. Au début, on trouve surtout des applications de la percolation : propriétés de transport et mécaniques de structures composites, physico-chimie des gels, hydrodynamique des poreux... Les thèmes ont évolué ensuite vers des systèmes où le désordre se modifie sous les sollicitations imposées, comme les milieux granulaires dont la géométrie – en particulier celle des contacts – dépend des contraintes appliquées. Les recherches qui se développent alors impliquent des communautés variées : génie chimique, matière molle, métallurgie, géophysique et hydrologie. Mais l'étude de la matière divisée (les granulaires) reste une constante à travers ces évolutions. La mécanique des milieux continus, vue par des physiciens et spécialistes des matériaux, y a aussi toujours été très présente.

Plutôt que de résumer cette longue aventure, soulignons-en quelques caractéristiques, qui peuvent être utiles dans d'autres entreprises du même type.

## Références

- 1 • Daniel Bideau, Étienne Guyon et Jeanne Pullino, « Le tas de sable. Du désordre qui rassemble », *La Revue pour l'histoire du CNRS*, N°22 - Automne 2008, pp. 32-38.
- 2 • Les Houches 1991, Cargèse 1994, 1997, 2005, Porquerolles 1995, 2001, 2006.
- 3 • GdR MIDI, **14**, 341-365v (2004).
- 4 • GdRs MeGe (Couplages multiphysiques et multiéchelles en mécanique géo-environnementale) et MéPhy (Mécanique et physique multiéchelles)

- Une unité de site (le VVF de Carry-le-Rouet, où se sont tenues quasi annuellement des rencontres de trois jours pendant près de trente ans).
- L'investissement personnel de Pierre-Gilles de Gennes (qui a participé à une dizaine de rencontres) et, également, à chaque rencontre, de scientifiques de haut niveau, souvent issus d'autres domaines (J. Villermaux, D. Stauffer, J. Hinch,

J. Jenkins...), qui ont ouvert cette communauté à partir d'un groupe de départ (R. Blanc et les deux auteurs de cet article).

Le noyau dur initial de participants s'est renouvelé progressivement au cours du temps. Il est tout à fait remarquable que la moyenne d'âge actuelle soit restée la même qu'à l'origine : cela indique un renouvellement très fort de la communauté, qui a pourtant conservé un même style et un intérêt constant pour les applications des systèmes en désordre.

Les rencontres rassemblent et brassent annuellement une quarantaine de scientifiques, allant du doctorant au professeur au Collège de France ou dans une université anglo-saxonne. Le style très informel et, à première vue, peu organisé a favorisé une participation très active des jeunes.

L'organisation autour d'une même structure administrative à Marseille (avec l'efficace et souriant soutien de Jeanne Pullino tout au long de la trentaine d'années de ces rencontres) a permis un fonctionnement léger au plan administratif et avec des budgets

## Dynamique de tassement d'un milieu granulaire

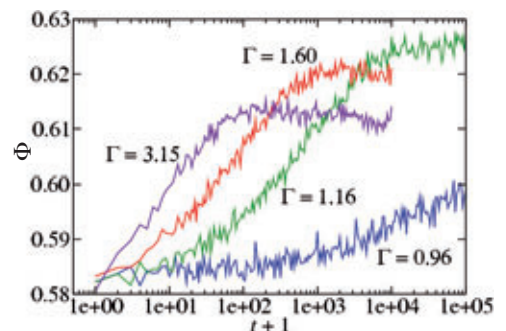
encadré 1

La dynamique de tassement d'un milieu granulaire – sec ou humide – est un problème pratique important, par exemple en génie civil. Depuis un article d'une équipe de Chicago en 1995 [1] et un travail de Sam Edwards *et al.* sur la « thermodynamique des poudres », c'est également devenu un sujet de base en physique statistique. Dans ce cadre, il est en particulier important de comprendre l'évolution de la compaction au cours du temps sous différentes conditions expérimentales.

Prenons, par exemple, un empilement de sphères égales soumis à des secousses verticales (*taps*) de fréquence et d'amplitude contrôlées ; la compaction est extrêmement lente : la compacité  $\Phi$  (volume solide/volume total) augmente encore après 10 000 *taps* et suit une loi en  $1/\log 1/t$ . La figure ci-dessous montre à titre d'exemple différentes dynamiques de compaction en fonction de l'accélération des *taps*  $\Gamma$  (en  $m.s^{-2}$ ) et du temps  $t$  (exprimé en nombre de *taps*) : à faible accélération (courbe bleue), le maximum de compacité est loin d'être atteint après 100 000 *taps*.

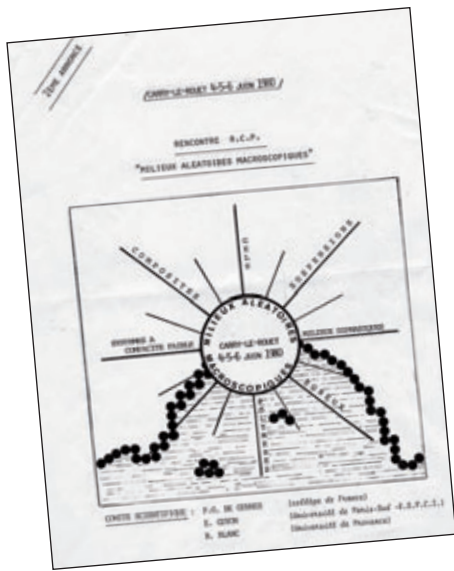
Des travaux ont été menés à la suite de cet article au niveau international et dans notre communauté MIAM, y compris par de Gennes [2]. Ont ainsi été mis en évidence des effets mémoire (dans les mêmes conditions expérimentales, la courbe de compaction dépend de l'« histoire » initiale du système), de vieillissements assez surprenants et la notion de température granulaire a reçu un nouvel éclairage...

En même temps, ces travaux ont permis de mieux comprendre ce processus industriel.



Évolution de la compacité  $\langle \Phi \rangle$  en fonction du nombre de *taps* [3]. L'amplitude est mesurée en terme du rapport  $\Gamma$  de l'accélération maximum à celle de la pesanteur.

- 1 • J.B. Knight, C.G. Fandrich, C.N. Lau, H.M. Jaeger and S.R. Nagel, *Phys. Rev. E* **51** (1995) 3957.
- 2 • T. Boutreux et P.G. de Gennes, *Physica A* **244** (1997) 59-67.
- 3 • P. Richard, M. Nicodemi, R. Delannay, P. Ribière et D. Bideau, *Nature Materials* **4** (2005) 121-128.



**4. Annonce de la rencontre de la RCP MIAM de 1980 à Carry-le-Rouet.**

modestes accordés par le CNRS et le ministère de la Recherche. Sans être en compétition avec des Écoles du type *les Houches* et *Cargèse*, auxquelles ont d'ailleurs contribué nombre des membres de cette communauté, le style beaucoup plus souple et la continuité pluriannuelle de l'esprit des rencontres, par-delà le renouvellement des thèmes année après année, a permis un très grand brassage et la constitution facile de collaborations sous forme de projets

d'études, de visites, de contrats, d'obtention d'emplois et de stages. Ceci n'a pas empêché l'organisation de nombreuses écoles thématiques ouvertes à une communauté plus large [2].

L'action des rencontres MIAM a été accompagnée successivement par des actions thématiques programmées du PIRMAT dirigé par J. Hanus entre 1980 et 1990, et par les GDRs « Physique des Milieux Hétérogènes Complexes » jusqu'en 2000 et « Milieux dispersés » (MIDI) ensuite. Ces actions, sous des directions diverses, ont également largement contribué à soutenir cette communauté, aussi hétérogène que les milieux qu'elle étudie !

La gazette « info miam », diffusée sur support papier et, elle aussi, produite de façon artisanale et à la demande, a paru continûment depuis 1980. Elle a été remplacée vers 2000 par une gazette électronique (toujours appelée « info miam »), qui est diffusée aujourd'hui à plus de 200 inscrits.

Le site du GDR MIDI est toujours très fréquenté ([www.lmgc.univ-montp2.fr/MIDI](http://www.lmgc.univ-montp2.fr/MIDI)).

On pourrait poser la question des applications pratiques tangibles de ces années d'activité. L'étude des nouveaux bétons, par

exemple, a utilisé les résultats sur les problèmes d'empilements de grains (encadré 1, p. 6) ; celle de la dynamique des dunes, des études d'avalanches (image de couverture) et de transport éolien de grains. Les milieux pétroliers et d'hydrogéologie ont bénéficié de la meilleure connaissance des milieux poreux et fissurés (encadré 2 ci-dessous). Les études de surfaces et d'interfaces rugueuses ont permis des progrès sur la compréhension du mouillage et de la friction... Un point d'orgue a été l'article collectif du GDR MIDI sur la rhéologie des écoulements granulaires denses [3], qui est bien cité au niveau international.

Mais il faut aussi souligner l'action pédagogique constante à travers des écoles de formation, des livres, des expositions itinérantes qui ont toutes connu un grand succès...

Les MIAMs viennent d'être renouvelés par le lancement de nouveaux programmes [4]. Sans doute, les thèmes ont fortement évolué, tout en restant centrés sur la matière en désordre ; les acteurs principaux sont aussi, pour une bonne part, nouveaux. Mais une même vision de cette physique légère, soucieuse d'applications « à la de Gennes », est toujours présente. ■

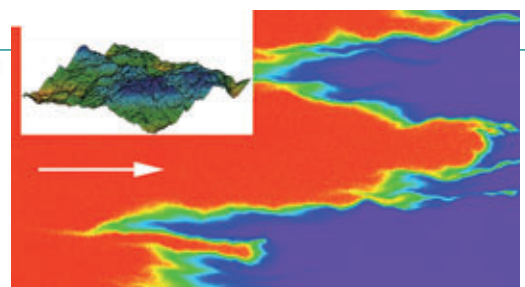
**Dans les deux articles suivants, on décrit plus en détail deux cas importants et très différents de milieux aléatoires macroscopiques : la sédimentation d'un nuage de particules dans un liquide (« Des particules qui se la coulent douce... », pp. 8-11), et la structure et les propriétés mécaniques de matériaux composites d'intérêt industriel (« Structure multiéchelles et propriétés des matériaux du pneu », pp. 12-15).**

## MIAMs, fissures et chenaux —encadré 2

L'étude de matériaux complexes a grandement bénéficié des approches statistiques de la physique du désordre. Un bon exemple est celui des roches ou matériaux compacts fracturés (massifs granitiques par exemple), à travers lesquels l'eau (ou tout autre fluide) ne peut s'écouler qu'en empruntant un réseau de fissures. Les applications sont nombreuses tant en hydrologie, en géothermie ou en génie pétrolier que dans les procédés de confinement ou de stockage de déchets (chimiques ou radioactifs, par exemple).

Un des problèmes majeurs avec ces matériaux est l'effet de « chenalisation » : les écoulements ne sont pas distribués uniformément, mais concentrés dans quelques chemins préférentiels. Cette structuration apparaît aussi bien à l'échelle de la fracture individuelle qu'à celle du réseau de fractures. Nous nous sommes surtout intéressés au premier cas, où les hétérogénéités d'écoulement sont largement liées à la rugosité des deux parois de la fissure : leur surface a une géométrie souvent caractérisée par une très large distribution de la taille des rugosités (l'encart de la figure en montre un exemple). Ces rugosités ont pour conséquence des variations d'ouverture présentes, par exemple, si au départ les deux parois sont en contact et se décalent latéralement lorsque la fracture se propage : dans ce dernier cas, les expériences et modélisations montrent qu'il apparaît des chenaux perpendiculaires au déplacement relatif.

La figure ci-contre montre les conséquences de la présence d'un tel chenal sur le déplacement d'un fluide (en bleu) par un autre, miscible avec le premier (en rouge). Le déplacement est beaucoup plus rapide dans les chemins préférentiels. De tels effets de digitation peuvent réduire de manière importante l'efficacité de la récupération du pétrole (ou de la chaleur) dans l'exploitation d'un champ pétrolier (ou la géothermie).



**Vue en fausses couleurs des variations de concentration lors du déplacement d'un fluide (en bleu) par un autre, miscible avec le premier (en rouge), dans une fracture rugueuse « chenalisée » dans la direction parallèle à l'écoulement moyen (flèche blanche).**

Les concentrations relatives des deux fluides, intermédiaires entre 0 et 1, sont marquées par les autres couleurs dans l'ordre de l'arc-en-ciel. Le champ réel de l'image est de 80 x 230 mm. Encart : vue en perspective 3D de la surface auto-affine d'une des parois ; les hauteurs locales sont codées en fausses couleurs (bleu : hauteur élevée, rouge : faible). Pour une roche réelle la taille de l'échantillon serait de l'ordre de 100 mm et la hauteur des rugosités les plus grandes de l'ordre de 10 mm. Expériences réalisées au laboratoire FAST (UMR 7608) par A. Boschan, H. Auradou et J.P. Hulin, avec la coopération de I. Ippolito et R. Chertcoff (Université de Buenos-Aires).

# Des particules qui se la coulent douce...

Bloen Metzger (bloen.metzger@polytech.univ-mrs.fr) et Élisabeth Guazzelli  
IUSTI, UMR CNRS 6595, Technopôle de Château-Gombert, 13453 Marseille Cedex 13

Formation d'un tore, déstabilisation en gouttelettes, puis cascade auto-similaire : la sédimentation d'un nuage de particules dans un fluide visqueux est spectaculaire. Comment un système conceptuellement aussi simple peut-il développer une telle richesse de comportements ? La longue portée des interactions hydrodynamiques entre particules et le comportement collectif qu'elles entraînent (du type problème à N-corps) sont les composantes essentielles pour comprendre cette dynamique.

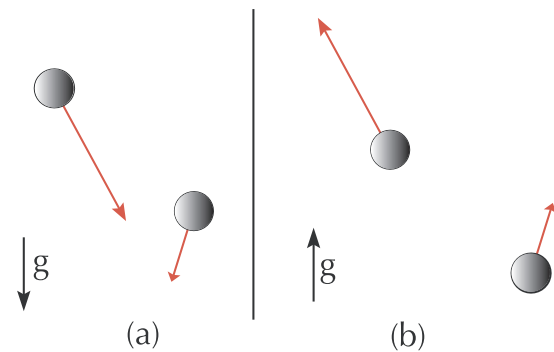
Lorsque de petites particules sédimentent (tombent sous l'effet de la gravité) à faible vitesse dans un fluide initialement au repos, elles génèrent des perturbations d'écoulement dont la décroissance spatiale est très lente. Les particules s'influencent mutuellement *via* le fluide. Chaque particule voit ainsi sa trajectoire modifiée par rapport à celle qu'elle aurait si elle tombait de façon isolée.

Ces interactions hydrodynamiques, propres aux écoulements de Stokes (encadré, p. 9), sont à l'origine de phénomènes complexes d'un grand intérêt. Cette situation préfigure de nombreux phénomènes naturels comme le comportement de globules rouges, la sédimentation d'alluvions ou, pour citer une expérience quotidienne, la chute des grains de marc dans votre tasse de café. Ce système donne surtout une occasion quasiment unique en physique classique d'étudier expérimentalement le problème à N-corps<sup>(1)</sup>. En effet, à l'instar de l'interaction gravitationnelle qui régit le mouvement des planètes, les interactions hydrodynamiques entre particules sont de type longue portée.

Nous commencerons par décrire la dynamique de sédimentation d'une, de deux, puis de trois particules. Au passage de deux à trois particules, on aborde le problème à N-corps ; apparaissent alors certains comportements chaotiques. La deuxième partie de l'article est consacrée à la sédimentation d'un « nuage de particules ». Des films sont disponibles sur le lien de la référence [1].

## 1, 2, 3 particules

Le problème de la chute d'une particule sphérique dans un fluide visqueux sous l'effet de la gravité a été complètement résolu par Stokes en 1851 [2]. La perturbation d'écoulement induite au sein du fluide par la chute de la sphère possède une propriété remarquable : son amplitude décroît très lentement, comme l'inverse de la distance au centre de la sphère (encadré, p. 9). On verra que cette propriété est essentielle pour comprendre la dynamique d'évolution d'un ensemble de particules.



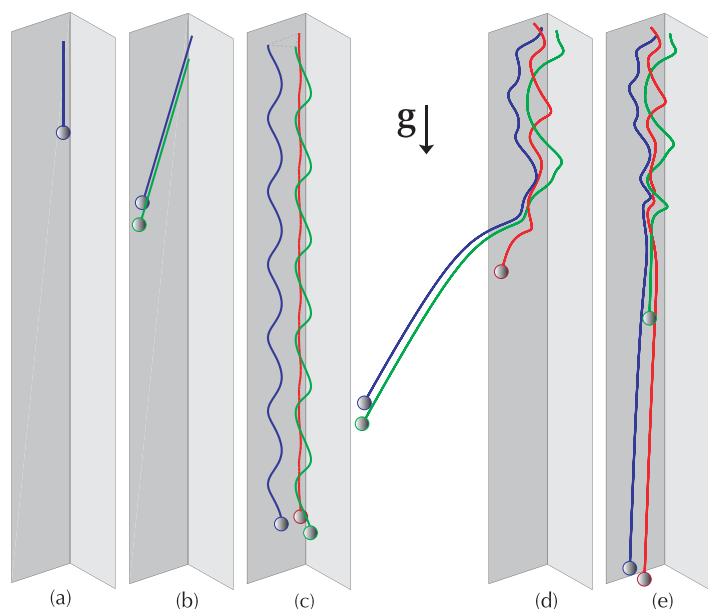
**1. Deux sphères identiques tombent lentement dans un fluide visqueux sous l'effet de leur propre poids : la linéarité des équations de Stokes permet de montrer que les vitesses des deux sphères sont nécessairement les mêmes.**

a) Supposons que les deux sphères ont des vitesses différentes : la sphère située à l'arrière (par rapport au sens du mouvement) rattrape la première sphère et les deux sphères se rapprochent.  
b) Invertissons le sens de la pesanteur  $g$ . En utilisant la propriété de linéarité, l'inversion du sens des forces entraîne l'inversion du sens des vitesses. Cette fois, la sphère située à l'avant se déplace plus rapidement et les deux sphères s'éloignent l'une de l'autre.

Les deux situations sont pourtant formellement identiques, la dynamique doit donc nécessairement être la même. Les vitesses des deux sphères sont donc identiques.

Imaginons maintenant la sédimentation d'un doublet de particules identiques. Le mouvement du fluide induit par le déplacement de chacune des sphères influence la trajectoire de l'autre. La vitesse de chaque sphère peut ainsi être évaluée en ajoutant la vitesse propre de sédimentation d'une sphère isolée à celle induite dans le fluide par le mouvement de l'autre. La vitesse du doublet de particules a donc un module supérieur à la vitesse de sédimentation d'une particule isolée (fig. 2 – a et b). La linéarité des équations de Stokes permet de montrer que les vitesses résultantes des deux sphères sont nécessairement identiques (fig. 1). Les deux particules sédimentent donc sans mouvement relatif l'une par rapport à l'autre.

La situation est très différente pour trois particules [3]. Certaines configurations initiales très particulières produisent un mouvement périodique (fig. 2c) : lorsque, par exemple, les trois particules sont initialement positionnées aux sommets d'un triangle isocèle horizontal. Dans



**2. Simulations numériques : sédimentation d'une (a), de deux (b) ou de trois (c, d, e) particules dans un fluide visqueux.**

- c) Initialement positionnées aux sommets d'un triangle isocèle horizontal, les particules suivent un mouvement périodique.
- d) Initialement distribuées aléatoirement, les particules passent par une phase d'interaction à trois, puis un doublet (particules bleue et verte) « s'échappe » et laisse la particule rouge isolée.
- e) Même configuration initiale que pour d, sauf pour la particule bleue dont la position initiale a été légèrement modifiée. Si l'évolution aux temps courts est similaire, l'évolution aux temps longs, par contre, est très différente d'une configuration à l'autre. Cette fois, le doublet rouge et bleu s'échappe et laisse la particule verte isolée. Cette extrême sensibilité aux conditions initiales est caractéristique des systèmes chaotiques.

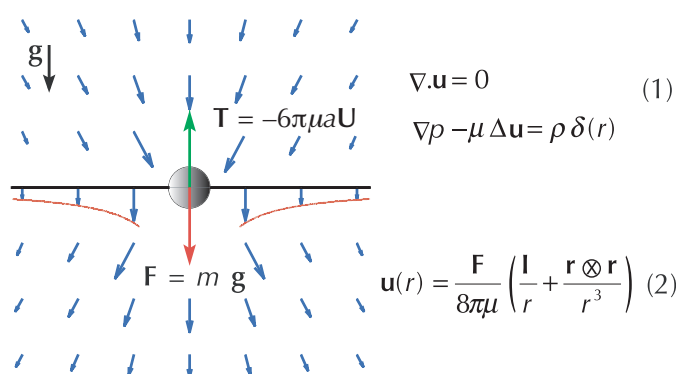
les autres cas, la dynamique d'évolution est chaotique (fig. 2 – d et e). On distingue une phase d'interaction à trois particules, pendant laquelle la position relative des particules change totalement. Ensuite, un doublet « s'échappe » et laisse en arrière la troisième particule. Le doublet sédimente plus rapidement que la particule isolée, car chacune des particules du doublet est entraînée par la perturbation d'écoulement générée par l'autre particule du doublet. La nature chaotique de la configuration à trois particules est bien illustrée dans la figure 2 (d et e) par la sensibilité du système aux conditions initiales.

Les équations de Stokes qui déterminent le mouvement de ces particules sont linéaires et instantanées. Elles sont par conséquent réversibles en temps. Comment se fait-il alors que les particules présentent une dynamique d'évolution si complexe ? Pourquoi une telle sensibilité aux conditions initiales ? Cette dynamique chaotique apparaît dès que le nombre de particules est supérieur à deux. Elle a pour origine le couplage entre l'écoulement du fluide et la distribution spatiale des particules. À un instant donné, la distribution spatiale des particules détermine complètement l'écoulement, mais l'écoulement produit entraîne les particules et donc modifie aussitôt cette distribution. Cette perpétuelle rétroaction entre écoulement et microstructure donne lieu à une dynamique temporelle fortement non linéaire, qui est à l'origine du comportement chaotique observé.

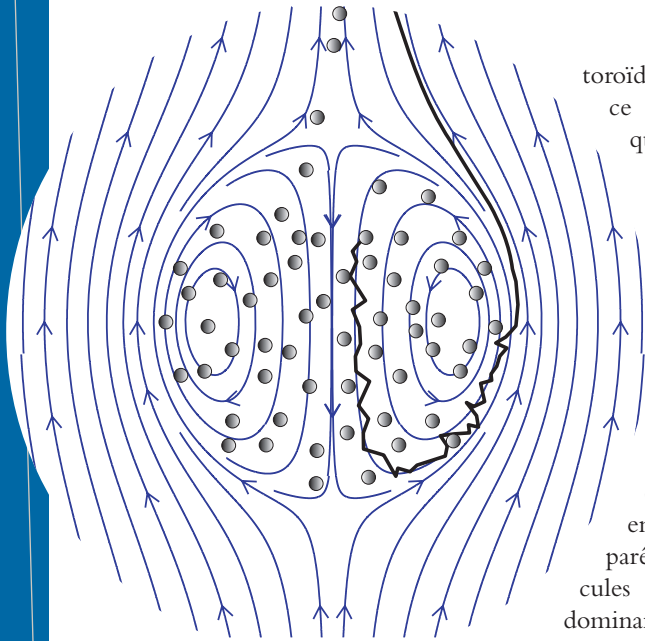
>>>

## Chute d'une petite particule sphérique dans un fluide visqueux sous l'effet de la gravité.

Lorsqu'une petite particule de rayon  $a$  tombe dans un fluide visqueux de viscosité  $\mu$ , la force de traînée  $\mathbf{T} = -6\pi\mu a\mathbf{U}$  exercée par le fluide sur la particule compense exactement la force de gravité  $\mathbf{F}$ , de sorte que la vitesse de sédimentation de la particule  $\mathbf{U} = \mathbf{F}/6\pi\mu a$  est constante. L'écoulement  $\mathbf{u}$  induit dans le fluide est solution des équations de Stokes (1), où  $p$  est le champ de pression et  $\delta$  la fonction de Dirac qui décrit la distribution du champ de forces au sein du fluide, si on assimile la particule à une masse ponctuelle. Ces équations, valables si l'écoulement est suffisamment lent et/ou la viscosité du fluide suffisamment grande et/ou la taille de la particule suffisamment petite, sont linéaires ; elles sont donc aussi réversibles (pour plus de détails, consultez la référence [1]). La solution analytique de cet écoulement est connue (2) ; elle correspond à la solution de Green des équations de Stokes.



Sur la figure, les flèches bleues représentent le champ de vitesse induit dans le fluide par la chute de la particule, et la courbe rouge indique sa propriété la plus remarquable, qui est la lente décroissance (en  $1/r$ ) de son amplitude.



**3. Simulation numérique de l'écoulement produit (dans le référentiel du nuage) par un nuage de particules.** Le mouvement général est celui d'une recirculation toroïdale d'axe vertical. Les fluctuations dues au caractère discret et aléatoire de la distribution des particules à l'intérieur du nuage conduisent certaines particules à traverser l'interface entre le nuage et le fluide externe. Ces particules, entraînées par le fluide externe, forment un fin filet à l'arrière du nuage.

>>>

## Nuage de particules

Nous allons maintenant examiner le mouvement d'un grand nombre de particules soumises à la gravité. Les particules sont initialement distribuées aléatoirement à l'intérieur d'un volume prescrit du fluide, de sorte qu'elles forment ce que l'on appellera dans la suite un « nuage de particules ».

Le phénomène le plus surprenant, et certainement le plus spectaculaire, est la dynamique collective des particules pendant leur chute (fig. 3). Le mouvement général apparent est celui d'une recirculation

toroïdale d'axe vertical. Remarquez que ce mouvement collectif résulte uniquement des interactions hydrodynamiques entre particules.

Un modèle simple pour décrire ces interactions est de considérer que chaque particule produit dans le fluide ambiant une perturbation d'écoulement équivalente à celle que produirait à sa place une particule ponctuelle<sup>(2)</sup> (encadré, p. 9). Cette approximation est naturelle en milieu dilué, puisque la distance entre les particules est grande comparée à leur taille typique ; les particules ne ressentent alors que l'ordre dominant des perturbations d'écoulement créées par leurs voisines (en  $1/r$ ).

La linéarité des équations de Stokes peut nous aider à comprendre la dynamique collective des particules. Chacune des particules à l'intérieur du nuage est *advectée* par la somme des perturbations d'écoulement induites par la chute de toutes les autres particules du nuage. Comme deux particules voisines voient quasiment la même distribution de particules autour d'elles, elles ont des vitesses presque identiques et donc des trajectoires fortement similaires ; au lieu de se disperser rapidement dans le fluide ambiant, les particules du nuage forment une entité « cohésive » qui perdure pendant un temps très long.

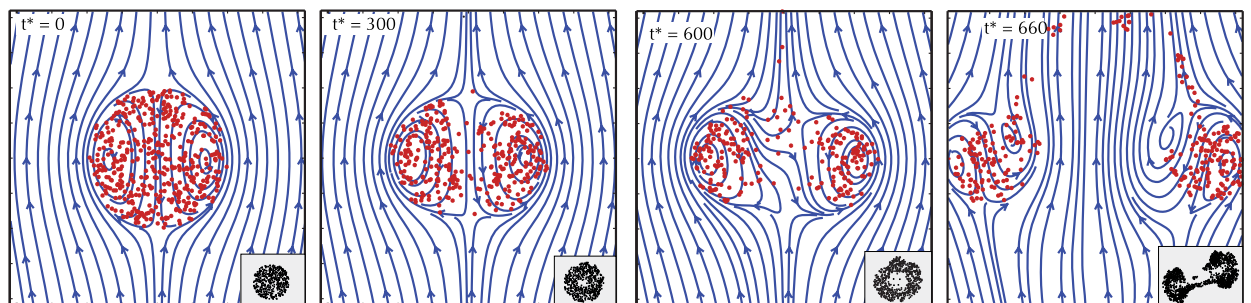
Ce mouvement de recirculation toroïdal est aussi observé lorsqu'une goutte de fluide pur sédimente dans un fluide plus léger [4]. La suspension peut être assimilée à un fluide effectif plus dense que le fluide ambiant, mais cette analogie a des limites ; les suspensions possèdent des caractéristiques intrinsèques qui ne peuvent être traduites dans un modèle de type milieu effectif.

Le mécanisme de perte de particules illustre bien ces différences. Certaines particules s'échappent spontanément du nuage (fig. 3). Le caractère multiple des interactions et le réarrangement permanent des particules au sein du nuage génèrent d'importantes fluctuations (comme l'illustre schématiquement la ligne brisée de la figure 3). Certaines particules traversent spontanément l'interface entre le nuage et le fluide externe, et sont alors entraînées par ce dernier. Malgré la nature réversible des équations de Stokes, on observe un mécanisme qui génère un transport diffusif irréversible des particules vers l'extérieur du nuage.

Les particules qui « s'échappent » viennent de la couche externe du mouvement toroïdal de recirculation du nuage ; leur départ crée un déficit de particules au niveau de son axe vertical de symétrie (fig. 4). Le nuage initialement sphérique évolue donc lentement vers un tore.

Le tore continue de perdre des particules et son rapport d'aspect (rapport de sa dimension horizontale sur sa dimension verticale) augmente. Au-delà d'un rapport d'aspect critique, la topologie de l'écoulement change brutalement : le fluide externe passe alors au centre de l'anneau formé par le nuage au lieu de le contourner (fig. 4). À cet instant précis, le tore se fragmente en plusieurs gouttelettes. Chaque gouttelette forme un tore plus petit qui se déstabilise à son tour, formant ainsi une cascade de gouttelettes de particules (fig. 5).

Cette déstabilisation nous donne l'occasion de revenir sur la notion de rétroaction entre microstructure et écoulement. Juste avant la déstabilisation, la distribution spatiale des particules est telle que l'écoulement du fluide externe contourne le nuage de particules : le tore est stable (fig. 4). Au-delà du rapport d'aspect critique, *i.e.* pour une



**4. Simulation numérique de l'écoulement (dans le référentiel du nuage) généré par un nuage comportant initialement 3000 particules.** Le nuage, initialement sphérique ( $t^* = 0$ ), évolue progressivement vers un tore ( $t^* = 300$ ). Lorsque le fluide externe passe au centre du nuage ( $t^* > 600$ ), il y a déstabilisation en deux gouttelettes similaires au nuage initial. Les inserts représentent les vues de dessus correspondantes. Le temps est adimensionné par le temps mis par le nuage pour parcourir son rayon :  $t^* = t(R/V_n)$ , où  $R$  et  $V_n$  sont respectivement le rayon et la vitesse de sédimentation du nuage à  $t^* = 0$ .

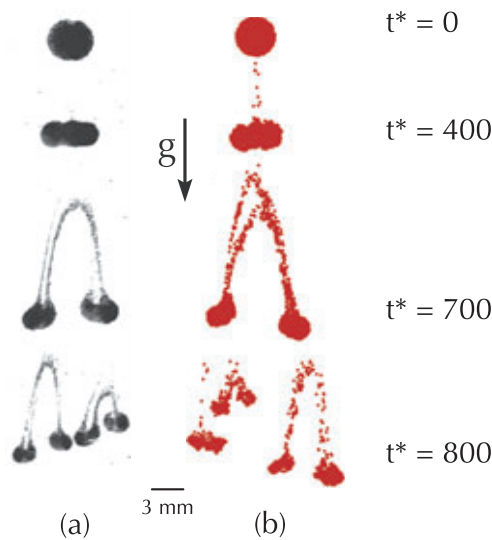
microstructure légèrement différente, le fluide externe passe au centre de l'anneau formé par les particules et le sens de recirculation est alors nécessairement inversé. Ce changement topologique de l'écoulement rend le tore instable : il se brise en gouttelettes, et la distribution spatiale des particules est ainsi totalement modifiée.

## Conclusion

Malgré sa simplicité conceptuelle, la sédimentation d'un nuage de particules dans un fluide visqueux présente une grande richesse de comportements. Dès que le nombre de particules est supérieur à deux, le système devient chaotique. Les trajectoires des particules sont tortueuses et extrêmement sensibles aux conditions initiales. On se retrouve dans la situation du problème à trois corps. La sédimentation donne une occasion quasiment unique d'étudier expérimentalement ce problème, considéré comme l'un des plus difficiles des mathématiques. Pour approfondir ce point, le lecteur peut se reporter à la référence [3].

Pour un nombre plus élevé de particules, l'évolution est plus complexe. Le « nuage de particules » évolue d'abord vers un tore, qui se déstabilise ensuite en gouttelettes plus petites. Les équations qui gouvernent le mouvement des particules sont linéaires et donc réversibles en temps. On observe pourtant un certain nombre de phénomènes irréversibles comme la perte de particules, qui sont déterminants dans l'évolution subséquente du nuage. Un modèle numérique très simple, basé sur une approximation de particules ponctuelles est suffisant pour capturer l'évolution du nuage jusque dans ses détails (fig. 5). Cette étude montre à quel point les interactions hydrodynamiques dominent la dynamique de ces systèmes.

Un autre phénomène saisissant est le mouvement général de recirculation toroïdale observé par les particules. Cette dynamique collective,



qui naît de la lente décroissance des interactions hydrodynamiques, peut paraître assez singulière. Elle est en fait d'une importance majeure dans un très grand nombre de systèmes moins académiques. On observe, par exemple, des « tourbillons » dans les suspensions de particules sphériques [6] ; des « amas », qui s'organisent ensuite en colonnes, caractérisent la sédimentation des suspensions de fibres [7]. Ces structures, qui naissent des effets collectifs et qui se développent en général sur des échelles bien supérieures à la taille typique des particules, ont une influence profonde sur la dynamique de ces systèmes. Il est donc particulièrement important de les étudier. ■

(1) Le problème à N-corps consiste à prédire la dynamique d'un grand nombre de corps ou particules (atomes, électrons...), qui interagissent *via* des interactions souvent fortes et à longue portée. En physique classique, on le rencontre en astronomie (étude des trajectoires de N corps célestes en interaction gravitationnelle). On le rencontre aussi en physique des solides et dans d'autres systèmes quantiques.

(2) Cette approximation est équivalente à celle effectuée en astronomie : remplacer deux solides à répartition sphérique de masse par deux masses ponctuelles coïncidant avec leurs centres respectifs.

## 5. Images successives de la chute d'un nuage de particules tombant dans un liquide visqueux.

a) Expérience de laboratoire réalisée à l'aide de particules de verre de diamètre 100  $\mu\text{m}$  dans une cuve remplie d'huile silicone 1000 fois plus visqueuse que l'eau. b) Simulation numérique [5]. Des films sont en visualisation et téléchargement libre sur le lien de la référence [1].

## Références

- 1 • <http://justi.polytech.univ-mrs.fr/~metzger/CloudSedimentation.html>
- 2 • É. Guyon, J.P. Hulin et L. Petit, *Hydrodynamique physique, Savoirs Actuels*, EDP Sciences/CNRS Éditions (1982).
- 3 • I.M. Jánosi, T. Tél, D.E. Wolf, J.A.C. Gallas, "Chaotic particle dynamics in viscous flows: The three-particle Stokeslet problem", *Phys. Rev. E* **56** (1997) 2858–2868.
- 4 • J.S. Hadamard, « Mouvement permanent lent d'une sphère liquide et visqueuse dans un liquide visqueux », *C. R. Acad. Sci. (Paris)* **152** (1911) 1735–1738.
- 5 • B. Metzger, M.L. Nicolas et É. Guazzelli, "Falling clouds of particles in viscous fluids", *J. Fluid Mech.*, **580** (2007) 283–301.
- 6 • É. Guazzelli, "Evolution of particle-velocity correlations in sedimentation", *Phys. Fluids*, **13** (2001) 1537–1540.
- 7 • B. Metzger, J. E. Butler et É. Guazzelli, "Experimental investigation of the instability of a sedimenting suspension of fibres", *J. Fluid Mech.*, **575** (2007) 307–332.

# Structure multiéchelles et propriétés des matériaux du pneu

Marc Couty (marc.couty@fr.michelin.com)

Physique des Matériaux et de leurs Transformations, Centre de Technologie Michelin, 63040 Clermont-Ferrand Cedex 09

Derrière l'aspect uniforme des matériaux du pneu, se dévoile à des échelles de quelques nanomètres un univers complexe.

Une vision physico-chimique du procédé de fabrication des mélanges donne un éclairage sur la morphologie de répartitions aléatoires de petits objets fractals dans une matrice de polymère.

On discute du lien entre les propriétés mécaniques mesurées au niveau macroscopique, la structure aux petites échelles des matériaux et le procédé d'obtention de cette structure.

On illustre que le couplage entre expériences réelles et virtuelles *via* la simulation numérique est un atout fort de la démarche scientifique.

Un pneu, c'est rond, c'est noir. Pourtant, si l'on pouvait remonter les étapes de sa fabrication, on réaliserait combien, sous cet aspect uniforme, se cache une nature intérieure beaucoup plus complexe. Chaque pneu, petit ou gros, est composé d'une vingtaine de matériaux spécifiques lui conférant ses propriétés d'élasticité, de longévité, d'adhérence et de résistance à l'usure. Les éléments du squelette du pneu, renforts métalliques ou textiles, sont associés par des matériaux élastomères, fortement déformables, aux propriétés adaptées aux différents fonctionnements thermomécaniques des matériaux du pneu en usage. Homogènes à des échelles supérieures au micron, ces matériaux sont, à plus petite échelle, des composites, faits de coupages de polymères, d'huiles, de charges renforçantes et d'additifs chimiques. Chaque matériau est un assemblage d'une dizaine de matières premières.

Pour des problèmes d'approvisionnement en caoutchouc naturel pendant la Seconde Guerre mondiale, la synthèse des polybutadiènes a connu un essor fulgurant. Des avancées majeures en terme d'adhérence des pneumatiques ont été réalisées *via* le développement des copolymères styrène-butadiène, polymères dont la température de transition vitreuse est ajustable par le taux de styrène dans la chaîne.

Ces gains n'auraient pu être valorisés dans l'industrie du pneu sans un renforcement des propriétés mécaniques de ces polymères par l'insertion d'agglomérats de particules minérales, appelés « charges ». L'apport du renforcement des polymères par les charges que sont le noir de carbone et la silice est double : le matériau chargé possède un module élastique typiquement 2 à 5 fois plus élevé que le polymère seul, et la contrainte à rupture d'un matériau chargé est multipliée par un facteur supérieur à 10. La contrepartie de ce renforcement est une augmentation des pertes hystérétiques dans le matériau lors de la déformation induite par le roulage du pneu, qui se traduit par une résistance à l'avancement. Le renforcement par la silice n'est effectif qu'en utilisant des polymères fonctionnels, ou des agents de couplage qui se lient par une extrémité à la charge et par l'autre au polymère.

Dans cet article, nous allons détailler les relations entre propriétés macroscopiques et structure microscopique du matériau, en intégrant l'interaction entre matières premières et procédé et l'apport de la simulation numérique.

## Procédé d'obtention et processus physico-chimiques

Le processus de fabrication des gommages peut paraître des plus rudimentaires : les polymères en morceaux et les charges sous forme de granulés de taille millimétrique sont introduits dans un mélangeur et malaxés, typiquement pendant une durée de 2 à 5 minutes. Le fait de cisailer des polymères très visqueux – la masse molaire moyenne d'un polymère de synthèse variant typiquement entre 50 000 et 150 000 g/mol – engendre une production de chaleur importante et donc une élévation de température, dépendant des conditions d'échange entre le mélangeur et son milieu extérieur. Un mélangeur industriel de 300 kg fonctionne en condition quasi adiabatique, et sa température interne atteint 160 à 170°C en quelques minutes. Associant température élevée et cisaillement mécanique, le mélangeur est en fait un réacteur chimique, et un examen détaillé des processus physico-chimiques mis en jeu révèle toute la complexité du procédé de synthèse des matériaux.

- 1• Fragmentation des agglomérats de charges : les charges introduites dans le mélangeur sont sous la forme d'agglomérats d'objets élémentaires insécables, appelés « agrégats », dont on détaillera la structure ultérieurement. L'action première du mélangeur consiste à fragmenter les objets macroscopiques dans le but d'obtenir des agrégats individualisés en imposant un fort cisaillement de la matière. Un but second est de disperser et d'homogénéiser ces agrégats dans le polymère.
- 2• Fragmentation des chaînes de polymères : à haute température et sous forte extension lors des cisaillements, les chaînes de polymères sont susceptibles de se rompre. Cette fragmentation dépend essentiellement de la nature chimique de la chaîne de polymère. Dans le

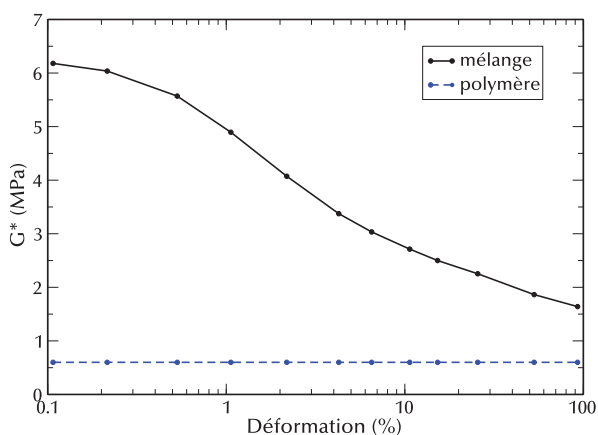
cas de polymères de synthèse, on pourra introduire des fonctions le long de la chaîne en quantité contrôlée et avec une chimie spécifique, permettant d'imposer la fragmentation à des températures variables.

3• Greffage sur la surface accessible des charges : plusieurs espèces sont aptes à se greffer sur les charges au cours du mélange. La chimie du « pied » des agents de couplage ou de la fonctionnalité d'un polymère fonctionnel a été spécifiquement conçue pour former un ancrage sur la charge. Dans le cas où la fragmentation du polymère est aussi un processus important, en particulier à haute température, les fragments peuvent former des liaisons avec la surface des charges. L'efficacité du greffage dépend fortement de l'accessibilité de la surface et des sites actifs, en particulier les surfaces vierges exposées suite à un événement de fragmentation des agglomérats.

La quantité de polymère greffé est mesurable, en réalisant une extraction du polymère non greffé par un bon solvant et une simple pesée après séchage. Cette quantification globale de polymère lié, dénommée *Bound Rubber* (BR) et exprimée en fraction de la quantité de polymère constitutif, varie fortement en fonction des matières premières utilisées et du temps de mélange.

## Les propriétés physiques et mécaniques des mélanges

Une des propriétés mécaniques remarquable des polymères renforcés est l'effet Payne, caractérisé par une évolution de la rigidité du matériau avec l'amplitude de la déformation appliquée (fig. 1). On appelle non-linéarité (NL) de rigidité, la différence entre les modules élastiques à basse et grande déformation,  $NL = G^*(0,1\%) - G^*(100\%)$ , mesurés dans un essai de cisaillement simple à haute température. Le module  $G^*$  relie la contrainte  $\sigma$  à la déformation de cisaillement sinusoidale  $\gamma$  appliquée via l'expression  $\sigma = G^* e^{i\delta} \gamma$  avec  $\gamma = \gamma_0 e^{i\omega t}$ . L'effet Payne se traduit par une dissipation d'énergie d'origine viscoélastique liée à l'angle de déphasage  $\delta$  dans l'expression ci-dessus. Si la non-linéarité de rigidité n'est pas directement liée à une performance du pneumatique, la dissipation d'énergie dans les mélanges impacte fortement la résistance au roulement liée au pneu. Cette résistance représente 20% de la



**1. Module d'élasticité d'un mélange à base de noir de carbone N234 et du polymère constitutif en fonction de la déformation appliquée à l'éprouvette.** Caractérisation réalisée en cisaillement simple à 60°C à 10 Hz. On remarquera l'absence d'effet Payne dans le polymère pur.

consommation de carburant d'un véhicule de tourisme.

L'origine microscopique de la non-linéarité, présente dans les mélanges pour tout type de charge renforçante, est un sujet de débat dans la communauté scientifique [1]. Parmi les mécanismes invoqués, on citera la rupture d'un réseau d'agrégats formé par floculation après mélange, la désorption/adsorption de chaînes de polymères sur les agrégats, ou la fusion d'une zone vitreuse de polymère à l'interface polymère/charge sous l'effet de la sollicitation mécanique. Dans le cas du noir de carbone, la mesure de la résistivité  $\rho$  d'un mélange a été largement utilisée comme caractéristique « microscopique » de la structure des matériaux. La conduction électrique se fait entre les agrégats conducteurs d'électricité par effet tunnel et sonde ainsi les courtes distances entre les charges. Des travaux intensifs de nature « relations structure-propriétés » ont permis d'établir des corrélations (fig. 2) entre ces trois grandeurs caractéristiques : NL, BR et  $\rho$ . La corrélation entre NL et  $\rho$  est interprétée par une origine commune de ces deux propriétés, toutes deux reliées à l'existence de courtes distances entre les charges ; la corrélation entre BR et  $\rho$  comme une relation de cause à effet :

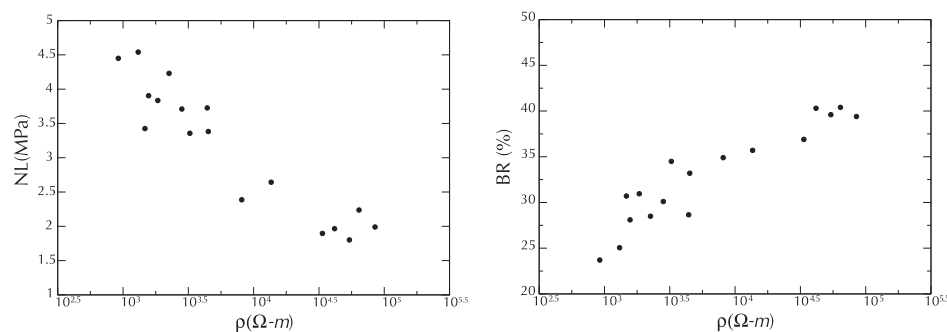
plus la quantité de polymère greffé est grande et plus les distances entre les charges sont grandes et le mélange résistif.

Comme en témoignent les graphes de la figure 2, les tendances restent qualitatives et de nombreux travaux sont nécessaires pour passer à une description quantitative du rôle du polymère greffé sur l'établissement des distances entre les agrégats et le lien avec l'effet Payne.

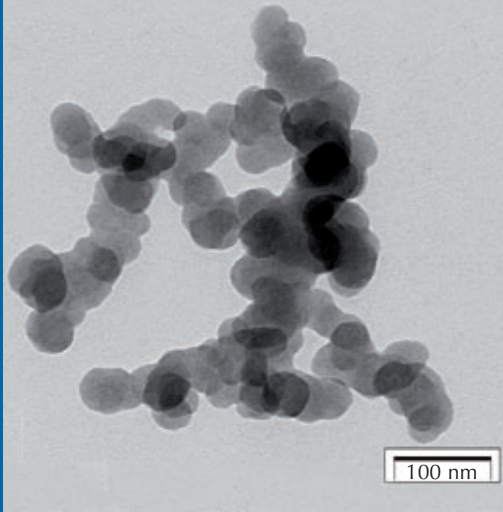
## Les agrégats de charge

On a évoqué précédemment le processus de fragmentation des agglomérats dans le mélangeur : ce processus doit être le plus abouti possible pour tirer le meilleur parti de la matière première en dissociant un maximum d'agglomérats en agrégats élémentaires. La caractérisation de ces agrégats élémentaires supposés insécables est réalisée en couplant plusieurs techniques expérimentales. En particulier l'imagerie directe par microscopie électronique en transmission de haute résolution permet de déterminer les caractéristiques fondamentales des agrégats (fig. 3) : ceux-ci sont composés de particules élémentaires, sphériques en première approximation, ayant une distribution de rayon s'étalant entre 10 et 30 nm

>>>



**2. Corrélation entre amplitude de la non-linéarité et résistivité (a), et entre Bound Rubber et résistivité (b) de divers mélanges à base de différents polymères (naturels ou synthétiques) avec un noir de carbone N234 dans diverses conditions de mélangeage.**



**3. Image de microscopie électronique en transmission d'un agrégat de noir de carbone** (1 pixel = 0.5 nm). Les agglomérats sont traités dans l'eau avec une sonde à ultrasons qui permet la fragmentation totale. Une goutte de liquide est déposée sur une grille de microscopie et le solvant est évaporé. L'image étant une projection 2D d'un objet tridimensionnel, 3 niveaux de gris se distinguent : gris clair, gris foncé et noir, quand le faisceau électronique traverse respectivement 1, 2 ou plus de 3 particules élémentaires.

>>>

pour un noir de carbone. Lors de la synthèse des charges, des particules élémentaires en croissance vont entrer en collision et fusionner de manière irréversible selon différents processus : processus balistique dans le cas des milieux très dilués qui est celui des phases gazeuses à très hautes températures, processus brownien dans le cas des milieux concentrés ou en phase liquide. Ces différents types de processus conduisent à la formation d'objets fractals, plus ou moins dendritiques ou compacts [2]. Il existe une distribution du nombre de particules par agrégats allant de 2 à plus de 100 particules élémentaires, leur sphère circonscrite ayant un rayon pouvant atteindre 200 à 300 nm.

### Les deux phases du procédé de fabrication

Pour revenir aux mécanismes physiques mis en jeu dans le procédé de synthèse des matériaux, on va considérer qu'il existe deux phases bien distinctes qui permettent de faire des hypothèses simplificatrices utiles pour la simulation numérique.

- 1• Une première phase, pendant laquelle l'action du rotor du mélangeur entraîne une décorrélation rapide de la position des charges dans le mélange. Cette phase peut être assimilée à l'obtention d'une répartition aléatoire d'agrégats élémentaires, si le processus de fragmentation a atteint son stade ultime, ou plus généralement d'objets présents au temps  $t$  écoulé depuis le début du processus de fragmentation.
- 2• Une seconde phase, ayant lieu au moment de l'arrêt du mélangeur, en général à haute température, pendant laquelle les charges vont évoluer sous forme d'une suspension non brownienne sous l'effet des forces interparticulaires et conduire à une auto-organisation à l'échelle mésoscopique. La présence de forces (effectives si induites par le polymère environnant ou directes dans le cas de forces électrostatiques, par exemple) attractives entre les particules élémentaires des charges, peut conduire à des contacts entre agrégats : on parle alors de floculation des charges.

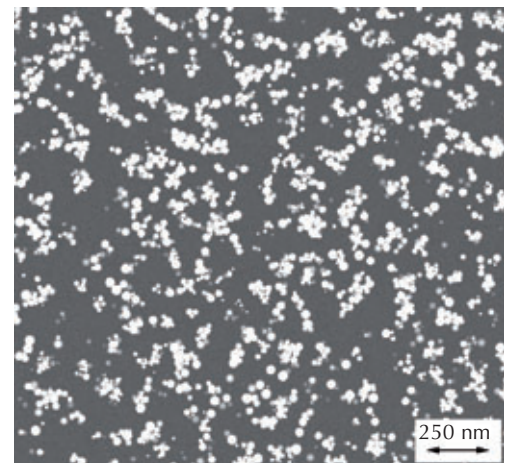
**4. Image de microscopie électronique à balayage reconstruite par simulation** en donnant aux charges le contraste d'objets de silice dans une matrice de polymère diénique (1 pixel = 2,1 nm). La fraction volumique de charge est de 18%. Chaque particule élémentaire d'un agrégat est représentée par un disque blanc dans le plan de coupe et dans un niveau de gris croissant avec la profondeur jusqu'à une distance de 10 nm de la coupe. On remarquera que l'image de cette coupe de matériau contraste avec la quasi-percolation 3D de la structure, obtenue via un nombre de contacts faible par rapport au nombre de particules dans le système.

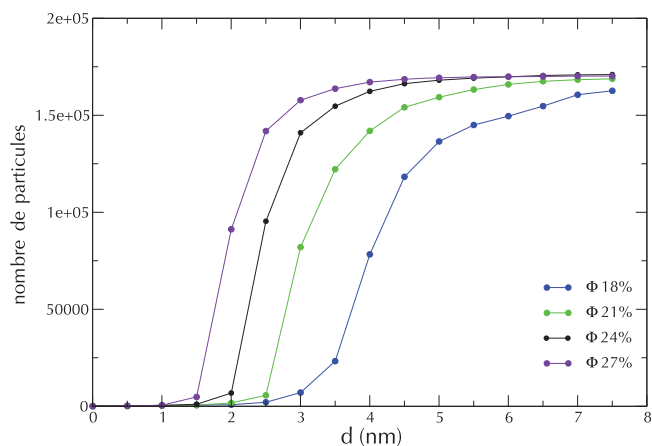
Toute observation à la fin de la première étape reste un challenge pour l'expérimentateur. En revanche, il faut garder à l'esprit que le mélange final sur lequel on peut réaliser des mesures est la résultante de ces deux processus faisant appel à des physiques très différentes.

### Analyse des répartitions aléatoires par simulation

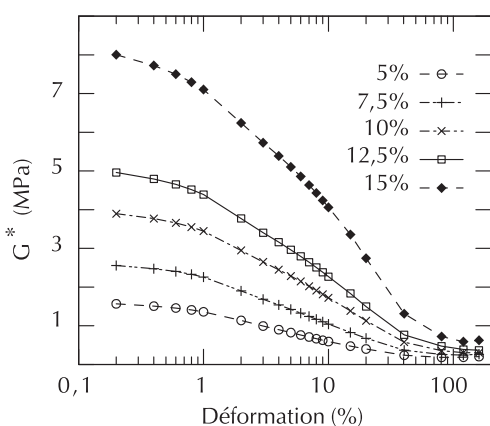
Pour être représentatif d'un échantillon macroscopiquement homogène, il est nécessaire de travailler sur des échantillons de 1 à 2 microns de côté. La fraction volumique cible étant comprise entre 15 et 25% de charges, cela nécessite de construire quelques milliers d'agrégats à partir de quelques centaines de milliers de particules élémentaires respectant la dimension fractale du processus d'agrégation et les distributions en rayon de particules et en nombre de particules décrites ci-dessus. Cette tâche réalisée, on utilise un algorithme élémentaire de répartition aléatoire des agrégats dans une boîte cubique. Le succès de la méthode tient au fait que les fractions volumiques cibles sont largement inférieures à la compacité maximale des agrégats, estimée entre 35 et 40%. On s'est intéressé dans un premier temps à analyser par simulation les dispersions aléatoires d'agrégats, en se focalisant sur le calcul des courtes distances entre les agrégats dans le cas d'une fragmentation totale.

Une vision de la topologie du milieu est donnée en calculant le nombre d'objets distincts et le nombre de particules dans le plus gros objet en fonction d'une distance caractéristique  $d$ . Pour ce faire, on se donne la règle suivante : deux agrégats appartiennent au même objet si les particules les plus proches sont séparées par une distance inférieure à  $d$ , qui peut être assimilée à la taille d'un pixel d'une image de microscopie (fig. 4). Le nombre de particules dans le plus gros objet présente une transition très abrupte pour une distance de quelques nanomètres, à laquelle on atteint un seuil de





**5. Nombre de particules dans le plus gros objet en fonction d'une distance de distinction  $d$**  : deux agrégats appartiennent au même objet si la distance minimale entre les particules constitutives est inférieure à  $d$ . Le système est constitué de 7200 agrégats élémentaires, construits avec 170 000 particules environ. Une fraction volumique de 18% représente un cube de matière de 2  $\mu\text{m}$  d'arête.



**6. Module d'élasticité de mélanges obtenus par simulation numérique pour différentes fractions volumiques de charge.** Le modèle est construit avec les seuls éléments suivants : un potentiel quadratique assimilable à un ressort est imposé entre les particules d'agrégats différents les plus proches dans l'état initial ; cette connectique, traduisant l'interaction *via* le polymère confiné reste inchangée durant la déformation. Un potentiel à courte portée de type Lennard-Jones entre toutes les particules est ajouté pour interdire l'interpénétration entre particules rigides lors de la déformation.

percolation des agrégats de charges qui forment alors un amas couvrant tout l'échantillon (fig. 5). En augmentant la fraction volumique de charge de 18 à 27%, on obtient la transition percolante vers des distances de distinction de plus en plus faibles. La morphologie dendritique des agrégats et la répartition aléatoire sont à l'origine des distances de quelques nanomètres entre eux-ci.

Les propriétés macroscopiques des mélanges sont la résultante d'une cascade d'effets physiques à différentes échelles. Ainsi, la répartition aléatoire des charges, prise comme état initial de l'auto-organisation avant auto-assemblage sous l'effet des forces interparticulaires, est caractérisée par des distances de l'ordre de quelques nanomètres. Cette distance est du même ordre de grandeur que le rayon de giration d'une chaîne de polymère dans un fondu libre. Le polymère dans le mélange se trouve donc confiné entre les surfaces des charges et son interaction avec les sites surfaciques modifie ses caractéristiques morphologiques et sa dynamique par rapport au fondu libre [3]. Une chaîne de polymère a la faculté de pouvoir interagir avec deux particules de charge éloignées de quelques nanomètres. Il a été montré par simulation numérique que ce phénomène local engendrait des effets de réseaux macroscopiques à l'origine de l'existence d'un pic de contrainte en début d'écoulement [4].

On a aussi cherché à analyser par simulation numérique la contribution à l'effet Payne des deux spécificités majeures : la morphologie des agrégats et l'interaction spécifique entre les particules séparées par quelques nanomètres *via* des chaînes de polymère. Dans ce dessein, on a étendu un modèle développé précédemment pour des particules sphériques [5] aux agrégats supposés indéformables et mobiles, sous l'effet des différentes forces, par translation du centre de masse et rotation dans un milieu de viscosité constante. Les résultats de simulation (fig. 6) montrent une forte non-linéarité du module. L'interaction spécifique entre les particules proches est un élément clé de l'effet Payne et son origine physique aujourd'hui controversée reste à établir.

## Conclusion et perspectives

La simulation numérique de répartitions aléatoires d'agrégats de charge dans une matrice de polymère a permis de mettre en évidence des valeurs de distances interagrégats de l'ordre de quelques nanomètres. En postulant l'existence d'une interaction spécifique à courte distance entre polymère et charge, la simulation numérique des propriétés mécaniques retrouve l'effet Payne caractéristique de ces matériaux. Cette interaction à l'échelle microscopique a des répercussions à l'échelle macroscopique sur les propriétés mécaniques et, par conséquent, sur la performance des pneus et la consommation de carburant des véhicules. Élucider son origine physique est un point fondamental. L'objectif final de la démarche est de construire une simulation numérique permettant de prédire quantitativement les propriétés macroscopiques et permettre l'optimisation du couple matières premières – procédé pour accroître la puissance de l'innovation matériau. ■

### Remerciements

Cet article est extrait d'une présentation au minicolloque « Particules colloïdales et nano-objets : auto-organisation et inclusions dans les fluides complexes » des Journées de la Matière Condensée 2008. Je tiens à remercier les organisateurs pour l'invitation à présenter ces travaux.

## Références

- 1 • T.A. Witten, M. Rubinstein et R. H. Colby, "Reinforcement of Rubber by Fractal Aggregates", *J. Phys. II* **3** (1993) 367-383 ; M. Klüppel, "The Role of Disorder in Filler Reinforcement of Elastomers on Various Length Scales", *Adv. Polym. Sci.* **161** (2003) 1-86 ; S. Merabia, P. Sotta et D. Long, "A Microscopic Model for the Reinforcement and the Nonlinear Behavior of Filled Elastomers and Thermoplastic Elastomers (Payne and Mullins Effects)", *Macromolecules* **41** (2008) 8252-8266.
- 2 • *Aggregation and Fractal Aggregates*, R. Jullien et R. Botet, World Scientific (1987).
- 3 • K. Smith, M. Vladkov et J.L. Barrat, "Polymer Melt near a Solid Surface: A Molecular Dynamics Study of Chain Conformations and Desorption Dynamics", *Macromolecules* **38** (2005) 571-580 ; M. Vladkov et J.L. Barrat, "Local Dynamics and Primitive Path Analysis for a Model Polymer Melt near a Surface", *Macromolecules* **40** (2007) 3797-3804.
- 4 • J.D. Thomin, P. Kębliński et S.K. Kumar, "Network Effects on the Nonlinear Rheology of Polymer Nanocomposites", *Macromolecules* **41** (2008) 5988-5991.
- 5 • D. Long et P. Sotta, "Nonlinear and Plastic Behavior of Soft Thermoplastic and Filled Elastomers studied by Dissipative Particle Dynamics", *Macromolecules* **39** (2006) 6282-6297.

# Le télescope Canada-France-Hawaï sur la piste de l'énergie noire

Vanina Ruhlmann-Kleider ([vanina.ruhlmann-kleider@cea.fr](mailto:vanina.ruhlmann-kleider@cea.fr))  
Service de Physique des Particules de l'Irfu au CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex



1. Vue panoramique du sommet du Mauna Kéa à Hawaï montrant le CFHT au centre, coupole ouverte, et les télescopes IRTF (Infrared Telescope Facility), Keck I et II à gauche.

## Du Big Bang à l'expansion accélérée de l'Univers

Comme pour le reste de la physique, le XX<sup>e</sup> siècle a fait faire un pas de géant à la cosmologie. Notre vision des lois qui gouvernent l'Univers s'en est trouvée considérablement modifiée. Le début du siècle a vu les mesures de distance s'affiner et les astronomes réaliser que certains objets lumineux sont situés en dehors de notre propre galaxie. En 1929, Edwin Hubble étudie les spectres des galaxies proches de la nôtre et remarque qu'ils sont décalés vers les plus grandes longueurs d'onde (on parle de « décalage spectral vers le rouge »), preuve que les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à la distance qui les sépare. L'idée d'un Univers en expansion émerge et trouve naturellement sa place dans le modèle dit du Big Bang, qui fait naître l'Univers d'une singularité initiale, que l'on peut voir comme l'explosion d'un grain de matière dense et chaud. Associé à la relativité générale d'Einstein et à la physique nucléaire, le modèle permet de décrire les grandes étapes de l'évolution ultérieure de l'Univers.

Après l'explosion initiale, celui-ci se dilate régulièrement et se refroidit, rendant possible la synthèse des premiers noyaux atomiques, hydrogène et hélium, qui se fait essentiellement dans les trois premières minutes après le Big Bang. S'ensuit une période d'équilibre entre matière et rayonnement, durant laquelle le rayonnement détruit les édifices atomiques plus complexes aussitôt qu'ils sont créés par la matière. Après 380 000 ans environ, l'Univers s'est suffisamment refroidi et la formation des atomes n'est plus contrariée par le rayonnement. Dès lors, matière et rayonnement suivent des évolutions différentes. Ainsi, le rayonnement, libéré, peut traverser l'Univers. L'existence d'un tel rayonnement, dit

« fossile » est l'une des prédictions fortes du modèle du Big Bang. Elle recevra une confirmation éclatante lors de la découverte fortuite du fond diffus cosmologique en 1964 par A. Penzias et R. Wilson, lors de la mise au point d'antennes de radioastronomie de haute sensibilité. Quelques années plus tard, une autre prédiction du modèle sera également couronnée de succès : les abondances prédites pour les éléments légers produits lors de la nucléosynthèse primordiale évoquée plus haut sont en accord avec les observations. À la fin des années 70, le modèle du Big Bang s'impose donc comme le cadre théorique le plus crédible pour décrire l'évolution de l'Univers.

Loin s'en faut, pourtant, que tous les détails soient connus. Ainsi, dans les années 30, les premières mesures de masse des amas de galaxies montrent un désaccord selon que la masse de l'amas est estimée d'après son influence gravitationnelle ou d'après sa luminosité. Depuis les années 70, les observations se diversifient et se multiplient, mais toutes vont dans le même sens. Il est nécessaire de supposer l'existence dans l'Univers d'une matière dite noire, différente de la matière ordinaire et qui ne donne aucun signal électromagnétique. Depuis le début des années 90, les expériences de cosmologie observationnelle, par exemple celles qui étudient le rayonnement fossile, sont capables de mesurer précisément les densités correspondant aux deux types de matière. Leurs réponses sont concordantes : la matière ordinaire ne représente que 16% environ de la densité totale de matière dans l'Univers, la matière noire est cinq fois plus importante.

Le XX<sup>e</sup> siècle s'est achevé sur une autre surprise de taille pour les cosmologistes. À cause de l'attraction universelle, la dilatation de l'Univers devrait se ralentir. Or, à la fin des années 90, les premières observations de supernovæ de type Ia

Les supernovæ, explosions d'étoiles en fin de vie, sont parmi les phénomènes les plus lumineux de l'Univers. Certaines de ces explosions, dites de « type Ia », ont même une luminosité quasi reproductible. Mesurer leur flux revient donc à mesurer leur distance. Or, les mesures faites sur les supernovæ Ia lointaines s'accordent toutes : elles sont moins lumineuses, et donc plus lointaines, qu'attendu.

Ainsi, l'expansion de l'Univers, au lieu de ralentir, s'accélère. Retour sur l'une des plus grandes surprises de la cosmologie moderne, confirmée sans ambiguïté par le récent relevé de supernovæ lointaines du télescope Canada-France-Hawaï, le « Supernova Legacy Survey ».

**Image de supernova** prise au télescope Canada-France-Hawaï par la caméra Megacam, dans une région du ciel différente de celles observées par SNLS. Il s'agit de IC443, résidu de supernova de type gravitationnel, situé dans notre galaxie dans la constellation des Gémeaux.



lointaines – situées à plusieurs milliards d'années-lumière – révèlent que le flux apparent de ces objets est plus faible que ce que l'on attendrait pour un univers composé exclusivement de matière (ordinaire ou noire). Il semble que la distance parcourue par les photons émis par les supernovæ soit plus grande que prévu. Il faut alors admettre l'existence dans l'Univers d'une composante énergétique qui ne soit ni matière ni rayonnement, mais qui, à l'inverse de l'attraction universelle, accélère l'expansion. D'un point de vue théorique, une telle composante peut se déduire des équations d'Einstein de la Relativité Générale à condition d'y rajouter une simple constante, appelée constante cosmologique. Mais d'autres descriptions théoriques lui donnent un contenu plus fondamental. Dans l'état actuel des observations, il n'est pas possible de trancher et cette composante, inscrite depuis au bilan énergétique de l'Univers, a reçu le nom d'« énergie noire ». Sa nature demeure donc inconnue. Par contre, sa densité, déduite des mesures cosmologiques, domine l'Univers actuel, puisqu'elle représente environ trois quarts du contenu énergétique de l'Univers, contre un quart pour la matière. Dans ces conditions, l'expansion de l'Univers au lieu de ralentir, s'accélère.

### Le relevé de supernovæ du CFHT

Ce résultat était si inattendu que de nouveaux projets d'étude de supernovæ lointaines ont été lancés. Le Supernova Legacy Survey (SNLS) appartient à cette seconde génération d'expériences. Il en est également le fleuron. SNLS utilise le télescope Canada-France-Hawaï de 3,6 m de diamètre situé sur le sommet du Mauna Kéa à Hawaï (fig. 1). Programmé pour cinq ans, de 2003 à 2008, le relevé affichait l'ambition de détecter et mesurer précisément plusieurs centaines de supernovæ de type Ia (SN Ia), à comparer à une cinquantaine d'objets étudiés par les expériences antérieures.

Les SN Ia (voir encadré) sont des phénomènes rares, typiquement une explosion par siècle pour une galaxie comme la nôtre. L'efficacité de détection est donc le premier facteur important pour un relevé de supernovæ. Pour ce faire, SNLS bénéficie de la caméra à grand champ Megacam, caméra CCD de 340 millions de pixels. Instrument unique au monde, son champ de 1 degré carré (l'équivalent de quatre fois la pleine lune) permet d'observer en un seul pointé de grandes portions du ciel, susceptibles de contenir simultanément jusqu'à une dizaine de supernovæ. Des poses longues permettent de détecter des SN Ia suffisamment lointaines pour tester des distances de plusieurs milliards d'années-lumière. Afin d'assurer la permanence des détections tout au long de l'année, les observations sont faites sur quatre champs de 1 degré carré chacun, chaque champ étant observable depuis Hawaï sur une durée de 7 mois environ. SNLS suit donc deux champs simultanément à toute époque de l'année. Les supernovæ y sont détectées en recherchant une augmentation de flux par rapport à celui des galaxies qui les hébergent, comme sur l'exemple de la figure 2.

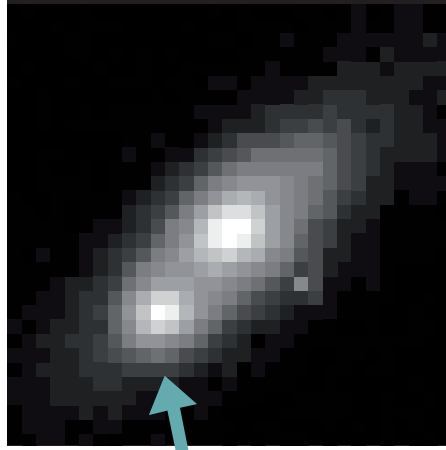
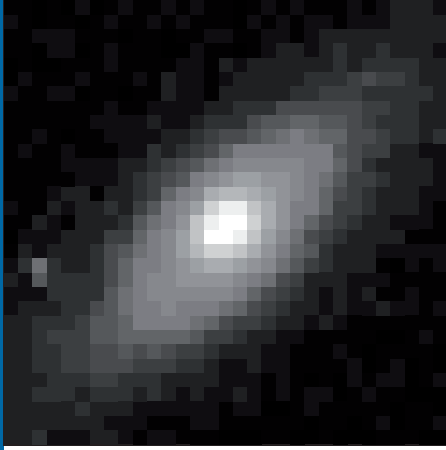
Les SN Ia sont des phénomènes très lumineux mais transitoires. L'émission de lumière qui les accompagne présente un profil temporel typique, appelé courbe de lumière, croissant sur une vingtaine de jours après l'explosion, pour décroître et finir par s'évanouir au bout d'une cinquantaine de jours (fig. 3). Il est important de mesurer précisément la courbe de lumière de tous les candidats supernovæ détectés. Pour ce faire, SNLS bénéficie d'une stratégie de suivi optimale. Rester en permanence sur les mêmes champs tant que ceux-ci sont visibles permet de suivre dans le temps tous les candidats détectés. Les mesures de flux sont réalisées régulièrement tous les trois à quatre jours, en dehors des périodes de pleine lune. Quatre bandes de fréquence sont utilisées, de l'optique à l'infrarouge proche pour couvrir toute la gamme de longueurs d'onde du spectre des supernovæ (fig. 3). Les courbes de lumière obtenues sont très bien échantillonnées en temps, ce qui constitue une amélioration notable par rapport aux programmes antérieurs, qui

>>>

## Les supernovæ de type Ia : des chandelles standard

Les supernovæ de type Ia (SN Ia) observées jusqu'à ce jour ont des propriétés spectrales et lumineuses très homogènes. Le mécanisme imaginé pour rendre compte de ce fait est le suivant. Les SN Ia seraient dues à l'explosion thermonucléaire d'une naine blanche, étoile en fin de vie, accréant la matière d'une étoile compagne géante. La naine blanche gagne en masse jusqu'à approcher la limite dite de Chandrasekhar. La température interne de l'étoile s'est alors suffisamment élevée pour que se déclenche une combustion nucléaire explosive : les éléments du cœur de l'étoile, essentiellement du carbone et de l'oxygène, brûlent en donnant du  $^{56}\text{Ni}$ , et cette combustion dégage une énergie telle que l'étoile finit par exploser. C'est la désintégration ultérieure du  $^{56}\text{Ni}$  en  $^{56}\text{Co}$  puis en  $^{56}\text{Fe}$  qui définit la luminosité de la supernova et rend l'objet aussi brillant que quelques milliards de soleils, l'équivalent d'une petite galaxie. Comme la masse de l'étoile, et donc la quantité de nickel produite, est pratiquement toujours la même lors de l'explosion, les SN Ia présentent des luminosités similaires.

De ce fait, on peut les utiliser comme des « chandelles standard » pour mesurer des distances, car leur flux apparent (i.e. mesuré) ne dépend que de la distance parcourue par les photons entre l'instant de l'explosion et celui de l'observation.



2. À gauche : image (grossie) d'une galaxie vue par SNLS avant explosion de la supernova 04D1dc ; à droite : image de cette même galaxie après explosion. L'accroissement de flux apporté par la supernova (25% par rapport au flux galactique sous-jacent) est clairement visible au bord de la galaxie (indiqué par une flèche en bas à gauche sur le cliché de droite).

>>>

suivaient les supernovæ à quelques semaines d'intervalle et dans deux bandes de fréquence seulement.

Par ailleurs, dès sa détection par SNLS, toute supernova potentielle proche de son maximum de lumière est observée par des spectrographes sur des télescopes de 8 à 10 m de diamètre afin de déterminer précisément son décalage spectral et son type, thermonucléaire ou gravitationnel. Le temps d'observation alloué à SNLS permet de réaliser ces mesures sur une large fraction (environ 60%) des supernovæ détectées. La plupart des spectres sont mesurés par le Very Large Telescope (VLT) de l'observatoire européen austral au Paranal (Chili). Les autres mesures sont effectuées sur les télescopes Keck à Hawaï et sur les deux télescopes Gemini, l'un à Hawaï et l'autre au Chili. L'examen des spectres, outre la mesure du décalage spectral, permet, par la présence ou l'absence de certaines raies de référence, de déterminer le type des supernovæ. Celles-ci peuvent être dues à une explosion thermonucléaire dans le cas du type Ia ou à un effondrement gravitationnel pour les supernovæ de type Ib, Ic ou II. Les supernovæ gravitationnelles ne sont pas exploitables pour la cosmologie, du fait de leur grande variabilité en luminosité d'un objet à l'autre. Elles constituent un bruit de fond pour la recherche de SN Ia, dont

on s'affranchit grâce aux mesures spectrales. À l'issue du relevé en juin 2008, le nombre de supernovæ de type Ia détectées et suivies par SNLS, et confirmées par la spectroscopie s'élève à environ 500, soit 10 fois plus que le lot accumulé par les expériences antérieures. L'objectif du projet est donc rempli.

## Cosmologie et supernovæ de type Ia

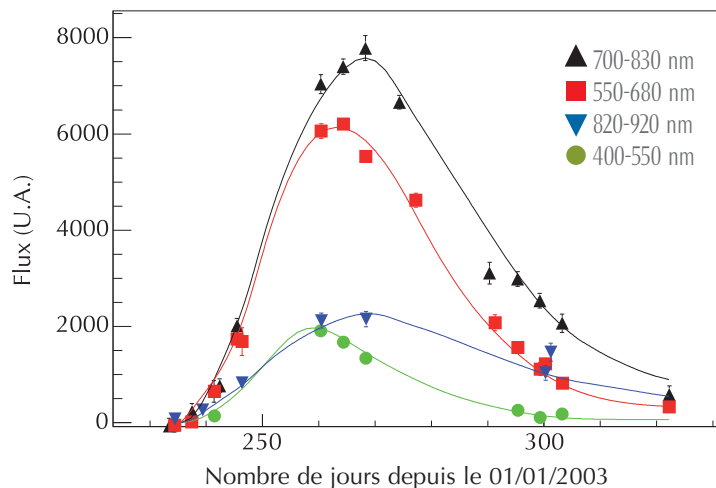
Au-delà de la confirmation du type de supernova, les mesures spectrales permettent également de déterminer l'un des ingrédients clés pour remonter à la cosmologie, à savoir le décalage spectral<sup>1</sup> de chaque supernova, noté  $z$ . En effet, l'expansion de l'Univers affecte les mesures de distance ; une même distance – par exemple celle entre deux galaxies – mesurée à des instants différents donne des valeurs différentes, croissantes au cours du temps. Il en est de même pour la longueur d'onde d'un photon entre le moment de l'émission et celui de son observation : les raies spectrales d'un objet céleste en expansion sont décalées vers les plus grandes longueurs d'onde par rapport aux raies du spectre émis. On peut montrer [1] que ce décalage spectral, d'origine cosmique, est une mesure directe du facteur d'expansion de la taille de l'Univers entre l'instant de l'émission et celui de l'observation, soit  $(1+z)$ . Ainsi, SNLS est sensible à des SN Ia de décalage spectral compris entre 0,2 et 1,2. Ces supernovæ ont donc explosé lorsque l'Univers avait une taille réduite de 20 à 50% par rapport à sa taille actuelle, c'est-à-dire lorsque l'Univers était plus jeune de 2 à 8 milliards d'années environ. Les supernovæ détectées par SNLS viennent donc du passé lointain de l'Univers et leur lumière a franchi des distances considérables – plusieurs milliards d'années-lumière – avant de nous parvenir.

## Références

- 1 • <http://en.wikipedia.org/wiki/Redshift> #Expansion\_of\_space
- 2 • P. Astier et al., *A&A* **447** (2006) 31.
- 3 • A. Conley et al., *AJ* **132** (2006) 1707.
- 4 • M. Sullivan et al., *ApJ* **648** (2006) 868.
- 5 • D. Howell et al., *ApJ* **667** (2007) 37.
- 6 • T.J. Bronder et al., *A&A* **477** (2008) 717.
- 7 • R.S. Ellis et al., *ApJ* **674** (2008) 51.
- 8 • Z. Ivezic et al., astro-ph/0805.2366.
- 9 • « L'expansion de l'Univers, pourquoi elle accélère », *Ciel et Espace* **444** (mai 2007) 26.  
« Énergie sombre, le fantôme qui dilate l'Univers », *Ciel et Espace* **454** (mars 2008) 38.  
« Énergie noire, l'étrange moteur de l'Univers », *La Recherche* **422** (juillet 2008) 31.

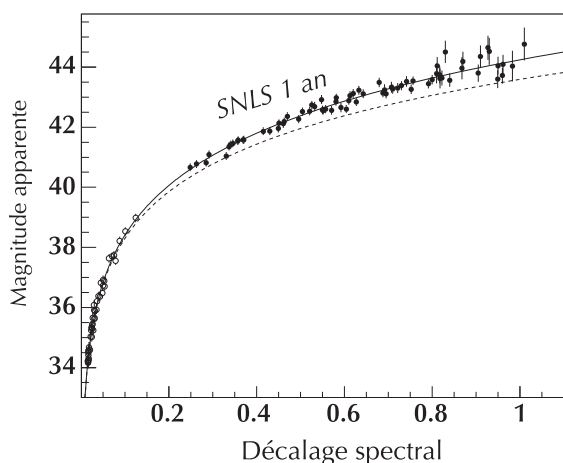
1 - Le décalage spectral  $z$  est défini par :  $z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{émission}}) / \lambda_{\text{émission}}$ . Pour un phénomène observé à un décalage spectral  $z$ , on a la relation :  $1+z = a(t_{\text{obs}}) / a(t_{\text{émission}})$  où  $a(t)$  représente le facteur d'échelle de l'Univers à l'instant  $t$ , qui permet de retrouver la distance d'un objet,  $R(t)$ , connaissant ses coordonnées comobiles  $\chi$  :  $R(t) = a(t)\chi$ . Dans un univers en expansion,  $a(t)$  croît avec le temps.

2 - Il est d'usage en astrophysique d'exprimer les flux lumineux sur une échelle logarithmique inversée, dite échelle des magnitudes. Plus un objet est lumineux, plus faible sera sa magnitude.



3. Courbe de lumière de la supernova 03D4dh mesurée par SNLS. Les mesures sont effectuées dans quatre bandes passantes distinctes. La fréquence des observations permet d'avoir suffisamment de points de mesure pour remonter non seulement à la luminosité au pic, mais aussi à la forme globale de la courbe (temps de montée et de descente).

**4. Magnitude<sup>2</sup> apparente des SN Ia (déduite du flux lumineux au pic et corrigée des effets de dispersion intrinsèque) en fonction de leur décalage spectral.** Les mesures de première année du SNLS (points), associées à des mesures sur des supernovæ proches (cercles), sont comparées aux prédictions pour un univers composé exclusivement de matière (tirets) et pour un univers en expansion accélérée, composé de 74% d'énergie noire et de 26% de matière (trait plein).



Or, sur de telles distances, le parcours des photons dépend significativement de l'évolution que l'Univers a suivie dans le passé. Ainsi, à décalage spectral donné, si l'on considère deux scénarios d'évolution conduisant à l'Univers actuel, l'un correspondant à un univers en expansion constante, l'autre à un univers en expansion accélérée, il faut un temps plus long si l'expansion est accélérée pour réaliser un même facteur d'expansion, i.e. un même décalage spectral. Or, un temps de parcours plus long implique une distance de parcours plus grande pour les photons, et donc un flux détecté plus petit. En effet, du fait de l'homogénéité des luminosités intrinsèques des SN Ia, le flux détecté mesure directement la distance parcourue par les photons depuis l'explosion. Plus la distance parcourue est grande, plus le flux détecté est faible. Mesurer le flux des SN Ia sur une gamme étendue de décalages spectraux doit donc permettre de remonter à l'évolution passée de l'Univers, elle-même déterminée par son contenu en matière et en énergie.

Cette analyse a été entreprise par SNLS à l'issue de la première année d'observations, sur la base de 70 SN Ia confirmées par la spectroscopie, soit autant que le lot accumulé jusqu'alors sur une dizaine d'années par les autres expériences. Les mesures, représentées sur la figure 4, montrent que, à décalage spectral donné, le flux reçu des SN Ia lointains est plus faible que ce que l'on attendrait pour un univers dominé par la matière [2]. Les mesures sont, en revanche, en accord avec ce que l'on attend pour un univers en expansion accélérée, dominé par l'énergie noire. Le résultat de la première génération d'expériences de supernovæ lointains est donc confirmé sans ambiguïté. Mais les mesures réalisées

par SNLS permettent d'aller plus loin et de préciser le contenu énergétique actuel de l'Univers. La matière n'en constitue que 26% (à une incertitude relative près de 16%), les 74% restants étant attribués à l'énergie noire. Les données de SNLS, couplées à celles d'autres observations cosmologiques, permettent aussi, et pour la première fois, de tester l'évolution temporelle de la densité d'énergie noire. Celle-ci se révèle constante dans le temps, à 10% près en incertitude relative.

L'analyse des trois premières années de données de SNLS (250 SN Ia), en cours d'achèvement, conclut dans le même sens, mais avec une précision accrue. La densité de matière est maintenant contrainte avec une incertitude relative de 10%, et la densité d'énergie noire est constante dans le temps, à 6% près en incertitude relative. Affiner la précision de ce dernier test est l'un des objectifs majeurs de la cosmologie observationnelle actuelle, car une densité d'énergie noire constante dans le temps favoriserait une interprétation en termes de constante cosmologique.

### Mieux connaître les supernovæ de type Ia

Même si le mécanisme supposé à l'origine des SN Ia conduit à une homogénéité de leurs propriétés spectrales et lumineuses, les courbes de lumière mesurées et corrigées du décalage spectral montrent une dispersion d'environ 30%. D'une supernova à l'autre, ces courbes sont donc proches, mais ne deviennent superposables qu'après une correction empirique, fonction de deux caractéristiques intrinsèques des SN Ia. Ces caractéristiques sont liées à la durée de l'émission de lumière et au rapport des flux émis dans deux bandes de fréquence

de référence. Ce sont les courbes de lumière corrigées de ces effets de dispersion intrinsèque qui sont utilisées pour les mesures cosmologiques. À l'heure actuelle, la même correction est utilisée quel que soit le décalage spectral, car on suppose que les SN Ia sont les mêmes, qu'elles soient proches (explosions récentes) ou lointaines (explosions anciennes).

Grâce à la statistique élevée et à la qualité des données de SNLS, on peut tester la validité de cette hypothèse en vérifiant si les caractéristiques changent entre SN Ia lointains et proches, ou s'il existe des sous-lots de SN Ia aux caractéristiques différentes. De nombreuses études ont été réalisées en ce sens sur la base des 250 SN Ia collectées sur trois ans ([2] à [7]). Aucun effet significatif n'a été relevé, à l'exception d'une faible différence entre les SN Ia explosant dans les galaxies âgées, qui ne forment plus d'étoiles, et celles explosant dans les galaxies jeunes, actives sur le plan de la formation stellaire [4]. Les SN Ia des galaxies âgées ont en effet des courbes de lumière intrinsèques plus rapides, moins lumineuses et plus rouges que celles qui explosent dans un environnement jeune. Cet effet induit une faible variation des caractéristiques moyennes des SN Ia en fonction du décalage spectral [5], car les proportions de SN Ia dues aux galaxies jeunes et âgées varient avec ce dernier [4]. Cependant, au niveau de précision actuel, cette variation n'a pas d'impact sur les résultats cosmologiques : la modélisation actuelle des effets de dispersion intrinsèque reste donc valide. Les deux dernières années de données de SNLS devraient nous en apprendre un peu plus.

Mais pour aller au-delà, il faudra attendre le démarrage vers 2015 des projets actuellement en cours de construction, dont l'objectif est de détecter des centaines de milliers de supernovæ Ia : il sera alors possible de mieux comprendre les différences entre SN Ia et de contrôler leur impact éventuel sur les résultats cosmologiques [8]. Nul doute que ces projets, combinés aux autres méthodes cosmologiques, comme la mesure des oscillations acoustiques baryoniques, des effets de lentilles gravitationnelles faibles ou le comptage des amas de galaxies, nous feront faire un pas de géant dans la compréhension de ce qui se cache derrière l'énergie noire [9]. ■

# La vie de Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958)

Jean-Claude Boudenot, Thalès, 91767 Palaiseau

Un des plus grands physiciens du XX<sup>e</sup> siècle, découvreur du principe d'exclusion et du neutrino, prix Nobel de physique en 1945, Wolfgang Pauli était un personnage original et complexe, objet d'anecdotes innombrables.

À l'occasion du 50<sup>e</sup> anniversaire de la mort de Pauli, notre regretté collègue Jean-Claude Boudenot retrace la vie et la carrière de ce physicien exceptionnel.

Nous dédions cet article à la mémoire de Jean-Claude.

## Naissance et enfance à Vienne, études à Munich

Wolfgang Ernst Friedrich Pauli naît à Vienne, le 25 avril 1900. Son second prénom lui vient de son parrain, le physicien Ernst Mach. Son père, Wolfgang Josef Pascheles, était professeur de médecine à l'université de Vienne, tandis que sa mère, Camilla Pauli-Schütz, était une spécialiste de littérature dramatique et auteure d'un livre sur la Révolution française. Le jeune Wolfgang entre au *Döbling Gymnasium* à l'âge de dix ans. Très jeune, il « dévore » les livres de mathématiques et de physique, en particulier ceux que lui conseille son parrain<sup>1</sup>. Ce n'est cependant pas un élève modèle ; certes, il se révèle excellent en mathématiques, physique et philosophie, mais médiocre en latin et grec. Lors de sa dernière année au *Döbling Gymnasium*, il sera dans une classe surnommée depuis « la classe des génies ». En effet, parmi ses 26 camarades se trouvent Richard Kuhn, qui recevra le prix Nobel de chimie en 1938, Herbert Winkler qui sera un grand chef d'orchestre, Hans Thiming et Gustav Diessl qui deviendront des acteurs célèbres. Wolfgang reçoit son diplôme le 2 juillet 1918. Cette année-là, alors qu'il n'a que dix-huit ans, il publie deux travaux originaux sur la relativité générale qui le font remarquer de la communauté scientifique en général et de Hermann Weyl en particulier.

Sa réputation est déjà grande lorsqu'il rejoint l'université de Munich, le 4 octobre 1918. Son professeur n'est autre qu'Arnold Sommerfeld, dont il suivra le cursus de physique de trois ans. Ce dernier l'encourage à écrire un article sur la relativité générale dans l'*Encyclopédie des Mathématiques*. Einstein est impressionné par l'article et ahuri par l'âge de l'auteur ; il écrit : « Aucun de ceux qui liront ce travail remarquable, qui est d'une maturité impressionnante, ne pourra croire que son auteur n'a que 21 ans. Car on ne sait ce qu'il faut le plus admirer : la compréhension du développement des idées, la sûreté des déductions mathématiques, la profondeur des intuitions physiques, l'aptitude à présenter les choses avec clarté, la connaissance de la littérature spécialisée, l'exhaustivité du propos, ou bien la finesse de la critique. » Pauli a une méthode bien



Wolfgang Pauli devant un tableau noir à Princeton.

à lui pour étudier : il passe ses soirées dans les cafés et, au cœur de la nuit, se met à potasser les livres de physique. Cela ne l'empêche pas d'obtenir son doctorat, sur la description quantique de l'ion moléculaire  $H_2^+$ , avec la mention *Summa cum laude* à 21 ans.

## Assistant à Göttingen, puis à Hambourg ; le principe d'exclusion

Il rejoint alors Göttingen, où il devient, en octobre 1921, l'assistant de Max Born. Ce dernier confiera plus tard à Einstein « que de toute sa vie il n'aura plus jamais un aussi bon collaborateur ». À Göttingen, Pauli poursuit les travaux initiés dans sa thèse et développe, avec Max Born, une formulation générale de la théorie des perturbations pour l'appliquer à l'atome d'hélium et aux atomes plongés dans des champs magnétiques ou électriques. À Göttingen il rencontre Niels Bohr, ainsi que Werner Heisenberg, Paul Ehrenfest et Oskar Klein.

En avril 1922, il part pour Hambourg pour devenir l'assistant de Wilhelm Lenz, le titulaire de la chaire de physique théorique. L'Allemagne est alors en pleine crise économique. À la suite d'une conférence donnée par Bohr et après quelques minutes de conversation, ce dernier l'invite à le rejoindre à Copenhague pour un

séjour d'un an. Pauli revient ensuite à Hambourg, où il passe sa thèse d'habilitation en 1924.

C'est à 24 ans, le 16 janvier 1925, que Pauli énonce le fameux principe d'exclusion qui ne tardera pas à porter son nom. La même année, il calcule avec le nouveau formalisme d'Heisenberg (la mécanique des matrices) les niveaux de l'atome d'hydrogène, ce qui exige une « habileté de magicien ». Pauli, qui était redevenu sobre, se remet à goûter à l'alcool ; il écrit lui-même : « Quand je suis venu à Hambourg je suis passé, sous l'influence de Stern, directement de l'eau minérale au champagne. »

## Première période à Zurich ; le neutrino

Fin 1927, suite au départ de Peter Debye, le poste de professeur de physique au Polytechnicum de Zurich (ETH) se libère ; Pauli est choisi pour succéder au grand physico-chimiste, et notre physicien arrive en Suisse en avril 1928. Cette période est toutefois difficile pour lui. Sa mère, lassée des infidélités de son mari, se suicide le 15 novembre 1927. Son père se remarie très vite avec une femme que Wolfgang ne supporte pas. Pauli fréquente alors les bars et se met à boire. Il y rencontre une jeune danseuse de 22 ans, Luise Margarete Käthe (Kate) Deppener et l'épouse le 23 décembre 1929, sans même bien la connaître. Le mariage est un fiasco, la jeune femme quitte Wolfgang pour un chimiste, Paul Goldfinger, qu'elle connaissait avant son mariage et que finalement elle épousera en seconde noce. Pauli réagit ainsi : « Si elle avait choisi un matador, j'aurais pu me battre, mais contre un chimiste médiocre, quoi faire ? » Wolfgang et Kate divorcent le 26 novembre 1930, le mariage aura duré moins d'un an. Notre physicien sombre encore un peu plus et va jusqu'à participer à des rixes d'ivrognes dans les tavernes de la ville. Son père lui conseille de voir le psychanalyste Carl Jung. Il entamera une analyse, d'abord avec Erna Rosenbaum, puis avec Jung lui-même. L'analyse se termine en 1934, mais les deux hommes correspondront jusqu'à la mort de Pauli.

Les problèmes personnels de Pauli n'entament pas sa créativité scientifique. Une réunion importante doit se tenir à Tübingen où les meilleurs physiciens



Automne 1925. Max Born (à gauche) et Wolfgang Pauli à Hambourg.



Octobre 1934 à Genève. Wolfgang Pauli (à droite) et Arnold Sommerfeld.

nucléaires vont se réunir pour discuter en particulier de la crise ouverte par la découverte, par Chadwick, du spectre continu  $\beta$ . Pauli préfère rester à Zurich pour aller au bal. Il écrit à « Mesdames et Messieurs radioactifs » (voir encadré p. 22) pour leur faire part de son hypothèse suivant laquelle la continuité du spectre  $\beta$  est compatible avec la conservation de l'énergie à condition de supposer l'existence d'une nouvelle particule, qu'il appelle *neutron* (et qui sera rebaptisée *neutrino* par Fermi en 1932). Ce n'est toutefois pas avant le 7<sup>e</sup> conseil Solvay, en octobre 1933, que Pauli exposera en public son hypothèse. Ce n'est que le 15 juin 1956 que l'existence du neutrino sera confirmée expérimentalement !

En 1931 une très grande marque de reconnaissance est faite à notre physicien : il reçoit la seconde médaille d'or de Lorentz (la première a été attribuée à Planck en 1927). Pauli travaille alors sur les fondements de la mécanique quantique et sur l'interprétation de Copenhague. Il écrit, en 1933, un article de synthèse, « Les principes généraux de la mécanique ondulatoire », dans le *Handbuch der Physik*<sup>2, 3</sup>, d'une grande profondeur et aussi apprécié que son article sur la relativité générale de 1921. Cet article sera rapidement baptisé par les physiciens le « Nouveau Testament » !

Du point de vue personnel, la vie de Pauli s'éclaircit. Il rencontre Franziska (Franca) Bertram, la secrétaire d'un homme politique suisse. Pauli, qui va avoir 34 ans, épouse Franca, qui en a 32, à Londres le 4 avril 1934. C'est un mariage d'amour tendre et le couple sera épanoui.

Du point de vue scientifique, Pauli est toujours aussi productif : dans une lettre adressée à Heisenberg le 7 novembre 1934, il lui fait part d'une connexion entre le *spin* et les statistiques quantiques, qui sera connue sous le nom de « théorème *spin*-statistique »<sup>4</sup>.

## Entre Zurich et Princeton ; la guerre et le prix Nobel

Quatre ans plus tard, peu après leur aménagement dans une maison agréable située à Zollikon, petite cité au bord du lac à quelques kilomètres de Zurich, l'Allemagne nazie annexe l'Autriche (Anschluss du 13 mars 1938). Pauli, qui a demandé en avril 1938 sa naturalisation suisse sans succès, est obligé d'accepter un passeport allemand en novembre. Ses différentes démarches pour obtenir la nationalité suisse échouent les unes après les autres<sup>5</sup>. Finalement, durant l'été 1940 il demande à l'ETH un congé de six mois et part avec Franca aux États-Unis, où ils arrivent le 24 août. Il est reçu à Princeton par von Neumann et retrouve Einstein à l'*Institute for Advanced Studies*. Compte tenu de son passeport allemand, pays en guerre avec les États-Unis depuis la fin 1941, Pauli, malgré les appels de l'ETH, ne peut pas se rendre en Suisse où il est toujours titulaire de la chaire de physique. Ce n'est qu'à la fin de la guerre que la situation évoluera.

En novembre 1945, il apprend que le comité Nobel a choisi de lui attribuer le prix Nobel de physique « pour sa découverte du principe d'exclusion, aussi appelé principe de Pauli ». Compte tenu des difficultés de voyage, il préfère ne pas se rendre à Stockholm pour la cérémonie de remise >>>

## Pour en savoir plus

*No time to be brief, a scientific biography of Wolfgang Pauli*, Charles Enz, Oxford University Press (2002).

*The genius of science, a portrait gallery of twentieth-century physicists*, Abraham Pais, Oxford University Press (2000).

du 10 décembre, et c'est à Princeton que ses collègues vont célébrer dignement cette prestigieuse récompense. Parmi ses collègues de l'*Institute for Advanced Studies*, on compte Hermann Weyl, John von Neumann, Kurt Gödel et Albert Einstein. Ce dernier fait un discours improvisé qui touchera profondément Pauli, au cours duquel il en fait en quelque sorte son fils spirituel, son digne successeur. Après l'attribution du prix Nobel, plusieurs postes sont offerts à Pauli à Princeton et à l'université Columbia (New-York) ; de plus, il reçoit la nationalité américaine.

Mais finalement, en avril 1946, après avoir passé six ans aux États-Unis, il décide de retourner à Zurich. Le 2 octobre, le couple retrouve leur maison de Zollikon. Pauli reprend son poste de professeur à l'ETH. Il participe, en juin 1958, au onzième conseil Solvay dont le thème porte sur « l'astrophysique, la gravitation et la structure de l'univers ». Malgré un mal d'estomac persistant depuis l'été 1957, Pauli reste toujours aussi actif et participe à plusieurs autres conférences. Le 5 décembre 1958, à la fin d'un cours, ses douleurs à l'estomac deviennent intenses. Il est hospitalisé le lendemain (dans la chambre 137 <sup>16</sup>) et opéré le 13. Le chirurgien découvre une énorme tumeur, non opérable, au pancréas. Wolfgang Pauli s'éteint deux jours plus

tard, le lundi matin 15 décembre 1958. La médaille Planck, qui devait lui être remise en octobre, est apportée à sa veuve, par le professeur Trendelenburg. Ce dernier honneur récompense une vie consacrée à la physique fondamentale.

## Quelques anecdotes sur Pauli

Les contributions de Pauli à la physique ne se limitent pas à ses grandes découvertes ; elles s'étendent à d'autres domaines comme le magnétisme des métaux, le *spin* nucléaire, le moment magnétique des noyaux. George Gamov indique « qu'il est aussi difficile de trouver une branche de la physique moderne où le principe de Pauli n'est pas utilisé, que de trouver un homme aussi doué, aussi aimable et aussi amusant ».

Les anecdotes sur Wolfgang Pauli sont innombrables. On l'a dit « inathlétique, hédoniste, indifférent à la nature, noctambule, sarcastique, cynique, critique acerbe ». Pauli est professeur dès l'âge de 23 ans, mais ce qu'il écrit au tableau est à peine lisible et il lui arrive de s'interrompre en plein cours pour méditer ce qu'il vient d'enseigner. Un jour un étudiant se risque : « Vous nous dites que la conclusion à laquelle vous êtes arrivé est triviale, mais je ne la comprends pas. » Énervé, Pauli quitte

la salle quelques minutes pour trouver une présentation plus simple. Il réapparaît et se contente de dire : « Mais c'est trivial ! » Quand Weisskopf se présente en 1934 à Pauli pour être son assistant à Zurich, ce dernier lui dit : « Qui êtes-vous ? », « Je suis Weisskopf. Vous m'avez appelé pour être votre assistant. » « Ah, oui, j'aurais vraiment voulu que ce soit Bethe, mais il travaille sur la physique du solide, que je n'aime pas, même si j'ai commencé à m'y mettre. » Weisskopf rapporte ses débuts difficiles : « Pauli me donne quelques problèmes à étudier... et après une semaine il me demande ce que j'ai fait. Je lui montre ma solution et il dit : "Finalement j'aurai vraiment dû prendre Bethe." » La même année, Weisskopf, effectuant le calcul de l'énergie propre de l'électron, réalise qu'il a fait une erreur. Il va voir Pauli pour lui demander si une telle erreur le condamne à abandonner la physique : « Non, réplique Pauli catégorique, tout le monde fait des erreurs sauf moi. » À Emilio Segré, qui venait de présenter une conférence, il dit : « je n'ai jamais entendu un discours pire que le vôtre » ; puis il se retourne vers un collègue et ajoute : « excepté quand j'écoutais votre leçon inaugurale à Zurich. »

Pauli était d'une maladresse légendaire, ce fait est connu sous le nom « d'effet Pauli ». George Gamov rapporte l'anecdote suivante : James Franck réalise sa célèbre expérience (de « Franck et Hertz ») à Göttingen, quand son dispositif s'effondre sans cause apparente. Il rapporte le fait à Pauli dans une lettre humoristique. Pauli lui apprend alors qu'au moment de l'incident, il était précisément à Göttingen lors d'un voyage qui le menait de Zurich à Copenhague ! ■

1 - C'est ainsi qu'il lira, à treize ans, *La mécanique*, que Mach lui dédicace.

2 - "Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik", *Handbuch der Physik*, 1933.

3 - Pauli donne une interprétation de la mécanique quantique qui est semblable à celle de Bohr, Born ou Heisenberg ; pour lui « le résultat d'une seule observation n'est déterminé par aucune loi et par conséquent il est sans cause ».

4 - Le théorème *spin*-statistique indique que les particules de *spin* demi entier répondent à la statistique de Fermi Dirac (et donc obéissent au principe d'exclusion de Pauli), tandis que les particules de *spin* entier répondent à la statistique de Bose Einstein (et peuvent donc subir la condensation de Bose).

5 - Il écrira en 1942 à Uhlenbeck : « ... Je suis de plus en plus conscient que je n'appartiens à aucune nation existante. Je sens que mon point de vue doit être supranational, fondé sur des valeurs d'idéaux généraux valant pour toute la civilisation... » Une telle attitude est très proche de celle d'Einstein.

6 - Valeur de l'inverse de la constante de structure fine.

## Lettre de Pauli du 4 décembre 1930 à « Mesdames et Messieurs les radioactifs »

*Chers Mesdames et Messieurs radioactifs,*

*Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la continuité du spectre, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver la loi de conservation de l'énergie. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin 1/2, que je souhaite appeler neutrons, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons en ce qu'elles ne se déplacent pas à la vitesse de la lumière. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que la masse des électrons et, quoi qu'il arrive, pas plus grande que 0,01 fois la masse du proton. Le spectre continu deviendrait alors compréhensible en supposant que lors de la désintégration un neutron est émis en plus de l'électron, de telle sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante...*

*Je conviens que mon remède peut sembler incroyable car, s'ils existent vraiment, l'on devrait avoir vu ces neutrons beaucoup plus tôt. Mais c'est seulement celui qui ose qui peut gagner et la situation difficile, due à la structure continue du spectre, est éclairée par une remarque de mon honorable prédécesseur, M. Debye, qui m'a récemment dit à Bruxelles : « Oh, comme pour les nouveaux impôts, il vaut bien mieux ne pas penser à cela du tout ». Dorénavant, chaque solution à ce problème doit être discutée. Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement, je ne pourrai pas être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre.*

*Votre serviteur, le plus dévoué,  
W. Pauli*

# Mesure et Régulation de Débit Massique

**Nouveau:  
MULTI-GAZ /  
MULTI-GAMMES**



- ◆ Signal de mesure précis
- ◆ Contrôle de la régulation très rapide (msec)
- ◆ Débit gaz de 0,05 ml<sub>n</sub>/min à 11.000 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h
- ◆ **Nouveau: Multi-Gas / Multi-Gammes**  
Logiciel de programmation Multi-Gaz/Multi-Gammes  
à disposition

**Leader Européen de la débitmétrie massique**

  
**Bronkhorst®**  
FRANCE

[www.bronkhorst.fr](http://www.bronkhorst.fr) - [sales@bronkhorst.fr](mailto:sales@bronkhorst.fr)

## Le Conseil d'administration du 19 septembre 2008

Les principaux points à l'ordre du jour concernaient le positionnement de la SFP par rapport à une stratégie nationale de la recherche, le projet de fédération de plusieurs sociétés de sciences physiques et l'évolution de *Reflets de la physique* dans le cadre d'un contrat avec EDP Sciences.

Michèle Leduc fait le point sur les interventions de la SFP devant les différentes commissions nommées par la ministre de la Recherche, et pose la question de la participation de la SFP à l'exercice de définition d'une « stratégie nationale de recherche et d'innovation », annoncé le 3 septembre 2008 [1]. Après discussion, le CA estime que la SFP ne peut pas refuser de participer à ce type de réflexion et doit prendre une position dure pour défendre la recherche fondamentale non programmée. Au congrès SFP 2009, une journée consacrée au bilan de l'ANR est envisagée.

Michèle Leduc présente au CA le projet d'une fédération des sciences physiques, rassemblant dans un premier temps la SFP, la SFO et la SEE (voir éditorial, p. 2). Le CA demande à ce que la dénomination de cette fédération soit assez large pour permettre la participation d'autres sociétés. Dans ce contexte, pour ne pas prêter à confusion, le CA donne son accord pour que la SFP se retire du G2P dont l'activité est devenue très réduite. L'action sur les métiers de la physique est maintenue dans une commission de la SFP ouverte aux autres sociétés.

Charles de Novion présente au CA un projet de contrat entre la SFP et EDP Sciences pour *Reflets de la physique*. La stratégie d'EDP Sciences, résumée par Jean-Marc Quilbé, est d'être un partenaire des sociétés savantes et un prestataire de services. Le contrat entre la SFP et EDP prévoit qu'EDP Sciences développera un site web spécifique à *Reflets de la physique*, où les articles de la revue seront mis en ligne. Ce site sera en accès partiellement restreint. D'autre part, il est prévu que la revue *Reflets de la physique* s'ouvre à la publicité (dans la limite de 20% de la surface de publication), et qu'EDP Sciences prendra en charge la prospective de la clientèle et la réception des annonces publicitaires. Après discussion, le Conseil d'administration approuve le contrat, qui entrera en vigueur à compter du 1<sup>er</sup> octobre 2008 pour une durée de 4 ans.

Par ailleurs, il est décidé de lancer une journée de rencontre entre les responsables des divisions de spécialité. Il est proposé que les divisions de Physique des plasmas et PAMO l'organisent conjointement à Toulouse, en mars 2009.

Le CA approuve la nomination de Daniel Heuer (Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble) comme responsable de la Commission énergie-environnement.

[1] [www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid22375/communication-sur-la-strategie-nationale-de-recherche-et-d-innovation.html](http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid22375/communication-sur-la-strategie-nationale-de-recherche-et-d-innovation.html)

## Le site web de la SFP fait peau neuve...

Chaque jour, le web évolue. La SFP aussi : le site **www.sfpnet.fr** fait peau neuve !

Plus claire, plus attractive, la nouvelle interface met à l'honneur de belles images de physique.

Actualité oblige, c'est aujourd'hui un aimant quadrupôle pour le LHC qui vous accueille.

Côté pratique, toutes les fonctionnalités déjà existantes restent en place, et la nouvelle interface garde le concept qui a fait la force de la précédente : la coopération. En effet, le site de la SFP se voulant un espace d'échange, c'est toute une équipe de bénévoles qui maintient à jour les actualités, les offres d'emploi et les événements, pour ne citer qu'eux.

Nous voulons désormais aller plus loin, et c'est pourquoi un forum flambant neuf est maintenant disponible pour recueillir vos commentaires sur tous les « sujets chauds » du moment.



De nombreux changements sont encore à prévoir dans les prochains mois, alors restez connectés !

Olivier Dauchot

## Grand Prix de Physique Louis Néel 2008 Mathias Fink

Ce grand prix, d'un montant de 7000 €, est attribué par le Groupe d'Action pour la Physique (G2P), qui regroupe plusieurs sociétés savantes (dont la SFP). Il récompense l'excellence de travaux de recherche en sciences physiques ayant débouché sur une carrière exemplaire, associée à des développements technologiques en liaison directe avec le monde de l'entreprise. Le jury du grand prix Louis Néel 2008, sous la présidence de Jean-Claude Lehmann, de l'Académie des technologies, a récompensé Mathias Fink, professeur à l'ESPCI. La remise du prix a été effectuée le 6 juin 2008 au 4<sup>e</sup> Salon européen de la recherche et de l'innovation, à Paris-Expo, porte de Versailles (voir *Reflets* n°11, p. 23).

Mathias Fink, né en 1945, est directeur du Laboratoire Ondes et Acoustique qu'il a créé au sein de l'ESPCI, il y a environ vingt ans. Ce laboratoire est devenu un centre de recherche exceptionnel à plus d'un titre. Il est fondé sur trois piliers : une très grande pluridisciplinarité, un équilibre remarquable entre recherche fondamentale et appliquée, une véritable culture de valorisation produisant de nombreux contrats industriels et aboutissant à la création d'entreprises innovantes. La personnalité rayonnante et l'inventivité de son directeur, Mathias Fink, ont marqué ce laboratoire d'une culture du continuum interdisciplinaire et du risque. L'originalité profonde de sa recherche réside dans l'invention et la maîtrise de méthodes et de concepts comme les miroirs à retournement temporel pour les ondes ultrasonores, la focalisation en milieu complexe, l'utilisation des ondes de cisaillement dans le corps humain, la super-résolution en électromagnétisme, l'utilisation des multi-ondes en imagerie. Comme cette pluridisciplinarité va de pair avec une volonté résolue de valorisation, de nombreux brevets ont été déposés, puis licenciés au sein de *start-up*, ce qui a permis d'embaucher plus de 120 personnes.

Ces recherches ont donné lieu à de nombreuses applications (dont plusieurs sont commercialisées) : système de destruction de calculs rénaux, thérapie du cerveau par hyperthermie ultrasonore, premier imageur ultrasonore capable de réaliser 5000 images du corps humain par seconde, domotique, contrôle non destructif, acoustique sous-marine.

Les succès scientifiques de Mathias Fink sont exceptionnels : publications nombreuses et largement citées, brevets et licences d'application, conférences invitées au plan international, création d'entreprises.

Roger Maynard

## Remise du prix Jean Perrin 2007 à Michel Cabaret à l'Espace des Sciences de Rennes

Le 16 septembre 2008, Yves Petroff, vice-président de la SFP, a remis le prix Jean Perrin 2007 de popularisation de la Science à Michel Cabaret, directeur de l'Espace des Sciences de Rennes (voir notice dans *Reflets* n°10, p. 24).

Ce prix a été remis à l'Espace des Sciences en présence du maire de Rennes, Daniel Delaveau, de plusieurs représentants du Conseil Général et de près de 200 personnes. À la suite de la remise du prix, Michel Cabaret a prononcé une allocution dans laquelle il a exposé l'importance de la diffusion des connaissances scientifiques en soulignant le rôle majeur que Jean Perrin y avait joué en son temps, en particulier en associant la création de ce qui allait devenir le CNRS avec le tout nouveau Palais de la découverte. Ce sont précisément les visites du jeune Michel au Palais qui ont été à l'origine de sa vocation.

Par son ampleur et sa qualité, l'Espace des Sciences rayonne sur toute la région bretonne (et même au-delà !) et soutient des activités de centres culturels dans de nombreuses villes de la région Bretagne.

Avec Michel Cabaret, le jury a voulu distinguer non seulement un acteur régional incontournable de la diffusion de la culture scientifique mais aussi l'équipe très dynamique, motivée et efficace qui l'entoure. Alors que l'existence de certains CCSTI est menacée, ce prix est ainsi une reconnaissance de l'importance des actions culturelles scientifiques dans les régions.

Roland Lehocq



Jean-Claude Lehmann (à gauche) et Mathias Fink.



Yves Petroff (à droite) et Michel Cabaret.

# L'école d'été e2phy 2008, « Physique et Sport », à Dijon



Roland Lehoucq

La huitième école d'été de physique, sur le thème « Physique et sport », s'est déroulée du 26 au 29 août 2008, dans les locaux de l'UFR Sciences et Techniques de l'Université de Bourgogne à Dijon. Cette école, qui rassemble chaque année enseignants et chercheurs, a été une nouvelle fois un succès, avec 200 participants venus de toute la France.

Treize conférenciers de talent, physiciens ou spécialistes du sport, et souvent les deux à la fois, ont su captiver l'auditoire.

G. Millot (Université de Bourgogne), associa de manière inattendue la haute technologie à un phénomène largement répandu sur les stades, la « Ola ». É. Guyon (ESCPI) fut un des invités phares de l'école, avec un exposé remarquable sur la physique des balles et ballons. La physique de la plongée sous-marine fut bien représentée par S. Rémy (CCSTI du Limousin) et par le directeur de la COMEX, B. Gardette. La bicyclette fut également à l'honneur, tant du point de vue de la physique fondamentale (J.P. Vieren, ENS) que des aspects

sportifs, incluant le dopage, abordé sans tabou (A. Vayer, ancien entraîneur chez Festina). R. Seigneuric (Université de Bourgogne) fit découvrir les règles complexes et la physique étonnante d'un sport méconnu en France, le base-ball. Les matériaux pour le sport (pneus de F1, élastomères thermoplastiques) et la physique des muscles ne furent pas oubliés. Enfin, R. Lehoucq (CEA) clôtura l'école par une conférence sympathique sur la physique de Superman.

Les exposés étaient complétés par de nombreux ateliers, portant à la fois sur le thème principal de l'école et sur les recherches menées en physique à Dijon. Une attraction spectaculaire fut le Camion de Sciences « La Physique fait du Sport », venu tout exprès de la Région Rhône-Alpes. Et, comme il se doit, un banquet festif et convivial rassembla tous les participants.

Le programme et l'ensemble des exposés et documents issus des ateliers seront bientôt disponibles sur le site web de l'école : <http://e2phy.in2p3.fr/2008/>.

Rendez-vous l'an prochain à Marseille pour la neuvième édition d'e2phy, consacrée à l'astronomie, Année mondiale oblige !

Vincent Boudon<sup>1</sup> et Jean-François Gambey<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Institut Carnot de Bourgogne (Dijon), Président de la Section Bourgogne Franche-Comté

<sup>2</sup> - Union des Professeurs de Physique et Chimie, organisateur d'e2phy 2008

## Disparition

### Gérard Lambert

Gérard Lambert nous a quitté le 4 août dernier, discrètement, à l'âge de 78 ans. Il a été l'une des grandes figures du Centre des Faibles Radioactivités (CFR) et il est à l'origine de plusieurs des orientations scientifiques actuelles du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE).

En 1957, Gérard a rejoint à Saclay le groupe de géophysique nucléaire créé par Jacques Labeyrie. Là, il s'intéresse aux émissions naturelles de radon, un gaz qui est émis par les roches continentales, en raison de leur teneur en uranium, si faible soit-elle. Le radon a la propriété de se désintégrer en donnant naissance à des atomes de métaux radioactifs, qui se fixent sur les particules en suspension dans l'air et constituent donc des traceurs de la circulation des masses d'air. Gérard Lambert développe un petit groupe de recherche qui mesure le transport atmosphérique des aérosols radioactifs, artificiels ou naturels.

Après sa thèse, soutenue en 1963, attiré par l'enseignement, il devient en 1966 professeur à l'Université de Picardie à Saint-Quentin, mais il poursuit ses recherches au CFR où il développe un groupe d'étude de la physico-chimie de l'atmosphère. Il terminera sa carrière comme Directeur de recherches au CNRS, où il est détaché à partir de 1985. Ces dernières années, Gérard Lambert a su transmettre à la communauté scientifique et au grand public sa vision claire de l'évolution de la planète en animant un programme au Palais de la découverte, en écrivant plusieurs livres sur le climat et en participant à la rédaction d'ouvrages collectifs sur la radioactivité et sur « le méthane et le destin de la Terre ». Nous gardons tous un souvenir profond de sa gentillesse et de son aptitude pédagogique à exposer, en termes simples, les phénomènes les plus complexes qui se développent dans l'environnement.

Jean-Claude Duplessy

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)

Membre de la SFP depuis 1971, Gérard Lambert a joué un rôle important dans notre société : il a été membre de la commission enseignement et président de la division « environnement, milieux naturels ». Nous adressons à son épouse Marianne, ancienne présidente de la SFP, et à sa famille l'assurance de notre profonde amitié.

La rédaction



Jean Fontanieu

## EDP Sciences développe une politique active vers le livre numérique

Le monde de l'édition, et plus généralement de la publication, est à la veille d'une transformation majeure. Technologie et habitudes de lecture commencent à se recouper : le livre électronique est à nos portes. L'édition électronique, qui complète l'édition classique sur support papier, a généré son propre vocabulaire. Le terme d'*e-book* recouvre tout ouvrage publié dans un format électronique (pdf, html...). Les *e-books* peuvent être lus sur un ordinateur classique, mais aussi sur des dispositifs électroniques spécialisés et nomades appelés *readers* (PDA, téléphones portables, *laptops* et autres lecteurs numériques).

La plupart des bibliothèques numériques ou opérateurs (appelés encore agrégateurs) proposent des modèles économiques différents, allant de l'abonnement (pour accéder à un fichier à l'unité ou à un panier de titres) à l'achat à l'unité ou au chapitre, voire à la page. Sur le site *numilog.com* par exemple, les fichiers achetés peuvent être stockés en ligne, comme dans une bibliothèque, afin de s'affranchir de l'ordinateur de lecture. Concernant la gestion des droits, il est parfois impossible d'imprimer plus d'un certain nombre de pages ou d'effectuer un copier/coller. Les prix de ventes de ces fichiers électroniques sont soit égaux au prix papier, soit, dans la plupart des cas, inférieurs à la version imprimée (10 à 30% selon les éditeurs et les agrégateurs). Enfin, le premier opérateur mondial est américain, et s'appelle *netlibrary.com* (il diffuse les ouvrages d'EDP Sciences).

### La technologie

Essentiellement centrée pour l'instant sur le format PDF (Adobe), elle consiste à proposer des fichiers de textes mis en page (livres entiers, chapitres ou pages, aujourd'hui en noir et blanc). Certains *readers* sont capables de stocker plusieurs milliers d'ouvrages, et offrent à l'individu de nombreuses fonctionnalités (indexation personnelle, grossissement des caractères, recherche d'occurrences, etc...).

Le marché du *e-book* progresse surtout dans les pays anglo-saxons, et les acheteurs sont essentiellement institutionnels (bibliothèques). La France est en retard, à la fois dans ses modes de consommation de ces produits électroniques, et dans l'offre réduite de livres français disponibles sous ce format. Les individus n'ont pas encore plébiscité ce mode de lecture, qui apparaît séduisant, mais reste peu pratiqué. (Attachement profond aux produits papiers ? Trop grande multiplicité des appareils de lecture et coût d'achat encore trop élevé ?)

Une phase ultérieure du développement technologique permettra d'offrir d'une part, des contenus plus riches, intégrant par exemple de la couleur, des images animées, des sons, et d'autre part, des contenus s'adaptant automatiquement aux formats des lecteurs électroniques.

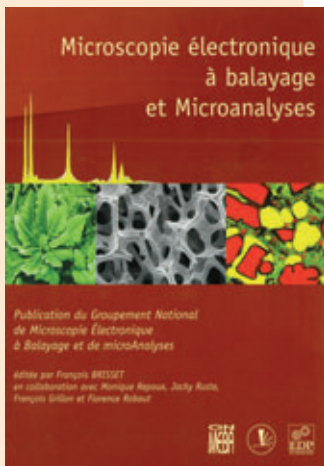
### La politique d'EDP Sciences

EDP Sciences a été le premier éditeur français, dès 2005, à entreprendre une politique active et systématique de numérisation de ses titres. La chaîne de production intègre actuellement les deux dimensions de réalisation des ouvrages, fournissant en parallèle livres imprimés et *e-books*. Début 2009, la totalité de son catalogue vivant (soit près de 400 titres) sera disponible sous format numérique. La diffusion de ces fichiers est assurée par six agrégateurs, dont deux français et quatre étrangers. En 2008, le département Livres d'EDP Sciences envisage de réaliser 1% de son chiffre d'affaires par ce nouveau mode de diffusion et d'accès aux savoirs.

Jean Fontanieu,

Responsable du département Livres d'EDP Sciences

## Actualité éditoriale



### Microscopie électronique à balayage et Microanalyses

Publication du Groupement National de Microscopie Électronique à Balayage et de Microanalyses (GN-MEBA).  
Édité par François Brisset.

Ce volume en langue française est le seul traitant du sujet de façon aussi exhaustive ; il représente la version actualisée et totalement refondue d'une précédente édition de 1979, aujourd'hui épuisée.

Ce livre est particulièrement recommandé aux expérimentateurs, mais intéressera aussi les spécialistes en science des matériaux, désireux de s'investir dans toutes ces techniques d'imagerie et d'analyse. Il a été écrit par les enseignants de l'école d'été de Saint-Martin-d'Hères en 2006, tous chercheurs ou ingénieurs et spécialistes dans leur domaine.

Octobre 2008 • 984 pages couleur  
ISBN : 978-2-7598-0082-7 • 119 €.

### Le modèle économique

Il se cherche... et c'est la question centrale, car c'est le marché qui décide, et il hésite ! On peut supposer que vers 2010, le marché du livre numérique aura décollé grâce à l'émergence des *readers* et de l'offre en ligne d'*e-books*. Avec Internet, la librairie qui diffusait l'ouvrage papier sera en partie mise hors-circuit.

Les *e-bookshops* (*amazon.fr* par exemple) se différencient des bibliothèques numériques en ce qu'ils ne proposent que la commercialisation, *via* Internet, d'ouvrages papier dans un premier temps. Les bibliothèques numériques vendent directement le livre sous forme d'*e-book*, et seulement dans un deuxième temps, sous forme papier.



# Matthieu Piel

## Un parcours à l'interface de la physique et de la biologie

Matthieu Piel a 35 ans.

- 1992 École polytechnique.
- 1997 DEA de physique des liquides, Université de Paris VI.
- 1997 Thèse de Doctorat à l'Institut Curie :
- 2001 « Étude cinématique et fonctionnelle du centrosome des cellules de vertébrés ».
- 2004 Prix Nine Choucroun.
- 2002 Post-doctorat chez le Prof. Andrew Murray,
- 2005 Harvard University, Cambridge, USA.
- 2005 Recrutement au CNRS comme Chargé de recherches à l'Institut Curie.
- Depuis 2007 Dirige la jeune équipe « Biologie systémique de la division et de la motilité cellulaire » dans l'UMR 144 CNRS -Institut Curie.

Je dirige une jeune équipe de recherche à l'Institut Curie depuis le 1<sup>er</sup> octobre 2007. Le début d'une aventure, mais aussi une certaine forme d'accomplissement dans ma carrière de chercheur : on me charge d'orienter les recherches d'un groupe d'ingénieurs, d'étudiants et de jeunes chercheurs, pour que ces recherches soient cohérentes, originales et surtout aboutissent dans des délais « raisonnables » – l'Institut Curie héberge les jeunes équipes pour une durée de 5 ans.

Retour sur mon parcours...

### Études en physique, thèse de biologie

Classes préparatoires puis École polytechnique, avec un intérêt particulier pour la physique expérimentale et la biologie. Je me lance donc dans la voie de l'interdisciplinarité. Le grand mot ! Il peut certes sembler un peu galvaudé aujourd'hui. Mais il y a dix ans, lorsque je dois choisir un troisième cycle, peu de formations existent pour allier physique et biologie. Je choisis donc le DEA de physique des liquides, qui comporte de nombreuses options intéressantes pour l'étude de la matière vivante. En parallèle, je continue à fréquenter le laboratoire de biologie dans lequel j'avais déjà fait mon stage de fin d'études à l'École polytechnique : celui de Michel Bornens dans l'UMR 144 (Compartimentalisation et dynamique cellulaire) à l'Institut Curie. Michel avait su me convaincre que le centrosome, objet d'étude de son équipe, était en quelque sorte la clé de voûte d'une partie du système architectural qui sous-tend la dynamique cellulaire. Un objet à la fois esthétique, mal compris et donc assez mystérieux pour attiser la curiosité, et plein de promesses de découvertes. Michel était aussi engagé, avec Jacques Prost, dans un programme interne à l'Institut Curie, de promotion de la recherche à l'interface physique/biologie. Cela avait donc tout pour me plaire.

Même si la formation que j'ai suivie m'a énormément plu et m'a certainement ouvert à des domaines passionnants que je n'aurais sinon jamais approchés (comme les cristaux liquides

ou le mouillage), je me suis rapidement retrouvé à faire de la biologie cellulaire, sans me servir des outils conceptuels enseignés dans mon DEA. Or, il est très clair que les connaissances théoriques qu'on ne met pas en application ne survivent bien vite qu'à l'état de vagues souvenirs. Je suis donc aujourd'hui persuadé qu'il faut des formations spécifiques pour les étudiants qui ont le courage de se lancer dans des domaines de connaissance à l'interface de plusieurs disciplines. Outre le parcours Interface Physique-Biologie de Paris-Diderot, une nouvelle école doctorale, Frontières du Vivant, dirigée par François Taddei, vient de voir le jour, associée à un parcours de master. Mais, aujourd'hui encore, ces formations à l'interface physique/biologie sont trop peu nombreuses.

Encore plus étonnant peut-être pour ceux qui pensent que l'interdisciplinarité est devenue une banalité : le CNRS n'a plus depuis plusieurs années de commission d'interface physique/biologie. De plus, il semble toujours difficile de faire en sorte que des physiciens travaillent au sein des laboratoires de biologie, une condition indispensable à un encadrement véritablement pluridisciplinaire des étudiants.

### Post-doctorat aux USA

Suite de mon parcours : le « post-doc ». Après une solide formation en biologie cellulaire et en microscopie, et des travaux de thèse couronnés de succès (bonnes publications et prix Nine Choucroun), je me rends à l'évidence : je ne suis pas encore devenu un biologiste, et certainement pas un physicien. Un point noir dans ma formation à la biologie : la génétique. Et une déficience de ma thèse : les approches quantitatives, comme me le fait remarquer très justement Jacques Prost lors de ma soutenance. J'ai donc recherché pour mon stage post-doctoral, le laboratoire d'un généticien, intéressé par des questions d'organisation spatiale de la cellule, et prêt à tenter de développer des approches quantitatives avec des techniques expérimentales empruntées à la physique. J'avais aussi envie, comme beaucoup de jeunes chercheurs, de connaître d'un peu plus près l'eldorado de la recherche mondiale : les USA.

Je trouvais un cadre de travail et un sujet idéal chez Andrew Murray à Harvard University, département MCB (molecular and cellular biology). Andrew, un généticien de la levure, avait rejoint Harvard quelques années auparavant avec comme projet la création d'un département interdisciplinaire pour exploiter les retombées de la génomique, le CGR ("Center for genomic research", aujourd'hui renommé en "Systems Biology").

Ce département est innovant à plus d'un titre : il propose à de très jeunes chercheurs, souvent juste après leur thèse, une première expérience de chercheur indépendant, encadrée. Le jeune chercheur bénéficie du financement d'un ou deux collaborateurs post-doctorants et de suffisamment de fonds pour ne pas avoir à faire de demande de financement. Le centre est aussi équipé de nombreuses plateformes communes, et toutes ces très petites équipes sont encouragées à collaborer les unes avec les autres.

Dans sa propre équipe, Andrew avait décidé d'expérimenter aussi l'interdisciplinarité : mathématiciens, généticiens, physiciens théoriciens ou expérimentateurs, informaticiens, se côtoyaient sur des sujets allant du cycle de division cellulaire à l'évolution dirigée, en passant par le chimiotropisme des levures. La levure me donnait accès à toutes les modifications génétiques envisageables et je découvrais un domaine de recherche qui m'était complètement inconnu : la transduction des signaux extracellulaires.

J'ai pu me rendre compte, comme au cours de ma thèse, de l'intérêt que peut avoir la position du néophyte : je relisais tous ces articles « classiques » avec un regard à la fois naïf et critique, des articles qu'un biologiste « cultivé » n'aurait probablement même pas consultés, les considérant comme des acquis. Le danger aussi de cette position : il faut bien connaître un domaine pour savoir quelles sont les questions pertinentes à poser. Pour cet aspect, je faisais confiance au recul et à l'expertise de mon mentor.

## De la recherche en Amérique

Pour finir, j'aimerais décrire quelques aspects de la formation par la recherche à l'américaine qui m'ont frappé lors de mon séjour, tout en précisant qu'il s'agit là d'une observation sur un échantillon limité : trois années passées dans un laboratoire à Harvard.

“ La formation par la recherche est très bien reconnue aux USA et les post-doctorants n'ont aucun mal à y trouver un emploi à leur goût. ”

Les étudiants, dès leur première année d'université, arrivaient au laboratoire pour des stages de longueur variable qui souvent se prolongeaient toute l'année, voire sur plusieurs années, l'étudiant passant au laboratoire dès qu'il avait un moment de libre. Ces étudiants n'étaient donc pas, comme trop souvent en France, dans un laboratoire pour la première fois à partir de la licence pour un stage court. Il me semble très bon que les étudiants fréquentent les laboratoires le plus tôt et le plus possible, sous forme de tutorat par exemple, avec des sujets qui peuvent avancer lentement sur quelques années au cours de petits stages ou de simples passages au labo lors d'une journée libre ou pendant les vacances. Résultat : lorsque ces étudiants commencent leur thèse, ils se sont déjà frottés à plusieurs labos et à plusieurs projets de recherche, sur des périodes prolongées. Par ailleurs, les thèses durent le plus souvent de 5 à 6 ans, ce qui permet aux étudiants, lors des deux ou trois premières années, d'adopter une attitude très exploratoire.

Les post-doctorants peuvent aussi faire des séjours assez longs, et si on peut déplorer la prolongation à outrance d'un statut de chercheur « précaire », cette précarité est à relativiser lorsque l'on sait que la formation

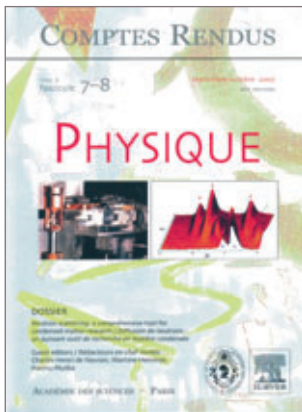
par la recherche est très bien reconnue aux États-Unis et que ces post-doctorants n'auront aucun mal à trouver un emploi à leur goût. Le diplôme de PhD, l'équivalent de la thèse de troisième cycle, ouvre toutes les portes. Le poste de mon épouse, qui était à l'époque chargée de l'antenne bostonnienne d'une agence de développement francilienne, m'a permis de me rendre compte de cela : pas un CEO (Chief Executive Officer) d'une entreprise innovante dans la région de Boston qui ne soit "PhD". Cela a aussi un effet bénéfique dans les labos : on y trouve des étudiants qui se destinent à toutes sortes de métiers. Le *consulting* est très en vogue, mais aussi des voies plus exotiques comme la diplomatie. Ces étudiants n'en sont pas moins passionnés par leur travail de thèse, qu'ils effectuent peut-être aussi avec un peu plus de décontraction, ce qui n'est pas plus mal. Ils auront par la suite, qu'ils optent pour la recherche académique, appliquée, le commerce ou autre, un très bon réseau d'anciens collègues de paillasse, respectueux les uns des autres.

C'est peut-être de ce côté qu'il faudrait chercher pour tisser ces fameux liens entre recherche publique et privée, ou fondamentale et appliquée, qui nous font tellement défaut en France, les chercheurs académiques n'ayant bien souvent aucun réseau dans le privé (à l'exception de certains lieux, exceptionnels, comme l'ESPCI à Paris). Si les ingénieurs et les CEO de nos entreprises faisaient leurs classes sur les mêmes paillasses que les chercheurs académiques, on n'en serait pas à ce niveau d'incompréhension mutuelle. Et, de ce point de vue, je crois que ce ne sont pas les chercheurs académiques qui doivent faire des stages en entreprise, mais bien le monde industriel qui doit s'ouvrir aux formations par la recherche, à tous les niveaux, pour qu'à la prochaine génération, les anciens thésards d'un même labo puissent se retrouver aussi bien à la tête d'une entreprise innovante qu'à la direction d'un groupe de recherche fondamentale. ■

Matthieu Piel  
matthieu.piel@curie.fr

## Neutron scattering: a comprehensive tool for condensed matter research

Dossier réuni par Charles-Henri de Novion, Martine Hennion et Hannu Mutka. *Comptes Rendus Physique de l'Académie des sciences*, tome 8, fascicule 7-8, septembre-octobre 2007, pp. 715-920 (Elsevier)



La diffusion des neutrons est devenue une sonde incontournable d'étude de la matière condensée depuis le début des années 1950, en prouvant l'existence de l'antiferromagnétisme. Si l'étude du magnétisme reste l'un de ses domaines de prédilection, les spécificités de l'interaction neutron-matière font de la diffusion des neutrons un outil de choix pour, entre autres, la mesure des excitations et des corrélations spatio-temporelles de la matière, l'étude de la matière organique (grâce aux substitutions isotopiques) et d'objets massifs ou placés dans des conditions *in situ* (grâce à son fort pouvoir pénétrant).

Le présent dossier, qui comprend 12 articles écrits par quelques-uns des meilleurs spécialistes et/ou utilisateurs de l'Institut Laue Langevin (Grenoble) et du Laboratoire Léon Brillouin (Saclay), n'est ni une introduction à la diffusion des neutrons, ni une revue exhaustive de la technique, mais une illustration ciblée de la méthodologie actuellement utilisée. Pour cela, les *Comptes Rendus* se centrent sur quelques recherches d'actualité, prises dans un large éventail de disciplines couvrant la physique des solides, la science des matériaux, la matière molle, les systèmes biologiques et même l'archéométrie.

Les recherches actuelles concernent des systèmes complexes, dont tous les aspects ne peuvent être appréhendés par l'utilisation d'une seule technique expérimentale. Plusieurs articles de ce dossier illustrent bien la complémentarité indispensable de la diffusion des neutrons avec les autres techniques expérimentales, en particulier celles du rayonnement synchrotron.

De gros progrès ont été apportés aux techniques de diffusion de neutrons au cours de ce dernier demi-siècle, principalement par l'invention de nouveaux instruments et l'amélioration ininterrompue de l'instrumentation, la brillance des sources nucléaires continues ayant vite atteint sa limite pour des raisons thermodynamiques. Un saut quantitatif de deux ordres de grandeur en flux est attendu dans le proche futur avec la mise en service aux États-Unis et au Japon des sources pulsées à spallation (voir à ce sujet l'excellente introduction de F. Mezei). Dans ce cadre, l'Europe développe depuis plusieurs années le projet ESS (European Spallation Source), en attente d'une décision politique.

Ce dossier, présentant l'état de l'art de la diffusion des neutrons sur des sujets de recherche d'intérêt actuel, sera profitable aux chercheurs et futurs utilisateurs. Il devrait aussi servir de référence aux décideurs chargés de la politique des très grandes infrastructures de recherche.

Jean-Paul Pouget

Directeur de recherche au CNRS, Directeur du Laboratoire de Physique des Solides (Orsay)

## La 100<sup>e</sup> *Statistical Mechanics Conference* de Rutgers

La 100<sup>e</sup> *Statistical Mechanics Conference* a eu lieu à l'Université de Rutgers (NJ, USA) du 13 au 18 décembre 2008. Cette conférence semestrielle, organisée depuis une cinquantaine d'années par le professeur Joel L. Lebowitz, a été depuis sa création un lieu privilégié de rencontres et d'échanges de la communauté internationale. Une des grandes originalités de ces conférences est qu'elles comportent, en plus de nombreux exposés invités, des sessions de contributions courtes permettant à tous ceux qui le souhaitent, même aux plus jeunes, d'exposer en quelques minutes leurs derniers résultats ou leurs travaux en cours devant les meilleurs experts du domaine.

Ces conférences de Rutgers ont joué depuis le début des années 60 un rôle considérable dans le développement de la physique statistique. Depuis 50 ans, Joel Lebowitz les a toutes organisées et présidées, sans que cela n'affecte ni son activité de recherche ni son engagement pour la paix, les droits de l'homme et la défense de nos collègues opprimés.

Qu'une conférence, organisée par la volonté d'un seul, fête sa 100<sup>e</sup> édition est en soi un événement tout à fait exceptionnel qui mérite d'être salué. Que son organisateur soit Joel Lebowitz, visiteur régulier de l'I.H.E.S., de l'I.H.P., de l'École normale supérieure, ami

et collaborateur de nombreux physiciens français, nous réjouit particulièrement.

Ces *Rutgers Meetings* ont fait école dans plusieurs pays où des conférences ont lieu régulièrement, avec des sessions courtes permettant aux débutants comme aux seniors de faire part de leurs derniers progrès. À Paris, ces « Journées de Physique Statistique » ont été créées en 1981 à l'initiative de Bernard Souillard et de Joel Lebowitz, lors d'une de ses visites au début des années 80. Depuis près de 30 ans, elles réunissent chaque année à l'École de Physique et Chimie de Paris 150 à 200 participants avec une centaine de contributions, la plupart par de jeunes doctorants ou de jeunes post-doctorants.

Cette 100<sup>e</sup> édition des *Rutgers Meetings* est pour beaucoup d'entre nous, qui avons depuis de nombreuses années pu apprécier les qualités scientifiques et humaines de Joel Lebowitz, l'occasion de le remercier pour son dévouement à la communauté scientifique et de lui souhaiter de continuer son œuvre pendant très longtemps.

Édouard Brézin et Bernard Derrida  
École normale supérieure, Paris

## Grandes écoles et universités : un débat

### Pour la suppression des grandes écoles

Chercheur dans un grand laboratoire industriel depuis 38 ans, je suis extrêmement surpris de la teneur de l'éditorial du n°11 de *Reflets de la physique*. Un physicien doit être avant tout intuitif et créatif, deux qualités qui ne sont, en France, [...] jamais prises en compte dans la sélection des lycéens admis dans les classes préparatoires et qui n'y sont ensuite jamais développées. [...]

Ce système, hérité du 19<sup>e</sup> siècle, trie donc des esprits obéissants et rationnels qui ont besoin d'un encadrement strict : on prépare à un concours plus que l'on n'enseigne les sciences. On privilégie l'intelligence raisonneuse sur les valeurs de l'intuition et de l'élan individuel. Les professeurs des classes préparatoires ne font pas de recherches et ont en général une agrégation obtenue sur le programme de la maîtrise (Bac + 4-5). Rien de commun avec un maître de conférence de DEUG, qui est en général titulaire d'un DEA et d'une thèse et a fait plusieurs années de post-doctorat avant de présenter un projet de recherches pour postuler à un poste en faculté ou au CNRS. L'enseignement en DEUG est fait par des créatifs ayant publié des travaux originaux et qui sont reconus au plan international. L'enseignement en classe préparatoire ignore en général les développements modernes de la recherche : il ignore, par exemple, les détecteurs infrarouges à multipuits quantiques, les lasers à cascade quantique, les valves de *spin*... et prive ainsi les soi-disant « élites » des développements récents de la science. [...]

Je pense qu'il est grand temps de sélectionner les meilleurs étudiants sur d'autres critères que la résolution d'intégrales, qui aujourd'hui se résolvent en quelques clics de souris sur tous les PC du monde et bientôt sur tous les téléphones portables... et d'obliger les meilleurs à faire un Bac + 8. La suppression des grandes écoles me paraît être une source d'économie et de richesse intellectuelle, car la science aurait enfin en France un creuset large de grands talents qui actuellement s'ignorent et alimentent les ministères, les bulles financières...

Domage que cet éditorial ne pose pas les vrais problèmes. [...]

René Bisaro ([renato.bisaro@thalesgroup.com](mailto:renato.bisaro@thalesgroup.com))

### Réponse

René Bisaro, chercheur chez Thales, nous adresse un courrier incisif, suite à l'éditorial du numéro 11 de *Reflets* sur les universités et les grandes écoles. Nous y préconisons un rapprochement progressif des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) et des premiers cycles universitaires, sans bouleverser notre système très français. R. Bisaro affirme que l'enseignement dans les CPGE, éloigné de la recherche actuelle, ne développe pas les qualités de créativité nécessaires, et il met en cause l'existence même des grandes écoles.

Nous partageons bien volontiers certaines de ses analyses : en effet, les grandes écoles prestigieuses forment de moins en moins d'ingénieurs. Actuellement, les carrières de la haute fonction publique ou de la finance attirent davantage les jeunes étudiants brillants, leur formation en sciences exactes est très incomplète et les grandes entreprises commencent à manquer de cadres scientifiques de très haut niveau comme, par exemple, dans le génie nucléaire [1, 2]. Sans détruire les grandes écoles (qui peut l'envisager sérieusement aujourd'hui ?), il faut trouver le moyen d'inciter tous leurs élèves à faire un passage par la recherche avant de se lancer dans la vie active. La proportion de docteurs sortie de ces écoles doit augmenter très fortement. C'est possible : les élèves de l'École Supérieure de Physique et Chimie de Paris (l'ESPCI) ou de l'École Supérieure d'Optique sont plus de 50% à y faire des thèses (suivies de carrières réussies), alors qu'ils sont moins de 10% dans le cas de l'École polytechnique. Pour les classes de CPGE, nous convenons avec R. Bisaro que leurs programmes de physique ont besoin d'être modernisés. Nous préconisons dans notre éditorial que leurs enseignants soient mieux couplés au monde universitaire. Nous sommes sans doute des optimistes (et des réformistes...), car nous pensons que des évolutions en ce sens sont possibles sans pour autant « casser » le système.

Michèle Leduc et Roger Maynard

[1] V. Mosser, « Faut-il encore enseigner la physique en Écoles d'ingénieurs ? », *Reflets de la physique* n°8 (2008) 23-25.

[2] V. Mosser, « Grandes écoles et formation des ingénieurs », pp. 63-68 des actes du Colloque d'Action Sciences du 5 avril 2008, « Quel avenir pour l'enseignement scientifique au lycée et dans l'enseignement supérieur ? », téléchargeable sur <http://vslovacekchauveau.free.fr/MetiersMaths/actes9sept.pdf>

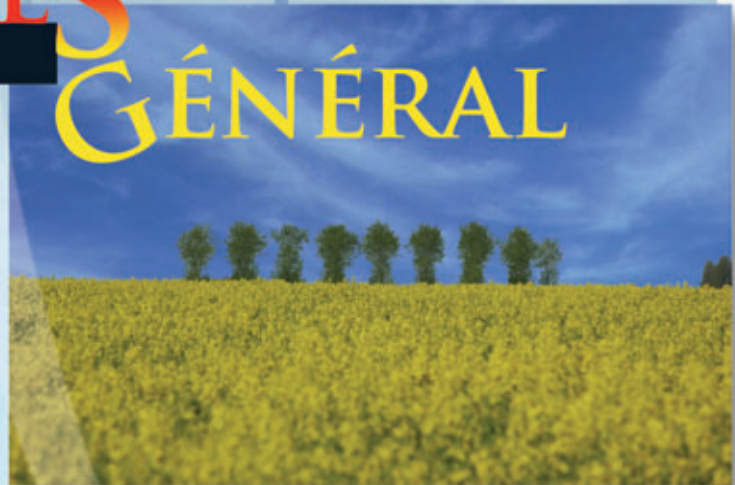


SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE



TRIANGLE  
DE LA  
PHYSIQUE

# CONGRÈS GÉNÉRAL



## Conférences plénières

David Bensahel  
Leticia Cugliandolo  
François Daviaud  
Mathieu de Naurois  
Louis Fayard  
Albert Fert  
Ray Golstein  
John Johanopoulos  
Ludwik Leibler  
David Pine  
Jean-Michel Raimond  
Tania Smith  
Paul Tafforeau  
Wendelin Werner  
Wolfgang Wernsdorfer

## Sessions parallèles

Astronomie gamma : une nouvelle ère avec Fermi  
Systèmes complexes : la physique statistique a perdu l'équilibre...  
Silicium et matière grise  
Matériaux et effets de taille : une convergence de la physique et de l'ingénierie  
Physique quantique dans tous ses états  
Terre et climat  
Outils pour explorer le monde de la physique  
Physique pour le vivant

# SFP2009

Du **6 au 10 juillet 2009**  
à l'**École Polytechnique**  
**Palaiseau**

**Président du conseil scientifique**  
**Michel Broyer**

**Présidente du comité d'organisation**  
**Élisabeth Bouchaud**

<http://www.sfp2009.polytechnique.fr>