

de la **PH** **reflets** **SIQUE**

n° 43
mars-avril 2015

www.refletsdelaphysique.fr

Revue de la Société Française de Physique

n° 43 - mars-avril 2015 - 10 - 5 numéros par an

Hommage à Jacques Friedel

Cinq contributions en hommage à ce grand physicien

Images de la physique

L'expérience LHCb au CERN

Science et société

Risques naturels, expertise et situation de crise



www.sfpnet.fr



Depuis 2013, le bac S est inadapté aux études supérieures de physique

Atterrés par ce constat alarmant, les présidents de l'Union des Professeurs de classes préparatoires Scientifiques aux grandes écoles (UPS), de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie (UdPPC) et de la Société Française de Physique (SFP) se sont adressés à Madame la ministre de l'Éducation nationale pour faire connaître l'ampleur du diagnostic* lors d'une entrevue, accordée le 25 mars 2015.

Le bac S (scientifique) est inadapté pour aborder les cinq années d'enseignement supérieur, universités et grandes écoles, ouvrant aux carrières scientifiques, celles qui mènent aux métiers de l'ingénieur comme celles qui préparent à la recherche.

En 2014, parmi les 163 100 lauréats du bac S, seuls environ 50 000 jeunes, le tiers, se lancent dans des études supérieures scientifiques pour obtenir un diplôme de sortie bac+5. (Le bac S, comme les autres bacs généraux, a un taux de réussite important, 89% en 2006 et 92% en 2014.)

L'enseignement supérieur a ainsi accueilli à la rentrée de septembre 2013 des étudiants ayant suivi les nouveaux programmes du lycée. La SFP, l'UdPPC et l'UPS ont alors décidé à la fin de l'année scolaire 2013-2014 de consulter* les enseignants de première année de l'enseignement supérieur (universités, IUT, classes préparatoires).

Constat : mener une démonstration développée en plusieurs étapes, maîtriser les outils de base de mathématiques, et s'astreindre à la rigueur pour construire un raisonnement sont des objectifs éliminés de la formation donnée aux bacheliers de la série S.

Éloignée de ces valeurs, une séquence de champs scientifiques, sans lien, sans objectif de progression, est proposée, limitée aux vertus culturelles, certes importantes, mais totalement inadaptées à la constitution d'un corpus de pratiques scientifiques. Une réduction des horaires, diverse dans le détail, mais globalement d'une heure en première et terminale, à la fois pour les mathématiques et la physique-chimie, associée à une évolution conséquente du programme de mathématiques, mine les bases de la formation scientifique au lycée, si nécessaire à l'économie française pour reconquérir un socle industriel actuellement très affaibli. Seuls les travaux personnels encadrés (TPE) échappent à la critique. En classe de première proposer aux lycéens de préparer un dossier synthétisant leur travail de recherche sur un sujet choisi ou de fabriquer un montage mécanique ou électronique recueille une opinion générale positive à laquelle nous nous associons.

Loin d'améliorer la transition lycée-postbac des étudiants des séries scientifiques, la réforme a creusé le fossé.

- L'enquête montre que les meilleurs étudiants scientifiques ont tendance à se détourner de la physique. Ils quittent le lycée avec une vision erronée des sciences physique et chimie. De nombreux étudiants sont désarmés et déçus quand ils constatent leur incapacité à utiliser des outils formels et à pratiquer des démarches scientifiques rigoureuses.
- Ces programmes ont été conçus avec l'idée que la majorité (2/3) des élèves de série S ne poursuivra pas d'études supérieures scientifiques. Cela se traduit par un *renoncement* à en asseoir les bases indispensables. Ce repliement sur un vernis culturel superficiel asséné par des arguments d'autorité est bien loin d'une vraie culture, tant les fondements d'une véritable démarche scientifique en sont absents. Les bacheliers S *collectionnent* des connaissances cloisonnées non consolidées : cette « culture scientifique mal digérée » survole de manière superficielle quelques sujets « scientifiques », bannit toute vision d'un continuum interdisciplinaire et ne construit aucun ancrage pour une véritable formation.
- La compréhension des démarches scientifiques est une construction lente, qui ne saurait attendre l'entrée dans l'enseignement supérieur. Elle requiert, en amont, *une pratique concrète de la démarche de modélisation mathématique*, essentielle à l'enseignement même et aux disciplines que sont la physique et la chimie. Ces concepts, ces outils sont absolument indispensables aux 50 000 étudiants formés dans les séries scientifiques de l'enseignement supérieur, en France ou à l'étranger.

Il est urgent d'agir, car l'effondrement durable de l'enseignement des sciences, physique et chimie, au lycée aura des conséquences graves, non seulement sur la formation de nos futurs citoyens mais aussi sur la formation et le recrutement des cadres scientifiques (techniciens, ingénieurs, entrepreneurs, chercheurs, professeurs...) dont la France a besoin pour maintenir son rang au sein d'une économie mondialisée.

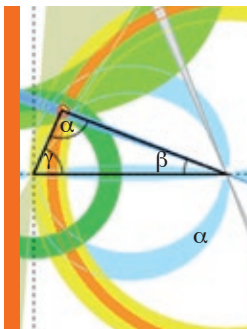
Sylvie Bonnet, présidente de l'UPS
Alain Fontaine, président de la SFP
Vincent Parbelle, président de l'UdPPC

* Pour l'UdPPC, deux publications en 2013 et 2014 :
www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php?ID_fiche=21693
www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php?ID_fiche=21402
Pour la SFP :
www.sfpnet.fr/uploads/tinyMCE/ResultatsenqueteSFPprogrammelycee-1.pdf



© Henri Feymann - Académie des sciences

p. 13



p. 22



© i.wikipedia

p. 43



© CNRS Photonique / Céline Anaya-Gautier

Travail sur une cuve à effet Cherenkov de l'Observatoire Pierre Auger. Voir article, p. 31.

Comité de rédaction

Président : Stefano PANEBIANCO

Membres : Michel BELAKHOVSKY - Irène BUVAT - Fabienne CASOU - David CÉBRON - Jean-Michel COURTY - Nicolas DELERUE - Olivier DULLEU - François GRANER - Étienne GUYON - Jean-Pierre HULLIN - Agnès JACQUESY - Michèle LEDUC - Stéphane MAZOUFFRE - Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS - Laurence RAMOS - Sophie REMY - Christiane VILAIN - Paul VOISIN

Ce numéro a été préparé avec la participation de l'Institut de Physique du CNRS.

Directeur de la publication : Jean-Jacques BÉNATTAR

Rédacteur en chef : Charles de NOVION

Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR

Réalisation graphique : Lætitia MORIN - web : laetitiamorin-graphiste.fr

Suivi de rédaction : Agathe CYMER

Service publicité : Jessica EKON - Tél. : 01 69 18 92 40

e-mail : publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 2^e trimestre 2015 - ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777 -

© SFP - Édité à 3000 exemplaires

Imprimerie Jouve

11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cédex 01 - Tél. : 01 44 76 54 40

Société Française de Physique

33, rue Croulebarbe, 75013 Paris - Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19

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

SFP Bulletin, Institut Henri-Poincaré,

11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris - e-mail : sfp-bulletin@ihp.fr

Serveur : www.refletsdelaphysique.fr

Éditorial

- 2 Depuis 2013, le bac S est inadapté aux études supérieures de physique et de chimie
Sylvie Bonnet, Alain Fontaine et Vincent Parbelle

Hommage à Jacques Friedel

- 4 Présentation
Michel Lannoo, Alain Fontaine et Pierre Radvanyi
- 6 L'apport de Jacques Friedel à la physique de la matière condensée
François Gautier
- 8 Nucléaire civil : les convictions de Jacques Friedel
Robert Dautray
- 10 Jacques Friedel, la métallurgie et l'industrie
Yves Bréchet
- 12 Plasticité ou fragilité de la recherche française en physique ?
Jacques Friedel

Histoire des sciences

- 14 La « dynastie Friedel » : une grande lignée de scientifiques
Olivier Hardouin Duparc

Images de la physique

- 18 Recherche d'une physique au-delà du modèle standard avec l'expérience LHCb au CERN
Frédéric Machefer

Avancées de la recherche

- 26 Les enjeux de l'hadronthérapie par ions carbone
Joseph Remillieux, Jean-Michel Moreau, Denis Dauvergne et Jacques Balosso
- 31 Les rayons cosmiques d'énergie extrême
Olivier Deligny et Tiina Suomijärvi
- 38 Indenter du verre avec un liquide ?
Richard Villey, Cécile Cottin-Bizonne, Liliane Léger, Élisabeth Charlaix et Frédéric Restagno

Science et société

- 41 L'école d'été e2phy 2014 : « La physique des extrêmes »
Arnaud Le Padellec, Vincent Moréas et Stefano Panebianco
- 42 Risques naturels, expertise et situation de crise
Michel Campillo, Christophe Voisin et Yves Nicolas
- 46 Jouer avec les chiffres du climat : une approche par budget carbone
Jacques Treiner
- 51 Pugwash : les physiciens, l'arme nucléaire, la responsabilité des scientifiques
Jacques Bordé, Nicolas Delerue et Annick Suzor-Weiner

Au sein et autour de la SFP

- 54 Actualités de la SFP
- 56 Prix scientifiques
- 57 La SFP, partenaire de ENOVA PARIS 2014
- 58 Les publications en physique au CNRS : combien, par qui et où ?
Martina Knoop, Lorenzo Brighigni et Bart van Tiggelen
- 61 Portrait : Julie Grollier, cerveau (spin)tronique
Mathieu Grousson,

Reflète de la physique et ses lecteurs

- 62 Notes de lecture



Hommage à Jacques Friedel



Jacques Friedel nous a quittés le 27 août 2014. Son décès constitue un événement douloureux pour tous les physiciens. La communauté scientifique française lui est extrêmement reconnaissante pour son apport exceptionnel au développement de la physique de la matière condensée.

Né le 11 février 1921 à Paris, Jacques Friedel est issu d'une famille de scientifiques. Rappelons quelques étapes de sa prestigieuse carrière. Après être passé par les lycées Louis-le-Grand et Henri IV, il étudie à l'École polytechnique puis à l'École nationale supérieure des mines de Paris, obtenant par ailleurs une licence ès sciences de l'Université de Paris. Il prépare son PhD à l'Université de Bristol dans le laboratoire de Sir Nevill F. Mott, puis soutient sa thèse de doctorat d'État à l'Université de Paris. Par la suite, il devient professeur à l'Université Paris-Sud où il fonde en 1959, avec André Guinier et Raymond Castaing, le

Laboratoire de Physique des Solides à Orsay, qui a été et est attractif pour nombre de grands professeurs venus du monde entier pendant leurs congés sabbatiques – certains futurs prix Nobel –, ou plus jeunes scientifiques venus bénéficier d'une excellente formation dans cet environnement exceptionnel.

Jacques Friedel a été président de la Société Française de Physique (1970), de la Société Européenne de Physique (1982-1984) et de l'Académie des sciences (1992-1994). Il a aussi été élu membre associé de l'Académie Nationale des Sciences américaine, de l'Académie Royale des Sciences suédoise et de la Royal Society anglaise. Il a reçu de nombreux prix : médaille d'or du CNRS en 1970, prix Holweck, Von Hippel award... Il a enfin été élevé à la dignité de grand'croix de la Légion d'Honneur en 2013.

L'apport de Jacques Friedel à la physique de la matière condensée, en particulier à la compréhension des propriétés électroniques, a été considérable. En premier lieu, il faut citer la découverte des « oscillations de Friedel », oscillations de densité électronique autour des impuretés dans les métaux, phénomène d'écrantage de portée très générale. Un autre aspect essentiel concerne la description des propriétés électroniques des solides par des méthodes simples : « électrons libres » et surtout « liaisons fortes ». Cette dernière, idéale pour décrire la liaison chimique, permet d'analyser, de façon très descriptive et efficace, les tendances dans les propriétés de cohésion et les excitations électroniques. Elle s'applique pratiquement à tous les types de matériaux : métaux de transition, semi-conducteurs, solides partiellement covalents et ioniques, cristallins ou amorphes... Elle est très utilisée actuellement en modélisation quantitative de composants électroniques nanométriques.

Pour terminer, ajoutons les apports de Jacques Friedel à l'analyse du rôle des défauts étendus des structures cristallisées (en particulier les dislocations, essentielles à la plasticité des métaux, auxquelles il a consacré un ouvrage en 1956, qui a connu un immense succès), à l'étude des cristaux liquides et aussi à la compréhension des différentes manifestations de la supraconductivité.

Jacques Friedel va nous manquer. Ses avis scientifiques, y compris les plus récents, ont toujours eu une très grande valeur pour nombre d'entre nous.

Michel Lannoo^(*) et Alain Fontaine^()**

^(*) Ancien président (2012-2013) de la SFP

^(**) Président de la Société Française de Physique (SFP)

Jacques Friedel, président de la SFP et de la Société européenne de physique

Jacques Friedel ne fut pas seulement un physicien de grand talent, mais également un homme soucieux de l'intérêt général, en particulier du développement et de l'organisation de la recherche en France. Il fut ainsi amené à devenir président de la Société française de physique (SFP) en 1970, puis de la Société européenne de physique (EPS) de 1982 à 1984 ; je le connus dans ces deux fonctions.

Tous ceux qui ont collaboré avec lui ont encore en tête – et ont peut-être conservé – ces petits mots manuscrits rapidement écrits, parfois dans un train, posant des questions ou faisant des remarques sur un problème lui tenant à cœur ; ils n'étaient jamais à négliger. On était frappé par la subtilité de son analyse et la sûreté de son jugement. Sa retenue et sa modestie étaient appréciées.

Jacques Friedel fut président de notre Société française de physique en 1970 et s'intéressa toujours à nos actions : chaque fois que la SFP souhaitait faire passer un message aux pouvoirs publics ou que lui-même sentait qu'un tel message était nécessaire, il prenait sa plume et écrivait un article significatif pour notre *Bulletin*. On peut ainsi suivre sa trace dans les numéros successifs.

« Laissera-t-on rouiller l'outil ? », son allocution lorsqu'il reçut la médaille d'or du CNRS est publiée en janvier 1971 ; il y relève la nécessité « du contact avec le monde de la physique appliquée, tant pour lui transmettre une connaissance utilisable que pour en tirer certains thèmes de recherche fondamentale. » Mais il ajoute : « Nous nous méfions de la tentation dirigiste en recherche fondamentale. » Il se préoccupa du recrutement des jeunes chercheurs, de l'emploi des jeunes docteurs, des moyens accordés à la recherche, ainsi que des publications de physique, notamment du *Journal de physique* qui se doubla d'un journal de lettres. Il accueillit dans son laboratoire le secrétariat de la Commission des publications, chargé de recevoir les manuscrits et de les envoyer aux rapporteurs.

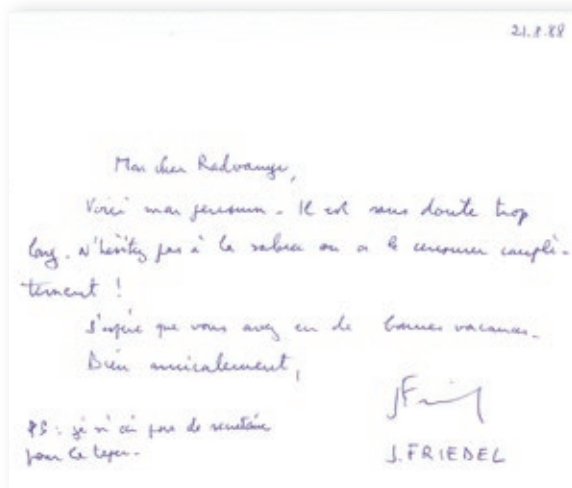
Il prit part à l'installation de la Société européenne de physique (EPS) qui se proposait, malgré la guerre froide, de réunir les physiciens de l'Ouest et de l'Est de l'Europe. Son siège fut d'abord fixé à Genève. J. Friedel devint membre de son Comité exécutif, puis en fut le président de 1982 à 1984. Là aussi, il s'intéressa particulièrement aux publications et s'efforça d'obtenir la fixation de certaines règles. Il était préoccupé par la double structure des adhérents de l'EPS : membres individuels et sociétés nationales, dont le rôle était essentiel. Il œuvra pour l'amélioration du travail des divisions de spécialité ; la division de la matière condensée se développa, mais il ne put pas empêcher la sécession des opticiens. Il préconisa l'étude d'une source européenne de rayonnement synchrotron.

C'était instructif d'observer de la salle, l'expression de son visage quand il était assis à la tribune lors d'une réunion de l'EPS : lorsqu'il fronçait le nez, je savais qu'il était en désaccord avec ce que l'intervenant était en train de dire. Nous nous sommes ainsi retrouvés à plusieurs reprises à Genève et nous nous asseyions quelquefois à la terrasse d'un café, évoquant les questions d'actualité.

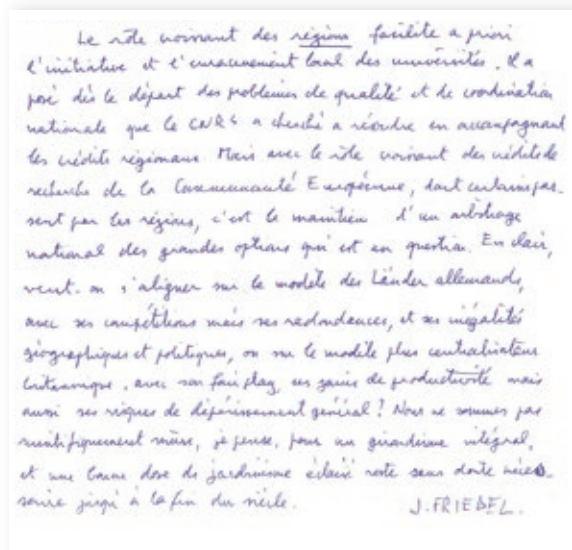
Une année, le directeur du CNRS arrivait en fin de mandat. Nous étions tous les deux assis au soleil à proximité du siège de l'EPS en attendant l'heure fixée. J. Friedel me raconta l'entrevue qu'il avait eue la veille à Paris avec le ministre et la discussion qu'ils avaient eue sur l'évolution de la recherche en France. Il se tut. Je sentis alors qu'il s'était passé quelque chose de plus ; je le regardai et lui dis : « Et le ministre vous a proposé de devenir directeur du CNRS et vous avez refusé ? » Il répondit : « Oui, c'est cela. », et il sourit.

Pierre Radvanyi

Ancien secrétaire général de la SFP, ancien membre du comité exécutif de l'EPS



[...]



Jacques Friedel s'est toujours soucieu du développement et de la qualité de la recherche en France ; il s'est souvent exprimé à ce sujet dans le *Bulletin de la SFP*. Ci-dessus le mot d'accompagnement et la conclusion de l'article « Où va la recherche universitaire ? » paru dans le *Bulletin de la SFP*, N° 70, p. 17, octobre 1988.

Un document de 16 pages, édité par la Société Française de Physique, réunit les contributions de plusieurs des collaborateurs et élèves de Jacques Friedel, qui retracent les divers aspects de sa très riche activité scientifique. Ce document (pdf) peut être téléchargé à l'adresse : www.sfpnet.fr/hommage-a-jacques-friedel.

L'apport de Jacques Friedel à la physique de la matière condensée

Jacques Friedel a joué un rôle majeur dans le développement des recherches concernant d'une part les défauts dans la matière condensée et leur impact sur les propriétés macroscopiques, et d'autre part les propriétés électroniques des solides en relation avec leur cohésion et leur structure.

Jacques Friedel débute ses travaux de recherche en 1948 au laboratoire de métallurgie de l'École des mines de Paris. La métallurgie est, à l'époque, une discipline en plein essor. Le rôle des défauts – ponctuels, linéaires, de surface ou d'interface – commence à être reconnu, mais n'a fait l'objet que de peu d'études. De nouvelles techniques permettent désormais d'étudier ces défauts. C'est ainsi que l'on peut, par exemple, visualiser les dislocations (décoration par des figures d'attaque chimique, spirales de croissance des cristaux) : celles-ci ne sont plus des objets mathématiques dont l'existence et le rôle ressortent de spéculations ! Par ailleurs, d'un point de vue microscopique, les bases de la physique des solides pour les cristaux parfaits sont établies ; en témoigne le livre de F. Seitz, *The modern theory of solids*, publié en 1940. Elles rendent désormais possible la compréhension détaillée de la cohésion, de la stabilité de phase, des propriétés des défauts, de leur structure, de leur stabilité, de leurs interactions et de leur dynamique.

Deux voies de recherche convergentes s'ouvrent : d'une part l'étude à une échelle « mésoscopique » des défauts et de leur impact sur les propriétés macroscopiques, d'autre part l'étude à l'échelle microscopique de la structure électronique des métaux, de leur cohésion et des défauts associés. Jacques Friedel développera ses recherches selon ces deux directions, dont le rapprochement apparaît, dès cette époque, comme une nécessité.

J. Friedel rejoint donc naturellement en 1949 le H.H. Wills Physical Laboratory de Bristol, où C. Franck et N.F. Mott développent ces orientations. Il y reste trois ans et y soutient sa thèse sous la direction de N.F. Mott sur les propriétés électroniques des impuretés dans les métaux. Il revient

en 1952 à l'École des mines de Paris. Il y crée un groupe de théoriciens ; celui-ci rejoint le Laboratoire de Physique des Solides d'Orsay (L.P.S.), que J. Friedel crée en 1959 avec André Guinier et Raymond Castaing. Dès lors, il anime le L.P.S. et y poursuit ses recherches avec ses élèves et collaborateurs.

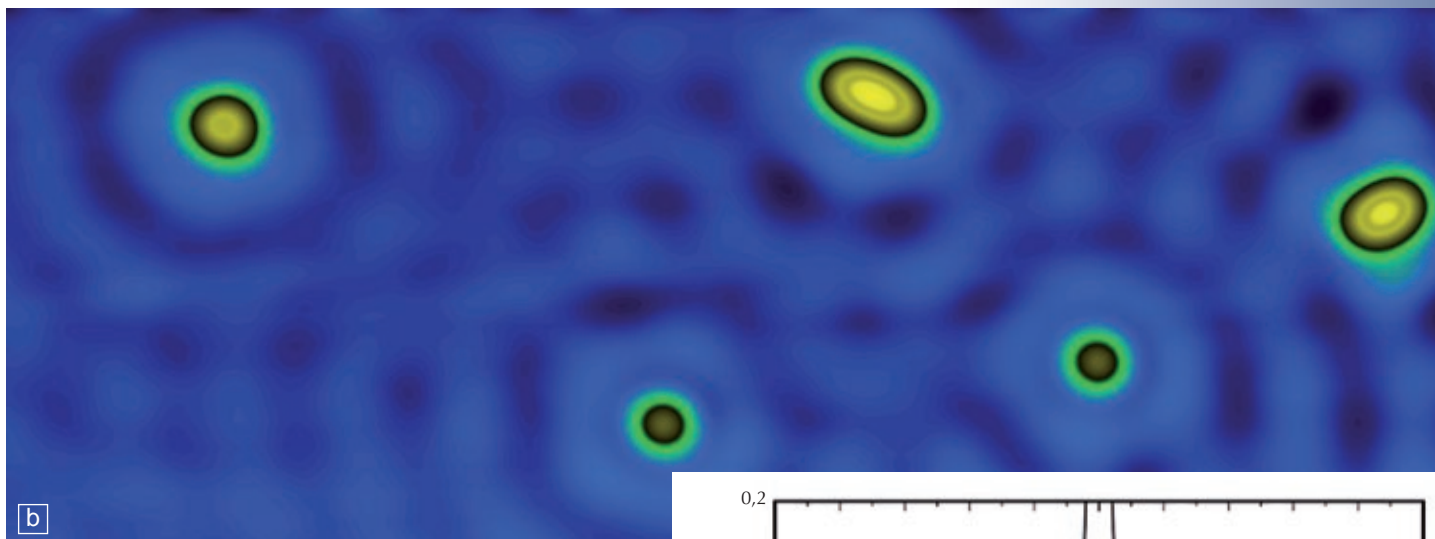
Parmi les résultats marquants de J. Friedel concernant les défauts dans la matière condensée et leur impact sur les propriétés mécaniques des matériaux, je me limite ici à citer quelques-uns des premiers travaux concernant la montée, le glissement dévié, les réseaux de dislocations, leur stabilité et leur évolution sous sollicitation, le durcissement par un réseau aléatoire d'obstacles, la fracture et, plus récemment, l'étude des disclinaisons dans les cristaux liquides. Il faut également rappeler ici le livre sur les dislocations qu'il a écrit dès 1956 [1] et qui reste un classique.

En ce qui concerne les propriétés électroniques des solides, J. Friedel introduit puis développe d'abord avec ses élèves l'étude des états d'impuretés et des propriétés des alliages métalliques dilués. Dans ses premiers travaux portant sur la structure électronique des impuretés dans les métaux [2], il utilise la théorie de la diffusion ("scattering") pour déterminer la variation de la densité électronique $\Delta n(r)$ induite autour d'une impureté par la charge supplémentaire Z apportée par celle-ci. L'écrantage de la charge Z par la redistribution électronique $\Delta n(r)$ doit être parfait. J. Friedel obtient alors une formule (règle de somme de Friedel) reliant Z aux déphasages δ induits par le potentiel de l'impureté dans les fonctions d'onde des électrons de conduction. Il montre que Δn décroît avec la distance r

de l'impureté comme r^{-d} (d = dimension de l'espace), en oscillant avec un nombre d'onde $2k_f$ égal à un diamètre de la surface de Fermi (fig. 1a). À trois dimensions et avec une surface de Fermi sphérique, on a $\Delta n(r) \sim r^{-3} \cos(2k_f r + \delta)$. Il a fallu plusieurs années pour se convaincre de la généralité et de l'importance de ces « oscillations de Friedel ». Elles sont maintenant observées directement par microscopie à effet tunnel (STM) sur une surface proche des défauts (fig. 1b), ou à l'intérieur d'un « corral » d'atomes déposés sur une surface.

Lorsqu'on introduit une impureté de métal de transition (Mn par exemple) dans un métal normal (Al, Cu...) dont les électrons de conduction sont de symétrie (s, p), les états localisés d de l'impureté interagissent faiblement avec le continuum d'états de conduction de la matrice : les électrons qui occupent ces états restent longtemps sur le site de l'impureté avant de sauter sur un site voisin. Ceci se traduit par un faible élargissement (Γ) en énergie (*via* la relation d'incertitude de Heisenberg) des états d et une forte augmentation de la densité d'états sur le site de l'impureté pour des énergies voisines de celle des états d , E_d (fig. 2). Par rapport au métal pur, l'alliage dilué est alors caractérisé par une forte augmentation des propriétés (chaleur spécifique électronique, résistivité résiduelle) dépendant de la densité d'états au niveau de Fermi E_f si $E_d \sim E_f$ et par un magnétisme local de l'impureté si de plus l'interaction coulombienne entre électrons sur l'impureté est suffisante. Ce modèle très populaire de « l'état lié virtuel de Friedel » a été reformulé en 1961 par P.W. Anderson.

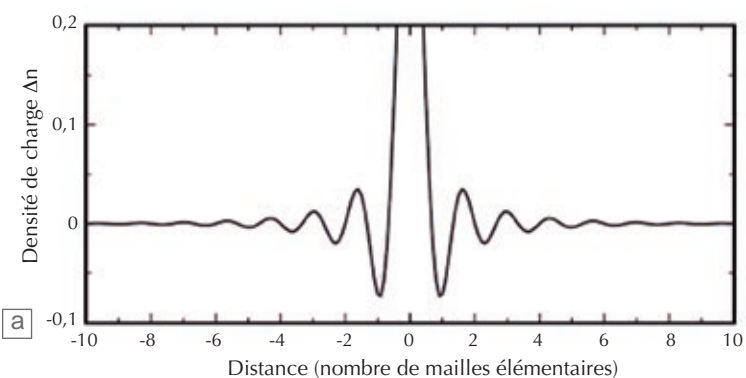
Les impuretés interagissent entre elles par un potentiel oscillant avec la distance comme $\Delta n(r)$. Ces interactions sont à la base de l'ordre local dans les alliages ; elles permettent de clarifier l'origine de leur stabilité et de déterminer l'énergie des défauts ponctuels ou étendus. Si, de plus,



1. Oscillations de Friedel dans un métal.

(a) Profil des oscillations à une dimension : variation de la densité électronique en fonction de la distance à une impureté située en $r = 0$ (d'après S. Ravy *et al.*, *Phys. Rev B* **62** (2000) R16231).

(b) Observation par STM des oscillations de Friedel d'un gaz d'électrons à deux dimensions, diffusé par des atomes uniques ou de petits amas d'atomes de cuivre (en jaune) adsorbés sur une surface plane (en bleu) de cuivre, orientée selon la direction cristallographique (111). Les différentes nuances de bleu traduisent les variations de densité électronique. (Dimensions de l'image : $18 \times 7 \text{ nm}^2$) (Avec la permission de G. Schull, IPCMS).



les impuretés sont magnétiques, elles interagissent magnétiquement avec un couplage oscillant. L'alliage dilué présente alors un ordre antiferromagnétique aléatoire gelé à basse température (verre de *spin*), qui a été introduit et étudié pour la première fois par J. Friedel et André Blandin.

Progressivement, Jacques Friedel et ses élèves ont ensuite développé au Laboratoire de Physique des Solides d'Orsay une description générale des propriétés électroniques des matériaux métalliques ou semi-conducteurs, de leur cohésion, de leurs défauts, que ces systèmes soient de

basse dimensionnalité ou non, cristallins, amorphes ou liquides. Cette description, qui utilise l'approximation des liaisons fortes, les électrons étant dans le régime des corrélations faibles, est simple, physiquement transparente et adaptée à beaucoup de situations physiques.

Ainsi, J. Friedel et ses élèves ont montré que les propriétés spécifiques des métaux et alliages de transition, et en particulier leur magnétisme, proviennent des électrons *d* itinérants dans un régime de corrélations modérées. Ils obtiennent, par exemple, une interprétation physique des moments magnétiques à basse température des alliages de nickel, cobalt et fer (courbe de Pauling-Slater), en supposant que l'écran se forme essentiellement dans les bandes *d* et que, si la perturbation induite par l'impureté est trop forte dans le nickel ou le cobalt, un état lié est extrait du haut des bandes majoritaires en *spin*, les électrons occupant cet état étant transférés dans les bandes minoritaires. Ce modèle a permis ultérieurement de comprendre les couplages magnétiques et la magnétorésistance géante dans les super-réseaux métalliques [3].

La voie a été ainsi ouverte vers l'étude de composés à base de métaux de transition (hydrures, borures...) ou de systèmes complexes exhibant des propriétés très différentes selon leur structure atomique, la nature des orbitales mises en jeu et l'importance des corrélations. Elle est pro-

longée actuellement en utilisant des méthodes plus sophistiquées, permettant éventuellement l'étude des systèmes à corrélations fortes (oxydes, par exemple).

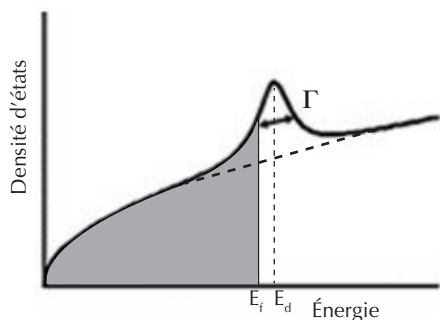
Au contraire des électrons *d* des métaux de transition, les électrons *4f* des terres rares et de leurs composés sont localisés : leur rôle a été étudié par P.G. de Gennes.

Enfin, J. Friedel a proposé une première classification des actinides, en liaison avec le remplissage et la localisation progressifs des états *5f*.

Les travaux de Jacques Friedel permettent de faire reposer sur de solides bases physiques les recherches qui se développent actuellement sur la matière condensée en utilisant des techniques numériques complexes et dans des domaines très variés, qu'il s'agisse par exemple de nanostructures en spintronique ou d'alliages multicomposants et de leur nanostructuration.

François Gautier

Professeur honoraire à l'Université de Strasbourg



2. Niveau lié virtuel. Pic de densité d'états électroniques, de largeur en énergie Γ , associé à une impureté non magnétique de métal de transition dans un métal « normal ». E_d : énergie du niveau atomique *d* de l'impureté. E_f : énergie de Fermi de la matrice. Les états électroniques *d* de l'impureté sont partiellement occupés.

En savoir plus

- 1• J. Friedel, *Les dislocations*, Gauthier Villars, Paris (1956). (2^e édition en anglais, Pergamon, 1964).
- 2• J. Friedel, "Metallic alloys", *Nuovo Cimento*, **7**, Suppl. 2 (1958) 287-311.
- 3• A. Fert, « Les débuts de la spintronique », *Reflète de la physique* **15** (2009) 5-9.

Nucléaire civil : les convictions de Jacques Friedel

En s'intéressant aux problèmes du nucléaire civil, Jacques Friedel répétait sa conviction qu'avec la croissance démographique dans les pays en voie de développement, les besoins de nourriture et d'eau, tant pour la consommation directe que pour l'agriculture, les soins médicaux, les concentrations urbaines et suburbaines, il fallait des sources massives d'électricité. L'énergie nucléaire, une fois les problèmes cités ci-dessous réglés, lui paraissait une des sources d'énergie nécessaires. Sur son lit d'hôpital, cette réflexion sur ce monde tragique, douloureux pour tant de personnes, sur la nécessité pour qu'ils aient une vie décente d'avoir accès à l'énergie électrique, n'a pas cessé.

Dans les années 1955-1965, le déchiffrement de la métallurgie du plutonium, avec les électrons de la couche 5f partiellement délocalisés à l'origine d'un diagramme de phases complexe et de propriétés physiques anormales (telle que la dilatation thermique négative de la phase δ), nécessita un travail en profondeur. Le responsable CEA de l'époque, Emmanuel Grison, fit appel à Jacques Friedel pour le prier d'aider ses équipes. Cette collaboration allait augmenter, à mesure que les problèmes liés aux matériaux dans les réacteurs nucléaires étudiés à Saclay se révélaient cruciaux.

En 1995, le gouvernement voulut qu'un rapport soit réalisé sur l'utilité du prototype de réacteur à neutrons rapides (RNR) **surgénérateur** Super Phenix. Le ministre demanda à Jacques Friedel de prendre la direction d'un groupe de travail pour écrire ce rapport. J. Friedel jugea qu'il n'avait pas assez de temps pour mener cette tâche, mais assez pour y participer. Raymond Castaing accepta la tâche et créa ce groupe de travail, dans lequel Jacques Friedel s'intéressa en particulier aux propriétés mécaniques des matériaux, tant pour les structures du cœur que pour les gaines des crayons combustibles.

Après cette expérience, le projet de concept de réacteur de puissance pour les futures centrales électronucléaires qui intéressait le plus Jacques Friedel était, pour le long terme, après les réacteurs à eau pressurisée (REP) actuels et les futurs EPR (European Pressure Reactors), le **surgénérateur**, basé sur un spectre de neutrons (dit rapides, d'où le sigle RNR) dont le maximum se situe à une énergie de l'ordre de 0,2-0,3 MeV. À l'initiative de

Jacques Friedel et de ses collègues intéressés, plusieurs colloques de comparaison des phénomènes de matériaux advenant dans ces RNR ont été tenus à l'Académie des sciences. L'objectif de Jacques Friedel, Yves Bréchet, Georges Martin, André Pineau et moi-même, en coorganisant et menant ces colloques, était que les jeunes scientifiques et techniciens disposent d'outils synthétiques pour saisir des champs de connaissance vastes et compliqués. Le souci majeur de Jacques Friedel était l'augmentation des **ressources** utilisables de noyaux fissiles, grâce à un concept **d'économie des neutrons** favorisant leur capture par des noyaux fertiles. C'est le trait essentiel des surgénérateurs (voir encadré).

Pour tirer le maximum d'énergie thermique de chaque unité de volume du cœur, il faut **augmenter le flux de neutrons**. Mais la puissance thermique produite par les fissions est limitée par la possibilité de l'extraire du cœur par un fluide caloporteur. Pour avoir un rendement de Carnot aussi élevé que possible, au-delà des 34% des REP actuels, il faut que la température de

la source de chaleur soit la plus élevée possible. Dans les REP, la limite de température est donnée par la condition de ne pas laisser le fluide caloporteur bouillir, soit 350 °C à une pression d'eau de 140 bars.

Les **fluides caloporteurs** envisagés pour les RNR (sodium, plomb liquide, hélium, sels fondus de fluor) permettraient d'atteindre 550 à 600°C, visant des rendements thermodynamiques de près de 40%. Les accidents ont notamment illustré les limites physiques des matériaux des gaines. Jacques Friedel *et al.* organisèrent à l'Académie des sciences un colloque sur les fluides caloporteurs possibles pour les RNR [1]. Pour ces derniers, plusieurs fluides ainsi que différents **matériaux des circuits** (dont les gaines des éléments combustibles) qui les contiennent, sont envisagés.

Il reste à concevoir et développer les **matériaux capables de supporter les irradiations à de hauts flux de neutrons, ces températures, les contraintes mécaniques engendrées par les gradients de source et d'évacuation de la chaleur**. La fragilisation sous irradiation des aciers des cuves de réacteurs des deuxième et troisième générations est déjà un facteur limitant leur durée de fonctionnement. Ces réflexions sur les **matériaux** furent menées à l'Académie des sciences (réf. [2], pp. 499-500). Jacques Friedel y déploya sa profonde compréhension des mécanismes à l'œuvre dans les conditions physiques citées ci-dessus.

Les surgénérateurs

Les surgénérateurs sont des réacteurs qui produisent plus de matière fissile qu'ils n'en consomment. Dans les REP et EPR classiques, on n'utilise que les 0,72% d'uranium 235 fissile contenu dans l'uranium naturel. Dans la filière uranium/plutonium, la surgénération vise à tirer profit des 99,28% d'uranium 238 non fissile mais « fertile », la capture de neutrons par U^{238} conduisant au plutonium 239 fissile. Les lois de la neutronique montrent que cela est possible, à condition :

- d'utiliser un combustible fait de Pu^{239} fissile et d' U^{238} fertile en proportions convenables ;
- de ne pas ralentir les neutrons avec un modérateur, c'est-à-dire d'utiliser des neutrons rapides.

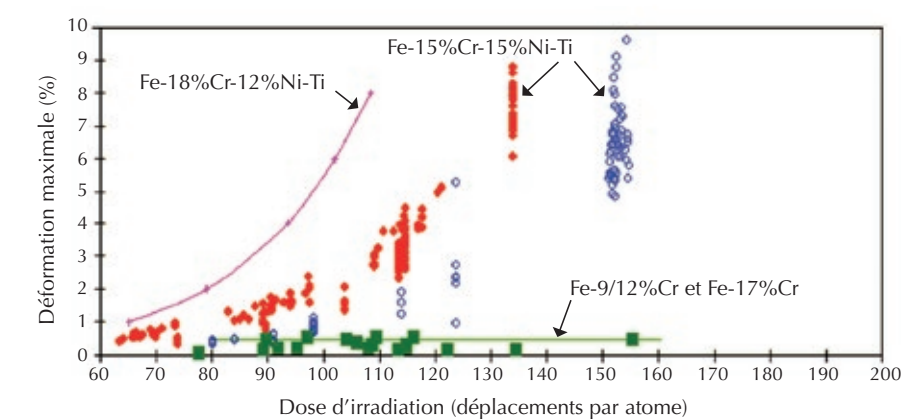
Les surgénérateurs produisent donc de l'électricité tout en consommant U^{238} , ainsi que le Pu^{239} récupéré dans le retraitement des combustibles usés des réacteurs REP. Ceci permettrait de gagner un facteur 40 à 50 sur les ressources de matière fissile disponibles.

On sait que les noyaux radioactifs à demi-vie longue formés dans les cœurs des réacteurs posent problème pour leur **stockage définitif**, par exemple en **couche géologique souterraine**. L'un des degrés de liberté du système de stockage est la capacité d'un **conteneur de substances radioactives** à être totalement étanche pendant de très longues durées, ce qui est un problème de **matériaux** que Jacques Friedel *et al.* étudièrent (réf. [2], pp. 489-490).

Le rôle des divers isotopes du **plutonium** dans le cycle du combustible en France a préoccupé Jacques Friedel *et al.* [3]. Quel sort donner aux actinides produits durant l'irradiation des éléments combustibles et conduisant à l'accumulation des isotopes de l'américium, du curium et du neptunium (isotope Np^{237} , de demi-vie $2 \cdot 10^6$ ans) ? La solution de les irradier en réacteur dans des cibles, pour les réduire à des produits de fission à demi-vie courte, exige de disposer de matériaux capables de supporter, outre les conditions extrêmes du cœur déjà citées, les pressions internes à ces cibles engendrées par les gaz de fission, les particules α et les fissions spontanées, toujours présents, même quand la cible est sortie du cœur du réacteur.

Une question lancinante des entretiens de Jacques Friedel *et al.* a été de s'interroger sur la possibilité de **comparer entre eux les risques** des grands systèmes technologiques, et notamment, pour le nucléaire civil, des **accidents majeurs dispersant des substances radioactives** dans de vastes régions, dans l'atmosphère, dans les eaux tant du sol que météoriques, et cela pendant des durées indéfinies. S'agit-il d'une propriété du nucléaire civil, ou bien d'une caractéristique des concepts actuels de réacteurs basés sur des combustibles solides ? Quels sont les moyens d'agir sur ces grands systèmes nucléaires pour minimiser leurs risques et leurs conséquences ?

Nous avons observé que le fait le plus important du nucléaire civil depuis son début dans les années 1950 est que les réacteurs de fission, modérés et refroidis à l'eau ordinaire, sont devenus le concept international utilisé par la majorité des



Déformation de gonflement en fonction de la dose pour plusieurs aciers irradiés aux neutrons rapides. Les compositions des aciers sont indiquées sur la figure. (D'après J.L. Séran, communication personnelle.)

entreprises de production d'électricité. Ceci est dû largement aux **qualités physiques, chimiques et mécaniques des aciers et des alliages de zirconium** en contact avec les fluides caloporteurs.

Nous avons constaté que tous les **combustibles utilisés dans les centrales électronucléaires actuellement en fonctionnement sont en matériau solide**. On ne peut donc les sortir du réacteur qu'à de très longs intervalles se comptant en années, pendant lesquelles ils deviennent des agrégats de produits de fission et d'actinides radioactifs mélangés, sources de chaleur et de substances radioactives gazeuses ou volatiles pouvant être dispersées en cas de défaillance des gaines. Peut-on faire progresser la sûreté nucléaire par une **modification de ce paradigme de la physico-chimie des installations nucléaires** ? Un exemple, avec un combustible fluide, en est donné dans la référence [4].

C'est en pesant chaque mot que Jacques Friedel *et al.* ont écrit (réf. [2], p. 509) : « Dans la perspective de centrales électronucléaires construites dans le monde entier, on peut se demander si les préoccupations concernant l'emploi présent et futur de l'énergie électronucléaire sont justifiées. L'une d'elles est inéluctable... C'est que toute centrale électronucléaire (avec les installations

associées du cycle de combustible), où qu'elle soit située dans le monde, ne devrait impliquer que des personnels expérimentés, munis des équipements en état de marche, toujours prêts à intervenir à tout moment, en cas d'événements naturels, de bouleversement politique ou belliqueux, ou de troubles des grands systèmes. Une telle surveillance devrait être maintenue, pendant le fonctionnement... et tant que les éléments combustibles irradiés sont dans le bâtiment du réacteur. L'électricien français et l'autorité de sûreté ont assumé, jusqu'ici, tous les aspects de cette tâche rigoureuse et vigilante. »

Robert Dautray

Membre de l'Académie des sciences
Ancien Haut-Commissaire à l'énergie atomique

En savoir plus

- 1 • Fluides caloporteurs pour réacteurs à neutrons rapides, Académie des sciences, EDP Sciences (2014).
- 2 • R. Dautray, J. Friedel et Y. Bréchet, « Réflexions sur l'avenir de l'énergie nucléaire, de la France d'aujourd'hui au monde de demain : II^e à IV^e générations », *C.R. Physique* **13** (2012) 480-518.
- 3 • « Le plutonium et la cohérence du parc électronucléaire français », *C.R. Physique* **14** (2013) 228-247.
- 4 • « Contrôler et limiter la dispersion des produits radioactifs des centrales électronucléaires en cas d'accident », *C.R. Physique* **15** (2014) 481-508.

Jacques Friedel, la métallurgie et l'industrie

La métallurgie traverse toute la carrière de Jacques Friedel, depuis ses tout premiers travaux sur l'énergie des joints de grain, effectués dans le laboratoire de son cousin C. Crussard, ou sa thèse avec N.F. Mott sur les états liés virtuels, jusqu'à ses dernières ré exions sur la dynamique du frottement entre plaques tectoniques, et sur la structure électronique des quasicristaux.

J. Friedel est au tout premier rang des fondateurs de la discipline, puis parmi ceux qui portent la science des matériaux, héritière de la métallurgie, et en n parmi ces scienti ques qui s'intéressent presque instinctivement aux applications industrielles de leur domaine, au nombre desquels sont des noms aussi prestigieux que Kelvin, Pasteur ou de Gennes.

Le siècle d'or de la métallurgie les pères fondateurs

Jacques Friedel était l'incarnation de la métallurgie « moderne ». Longtemps empirique, la métallurgie s'est constituée comme véritable science dans les années 1930-60, période où ont émergé les concepts fondateurs de la discipline et les grands noms qui les ont portés :

- la théorie des défauts avec G.I. Taylor, E. Orowan, J. Eshelby, N.F. Mott, F.R.N. Nabarro, P. Haasen, A. Seeger, A. Cottrell et J. Friedel ;
- la théorie électronique de la cohésion des solides, avec encore N.F. Mott, J. Friedel, A. Cottrell, W. Kohn ;
- la théorie des transformations de phases, avec C. Zener, D. Turnbull, J.W. Cahn, M. Hillert, J.W. Christian, W. Mullins, M. Flemings.

Deux générations ont ainsi construit la discipline en tant que science théorique, pendant qu'en parallèle, une floraison de méthodes expérimentales nouvelles sont apparues :

- microscopie électronique, avec P.B. Hirsh,
- diffusion centrale des rayons X puis des neutrons, avec A. Guinier,
- analyse chimique locale, avec R. Castaing.

Ces méthodes ont apporté une moisson de résultats qui ont fondé solidement la volonté de cette métallurgie nouvelle de comprendre les propriétés des métaux et alliages à partir d'une compréhension fine des microstructures, et de comprendre l'influence des procédés de transformations *via* la genèse des microstructures.

On ne dit avec quelque apparence de raison qu'en lisant attentivement les premiers volumes de la revue *Acta Metallurgica* entre 1958 et 1968, on avait l'essentiel des idées en place, dans leur lumineuse simplicité, et que les deux générations suivantes ont essentiellement écrit des notes de bas de page des travaux de ces géants, dont au tout premier rang, J. Friedel et son jumeau britannique A. Cottrell^(a).

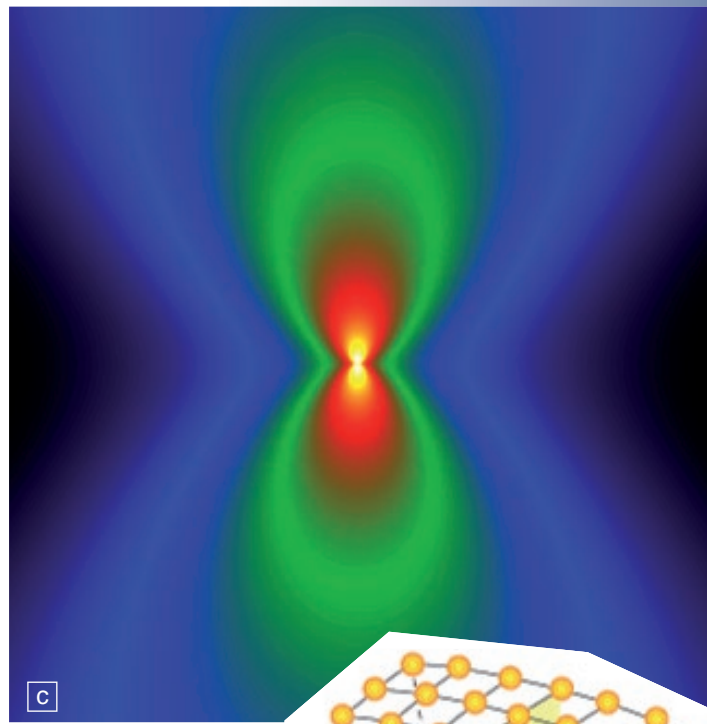
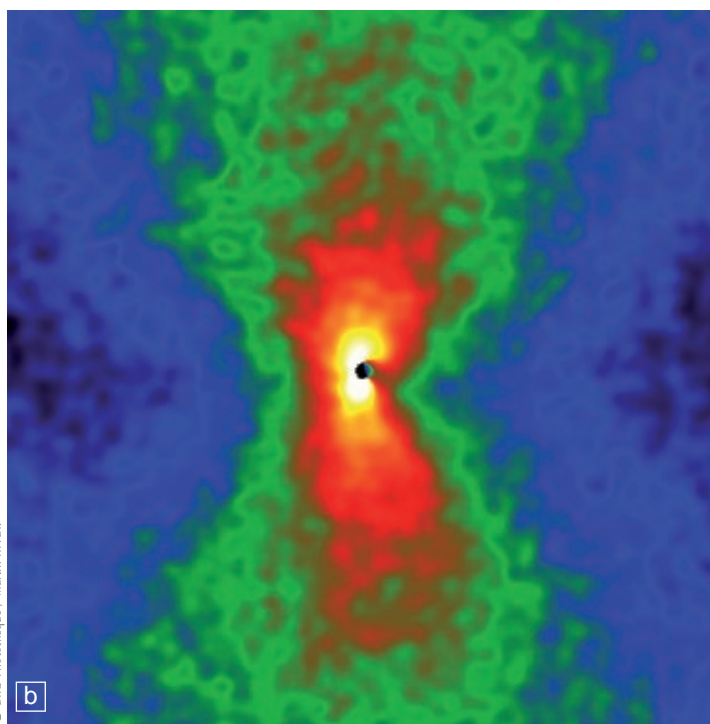
La génération suivante, celle des élèves de Friedel en France, a permis le plein développement de ces idées et de ces méthodes, et a en quelque sorte irrigué le territoire académique français : Poitiers, Lille, Lyon, Nancy, Saint-Étienne, Grenoble... Dans chacune de ces villes on peut sans difficulté construire une généalogie scientifique qui, immanquablement, remonte à Friedel. On ne compte plus les témoignages de ceux qui, dans les années 1970, ont pu monter des groupes de recherche grâce aux « actions thématiques programmées » que Friedel orientait judicieusement.

Il ne fut pas très favorable au calcul numérique intensif en métallurgie, son goût le portant naturellement vers les « petits modèles simples ». Mais au travers de ses visites régulières au laboratoire de Y. Adda puis G. Martin (SRMP, CEA/Saclay), il en suivait les développements, et les guidait par ses questions touchant directement le cœur des problèmes, au-delà des images séduisantes. Il y avait du calviniste dans ce regard critique sur « l'iconographie numérique ».

Faire sortir la métallurgie de son ghetto : vers une science des maté

L'examen de la longue et riche carrière de Jacques Friedel montre à quel point il était conscient que la vraie place de la métallurgie était au cœur de la science des matériaux. Les concepts développés pour les métaux, en particulier ceux des défauts topologiques, s'avèrent très fertile dans d'autres domaines. Rejoignant en cela C. Franck et P. Haasen, il s'est intéressé aux dislocations et disinclinaisons dans les cristaux liquides, aux concepts de plasticité des ondes de densité de charge (où, comme pour les réseaux de vortex dans les supraconducteurs, les dislocations jouent un rôle clé dans la compréhension des courants critiques).

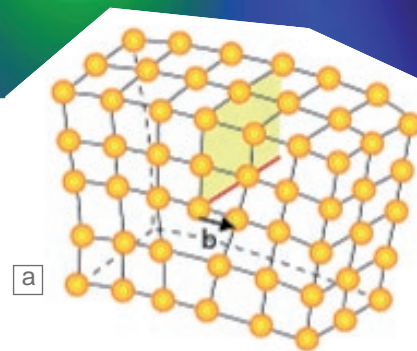
Dans ses toutes dernières années, il travaillait sur la plasticité des métaux nanostructurés. Il n'a jamais cessé de s'intéresser aux structures électroniques, des métaux et alliages en général, mais aussi des agrégats, des quasicristaux, des supraconducteurs à haute température. Une anecdote pour montrer l'étendue de sa curiosité : présidant le groupe de travail de l'Académie des sciences sur les aspects séismiques de l'accident de Fukushima (à plus de 90 ans, il y voyait « une occasion d'apprendre quelque chose »), il faisait part dans sa correspondance de quelques idées simples pour estimer l'amplitude du glissement des plaques tectoniques, s'appuyant sur les concepts de mouvements des dislocations, qu'il avait forgés pour de tout autres questions.



Champ de déplacement d'une dislocation coin dans un réseau cristallin cubique.

(a) Schéma d'une dislocation coin de vecteur de Burgers **b** : en rouge, la ligne de dislocation. Autour de la dislocation, le cristal se déforme différemment selon les directions cristallographiques.

(b) Champ de déplacement dans le plan perpendiculaire à la ligne de dislocation, mesuré dans le silicium par microscopie électronique en transmission à haute résolution, et obtenu avec une précision de $3 \cdot 10^{-12}$ m par la technique « d'analyse des images de phase ». Ce résultat est en bon accord à l'échelle nanométrique avec les déplacements calculés par la théorie élastique anisotrope (c).



La métallurgie et l'industrie : une inquiétude militante

Jacques Friedel est issu d'une dynastie de scientifiques. Il est aussi apparenté à une dynastie d'industriels. Il n'a jamais oublié que la métallurgie est une science mais aussi une industrie, et que cette industrie ne sera innovante et compétitive que si elle sait s'approprier et soutenir la recherche de base. Peu de gens ont eu comme lui cette intuition des problèmes fondamentaux posés par les questions industrielles, et des conséquences appliquées des développements fondamentaux. Dans le domaine de la métallurgie nucléaire qui l'a toujours intéressé, il voyait à la fois ce que la physique fondamentale des solides pouvait permettre de comprendre sur la chimie des actinides, mais aussi la richesse des comportements sous irradiation des populations de défauts. En ce sens le parallèle avec de Gennes dans le domaine de la « matière molle » vient de suite à l'esprit : irriguer d'un double flux la science et

l'industrie, chacun continuant à faire son métier dans le respect de celui de l'autre. En des temps de programmation tatillonne, la leçon mérite d'être méditée.

Il était de la génération pour laquelle le centre de recherche de la sidérurgie (IRSID) à Saint-Germain-en-Laye avait été une école de problèmes fondamentaux. Combien se souviennent aujourd'hui de ce beau papier qu'il écrivit sur les instabilités des interfaces métal-laitier ? Jacques Friedel n'avait de cesse de critiquer le désengagement de l'industrie française de la recherche fondamentale en métallurgie, et il y voyait un risque grave pour notre pays... L'avenir lui a hélas donné raison et, au moment où on parle de réindustrialisation, on ferait bien de se souvenir de cette grande voix. Il n'était pas plus tendre pour Philips ou France Télécom. C'est qu'il y avait du « grand commis de l'État » dans ce Professeur, un engagement fort au service du pays, par des rapports toujours incisifs^(b).

Il avait vivement encouragé la rédaction du rapport conjoint de l'Académie des

sciences et de l'Académie des technologies sur la métallurgie^(c), il en a suivi la rédaction, il en a fait la lecture critique et l'a présenté à l'Académie des sciences en personne. On ne peut mieux faire pour conclure que de lui laisser la parole...

Yves Bréchet

Membre de l'Académie des sciences

« Il faut bien comprendre au contraire que ce qui est demandé est un changement d'attitude vers le long terme et des mesures initiales qui touchent plus à l'organisation de ce qui existe qu'à des dépenses supplémentaires importantes. [...] La crise actuelle n'est pas plus importante que celle des années 30. Or c'est dans les années 30 que les firmes sidérurgiques françaises ont décidé de créer un laboratoire commun qui deviendra l'IRSID [...]. Le décret Suchet en 1939 faisait obligation à tous les corps de l'État d'affecter à la recherche 10% de leur personnel. Cette mesure simple et peu coûteuse a été un facteur positif pour le renouveau de la recherche après-guerre, notamment en métallurgie. »

Jacques Friedel

(a) Il ne faut, en aucun cas, voir dans cette phrase une dépréciation des successeurs, mais plutôt un écho du mot de Bertrand Russell, disant que toute la philosophie se bornait à une série de notes en bas de page d'une édition de Platon : les bonnes questions sont posées dès l'origine, permettant des développements fructueux.

(b) Celui rendu à Raymond Barre en 1980 sur la recherche gagnerait à être relu aujourd'hui, il n'a pas pris une ride...

(c) *La métallurgie, science et ingénierie* (2011). La présentation du rapport à l'Académie par J. Friedel est un modèle du genre : vision cohérente de la recherche, de l'enseignement et de l'industrie, réflexions sur le passé, vue d'ensemble de la discipline et de ses ramifications, recommandations pour l'avenir. Voir aussi *Reflets de la physique* 24 (2011) 16-20.

Plasticité ou fragilité de la recherche française en

Nous publions ci-dessous un texte de Jacques Friedel, paru en mars 2004 dans le numéro 143, page 31, du Bulletin de la Société Française de Physique, à la suite de la crise grave de financement de la recherche de 2003-2004. On ne peut qu'être frappé par la justesse et l'actualité du propos, plus de dix ans après sa publication.

La rédaction

Lancée par des patrons des sciences de la vie [*Appel de Cochin, 4 avril 2003*], la protestation récente concernant les crédits de recherche dénote un mécontentement plus général. Dans un contexte certes difficile, le budget de la recherche semble géré de façon assez chaotique, peu favorable aux initiatives au niveau des laboratoires. L'exemple de la physique montre que les problèmes sont profonds et généraux. Ils méritent une réflexion à long terme, pour laquelle une réunion style colloque de Caen 1956 ne peut être utile que si elle est largement préparée et suivie d'autres initiatives. En fait, la crise de la recherche reflète la crise de notre société.

Trois facteurs se conjuguent en effet, comme nous le voyons bien en physique : démographique, économique et culturel.

Démographie : l'afflux des jeunes, les besoins de la reconstruction, le développement des villes aux dépens de la campagne, ont produit après la dernière guerre un accroissement considérable du monde universitaire, comme de la recherche. Le développement, plus tardif en France que dans les pays anglo-saxons, produit la vague de retraites actuelle. Et le volume et l'intensité de la recherche vont être difficiles à maintenir globalement, du simple fait d'une natalité française défailante. La situation sera encore plus tardive et catastrophique en Allemagne. Mais même aux États-Unis, les seules solutions, en sciences pour l'ingénieur (SPI) et en physique, sont la formation et l'utilisation majoritaires de chercheurs étrangers, essentiellement d'Extrême-Orient, et plus récemment la délocalisation partielle du développement et même de la recherche dans ces mêmes pays.

Économie : le deuxième facteur négatif provient d'un désinvestissement progressif dans la recherche industrielle. Du fait, entre autres, que les revenus industriels sont à la base d'une fraction importante des fonds de retraite, les industries dépendent de plus en plus d'actionnaires qui exigent des revenus annuels importants et garantis. Ceci privilégie les directeurs financiers plutôt que les techniciens, et l'achat ou la vente de firmes par appartements plutôt que le maintien d'une recherche et d'un développement à long terme. À l'extrême, les laboratoires industriels sont remplacés par des contrats avec des PME que l'on soutient en partie, souvent délocalisées dans les pays du tiers-monde. À cette tendance générale s'ajoute, pour la physique et un certain nombre de SPI, une diminution de l'effort de recherche dans les secteurs nationalisés en cours de dénationalisation. De même, dans le secteur de la défense nationale, l'évolution rapide des problèmes à résoudre et des techniques est un facteur d'instabilité.

Culture scientifique : l'évolution des modes d'information scientifique conduit à une domination de fait de la recherche anglo-saxonne. Ainsi, pour les publications, leurs journaux privés, dont les politiques sont loin d'être neutres, sont considérés par les jeunes chercheurs, en physique comme ailleurs, non seulement comme le *nec plus ultra*, mais en fait comme la seule référence valable. Les communications par courriel et les index de citation complètent actuellement un effort – peut-être inconscient – d'imposer trop tôt un *credo* unique sur les problèmes scientifiques pendants. De même, toute réflexion prospective sérieuse par les chercheurs eux-mêmes semble le plus souvent abandonnée à l'échelle nationale ou même européenne, à l'exception de quelques grandes machines de hautes énergies ou d'astrophysique, ou de secteurs comme l'espace ou la fusion nucléaire où l'Europe semble actuellement distancée, pour des raisons peut-être plus politiques que scientifiques.



Jacques Friedel avec Sébastien Candel, actuellement vice-président de l'Académie des sciences.

Que faire ? On peut penser que ces problèmes rendent la situation **éminemment plastique** : il devient beaucoup plus facile de circonscrire les citadelles vieillissantes ; il devient concevable d'éteindre de larges secteurs considérés comme endormis, pour développer les secteurs d'avenir. C'est en fait ce qui a été répété depuis deux ans au moins : il faudrait se concentrer sur quelques domaines – sciences de la vie, mathématiques appliquées, environnement... – imitant les Anglo-saxons, il faudrait stimuler les jeunes chercheurs en privilégiant les petits groupes productifs et pas chers, menés par des chefs de projet recrutés pour un temps limité, ayant si possible un pied – ou les deux – dans l'industrie.

Mais en France, la recherche semble trop **fragile** pour ce jeu. Ainsi, à force d'affirmer que, des sciences, seules celles du vivant avaient un avenir, mais en contingentant en même temps la formation médicale sans prévoir de places claires pour les futurs chercheurs, on a convaincu l'ensemble des jeunes de se détourner de toute formation scientifique universitaire. Sans cette pression à la base, toutes les filières scientifiques universitaires, biologie comprise, voient naturellement leurs postes libérés par les retraites s'évaporer au profit d'autres secteurs, moins porteurs encore de débouchés.

Dans ce passage délicat de relais entre générations, les nouveaux retraités n'ont pas à rougir de leur action depuis les années 1960. Mais c'est à la nouvelle génération de prendre sa destinée en main, avec modestie mais détermination. Elle doit avoir conscience de l'importance d'entretenir en France des foyers de recherche pertinents et originaux, qui contribuent à la formation des élites comme au progrès des connaissances. Ceci ne se fait pas en un jour et demande un effort constant et sérieux de prospective scientifique et technique, tant au niveau national qu'euro-péen. Un dialogue doit être mené avec l'industrie sur la place que doivent conserver la recherche et l'innovation industrielle en France. Enfin, toute réforme profonde d'organismes comme le CNRS devrait être précédée par une révision du système universitaire, qui donne sa place à une recherche fondamentale de pointe, mais aussi à des activités d'innovation technologique plus proches de l'environnement local.

Il est clair que toute réforme ne peut être uniquement parachutée d'en haut. En principe, des contextes comme la Société Française de Physique et l'European Physical Society devraient jouer un rôle important dans les réflexions.

Jacques Friedel

La « dynastie Friedel » : une grande lignée de scientifiques

Olivier Hardouin Duparc (olivier.hardouinduparc@polytechnique.edu)
Laboratoire des Solides Irradiés (UMR CNRS-CEA-X), École polytechnique, 91128 Palaiseau

Charles, Georges, Edmond, Jacques, et plusieurs autres : résumer la « dynastie scientifique Friedel » est une gageure que je tente néanmoins pour proposer au lecteur quelques jalons introductifs à cette lignée si célèbre dans le monde de la chimie, de la minéralogie, de la cristallographie, de la physique des solides et de la plasticité des matériaux.

Jacques Friedel se considérait lui-même comme une « graine de mandarin », au meilleur sens du terme. Son décès l'an dernier, le 10 août 2014 à l'âge de 93 ans, son rôle actif en physique jusqu'à ses toutes dernières semaines, l'amitié qu'il m'accordait depuis plusieurs années déjà, et la fierté qu'il avait de sa grande famille justifient ces rappels.

Les origines, jusqu'à Charles Friedel (1799)

Des Friedel alsaciens luthériens étaient tanneurs de père en fils jusqu'à ce que, à la faveur de la Révolution, l'un d'entre eux, prénommé Jean-Jacques, devienne négociant en cuir et épouse la fille d'un instituteur calviniste et organiste (les recommandations de Jean Calvin en la matière n'étaient plus considérées comme fondamentales). Ils mirent leur fils Charles au prestigieux Gymnase Jean Sturm de Strasbourg puis le marièrent à la fille du doyen de la faculté des sciences de Strasbourg, Georges Duvernoy. Charles (I) Friedel (1798-1882) s'établit commerçant comme son père mais en épicerie, puis créa une banque dont il espérait céder la direction à son fils Charles (II), à qui il avait également fait suivre ses études dans ce foyer humaniste libéral qu'était le Gymnase, fondé en 1538 et qui avait eu l'érudit et pédagogue Jean Sturm comme premier recteur.

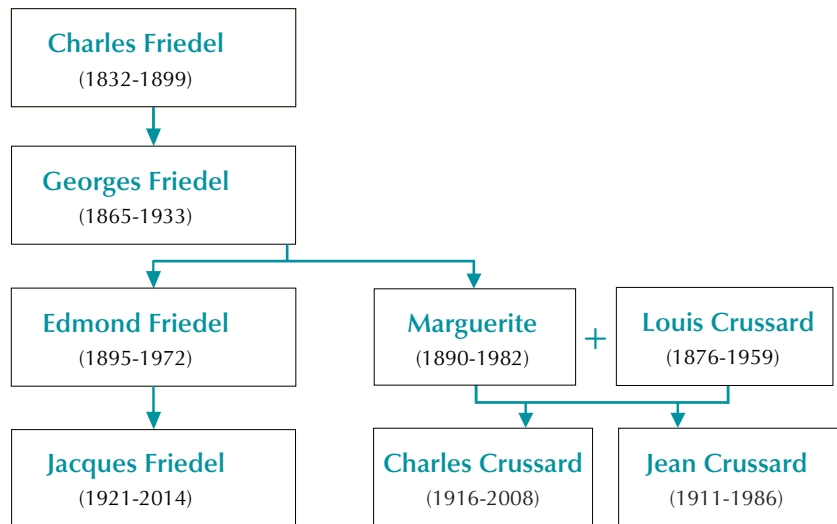
Originaire de Montbéliard, Georges Duvernoy (1777-1855) était un lointain parent de Georges Cuvier (1769-1832), dont il sollicita l'aide et grâce à qui il fut nommé professeur à Strasbourg. Il devint son adjoint à Paris et finalement son successeur au Collège de France. Ce grand-père influença Charles (II), qui fit tout pour s'orienter vers les sciences alors que son père aurait voulu le voir entrer dans les affaires. Un cours de cristallographie de Pasteur à Strasbourg l'avait enthousiasmé, et il partit à Paris loger chez son grand-père dans l'ancienne maison de Buffon au Jardin des plantes pour préparer l'entrée à l'École normale. Un premier échec et l'obligation

de signer allégeance à l'empereur Napoléon III en cas de succès l'orientèrent vers la faculté des sciences. Hésitant entre la cristallographie avec Pasteur et la chimie avec Charles-Adolphe Wurtz, il choisit Wurtz en 1854 tout en devenant attaché à la collection de minéralogie de l'École des mines de Paris (Mines ParisTech), sans doute en 1855, collection dont il fut nommé conservateur en 1856.

Son premier travail concerne les diamants (1856). C.F. approfondit entre autres, la connaissance de la chimie du silicium, basée sur sa tétravalence (on disait tétratonicité), montrant qu'elle était presque aussi riche que la chimie du carbone. C.F., comme Wurtz, était partisan de l'existence des atomes. Il découvrit surtout les réactions dites de Friedel et Crafts avec son grand ami américain francophile James Crafts en 1877, un peu par hasard mais tout en y étant parfaitement préparés. L'utilisation du chlorure d'aluminium comme catalyseur fut le coup de baguette magique pour les réactions sur les molécules d'hydrocarbures, si utiles plus tard tant dans l'industrie pétrolière que dans la parfumerie.

C.F. eut de nombreux élèves. Le père de Pierre Auger fit sa thèse dans son laboratoire de chimie et devint un professeur réputé à la Sorbonne. C.F. accueillit son lointain cousin Jacques Curie et étudia avec lui la pyroélectricité, en relation avec les propriétés de symétrie des cristaux et de leurs macles. Jacques et Pierre Curie découvrirent ensuite la piézoélectricité dans son laboratoire à la Sorbonne en 1880 (ce laboratoire devint ce qui est aujourd'hui, en 2015, l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie, à Jussieu).

Le lignage scientifique Friedel / Crussard



Suite à la défaite de 1870 et à la perte de son Alsace natale, C.F. contribua à la fondation de l'École alsacienne et créa le Laboratoire de chimie pratique et industrielle, destiné à former avec le même niveau scientifique à la fois des chimistes se destinant à l'industrie et des chimistes se destinant à la recherche, ainsi que le faisaient les universités allemandes. Cela devint l'École nationale supérieure de chimie de Paris (Chimie ParisTech). C.F. a été quatre fois président de la Société chimique de France qu'il avait aidée lors de sa naissance, de même qu'il avait contribué à la création de la Société française de minéralogie et de cristallographie. Outre son activité scientifique, Charles Friedel était membre de presque toutes les organisations protestantes de Paris. Il fut membre fondateur de la Ligue des droits de l'homme, l'année de son décès. Son dernier article décrivait un minéral radioactif, qu'il avait fait analyser par Pierre et Marie Curie.

>>>

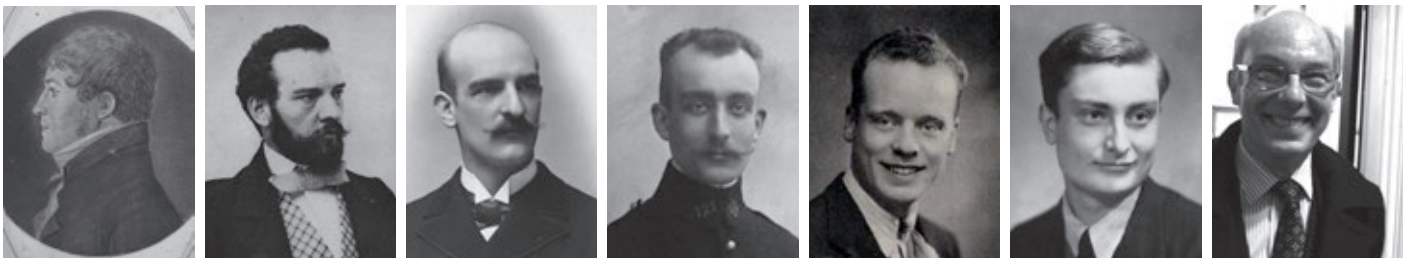
1. Arbre généalogique simplifié et partiel, mais « synoptique », de la « dynastie » Friedel.

On n'y a pas indiqué Georges Duvernoy (1777-1855), qui est à la fois le grand-père de Charles Friedel (voir texte) et de Eugène Peugeot (1844-1907, fils de Jules, neveu d'Émile, cousin d'Armand avec qui il fit passer l'utilisation des aciers Peugeot des baleines de corsets aux bicyclettes puis aux voitures). Par la mère de Georges Friedel, on peut remonter jusqu'au mathématicien et physicien suisse Jean Bernoulli (1667-1748). L'un des frères aînés de Charles Crussard, Jean, avait commencé à travailler avec Louis Leprince-Ringuet sur la physique des rayons cosmiques. Il dédia sa carrière à la physique des particules et à la physique nucléaire.

« Assurément, des trois tendances, celles du naturaliste, du physicien et du mathématicien, aucune n'est à rejeter, et il faut souhaiter un juste équilibre entre elles.

Georges et Edmond Friedel,
en 1930

Retranscrit dans *Zeitschrift für Kristallographie* 79 (1931).



2. De gauche à droite : Georges (Duvernoy), Charles, Georges, Edmond, « Charlie » (Charles Crussard), Jacques et Paul. La belle barbe de l'aïeul Charles est d'origine « post quarante-huitarde », suite à la Révolution française de 1848. Je remercie grandement Jean Friedel pour son aide précieuse pour toutes ces photos et ce montage.

>>> De Charles Friedel à Georges Friedel (1933)

En 1896, C.F. se vit refuser par l'École polytechnique (« l'X ») le poste de professeur de chimie, tout comme Henry Le Chatelier. C.F. reprit la chaire de Wurtz à la Sorbonne, et son fils Georges intégra l'X l'année suivante en position de major. Doué en tout, y compris les sports et la musique, G.F. aurait voulu choisir ensuite le génie maritime mais, étant également sorti major, il dut intégrer le corps des mines et rejoignit ainsi son père avec qui il se spécialisa en minéralogie et cristallographie.

G.F. établit dès 1904 une classification toujours en vigueur des macles, avec le concept mathématique de réseau de coïncidence entre les grains caractérisé par un index de coïncidence, tout en sachant bien dès l'origine que « le réseau le plus intéressant à connaître pour expliquer les macles [est] le réseau matériel », mais à l'époque ce réseau atomique était inconnu pour tous les minéraux. Il s'intéressa de près à la découverte de la diffraction par les cristaux en 1912 et il montra immédiatement que les diagrammes de Laue de l'époque, les « radiogrammes », devaient être centrosymétriques et ne pouvaient donc révéler l'éventuelle hémiedrie d'un cristal (ce que l'œil nu peut faire à partir de l'examen des faces d'un cristal hémédre). C'est ce qu'on appelle la « loi de Friedel ». G.F. étudia aussi dès 1910 les étranges matériaux de l'Allemand Otto Lehman, les fameux cristaux liquides, une appellation bien malgré lui mais entérinée par Charles Mauguin en 1911 et plus parlante que « états mésomorphes de la matière ». Après un certain scepticisme, G.F. en fit une étude magistrale en 1922 en les divisant en smectiques, nématiques et cholestériques.

G.F. dirigea l'École des mines de Saint-Étienne jusqu'en 1919, avant de rejoindre l'université de Strasbourg juste libérée. Il y professera ses leçons de cristallographie, sans jamais être reconnu comme professeur, parce qu'il n'avait pas de diplôme universitaire. Le corps des mines continuait à assurer son salaire. Dans toutes les disciplines où G.F. s'illustra, son antigermanisme, sans doute explicable par l'histoire de l'Alsace vue du côté français, s'exprimait autant que possible et sans ménagement. Sa fille Marguerite épousa en 1909 Louis Crussard (1876-1959, major de l'X), professeur à Saint-Étienne avant d'aller participer à la fondation de l'École des mines de Nancy en 1920.

Edmond Friedel (1872-1972) Charles Crussard (1876-2008)

Edmond Friedel fut également major de l'X et corps des mines. Il travailla avec Maurice de Broglie, frère aîné de Louis, sur les smectiques en 1925, utilisant les rayons X pour préciser des mesures de Jean Perrin et de son étudiant Wells, obtenues en lumière visible. Ils montraient que les lames minces de savon sur lesquelles Perrin avait découvert sa loi des épaisseurs multiples étaient des lames de corps smectique, ce qui confirmait ce que prévoyait G.F. en 1922, à savoir que les corps smectiques se composent bien de couches moléculaires équidistantes. E.F. s'occupa ensuite surtout de géologie pour la recherche de ressources minières, comme par exemple le pétrole, de manière hélas infructueuse au Maroc. Il dirigea l'École des mines de Paris. Outre l'enseignement d'économie qu'il y réorganisa après la guerre, il lança en 1939 avec le soutien d'Albert Portevin un Centre de recherches métallurgiques dont le premier directeur fut son neveu Charles Crussard (1916-2008, encore un major de l'X).

C.C. travailla beaucoup sur ce qu'il appela la recristallisation *in situ* dans les métaux, surtout l'aluminium, et devint directeur scientifique du centre de recherche du groupe industriel Pechiney à Voreppe, qu'il a contribué à créer après avoir participé au développement de l'Institut de recherches de la sidérurgie française (IRSID) à Saint-Germain-en-Laye.

Jacques Friedel (1916-2014)

L'épouse d'E.F., Jeanne, née Bersier, contracta la tuberculose probablement en 1923 et resta de santé fragile, nécessitant de fréquents séjours en montagne. Leur fils aîné Jacques Friedel reçut une éducation familiale et par correspondance jusqu'à l'âge de 10-11 ans. Lui et sa jeune sœur pouvaient ainsi accompagner leur mère autant que possible lors de ses séjours dans les Alpes ou dans le Jura. Grand maigre dégingandé, J.F. en garda un caractère plutôt timide et intériorisé. Il reçut une éducation très classique (mandarinale, écrira-t-il en 1994), avec latin, grec et allemand. Il apprit le grec avec sa tante Marie Friedel qui avait, dit-on, soufflé à son propre père les noms de ses états mésomorphes (smectique, nématique, cholestérique). Arrivé au baccalauréat, ses parents lui offrirent une année d'études

classiques en philosophie et littérature (sans doute surtout à l'instigation de sa mère), avant une année scientifique. Balloté par les années de guerre, J.F. échoua deux fois à l'X et ne fut reçu « que » quatrième la troisième fois. Il se rattrapa brillamment par la suite.

Après une première expérience de recherche peu gratifiante comme stagiaire chez Louis Leprince-Ringuet à l'X, il alla travailler sur les joints de grains métalliques chez son cousin Charles Crussard qui l'envoya ensuite se spécialiser chez Nevill Mott à Bristol. Mott l'aiguilla sur le problème de l'intensité de l'écrantage de la charge d'une impureté par les électrons libres du métal, problème qu'il avait lui-même étudié à l'aide d'un modèle qu'il savait être sans doute trop simple. J.F. s'y fit une réputation en montrant que cet écrantage décroissait moins vite que ce qu'avait prévu Mott, avec des oscillations, désormais appelées oscillations de Friedel. Outre ce travail, Jacques Friedel suivit à Bristol les séminaires informels de Charles Frank sur les dislocations et les joints de grains, et il lui fit d'ailleurs découvrir le livre *Leçons de cristallographie* de son grand-père.

De retour en région parisienne, J.F. commença par enseigner les dislocations, et ce sont ces cours qui lui ouvrirent la voie vers le poste universitaire qu'il désirait en France. De nombreux mécanismes de plasticité portent son empreinte et son nom.

C'est à Bristol que Jacques connut et épousa Mary Horder, la jeune sœur de Ruth, épouse de Mott. Mary était de dix ans l'aînée de Jacques. Plutôt littéraire et artiste, Mary connaissait déjà fort bien le milieu des physiciens.

Il me semble que, au-delà de sa solide formation physico-mathématique de polytechnicien, la magie de Jacques Friedel consistait à deviner les causes prédominantes pour expliquer nombre d'effets, aussi bien électroniques dans les alliages métalliques avec des hamiltoniens quantiques, que plastiques en métallurgie faisant intervenir les dislocations sans aucun hamiltonien. En cela J.F. ressemblait à Mott et Frank, qu'il appréciait particulièrement. J.F. se gardait bien de faire des calculs complets avec une précision qui aurait dépassé la simplicité de ses hypothèses, et l'accord de ses prédictions avec les effets mesurés le surprenait lui-même. Il travailla aussi sur les disinclinaisons dans les cristaux liquides, et sur les quasi-cristaux.



3. Jacques Friedel, lors de la remise de la grand'croix de la Légion d'honneur par le président de la République, François Hollande, le 22 octobre 2013 au Palais de l'Élysée.

Quoique plutôt réservé, il s'impliqua de manière fondamentale dans l'organisation de l'enseignement (physique des solides et des matériaux) et de la recherche en France. Il a présidé la Société française de physique en 1970, la Société Européenne de Physique (EPS) en 1982-84, et l'Académie des sciences en 1993-94. Sa grande culture classique lui permettait de s'intéresser aussi aux problèmes de terminologie scientifique. Jacques fut élevé à la dignité de grand'croix de la Légion d'honneur, le 22 octobre 2013.

Jean et Paul

Jean, le fils aîné de Jacques et Mary, est médecin dermatologue et dirige un service d'hôpital général en Bourgogne. Il s'est spécialisé dans la généalogie de sa famille.

Paul, polytechnicien et docteur d'État en physique des solides, a travaillé en physique des surfaces des semi-conducteurs. Il a eu une carrière industrielle internationale, toujours à l'interface entre la recherche et le marché. Il a présidé la Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication (SEE) et dirige aujourd'hui l'École Télécom Bretagne de l'Institut Mines-Télécom. Paul a hérité du violon de son arrière-grand-père Georges et il en joue avec talent et plaisir avec ses élèves à Brest, tout comme G.F. en jouait avec ses élèves à Saint-Étienne. ■

“ Ce qui caractérise à nos yeux la Minéralogie et ce qui lui donne son véritable intérêt, c'est précisément qu'elle est le point de rencontre naturel de la Chimie, de la Physique et de la Cristallographie. Le but qu'elle se propose, la détermination complète des minéraux, l'oblige à réagir contre la division extrême que le progrès des Sciences a eu pour conséquence.

Cette division, qui permet d'explorer à fond chaque science particulière et d'exploiter ses moindres filons, est cause que l'on néglige trop souvent ces confins où se touchent plusieurs ordres de connaissances et où, comme au contact de deux terrains différents, se trouvent fréquemment accumulées des richesses exceptionnelles.”

Charles Friedel, inaugurant sa première leçon à la chaire de minéralogie de la Sorbonne, en 1876

Cité par Stanislas Cannizzaro, chimiste italien (1826-1910), en 1900. On trouve une formule de même esprit dans la préface de son *Cours de minéralogie*, imprimé en 1893.

Pour aller plus loin

- 1• Jacques Friedel, *Graine de Mandarin*, éditions Odile Jacob (1994).
- 2• Les films des interventions faites lors de la Journée intitulée « Les Friedel, la chimie et les cristaux », organisée principalement par l'auteur (OHD) le 22 avril 2014 en l'amphithéâtre Charles Friedel de Chimie ParisLech (Valérie Cabuil, Paul Friedel, Danielle Fauque, Alain Fuchs, Jean-Claude Boulliard, OHD, Didier Nectoux, Robert Mahl, Yves Quéré, Maurice Kléman, François Gautier, Michel Lannoo, Julien Bok, Georges Saada, Ladislav Kubin, Denis Gratias et Yves Bréchet). Interventions filmées par Serge Chiche du CEA et montées par lui en collaboration avec OHD, disponibles sur demande auprès de OHD.
- 3• OHD, "A review of some elements in the history of grain boundaries, centered on Georges Friedel, the coincident 'site' lattice and the twin index", *Journal of Materials Science* **46** (2011) 4116-4134.
- 4• OHD, "On the origins of the Finnis-Sinclair potentials", *Philosophical Magazine* **89** (2009) 3117-3131.
- 5• OHD, "Charles Crussard's early contributions: Recrystallization *in situ* and a Grain Boundary study with J. Friedel and B. Cullity", *International Journal of Materials Research (ex Zeitschrift für Metallkunde)* **100** (2009) 1382-1388.
- 6• Jacques Friedel et OHD, "Alan Cottrell, a fundamental metallurgist. *In memoriam*", *Philosophical Magazine* **28-30** (2013) 3703-3713.
- 7• Yves Bréchet et OHD, « *In Memoriam*. Disparition de Jacques Friedel », *Matériaux et Techniques* **102** (2014) N°6 (2 pages).
- 8• Le dossier SFP « Hommage à Jacques Friedel » (Pierre Radvany, Yves Bréchet, Maurice Kléman, Michel Lannoo, François Gautier, Denis Jérôme et Jean-Paul Pouget). 16 pages, dossier réalisé à l'initiative des présidents de la Société Française de Physique, Alain Fontaine et Michel Lannoo, à l'automne 2014, téléchargeable à l'adresse www.sfpnet.fr/hommage-a-jacques-friedel.
- 9• Adrian Sutton et OHD, « Jacques Friedel. 1921-2015 », *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society* (2015), en préparation.
- 10• Les pages 'html' du site www.annales.org/archives/x/.

Recherche d'une physique au-delà du modèle standard et étude de la violation de symétrie CP avec l'expérience LHCb au CERN

Frédéric Machefert (frederic.machefert@in2p3.fr)

Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL, UMR8607), Centre scientifique d'Orsay, Bât. 200, BP 34, 91898 Orsay Cedex

LHCb est l'une des expériences situées sur l'anneau de collision de protons du CERN, le LHC. Son objectif est d'explorer les légères différences qui existent entre matière et antimatière, et de mesurer des taux de désintégrations rares de particules.

Les données accumulées ces dernières années fournissent de nombreux résultats, en particulier sur la mesure de l'angle γ du triangle d'unitarité CKM, sur les propriétés des mésons B et D, et sur les désintégrations des mésons B. Elles donnent ainsi un premier éclairage sur ce que pourrait être (ou non) une physique au-delà du modèle standard.

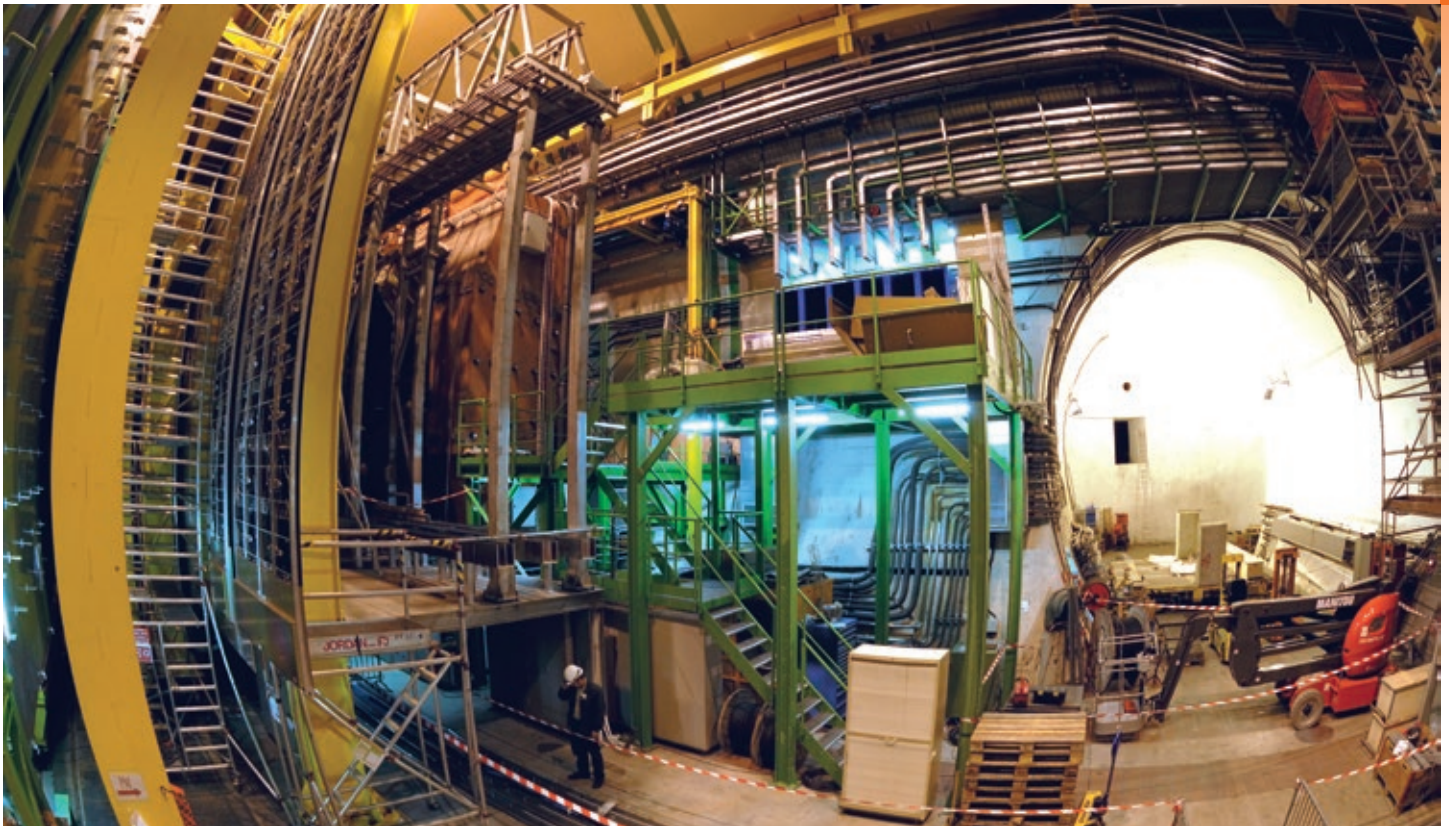
La physique des particules est l'étude des constituants élémentaires de la matière et de leurs interactions. L'un des moyens les plus efficaces pour approfondir les connaissances dans ce domaine est la réalisation d'expériences de collisions de particules. Le Large Hadron Collider (LHC) du CERN, le laboratoire européen pour la physique des particules, est un anneau de 27 km de circonférence dans lequel circulent en sens opposés deux faisceaux de protons. L'énergie et la fréquence des collisions aux quatre points de croisement des faisceaux atteignent des niveaux sans précédent, qui permettent de fournir aux expériences des données d'une grande richesse.

Deux détecteurs généralistes, ATLAS et CMS, ont essentiellement pour but de produire directement et d'étudier le boson de Higgs et de possibles nouvelles particules. Les deux autres expériences sont ALICE, dédiée à la recherche d'un nouvel état dense et chaud de la matière, le plasma de quarks et de gluons, et LHCb qui étudie la physique des différents types (ou « saveurs ») de quarks et les interactions entre quarks de différentes familles. Ce domaine est relativement vaste et, à l'instar des deux expériences généralistes déjà citées, LHCb (dont le détecteur est décrit dans l'encadré 1, p. 20) a également pour but de mettre en évidence, de manière indirecte, une nouvelle physique au-delà du « modèle standard », qui réunit l'essentiel de nos connaissances en physique des particules.

Le modèle standard

Le modèle standard repose sur la relativité restreinte et la mécanique quantique, puisqu'il décrit des objets rapides et petits. Les phénomènes de création et d'annihilation de particules ont obligé les théoriciens à développer les outils mathématiques de la théorie des champs, afin de décrire des populations de particules dont le nombre n'est pas fixe. Enfin, un élément essentiel en physique des particules est l'intégration de la notion de symétrie de jauge locale, qui permet de rendre invariantes les équations par rapport à des changements arbitraires de variables (temps, coordonnées spatiales, vitesses...). Ces symétries sont l'expression de la conservation de certaines grandeurs, comme les charges. Les « équations » qui découlent de ces fondements sont ensuite appliquées au contenu du modèle standard : les particules.

Le modèle standard décrit la matière avec douze fermions de *spin* 1/2 : six leptons et six quarks (voir tableau 1). La charge électrique des quarks « u », « c » et « t » (ligne supérieure du tableau) est +2/3, alors que celle des quarks « d », « s » et « b » (ligne inférieure pour les quarks) est -1/3. Les fermions sont groupés par familles (ou colonnes sur le tableau 1), contenant chacune deux leptons et deux quarks. La principale différence entre les familles tient dans les masses des particules qui les composent. Les interactions entre ces fermions sont



© CERN

Vue de l'expérience LHCb.

vues comme des échanges de particules, des bosons de *spin* 1, vecteurs des forces ou particules d'interactions et appelés photon pour l'électromagnétisme, bosons Z et W pour l'interaction faible, et gluons pour la force forte^(a). Par exemple, la répulsion de deux électrons dont la charge électrique est négative est interprétée comme l'échange de photons entre ces deux particules.

Le modèle standard étend la notion de charge, commune en électromagnétisme, à l'ensemble des forces. La charge électrique caractérise les particules sensibles à l'interaction électromagnétique. De manière identique, d'autres charges sont liées aux deux autres forces. Mais pour ces dernières, les bosons vecteurs (le Z, les W et les gluons) portent également des charges et peuvent donc interagir avec d'autres bosons du même type, un peu comme si on imaginait un photon portant une charge électrique. À partir de cet alphabet relativement simple, il est possible de fabriquer la matière qui nous entoure en associant les fermions, le ciment étant constitué par les bosons. Une dernière particule complète ce tableau : il s'agit du boson de Higgs (particule de *spin* 0). Il est intégré au modèle standard depuis longtemps, mais n'a été observé directement au LHC qu'en 2012, sa mise en évidence apportant le prix Nobel de physique 2013 à Englert et Higgs pour leur prédiction théorique. Cette particule et le champ qui

Récapitulatif des particules du modèle standard.

| | Particules de matière (fermions) | | | Particules d'interactions | boson de masse |
|---------|--|--|---|---|---|
| | I | II | III | | |
| QUARKS | 2.4 MeV +2/3 1/2 u up | 1.27 GeV +2/3 1/2 c charm | 171.2 GeV +2/3 1/2 t top | 0 0 1 γ photon | 125 GeV 0 0 H boson de Higgs |
| | 4.8 MeV -1/3 1/2 d down | 104 MeV -1/3 1/2 s strange | 4.2 GeV -1/3 1/2 b bottom | 0 0 1 g gluon | |
| | <2.2 eV 0 1/2 ν_e neutrino électronique | <0.17 MeV 0 1/2 ν_μ neutrino muonique | <15.5 MeV 0 1/2 ν_τ neutrino tauique | 91.2 GeV 0 1 Z⁰ boson Z | |
| LEPTONS | 511 KeV -1 1/2 e électron | 105.7 MeV -1 1/2 μ muon | 1.777 GeV -1 1/2 τ tau | 80.4 GeV ±1 1 W[±] bosons W | |

BOSONS DE JAUGE

nom
spin
charge électrique
masse

symbole

Tableau 1. Les quarks sont en jaune et les leptons en vert. Ils constituent la matière et sont groupés par familles. Les trois familles connues correspondent aux colonnes notées I, II et III. Les autres particules (en rouge) sont les bosons vecteurs des interactions, et le boson de Higgs.

lui est associé permettent de fournir de manière élégante leurs masses aux fermions et aux bosons du modèle, en conservant son pouvoir prédictif et sa cohérence.

Enfin, pour clore cette description du modèle standard, il faut garder à l'esprit que chacun des fermions mentionnés plus haut apparaît sous deux aspects différents,

comme particule de matière et comme particule d'antimatière (pour lesquelles les signes des charges sont opposés), doublant du coup le nombre de fermions.

Conventionnellement, et cette notation sera suivie ici, la particule d'antimatière est indiquée avec une barre surmontant le symbole attribué à la particule de matière.





Cette image cohérente masque un certain nombre de difficultés occultées ou imparfaitement résolues par le modèle actuel. L'une d'elles est la différence observée entre les quantités de matière et d'antimatière dans l'univers. On suppose qu'à l'origine l'univers était symétrique. Un processus a dû rompre l'équilibre entre les deux formes, notre univers étant essentiellement vide, avec une faible quantité de matière et sans antimatière. Le physicien russe Sakharov a été le premier à énoncer, en 1967, les trois conditions nécessaires à ce déséquilibre, l'une d'elles étant la violation de la symétrie CP.

La violation de la symétrie CP et les désintégrations rares

En mécanique quantique, l'opération « CP » consiste à appliquer les opérateurs C et P, qui renversent respectivement les charges et l'orientation de l'espace (un peu comme le ferait un miroir). Appliquer ces opérateurs C et P sur la transition d'un état initial vers un état final, $CP(Initial \rightarrow Final)$, consiste à regarder cette transition pour les

états symétriques matière-antimatière associés, $Initial \rightarrow Final$. Sans violation de la symétrie CP, les intensités de ces deux transitions sont identiques. Une violation suppose un traitement asymétrique de la matière et de l'antimatière par la Nature.

Les violations des symétries C et P, appliquées indépendamment, sont connues depuis longtemps. La violation de la symétrie CP a été plus difficile à observer, en raison de la faible intensité du phénomène. Le premier secteur où l'effet a été vu est celui du quark de saveur étrange « s » (de l'anglais "strange") de la deuxième famille (voir le tableau 1), lors de réactions impliquant les mésons K (qui sont des particules fabriquées à partir d'une paire quark-antiquark appelés K, dont l'un des deux constituants a la saveur « s »). Au début des années 2000, les expériences Babar et Belle, respectivement aux États-Unis et au Japon, ont étendu l'exploration au secteur du quark « b » (de l'anglais "bottom"), appartenant à la troisième famille, plus difficile à produire mais où la théorie prévoit une intensité plus forte du phénomène.

L'observation de cette asymétrie a valu le prix Nobel à des expérimentateurs ainsi qu'aux théoriciens qui ont su l'intégrer au modèle standard (encadré 2). Pourtant, le modèle standard est clairement mis en défaut dans la nature, puisque l'amplitude de la violation de CP nécessaire pour rendre compte de l'asymétrie dans l'univers, est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à ce que nous observons actuellement et à ce qui est calculé. Parallèlement, ces failles indiquent que l'étude poussée de la violation de CP devrait fournir plus facilement des indications sur une physique nouvelle, au-delà du modèle standard, et donnent une grande importance à ce domaine de recherche.

La notion de violation de la symétrie CP est étroitement liée à la saveur des quarks, ce dont rend compte le modèle standard qui intègre l'effet (voir encadré 2). L'étude des mésons B (dont l'un des constituants est de saveur « b ») est le domaine le plus favorable à l'étude de la violation de CP. Les conditions du faisceau, notamment l'énergie du LHC et la zone angulaire

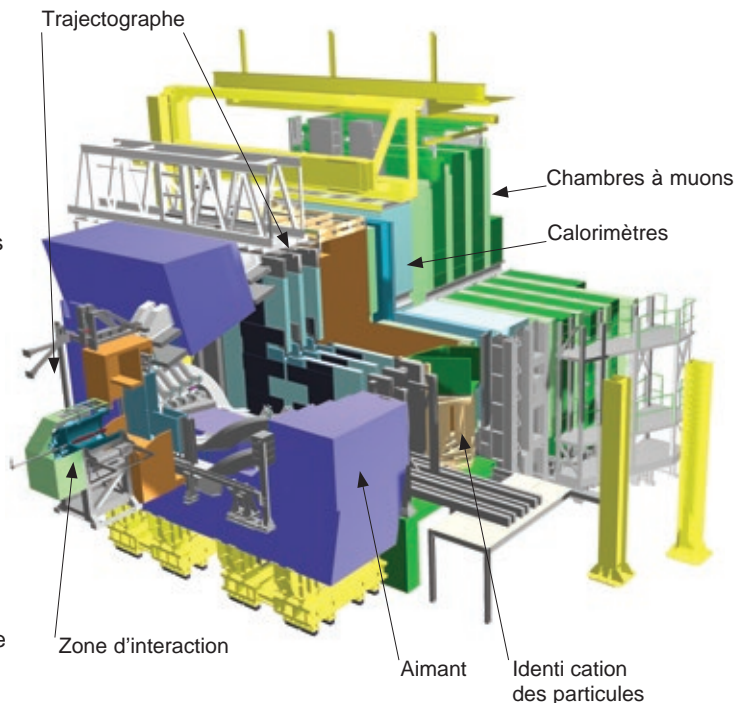
Le détecteur LHCb

encadré 1

LHCb est une collaboration internationale regroupant plus de 700 personnes provenant de 52 universités à travers le monde, qui ont conçu le détecteur et, depuis 2010, exploitent ses données.

Le détecteur LHCb est situé sur l'anneau de collision du LHC et bénéficie de la grande probabilité de production de paires de quarks « b » « \bar{b} » aux énergies du LHC, lors des collisions proton-proton. La configuration du détecteur (fig. E1), dont l'ouverture angulaire rend possible l'observation des particules produites près de l'axe des faisceaux, permet de suivre les trajectoires des particules issues de la désintégration des mésons B.

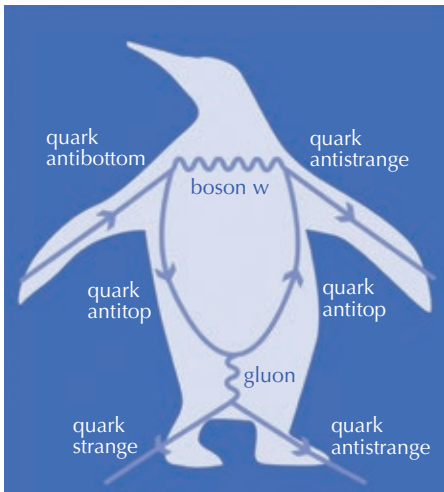
Après la collision, les particules produites par interaction proton-proton, ou plus exactement par interaction de quarks ou de gluons, constituants élémentaires des protons, traversent le détecteur de « vertex ». Ce détecteur, constitué de plans de silicium, mesure avec une très grande précision les trajectoires des particules chargées. Il permet notamment de déterminer très précisément le point de désintégration des hadrons contenant un quark « b ». Ces particules composées ont une durée de vie relativement longue, ce qui permet de les identifier par les distances, de l'ordre du centimètre, séparant le point d'interaction des protons, lieu de production de ces hadrons, de ceux de leurs désintégrations. Ensuite, les particules traversent le reste du trajectographe de l'expérience, qui mêle des plans de mesure de la trajectoire avec un champ magnétique intense, et fournit la mesure de l'impulsion des particules chargées. L'identification des particules est faite par deux imageurs à effet Cherenkov, sensibles à la masse des particules, les calorimètres (qui mesurent l'énergie des photons, des électrons et des hadrons) et les détecteurs à muons.



El. Schéma du détecteur LHCb, montrant le point d'interaction proton-proton et les principaux éléments de détection des particules produites.

couverte par le détecteur LHCb, permettent la production et l'observation d'un grand nombre d'événements contenant des quarks « b » à partir d'une collision proton-proton. Au point d'interaction de l'expérience, environ 10^{12} paires « b » « \bar{b} » sont produites chaque année. Seule une fraction de ces événements est intéressante et sera stockée sur bande pour l'analyse. Mais cela constitue le plus large échantillon de données de ce type jamais enregistré. Il s'agit ici du premier grand axe de recherche de l'expérience LHCb.

La statistique accumulée chaque année par LHCb permet d'étendre naturellement le domaine de recherche de l'expérience à un second axe, le secteur des désintégrations rares. Les prédictions du modèle standard sont, dans un très grand nombre de situations, très précises. Notamment, certaines transitions sont interdites ou très peu probables. Il s'agit souvent de modes de désintégration dont la forme simple (dite à « l'arbre », fig. E2a) fait intervenir un terme très petit du modèle standard ou bien viole une règle de conservation. Les diagrammes (voir encadré 3) alors autorisés sont plus complexes, avec des boucles de particules (certains de ces diagrammes sont dits « en boîte », le chemin des particules sur la figure formant un carré comme sur la figure E2c, ou « pingouins » en raison de leur forme également, voir la figure 1, et si vous avez beaucoup d'imagination !). Ces derniers conduisent en général à une faible fréquence des événements recherchés. Mais, par les boucles qu'ils contiennent, ces diagrammes ont un intérêt particulier, notamment dans le cadre de nouvelles physiques au-delà du modèle standard.



Le modèle standard et la violation de la symétrie CP

La violation de la symétrie CP est incluse indirectement dans le modèle standard. Elle tient son origine de la force faible et des courants chargés associés, c'est-à-dire des interactions dont le médiateur est le boson doté d'une charge électrique, W/W^{\pm} . Le modèle standard stipule que les états propres des quarks, vus par l'interaction faible, ne sont pas les états propres de masse (les états physiques). Ainsi, lorsqu'un boson W interagit avec un quark, il ne voit pas un état de saveur du type de ceux indiqués dans le tableau 1, mais une combinaison linéaire, une superposition de deux états.

Les transitions autorisent les changements de saveur lors de l'interaction, et la probabilité des couplages entre un boson W et deux quarks de saveurs données est fournie par la matrice de rotation entre les états propres de masse et les états vus par l'interaction faible. Cette matrice, appelée communément « matrice CKM » d'après les noms des trois théoriciens à l'origine du modèle, N. Cabibbo, M. Kobayashi et T. Maskawa, est de dimension 3×3 dans le modèle standard (parce que ce modèle intègre trois familles) et permet de coupler les quarks chargés positivement avec les quarks de charge négative. Ainsi, par exemple, un « d » se couple avec un « u » avec une amplitude V_{ud} .

$$\hat{V}_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

La matrice CKM rend compte de la force des couplages entre les quarks *via* l'interaction faible et montre une hiérarchie intéressante entre ces couplages. Les termes diagonaux sont très proches de l'unité, ce sont les couplages les plus favorisés. Ils sont de plus en plus petits lorsqu'on s'éloigne de la diagonale.

Mais le formalisme de la matrice CKM va beaucoup plus loin et a d'importantes implications en physique des particules. Les propriétés de cette matrice sont celles d'une matrice de rotation et elle doit vérifier les relations mathématiques correspondantes. Ainsi, le produit avec son adjointe doit être l'identité. Cette contrainte réduit le nombre de degrés de liberté de la matrice, qui dépend de sa dimension et donc du nombre N de familles et vaut $(N-1)^2$, à savoir $N(N-1)/2$ angles de rotation et $(N-1)(N-2)/2$ phases complexes. Pour deux familles, il n'existe qu'un angle de rotation, appelé angle de Cabibbo. À l'origine, la matrice ne contenait que ce paramètre. Mais les expériences ont pu déterminer l'existence d'une troisième famille intégrée au modèle standard, et la matrice s'est enrichie de deux nouveaux angles de rotation et d'une phase complexe.

La phase complexe η est à l'origine de la violation de la symétrie CP dans le modèle standard. Supposons une désintégration faisant appel à l'interaction faible et donc pour laquelle l'amplitude est liée à un terme de la matrice CKM. Ce terme et l'amplitude correspondante dépendent potentiellement de la phase η . Mais, à l'instar d'une expérience de mécanique quantique habituelle, lorsqu'une seule amplitude intervient, les phases complexes disparaissent lorsque l'intensité du phénomène est calculée. En d'autres termes, l'observable physique ne dépend pas de la phase. Cette situation est plus complexe lorsque (et c'est le cas dans les transitions qui nous intéressent ici) plusieurs amplitudes, correspondant à différents chemins pour aller de l'état initial à l'état final, contribuent à la désintégration. Alors, l'intensité dépend de la phase complexe de la matrice CKM de par les interférences entre amplitudes. Cette phase change de signe lorsqu'on considère les antiparticules. Le modèle standard, par la phase complexe de la matrice CKM et les interférences, intègre ainsi la violation de la symétrie CP.

C'est un succès pour ce modèle. Pourtant, il s'avère que le phénomène calculé par les équations du modèle standard, s'il correspond à ce qui est mesuré par nos expériences, est plusieurs ordres de grandeur en-dessous de ce dont nous aurions besoin pour expliquer l'état actuel de notre univers. La réponse actuelle est au mieux une ébauche et notre compréhension n'est que partielle. C'est pourquoi ce domaine de recherche est très actif et est considéré comme l'une des pistes les plus sérieuses à suivre pour découvrir une nouvelle physique au-delà du modèle standard.

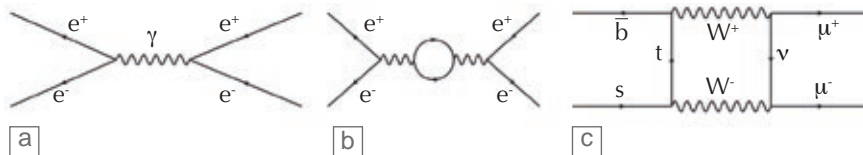
1. Représentation d'un diagramme de Feynman, dit « pingouin ». Les particules entrent par la gauche, et celles qui sortent par la droite ont été produites par la réaction. La boucle intermédiaire contient des particules « virtuelles », susceptibles d'avoir des masses élevées et d'être encore inconnues.

Les diagrammes de Feynman

encadré 3

Le physicien Richard Feynman a introduit, à la fin des années 1940, des diagrammes qui permettent de représenter la propagation des particules élémentaires, leurs interactions et leurs désintégrations. Ils donnent une représentation compacte et plus facile à interpréter des processus intervenant en physique des particules. La propagation des particules est figurée par des lignes (droites pour les fermions, ondulées pour les bosons), qui traduisent schématiquement l'amplitude de probabilité qu'a une particule d'aller d'un endroit à un autre. Les points où les lignes se rencontrent (communément appelés « vertex ») correspondent à deux ou plusieurs particules qui se trouvent être au même endroit au même moment, et matérialisent leur interaction. Habituellement, sur les diagrammes, le temps va de gauche à droite et la dimension spatiale est verticale. Les diagrammes de Feynman peuvent avoir une forme simple, dite « en arbre » (fig. E2a), ou une forme plus complexe, avec une « boucle » (fig. E2b) ou en « boîte » (fig. E2c).

Il est possible d'appliquer des règles de calcul, les règles de Feynman, à chaque partie d'un diagramme (lignes internes et externes, vertex, etc.) afin de déterminer l'amplitude correspondante du phénomène.



E2. Exemples de diagrammes de Feynman : une paire électron-positron s'annihile en donnant un photon qui produit à nouveau une paire électron-positron (a) ; une autre contribution à ce processus physique avec les mêmes états initiaux et finals, mais incluant une boucle correspondant à l'apparition et l'annihilation de particules virtuelles de très courte durée de vie (b) ; et, enfin, le diagramme de production d'une paire de muons par la désintégration d'un méson B_s dans le cadre du modèle standard (c).

>>>

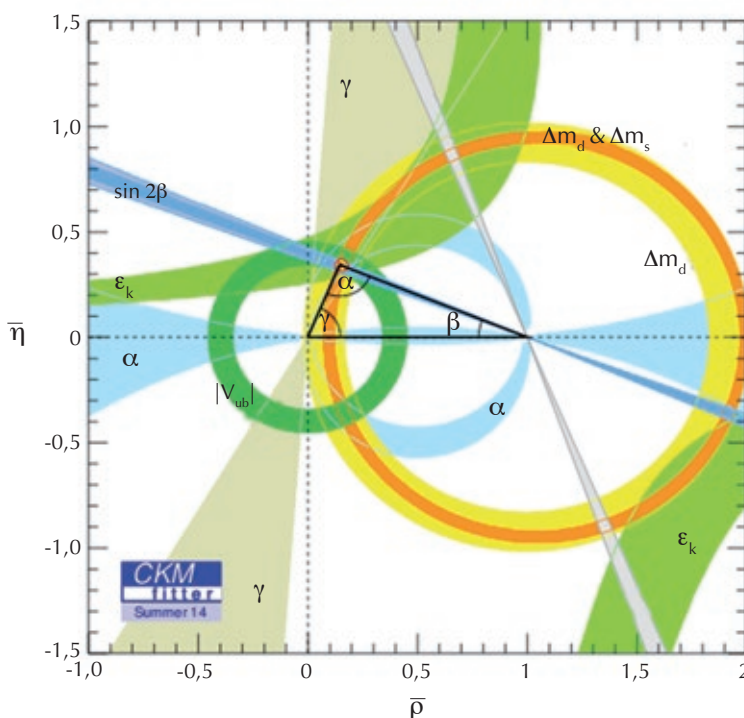
Le principe d'incertitude d'Heisenberg, bien connu en mécanique quantique, s'applique en physique des particules. Il stipule que l'énergie d'une particule dont l'existence est brève (on dit alors que la particule est « virtuelle ») n'est pas bien définie et peut donc potentiellement être grande. Les particules circulant dans les boucles (fig. E2b) des diagrammes complexes sont virtuelles (elles n'apparaissent pas dans l'état final et disparaissent juste après leur apparition), leur énergie n'est donc plus aussi fortement contrainte que pour les diagrammes simples, dits à « l'arbre ». On peut supposer que des particules liées à une physique au-delà du modèle standard et de forte masse peuvent circuler dans ces boucles. Sans qu'elles puissent apparaître dans l'état final (elles doivent être virtuelles), leur effet est potentiellement visible dans de très nombreuses observables (les distributions angulaires lors de réactions, le nombre d'événements d'un certain type, etc.). Au-delà de la compréhension de la violation de CP, LHCb effectue de nombreuses mesures liées à ces effets, la collaboration ayant à ce jour publié plus de 200 articles. Certaines sont décrites ici.

Le triangle d'unitarité

Comme évoqué plus haut, un mécanisme inclus dans le modèle standard et décrit dans l'encadré 2, permet de rendre compte des transitions entre familles et de la violation de CP. Ce mécanisme et les paramètres qu'il utilise peuvent être combinés et représentés dans le plan complexe sous la forme d'un triangle appelé triangle d'unitarité, qui aide à visualiser toute incompatibilité entre les mesures, toujours dans le cadre du modèle standard (fig. 2).

Ainsi, le triangle doit être fermé, les rapports entre les côtés et les angles doivent être en accord, etc. Une incohérence entre deux grandeurs est potentiellement l'indication d'une lacune du modèle standard et a son origine dans des phénomènes nouveaux. Jusqu'à présent, l'accord est très bon entre les mesures. Mais on peut supposer que cela est lié à la méconnaissance de certaines quantités, autrement dit aux erreurs de mesure actuelles. L'un des objectifs est donc d'améliorer la précision sur ces grandeurs.

Parmi les angles du triangle, γ est le moins bien connu (fig. 2). Les expériences actuelles déterminent essentiellement cet angle par l'étude du canal de désintégration $B^{\pm} \rightarrow DK^{\pm}$,



2. Le triangle d'unitarité (en noir), obtenu en combinant les mesures actuelles sur la violation de CP, qui correspondent aux différents domaines colorés : leur intersection, non vide, définit les régions permises pour le sommet du triangle. En ordonnée, la phase η à l'origine de la violation de symétrie CP dans le modèle standard (voir l'encadré 2). Des trois angles du triangle, γ est le moins bien déterminé.

où un méson B chargé (constitué d'une paire quark-antiquark « b » et « u ») produit deux mésons, D (contenant un quark « c ») et K (avec un quark de type « s »). Deux diagrammes à l'arbre contribuent principalement à cette désintégration et font apparaître, sous la forme d'une phase relative, l'angle γ .

Après deux années complètes de fonctionnement, LHCb a accumulé suffisamment de données pour extraire cet angle avec une précision de l'ordre de celle des expériences précédentes, et conduisant à une incertitude sur la moyenne mondiale de 10° pour γ . L'accumulation des données avec LHCb doit permettre dans les années à venir de réduire à quelques degrés l'imprécision sur cette mesure.

D'autres méthodes, basées sur des diagrammes avec des boucles, devraient également fournir des résultats dans les années à venir. Ces diagrammes en boucles, on l'a vu, sont plus sensibles à une nouvelle physique. Une différence entre les mesures de l'angle γ par les diagrammes « à l'arbre » et par les diagrammes en boucle serait également un indice important pour l'existence d'une physique au-delà du modèle standard.

Les oscillations des mésons B et D

Les mésons neutres, dits B_d et B_s (constitués d'un antiquark « \bar{b} » et respectivement d'un quark « d » et « s »), subissent un phénomène remarquable où, au cours de sa

propagation, la particule peut se transformer en sa propre antiparticule et *vice versa*. On observe alors une « oscillation » d'une particule vers son antipartenaire, jusqu'à sa désintégration. Cet effet est possible *via* des diagrammes en boîte (fig. E2c), très sensibles à une physique nouvelle et dont les paramètres peuvent être reliés au mécanisme de violation de CP.

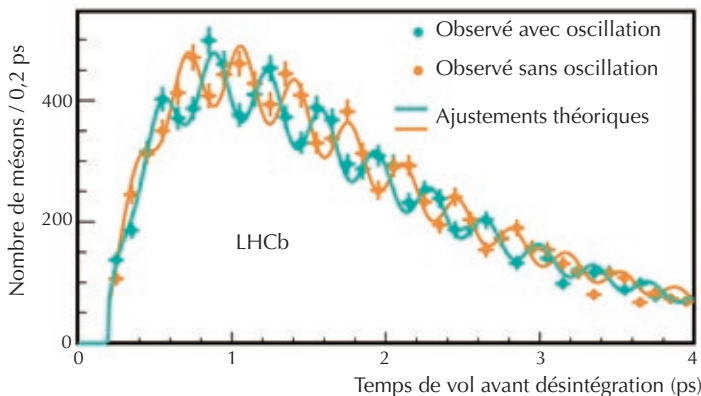
Ces oscillations ont été observées dans un premier temps par les expériences du LEP, l'accélérateur qui a précédé le LHC au CERN, puis par l'expérience CDF au Tevatron, aux États-Unis, pour le B_d et le B_s , respectivement. LHCb a mesuré avec une exceptionnelle précision ces oscillations. La figure 3 montre, en fonction de leur temps de vol avant désintégration, le nombre de mésons B qui se désintègrent dans le même état ou dans l'état opposé à celui de leur production. Certains paramètres du modèle standard associés à ces oscillations sont déterminés à partir des points de mesure et fournissent les courbes théoriques superposées aux points sur la figure 3, contraignant par ailleurs fortement toute déviation par rapport au mécanisme standard.

Malgré son nom, l'expérience LHCb étudie également le quark « c » (pour « charme ») qui, à l'image du « b », est produit en grand nombre au point de collision. Cette abondance a permis d'observer pour la première fois avec certitude l'oscillation du méson D contenant ce quark « c ».

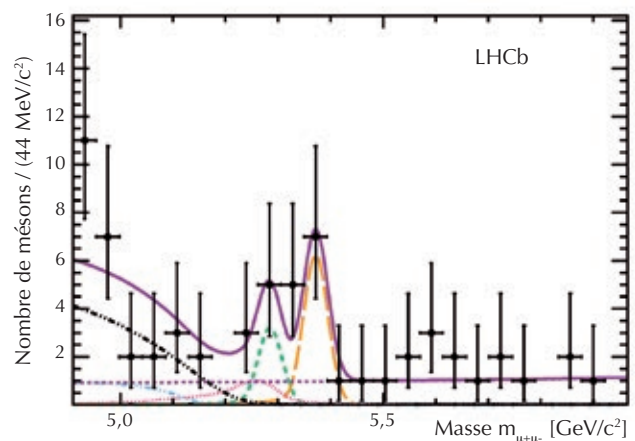
La désintégration $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Le méson B_s ne peut que difficilement se désintégrer en une paire de muons dans le cadre du modèle standard (de l'ordre de trois désintégrations de ce type pour un milliard de désintégrations du B_s) ; mais une variété de modèles (notamment supersymétriques [4]), décrivant une physique nouvelle, prédisent une augmentation souvent sensible, voire drastique (pouvant atteindre plusieurs ordres de grandeur), du taux de ces désintégrations. Ce canal, par ses capacités à tester nos connaissances et les extensions au modèle standard, a été pendant longtemps l'un des phénomènes les plus recherchés en physique des particules, donnant à ce champ d'investigation une importance considérable.

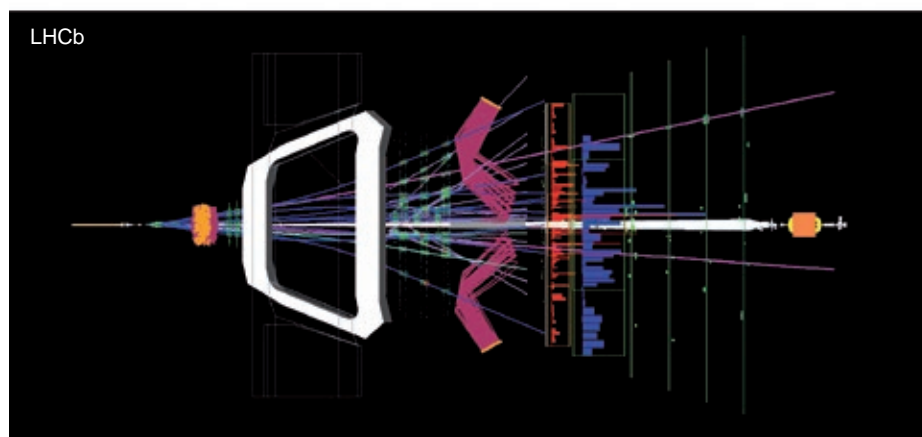
Dès 2012 et avec une statistique partielle, LHCb avait pu détecter des désintégrations s'effectuant par ce canal (fig. 5, p. 24). La mesure est maintenant confirmée par LHCb (en utilisant un échantillon de données plus important) et CMS, l'une des trois autres expériences du LHC. La figure 4 montre la masse invariante reconstruite à partir de la paire de muons et pour les événements sélectionnés par l'analyse des données. Une légère accumulation est visible autour de $5,4 \text{ GeV}/c^2$, valeur correspondant à la masse du B_s . La mesure est en parfait accord avec le modèle standard, mais elle permet par ailleurs de contraindre, comme rarement une unique mesure, de nombreux modèles de nouvelle physique.



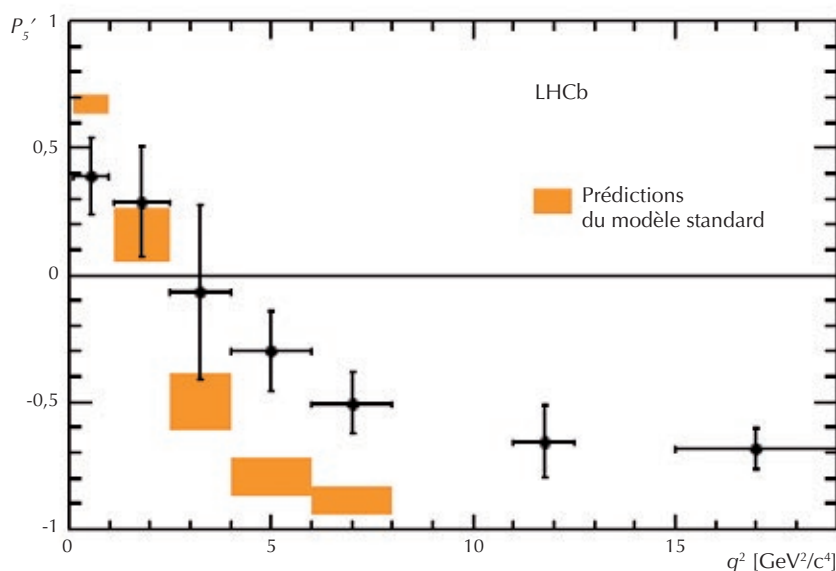
3. Nombre de mésons B sélectionnés au cours de l'analyse de données, en fonction de la durée de vol des particules avant désintégration. En orange, sont indiqués les mésons mesurés lors de leur désintégration dans le même état que celui dans lequel ils ont été produits ; en vert, ceux qui ont changé de saveur au moment de la désintégration.



4. Masse reconstruite (en abscisse) à partir des deux muons observés et pour les candidats sélectionnés par l'analyse des événements du type $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Les points avec leurs barres d'erreur sont les données et indiquent une accumulation autour de $5,4 \text{ GeV}/c^2$, correspondant à la masse du B_s . Les courbes de couleur en tirets et pointillés représentent les contributions attendues pour les bruits de fond et, en orange, le signal recherché. La courbe violette est la somme attendue de toutes ces contributions.



5. L'image montre un événement compatible avec la désintégration d'un méson B_s en une paire de muons μ^+ et μ^- . La paire de muons s'échappe par l'arrière du détecteur (à droite de la figure). La position du point de collision proton-proton est reconstruite par la convergence des traces mesurées dans le détecteur. Les deux muons sont indiqués par des trajectoires violettes. Le méson B_s n'est pas vu dans le détecteur, mais sa direction et sa longueur de vol (de l'ordre du centimètre) par rapport au point d'interaction sont déterminées grâce aux muons.



6. Le paramètre P'_5 lié aux distributions angulaires observées par LHCb lors de désintégrations du type $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ (points avec les barres d'erreur) est comparé avec les prédictions du modèle standard (en orange, la hauteur des rectangles indique la précision des calculs). Le paramètre q^2 est le carré de la masse invariante de la paire de muons.

(a) La force gravitationnelle a une intensité trop faible pour avoir un effet mesurable dans les expériences actuelles en physique des particules sur accélérateur et rentre mal dans le cadre théorique. Elle n'est pas prise en compte dans le modèle standard.

En savoir plus

- 1• Le site public de LHCb : <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>
- 2• Le site français dédié au LHC et aux expériences : www.lhc-france.fr
- 3• L. di Ciaccio et G. Hamel de Monchenault, « Découverte du Boson de Higgs au LHC ? », *Reflets de la physique* n°31 (2012) 17.
- 4• M. Petropoulos, « Cordes et théories d'unification », *Reflets de la physique* n°30 (2012) 12.
- 5• S. Emery et S. Loucatos, « Feuille de route pour la physique des deux infinis », *Reflets de la physique* n°32 (2013) 31.

>>> Le canal $B \rightarrow \mu^+ \mu^- K^*$

La plupart des résultats obtenus par LHCb ont à la fois amélioré la précision sur de nombreux paramètres et conforté la cohérence du modèle standard. Il en existe néanmoins certains qui, dans la limite des incertitudes actuelles des mesures, contredisent des prédictions bien établies. Ainsi, la distribution angulaire des particules en fonction de la masse reconstruite de la paire de muons lors de désintégrations du type $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ est sensible à la présence de particules inconnues. De plus, les prédictions sur ces distributions sont relativement précises.

La comparaison entre les mesures et les estimations théoriques pour une de ces variables angulaires (P'_5) est visible sur la figure 6 et montre un désaccord. Il est possible que cette divergence soit due à une trop faible statistique ; seule l'accumulation des données par LHCb permettra de la confirmer ou de la réfuter. Mais il peut également s'agir d'une première preuve de la nature incomplète du modèle standard.

Le futur de l'expérience

L'accélérateur LHC doit redémarrer en 2015, avec un nombre de protons stockés dans la machine et une énergie accrues. Les expériences bénéficieront alors d'une plus grande statistique pour mesurer avec plus de précision les phénomènes qui se déroulent aux points de collisions proton-proton.

Par ailleurs, les collaborations réfléchissent aux moyens d'améliorer la prise de données en augmentant l'efficacité des détecteurs et en changeant les méthodes de sélection des événements intéressants. Le prochain arrêt de l'accélérateur, prévu vers 2018, sera utilisé par la collaboration LHCb pour augmenter les performances de l'expérience, dans le but de gagner jusqu'à un ordre de grandeur sur la quantité de données utiles stockées.

Le modèle standard n'explique pas toutes les observations (l'exemple le plus flagrant est l'asymétrie matière-antimatière) ; la découverte d'une extension à ce modèle requiert plus de précision. C'est pourquoi un nombre croissant de physiciens travaillent en parallèle, à contraindre encore plus fortement le modèle standard en utilisant les données accumulées ces dernières années et, dans le même temps, à l'amélioration des détecteurs à venir. ■

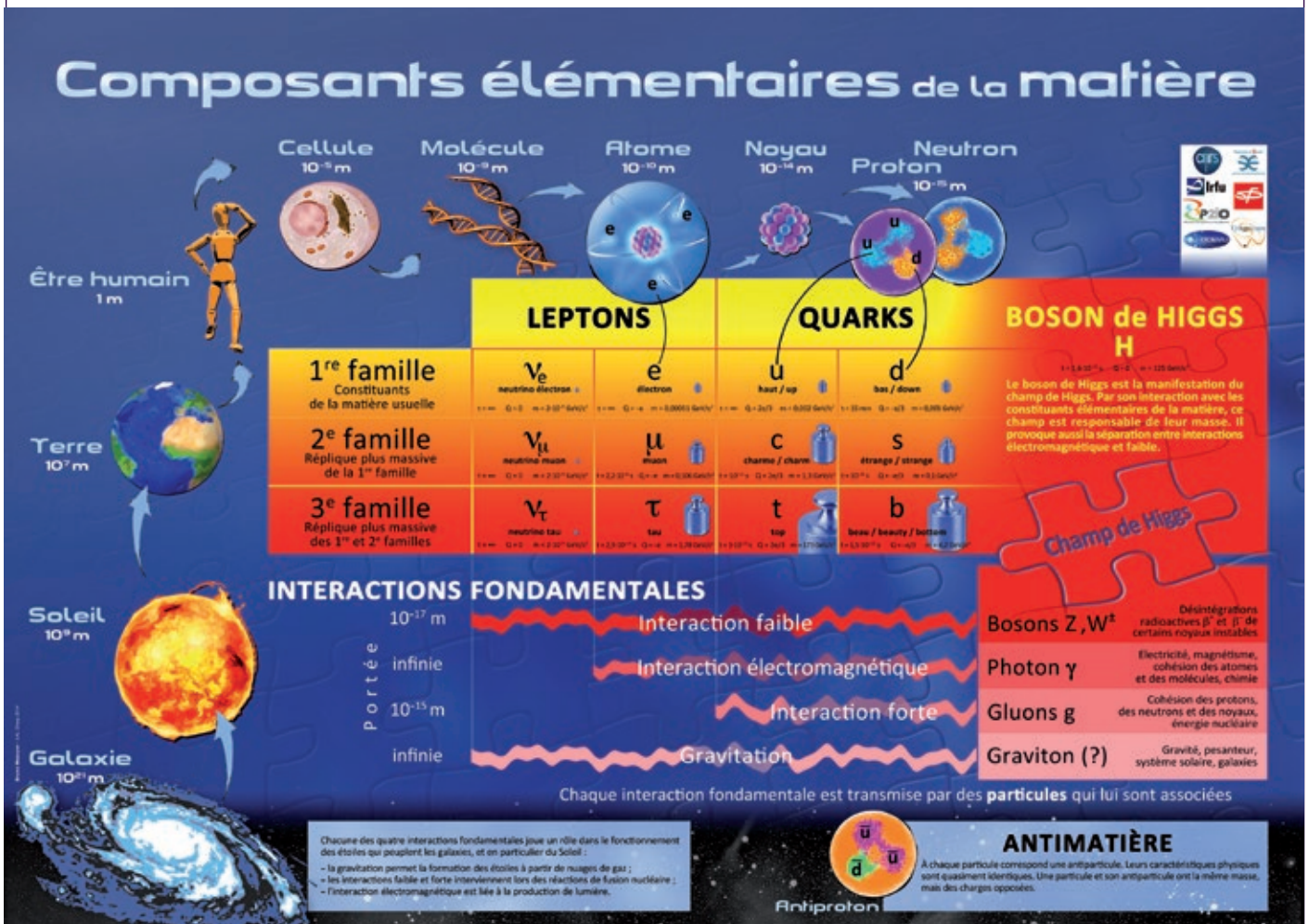
La nouvelle affiche « Composants élémentaires de la matière » est prête !

Il s'agit d'une version mise à jour du poster original sur fond bleu, créé en 2005 à l'occasion de l'Année mondiale de la physique.

Comme sa devancière, elle va être largement diffusée dans les établissements scolaires, les laboratoires et les universités et, plus généralement, vers les acteurs du domaine de la médiation scientifique.

Cette affiche, réalisée par une équipe pluridisciplinaire associant physiciens, enseignants et spécialistes en communication, est soutenue par la SFP, le CNRS, le CEA, l'Inspection générale de physique-chimie, Sciences à l'École et les laboratoires d'excellence ENIGMASS, OCEVU et P2IO.

Elle peut être commandée, ainsi que le livret pédagogique associé, par les laboratoires partenaires du projet, leurs instituts et tutelles, ainsi que par les associations de médiation scientifique.



Plus d'informations

www.particuleselementaires.fr

e-mail de contact : afficheComposantsElementaires@in2p3.fr

Les enjeux de l'hadronthérapie par ions carbone

Joseph Remillieux^{(1)*}, Jean-Michel Moreau^{(2)*} (jean-michel.moreau@univ-lyon1.fr), Denis Dauvergne^{(1)**} et Jacques Balosso^{(3)***}

(1) Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL), Université Claude Bernard Lyon 1, UMR 5822 CNRS/IN2P3, 69622 Villeurbanne Cedex

(2) Laboratoire d'Informatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS), Université Claude Bernard Lyon 1, UMR 5205 CNRS, 69622 Villeurbanne Cedex

(3) Institut des Neurosciences de Grenoble (GIN), INSERM U 836, CHU de Grenoble, Université Joseph Fourier, 38706 La Tronche Cedex

* Direction scientifique du Programme Rhônalpin de Recherche en Hadronthérapie pour ETOILE (PRRH)

** Direction du LabEx PRIMES et du Nœud Rhône-Alpes Auvergne de France HADRON (Farah)

*** Direction du GCS ETOILE et Direction de France HADRON.

L'hadronthérapie est une modalité de radiothérapie qui utilise des faisceaux d'ions pour traiter des tumeurs, éventuellement proches d'organes à risque, en réduisant les effets secondaires dans les tissus sains. L'utilisation des ions carbone permet en plus d'atteindre des doses d'ionisation assez élevées pour traiter les cancers les plus radiorésistants.

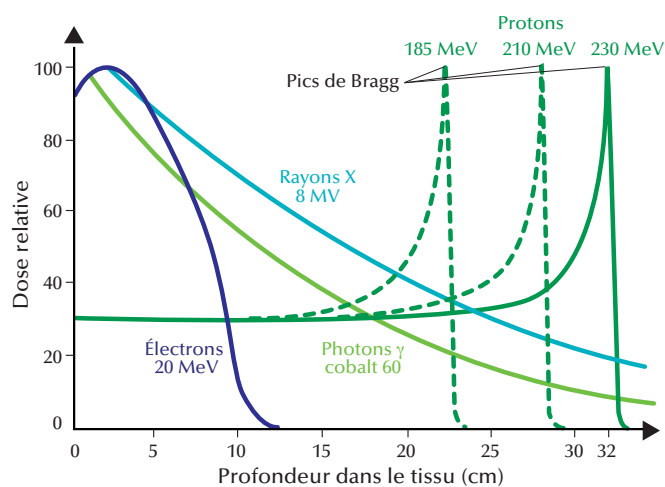
Cette thérapie, fondée sur l'interaction d'ions rapides avec les tissus, fait appel au savoir-faire des physiciens. Cet article fait le bilan et la prospective du rôle de ces derniers dans le développement de la thérapie par ions carbone.

L'ambition de doter la France d'un centre de traitement des tumeurs par faisceaux d'ions carbone est née, à la fin des années 1990, de la rencontre à l'Université Claude Bernard Lyon 1 de quelques médecins et physiciens, convaincus que la France avait toutes les capacités médicales et scientifiques pour initier un tel programme. Ce projet de « carbonothérapie » prit le nom de projet ETOILE (*Espace de Traitement Oncologique par Ions Légers en Europe*) au début des années 2000. Pour comprendre pourquoi il n'a pas été réalisé et évaluer les chances pour qu'il le soit un jour, il faut analyser les enjeux, les difficultés et les avantages de la carbonothérapie, comparée à la protonthérapie et aux formes les plus avancées de la radiothérapie.

Les physiciens et le développement de l'hadronthérapie

Le terme « hadronthérapie » est encore aujourd'hui énigmatique, tant pour les patients que pour la plupart des médecins. Ceci s'explique par le fait que c'est un physicien, R.R. Wilson [1], qui a suggéré l'intérêt qu'il pourrait y avoir dans le traitement des tumeurs solides à remplacer les « rayons » de la radiothérapie classique (des photons gamma, donc des bosons) par des faisceaux de protons (de la famille des hadrons).

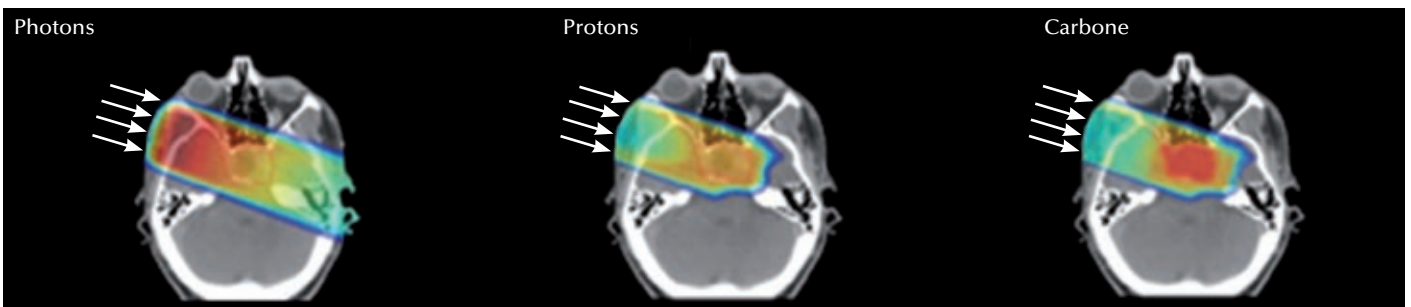
Cette proposition, solidement étayée, ne suscita qu'un très faible intérêt chez les radiothérapeutes, mais l'enthousiasme unanime des physiciens. L'argument de



1. Le pic de Bragg. Représentation schématisée du rendement de dose en profondeur d'un faisceau de protons mono-énergétiques, caractérisé par la présence d'un pic en fin de parcours (pic de Bragg), comparé à d'autres types de rayonnements utilisés en radiothérapie (photons X ou électrons). La position du pic de Bragg dépend de l'énergie initiale des protons. D'après [3].



Salle de traitement par irradiation dans le Centre de thérapie par faisceaux d'ions (HIT) de Heidelberg.



2. Simulation illustrative des profils de dépôts de dose (le rouge correspond aux doses les plus élevées) pour le traitement d'une tumeur cérébrale (au centre de chaque image, contour en orange) respectivement par des rayons X (à gauche), par des protons (au centre) et par des ions carbone (à droite). Source : GCS ETOILE.

Wilson était purement balistique, lié à l'existence du « pic de Bragg », découvert par W.H. Bragg [2], montrant que c'est à la fin de leur parcours que les ions déposent le plus d'énergie par unité de longueur, et donc de densité locale d'ionisation, dans la matière qu'ils pénètrent (fig. 1).

Wilson proposait d'aligner un faisceau de protons dans la direction de la tumeur à traiter, puis d'ajuster l'énergie du faisceau pour que le parcours des protons corresponde rigoureusement à la profondeur de la tumeur. Cette balistique permet de disposer d'une efficacité maximum d'ionisation au sein de la tumeur pour stériliser les cellules cancéreuses, mais aussi de créer moins de dommages dans les tissus sains traversés en amont, tout en épargnant ceux qui sont situés au-delà de la zone d'arrêt des protons. Ces trois « avantages balistiques » sont à la base de l'intérêt potentiel de la « protonthérapie » [3] par rapport à la radiothérapie par rayons X traversant le corps du patient (fig. 2).

La « visée » de la tumeur par le faisceau de protons ne pose pas de problème tant que la dispersion angulaire du faisceau au site de la tumeur reste faible ; cependant, la diffusion multiple des protons est d'autant moins négligeable que la tumeur est profonde.

De plus, le calcul du parcours des protons vers la tumeur se heurte à la complexité de la « cible » biologique traversée. Le ralentissement des ions dans la matière fut l'objet d'une succession de théories classiques puis quantiques et relativistes (N. Bohr 1913, H. Bethe 1930, F. Bloch 1933, U. Fano 1963...), et l'on travaille encore sur les raffinements de ces théories. Dans le cas de l'hadronthérapie, les distributions des compositions atomiques et des épaisseurs respectives des différents tissus traversés doivent être calculées à partir d'images de scanner X qui renseignent sur les taux d'absorption respectifs des rayons X dans ces tissus. La conversion de ces données d'absorption en énergie perdue par unité de longueur ou *pouvoir d'arrêt* (dE/dx) des tissus pour les ions, encore appelé *Transfert d'Énergie Linéique (TEL)* par les biophysiciens, est complexe, d'autant plus que la cible est ici vivante, susceptible de se déplacer, voire de se déformer, pendant l'irradiation. Cette complexité, de nature mécanique et cinétique, est particulièrement difficile à surmonter pour les tumeurs associées à des organes très mobiles, tels que les poumons.

Actuellement, les parcours et les dépôts de doses dans les tissus peuvent être simulés

par des logiciels développés par les physiciens des particules pour concevoir leurs grands détecteurs, comme le code GEANT4. Il faut ensuite prévoir l'efficacité clinique de l'hadronthérapie dans la tumeur, ainsi que ses éventuels effets secondaires dans les tissus sains traversés, c'est-à-dire passer de la dose physique locale à la probabilité de survie des cellules. Cette étape est celle du radiobiologiste, qui étudie les effets primaires et secondaires des dépôts de doses, c'est-à-dire les probabilités respectives d'endommagement, de réparation et de mort des cellules concernées. Dans la prévision et la simulation des effets cliniques, la collaboration entre biologistes et physiciens est indispensable, tant pour les aspects expérimentaux (dosimétrie) que théoriques (gerbes électroniques, radiolyse), et pour l'introduction des effets biologiques dans les codes de calcul.

Le savoir-faire des physiciens est aussi nécessaire pour que la séance d'irradiation puisse être *guidée par l'image* : leur expérience des grands détecteurs est transférable aux méthodes d'imagerie à développer pour le contrôle en temps réel de la distribution de la dose déposée dans l'organisme du patient.





L'hadronthérapie nécessite un accélérateur de particules permettant de traiter les tumeurs les plus profondes : pour pénétrer 30 cm de tissus il faut une énergie d'environ 220 MeV avec des protons, et 400 MeV par nucléon pour des ions carbone. C'est ainsi qu'en 1954, dans un laboratoire de physique nucléaire auprès du synchrotron *Bevatron*, au *Lawrence Berkeley Laboratory*, les premiers patients furent traités par protonthérapie. C'est dans ce même laboratoire que fut expérimentée dès 1975, auprès de l'accélérateur *Bevalac*, l'utilisation thérapeutique d'ions plus lourds que les protons (hélium, néon...). Cette innovation ouvrait l'hadronthérapie au domaine des *hauts TEL*, permettant d'atteindre dans le pic de Bragg des densités d'ionisation inaccessibles avec des rayonnements de bas TEL (X et protons, cf. fig. 2 pour les ions carbone).

Les tissus cancéreux irradiés dans ces conditions de haut TEL étant stérilisés, même en cas d'hypoxie, il devenait possible de traiter des tumeurs très radiorésistantes, quasi intraitables autrement. Par ailleurs, les tissus sains traversés, en amont du pic de Bragg, ne subissaient pas plus de dommages que dans les thérapies à *bas TEL*. C'est à Berkeley qu'il fut ainsi démontré qu'un optimum thérapeutique était obtenu avec des ions carbone : minimum d'effets secondaires dans les tissus sains pour une dose permettant la stérilisation totale des tumeurs les plus radiorésistantes. La carbonothérapie était née.

Afin de quantifier l'intérêt clinique de l'hadronthérapie, on introduit l'*Efficacité Biologique Relative* (EBR), qui est le rapport entre les doses respectives (en Gray, $1\text{G} = 1\text{J/kg}$) de rayons X et d'ions conduisant au même taux de survie des cellules irradiées, c'est-à-dire au même effet biologique du traitement. L'expérience montre que l'EBR des ions carbone est de l'ordre de 3, alors qu'il est proche de 1 pour les protons. Pour interpréter la haute efficacité biologique des ions carbone, les physiciens simulent les cascades d'électrons qui sont particulièrement denses dans leurs traces. Commence alors le travail collaboratif entre physiciens et radiobiologistes pour recenser, à toutes les échelles de temps, tous les effets primaires (les cassures multiples des brins de l'ADN) et secondaires (les effets physico-chimiques tels que la radiolyse de l'eau) susceptibles d'être létaux pour les cellules atteintes. Ces effets doivent ensuite être introduits dans le code de calcul global pour établir le *Plan de Traitement* du patient.

Pour la carbonothérapie (et dans une moindre mesure la protonthérapie), ce calcul doit aussi intégrer la probabilité de fragmentation nucléaire des projectiles et des atomes cible, qui pollue le faisceau au cours de sa pénétration vers la tumeur (effet d'autant plus important que la tumeur est profonde). La simulation tient compte de la dispersion latérale des fragments, et de leur pénétration éventuelle au-delà du pic de Bragg, ce qui détériore la précision de la balistique de l'irradiation. En revanche, la fragmentation produit des rayonnements secondaires et des noyaux radioactifs qui permettent l'imagerie en ligne et le contrôle du traitement.

Pour résumer [4], la maîtrise totale de la carbonothérapie, vue par un physicien, repose sur l'établissement d'un code de calcul fondé sur les interactions électromagnétiques (parcours et cascades électroniques), les interactions fortes (émission de fragments nucléaires et rayonnements de desexcitation des noyaux), les interactions faibles (désintégration des fragments), l'étape physico-chimique (évolution des espèces chimiques réactives) et enfin l'étape radiobiologique (mort ou réparation des cellules dans les tissus irradiés). Un rôle central revient aussi au radiothérapeute, qui décide pour chaque patient de la pertinence du traitement, des doses à délivrer dans les différents volumes cibles, des niveaux acceptables d'incertitude, du fractionnement des irradiations et du suivi après traitement.

Le développement des projets de carbonothérapie

Il y a aujourd'hui près de 50 centres de protonthérapie dans le monde (dont la moitié en Amérique du Nord) et seulement une demi-douzaine de centres de soins opérationnels par ions carbone (Asie et Europe). En juin 2014, à la conférence PTCOG [5], on recensait 95 424 patients traités par protonthérapie, et 12 778 par ions carbone.

À la suite des premières expérimentations des physiciens aux États-Unis, deux pays se lancèrent dans la réalisation de centres de carbonothérapie : le Japon, qui ouvrit le premier centre (HIMAC, Chiba, 1994), et l'Allemagne, par le biais du GSI (Darmstadt, 1998), autre centre de recherche en physique, relayé en 2009 par le centre dédié HIT du CHU de Heidelberg (voir photo, p. 27). À ce jour, l'Allemagne a achevé la construction de deux centres

(Heidelberg et Marburg), et le second sera bientôt opérationnel. Le Japon compte cinq centres en service (Chiba1 1994, Hyogo 2001, Gunma 2010, Chiba2 2012, Saga-Tosu 2013), et un sixième est en cours de réalisation (Kanagawa). Le centre italien CNAO à Pavie a ouvert en 2011, avec un premier patient traité par ions carbone en septembre 2012. L'Autriche construit son centre (MedAustron) à Wiener-Neustadt, les premiers traitements par protons auront lieu en 2016. En Chine, outre un centre expérimental à Lanzhou, un des plus grands centres du monde vient d'ouvrir début 2014 à Shanghai.

La France comptait deux projets de centre carbone : le premier, historiquement, à Lyon (ETOILE, traitement, recherche clinique et R&D autour du patient) et le second à Caen (ARCHADE, recherche technologique sur de nouveaux types d'accélérateurs et expérimentation pour la carbonothérapie). À ce jour seul le projet ARCHADE est lancé, pour de la protonthérapie de routine et pour la mise au point d'un cyclotron cryogénique pour ions carbone.

Malgré sa validité clinique et technologique acquise pour le traitement de tumeurs radiorésistantes au Japon et en Allemagne, plusieurs raisons peuvent expliquer les difficultés rencontrées par les promoteurs de la carbonothérapie.

Du point de vue de la physique, d'abord :

- les effets secondaires importants de la neutronthérapie, qui exploitait le potentiel thérapeutique associé au *haut TEL* des faisceaux de neutrons. Ces effets néfastes, liés à la mauvaise balistique associée à la pénétration des neutrons dans la matière, ont conduit à l'abandon progressif de la neutronthérapie (fermeture du centre d'Orléans en 2007). Cette expérience thérapeutique a cependant contribué à la compréhension des effets biologiques des hauts TEL dans les tissus, et la thérapie par capture neutronique par des noyaux ciblés tels que le bore reste une thérapie prometteuse [6] ;
- les faibles effets secondaires associés à la protonthérapie en font une méthode de soins particulièrement attractive en pédiatrie. Ceci explique en partie la grande attention portée aux centres de protonthérapie, notamment en France.

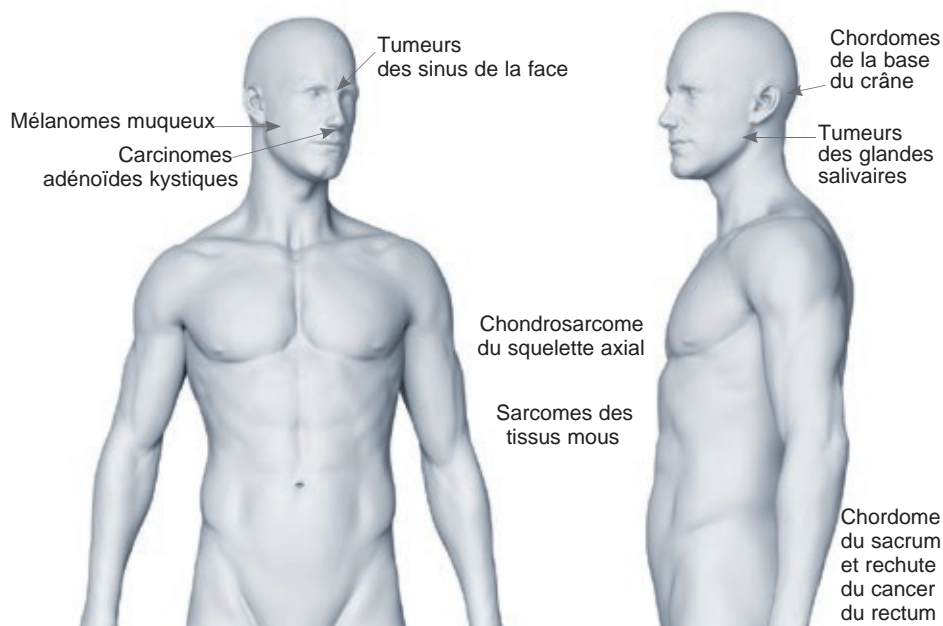
Du point de vue économique et politique, ensuite :

- le processus décisionnel français a été affecté par l'absence de réalisation de centre de traitement par ions carbone aux États-Unis, pour des raisons liées au modèle économique de santé nord-américain. Les modèles de santé allemand, italien et autrichien, tous différents mais fondés sur une couverture sociale publique (ou *via* des compagnies d'assurances santé obligatoires), se sont révélés plus favorables ;
- la crainte des radiothérapeutes eux-mêmes de voir une partie du financement destiné à la carbonothérapie manquer à leur propre activité ;
- le retrait du principal acteur industriel européen de la carbonothérapie, Siemens, après la construction des centres de HIT et Marburg (et le démantèlement d'un troisième centre à Kiel, mais cependant la conduite à son terme du centre de Shanghai), a renforcé l'idée de non-rentabilité économique en Europe. Les centres italien et autrichien ont, quant à eux, bénéficié du savoir-faire et du soutien technologique du CERN. Pendant ce temps, les Japonais ont su associer les développements combinant recherche publique (NIRS) et partenaires industriels (Mitsubishi, Hitachi, Sumitomo et Toshiba) ;
- le coût des technologies et recherches associées à la carbonothérapie, qui peut être deux fois plus élevé que pour la protonothérapie, notamment pour la réalisation de dispositifs de distribution rotative du faisceau autour du patient.

Les principaux axes de recherche en hadronthérapie

Les principaux axes thématiques de recherche en hadronthérapie visent à optimiser la qualité, mais aussi le coût du traitement. Ces objectifs ont largement motivé le Programme régional de recherche en hadronthérapie (PRRH) autour du projet ETOILE de 2002 à 2013 [7], puis, de façon plus générale pour l'hadronthérapie par protons et ions carbone, au sein de France HADRON depuis 2012. (Voir aussi [4].)

1. Recherches médicales et médico-économiques. Il s'agit de déterminer les indications (fig. 3) nécessitant une thérapie par protons ou par ions carbone, à partir de modélisations, d'études cliniques et épidémiologiques, la mise en place



3. Indications consolidées pour la thérapie par ions carbone. Source : GCS ETOILE.

de réseaux de soins aux niveaux national et international et la détermination d'un flux de patients pouvant être traités dans un centre donné.

2. Outils pour la planification du traitement. Ces outils comprennent une modélisation *in silico* (informatique) des effets thérapeutiques, la modélisation physique du dépôt de dose, et l'optimisation des simulations pour le calcul du plan de traitement : certains paramètres nécessitent des volumes de calcul importants, qui entraînent un besoin croissant en puissance et en temps de calcul.

3. Radiobiologie. Les traitements par hadronthérapie s'appuient sur l'étude des effets radiobiologiques des ions sur les cellules saines ou tumorales, au niveau le plus fin (ADN) (fig. 4). Un problème important est de déterminer l'efficacité biologique relative (EBR) des différents types de rayonnements utilisés en radiothérapie. Ces informations se traduisent dans les modèles employés pour définir le plan de traitement de chaque tumeur identifiée.

4. Outils et instrumentation pour l'amélioration du traitement. En plus de développements spécifiques autour des accélérateurs et lignes de faisceaux (par exemple, le besoin d'irradier les tumeurs selon diverses incidences

angulaires justifie l'étude de têtes rotatives isocentriques cryogéniques), les équipes françaises se concentrent sur :

- le développement d'instruments pour le contrôle en ligne du traitement, permettant de connaître et de contrôler en temps réel la dose distribuée et donc le traitement en cours de séance. Parmi les instrumentations développées figurent les capteurs de particules secondaires produites par les collisions nucléaires du projectile (gammas de désexcitation des noyaux, protons secondaires, ou encore fragments radioactifs pour la tomographie par émission de positons en ligne) ;
- le suivi des organes et tumeurs en mouvement. Pour pouvoir prendre en compte ces mouvements dans le cas d'une technique aussi performante que l'hadronthérapie, il est nécessaire de développer des méthodes de radiothérapie guidée par l'image et/ou fondées sur une modélisation biomécanique multi-échelle (de la cellule à l'organe).

Conclusion et perspectives

Dans le développement de la carbonothérapie, les laboratoires de physique ont joué un rôle fondamental : à Berkeley, au GSI (Darmstadt), et aussi au CERN *via* le projet R&D PIMMS [8] et la fédération des efforts de recherche en hadronthérapie par le biais du consortium européen ENLIGHT. Cependant, les accélérateurs d'ions carbone restent encombrants,

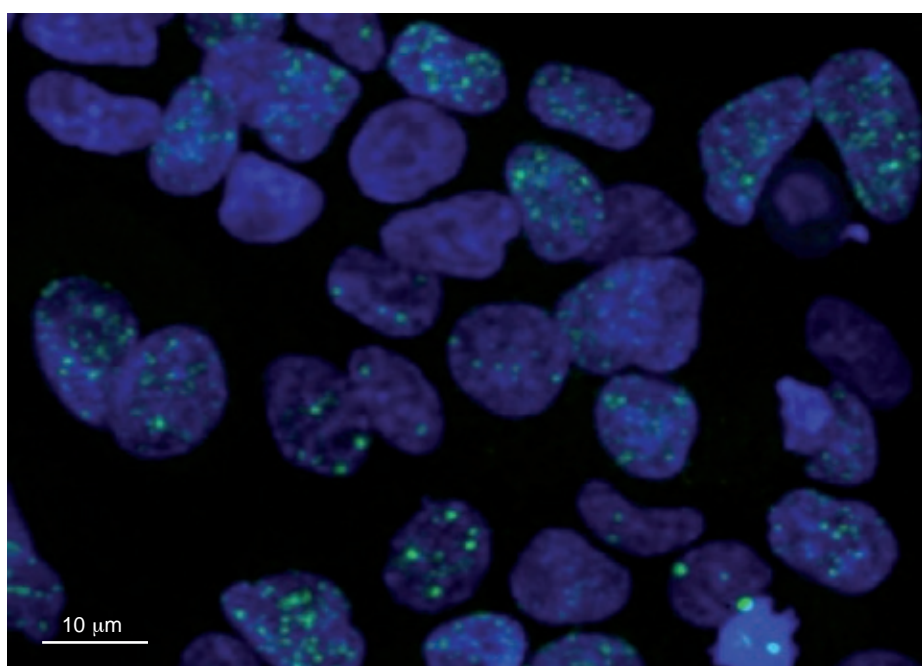
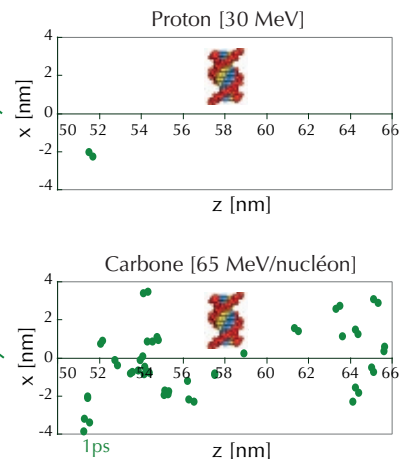
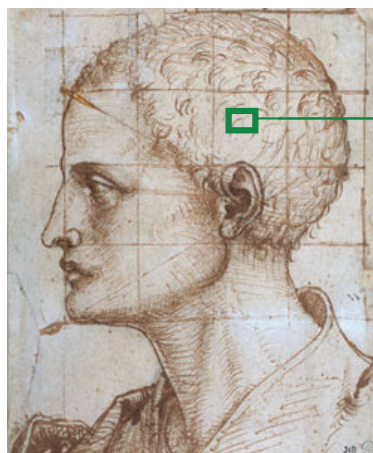




onéreux, et délivrent des flux trop faibles pour certains traitements. On peut fonder beaucoup d'espoirs sur la récente décision du CERN d'investir dans l'hadronthérapie, tant sur le plan de la recherche technologique vers de nouveaux accélérateurs d'ions que sur la mise à disposition de lignes de faisceaux d'ions pour la radiobiologie des hauts TEL. De même, la récente décision de démarrer la R&D pour un cyclotron supraconducteur à ARCHADE permet d'envisager des solutions sur le très long terme.

Du côté médical, le développement de la carbonothérapie recevra certainement une plus grande attention lorsque des études comparatives pourront mesurer de manière irréfutable l'apport de la radiothérapie à haut TEL pour le traitement des tumeurs radorésistantes inopérables. Ces études sont en cours, notamment en Allemagne et en Italie. Elles ont pu démarrer pratiquement dès l'ouverture des centres européens, grâce à l'expérience accumulée par le NIRS (National Institute of Radiological Science) au Japon.

La contribution de la France passera par la collaboration et l'organisation d'études multicentriques telles que celle qui est soutenue par le Programme hospitalier de recherche clinique et la Caisse nationale d'assurance maladie, en collaboration avec le centre italien CNAO. C'est une des missions de l'Infrastructure nationale de recherche en santé et biotechnologie France HADRON, cofinancée par le programme Investissements d'avenir, de coordonner et entretenir une activité dynamique de recherche clinique et de R&D autour de la carbonothérapie, en attendant l'ouverture de centres français. Ceci doit être réalisé dans le cadre européen. On peut ainsi espérer que l'avance acquise ces dernières années ne soit pas perdue, alors que d'autres centres vont se construire ailleurs dans le monde, et notamment aux USA où plusieurs projets semi-publics se consolident progressivement sous l'égide du *National Cancer Institute*. Le rôle de projets européens comme ULICE (*Union of Light Ion Centers in Europe, ENLIGHT*) pour favoriser et dynamiser les collaborations scientifiques et médicales de recherche en hadronthérapie au sein de l'Europe est tout aussi important. ■



4. Radiobiologie.

Haut : production de radicaux libres (points verts), à la suite d'une irradiation par protons et ions carbone. Les particules se déplacent de la gauche vers la droite, le long de l'axe z.

Bas : image de microscopie par fluorescence. Les taches vertes matérialisent le marquage des cassures d'ADN double brin ; les zones bleues, le marquage du noyau des cellules. Source : PRRH/ETOILE (IPNL).

Références

- 1• R.R. Wilson, "Radiological uses of fast protons", *Radiology* **47** (1946) 487-491.
- 2• W. Bragg et R. Kleeman, "On the α particles of radium, and their loss of range in passing through various atoms and molecules", *Phil. Mag.*, **10** (1905) 318-340.
- 3• R. Ferrand, « La protonthérapie, technique de pointe à l'interface entre la physique et la médecine », *Reflète de la physique* **26** (2011) 4-9.
- 4• The Nuclear Physics European Collaboration Committee, *Nuclear Physics for Medicine* (2014). www.nupec.org/pub/npmed2014.pdf
- 5• www.ptcog.ch/archive/patient_statistics/Patientstatistics-updateMar2014.pdf
- 6• W.A.G. Sauerwein *et al.*, *Neutron Capture Therapy*, Springer Verlag (2012).
- 7• M. Bajard *et al.*, *Rapport d'activité du Programme Régional de Recherche en Hadronthérapie pour le Centre ETOILE*, Université Claude Bernard Lyon 1, juin 2013. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00840163>.
- 8• L. Badano, P. Bryant *et al.*, *Proton-Ion Medical Machine Study (PIMMS)*, parts I and II, CERN/PS 99-010 and 00-007 DR (1999).

Les rayons cosmiques d'énergie extrême

L'une des grandes énigmes de l'astrophysique moderne

Olivier Deligny (deligny@ipno.in2p3.fr) et Tiina Suomijärvi (tiina@ipno.in2p3.fr)
Institut de Physique Nucléaire, CNRS/IN2P3 & Université Paris Sud XI-Orsay, 91406 Orsay cedex

Certaines particules provenant du cosmos transportent autant d'énergie qu'une balle de tennis frappée par les meilleurs joueurs. D'où viennent ces rayons cosmiques, et comment sont-ils accélérés à de telles énergies ? Ces questions ont motivé la construction du plus grand détecteur jamais conçu : l'Observatoire Pierre Auger, en Argentine.

Cet observatoire, couvrant une surface de 3000 km² afin de compenser au mieux la faiblesse du flux de ces particules de l'extrême, a permis de répondre à de nombreuses questions que soulevait leur existence. Même si leur origine exacte nous échappe encore, les données qui seront collectées dans la future configuration de l'Observatoire pourraient nous permettre de percer les secrets des accélérateurs naturels les plus puissants de l'Univers.



1. L'Observatoire Pierre Auger.

(a) Une cuve à effet Cherenkov de 3,6 m de diamètre contenant 12 000 litres d'eau purifiée.

(b) Un télescope à fluorescence, avec son miroir d'une surface de 13 m² et sa camera avec 440 pixels constitués de photomultiplicateurs.



Les rayons cosmiques ont été découverts il y a une centaine d'années, en 1912, par Victor Hess. En montant avec ses instruments à bord d'un ballon rempli d'hydrogène pour s'élever jusqu'à 5000 mètres d'altitude (sans dispositif d'assistance respiratoire !), il mesura le taux d'ionisation en fonction de l'altitude : le taux décroît jusqu'à 700 mètres, puis croît au-delà. Cette expérience fondamentale, suivie un an plus tard par celle de Werner Kolhörster (dont le ballon atteignit l'altitude de 9300 mètres), montra que le rayonnement ionisant observé jusqu'alors au niveau du sol provenait de l'espace extra-terrestre et non de la radioactivité naturelle des éléments présents sur Terre. Plus tard, en 1938, Pierre Auger montra que certains rayons cosmiques très énergétiques génèrent dans l'atmosphère des cascades de particules secondaires, s'étalant sur de très grandes surfaces au niveau du sol, cascades appelées *grandes*

gerbes atmosphériques (voir encadré 1, p. 32). Il en déduisit l'existence de rayons cosmiques transportant des énergies de l'ordre de 10¹⁵ eV (électron-volts).

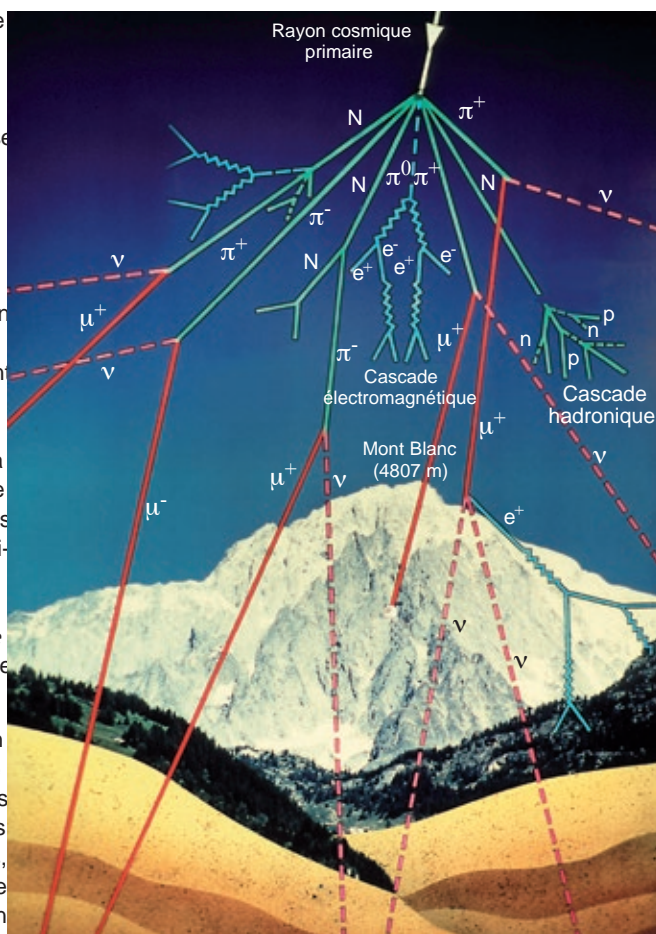
Depuis, des rayons cosmiques encore plus énergétiques ont été observés, et nous savons aujourd'hui que certains d'entre eux peuvent acquérir des énergies supérieures à 10²⁰ eV. Ils sont les messagers des phénomènes les plus violents se produisant dans certaines conditions extrêmes opérant dans l'Univers (voir encadré 2, p. 34). Mais leur origine demeure l'une des grandes questions auxquelles est confrontée l'astrophysique moderne. Les données collectées au-delà de ~ 10¹⁷ eV à l'Observatoire Pierre Auger depuis une dizaine d'années ont cependant permis de répondre à de nombreuses questions, et fournissent aujourd'hui une vue d'ensemble sur la nature et l'origine des rayons cosmiques les plus énergétiques provenant de la Galaxie et d'au-delà.

»»»

Une gerbe atmosphérique est une cascade de particules produite lorsqu'un rayon cosmique pénètre dans l'atmosphère (fig. E1). Pour un rayon cosmique tel qu'un proton ou un noyau de masse atomique A (avec $A \leq 56$, car les noyaux plus lourds que le fer ne sont pas assez abondants), la première interaction est hadronique et se produit dans la haute atmosphère, à environ 20 kilomètres d'altitude au-dessus du niveau de la mer. Cette première interaction produit un grand nombre de particules secondaires, principalement des pions, qui engendrent eux-mêmes d'autres interactions hadroniques : c'est toute une *cascade hadronique* qui est donc générée dans les premières couches de l'atmosphère. Les pions neutres se désintègrent en photons, qui peuvent produire des paires électron-positron tant que leur énergie est suffisante, et les électrons et positrons peuvent eux-mêmes produire des photons par rayonnement Bremsstrahlung : c'est toute une *cascade électromagnétique* qui est générée et qui se propage jusqu'au niveau du sol sur des surfaces allant jusqu'à quelques kilomètres carrés. Par ailleurs, la cascade hadronique s'éteint lorsque l'énergie des pions chargés est telle que ces derniers se désintègrent avant de pouvoir interagir. Cela se passe à une altitude d'environ 6 kilomètres au-dessus du niveau de la mer. Des muons sont alors produits avec une énergie de quelques GeV (10⁹ eV), et peuvent se propager jusqu'au sol en grand nombre : c'est la *cascade muonique* des gerbes. Cette cascade reste relativement concentrée autour de l'axe de la gerbe.

La cascade de réactions en chaîne provoquée à la suite de la collision d'un rayon cosmique avec une molécule de l'atmosphère se manifeste par deux effets mesurables. D'une part, aux ultra-hautes énergies (> 10¹⁸ eV), la cascade laisse une empreinte de plusieurs dizaines de milliards de particules secondaires (essentiellement des photons, des électrons/positrons et des muons) au niveau du sol, empreinte s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Grâce à un réseau de capteurs mesurant le nombre de particules par unité de surface en seulement quelques points, il est possible de reconstruire le profil *latéral* de la gerbe en ajustant des courbes théoriques sur les points de mesures. Ces courbes sont paramétriques, et l'un de ces paramètres est la *taille* de la gerbe, qui n'est autre que le signal attendu à une distance fixe du pied de gerbe. Cette distance est soigneusement choisie de sorte à être le meilleur compromis pour minimiser les fluctuations de signal attendues près du pied de gerbe en raison des fluctuations du point de première interaction dans l'atmosphère, et celles attendues loin du pied de gerbe en raison des fluctuations du faible nombre de particules. Une fois déterminée, la taille de la gerbe est un bon indicateur de l'énergie du rayon cosmique primaire. Par ailleurs, les temps de déclenchement des capteurs au sol permettent de remonter à la direction d'arrivée du rayon cosmique, en ajustant ces temps sur le passage d'une « galette » représentant le front de gerbe se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, c .

D'autre part, les électrons/positrons de la gerbe déposent une partie de leur énergie dans l'atmosphère, en ionisant les molécules d'azote et d'oxygène. Celles-ci, dans leur désexcitation, émettent dans l'ultraviolet une faible lumière, dite de fluorescence. De manière simplifiée, la gerbe vue par un détecteur optoélectronique (des tubes photomultiplicateurs) sera similaire à une ampoule de quelques dizaines de watts émettant une lumière d'intensité variable dans l'ultraviolet et traversant le ciel à une vitesse proche de c . Le suivi des photons détectés en fonction de l'altitude permet ainsi de tracer le profil *longitudinal* des gerbes. La profondeur atmosphérique X_{max} , correspondant à l'épaisseur d'air traversée et exprimée en g/cm^2 mo



El. Chaîne de désintégration d'un rayon cosmique de haute énergie dans l'atmosphère. N : noyau atomique ; p : proton ; n : neutron ; e⁻ : électron ; e⁺ : positron ; γ : photon ; μ⁺, μ⁻ : muons ; π⁰ : pion neutre ; π⁺, π⁻ : pions chargés. Version modifiée d'une figure originale du CERN

le nombre de photons détectés est maximum, revêt une importance particulière, car elle constitue le meilleur indicateur de la composition du rayon cosmique primaire. D'autre part, l'observation de ce profil permet de mesurer également l'énergie E_0 du rayon cosmique primaire de manière quasiment *calorimétrique*, en intégrant ce profil et en prenant en compte la fonction de transmission des photons depuis l'origine de la gerbe jusqu'au détecteur.

La composante muonique des gerbes recèle également beaucoup d'informations. Pour des rayons cosmiques de même énergie mais de compositions différentes, le nombre total de muons N_μ diffère significativement et constitue donc aussi, en principe, un bon indicateur pour déterminer la nature du rayon cosmique primaire à l'origine de la gerbe. Par ailleurs, le spectre en énergie des muons ainsi que leur répartition autour de l'axe de la gerbe peuvent en principe renseigner sur les premières interactions hadroniques ayant lieu dans les premiers étages de cette gerbe dans la haute atmosphère, interactions modélisées à partir d'extrapolations de résultats obtenus dans des accélérateurs de particules tels que le LHC au CERN. Cependant, il est encore aujourd'hui difficile de séparer les composantes électromagnétique et muonique des gerbes au niveau du sol, et ainsi de mesurer N_μ . Une telle mesure est une des motivations pour opérer l'*upgrade* de l'Observatoire (voir p. 36).

L'Observatoire Pierre Auger

En raison de la faiblesse du flux des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (moins d'une particule par kilomètre carré et par siècle !), il a fallu voir grand afin de pouvoir recueillir le maximum de ces précieux oracles. L'Observatoire Pierre Auger, ainsi nommé en l'honneur du pionnier français, est un ensemble de détecteurs répartis sur une surface de 3000 kilomètres carrés sur la plaine des hauts plateaux de la Pampa Amarilla, en Argentine. Cet observatoire allie deux techniques complémentaires de détection des grandes gerbes atmosphériques (voir encadré 1) : un réseau de détecteurs de particules au niveau du sol afin d'échantillonner le profil latéral des gerbes, c'est-à-dire le nombre de particules traversant une surface donnée à une certaine distance du pied de gerbe, et des télescopes à fluorescence échantillonnant leur profil longitudinal, c'est-à-dire le nombre de particules en fonction de l'altitude.

Les détecteurs de particules sont des cuves remplies d'eau, utilisant l'effet Cherenkov : en pénétrant dans l'eau de ces cuves, les particules chargées ultra-relativistes issues des gerbes atmosphériques, telles que les électrons/positrons et muons, rayonnent par effet Cherenkov, car leur vitesse est supérieure à la célérité des ondes électromagnétiques dans l'eau (notons que les nombreux photons de haute énergie issus des gerbes sont aussi détectés par ce procédé de manière indirecte, en profitant du fait qu'ils produisent des paires électron-positron lorsqu'ils pénètrent dans l'eau). Ce rayonnement est détecté par des photomultiplicateurs placés dans les cuves. Une photographie d'une de ces cuves est montrée sur la figure 1a. La première cuve a été installée en février 2000. Depuis, 1660 détecteurs identiques, espacés tous les 1,5 kilomètre, ont été déployés et opèrent avec un cycle de service quasi permanent.

L'autre technique de détection des gerbes repose sur des matrices de plusieurs centaines de capteurs photosensibles qui, grâce à un jeu de miroirs de télescope, surveillent chacun une petite portion du ciel. Ces capteurs détectent la fluorescence provoquée par la désexcitation des molécules d'azote à la suite de leur excitation par les nombreux électrons d'ionisation créés lors du passage dans l'atmosphère de la cascade électromagnétique des gerbes. Cette désexcitation donne lieu à un rayonnement ultraviolet très faible (équivalent à

l'énergie émise par une lampe de quelques dizaines de watts), mais que l'on arrive à déceler jusqu'à 30 ou 40 kilomètres de distance pendant des nuits sans lune. Au total, 27 télescopes identiques à celui montré sur la figure 1b sont répartis sur 5 sites, et sont orientés de manière à surplomber le réseau de détecteurs de particules.

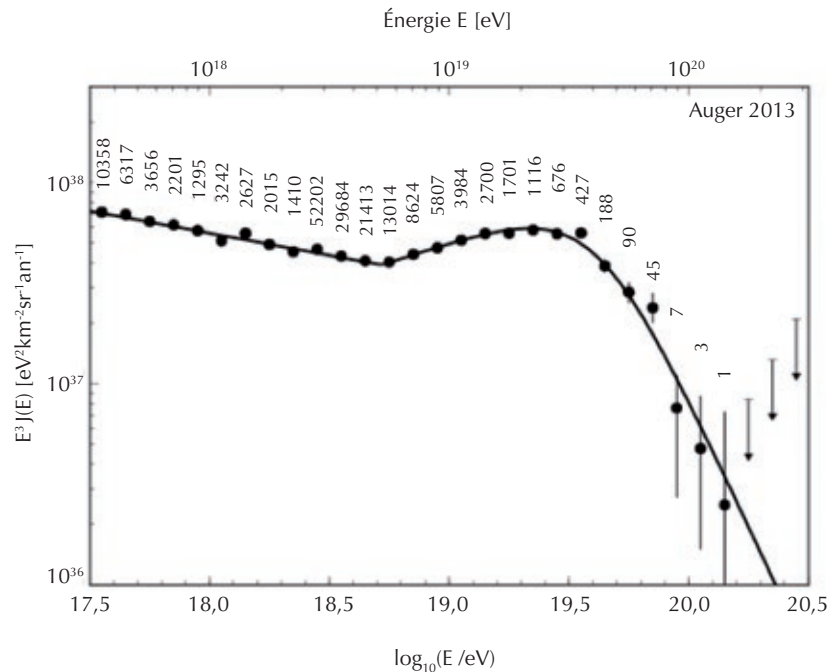
L'utilisation combinée des détecteurs au sol et des détecteurs de fluorescence permet d'accéder avec une grande précision aux caractéristiques des rayons cosmiques primaires (voir encadré 1).

La collaboration Auger est internationale, et comprend actuellement environ 500 chercheurs de 18 pays. La construction de l'Observatoire, qui avait démarré en 2001, a été terminée en juin 2008. Les équipes françaises y ont joué un rôle important, en particulier dans la conception et la réalisation de l'électronique des détecteurs de particules et dans le système d'acquisition et de transmission des données. Celles-ci sont transférées au centre de calcul de l'IN2P3 à Lyon, où elles sont disponibles pour l'analyse par les membres de la collaboration.

Les enseignements de l'Observatoire Pierre Auger

Le spectre des rayons cosmiques mesuré à l'aide des données de l'Observatoire Auger est représenté sur la figure 2, multiplié par l'énergie au cube afin de discerner plus clairement sa structure. Deux caractéristiques sont frappantes : une rupture de pente autour de 5×10^{18} eV, et une coupure du flux une décade en énergie plus haut. La rupture de pente, appelée *cheville*, est généralement considérée comme une signature spectrale marquant la transition entre l'extinction des rayons cosmiques d'origine galactique (qui dominent aux énergies inférieures à celle de la cheville) et l'apparition de la composante extragalactique (jusqu'à-là sous-dominante) pour des énergies supérieures.

Les champs magnétiques présents dans la Galaxie, de l'ordre du microgauss, courbent tellement la trajectoire des particules qu'ils empêchent l'identification directe des sources des rayons cosmiques par leurs directions d'arrivée. Néanmoins, pour des énergies supérieures à 10^{18} eV, la rigidité des trajectoires des particules devient suffisamment grande pour que certains



2. Spectre en énergie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie mesuré à l'Observatoire Pierre Auger. Le flux $J(E)$ (nombre de particules par unité d'énergie, de surface et d'angle solide, et par an) est multiplié par l'énergie au cube, afin de mieux discerner les structures du spectre. Les chiffres placés au-dessus de chaque mesure du flux indiquent le nombre d'événements détectés dans chaque intervalle d'énergie.



E2. La galaxie Centaurus A, observée en UV par le spectrographe FORS2 du télescope VLT de l'ESO, au Chili. Centaurus A est une des galaxies à noyau actif les plus proches de nous, située à 13 millions d'années-lumière de la Terre, avec un trou noir, dont la masse est évaluée à environ 50 millions de fois la masse solaire, au centre, et des jets de plasma susceptibles d'accélérer des rayons cosmiques.

De nombreux phénomènes astrophysiques mettent en jeu des gaz de plasma, c'est-à-dire des nuages d'ions en mouvement qui ont la propriété d'être accompagnés de champs magnétiques turbulents. Ces nuages de plasma et leurs champs turbulents agissent vis-à-vis des particules chargées comme une raquette de tennis sur une balle : quand la balle et la raquette ont des mouvements en sens opposés, la balle repart avec une vitesse plus grande après la frappe. Ce mécanisme d'accélération, nommé « mécanisme de Fermi », est invoqué pour expliquer l'accélération des particules dans des objets astrophysiques.

Les galaxies dites « à noyau actif » (fig. E2) sont des exemples d'objets assez violents pour accélérer des particules aux énergies extrêmes. Leur cœur abrite un trou noir supermassif, pouvant atteindre un milliard de masses solaires. Un tel monstre absorbe des torrents de gaz et des amas de matière, avec un débit de plusieurs masses solaires par an. La matière qui tombe dans le centre galactique s'enroule autour de lui en un disque de plasma très chaud, parcouru par des champs magnétiques intenses. Certains disques d'accrétion peuvent produire des jets, sortes de paires de faisceaux de matière se mouvant extrêmement rapidement et émergeant près du disque. Les rayons cosmiques pourraient être accélérés dans de tels jets.

Un autre phénomène astrophysique de très grande violence est aussi mis en avant : les « sursauts gamma ». Ceux-ci ont été découverts au début des années 60. Deux ou trois fois par jour, les astronomes constatent de brèves explosions de rayons gamma quelque part dans le ciel. Les sources de ces explosions sont réparties uniformément sur la voûte céleste, ce qui semble indiquer qu'elles sont distribuées de façon homogène dans tout l'Univers. Si tel est le cas, la plupart des sursauts observés doivent être produits par des événements qui ont eu lieu à d'énormes distances (plusieurs milliards d'années-lumière) ; l'on en déduit que, pour être détectables, ils ont dû mettre en jeu des énergies considérables. Selon certains modèles, un sursaut émet en quelques millièmes de seconde une quantité d'énergie équivalente à celle que l'on obtiendrait en transformant en rayonnement la totalité de la masse du Soleil.

Il existe donc dans l'Univers des phénomènes violents pouvant accélérer des rayons cosmiques à des énergies colossales. Néanmoins, le mécanisme à l'œuvre pour accélérer des rayons cosmiques à des énergies de l'ordre de 10^{20} eV reste encore à identifier.

>>>

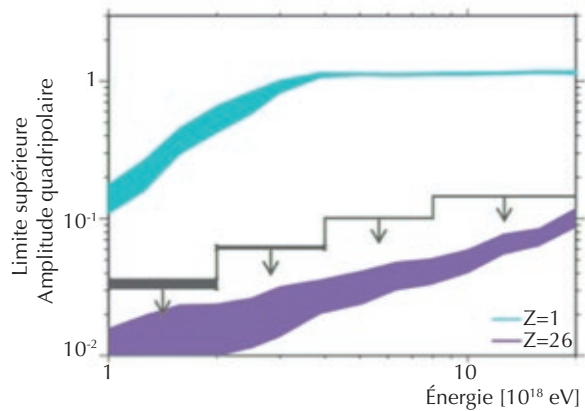
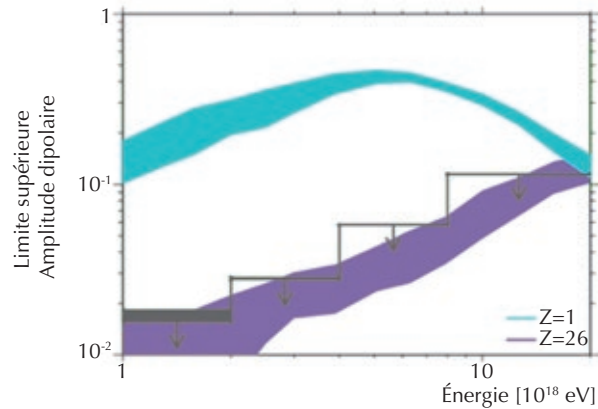
motifs puissent apparaître dans les directions d'arrivée étudiées à grande échelle. Pour des sources distribuées préférentiellement dans le disque de la Galaxie par exemple, des excès d'anisotropie dipolaire et quadripolaire sont des signatures génériques de la position excentrée du système solaire dans la galaxie. Mais, dans la limite des sensibilités actuelles, de telles anisotropies n'ont pas été observées comme on peut le voir sur la figure 3, alors qu'elles auraient dû l'être de manière significative pour des protons.

Il est intéressant de souligner que les résultats récents obtenus à l'Observatoire en termes de composition indiquent justement une présence majoritaire de protons, avec une présence minoritaire de noyaux du groupe carbone-azote-oxygène. Ces observations pourraient donc signifier que les protons proviennent de sources distribuées de manière plus ou moins isotrope en dehors de la Galaxie, ce qui pourrait expliquer plus naturellement le fort niveau d'isotropie observé autour de 10^{18} eV. Mais une telle explication soulève alors une autre question : si les rayons cosmiques sont déjà majoritairement d'origine extragalactique à des énergies inférieures à celle de la cheville, quelle est alors l'origine de la cheville ? Ainsi, comprendre comment s'opère la transition entre rayons cosmiques galactiques et extragalactiques, et quelle est l'origine de la cheville, sont des questions de grande actualité dans le domaine. Des caractérisations des distributions angulaires à grande échelle en fonction de la masse sont ici nécessaires, afin d'identifier l'origine de chaque composante.

L'autre caractéristique frappante du spectre montré sur la figure 2 est la coupure du flux observée au-delà de $\approx 5 \times 10^{19}$ eV. Les travaux fondateurs de Greisen, Zatsepin et Kuzmin (GZK) dans les années 60 avaient prédit ce genre de coupure dans cette gamme d'énergie (*ultra-hautes énergies* dans le jargon), en raison de l'interaction des protons extragalactiques avec le rayonnement du fond diffus cosmologique (voir encadré 3, p. 36). Par la suite, d'autres travaux montrèrent qu'une coupure semblable était aussi attendue pour des noyaux plus lourds. Une telle interprétation de la coupure observée impliquerait que les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie sont produits de manière quasi-identique dans des sites astrophysiques uniformément répartis dans l'Univers, et peuvent même y être accélérés bien au-delà de 10^{20} eV.

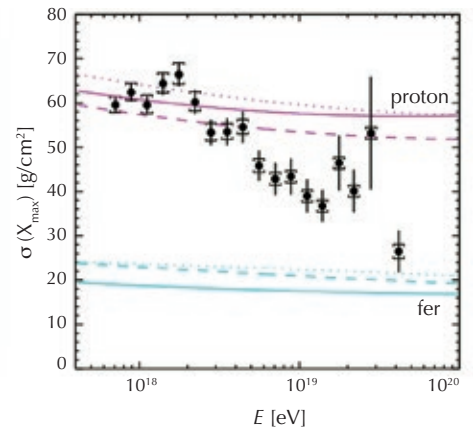
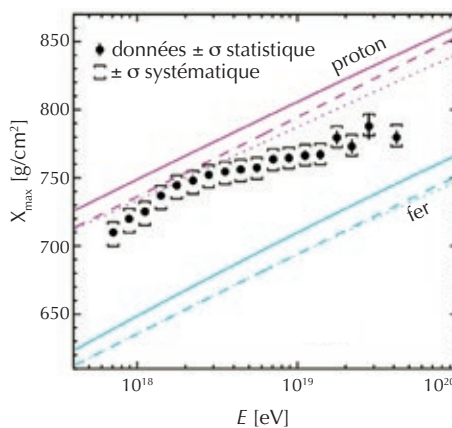
Cependant, les mesures de composition basées sur l'observation du maximum du développement des gerbes, X_{\max} , par les télescopes à fluorescence, ont apporté des éléments qui s'inscrivent mal dans ce scénario standard (fig. 4). En effet, la composition moyenne des rayons cosmiques s'alourdit progressivement avec l'énergie. Afin de reproduire simultanément la moyenne et l'écart type du maximum de développement des gerbes montrés sur la figure 4, des études récentes ont montré que la composante de protons disparaît entre 5×10^{18} et 10^{19} eV, et que la composition est dominée par des noyaux du groupe carbone-azote-oxygène vers 3×10^{19} eV. Ainsi, les modèles visant à reproduire simultanément le spectre en énergie et les mesures de X_{\max} favorisent nettement un scénario dans lequel les rayons cosmiques extragalactiques seraient accélérés proportionnellement à leur charge, avec une énergie de coupure inférieure à 10^{19} eV pour les protons. Dans ce cadre, la coupure du spectre observée à ultra-haute énergie serait principalement la signature de l'énergie maximale d'accélération de noyaux de fer dans les sources, et l'effet GZK serait faible, voire inexistant. Néanmoins, cette explication repose à l'heure actuelle sur une extrapolation des mesures de composition des particules primaires au-delà de $\approx 3 \times 10^{19}$ eV, car le faible flux de rayons cosmiques et le faible cycle de service des télescopes à fluorescence empêchent malheureusement de mesurer X_{\max} aux énergies extrêmes.

Comme déjà évoqué, les déviations magnétiques subies par les rayons cosmiques empêchent l'identification des sources, même à des énergies de 10^{19} eV. Ce n'est donc qu'aux énergies les plus élevées qu'il est éventuellement possible de pointer les sources à quelques degrés. D'autre part, à ces énergies extrêmes, les seules sources visibles ne sont, *a priori*, pas à chercher dans tout l'Univers visible mais dans un volume extrêmement réduit autour de la Voie Lactée, en raison des interactions des rayons cosmiques avec le fond diffus cosmologique, qui réduisent soudainement l'horizon de ces particules au-delà de $\approx 5 \times 10^{19}$ eV (voir l'encadré 3, p. 36). La combinaison de ces deux arguments pourrait en principe offrir la possibilité d'identifier directement les sources des rayons cosmiques extragalactiques. Malheureusement, les recherches de corrélations entre les distributions angulaires des rayons cosmiques et les catalogues



3. Limites supérieures (lignes noires) des amplitudes d'anisotropies dipolaire (en haut) et quadripolaire (en bas) en fonction de l'énergie de la particule primaire, déterminées à l'Observatoire Pierre Auger.

Les limites ont été obtenues à partir des directions d'arrivée de l'ensemble des gerbes détectées dans les intervalles d'énergie indiqués. Les bandes représentent les amplitudes attendues pour des configurations de sources uniformément réparties dans le disque galactique, dans les cas extrêmes de protons (bleu) et de noyaux de fer (violet). À partir de ces limites, une origine galactique pour les protons présents de manière dominante autour de 10^{18} eV est clairement exclue.



4. Moyenne (à gauche) et écart type (à droite) du maximum de développement des gerbes, X_{\max} , en fonction de l'énergie de la particule primaire, mesurés à l'Observatoire Auger. ♦ : données expérimentales. Lignes droites : simulations numériques pour un proton ou un noyau de fer. Ces observations permettent de remonter à la composition des rayons cosmiques par le biais de simulations de gerbes détectées par les télescopes à fluorescence. Un alourdissement progressif des particules primaires avec l'énergie est observé.

En 1966, trois physiciens, l'Américain Kenneth Greisen et les Russes Georgi Zatsepin et Vadim Kuzmin, ont montré que les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ne peuvent se propager sur de très grandes distances. En effet, l'espace intergalactique est en réalité rempli d'un nuage de photons. Ceux-ci constituent le rayonnement fossile émis par l'Univers lorsque, environ 300 000 ans après le Big Bang, le gaz ionisé qui le remplissait est devenu transparent. Aujourd'hui, ce rayonnement est un gaz de photons, dont la température s'est abaissée à quelques trois kelvins à cause de l'expansion de l'Univers. Lorsqu'une particule se déplace avec une énergie supérieure à 5×10^9 eV, elle « perçoit » ces photons comme des particules de haute énergie capables d'abaisser son énergie significativement lors de chaque collision. On estime qu'un rayon cosmique qui nous arrive avec une énergie supérieure à 10^{20} eV ne peut avoir parcouru une distance supérieure à 150 millions d'années-lumière, quelle qu'ait été son énergie au départ.

De telles distances sont en fait assez modestes à l'échelle cosmologique : elles correspondent à peu près à la taille du groupe de galaxies les plus proches de la nôtre, le « superamas local ». Ainsi, même si des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie sont produits partout dans l'Univers, on ne peut détecter sur Terre que ceux provenant de ce superamas local. On s'attend donc à une réduction drastique du flux au-delà de 5×10^9 eV. C'est l'effet GZK.



d'objets astrophysiques dans l'Univers proche n'ont mené jusqu'à présent qu'à l'observation de signaux marginalement significatifs. Ceci suggère que l'alourdissement observé jusqu'à $\approx 3 \times 10^{19}$ eV continuerait d'opérer à plus haute énergie, et que la majorité des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie serait composée de noyaux de fer, impliquant des déviations magnétiques encore importantes pour ces particules.

Enfin, l'Observatoire Auger présente également un fort potentiel pour détecter d'éventuels photons ou neutrinos d'ultra-haute énergie. Outre les informations directes sur les directions des sources que ces messagers neutres pourraient apporter, leur détection serait aussi un moyen indirect de tester la nature des rayons cosmiques à plus haute énergie, et notamment la présence de protons. Il faut en effet garder en tête que l'étude des gerbes, et notamment les déductions sur la nature des particules primaires, repose sur des modèles d'interaction hadronique ajustés sur des données prises sur accélérateurs, et obtenues à des énergies inférieures à celles qui se réalisent dans les premiers étages des gerbes d'ultra-haute énergie. Les paramétrages opérés dans les modèles hadroniques reposent donc sur des extrapolations à des énergies jusqu'à trente fois supérieures dans le centre de masse. De grandes incertitudes demeurent donc dans ce domaine, surtout si de la nouvelle physique au-delà du modèle standard de la physique des particules se réalise vers une énergie dans le centre de masse de l'ordre de 10^{14} eV. Cependant,

jusqu'à présent, aucun photon ou neutrino d'ultra-haute énergie n'a été détecté. Les limites obtenues sur les flux de ces particules neutres permettent par ailleurs de contraindre de manière décisive de nombreux scénarios dans lesquels les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie seraient des produits de désintégration de particules ultra-massives, reliques du *Big Bang*.

Le futur : l'upgrade de l'Observatoire

La détermination de la composition des rayons cosmiques aux plus hautes énergies permettrait de développer grandement la compréhension des mécanismes de leur production. S'il s'avérait que l'alourdissement progressif avec l'énergie observé entre 10^{18} et $\approx 3 \times 10^{19}$ eV se confirme à plus haute énergie, la composition des rayons cosmiques d'énergie supérieure à $\approx 5 \times 10^{19}$ eV serait dominée par des noyaux de fer. Du point de vue des mécanismes d'accélération, les conséquences importantes seraient d'une part que les sources épuisent leur capacité à accélérer des particules au-delà de 10^{20} eV (ainsi, la coupure du spectre ne proviendrait pas du mécanisme amenant à la coupure GZK), d'autre part que les rayons cosmiques extragalactiques ne sont pas accélérés selon le célèbre mécanisme de Fermi (voir encadré 2). Les implications d'un tel scénario seraient donc nombreuses, et la détermination de la composition aux plus hautes énergies constitue ainsi la raison première qui a motivé l'upgrade de l'Observatoire à court terme.

Pour relever ce défi, l'upgrade du réseau de surface consistera à compléter les cuves Cherenkov, sensibles aux composantes électromagnétique et muonique des gerbes, par des scintillateurs fixés sur leur dessus, sensibles principalement aux électrons/positrons créés par la composante électromagnétique seulement. En théorie, le profil des gerbes doit être *universel*, qu'elles soient initiées par des protons ou par n'importe quel autre noyau, et peut se voir entièrement décrit à l'aide de quelques paramètres seulement, dont l'énergie E , la profondeur du maximum de développement X_{\max} , et un indicateur du nombre global de muons N_{μ} . Suivant ce principe, la forme des grands signaux détectés au niveau du sol par n'importe quel type de détecteur peut être prédite à partir de quelques paramètres, dont E , X_{\max} et N_{μ} . Mais les corrélations entre ces paramètres empêchent, à l'heure actuelle, leur détermination précise gerbe par gerbe à partir des seules mesures des cuves Cherenkov. En ajoutant une autre mesure suffisamment différente de celle des cuves, comme c'est le cas avec les scintillateurs mesurant le seul signal électromagnétique des électrons/positrons, il sera alors possible de mesurer ces paramètres avec une bonne précision, gerbe par gerbe. La nature des rayons cosmiques pourra être connue avec une grande sensibilité et un cycle de service permanent.

Notons également qu'un sous-réseau de scintillateurs enterrés couvrant une vingtaine de kilomètres carrés, sur un pas resserré par rapport à l'espacement nominal entre deux détecteurs Cherenkov, permettra de mesurer précisément le nombre de muons pour des gerbes d'énergie inférieure à 10^{18} eV. On pourra ainsi confronter le principe de mesure indirecte de N_{μ} avec des scintillateurs sur les cuves à des observations plus directes.

En parallèle à cet *upgrade*, l'Observatoire est également le théâtre de développements pouvant servir de « laboratoire » pour un observatoire du futur, encore plus gigantesque. Les courants induits par la déviation des électrons/positrons créés dans les gerbes par le champ magnétique terrestre, ou l'excès du nombre d'électrons par rapport au nombre de positrons dans les gerbes, sont autant de mécanismes menant à l'émission d'ondes électromagnétiques détectables par des antennes au niveau du sol dans une bande de fréquence entre 30 et 80 mégahertz. Ces mécanismes ont effectivement été mis en évidence expérimentalement, et permettent

aujourd'hui de détecter des gerbes au travers de leur seule radiation électromagnétique. D'autres mécanismes, tels que l'émission par Bremsstrahlung moléculaire des électrons d'ionisation, sont aussi recherchés dans une gamme de fréquence plus élevée (celle du gigahertz). Beaucoup de développements sont encore nécessaires sur ces sujets.

La collaboration Auger a récemment obtenu l'accord de financement pour faire fonctionner l'Observatoire jusqu'en 2023. Les résultats acquis jusqu'à présent étaient pour la plupart inattendus, et nul doute que les futurs résultats réservent encore beaucoup de surprises. Les réponses qu'apporteront les données de l'Observatoire dans sa nouvelle configuration seront décisives pour développer la science des accélérateurs les plus puissants de la Galaxie et d'au-delà. Elles serviront également de marchepied pour dessiner les contours d'un observatoire du futur encore plus grand, capable de percer tous les secrets de ces messagers de l'extrême. ■

En savoir plus

1. Site de l'Observatoire Auger : www.auger.org/
2. P. Biasi, "Origin of Very High and Ultra-High Energy Cosmic Rays", *C.R. Physique* **15** (2014) 329.
3. I. Wingerter-Seez, « La Calorimétrie », *École IN2P3 - Du détecteur à la mesure* (2009), www.in2p3.fr/actions/formation/DetAMesure-09/Calorimetrie.pdf
4. A.A. Watson, "Extensive Air Showers and Ultra-High Energy Cosmic Rays", *Lectures given at a summer school in Mexico*, 2002, www.ast.leeds.ac.uk/Auger/augerthesis/mexlects3.pdf
5. K.H. Kampert et P. Tinyakov, "Cosmic Rays from the Ankle to the Cutoff", *C.R. Physique* **15** (2014) 318.
6. Pierre Auger Collaboration, "Observation of the Suppression of the Flux of Cosmic Rays above $4 \cdot 10^{19}$ eV", *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 061101.
7. Pierre Auger Collaboration, "Depth of Maximum of Air-Shower Profiles at the Pierre Auger Observatory: Measurements at Energies above $10^{17.8}$ eV", *Phys. Rev. D* **90** (2014) 122005.
8. Pierre Auger Collaboration, "Large Scale Distribution of Arrival Directions of Cosmic Rays Detected above 10^{18} eV at the Pierre Auger Observatory", *The Astrophysical Journal Supplement* **203** (2012) 34.
9. Pierre Auger Collaboration, "Searches for Anisotropies in the Arrival Directions of the Highest Energy Cosmic Rays Detected by the Pierre Auger Observatory", à paraître dans *The Astrophysical Journal* (arXiv:1411.6111[astro-ph]).
10. O. Deligny, "Cosmic Rays around 10^{18} eV: Implications of Contemporary Measurements on the Origin of the Ankle Feature", *C.R. Physique* **15** (2014) 367.
11. D. Harari, "The Flux Suppression at the Highest Energies", *C.R. Physique* **15** (2014) 376.

« Un chercheur, une manip » au Palais de la découverte

Une action du DIM Nano-K vers le grand public

3800 chercheurs, 337 équipes, 127 laboratoires

29 partenaires institutionnels :
CNRS, CEA, MESR, INSERM, 12 universités, 2 ENS,
6 écoles d'ingénieurs, LNE, EHESS, SOLEIL, INRETS



Le DIM Nano-K

Le centre de compétences en nanosciences de la région Île-de-France, C'Nano IdF, a été créé fin 2004 à l'initiative du CNRS, du CEA et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. En 2006, sa labellisation comme Domaine d'Intérêt Majeur (DIM) par le Conseil régional d'Île-de-France a constitué une étape-clé pour son développement. En 2012, la région Île-de-France a renouvelé son soutien et a réuni le réseau C'Nano IdF avec le réseau francilien des atomes froids (IFRAF) au sein d'un nouveau DIM, « Des nanosciences aux atomes froids », intitulé Nano-K. Ce périmètre élargi a été porteur de collaborations scientifiques inédites et a initié de nouvelles missions profitables à l'ensemble du réseau.

C'est dans ce cadre que le DIM a lancé, en 2015, une nouvelle édition du programme « Un chercheur, une manip », en partenariat avec le Palais de la découverte. Du 14 avril au 28 juin, plus de 40 doctorants⁽¹⁾ du réseau se relayeront pour animer trois expériences proposées par des chercheurs autour des thématiques de l'Année Internationale de la Lumière :

- **L'or se voit en nano** (fig. 1) – proposée par Bruno Palpant (Laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire de Centrale Paris)
- **Les nanoparticules pour la dépollution par photocatalyse** – proposée par Hynd Remita (Laboratoire de Physique Chimie de l'université Paris Sud)
- **Découverte de la propagation des ondes lumineuses** – proposée par Valentin Volchkov et Vincent Josse (Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'optique).



1. Extrait d'un des trois livrets pédagogiques créés pour « Un chercheur, une manip ».

(1) La participation des doctorants fait suite à une formation à la vulgarisation, organisée par le DIM. Informations : <http://cnanoidf.org/fr/formation/article/formation-a-la-vulgarisation>

Inauguration du stand

Palais de la découverte le 16 avril,
en présence de M^{me} Claudie Haigneré, présidente d'Universcience.

À cette occasion, le DIM remettra ses prix de l'image scientifique 2015 et présentera l'exposition de photographies associée. Le prix Louis Ancel de la Société Française de Physique (SFP) sera remis à Claire Wilhelm (chercheuse au LMSC de l'université Paris Diderot) par Michel Spiro, vice-président de la SFP.

Indenter du verre avec un liquide ?

Richard Villey⁽¹⁾, Cécile Cottin-Bizonne⁽¹⁾, Liliane Léger⁽²⁾,
Élisabeth Charlaix^(1,3) et Frédéric Restagno⁽²⁾

(1) Institut Lumière Matière, Université Lyon 1 – CNRS, 69622 Villeurbanne

(2) Laboratoire de physique des solides, Université Paris Sud – CNRS, 91405 Orsay

(3) Laboratoire interdisciplinaire de physique, Université Grenoble 1 – CNRS, 38402 Grenoble

Pour décrire les écoulements à des échelles nanométriques, on postule souvent que les fluides conservent leur comportement macroscopique à ces échelles et peuvent être décrits par des approches de type « milieu continu ».

La question suivante se pose alors naturellement : jusqu'à quelle taille de confinement cette hypothèse reste-t-elle valable ?

Dans cet article, nous montrons qu'en réalité des liquides newtoniens conservent leurs propriétés mécaniques ordinaires à ces échelles, et que l'élasticité mesurée est en fait celle des parois qui confinent. Il faudra en tenir compte à l'avenir.

Cela ouvre une piste nouvelle : utiliser un liquide pour sonder une paroi solide.

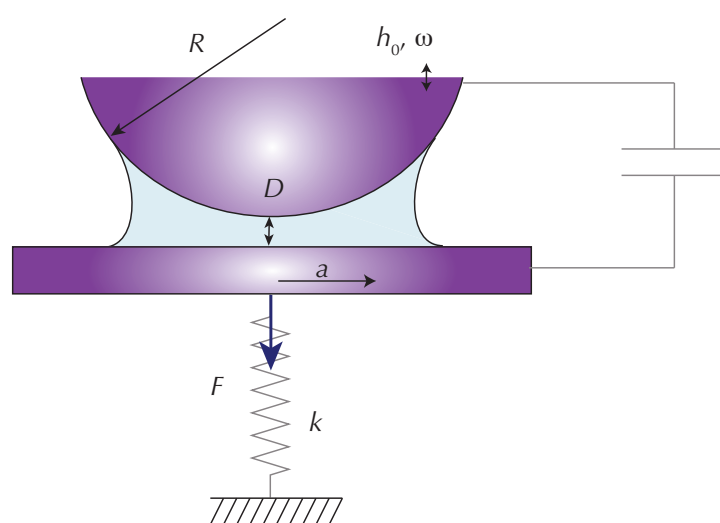
Ce travail, ainsi que la rédaction et la publication de l'article original [2], ont fait l'objet d'un film d'animation, « Le chercheur et son article : une aventure en trois actes », qui peut être vu sur le site : <http://hebergement.u-psud.fr/supraconductivite/stopmotion.html>.

(a) Liquides dont la loi contrainte – vitesse de déformation est linéaire.

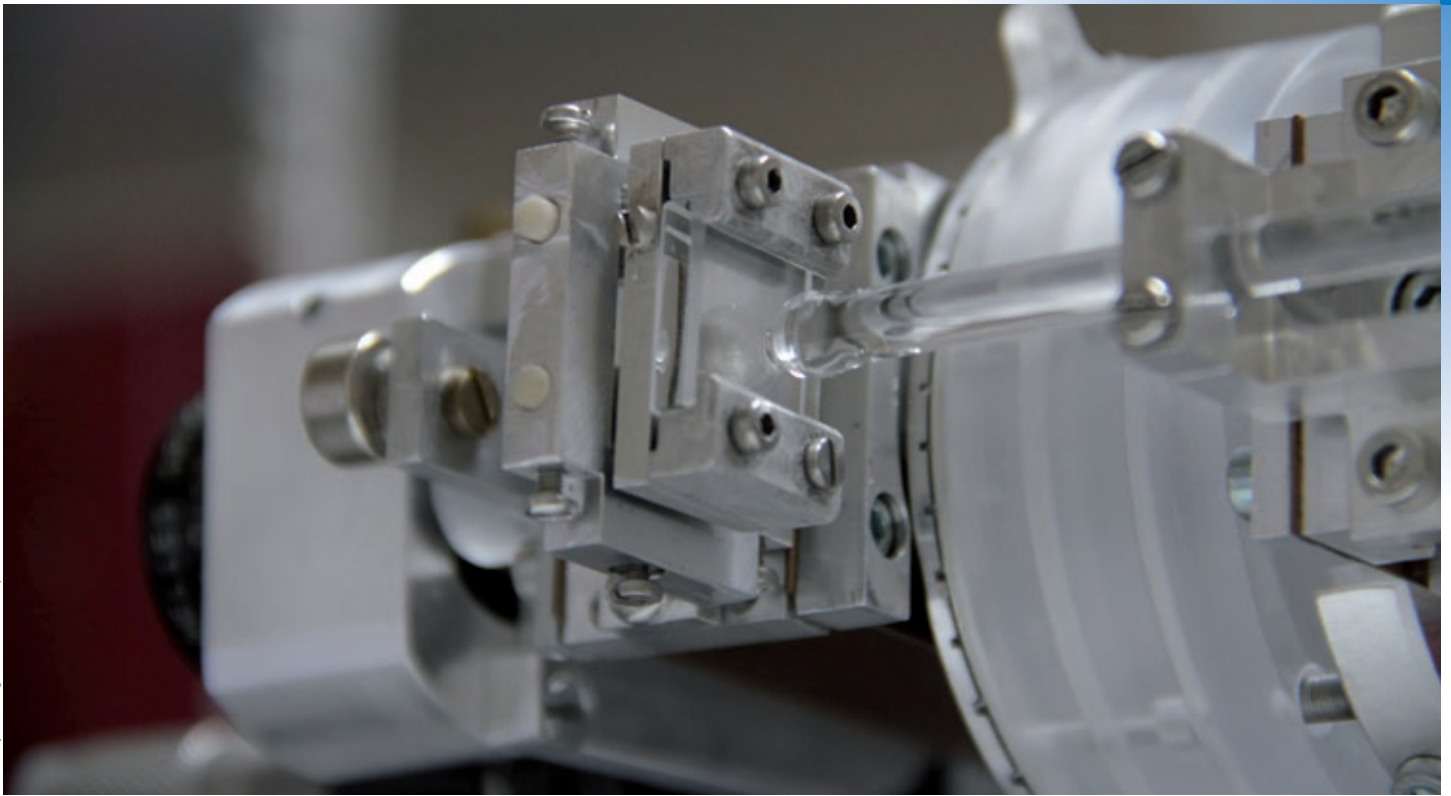
Les propriétés mécaniques des liquides confinés sont largement étudiées du fait de leurs applications potentielles, par exemple dans le domaine de la lubrification ou de la désalinisation de l'eau de mer. Plusieurs études ont mis en évidence des changements de propriétés mécaniques aux échelles nanométriques avec, en particulier, l'apparition d'un module élastique de cisaillement. Ces modifications de propriétés sont-elles liées à des modifications structurelles ? Sont-elles liées à des changements des lois physiques à prendre en compte ? Le débat fait rage dans la communauté. Pour le savoir, nous avons réalisé des expériences précises de nanorhéologie de liquides newtoniens^(a) confinés, en utilisant un appareil à forces de surface dynamiques.

Un nanorhéomètre : l'appareil à forces de surface dynamiques

Lorsqu'on cherche à connaître les propriétés mécaniques d'un liquide, on le place en général dans un rhéomètre. Le principe de ces appareils est de mesurer la contrainte nécessaire pour cisailier le liquide, par exemple en déplaçant périodiquement deux plaques parallèles séparées d'une distance D , avec une amplitude de déplacement périodique. Cependant, il est impossible de réaliser simplement une telle expérience pour des distances D qui deviennent nanométriques. En effet, pour cela, il serait nécessaire de régler le parallélisme entre les surfaces avec une précision inaccessible actuellement.



1. Principe de l'expérience. Un liquide est forcé de s'écouler entre une sphère de rayon R et un plan de pyrex, séparés par une distance D . En plus d'un mouvement d'approche lent, la sphère oscille à la fréquence $\omega/2\pi$ avec une amplitude h_0 . La distance est mesurée grâce à un capteur capacitif représenté sur le schéma. La force est mesurée grâce à la déformation d'une pièce élastique symbolisée par le ressort.



© R. Villey, F. Rescagno / CNRS Photographique

L'appareil à forces de surface dynamiques.

Une alternative est de placer le liquide entre une sphère et un plan. C'est ce qui est fait dans les appareils à forces de surface dynamiques (dSFA pour dynamic Surface Forces Apparatus) : on rapproche un plan et une bille millimétrique, tous deux en pyrex, immergés dans le liquide que l'on veut tester, jusqu'à ce que quelques nanomètres seulement les séparent (fig. 1) [1]. On fait osciller la sphère perpendiculairement au plan, et l'on mesure la force nécessaire pour produire cette oscillation. Ces appareils constituent ainsi de véritables rhéomètres qui permettent de créer des écoulements ultra-confinés. La fréquence des oscillations de la bille est variable, comme dans les rhéomètres classiques, mais l'amplitude n'est que d'une fraction de nanomètre.

Dans un tel écoulement entre une sphère de rayon R et un plan non déformable éloigné d'une distance D , la force complexe (puisque la sollicitation est sinusoïdale) appliquée sur la sphère (et transmise au plan par l'écoulement) vaut :

$$F^* = (6\pi R^2/D) Z^* h^* \quad (1),$$

où $h^* = h_0 \exp(i\omega t)$ est l'amplitude complexe du déplacement et $Z^* = Z' + iZ''$ est la réponse qu'on cherche à mesurer. Sa partie réelle, Z' , est liée à la réponse élastique du système, pour laquelle la déformation est proportionnelle à la contrainte. De même, la partie imaginaire Z'' rend compte de la dissipation. Pour un liquide parfaitement newtonien de

viscosité η confiné entre des parois infiniment rigides, la contrainte varie comme le taux de cisaillement, c'est-à-dire le gradient de vitesse, et on s'attend à mesurer la force dite « de Reynolds » :

$$F^* = i (6\pi\omega\eta R^2/D) h^*.$$

Réponse élastique apparente d'un liquide newtonien confiné

Nous avons mesuré la fonction complexe $Z' + iZ''$ pour un mélange eau/glycérol, afin d'observer à partir de quel confinement la force s'éloignerait de celle de Reynolds. Dans un rhéomètre classique, les propriétés rhéologiques du mélange eau/glycérol choisis sont celles d'un liquide newtonien de viscosité η et la réponse du liquide est purement imaginaire : $Z^* = i\omega\eta$. Pour une fréquence de 19 Hz et une viscosité de 35 mPa.s, on s'attendait ainsi à mesurer uniquement une composante imaginaire $Z'' = 4,18$ Pa.

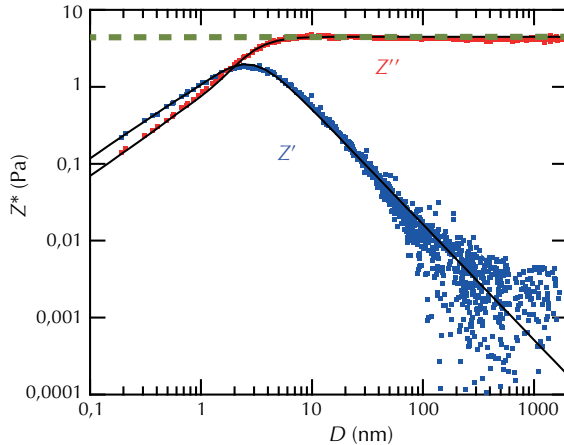
Or, la fonction complexe mesurée s'écarte du résultat attendu ($Z' = 0$ et $Z'' = 4,18$ Pa, en tirets verts sur la figure 2). Si l'on se concentre dans un premier temps sur les grandes distances sphère-plan D , on observe que Z'' est égal à la valeur attendue, mais nous mesurons aussi une partie réelle Z' , c'est-à-dire une réponse élastique. Quand la distance D décroît, cette réponse élastique augmente et la partie imaginaire, c'est-à-dire la dissipation, se met à décroître. Il existe alors une distance critique D_c pour

laquelle la réponse mécanique mesurée est plus élastique que visqueuse. Sur la figure 2, cette distance vaut $1,4 \pm 0,1$ nm.

Le confinement élastique

Pour interpréter nos résultats, nous avons proposé de remettre en question l'utilisation de l'équation (1) (qui fait l'hypothèse, classique en nanorhéologie, que la réponse complexe mesurée Z^* est égale au module élastique complexe du liquide), pour tenir compte du fait que... le pyrex de la sphère et du plan n'est pas un matériau parfaitement indéformable. Lorsque la sphère oscille, l'écoulement exerce une pression sur le plan et la sphère. Cette pression est faible lorsque la sphère est loin du plan, mais elle déforme tout de même ces surfaces. Les appareils à forces de surface étant particulièrement sensibles, ils détectent la force élastique liée à ces déformations. Quand D diminue, la force visqueuse augmente comme le prévoit la formule de Reynolds, les déformations élastiques de la sphère et du plan augmentent aussi, ce qui explique l'augmentation de Z' . À la limite des petites valeurs de D (confinement très important), Z' devient du même ordre de grandeur que Z'' car la déformation des surfaces devient du même ordre de grandeur que l'amplitude des oscillations, et le liquide ne coule plus. Ce sont alors les surfaces de pyrex qui se déforment pour suivre l'oscillation de la sphère. La distance critique





2. Module de cisaillement complexe $Z^* = Z' + iz''$ apparent d'un mélange eau-glycol de viscosité $\eta = 35$ mPa.s, mesuré à 19 Hz entre une sphère de pyrex de rayon $R = 3,59$ mm et un plan du même verre, en fonction de la distance sphère-plan (distance de confinement) D . Le trait en tirets verts représente ce qui serait mesuré pour le même liquide entre des surfaces non déformables. La simulation (lignes noires) est obtenue en tenant compte de la déformation des surfaces de pyrex, sans paramètre ajustable.

>>>

peut-être calculée [2] :

$$D_c = 2,16 R (\eta\omega/E)^{2/3} \quad (2).$$

Cette distance critique est proportionnelle au rayon R de la sphère. Sa valeur résulte d'une compétition entre la dissipation visqueuse du liquide et la déformation élastique de la sphère et du plan. Elle fait naturellement intervenir le rapport des modules de cisaillement du liquide et des surfaces confinantes (on utilise ici leur module d'Young E). Dans le cas des paramètres

expérimentaux de la figure 2, la distance critique théorique vaut $1,40 \pm 0,05$ nm, en très bon accord avec la valeur mesurée. En fait, si l'on tient compte de la déformation des surfaces, nous pouvons prédire la totalité du comportement observé sur cette figure sans paramètre ajustable (voir la simulation en traits continus noirs sur la figure 2), puisque tous les paramètres expérimentaux intervenant dans la formule (2) ont été mesurés indépendamment.

Conclusion

De telles mesures des propriétés visqueuses et élastiques d'une large gamme de liquides pour des confinements allant jusqu'à une taille moléculaire, peuvent être interprétées en supposant que les liquides conservent leurs propriétés mécaniques macroscopiques.

Ces résultats ont plusieurs conséquences. Ils obligent tout d'abord à revisiter un certain nombre de mesures de la littérature, qui suggéraient l'existence de comportements anormaux. D'autre part, ils ouvrent la possibilité d'utiliser le phénomène de déformation des parois par un liquide pour sonder des interfaces solide/liquide fragiles (comme des couches biologiques) qui ne pourraient supporter sans endommagement le contact direct d'une sonde solide [3]. Un liquide peut ainsi être utilisé comme un indenteur délicat pour sonder des propriétés de solides ! ■

Références

- 1• Les détails techniques sur le fonctionnement et les capteurs du dSFA ont été donnés dans : É. Charlaix *et al.*, « Propriétés hydrodynamiques au voisinage d'une surface », *Reflète de la physique* **22** (2010-2011) 14-18.
- 2• Article original : R. Villey *et al.* "Effect of surface elasticity on the rheology of nanometric liquids", *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 215701.
- 3• S. Leroy *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 264501.

Brève

Quelques enseignements du « hiatus » dans le réchauffement climatique

Extrait du communiqué de presse du CNRS (INSU) du 25 février 2015

L'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère provoque depuis la fin du 19^{ème} siècle un réchauffement global du système Terre, dont les mesures de température de l'air en surface restent l'un des indicateurs privilégiés. Ces observations ont toutefois montré un net ralentissement du réchauffement global de 1998 à 2012. Ce « hiatus » dans le réchauffement atmosphérique global peut paraître d'autant plus intrigant qu'il semble difficilement conciliable avec la plupart des simulations effectuées. Le ralentissement observé relève-t-il dès lors uniquement de la variabilité naturelle du climat ? Traduit-il aussi une mésestimation des forçages radiatifs anthropiques, voire une trop grande sensibilité des modèles à ces forçages ?

Les travaux les plus récents sur ce thème tendent à privilégier la première piste, en désignant plus particulièrement le Pacifique tropical et le régime des alizés. Ce bassin océanique est en effet le siège d'une forte variabilité naturelle aux échelles interannuelles (oscillation El Niño) et multidécennale, qui se traduit notamment par de fortes fluctuations des vents dominants.

Des chercheurs du Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique (CNRM-GAME, Météo-France/CNRS) ont revisité la question, en réalisant de nouvelles simulations visant à étudier plus spécifiquement le rôle du Pacifique tropical.

Ces travaux [1] montrent que les études antérieures ont surestimé l'influence du Pacifique tropical sur la température du globe, et que les résultats des modèles peuvent être très sensibles au protocole expérimental utilisé.

Ils confirment toutefois l'importante contribution de la variabilité naturelle du Pacifique tropical au ralentissement récent du réchauffement global observé. Le réchauffement a dès lors vocation à s'accélérer au cours des prochaines décennies.

■ Contact

Hervé Douville (herve.douville@meteo.fr)

[1] H. Douville *et al.*, "The recent global warming hiatus: What is the role of Pacific variability?", *Geophys. Res. Lett.* **42** (2015) 880-888.



© Maxime Rousseau

Conférence de Pascale Monier-Garbet, « Les défis de la fusion thermonucléaire » (25 août).

L'école d'été e2phy 2014 : « La physique des extrêmes »

<http://e2phy.in2p3.fr/>
Informations, ressources et documents

L'édition 2014 de l'école d'été de physique e2phy s'est tenue à Clermont-Ferrand, du 25 au 28 août, et a réuni quelques 200 participants de l'enseignement secondaire ou de classes préparatoires, autour de conférences et ateliers sur la physique des extrêmes.

Outre l'incontournable « Physique des volcans » dans cette magnifique Auvergne, l'édition de cette année s'est attachée à explorer les phénomènes violents, aussi bien sur Terre – avec les bouleversements climatiques – que dans le cosmos. Ont ainsi été abordés les états de la matière de l'Univers passé, reproductibles dans des accélérateurs de particules et incluant les plasmas quarks-gluons, jusqu'aux messagers cosmiques, en passant par la fusion thermonucléaire, les supernovæ et la nucléosynthèse stellaire.

Spécificité de cette année en lien avec les nouveaux programmes de lycée, une session autour de l'enseignement de la mécanique quantique et de la relativité restreinte a été organisée, et animée par Gilles Cohen-Tannoudji. Il s'est agi de faire appréhender aux participants de l'école le rôle fondamental joué par les constantes physiques dans les théories présentes... voire futures. Cette session « physique moderne » a été prolongée par un atelier MOOC – de l'anglo-saxon *massive open online course* –, où les professeurs ont pu réorganiser le matériau abordé dans la perspective d'en faire une *formation en ligne, ouverte à tous*. Une session « big data », avec ses enjeux multidisciplinaires, a également donné lieu à des échanges particulièrement nourris.

Comme pour les éditions précédentes, les après-midi étaient consacrés aux visites de laboratoires de la région et à divers ateliers. Ceux-ci ont permis de découvrir le scientifique Blaise Pascal au

musée Henri Lecoq, l'usine Michelin de Cataroux au travers de « L'Aventure Michelin », le projet TOMUVOL (Tomographie avec des muons atmosphériques des volcans) ou... la police scientifique. Le tout devant être facilement exploitable dans des leçons de lycée, par des habitués de l'école ayant manifestement toujours le même plaisir à se retrouver !

Notre Société Française de Physique joue un rôle central dans cette école estivale e2phy, non seulement en la subventionnant, mais également au niveau de l'organisation, puisqu'un certain nombre de ses membres s'y sont fortement investis.

L'école e2phy 2014 a été organisée de façon remarquablement efficace par le comité local, secondé par un comité national responsable du programme ainsi que du choix des orateurs. Un grand merci également à l'Université Blaise Pascal et à ses diverses composantes, qui se sont fortement impliquées pour faire découvrir la recherche en local.

Il nous tarde de nous retrouver fin août 2015 à Montpellier pour les prochaines aventures e2phy.

Arnaud Le Padellec, membre de la Commission enseignement de la SFP
Vincent Morénas, président du Comité local de l'école e2phy 2014
Stefano Panebianco, président du Comité national des écoles e2phy

École e2phy 2015

Montpellier, ENSCM (École nationale supérieure de chimie de Montpellier), du lundi 24 au jeudi 27 août 2015.

Thème : « Physique et chimie : du cosmos à l'industrie ».

Risques naturels, expertise et situation de

Michel Campillo⁽¹⁾ (michel.campillo@ujf-grenoble.fr), **Christophe Voisin**⁽¹⁾ et **Yves Nicolas**⁽²⁾

(1) Institut des Sciences de la Terre, Université Joseph Fourier et CNRS, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9

(2) Institut de la communication et des médias (ICM), Université Stendhal, Grenoble

Nous vivons dans une période où la parole des scientifiques est questionnée dans le public. En particulier, le rôle d'expert semble de plus en plus difficile à tenir par les scientifiques face à l'explosion des moyens de communication immédiats. Les risques naturels sont un bon exemple des difficultés rencontrées par les experts.

Nous discutons dans cet article les suites judiciaires de l'affaire du séisme de L'Aquila, survenu en avril 2009, dans laquelle les plaignants ont reproché à des géophysiciens italiens (condamnés en première instance, puis acquittés en appel) d'avoir, par une déclaration rassurante, laissé penser que le risque sismique était négligeable.

Les sciences ont créé des représentations qui permettent de comprendre et de quantifier des processus dont les occurrences ne sont décrites que par des probabilités. La communication de ces résultats reste très difficile pour un public non averti. Les représentations probabilistes ont pourtant des applications qui, loin des laboratoires, touchent directement le grand public. Un exemple en est apporté par les aléas naturels.

Un aléa naturel est le résultat d'interactions complexes, non linéaires, de systèmes physiques mal connus dont la dynamique relève d'échelles de temps et d'espace imbriquées. Pour cette raison, la science actuelle ne répond pas directement à des questions comme la prévision à court terme des séismes. Elle tente, par contre, de quantifier des probabilités d'occurrence, des niveaux d'aléa relatifs, des conséquences potentielles de scénarios probables, tous éléments de nature à éclairer la décision politique pour l'aménagement du territoire, la mise en œuvre de technologies potentiellement dangereuses, l'aide aux populations, etc. La science ne peut néanmoins pas apporter de réponses déterministes qui permettraient d'établir des éléments d'aide à la décision qui soient définitifs et simples à exprimer, car chacun de ces éléments est empreint d'une très grande incertitude. Si les frontières et les procédures de l'activité de recherche scientifique sont assez bien définies et comprises, les chercheurs sont souvent appelés à sortir de ce cadre pour

jouer un rôle d'expert à la demande d'opérateurs économiques ou politiques. Cette position d'expert amène le scientifique dans un champ d'activité différent de celui de la recherche proprement dite.

Nous traiterons ici des séismes, qui se caractérisent par de hauts niveaux d'incertitude, voire de controverse scientifique, et des enjeux sociaux très importants. Les exemples récents des séismes d'Haïti (avec le chiffre de 200 000 victimes) et du Japon (qui a montré, avec la centrale de Fukushima, la vulnérabilité d'un pays à très haut niveau de développement technique) ont rappelé, une fois de plus, l'impact des événements naturels. Participer aux efforts d'information et de préparation, et éventuellement apporter des éléments scientifiques d'aide à la décision en situation de crise, sont (*a priori*) des activités qui font partie des devoirs d'un scientifique responsable. Dans ce contexte, l'attention de la communauté scientifique internationale a été attirée par la mise en cause judiciaire de géophysiciens italiens dans l'affaire dite de L'Aquila, suite au séisme qui a affecté cette ville le 6 avril 2009, faisant 308 morts et détruisant plusieurs milliers de bâtiments.

Nous utiliserons cet exemple pour illustrer les mécanismes qui rendent difficile cet exercice d'expertise. Nous présenterons rapidement les recommandations qui ont été faites par le Comité d'éthique du CNRS, à la suite de cette affaire.



La préfecture de L'Aquila après le séisme, un symbole de la destruction.

L'a aire du séisme de L'Aquila : les faits

Donnons quelques éléments de contexte à l'exemple de l'Aquila. L'émotion a été créée par la lourde condamnation (le 22 octobre 2012), dont six ans d'emprisonnement en première instance, de participants à une réunion de type commission d'experts. Les personnalités incriminées étaient pour la plupart des chercheurs reconnus dans leur domaine. Ces mêmes personnes ont été acquittées le 10 novembre 2014, lors du procès en appel. Nous essayerons de décrire l'engrenage qui a conduit à cette condamnation en première instance.

Notons que le contexte politique dans lequel se produit la mise en cause des scientifiques a été utilisé comme élément d'explication (e.g. [1]). Des années de contraintes budgétaires et de pressions ont probablement pu peser sur les possibilités d'indépendance des universitaires italiens soumis à des attributions de crédit par des structures gouvernementales, et une partie de l'opinion a voulu aussi faire le procès du système de l'ère Berlusconi. Ces éléments spécifiques ne sont pas discutés ici, pas plus que ceux du débat judiciaire, mais il faut noter que les contextes de pression sont toujours présents, à des niveaux variables bien sûr, et il serait naïf de penser que cette dimension soit totalement absente dans d'autres contextes.



Commençons par quelques éléments factuels. L'Aquila se trouve dans la région des Abruzzes, une des zones sismiquement les plus actives d'Italie et d'Europe [2]. Le séisme de 2009 correspond à un événement dont la probabilité avait été évaluée comme grande avant même son occurrence (cf. tableau 1). Pour être plus précis, le niveau des sollicitations sismiques (accélération du sol) a correspondu aux documents produits par les scientifiques italiens. Il n'y donc pas eu de défaut d'évaluation ou de communication du risque à moyen terme.

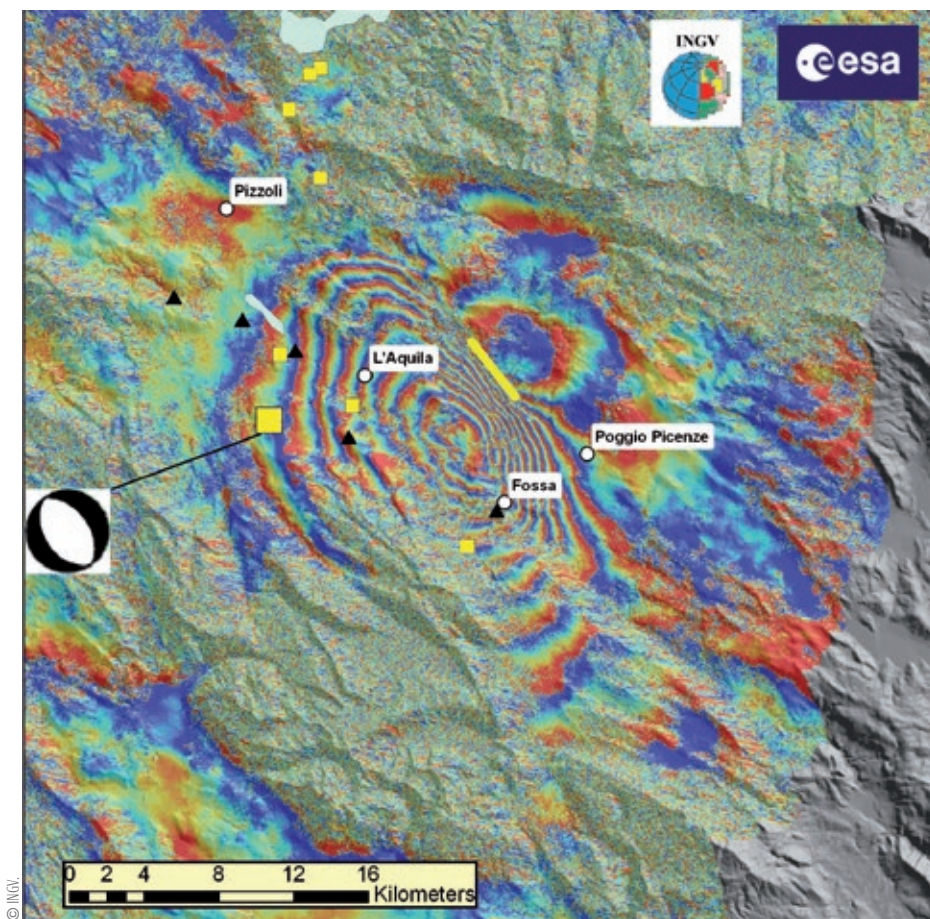
Pour bien comprendre la spécificité des événements, il faut prendre en compte plusieurs éléments. Le premier est la crise

financière qui a précédé le séisme : des centaines de séismes de magnitudes faibles, mais suffisantes pour qu'ils soient ressentis par la population, se sont produits à partir de décembre 2008. Dans un contexte de légitime inquiétude, le plus fort de ces événements, avec une magnitude de 4, s'est produit seulement sept jours avant le choc principal. La réunion incriminée s'est déroulée, elle, entre ces deux séismes. Nous remarquons ici que le risque d'un fort séisme était déjà discuté dans l'arène publique avant même la réunion du groupe d'experts, et c'est ce qui va la justifier.

Un autre élément factuel qui doit être considéré est la « prévision » d'un fort séisme, qui a été publiée par un ingénieur agissant indépendamment des structures

Tableau 1. Ordre de grandeur des probabilités d'occurrence pour un séisme comme celui de L'Aquila. (Source : processoaquila.wordpress.com).

| | |
|--|---------------------|
| Nombre de séquences sismiques observées en Italie durant la période 2008–2010. <i>Une seule séquence a conduit à un séisme de magnitude $M > 5,0$ (L'Aquila).</i> | 127 |
| Probabilité journalière d'occurrence d'un séisme $M > 5,5$ une semaine après un séisme de magnitude 4, comme celui du 30 mars 2009 (modèle ETAS). | $5 \cdot 10^{-4}$ |
| Probabilité de gagner le gros lot de la Loterie nationale. | $5,2 \cdot 10^{-8}$ |



1. Interférogramme de la région de L'Aquila, obtenu par le radar SAR du satellite ENVISAT de l'ESA et interprété par l'Institut italien de géophysique et volcanologie (INGV). On y voit des franges de couleur indiquant des modifications d'altitude de l'ordre du centimètre, résultant du séisme du 6 avril 2009. Le grand carré jaune désigne le choc principal, de magnitude 6,3. Les plus petits carrés jaunes indiquent les chocs ultérieurs de magnitude supérieure à 5, et les triangles noirs les stations GPS utilisées pour valider les observations de SAR. La ligne jaune à l'est de L'Aquila représente une fracture de 4 km de long.

>>>

en charge de l'évaluation du risque sismique. Cette prévision concernait une localité située à 80 km de L'Aquila, mais a eu un retentissement médiatique et a pu augmenter le niveau de tension dans la population. Elle a été faite sur la base de mesures d'émanations de radon. L'idée de réaliser le suivi temporel du radon trouve des fondements physiques. En effet, le gaz radon est un produit des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium, présents naturellement dans les roches. Le radon 222, issu de la désintégration de l'uranium 238, a une demi-vie d'environ quatre jours, et il a été proposé que son transport soit facilité par l'endommagement (ouverture de fissures) associé à la déformation des roches. Si une déformation significative des massifs rocheux près de la surface se produit juste avant les séismes, il serait possible qu'une anomalie

de l'émanation de radon puisse être détectée. Ce type d'anomalie n'a néanmoins pas été validé comme un élément précurseur en pratique, pas plus d'ailleurs que d'autres mesures de déformation en surface. Il y avait donc une difficulté particulière de communication pour expliquer pourquoi cet élément ne pouvait être retenu, tout en reconnaissant qu'il était, partiellement au moins, construit sur des arguments physiques. C'est une situation probablement assez commune de voir de simples spéculations se draper des habits de la crédibilité scientifique [3]. Internet représente pour cela un terrain très propice.

Suite aux nombreux petits séismes et à l'anxiété de la population, un groupe d'experts s'est réuni le 31 mars dans le cadre d'une structure déjà mise en place depuis plusieurs années, la « Commission des grands risques » (Commissione Grandi

Rischi). La réunion a été organisée très rapidement par la Protection Civile. Elle associera des personnes extérieures et ne durera que peu de temps. À l'issue de la réunion, un représentant de la Protection Civile fait une déclaration rassurante, affirmant que la sismicité en cours est plutôt un élément positif. Les plaignants affirmeront que c'est à la suite de cette déclaration que des personnes qui avaient quitté – ou décidé de quitter – L'Aquila de peur d'un séisme, ont finalement été présentes lors de la secousse du 6 avril et y ont perdu la vie.

Les scientifiques présents à la réunion (sans considération de leur appartenance à la Commission) sont accusés de ne pas avoir informé correctement la population, l'accusation étant que ce défaut de communication aurait été la cause de la mort de certaines victimes. Les plaignants, lors de leurs interventions dans la presse, ne mettent pas en cause l'incapacité réelle de prévoir l'occurrence du séisme et se défendent de vouloir faire le procès de la science. L'affaire judiciaire a été rejugée en appel, et les scientifiques incriminés en première instance ont été acquittés. Nous ne discuterons pas ici les fondements des jugements précédents. Nous voulons par contre comprendre comment nos collègues ont pu se trouver dans cette situation et décrire la nature du piège dans lequel nombre de chercheurs auraient pu tomber.

Une position délicate pour les scienti ques

Nous pensons en effet que cette affaire trouve son origine dans les conditions dans lesquelles l'expertise a été menée, et il est important à l'avenir que la procédure soit adaptée aux conditions spécifiques, tout en répondant aux exigences éthiques de l'implication des chercheurs dans des activités d'expertise comme celles mises en cause. C'est ce qui a justifié l'autosaisine du Comité d'éthique du CNRS (COMETS), qui a publié un avis sur cette question (www.cnrs.fr/comets/spip.php?article85). Dans son texte, le COMETS rappelle que des chartes de l'expertise existent (charte nationale de l'expertise, charte de l'expertise du CNRS...) et offrent des bases solides d'engagement qui, malheureusement, par leur complexité, sont peu adaptées aux situations de crise où les demandes de recommandations ont un caractère d'urgence. Une réunion décidée hâtivement, comme celle incriminée dans l'affaire de L'Aquila,

ne satisfait pas aux conditions spécifiées dans les chartes, et on peut imaginer une situation comparable dans beaucoup de pays sismiques. Il est néanmoins impossible pour les scientifiques de décider individuellement de ne pas répondre à des demandes de ce type. On imagine bien que ceux qui auraient refusé de participer à une telle réunion suivie d'une catastrophe seraient à leur tour accusés de ne pas avoir fourni en temps utile les informations nécessaires.

Face à un risque imminent, les principes exprimés dans les chartes générales sont difficiles à prendre en compte, dans la mesure où le commanditaire doit prendre des décisions rapides alors qu'il n'y a pas de réponse simple aux questions posées. La pertinence d'une évaluation probabiliste d'un niveau de risque peut sembler contredite par les faits (occurrence d'un événement de faible probabilité) pour un public non préparé (cf. tableau 1). Il serait rassurant de penser qu'il est possible de démontrer qu'un avis s'est bien appuyé sur une méthode scientifique rigoureuse. Néanmoins, on peut légitimement craindre que dans beaucoup de domaines liés aux risques naturels, existent à la fois des incertitudes fondamentales et des controverses qui animent le débat scientifique, dont la communication est difficile. L'expertise devra mettre au jour les méthodes et les interprétations, même diverses, qui font l'objet d'un consensus suffisant dans la communauté scientifique. Ces controverses nourrissent aussi dans l'espace public des débats d'opinion, qui échappent aux procédés auxquels les scientifiques sont habitués. C'est une dimension qui ne peut pas être ignorée. Les scientifiques impliqués dans ces expertises devront se préparer à voir la forme d'autorité d'un savoir construit être mise en doute par les convictions diverses qui s'expriment dans l'espace public.

Les suites du débat juridique

Beaucoup de voix se sont élevées pour attaquer le bien fondé des lourdes condamnations qui ont touché indifféremment agents opérationnels et scientifiques présents lors de la réunion incriminée, membres ou non de la Commission des grands risques. Nous ne commenterons pas des éléments de ce procès, ni ceux du jugement en appel. Au-delà des réactions que le jugement en première instance a pu provoquer, les décisions d'un juge européen, même discutées en appel, ne peuvent pas être ignorées.

La question de la causalité entre l'action de la commission et les conséquences fatales du séisme ouvre des perspectives d'ordre général. En particulier, l'interprétation donnée par le juge conduit à s'interroger sur l'existence d'une perception nouvelle du statut de la communication scientifique et des responsabilités du scientifique. Ce que prétendrait ce jugement est que l'on pourrait mourir d'un possible défaut de communication. Que celui qui communique « mal » est donc directement responsable, parce qu'on lui a donné un statut particulier, même s'il ne l'a pas choisi. Que la causalité serait là. Une telle interprétation donne tout son poids au fait social, au détriment du phénomène physique. En participant à des processus d'expertise sur des sujets avec de fortes implications sociales immédiates, les scientifiques doivent être conscients qu'ils s'engagent sur un terrain très éloigné de celui de leurs compétences réelles, et où la pertinence scientifique ne constitue pas une valeur en soi.

Conclusion

Les questions de communication constituent un élément critique et un enjeu indissociable du processus d'expertise lui-même : comment en effet communiquer les représentations scientifiques d'un monde complexe et incertain, en particulier les évaluations probabilistes des risques ? Même si les scientifiques sont généralement exclus des jeux politiques et médiatiques, ce qui est cohérent avec leur statut, ils doivent rester vigilants sur les risques d'instrumentalisation. Les chartes comme celles du CNRS ou l'avis du COMETS sont une ressource qu'ils doivent savoir utiliser à bon escient pour à la fois maintenir leur propre intégrité et offrir à la communauté les bénéfices des progrès de la recherche.

Dans ce contexte, le COMETS a fait une série de recommandations, dont nous rappelons celles relatives à la bonne conduite dans l'encadré ci-dessous. ■

Recommandations de bonne conduite :

comité d'éthique du CNRS. www.cnrs.fr/comets/spip.php?article85

- En s'appuyant sur les chartes existantes, et pour chaque type de risque, des procédures d'engagement dans l'expertise doivent être préparées en avance des situations de crise. La communication est particulièrement difficile sur des phénomènes complexes dont l'évolution requiert des approches probabilistes. Des porte-parole doivent être désignés, préparés et formés pour cette tâche, car l'espace public démocratique requiert d'autres règles et un autre registre que la discussion scientifique.
- L'exploitation des conclusions de l'expertise n'appartient pas à l'expert scientifique, mais au décideur politique. Cela doit être précisé pour le public dans tous les éléments de communication. Les scientifiques n'ont pas à être solidaires des décisions prises à partir d'un ensemble d'informations dont leur expertise n'est qu'un élément.
- L'expert conserve un pouvoir de contrôle sur le contenu de son expertise, qui ne doit pas être dénaturé dans sa présentation au public. Hormis le droit de rectification, l'expert doit bénéficier du régime général prévu par la loi n° 2013-316 du 16 avril 2013 relative à l'indépendance de l'expertise en matière de santé et d'environnement et à la protection des lanceurs d'alerte. En application de l'article 2 de cette loi, il incombe également aux organismes d'informer la Commission de déontologie instaurée par ce texte sur les actions qu'ils entreprennent en matière d'expertise, et notamment sur les codes de déontologie qu'ils mettent en place.

Le contenu scientifique de l'expertise inclut un exposé des informations techniques et de l'état de la connaissance. Ce contenu doit être rendu public rapidement. Les experts ne doivent pas être aveugles vis-à-vis des débats d'opinion en cours dans la sphère publique. Dans les problèmes d'aléas naturels, les conclusions scientifiques sont souvent entachées de fortes incertitudes liées à la dynamique du système considéré. La communication doit tenter de rendre cet état de fait compréhensible par tous.

Références

1. D.E. Alexander, *Natural Hazards* **72** (2014) 1159-1173.
2. D. Giardini *et al.*, "SHARE European Seismic Hazard Map, 10% Exceedance Probabilities in 50 years", doi 10.2777/30345, ISBN-13, 978-92-79-25148-1. Carte des risques sismiques : www.share-eu.org.
3. M. Campillo et Y. Nicolas, « La prévision des tremblements de terre : un dialogue à risque aux frontières de la science », *Le temps des savoirs* **2** (2000) 39-60.

Jouer avec les chiffres du climat : une approche par budget carbone

Jacques Treiner (jtreiner@orange.fr)

Ancien professeur à l'Université Paris 6, professeur à Sciences Po Paris

La conférence internationale sur le climat qui se tiendra à Paris en décembre 2015 doit actualiser les objectifs de réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Le but est souvent exprimé sous la forme : maintenir l'augmentation de la température moyenne de la Terre en dessous de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle. Cette limite sera pourtant nécessairement dépassée, compte tenu à la fois de la trajectoire d'émissions que suit l'humanité, et de l'inertie des systèmes énergétiques. Il apparaît aussi clairement que, si aucune politique de réduction des émissions n'est adoptée, on ne peut compter sur l'épuisement des ressources fossiles pour limiter la dérive climatique dans des limites gérables.

Le lecteur intéressé par la présente approche pourra aussi se reporter à l'article de Thomas Stocker, "Closing doors of climate targets", publié dans *Science Express*, novembre 2012. T. Stocker, de l'Université de Berne, est coprésident du Groupe de travail I du GIEC.

Je remercie Jean Poitou et François-Marie Bréon pour leur lecture attentive de cet article, leurs corrections et suggestions.

Depuis la réunion internationale de Copenhague de décembre 2009, quinzième Conférence des parties (COP15), un certain nombre de pays se sont engagés sur l'objectif de ne pas dépasser un réchauffement moyen de la surface de la Terre de 2°C. Cette valeur, obtenue à la suite de négociations extrêmement difficiles entre 26 pays seulement (notamment sans l'Union européenne) n'a pas de caractère contraignant, mais c'est le seul objectif chiffré qui sert depuis lors de référence internationale.

Comment apprécier cet objectif, à la veille de la COP21 à Paris en décembre 2015 ?

Les perspectives de réduction mondiale des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont souvent exprimées sous la forme : « diviser par deux les émissions mondiales d'ici 2050 ». Cette façon de faire a l'avantage de la simplicité, mais elle ne dit rien de ce qui compte vraiment du point de vue climatique, à savoir : *quelle quantité totale de carbone dans l'atmosphère ne faut-il pas dépasser pour limiter le réchauffement de la planète à telle ou telle valeur ?* À cette quantité correspond une *valeur cumulée des émissions anthropiques*, tenant compte du fait qu'environ la moitié seulement de ces émissions s'accumule dans l'atmosphère. Désignons par le terme de *budget carbone* cette valeur cumulée des émissions. La question peut donc se reformuler ainsi : quel *budget carbone* faut-il considérer, et quelle trajectoire d'émissions envisageons-nous, qui permette de ne pas dépasser une augmentation de température donnée ?

Dans le dernier rapport du GIEC, publié en 2013, quatre ensembles de trajectoires d'émissions sont envisagés (fig. 1).

À ces trajectoires sont associées les concentrations, en ppm (parties par million) de CO₂, jusqu'à l'horizon temporel 2100 (encadré à gauche de la figure 1). Notons que seules les trajectoires en bleu foncé conduisent à un budget global déterminé, puisque dans ce cas les émissions vers la fin du siècle deviennent légèrement négatives

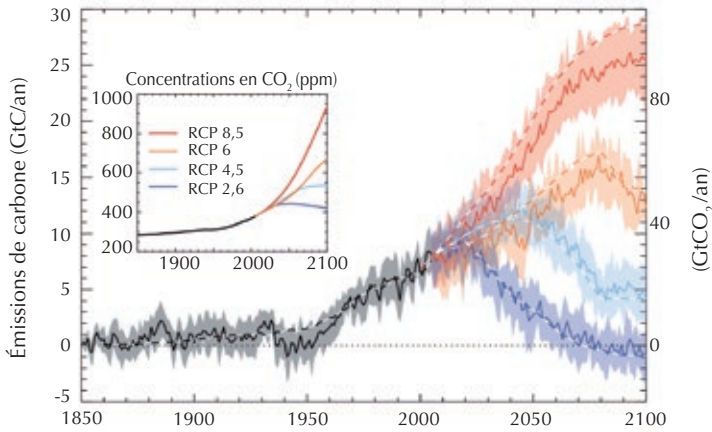
(au moyen de techniques de capture et stockage du gaz carbonique) : la valeur alors atteinte est environ 420 ppm de CO₂. Pour les autres trajectoires, les concentrations limites ne sont pas indiquées : les émissions ne s'annulent pas en 2100. En ce qui concerne les températures moyennes, elles sont données dans la figure 2, également extraite du rapport du GIEC.

Comme on s'y attend, la courbe en bleu foncé de la figure 2, correspondant à la trajectoire d'émissions la plus optimiste, se termine en 2100 avec une pente nulle, ce qui indique une stabilisation de l'anomalie de température à une valeur proche de +2°C. Il s'agit là du scénario qui correspond à l'accord signé à Copenhague. En revanche, les autres courbes se terminent avec une pente positive : l'anomalie de température continue d'augmenter au-delà du 21^e siècle.

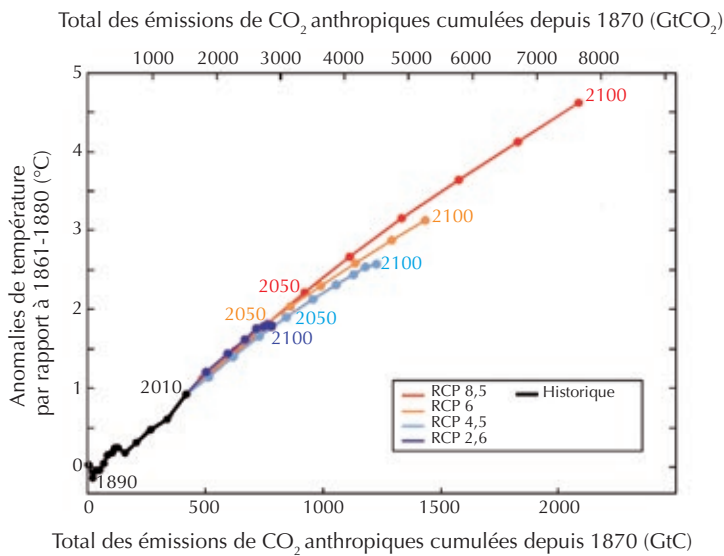
Dans ce qui suit, je voudrais argumenter les trois conclusions suivantes :

1. Le scénario optimiste n'est plus d'actualité, car il n'est plus réalisable.
2. Les scénarios les plus pessimistes, notamment celui en rouge dans la figure 1, ne sont pas réalistes, car ils supposent des ressources extractibles en combustibles fossiles bien au-delà de ce que les géologues indiquent.
3. Mais si nous ne faisons rien, les réserves de combustibles fossiles sont suffisantes pour qu'à terme la concentration en gaz à effet de serre atteigne plus de 800 ppm, ce qui devrait entraîner une augmentation de la température moyenne d'environ 5°C.

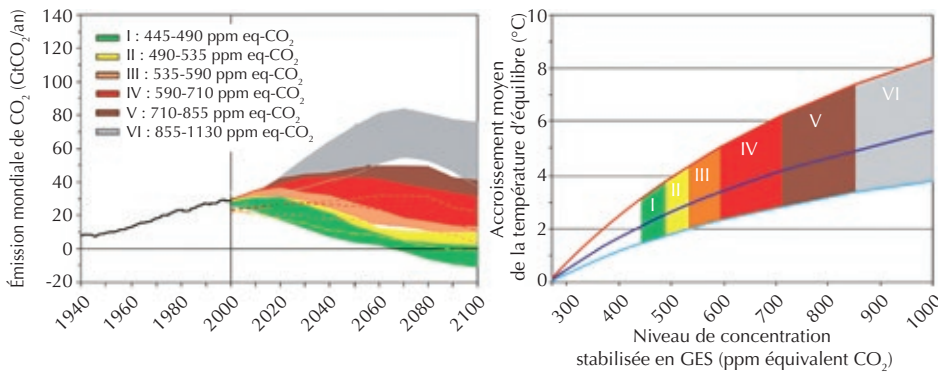
Par simplicité, nous allons raisonner dans la suite seulement sur le gaz carbonique, et considérer que l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère est uniquement d'origine anthropique. En procédant ainsi, nous ne tenons pas compte des GES qui risquent d'être émis naturellement du fait du réchauffement climatique. Le permafrost⁽¹⁾ contient en effet des stocks très importants de carbone organique. Le dégel va entraîner



1. Trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre (GES) envisagées dans le dernier rapport du GIEC (AR5). Les indications RCP2,6... RCP8,5 correspondent à divers forçages radiatifs atteints en 2100 : 2,6 W/m²... 8,5 W/m². Un forçage radiatif ⁽²⁾ représente la différence, au niveau du sommet de la troposphère, entre le rayonnement reçu du Soleil et celui émis par le système Terre, différence générée par l'augmentation de la concentration en GES. Un forçage radiatif positif tend à réchauffer l'atmosphère. L'encadré à gauche donne la correspondance en terme de concentration en CO₂ de l'atmosphère (d'après le Résumé Technique du Groupe de Travail I (WG1)).



2. Augmentation de température, par rapport à 1870, atteinte en 2100, selon les quatre ensembles de trajectoires d'émissions de la figure 1.



3. Trajectoires d'émissions mondiales de CO₂ et températures d'équilibre correspondantes, d'après le rapport GIEC 2007. Partie gauche : taux historique d'émission de CO₂ de 1940 à 2000, et taux d'émission envisagés de 2000 à 2100 suivant différentes trajectoires. Partie droite : températures moyennes d'équilibre correspondantes ; en abscisse : concentration en équivalent CO₂ (GES : gaz à effet de serre), pour chacun des six ensembles de trajectoires de la figure de gauche ; cette concentration est aujourd'hui d'environ 450 ppm (dont 400 ppm de CO₂).

une activité de microorganismes qui vont le transformer soit en CO₂, soit en méthane + CO₂, selon les organismes impliqués. De plus, nous ne tiendrons pas compte des gaz à effet de serre résultant de l'agriculture et du changement d'utilisation des sols. Leur émission annuelle est loin d'être négligeable aujourd'hui, mais leur contribution à l'effet de serre global demeure réduite (quelques pourcents).

Notons que, dans les rapports du GIEC, les émissions sont parfois exprimées en gigatonnes de carbone (GtC), parfois en Gt de gaz carbonique (GtCO₂) – ce qui ne facilite pas toujours la lecture. Nous avons présenté ici les figures originales avec les deux unités, qui se déduisent l'une de l'autre par le facteur 44/12, rapport de la masse molaire du CO₂ à celle du carbone. Les concentrations dans l'atmosphère sont exprimées en ppm.

Pourquoi la perspective d'une augmentation de température de 2°C n'est-elle plus d'actualité ?

La figure 2 indique que le total des émissions de CO₂ depuis 1870, dans le scénario optimiste, est limité à environ 800 GtC. C'est le budget global dont nous partons. Pour savoir combien nous pouvons encore émettre pour atteindre cette valeur, il faut déterminer combien nous avons émis de carbone jusqu'à aujourd'hui.

La concentration historique (antérieure à 1870) de l'atmosphère en CO₂ était de 280 ppm, elle est aujourd'hui de 400 ppm. Nous avons donc rajouté 120 ppm. Quelle masse de carbone cela représente-t-il ?

La masse de l'atmosphère étant de 5×10¹⁸ kg (pression × surface terrestre), 1 ppm de CO₂ représente 2 GtC (un millionième de la masse de l'atmosphère, pondérée par le rapport des masses molaires moyennes du carbone et de l'air). Les 120 ppm anthropiques représentent donc 240 GtC. Mais comme seulement la moitié du gaz carbonique que nous émettons s'accumule dans l'atmosphère (l'autre moitié étant pour une part dissoute par les océans et pour l'autre part absorbée par un accroissement de la photosynthèse), nous avons émis 480 GtC. Il reste donc, pour atteindre 800 GtC, un peu plus de 300 GtC à émettre. Nous allons à présent calculer diverses trajectoires d'émission correspondant à ce budget global.

Il est utile, auparavant, de reproduire une figure du rapport GIEC 2007, qui met en regard les trajectoires d'émission et les températures d'équilibre correspondantes (fig. 3).





Alors que la figure 2 montre les températures à l'horizon temporel de 2100, celles de la figure 3 sont des températures *asymptotiques*, lorsque le système climatique est parvenu à l'équilibre. Par exemple, l'augmentation de température d'équilibre correspondant à une concentration en équivalent CO₂ de 450 ppm est de 2 °C, alors que le réchauffement observé aujourd'hui n'est que de 0,8°C. L'effet d'un forçage radiatif⁽²⁾ met plusieurs décennies, voire plusieurs siècles, à se stabiliser complètement.

Détermination des trajectoires d'émission

Soit P le taux annuel d'émission, Q la quantité de carbone émise jusqu'à une certaine date, et Q_{max} le budget global (P est donc la dérivée discrétisée de Q , avec un pas de temps de 1 an).

Lorsque Q est petit devant Q_{max} , on peut raisonnablement supposer que P est proportionnel à Q (le développement initial de l'usage des combustibles fossiles est tel que plus on en a extrait, plus on est capable d'en extraire, en raison même du développement technique qu'ils permettent). C'est aussi ce que l'on constate empiriquement : $P = tQ$.

Mais lorsque Q s'approche de Q_{max} , P doit tendre vers 0. L'expression la plus simple qui satisfait ces deux conditions est la suivante (équation logistique) : $P = tQ [1 - Q/Q_{max}]$.

Pour généraliser un peu les formes possibles, nous allons introduire un paramètre supplémentaire α , et écrire finalement : $P = tQ [1 - Q/Q_{max}]^\alpha$.

On considérera dans la suite deux valeurs : $\alpha = 1$ et 0,5.

Le calcul de la trajectoire d'émission se mène de la façon suivante : on détermine t par ajustement sur la valeur de Q la plus récente, et on progresse vers le futur selon l'algorithme : $Q(n) = Q(n-1) + P(n-1)$, $P(n) = tQ(n) [1 - Q(n)/Q_{max}]^\alpha$.

Ces équations se programment en trois minutes sur un tableur. Pour $\alpha = 1$ et un budget carbone de 800 GtC, on obtient l'évolution montrée sur la figure 4a. Les premiers points correspondent aux émissions des années 2006 à 2012⁽³⁾. En ce qui concerne les émissions futures, la différence avec la trajectoire du GIEC (courbe bleu foncé de la figure 1) – le brusque changement de pente en 2013 – tient à ce que nous n'avons pas considéré, ici, la possibilité d'émissions négatives vers la fin du siècle. Nous pouvons le faire en autorisant un budget global plus « généreux », disons 960 GtC (nous pouvons alors émettre dans le futur autant que nous avons émis dans le passé). Dans ce cas, la trajectoire d'émissions devient celle de la figure 4b.

Cette trajectoire ressemble maintenant bien (sauf à la fin du siècle) à la trajectoire considérée par le GIEC (fig. 1), trajectoire que nous avons qualifié d'optimiste : les émissions cessent d'augmenter dès demain, et elles sont divisées par environ 2 d'ici 2050 (cela « explique » la formulation courante de la contrainte climatique).

En fait, les deux trajectoires décrites ci-dessus sont irréalistes : les systèmes énergétiques ont une inertie telle que, même si des décisions significatives étaient prises à l'échelle mondiale, il est difficile d'envisager de telles discontinuités dans la variation des émissions. Pour simuler une évolution moins brusque, on peut changer la forme fonctionnelle en choisissant d'autres valeurs de la puissance α . Par exemple, pour $\alpha = 0,5$, on obtient la trajectoire de la figure 4c.

Évidemment, le prix à payer pour le fait de continuer d'augmenter les émissions jusqu'à 2030 (fig. 4c) est de les réduire plus drastiquement par la suite : à partir du milieu du siècle, il faut être capable de diminuer mondialement les émissions au rythme d'environ 5% par an. Est-ce possible ?

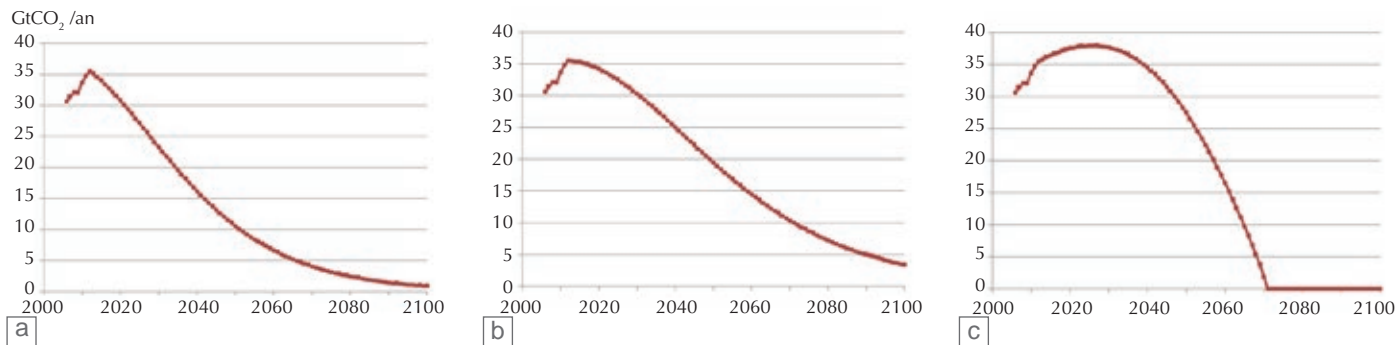
Dans l'histoire récente, de tels taux ont été enregistrés par deux fois. La première, pendant une dizaine d'années, à la suite de la chute de l'URSS et de l'effondrement économique qui en est résulté. La seconde, en France, lors de la construction de la filière nucléaire. Il est bien improbable que de telles évolutions puissent avoir lieu à l'échelle mondiale – en tout cas, on ne les voit pas se dessiner, chaque État gérant son « mix » énergétique en fonction de ses objectifs de développement propres.

Remarquons pour finir que si la technologie de capture et stockage du carbone n'est pas mise en place, un budget global de 960 GtC correspond à une concentration finale en GES de $280 + 2 \times 120$, soit 520 ppm. L'augmentation de température résultant serait alors de l'ordre de 3 degrés. Mais si, comme la discussion ci-dessus le suggère, une telle évolution semble très difficile à mettre en place – dans ce qu'elle suppose de coopération internationale – c'est que **l'humanité est résolument engagée vers une augmentation de température de 4 degrés.**

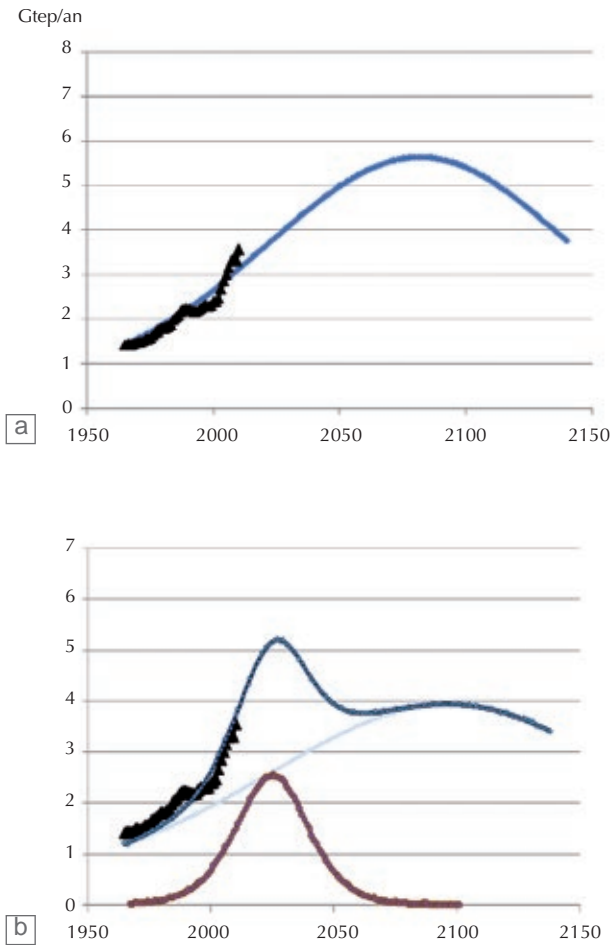
Il nous reste à explorer à présent l'autre limite : puisque les ressources en combustibles fossiles sont limitées (la Terre est un système fini !), que se passe-t-il si nous ne faisons rien pour diminuer nos émissions de GES ?

Que se passera-t-il si on ne fait rien ?

Il est intéressant de calculer le potentiel d'émission correspondant à la totalité des réserves estimées de charbon et d'hydrocarbures. Les taux d'émission sont de 4,3 tCO₂/tep⁽⁴⁾ pour le charbon, 3,1 tCO₂/tep pour le pétrole et 2,1 tCO₂/tep pour le gaz. En prenant des valeurs moyennes pour les réserves exploitables⁽⁵⁾, disons 850 Gtep de charbon, 400 Gtep de pétrole et 300 Gtep de gaz

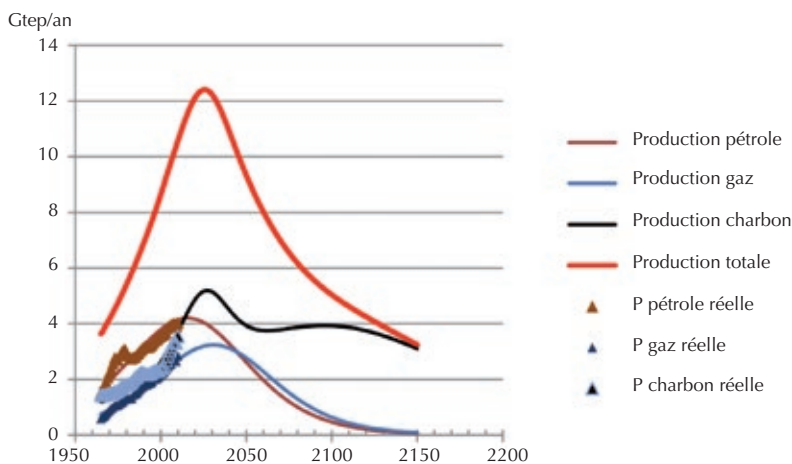


4. Trajectoires d'émissions (en GtCO₂ par an) calculées pour : (a) un budget global de 800 GtC ; (b) un budget global de 960 GtC ; et (c) un budget global de 960 GtC, tenant compte d'une certaine inertie des systèmes énergétiques.



5. Deux façons d'extrapoler la consommation mondiale annuelle de charbon (en Gtep par an) au-delà de l'année 2010.

- (a) Ajustement avec un seul maximum.
- (b) Superposition d'un pic étroit (courbe marron) pour la consommation chinoise, et d'un pic large (courbe bleu clair) pour la consommation du reste du monde. Le résultat est la courbe bleu foncé. Notons qu'il s'agit là de modélisations schématiques : la Chine est déjà importatrice de charbon.



6. Extrapolation de la production annuelle de ressources fossiles, en Gtep par an. La courbe rouge représente la somme des trois autres. Les points représentent les productions réelles jusqu'en 2010.

(incluant le gaz de schiste), le potentiel d'émission de gaz carbonique est de $850 \times 4,3 + 400 \times 3,1 + 300 \times 2,1 = 5525 \text{ GtCO}_2$, desquels nous avons déjà émis $480 \times 44/12 = 1760 \text{ GtCO}_2$ (le rapport 44/12 est égal au rapport des masses molaires du gaz carbonique et du carbone).

Le potentiel d'émission futur est donc égal à $5525 - 1760 = 3765 \text{ GtCO}_2$, soit 2,14 fois ce que nous avons déjà émis. La concentration finale en CO_2 , si nous émettions tout ce qui est disponible, se fixerait alors à $400 + 2,14 \times 120 = 657 \text{ ppm}$.

D'après la figure 3, partie droite, qui tient compte de la contribution des autres gaz à effet de serre, l'augmentation correspondante de la température moyenne serait d'environ 4°C : on ne peut donc pas compter sur l'épuisement des réserves pour régler la dérive climatique !

Il est possible de préciser la trajectoire des émissions, à partir d'un modèle calqué sur celui utilisé ci-dessus pour le budget carbone, mais où cette fois P représente la consommation annuelle d'une ressource fossile, Q la quantité déjà extraite et Q_{max} la réserve exploitable⁽⁶⁾.

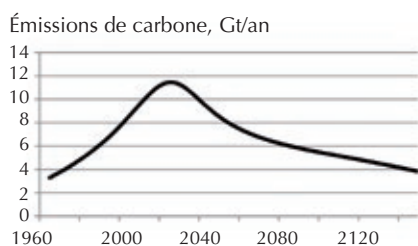
L'extrapolation pour le pétrole et le gaz ne pose pas de problème. En revanche, les données de production pour le charbon montrent une nette rupture de pente vers l'an 2000 (points noirs de la figure 5), due à la consommation chinoise. Dès lors, l'extrapolation peut se faire de deux façons distinctes :

- soit on considère qu'il s'agit d'une fluctuation passagère, et l'on extrapole en faisant passer une seule courbe par les données,
- soit on considère que la Chine a une logique de développement telle qu'elle exploitera ses réserves de charbon (environ 150 Gtep) à son rythme propre, auquel cas on extrapole les données en superposant deux courbes, l'une pour la Chine, l'autre pour le reste du monde.

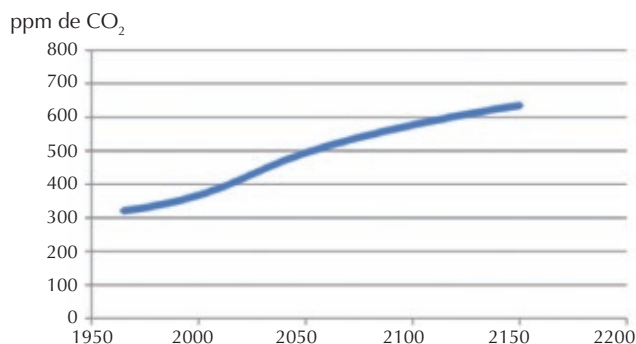
On obtient les résultats de la figure 5. Dans la suite, nous utiliserons l'extrapolation représentée sur la figure 5b.

On entend et on lit souvent que nous aurions assez de charbon pour quelques siècles. Cette estimation est obtenue en divisant les réserves présumées par le taux d'extraction de l'année. Effectivement, avec une réserve de 850 Gtep et un taux d'extraction annuel de 3,5 Gtep/an (qui est le taux actuel), on obtient environ 240 ans. Il faut mesurer ici combien cette estimation est trompeuse : d'une part, le taux d'extraction ne peut être considéré comme constant, et d'autre part, ce qui compte, du point de vue économique,





7. Émissions annuelles de carbone (en Gt par an), correspondant aux consommations de la figure 6.



8. Évolution de la concentration de l'atmosphère en gaz carbonique, correspondant à la courbe d'émission de la figure 7. La valeur asymptotique est de 660 ppm.

>>>

c'est la position du pic de production. Passé ce pic, la demande n'ayant pas de raison de diminuer, des tensions apparaissent sur les marchés de l'énergie, et le système devient instable, en tout cas plus difficilement prédictible.

La figure 6 montre les trois extrapolations obtenues pour le pétrole, le gaz et le charbon, ainsi que leur somme (en rouge). Pour le charbon, on a pris la courbe de la figure 5b.

Les émissions de gaz carbonique qui résultent des consommations de la figure 6 sont représentées sur la figure 7.

La figure 7 montre que les émissions de carbone culminent à environ 11,5 GtC/an en 2030⁽⁷⁾, puis diminuent pour atteindre environ 5 GtC/an en 2100. Cette courbe est à comparer à la plage en rouge de la figure 1 (scénario RCP8.5) et à la zone en grisé de la figure 3 (dans ce dernier cas, il faut multiplier l'échelle des ordonnées par le rapport des masses molaires du carbone et du gaz carbonique, soit $12/44 = 1/3,67$). On constate que les trajectoires les plus émissives considérées par le GIEC, qui culminent à 22 GtC/an en 2070 et sont encore de 18 GtC/an en 2100 dans le rapport de 2007, et qui culminent à 25 GtC/an en 2100 dans le scénario RCP8.5, sont bien au-delà de ce que les géologues anticipent comme possible. Il conviendrait donc de préciser le statut et l'intérêt, pour la réflexion, du scénario RCP8.5 : si les réserves de combustibles fossiles ne semblent pas suffisantes pour l'étayer, peut-être s'agit-il d'anticiper la possibilité d'exploitation de réserves non encore identifiées (clathrates de mer), ou de simuler l'effet de la fonte du permafrost⁽¹⁾ ?

L'évolution de la concentration totale en gaz carbonique dans l'atmosphère, associée à la trajectoire d'émission de la figure 7, est montrée sur la figure 8.

En guise de conclusion

L'objectif de limiter l'augmentation de température moyenne de l'atmosphère terrestre à 2°C semble bien appartenir au passé : pour s'y tenir, il faudrait que les émissions mondiales de GES se stabilisent dès aujourd'hui puis diminuent régulièrement jusqu'à s'annuler vers la fin du siècle – voire devenir négatives. Les pays riches sont bien parvenus à stabiliser leurs émissions, voire à les diminuer légèrement dans certains cas, mais les combustibles fossiles continuent d'être à la base de leur énergie primaire. Quant aux pays émergents, leur développement reste pour l'essentiel fondé sur les combustibles fossiles, qu'ils consomment en quantité croissante. On ne voit pas comment ces tendances pourraient s'inverser rapidement. À budget carbone total fixé, tout délai dans la mise en place de politiques de réduction des émissions implique des taux de réduction dans le futur qui semblent contradictoires avec l'inertie intrinsèque et économique des systèmes énergétiques.

Si rien n'est fait, les réserves disponibles en combustibles carbonés fossiles sont largement suffisantes pour faire dériver la température moyenne au-delà de +5°C. Toutefois, les scénarios d'émission les plus alarmistes envisagés par le GIEC paraissent irréalistes : en tout cas, les quantités de carbone émises dans ces trajectoires ne semblent pas compatibles avec les estimations des réserves données par les géologues. Les économistes ont généralement tendance à considérer que la question des réserves ne se pose pas : d'une part, l'évolution des prix ajusterait automatiquement offre et demande et, d'autre part, les diverses ressources seraient immédiatement substituables. Les géologues, pour leur part, insistent sur

les quantités physiques. Pour le prochain rapport du GIEC, une meilleure collaboration entre économistes et géologues paraît donc souhaitable.

Pour l'heure, il faut sans doute se préparer à un monde quatre degrés plus chaud... ■

(1) Permafrost (ou pergélisol) : sol gelé en permanence, en particulier dans les hautes latitudes. Son dégel pourrait entraîner de forts dégagements de gaz à effet de serre (CH₄ et CO₂).

(2) Pour une discussion sur le forçage radiatif, voir J. Poitou, *Reflets de la physique* 33 (2013) 28-33.

(3) Les données se trouvent sur le site : http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1731_2010.ems

(4) tep : tonne d'équivalent pétrole, unité d'énergie qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole « moyenne », soit 41,86 GJ (*Wikipédia*).

(5) Les spécialistes distinguent les ressources – ce qu'il y a dans le sol – des réserves – ce qu'il est envisageable d'extraire du sol. Parmi les réserves, ils distinguent les réserves prouvées – probabilité d'extraction de 90% – et les réserves probables – probabilité d'extraction de 50%. Ce qui compte, du point de vue économique, ce sont les réserves, et non les ressources : d'une part, l'énergie récupérable lors de la combustion doit être supérieure à celle mise en jeu dans la récupération, et d'autre part, le réservoir peut bien être immense, c'est la taille du robinet qui importe. Les valeurs utilisées ici se situent dans la moyenne des valeurs données par les géophysiciens. Par ailleurs, la prise en compte du pétrole de schiste ne devrait modifier la position du pic de production que de quelques années, sans permettre de compenser la diminution de la production de pétrole conventionnel.

(6) Il s'agit du modèle que Marion K. Hubbert avait utilisé en 1956 pour estimer la date du pic de production pétrolier des USA. Sa « prédiction », 1971, fut vérifiée avec une précision étonnante.

(7) Alors que je terminais cet article, un accord entre les USA et la Chine a été rendu public le 12 novembre 2014. La Chine y évoque un pic de ses émissions de gaz à effet de serre vers 2030. Cette date correspond au pic de la production de charbon envisagé ici (cf. fig. 5b). Les négociateurs chinois ont-ils tracé cette courbe ?! Toujours est-il que, dans la mesure où le charbon représente la principale ressource d'énergie primaire fossile en Chine, la proposition ne représente aucun « effort » particulier, puisque, ainsi que nous l'avons vu, elle correspond à l'utilisation de l'ensemble de la ressource charbonnière chinoise sans restriction aucune.

Pugwash :

les physiciens, l'arme nucléaire, la responsabilité des scientifiques

Jacques Bordé^(*), Nicolas Delerue^(**) et Annick Suzor-Weiner^(***) (annick.suzor-weiner@u-psud.fr)

(*) Ancien directeur de recherche au CNRS, Vice-président de Pugwash-France

(**) Laboratoire de l'accélérateur linéaire, CNRS et Université Paris-Sud, Vice-président de Pugwash-France

(***) Professeure émérite à l'Université Paris-Sud, Présidente de Pugwash-France

Dans les années qui suivirent la Seconde Guerre mondiale, les physiciens réalisèrent que la bombe qu'ils avaient construite était en train de leur échapper. Afin de promouvoir un usage pacifique de la science, ils fondèrent le Mouvement Pugwash, qui agit en coulisse en faveur de la paix dans le monde et a été l'un des instigateurs du traité sur la non-prolifération. Il a reçu en 1995 le prix Nobel de la Paix, et encore récemment a contribué à convaincre le gouvernement syrien de détruire ses armes chimiques. L'évolution actuelle est à l'ouverture, vers les scientifiques de toutes disciplines, mais aussi vers un large public qui doit être informé et associé à la réflexion sur les conditions de survie de l'humanité, et de sa survie en paix.



1. Les participants de la 60^e Conférence Pugwash à Istanbul, 1-5 novembre 2013.

Au deuxième rang, au centre : Dr. J. Dhanapala, président de Pugwash-international, ancien sous-secrétaire général des Nations Unies pour les affaires de désarmement. Au premier rang, deuxième à partir de la droite : A. Suzor-Weiner. Au dernier rang, cinquième à partir de la droite : N. Delerue.

En 1955, Einstein a tiré les leçons d'Hiroshima et compris qu'il avait fait preuve d'angélisme en poussant le développement de la bombe A, pensant qu'elle ne serait pas utilisée et ne servirait qu'à la dissuasion, pour la bonne cause. Il réalise que, si la même chose arrivait avec la bombe H, les conséquences ne seraient pas seulement la destruction d'une ville et de quelques centaines de milliers de personnes, mais pourraient conduire à la disparition de la vie sur terre. Son inquiétude rejoint celle de Bertrand Russell, mathématicien, philosophe et prix Nobel de littérature (1950) qui, en collaboration avec Joseph Rotblat, physicien anglais d'origine polonaise – le seul à avoir quitté, fin 1944, le projet Manhattan –, propose un *Manifeste* qu'Einstein va signer quelques jours avant sa mort.

Ce *Manifeste* [1] (dit d'Einstein-Russell, et cosigné, entre autres, par le Français Frédéric Joliot-Curie) exhorte les scientifiques à ne pas livrer aux politiques une telle arme, à faire passer les idéologies

politiques après la survie de l'espèce humaine, et appelle les principaux dirigeants du monde à rechercher des solutions pacifiques aux conflits internationaux. Il ne s'agit plus, dit-il, de faire gagner un camp plutôt qu'un autre, comme les scientifiques le faisaient traditionnellement en mettant leur science au service de leur patrie ; il s'agit surtout de ne pas créer la possibilité d'une guerre nucléaire tellement grave qu'il n'y aurait que des vaincus et peut-être plus d'hommes du tout, donc de ne pas mettre la science au service du mal absolu. D'où la phrase la plus citée du *Manifeste* : "Remember your humanity, forget the rest!"

Aujourd'hui encore, 25 ans après la fin de la guerre froide, la démarche d'Einstein reste d'actualité : que ce soit dans les débats sur la transition énergétique, dans les discussions sur les réductions des arsenaux nucléaires, l'utilisation de plus en plus fréquente de drones à des fins militaires, la compréhension de ce qui se passe réellement





dans les sites d'enrichissement iraniens ou les armes chimiques en Syrie, la science est au cœur de l'actualité. Chaque physicien, chaque chercheur doit s'interroger, aujourd'hui comme hier, sur les risques graves et irréversibles qui peuvent découler des résultats de ses recherches.

Genèse du Mouvement Pugwash

Après le premier *Manifeste*, il a fallu deux ans pour que celui-ci se traduise en actions : en juillet 1957, à l'instigation de Joseph Rotblat et grâce au soutien de l'industriel canadien Cyrus S. Eaton, un groupe de vingt-deux physiciens de dix pays se réunit à Pugwash, petite ville de Nouvelle-Écosse (Canada). Ce groupe décide de développer des liens entre questions scientifiques et enjeux politiques, en organisant des séminaires et conférences qui sont des lieux de rencontre entre scientifiques et politiques. Le prestige des participants (dont de nombreux Prix Nobel) leur permet en effet d'avoir l'écoute des dirigeants politiques, et le but de Pugwash est d'installer une diplomatie parallèle où les scientifiques de pays opposés agissent comme intermédiaires pour peser sur les accords internationaux, notamment le traité sur la non-prolifération (TNP). De fait, l'influence de Pugwash, peu connue du grand public puisque se déroulant dans les coulisses du pouvoir, a été reconnue officiellement 50 ans après les bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki, 40 ans après la signature du *Manifeste d'Einstein-Russell* : en 1995, le Mouvement Pugwash et Joseph Rotblat ont reçu conjointement le prix Nobel de la Paix.

Les responsables du Mouvement, qui a vu s'ouvrir des branches nationales dans une cinquantaine de pays à ce jour, se rencontrent régulièrement lors de conférences internationales. La plus récente s'est tenue à l'automne 2013 à Istanbul (fig. 1) et a réuni environ 200 participants. Elle fut l'occasion de nombreux débats, par exemple sur le programme nucléaire iranien, sur les arsenaux nucléaires ou encore sur la situation entre l'Inde et la Chine. Mais plus encore que les débats officiels, ce sont les échanges qui sont importants : des Israéliens ayant occupé des fonctions importantes qui discutent avec des Palestiniens, des Coréens du Nord qui dînent avec des Coréens du Sud... Dans un cadre informel, ces conférences permettent de tester des idées qui pourraient apparaître tôt ou tard au menu des négociations officielles.

La branche française du Mouvement Pugwash

L'Association française pour le Mouvement Pugwash est créée en 1964 ; cette association est régie par la loi de 1901. De très nombreuses personnalités ont participé à ses travaux. Citons, à titre d'exemple, Antoine Lacassagne, directeur de l'Institut du Radium, le seul Français présent à Pugwash en 1957 – voir photo, fig. 2), Jules Moch, Francis Perrin, Bernard Gregory, Alfred Kastler, Jean-Jacques Salomon, Étienne Bauer, Georges Charpak, Louis Leprince-Ringuet, Herbert Marcovitch, Raymond Aubrac, Bertrand Goldschmidt, Léo Hamon et André Lwoff.

Plus récemment, il faut citer Georges Ripka qui a présidé Pugwash-France de 1995 à 2007, suivi du regretté Georges Parisot qui lui a succédé jusqu'en 2010, puis de Pierre Lallemand jusqu'en 2013. La présidence est actuellement assurée par Annick Suzor-Weiner.

L'association participe aux grandes conférences internationales du Mouvement Pugwash, mais a aussi une activité locale. Outre des physiciens, elle implique dorénavant des scientifiques de toutes disciplines, y compris une forte composante relevant des sciences sociales et politiques. Chaque année, elle organise des conférences-débats sur des sujets variés touchant à la responsabilité des scientifiques, dans le domaine du nucléaire et plus généralement sur toutes les avancées technico-scientifiques porteuses de menaces excédant largement les bienfaits potentiels.

En mars 2012, Pugwash-France a organisé à l'UNESCO une conférence internationale intitulée "Science and Social Responsibility: Rising Problems, Wise Initiatives", réunissant quelque 150 participants du monde entier. Cette conférence a été précédée d'un atelier international à l'École normale supérieure, destiné à sensibiliser de jeunes chercheurs français à la démarche de l'association, tandis qu'au plan international les jeunes chercheurs associés au Mouvement Pugwash se regroupent au sein de l'ISYP – International Student Young Pugwash (www.isyp.org).

Parmi ses membres, l'association compte des chercheurs actifs ou retraités dont certains ont travaillé sur des thématiques très proches des armes nucléaires, et ce malgré l'absence de débat public en France sur cette question, toujours présentée comme bénéficiant d'un évident consensus national. On assiste actuellement à une remise en



2. Fondation du Mouvement à Pugwash (Nouvelle Écosse, Canada), en juillet 1957.

De gauche à droite : le Français Antoine Lacassagne, directeur de l'Institut du Radium ; le Britannique (d'origine polonaise) Joseph Rotblat ; l'industriel canadien Cyrus S. Eaton ; le Soviétique Dmitri Skobeltzyn, conseiller à la Commission soviétique pour l'énergie atomique.

cause publique par des personnalités de premier plan, de gauche comme de droite, de cette absence de débat sur la doctrine française de dissuasion, et Pugwash participe à cet effort.

En témoignent la parution depuis 2012 de plusieurs livres [2], signés par Paul Quilès, ancien ministre de la Défense, par le général Norlain, ancien chef de la force aérienne de combat, par Stéphane Hessel et Albert Jacquard ; de même, les débats publics organisés à l'Assemblée nationale le 25 janvier 2013, le 9 décembre 2013, le 25 janvier 2014, les 26 et 27 juin 2014 ; enfin, les activités de diverses associations en synergie avec les objectifs de Pugwash : ICAN (International Campaign for the Abolition of Nuclear weapons), Global Zero, PNND (réseau des Parlementaires pour la Non-prolifération Nucléaire et le Désarmement), ALB (Arrêtez la bombe)...

Contexte actuel des activités : ouverture vers la société et vers les autres disciplines

En 2014, la situation géopolitique et les capacités technologiques ont beaucoup évolué par rapport au temps où le monde était bipolaire et où la menace principale de destruction massive était l'arme nucléaire. La réflexion de Pugwash s'est élargie d'autant, tout en gardant l'esprit du *Manifeste* de 1955 : pour Joseph Rotblat, le court terme était d'abolir l'arme nucléaire mais son objectif à long terme était la paix dans le monde. On voit bien aujourd'hui que les risques de destruction massive ne proviennent pas seulement de la recherche en physique, et l'esprit de

Pugwash doit se propager à la chimie, la biologie, l'informatique, la robotique, ainsi, bien évidemment, qu'aux sciences humaines et sociales : les scientifiques de toutes les disciplines se doivent de réfléchir à leur responsabilité quant à l'avenir de l'humanité, aux conditions de sa survie et de sa survie en paix. C'est ainsi qu'en octobre 2014, Pugwash-France s'est associé à l'ADIF (Association pour le Droit International humanitaire, France) pour un fructueux colloque débattant du « Droit international, Guerre et Paix : problèmes actuels ».

Par ailleurs, les relations entre le monde scientifique, le monde politique et la société civile ont également évolué et l'influence confidentielle, dans la seule oreille des dirigeants, ne suffit sans doute plus aujourd'hui pour peser efficacement sur les décisions politiques : des tentatives de persuasion du gouvernement par des rapports « confidentiels » échouent souvent, là où une action publique, au grand jour, dans les médias, a un effet instantané. Outre un lieu de rencontres et de discussions entre scientifiques et politiques, le Mouvement Pugwash évolue pour devenir aussi **une source d'information pour un large public**, qui seul peut forcer les gouvernements à édicter puis respecter des traités internationaux garantissant l'usage pacifique des dernières avancées technologiques.

La spécificité actuelle de Pugwash est donc de réunir des spécialistes de sciences « dures », de sciences politiques et de sciences sociales, qui peuvent s'informer mutuellement et informer gouvernements et sociétés civiles, avec le souci indispensable de convaincre de jeunes scientifiques qu'ils sont concernés par l'existence d'armes de destruction massive, que leur avenir et celui de leurs enfants en dépendent. Il faut les convaincre que leur statut de scientifiques leur confère un rôle à jouer pour le non-développement de ces armes, et il faut être conscient que la vigilance doit s'exercer dans toutes les disciplines (physique, chimie, biologie, informatique avec la cyberguerre). Pour éviter l'avènement et l'amélioration d'armes de destruction massive, quelle que soit leur technologie, l'association française du Mouvement Pugwash souhaite vivement impliquer les physiciens et les scientifiques français, que ce soit directement ou au travers des sociétés savantes, des universités et des organismes de recherche. ■

Les physiciens au cœur du processus ?

encadré 1

Historiquement, les physiciens ont été les moteurs de la création de Pugwash et de la prise de conscience de la folie associée au développement d'armes aussi puissantes ; peuvent-ils aujourd'hui se défaire de leur responsabilité au titre que le problème est surtout politique ?

Pour deux raisons principales, nous sommes tentés de répondre « non » :

- Les physiciens sont au cœur, dans leurs laboratoires, de l'amélioration de ces armes, qui pose les mêmes questions morales que leur création du temps d'Einstein, voire davantage car l'amélioration augmente la puissance, viole certains traités internationaux, et n'a pas forcément pour but d'épargner les civils. En améliorant les armements nucléaires, les physiciens cautionnent de fait le non-respect des traités. Même ceux qui croient à la dissuasion pourraient écouter les militaires comme le général Étienne Copel, selon qui la puissance actuelle est suffisante [3].
- Ils sont aussi au cœur du désarmement pour déterminer les meilleures méthodes de dénucléarisation, de vérification ou de réutilisation pacifique de l'arsenal existant.

Pilotant l'invention, l'amélioration et la destruction ou reconversion de ces armes, les physiciens pourraient donc être à l'initiative de la création d'un comité scientifique international qui collecterait, avec d'autres spécialistes, les avancées des connaissances pertinentes pour gérer ces armes et l'impact de leur utilisation volontaire ou involontaire. Ce comité multidisciplinaire, sorte de « GIEC » de l'armement nucléaire (et autres armes de destruction massive, voir encadré 2), pourrait constituer un comité d'alerte mondial sur le danger mortel pour l'humanité si la situation actuelle perdure, voire s'aggrave avec le risque accru de prolifération.

Pour un « GIEC sur les Armes de destruction massive »

Le GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat), créé en 1988 et composé de scientifiques de disciplines variées, rassemble les connaissances les plus récentes dans le domaine du climat et évalue les conséquences pour l'homme des évolutions climatiques observées ; il publie régulièrement ses conclusions dans des rapports qui ont un retentissement mondial et qui obligent les politiques à tenter de trouver des solutions devant la menace du réchauffement de la planète. Peut-on s'inspirer de cet exemple et faire en sorte que les scientifiques concernés par l'évolution des armements nucléaires (ou plus généralement des ADM, armes de destruction massive) suivent les avancées scientifiques et technologiques dans ce domaine et s'organisent mondialement pour alerter les politiques sur les conséquences insensées des ADM pour l'avenir de l'humanité ?

Pour le nouveau groupement envisagé comme pour le GIEC actuel, il s'agit de faire appel aux scientifiques de toute la planète pour analyser la situation à la lumière de l'évolution des connaissances et de fédérer toutes les disciplines impliquées : physique, chimie, biologie, sciences de l'ingénieur, sciences de la terre, sociologie, politologie... Dans les deux cas, la nécessité d'alerter sur la dangerosité de la situation se heurte à la difficulté de construire une réponse politique appropriée et à des lobbies industriels puissants. Dans les deux cas, une communauté scientifique mondiale et fortement interdisciplinaire est une source d'experts pour mobiliser les autres chercheurs, les politiques, et l'opinion publique. Des différences notables existent cependant entre les deux sujets : d'abord le caractère militaire de l'un et le caractère civil de l'autre ; ensuite, pour le volet nucléaire des ADM, l'existence de l'AIEA avec laquelle il faudrait clarifier la différence de statut et le partage des rôles (peut-être la vérification et le contrôle pour l'AIEA, et l'alerte pour le nouveau groupe).

Il nous semble qu'aujourd'hui, devant la complexité des problèmes, tant scientifiques et technologiques que politiques, une initiative conduisant à une structuration du type GIEC, au moins au niveau européen, impliquant des groupes de travail interdisciplinaires, pourrait accélérer la prise de conscience collective des risques encourus par l'humanité.

Les prochaines réunions de Pugwash-France seront annoncées sur le site <http://pugwash.fr/> et se tiendront, sauf exception, à l'École normale supérieure, 45 rue d'Ulm, Paris, 5^e, en fin de journée. Pour être informé(e) directement, vous pouvez demander à figurer sur la liste de diffusion ou rejoindre l'association, en écrivant à l'adresse : contact@pugwash.fr.

Association Pugwash-France :

<http://pugwash.fr/>

Contact : contact@pugwash.fr

Pugwash international : <http://pugwash.org>

Références

1. <http://pugwash.org/1955/07/09/london-launch-of-the-russell-einstein-manifesto/>
2. P. Quilès, *Nucléaire, un mensonge français : réflexions sur le désarmement nucléaire*, Éditions Charles Léopold Mayer (2012). P. Quilès avec B. Norlain et J.-M. Collin, *Arrêtez la bombe*, Cherche-midi (2013). S. Hessel et A. Jacquard, *EXIGEZ ! Un désarmement nucléaire total*, Stock (2012). H. de Trochis, *Désarmement nucléaire/urgence*, L'Harmattan (2014).
3. É. Copel, *Le Monde*, 31 juillet 2012. www.lemonde.fr/idees/article/2012/07/30/n-abandonnons-pas-la-dissuasion-nucleaire_1740181_3232.html.

Conseil d'administration

4 décembre 2014

Suivant les propositions des jurys respectifs de ces prix, le Conseil décerne, à l'unanimité :

- **Prix Louis Ance**l 2014
Claire Wilhelm (Laboratoire Matière et systèmes complexes de l'Université Paris Diderot) ;
- **Prix Joliot-Curie** 2014
Michel Guidal (Institut de physique nucléaire d'Orsay).

Le Conseil ratifie les nominations de nouveaux responsables :

- **Division Champs et particules**
Guy Wormser (wormser@lal.in2p3.fr) ;
- **Section Bretagne**
Jean-Paul Taché (jean-paul.taché@univ-rennes1.fr).

Par ailleurs, il donne son accord pour une rénovation des locaux du siège de la SFP, rue Croulebarbe. Les travaux devraient être effectués en janvier 2015. J.J. Benattar étudiera la faisabilité d'un dispositif de visio-conférences, et d'un système de réservation en ligne de la salle de réunion.

Le séminaire SFP d'Orléans,

4-5 décembre 2014, Novotel Orléans La Source

Trois conférences ont alterné avec les présentations des sections locales, des divisions de spécialité et des commissions :

- Denis Jérôme (Académie des sciences) a présenté les nouveaux enjeux de l'édition scientifique, face aux défis que représentent l'existence de plusieurs modèles d'accès du chercheur aux publications, et le coût excessif imposé par certains éditeurs (voir le rapport www.academie-sciences.fr/presse/communiqu/rads_241014.pdf) ;
- Jean-Louis Bobin (commission énergie de la SFP) a fait le point sur les défis que constituent pour l'humanité la limitation des ressources en énergie et les menaces pesant sur le climat ;
- Bruno Gayral (CEA Grenoble) a raconté l'histoire du cheminement qui a mené à la découverte des LEDs bleues, récompensée par le prix Nobel de physique 2014.

Parmi les présentations, on note celle de la commission enseignement (Nathalie Lebrun), qui a donné les premiers résultats d'une enquête auprès des enseignants sur l'impact, en première année d'enseignement supérieur, des nouveaux programmes de lycée en physique : il apparaît que cette réforme n'a fait qu'amplifier les choses dans le mauvais sens pour le raisonnement, la rigueur et les capacités calculatoires des élèves (voir l'éditorial d'Alain Fontaine, p. 2). L'objectif d'un groupe inter-associatif UdPPC-UPS-SFP sera de faire des recommandations pour une évolution dans le bon sens des programmes de physique au lycée.

La commission Jeunes physicien(ne)s de la SFP a été récemment réactivée. En l'absence de Stéphanie Couvreur, présidente de la commission, Samuel Guibal a présenté ses priorités actuelles : organisation de journées « jeunes chercheurs » en province, sur le modèle de celle mise en place à Paris depuis deux ans, participation à des actions comme l'International Physics Tournament (IPT), ouverture vers les écoles d'ingénieurs.

Accord cadre SFO-SFP

Le 23 janvier 2015, à l'occasion de l'Assemblée générale de la SFP, les présidents Jean-Jacques Aubert (Société Française d'Optique, SFO) et Alain Fontaine (SFP) ont signé un accord cadre, par lequel les deux sociétés savantes sœurs conviennent plus particulièrement :

- d'organiser leurs congrès généraux en alternance à partir de 2016, celui de la SFP les années impaires, et celui de la SFO les années paires ;
- d'insérer le colloque biennuel PAMO de la SFP dans le congrès général de la SFO, en coordonnant les deux colloques pour harmoniser les programmes, et en organisant une journée commune sous l'égide d'un comité scientifique commun.

Composition du Bureau et du Conseil d'administration

Le Bureau au 23 janvier 2015

Fontaine Alain, président
Spiro Michel, vice-président entrant
Bénattar Jean-Jacques, secrétaire général
Bourée Françoise, trésorière
Duraud Jean-Paul, secrétaire
Guibal Samuel, secrétaire
de Novion Charles, secrétaire
Stehle Marc, secrétaire

Le Conseil d'administration au 23 janvier 2015

(200X : année d'élection)

| | |
|--------------------------|--------|
| Anakkar Abdelkader | (2013) |
| Brémond Georges | (2013) |
| Cohadon Pierre-François | (2014) |
| Couprie Marie-Emmanuelle | (2013) |
| Couvreur Stéphanie | (2014) |
| Cuisset Arnaud | (2015) |
| De Backer Marie-Renée | (2014) |
| Di Ciaccio Lucia | (2015) |
| Dulieu Olivier | (2013) |
| Emery-Schrenk Sandrine | (2013) |
| Gay Pascal | (2014) |
| Korichi Amel | (2015) |
| Lebre Agnès | (2013) |
| Levelut Claire | (2013) |
| Lollman Dave | (2014) |
| Mariette Henri | (2014) |
| Merlen Alexandre | (2013) |
| Perez Éric | (2015) |
| Prost Jacques | (2015) |
| Rairoux Patrick | (2014) |
| Robert-Philip Isabelle | (2013) |
| San Miguel Alfonso | (2015) |

L'assemblée générale et *Regards de physicien(ne)s* (23 janvier 2015)

L'assemblée générale de la SFP s'est tenue au CNAM, Paris, 3^e.

Les résultats des élections au Conseil d'administration et la composition du Bureau sont donnés ci-contre. Dans son allocution, Alain Fontaine, président de la SFP, fait un bilan des actions déployées en 2014, remercie le vice-président sortant, Michel Lannoo, et accueille le vice-président entrant, Michel Spiro (voir la notice ci-dessous).

La trésorière, Françoise Bourée, présente le bilan financier de l'année écoulée (compte de résultat analytique du 1/10/13 au 30/09/14) et le budget prévisionnel 2014-2015. On constate en 2014 une diminution des produits d'exploitation (dividende d'EDP Sciences, en particulier). Si l'année 2013-2014 affiche encore un résultat positif (marge nette de 66 k €), il n'en sera pas de même de 2015. Par vote à main levée, l'AG approuve le budget, ainsi que la reconduction pour six ans du mandat de la commissaire aux comptes.

L'assemblée générale a été suivie par la journée *Regards de physicien(ne)s*, ouverte au public et qui, cette année 2015, était dédiée à la lumière. Quatre conférences encadraient la remise des prix Jeunes chercheurs de la SFP par Alain Fontaine et Emmanuelle Gouillart (UMR CNRS/Saint-Gobain) à Emmanuel Jacquet (prix Saint-Gobain 2012), Anna Lombardi (prix Saint-Gobain 2013) et Mathieu Perrin-Terrin (prix Daniel Guinier 2013).

Bernard Maitte (Université de Lille 1) nous a exposé un magnifique panorama de l'histoire des théories de la lumière depuis l'an 1000, et de l'affrontement entre les deux conceptions, corpusculaire et ondulatoire, de la lumière. Jean-Yves Duboz (CRHEA Sophia Antipolis) a présenté les principes des diodes électroluminescentes, et les gains en énergie mais aussi les inconvénients environnementaux de l'usage des LEDs. Pascale Launois (LPS, Orsay) a retracé l'histoire de Rosalind Franklin et du cliché qui a révélé la structure de l'ADN, avec une démonstration sur ordinateur de l'obtention du diagramme de diffraction en croix de Saint-André d'une hélice. Enfin, Roland Lehoucq (CEA Saclay) a montré comment la Terre se situe entre deux sphères incandescentes, la surface du Soleil et le fond diffus cosmologique.



De gauche à droite : Alain Fontaine, Emmanuelle Gouillart (Prix Daniel Guinier 2008), Natalia del Fatti (ILM, Lyon), Anna Lombardi, Fabrice Vallée (directeur de l'Institut de physique du CNRS).

Résultats des élections

Votants : 494. Sont élus pour 3 ans :

Di Ciaccio Lucia (340 voix)
Cuisset Arnaud (297 voix)
Prost Jacques (281 voix)
Korichi Amel (278 voix)
Perez Éric (258 voix)
San Miguel Alfonso (258 voix)

Nouveau membre du Bureau : Michel Spiro, vice-président entrant



Michel Spiro (68 ans) obtient en 1976 un diplôme de doctorat d'État délivré par l'université d'Orsay suite à son travail au CEA/Saclay, qu'il intègre en 1970. Ses recherches en physique des particules le conduisent alors à participer à la découverte des bosons intermédiaires W et Z en 1983 (expérience UA1 au CERN). Il se dirige ensuite vers l'étude

des particules en provenance du cosmos en participant à l'expérience Gallex de détection des neutrinos solaires et, comme porte-parole, à l'expérience de recherche d'objets sombres (Eros).

Il a été président du comité scientifique des expériences auprès du LEP (Grand collisionneur électron-positon du CERN) de 1998 à 2001, avant de devenir en 2002, chef du Dapnia (département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et d'instrumentation associée) au CEA, puis directeur de l'IN2P3 (Institut national de physique nucléaire et de physique des particules) au CNRS. Il a été élu en janvier 2010 président du Conseil du CERN, la plus haute autorité de l'organisation, fonction qu'il a exercée jusqu'à fin 2012. Il est maintenant directeur de recherche émérite et conseiller scientifique au CEA.

Michel Spiro a enseigné en qualité de maître de conférences à l'École polytechnique, puis au DEA de physique théorique de Paris. Il a écrit plusieurs livres dont, récemment, *Le boson et le chapeau mexicain* avec Gilles Cohen-Tannoudji (Gallimard, Folio Essais, 2013) et *La physique des infinis* avec Francis Bernardeau, Étienne Klein et Sandrine Laplace (La ville brûle, 2013).

À la Société Française de Physique, il a été président de la division physique des champs et particules de 1984 à 1988, et a reçu le prix Félix Robin en 1999.

En tant que vice-président, ses priorités sont : œuvrer pour toujours plus d'assise et de visibilité de la SFP dans les laboratoires, les organismes de recherche et les établissements de l'enseignement supérieur, ainsi qu'auprès des ministères pour en être un interlocuteur reconnu ; développer la coordination avec les sociétés sœurs, notamment sur la valorisation du diplôme de docteur, sur l'emploi scientifique, sur l'organisation d'événements, sur la communication et sur des sujets sociétaux ; poursuivre et développer le couplage avec la formation, et donc avec les enseignants à tous les niveaux ; renforcer les liens et l'impact européens et internationaux de la SFP ; enfin, s'impliquer activement sur le suivi et le devenir de EDP Sciences.



Prix Holweck 2014 (conjoint IOP-SFP) : Ramin Golestanian

Ramin Golestanian est né en 1971 à Paris, de parents iraniens. Il a effectué ses études et le début de sa carrière académique en Iran, où il était professeur associé dans l'Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, à Zanjan. Il y a créé un groupe de recherche en matière molle, de niveau international. Il est venu en 2005 au Royaume-Uni à Sheffield, puis au département de physique de l'université d'Oxford où il est, depuis 2010, professeur de physique théorique de la matière condensée.

Le prix Holweck 2014 a été attribué à Ramin Golestanian pour ses contributions pionnières au développement de la recherche sur la matière molle active, plus particulièrement sur les nageurs microscopiques et les colloïdes actifs.

Ramin Golestanian est un chercheur exceptionnel. Ses premiers travaux ont porté sur la dynamique de condensation des contre-ions dans les polymères chargés : c'était un travail pionnier sur un domaine proche de la physique de l'ADN. Ses études de thèse sur les aspects fondamentaux de la force de Casimir ont contribué à réouvrir ce champ de recherche.

Depuis son arrivée au Royaume-Uni, les recherches de Ramin Golestanian se sont concentrées sur la mobilité de particules colloïdales dans des liquides de faible nombre de Reynolds. Ses travaux sur les micronageurs ont commencé avec l'introduction d'un modèle simple, constitué de trois sphères alignées connectées par deux tiges rigides, qui se contractent et se dilatent alternativement en longueur. Puis, il a développé la notion de propulsion stochastique pour des nageurs moléculaires, et a étudié le concept de cohérence entre nageurs stochastiques couplés par des interactions hydrodynamiques. Il a en outre proposé plusieurs idées théoriques pour

construire expérimentalement un nageur de ce type et, avec un groupe d'expérimentateurs, a été l'un des premiers à réaliser en laboratoire de tels nageurs, et à étudier leurs propriétés.

Avec ses contributions majeures à l'étude des phénomènes électromoteurs, des micronageurs, de la synchronisation hydrodynamique, de l'ADN, R. Golestanian a montré qu'il est un des principaux théoriciens en matière molle et en biophysique. Bien que ses travaux soient exceptionnels, ils n'ont été reconnus que tardivement, principalement pour des raisons politiques. Le prix Holweck traduit la reconnaissance de son activité de recherche de première importance.



Prix Gentner-Kastler 2014 (conjoint DFG-SFP) : François Biraben

François Biraben a 65 ans. Ancien élève de l'École normale supérieure, docteur d'État en 1977, il a effectué toute sa carrière au Laboratoire Kastler Brossel (ENS, CNRS, UPMC). Il y est directeur de recherche CNRS depuis 1985. Lauréat de plusieurs prix, il a reçu la médaille d'argent du CNRS en 1996.

François Biraben a apporté des contributions très importantes et novatrices à la spectroscopie de précision des transitions atomiques et aux mesures des constantes fondamentales, depuis la constante de Rydberg jusqu'au rayon du proton.

Dans les années 1970, il a participé à la mise en évidence de la suppression de l'effet Doppler dans les transitions atomiques à deux photons, étude pour laquelle il a développé un laser original en anneau monomode accordable.

Puis en 1983, il crée son propre groupe, spécialisé dans la métrologie des constantes fondamentales. Ses mesures de fréquence, réalisées dans l'atome d'hydrogène, ont permis de déterminer la constante de Rydberg avec une précision de plus en plus

grande – jusqu'à 10^{-12} . L'équipe de F. Biraben a aussi contribué de manière décisive à une collaboration internationale pour mesurer le déplacement de Lamb de l'hydrogène muonique. Ce résultat a conduit à une détermination du rayon de la distribution de charge du proton, beaucoup plus précise mais différente de la valeur admise jusque-là. Ce désaccord est appelé le "proton puzzle".

En 1999, François Biraben a proposé de déterminer la constante de structure fine α , à partir de la mesure de l'effet de recul d'un atome de rubidium ultra-froid lorsqu'il absorbe ou émet des photons, combinée à des techniques d'interférométrie atomique. La précision obtenue sur α atteint $0,66 \cdot 10^9$. La comparaison de ce résultat avec la

valeur expérimentale de l'anomalie du rapport gyromagnétique de l'électron fournit le meilleur test actuel de l'électrodynamique quantique.

L'ensemble des mesures réalisées par l'équipe de François Biraben contribue de façon substantielle à l'ajustement international des constantes fondamentales fait par le CODATA.

François Biraben a une compréhension profonde de la physique fondamentale. C'est un expérimentateur exceptionnel. Ses très beaux résultats, obtenus en proposant des solutions techniques simples, élégantes et astucieuses, et leur impact sur l'électrodynamique quantique, ont été reconnus par l'attribution du prix Gentner-Kastler.

La SFP, partenaire de ENOVA PARIS

16, 17 et 18 septembre 2014, Paris expo Porte de Versailles, Hall 7.2

ENOVA PARIS, le salon des technologies en électronique, mesure, vision et optique, a accueilli 460 exposants dont 112 nouveaux, et ce dans un contexte économique difficile. 4881 visiteurs professionnels, porteurs de projets et de perspectives concrètes d'affaires, sont venus à la rencontre des exposants. 92% des visiteurs se sont déclarés satisfaits de leur visite.

En organisant trois séries de conférences aux programmes attrayants, introduites par Marc Stehle, membre du bureau de la SFP, ainsi que la remise de son prix Yves Rocard 2014, la Société Française de Physique a atteint son objectif : être visible des acteurs de la recherche publique et privée, des exposants, du monde industriel et d'un public averti venu découvrir les nouveautés technologiques et l'instrumentation de pointe.

Les conférences

Nanomatériaux et santé, mardi 16 septembre, 14 h – 17 h.

Après-midi de conférences, organisée avec le soutien de la Fondation Nanosciences.

Nanomatériaux en forme d'origami, nouveaux vecteurs à base de nanomatériaux de carbone, détection mécanique de cellules vivantes, électronique de matériaux organiques pour des applications en nanosciences, prothèse de la rétine après dégénérescence des photorécepteurs : cinq conférences présentant des avancées récentes en nanomédecine.

Métiers de la physique, les Olympiades, mercredi 17 septembre, 14 h – 16 h.

Pierre Chavel, président du Comité national des Olympiades de Physique – France, a conduit les débats de cette table ronde, en une période où il est essentiel d'encourager les vocations scientifiques chez les jeunes.

Cristallographie : les cristaux et leur fonctionnalité, jeudi 18 septembre, 9 h – 16 h.

2014 étant l'Année internationale de la cristallographie, la SFP et la SFO (Société Française d'Optique) ont organisé ensemble cette journée scientifique.

Après une présentation de « la cristallographie, science moderne, racines antiques » par B. Capelle (Université Paris 6), les trois conférences du matin étaient consacrées aux cristaux pour l'optique. Celles de l'après-midi portaient sur les avancées de l'instrumentation pour la cristallographie, et sur les apports de cette science à l'étude des matériaux d'intérêt industriel et des matériaux du patrimoine.

Prix Yves Rocard 2014 de la SFP

Le prix Yves Rocard 2014 a été remis le mercredi 17 septembre 2014, lors du salon ENOVA, par Alain Fontaine, président de la SFP. Les lauréats, Olivier Schneegans (chercheur au LGEP), Frédéric Houzé (chercheur au LGEP), Pascal Chrétien (ingénieur au LGEP) et Didier Pellerin (dirigeant de la société ScienTec), sont récompensés pour leur développement du projet Résiscope, fruit d'une collaboration entre le Laboratoire de génie électrique de Paris (LGEP), la société ScienTec et sa filiale de fabrication d'instruments scientifiques CSI.



De gauche à droite : Marc Stehle (SFP), Francis Rocard (CNES, petit-fils d'Yves Rocard), Michel de Labacherie (INSIS, CNRS), Yves Farge (président du jury), Christian Chardonnet, Louis Pacheco (société CSI), Didier Pellerin, Frédéric Houzé, Pascal Chrétien et Alain Fontaine.

Le « Résiscope » est issu des travaux de l'équipe « Contacts électriques » du LGEP un transfert de technologie a été réalisé avec (CNRS/Supélec, Gif-sur-Yvette). Associé à la société ScienTec (91 Les Ulis). Son dirigeant, D. Pellerin, a alors créé la société CSI (Concept Scienti c Instruments), pour assurer la R&D et la commercialisation du résiscope. La société AGILENT assure depuis 2011 sa commercialisation à l'international. Une trentaine d'appareils ont été vendus depuis sa mise sur le marché.

En 2014, la société CSI introduit un nouveau mode, le « Soft-Résiscope », qui est basé sur un contact intermittent. L'absence de friction et le contact ponctuel à force constante de la pointe sur l'échantillon permettent d'obtenir des mesures quantitatives, sans abîmer la surface d'échantillons délicats, tels que des polymères conducteurs ou des matériaux organiques.

Les publications en physique combien, par qui et où ?

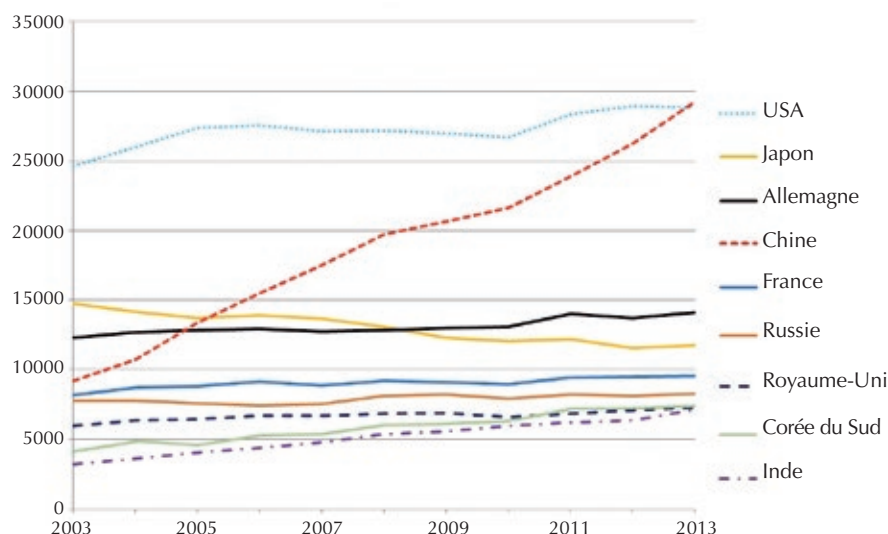
L'évolution rapide du paysage des publications scientifiques fait surgir beaucoup de questions et de discussions dans nos communautés. C'est une bonne chose, car cela nous concerne plus que jamais. Dans une démarche commune, l'Institut de Physique (INP) du CNRS et la Société Française de Physique (SFP) contribuent à ce débat en proposant des outils aux chercheurs, et en organisant des sessions d'informations (voir, par exemple, [1]).

Afin d'ancrer la discussion sur des bases plus solides, nous présentons ici une étude statistique sur les publications scientifiques dans le domaine de la physique en France, en particulier celles du CNRS. Les chiffres sont extraits directement de l'analyse du *Web of Science* ou de l'outil Zento du CNRS, qui recense la production scientifique par extraction de la base de données ISI *Web of Science* [<http://wokinfo.com/>] sur mot-clé prédéfini. Cette base de données est sans doute tronquée (comme toutes les bases de données), mais dans le domaine de la physique elle comporte 3500 revues, pour la plupart des journaux réguliers, et peu d'actes de colloque. Dans cet article, la « physique » correspond aux domaines de recherche tels que définis sur le *Web of Science*.

En 2013, un peu moins de 10 000 articles de « physique » étaient publiés en France. Si nous nous intéressons aux données concernant toutes les unités affiliées au CNRS (UMR, UPR, UMS, UMI...), on repère ainsi environ 81 % de toute la

production scientifique de la France en physique. Les 19 % restants concernent les articles signés par des unités sans mixité avec le CNRS, par d'autres EPST, EPIC (CEA, CNES, Onera...) ou des entreprises. On a constaté d'ailleurs que presque 16% des auteurs français en physique renseignent leur affiliation de façon incorrecte et ne sont pas repérés par le mot clé « CNRS ». Sans doute la multiplication des tutelles incite les coauteurs à tronquer les signatures, mais une fraction non négligeable des physiciens-auteurs des unités du CNRS ne mentionnent même pas le nom de leur cotutelle, voire de leur propre employeur.

Au niveau mondial, et toutes thématiques confondues, presque 1,6 million d'articles paraissent par an. Plus de 130 000 articles de physique, soit 8,6 % de l'ensemble, étaient publiés en 2013 dans le monde, un chiffre qui a augmenté d'un tiers depuis 2003. Presque 7500 articles en physique par an sont cosignés par une unité CNRS, soit 5,8 % de l'ensemble mondial en physique, ou 15 % de la production totale du CNRS, estimée à 50 000 par an. Au cours de la



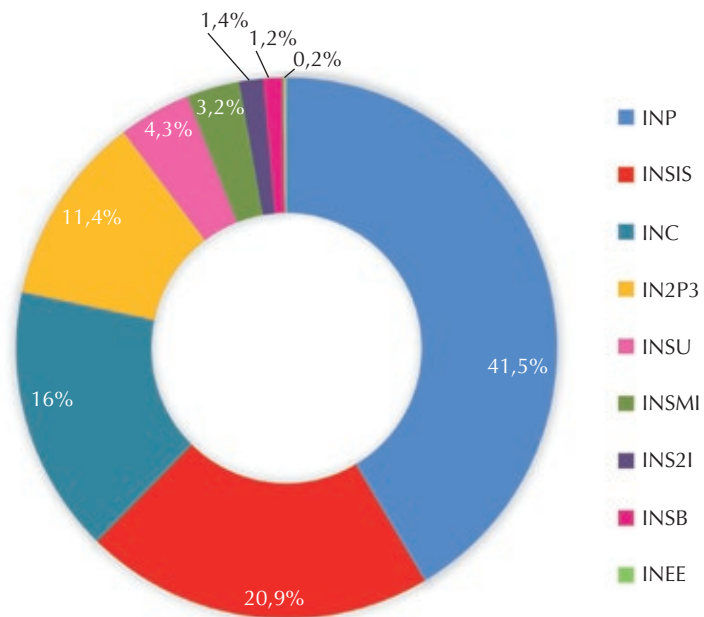
1. Évolution du nombre des publications en physique par pays pendant 10 ans. Entre 2003 et 2013, le nombre total est passé de 102 000 à 137 000. (Données *Web of Science*)

dernière décennie, le poids relatif des pays publieurs s'est modifié, comme le montre la figure 1, avec une forte croissance des publications venant de la Chine.

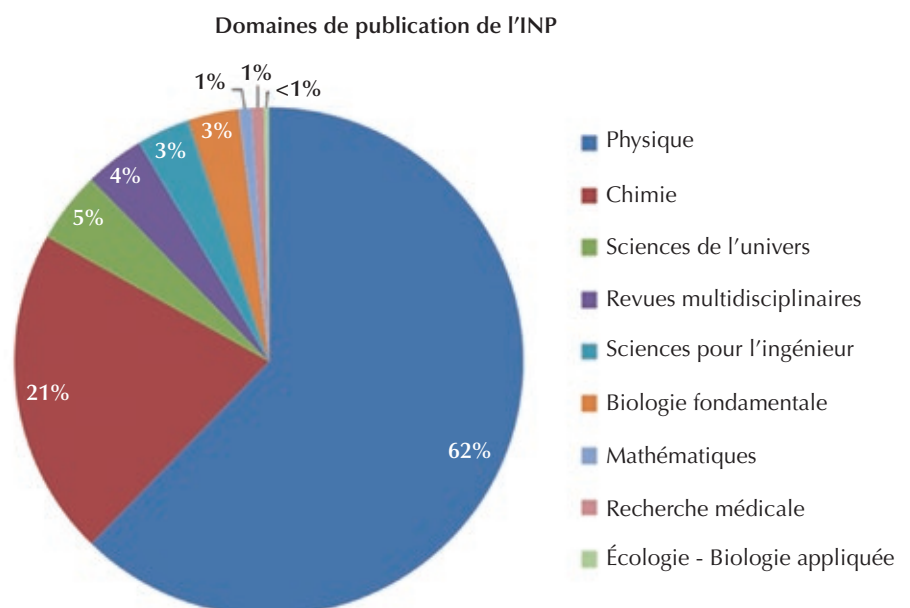
Si nous considérons « toute la physique au CNRS », ceci comporte *a priori* la production des instituts INP et IN2P3 dans leur totalité, et une partie significative des publications des instituts INSIS et INSU. Par ailleurs, des publications peuvent être cosignées par des auteurs de différents instituts. Dans le cas d'auteurs de deux instituts différents, la publication compte, dans notre analyse, 0,5 pour chaque institut. Ce calcul « fractionné » est généralement utilisé pour pondérer les contributions collaboratives. De ce calcul résulte la structure fine de la répartition des publications, visible sur la figure 2. L'ensemble des instituts du CNRS (exception faite des sciences humaines et sociales) publie des articles en relation avec la physique. Si on compte directement les signataires d'un article, alors 50 % de toutes les publications en physique au CNRS sont signées par au moins un auteur de l'INP.

On peut par ailleurs observer (fig. 3) que presque deux tiers de la production scientifique de l'Institut de Physique du CNRS concerne vraiment « la physique » – définie dans le sens des domaines de recherche du *Web of Science*. Les figures 2 et 3 montrent que le périmètre de l'INP couvre une large palette de thématiques et que la physique est une activité intrinsèquement interdisciplinaire. Il y a une vraie synergie qui existe aux interfaces de la physique, et en particulier avec la chimie.

Au sein de la physique, on peut remarquer que la production scientifique mondiale est dominée en nombre d'articles par trois grandes thématiques : la physique appliquée, la physique de la matière condensée et la physique des matériaux. Cette répartition peut être retrouvée dans la distribution des principaux journaux dans lesquels les articles de l'INP apparaissent, avec *Physical Review B* (matière condensée) largement



2. Répartition des publications en physique par institut du CNRS. Pour les publications signées par plusieurs (n) instituts, chaque institut obtient sa part fractionnée (1/n). (Données 2011-2012.)



3. Répartition des catégories du *Web of Science* dans les publications de l'Institut de Physique du CNRS (un article peut se retrouver dans plusieurs catégories). (Données Zento 2013, utilisation de l'indexation OST, www.obs-ost.fr)

en tête du classement. La figure 4 illustre (en rouge) le poids des articles écrits par des auteurs affiliés à l'INP sur la totalité des articles d'une revue. Les barres d'erreur de ce type de statistique sont évidemment grandes pour des journaux de petit volume. Il est remarquable de constater que 7% de toutes les publications dans les journaux de type « lettre blanche » (toutes thématiques confondues), comme *Physical Review Letters (PRL)* et *EPL*, sont signées ou cosignées par un auteur de l'Institut de Physique du CNRS !

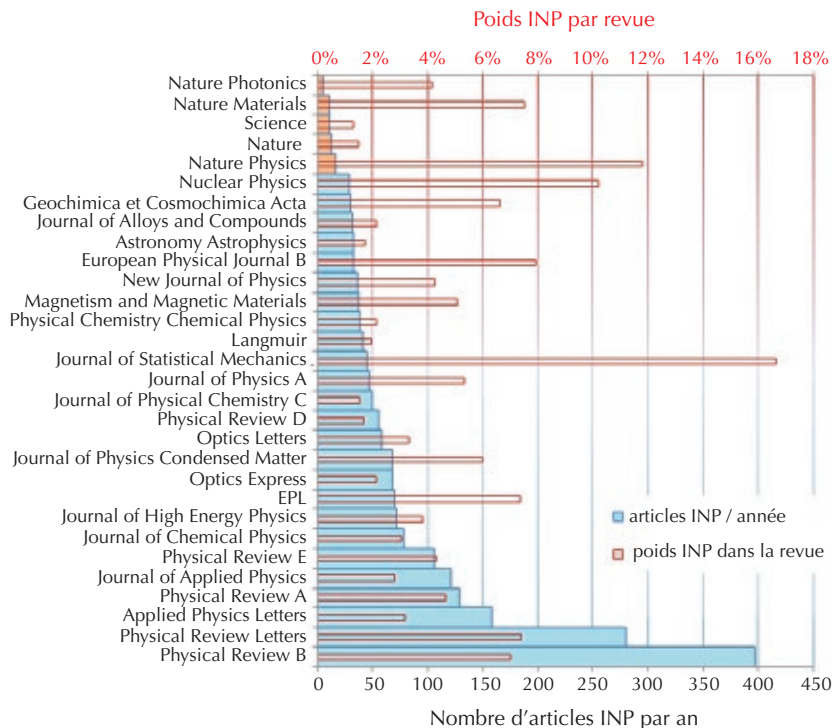
Concluons sur le facteur d'impact (IF). Il est bien connu que le calcul d'un IF n'a de sens que pour l'ensemble des articles d'un journal, et que cette moyenne ne reflète jamais la qualité d'un article individuel [2]. Il va sans dire que, pour juger cette dernière, il n'y a pas de solution de calcul : il faut lire l'article ! Plus de 80 % des journaux qui publient les articles de l'INP ont un IF < 4, avec une valeur moyenne d'environ 2,8 ; un deuxième petit pic dans cette distribution peut être retrouvé autour de l'IF de *Physical Review Letters* (fig. 5). Le calcul de l'IF est malheureusement devenu un argument de « vente », qui s'appuie sur une valeur moyennée sur une variété d'articles et de communautés trop différentes [2]. Même les grands journaux multidisciplinaires (tels que *Nature* ou *Science*) publient des articles à zéro citation !

Le graphique de la figure 5 montre bien que les publications de l'INP sont distribuées dans une large gamme de journaux de différents facteurs d'impact. La très grande majorité (> 80%) des articles sera citée au moins une fois au cours des cinq ans suivant leur parution, ce qui est très rassurant dans un domaine où certaines publications ne deviennent intéressantes qu'après plusieurs décennies. ■

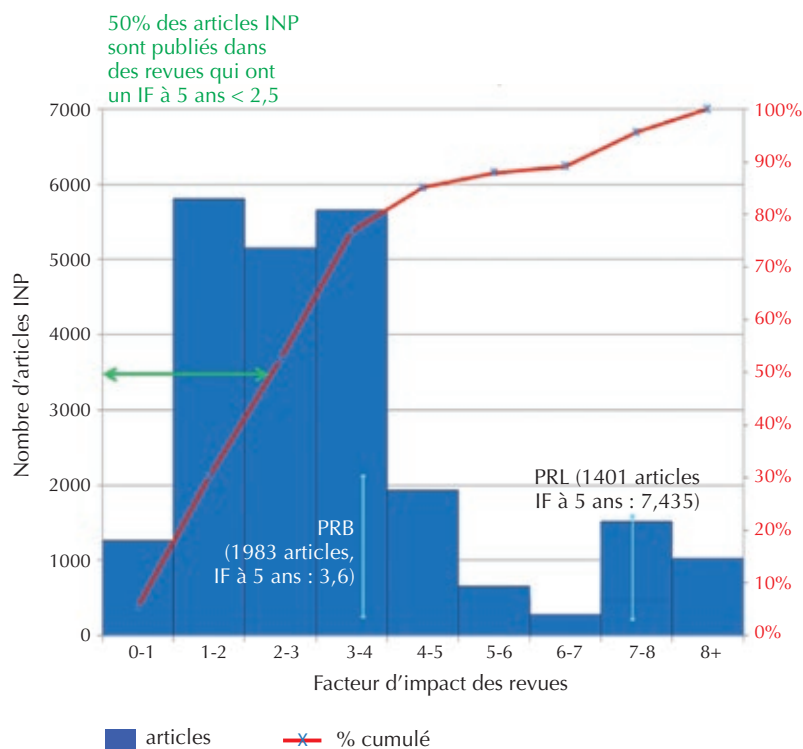
Martina Knoop (martina.knoop@univ-amu.fr),
Lorenzo Brighigni et **Bart van Tiggelen**
 Institut de Physique du CNRS

Références

1. A. Henry et al., « Réflexions sur la "Voie dorée" des publications scientifiques », *Reflète de la physique* **30** (2012) 28-30.
2. « La SFP et l'INP du CNRS sensibilisent les physiciens à l'utilisation abusive des facteurs d'impact », *Reflète de la physique* **32** (2013) 46.

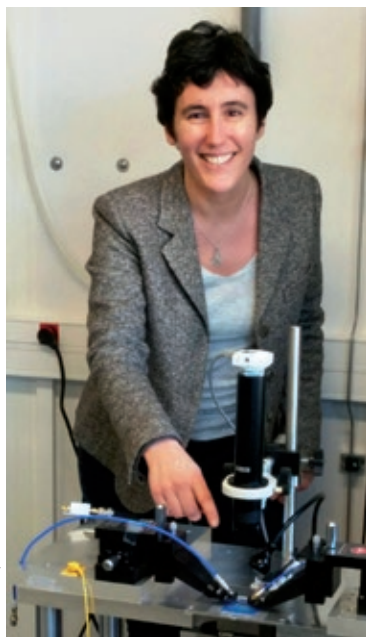


4. Nombre moyen annuel (entre 2007 et 2011) de publications signées par une unité rattachée à l'INP pour les 25 revues de physique dans lesquelles l'INP publie le plus (en bleu) et pour 5 revues « prestige » multidisciplinaires (en orange), et poids relatif (en rouge). (Données *Web of Science* 2007-2011.)



5. Nombre de publications de l'Institut de Physique du CNRS, en fonction du facteur d'impact de la revue. Ces chiffres sont cumulés sur 5 ans (2007-2011). La figure montre que 50% des articles sont publiés dans des revues avec un facteur d'impact (IF) à 5 ans inférieur à 2,5.

Julie Grollier, cerveau (spin)tronique



© Steven Lequeux - Unité mixte de recherche CNRS/Thales

Spécialiste de l'électronique de spin, cette touche-à-tout insatiable se passionne pour le fonctionnement du cerveau et vient de prendre la direction d'un groupement de recherche (GdR) du CNRS sur les puces bio-inspirées.

« Ce qui me plaît, c'est me servir de la physique que j'aime pour fabriquer des choses. » Ainsi se résume Julie Grollier, chargée de recherches au CNRS, dont la voix à la fois posée et enthousiaste témoigne de la détermination. Celle d'une ancienne élève de l'École supérieure d'électricité qui a découvert la physique par hasard lors d'un stage de recherche au Laboratoire de cristallographie et science des matériaux (CRISMAT), à Caen. « Ça a été la révélation, confie-t-elle. La découverte que la recherche est un espace de liberté et de stimulation intellectuelle sans pareil. »

D'où son intégration à l'École normale supérieure de Cachan en troisième année, suivie d'un master en sciences des matériaux, puis d'un doctorat sous la direction d'Albert Fert. Spécialité ? La spintronique, ou comment utiliser, plutôt que leur charge, la minuscule boussole (le *spin*) portée par les électrons pour stocker, transmettre ou traiter de l'information.

Précisément, Julie Grollier est alors l'une des premières à mettre en évidence l'effet dit de transfert de *spin* [1], ouvrant la possibilité de manipuler le *spin* électronique à l'aide d'un simple courant électrique. De quoi envisager à terme des mémoires non volatiles et très rapides à écrire. « Ce travail m'a beaucoup plu, car il m'a permis de pratiquer aussi bien la salle blanche que la théorie, en passant par des mesures fines de transport électrique », ajoute la physicienne qui revendique un profil éclectique.

Ce travail de thèse a ouvert de nouveaux horizons à cette insatiable curieuse, recrutée en 2005 par le CNRS à l'unité mixte de recherche CNRS/Thales. D'une part, le développement du transfert de *spin* dans le domaine hyperfréquence, avec en ligne de mire de possibles applications en télécommunications. D'autre part, sa nouvelle marotte : les puces électroniques dites bio-inspirées, capables de reproduire le fonctionnement du cerveau, avec à la clé : vitesse intrinsèque, tolérance aux défauts et faible consommation énergétique. « Un cerveau consomme 10 000 fois moins d'énergie qu'un superordinateur et est imbattable pour des tâches d'interprétation, de synthèse ou de classification », s'enthousiasme Julie Grollier.

Elle raconte : « En 2009, j'ai découvert les travaux de Hewlett-Packard sur les memristors, de minuscules résistances variables à effet mémoire capables de mimer le fonctionnement des synapses. » Ainsi, grâce à une bourse de l'ERC, elle se lance dans la mise au point de memristors bénéficiant des apports de la spintronique, plus rapides et également plus robustes que les memristors classiques. « Nous avons apporté la preuve du concept sur un memristor unique, et plusieurs brevets ont été déposés. »

Empruntant aux neurosciences, à l'informatique, aux mathématiques ou encore à l'électronique ou à la science des matériaux, la suite est affaire d'interdisciplinarité. Ce qui n'est en rien pour effrayer la jeune chercheuse, désormais à la tête du GdR BioComp (« Implémentations matérielles du calcul naturel »), regroupant 52 équipes de 34 laboratoires de cinq instituts du CNRS ! « On est à un moment de convergence très intéressant, et nos discussions visent à déterminer les meilleures voies possibles », complète la physicienne.

Julie Grollier participe à l'ANR MHANN, dont l'objectif est de fabriquer des réseaux de neurones artificiels avec des memristors ferroélectriques et des composants CMOS. À plus long terme, elle réfléchit également à des solutions à l'échelle nanométrique grâce aux potentialités du transfert de *spin*. « La spintronique est probablement une approche très prometteuse pour les puces bio-inspirées », juge-t-elle. La chercheuse est plus déterminée que jamais à utiliser ses talents pour fabriquer des « choses » ! ■

Mathieu Grousseau,
journaliste

[1] B. Dieny, *Reflète de la physique* 16 (2009) 6-11.

Web

Site de l'unité mixte de recherche CNRS/Thales
www.trt.thalesgroup.com/ump-cnrs-thales

Site de Julie Grollier
<http://julie.grollier.free.fr/publications.htm>

Julie Grollier, lauréate ERC 2011
www.cnrs.fr/inp/spip.php?article378



« Ils ont perdu la raison »

Nucléaire, gaz de schiste, pesticides, OGM, santé, diesel...
Pourquoi les gouvernants prennent les mauvaises décisions.

Jean de Kervasdoué (Robert Laffont, 2014, 240 p., 19,50 €)

Le dernier livre de Jean de Kervasdoué, « Ils ont perdu la raison », devrait être sur les tables de tous ceux qui pensent que la rationalité et la démarche scientifique doivent éclairer les choix politiques, sans pour autant prétendre à une suprématie dans l'acte de décision lui-même.

Enchaînant, chapitre après chapitre, une analyse très solidement argumentée et très pédagogique sur des sujets aussi agités que les particules diesels, le nucléaire, les pesticides, les OGM, en décortiquant les conséquences scientifiques et économiques de la démission face à des craintes souvent infondées et toujours complaisamment entretenues par les médias avides de peurs lucratives, en rappelant les vertus de la méthode scientifique pour pacifier une discussion en la soumettant au verdict de l'expérience, Jean de Kervasdoué fait œuvre de salubrité publique. On sent chez lui l'indignation d'un militant de la gauche républicaine qui voit son propre camp se détourner de la conviction de la valeur objective du progrès. Il nous rappelle que la droite a aussi déserté ce camp, mais il faudrait être bien aveugle pour s'en réjouir ! La « démocratie d'opinion », les « sciences citoyennes » apparaissent très clairement pour ce qu'elles sont, une machine à entretenir ou amplifier les peurs collectives, préparant un retour en force du sophisme et de la déraison, masqués par un relativisme qui fait très bien dans les dîners en ville. Cette évidence inquiétante, il faut avoir le courage de la dénoncer sans jésuitisme. Il faudra d'autres armes que l'accusation éliminée jusqu'à la corde de « scientisme » pour faire taire Jean de Kervasdoué : il y a du Tubiana dans cet homme-là !

Il n'y a pas grand doute à avoir sur l'accueil que ce livre recevra dans les milieux militants, mais on attend encore l'ouvrage qui se placerait comme celui-ci sur le plan des arguments et des faits scientifiques pour le réfuter. Il ne vient et ne viendra probablement pas, et cela pour la seule raison que l'arme des sophistes est la rhétorique, que la rhétorique n'a rien à répondre à la science, et que la science ne peut combattre la rhétorique. On peut, toutefois, espérer que cette voix courageuse réveille au moins les scientifiques.

À la fin de l'empire romain, Symmaque prit la défense de la tolérance païenne face au fanatisme des premiers chrétiens qui affirmaient l'unicité de la vérité révélée, et son caractère exclusif. Ceux qui devraient se revendiquer comme les héritiers de l'esprit des Lumières, en écoutant avec indifférence, quand ce n'est pas avec complaisance, ceux qui veulent interdire d'explorer, de découvrir, de réfléchir, d'agir, au nom d'une vision quasi mystique de la nature, ne sont pas sans rapport avec ces anciens Romains qui ne réalisèrent leur malheur que quand les barbares eurent saccagé Rome. Jean de Kervasdoué est un Symmaque moderne, qui nous rappelle notre devoir de vigilance intellectuelle envers nos concitoyens.

Yves Bréchet
Professeur à Grenoble INP



« Problèmes généraux de physique », avec rappels de cours, corrigés et formulaire de mathématiques

Gianni Pascoli (Éditions Ellipses, collection Références sciences, 2014, 648 p., 44 €)

L'auteur recommande son livre pour la licence, le CAPES et l'agrégation. En fait, on peut aussi le considérer comme un manuel de physique qui pourra être utile aux enseignants, aux chercheurs et plus généralement à tous ceux qui veulent mettre à jour leurs connaissances en physique en y consacrant un temps modéré.

Les 648 pages de ce livre (dont la typographie est modérément dense) couvrent l'essentiel de ce qu'il faut savoir sur : la mécanique des solides ; l'élasticité ; la mécanique des fluides ; l'électromagnétisme ; la mécanique quantique ; la physique statistique ; la relativité restreinte et générale. Chaque chapitre débute par un « rappel de cours » qui résume quelques notions fondamentales, et continue par l'énoncé de problèmes dont la plupart sont en fait des applications essentielles des principes ; on pourrait presque dire *les* applications essentielles des principes. Le lecteur paresseux ou pressé pourra lire l'énoncé et passer directement à la solution.

Il y a en tout 85 « problèmes ». Donnons quelques exemples : mouvement d'une toupie ; vibration d'une barre encastrée ; mouvement d'une planète autour du soleil ; effet Magnus ; solitons et tsunamis ; ondes de choc ;



« Hippolyte Fizeau, physicien de la lumière »

James Lequeux (EDP Sciences, collection Sciences et Histoire, 2014, 150 p., 19 €)

Pour ce livre de 150 pages, comportant trois appendices et une bibliographie, James Lequeux a utilisé de nombreuses sources autographes trouvées en particulier dans le fond Fizeau de l'Académie des sciences, et son récit demeure très proche des textes originaux, dont il a extrait de nombreux dessins.

On se trouve ainsi rapidement plongés dans un univers passionnant de recherches sur les sources et les dispositifs optiques, dispersifs ou interférentiels, destinés à étudier les propriétés de la lumière, celle des astres et d'abord du Soleil, sa vitesse et sa nature, le diamètre apparent des étoiles enfin.

L'effet Doppler-Fizeau, avec les premières observations de cet effet pour les ondes sonores grâce aux trains vers 1845, est mesuré avec une « roue sonore » par Fizeau, et étendu par celui-ci à tout phénomène ondulatoire. L'expérience qui a rendu Fizeau célèbre : la première mesure directe de la vitesse de la lumière en laboratoire par la méthode de la roue dentée en 1849 – il a alors trente ans – est racontée en détail, avec croquis et illustrations. La comparaison de cette vitesse dans l'air et dans l'eau permet enfin à Fizeau et Foucault, sur une idée d'Arago, de montrer dans un même dispositif que la lumière est plus rapide dans l'air et de réfuter ainsi le modèle de Newton, imposant la théorie ondulatoire de Huygens-Fresnel.

J. Lequeux, qui a publié un gros livre sur François Arago, connaît bien les antécédents des expériences conduites par Fizeau. Après avoir testé le modèle newtonien pour la lumière venant de différentes étoiles, Arago avait en effet été convaincu par l'hypothèse ondulatoire de Fresnel ; il avait eu alors l'idée de comparer la lumière reçue d'une étoile à six mois d'intervalle, pour mettre en évidence cette fois le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, sans lequel on ne pouvait expliquer l'« aberration » stellaire. Le résultat était nul ! Fresnel s'était alors lancé dans les hypothèses compliquées d'« entraînement de l'éther » par la Terre. Vers 1850, Arago fait appel à Fizeau pour reprendre ces expériences dans de meilleures conditions, ce que celui-ci fait courageusement, refait jusqu'en 1884, relayé en 1887 par le dispositif plus connu de Michelson et Morley, pour un même résultat négatif.

J. Lequeux poursuit, pour chaque thème, son exposé par celui d'expériences ultérieures, jusqu'au 20^e siècle. Le livre se termine sur un court récit de la vie du savant, discrète et un peu sombre, dominée par un travail passionné, académicien à partir de 1860, jusqu'à sa mort en 1896.

Ce livre n'est pas facile, mais les détails ardu reflètent la rigueur scientifique de Fizeau et de ses contemporains, ainsi que celle de l'auteur. En raison de cette difficulté, il y a trop peu de littérature sur ce savant dont les physiciens ne connaissent généralement que le nom, associé en second plan à ceux de Foucault et de Doppler. Appréciations donc d'avoir maintenant une véritable biographie scientifique de Fizeau, laquelle répond à des questions que toute personne s'intéressant à la nature de la lumière se pose à un moment ou à un autre, sans trouver de réponses assez précises dans l'historiographie courante.

Christiane Vilain

Laboratoire SPHERE, Université Paris 7

diffusion de la lumière, couleur du ciel et diffraction de Bragg ; corps noir, émission stimulée, laser et holographie ; guides d'ondes ; atomes d'hydrogène ; bandes électroniques ; règle d'or de Fermi ; effet Aharonov-Bohm ; inégalité de Bell ; paramagnétisme de Pauli ; phonons ; corps noir ; viscosité d'un gaz ; plasma et équation de Vlasov ; déviation gravitationnelle de la lumière ; ondes gravitationnelles. Un vaste périple à travers la physique, qui ne laisse guère de côté que la physique des particules et la physique nucléaire (sauf une brève allusion à la radioactivité alpha). Le lecteur trouvera ainsi dans un seul livre beaucoup des informations qu'il pourrait chercher dans les volumineux cours de physique de Landau et Lifshitz ou de Feynman ; ces informations sont mises à jour, faciles à trouver et clairement exposées. La table des matières est succincte, mais l'index permet de retrouver rapidement ce qu'on cherche.

La bibliographie est détaillée, mais comporte une lacune : le livre sur la gravitation et la relativité générale, que l'auteur publia jadis dans la collection *Que sais-je*, n'est pas mentionné. Il est pourtant très bon.

Jacques Villain
Académie des sciences

XXIII^e CONGRÈS GÉNÉRAL de la Société Française de Physique

Strasbourg
24-28 août 2015

Président du congrès : **Daniel Estève**
Président du comité d'organisation : **Pierre Gilliot**



Conférenciers invités

Albert Fert – *prix Nobel de physique 2007*

Stefan Hell – *prix Nobel de chimie 2014*

Thomas Ebbsen – *prix spécial SFP 2014*

Sydney Gales – *prix Robin SFP 2014*

Tilman Pfau – *prix Gentner Kastler SFP-DPG 2014*

Guillaume Unal – *prix Ricard SFP 2014*

Jean-Yves Bigot

Françoise Brochard

Hervé Cailleau

Brigitte Cros

Jean Dalibard

John Dudley

Wlodek Kofman

Michèle Leduc

Ludwig Leibler

Kirone Mallick

Tristan Meunier

Pascale Senellart

Pierre Vanhove

Isabelle Wingerter



Programme
et inscription



www.sfp2015.fr