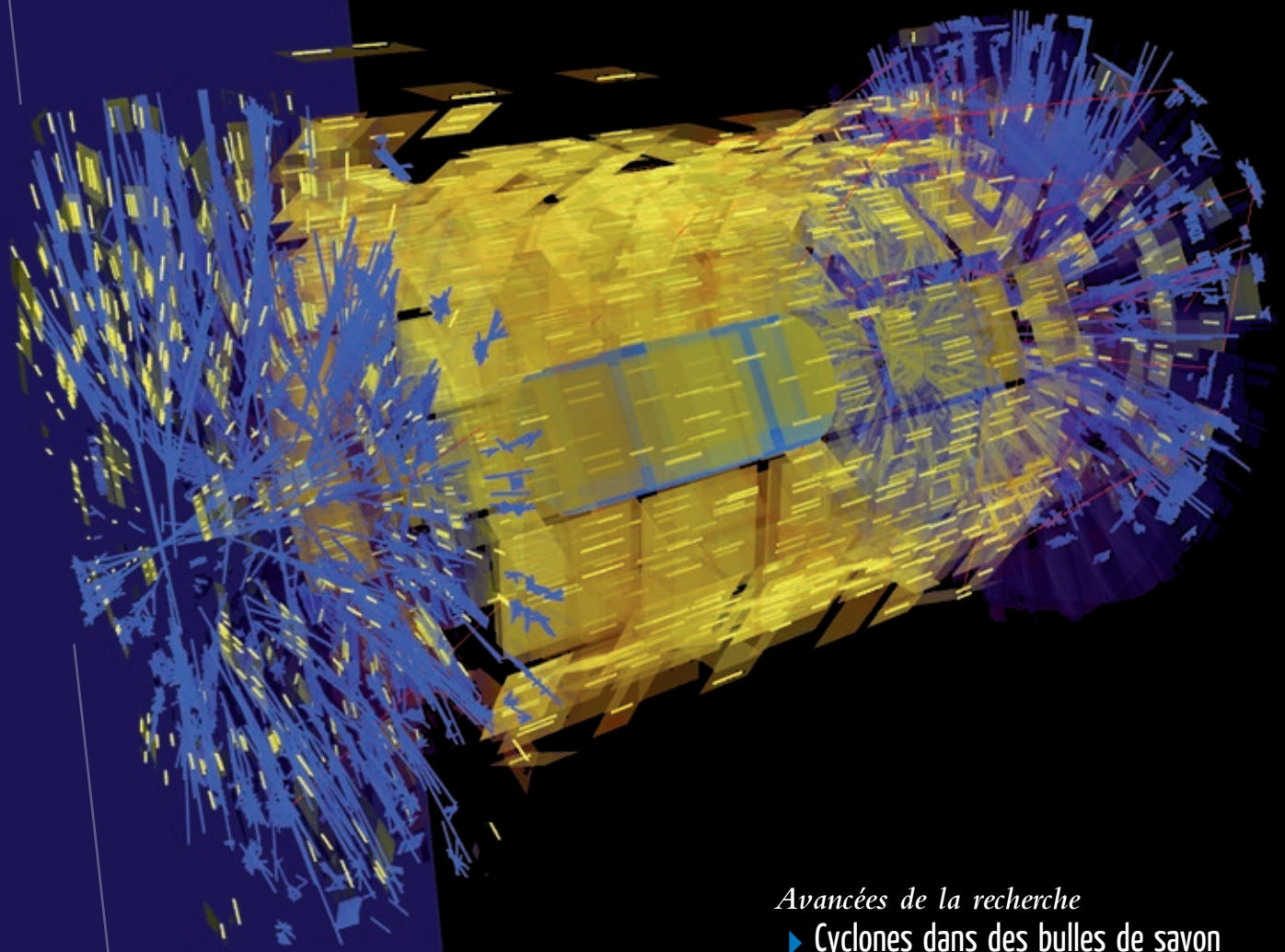
de la PHYSIQUE reflets

n° 46
octobre-novembre 2015

www.refletsdelaphysique.fr Revue de la Société Française de Physique

Derniers résultats sur le boson de Higgs



Avancées de la recherche

- Cyclones dans des bulles de savon
- Sursauts X des étoiles à neutrons

Science et société

- Enseigner la physique à l'université

n° 46 - octobre-novembre 2015 - 10 € - 5 numéros par an

www.sfpnet.fr

Article disponible sur le site http://www.refletsdelaphysique.fr

Publication, évaluation : sortons du diktat du facteur d'impact !

Publier est une étape incontournable de la production des connaissances et du métier de physicien. La communauté scientifique et l'édition scientifique partagent l'exigence de qualité de cette construction des connaissances, organisée autour de la vérification et de la validation par les pairs. Malheureusement, certains pans de la vie de l'édition scientifique ne procèdent pas seulement de cette convergence. Les nouvelles composantes marchandes de cette chaîne d'activité rongent, dissolvent, d'une façon presque indolore les valeurs de l'éthique scientifique, et ouvrent des fenêtres à la fraude.

Dans le numéro 43 de *Reflets de la physique*, l'article de M. Knoop *et al.* présente une analyse des publications de l'Institut de physique du CNRS. Sur cinq ans (2007-2011), seuls 10 % des articles publiés ont un facteur d'impact supérieur à 7. Les cinq revues « prestigieuses » multidisciplinaires cumulées contribuent à 2,5 % seulement du total. Cette frange de l'édition, et pas uniquement elle, réunit la présentation d'excellents résultats qui construisent leur prestige mais aussi, trop fréquemment, introduisent des pratiques aux antipodes de l'éthique scientifique. Ces dérives ne peuvent pas être ignorées par notre communauté. À terme, l'érosion des valeurs de la démarche scientifique au sein de l'édition serait un désastre irréversible pour l'ensemble de la recherche.

Physiciens, créateurs de connaissances scientifiques(1), formateurs de docteurs, mais également pairs en charge d'évaluation, membres de jurys de recrutement ou de prix, nous devons refuser le diktat du facteur d'impact qui érode l'excellence, plus exigeante, plus subtile à concevoir.

- **La machine.** Quelques éditeurs, pas uniquement ceux producteurs de journaux à haut facteur d'impact, animés principalement par leur démarche marchande, hyperrentable actuellement, deviennent les maîtres quasi exclusifs de la machinerie, profitant d'un rapport de force pour imposer des règles nouvelles au publiant et des abonnements en bouquet au lecteur et ses bibliothèques. Ces « lois » sont incompatibles avec le développement et la propriété des biens culturels et scientifiques, biens communs forgés pour leur majeure partie par les contribuables de tous les pays(2).
- **Le carburant.** Il alimente la machine et est fourni par nous, scientifiques. Nous nourrissons cette évolution pernicieuse, à la fois comme créateurs de la connaissance et comme multi-évaluateurs en tant que pairs. Surchargé et pressé, le scientifique est poussé à s'aligner sur le facteur d'impact dans l'appréciation de l'excellence.

Est-ce une descente inéluctable ? Fort heureusement, certaines communautés échappent à cette spirale destructrice. Les mathématiciens dans toute leur diversité, les physiciens des hautes énergies autour du CERN et SCOAP3, se sont organisés pour échapper aux diktats des majeurs de l'édition scientifique.

Les fortes évolutions de ces dix dernières années contribuent à cette érosion.

- **Multiplication et qualité de l'évaluation sont antinomiques.** La segmentation excessive des sources de financement de la recherche, le développement important des comités de toutes catégories, multiplient le travail d'expertise et conduisent à une évaluation de plus en plus hâtive, basée sur des indices de toutes natures (facteur d'impact compris), au détriment d'une appréciation qualitative, collective, issue d'une lecture intelligente des articles.
- **La révolution numérique**. Une grande chance pour la diffusion et le partage des connaissances nouvelles, elle facilite l'accès rapide aux résultats de la recherche. Mais elle permet aussi à quelques gros éditeurs d'accroître considérablement leur pouvoir, forgeant de nouvelles pratiques éloignées de l'éthique de la publication scientifique. Les éditeurs adossés aux sociétés savantes, telle que la SFP, plus soucieux de l'éthique, en sont gravement fragilisés.

Freiner et infléchir radicalement cette dérive est aussi la responsabilité des physiciens. Qu'ils soient créateurs de connaissances, formateurs de doctorants, membres de jurys, université et organisme, ou Académie des sciences, résister, aujourd'hui, aux appels miroitants des gros éditeurs est essentiel.

Alain Fontaine
Président de la Société Française de Physique

(1) « La science a toujours été appréhendée comme un bien commun. Historiquement, la méthode scientifique implique une construction collective de la connaissance, organisée autour de la vérification et de la validation par les pairs. » (Tribune publiée le 10 septembre 2015 dans le journal *Le Monde*, par 75 personnalités de la communauté scientifique, de la recherche, du numérique et de la culture.)

(2) Article 27 de la Déclaration universelle des droits de l'homme :
1. Toute personne a le droit de prendre part librement à la vie culturelle de la communauté, de jouir des arts et de participer au progrès scientifique et aux bienfaits qui en résultent.
2. Chacun a droit à la protection des intérêts moraux et matériels découlant de toute production scientifique, littéraire ou artistique dont il est l'auteur.

▸ p. 15

▸ p. 21

© Pierre Kitmacher, UPMC

▸ p. 35

© CEPPRA

▸ p. 45

© CERN/CMS

Traces laissées dans les détecteurs de l'expérience CMS du CERN par les particules issues d'une collision entre le faisceau de protons et un collimateur, lors d'un test effectué le 5 avril 2015. (Voir article p. 4).

Sommaire

Éditorial

2 Publication, évaluation : sortons du diktat du facteur d'impact !
A. Fontaine

Images de la physique

4 Derniers résultats sur le boson de Higgs au LHC
L. di Ciaccio et G. Hamel de Monchenault

Avancées de la recherche

11 Brève : Pourquoi l'atmosphère du Soleil est-elle beaucoup plus chaude que sa surface ?
12 Table ronde : L'avenir de la physique des hautes énergies
C. Bachas et P. Fayet
14 Sursauts X des étoiles à neutrons
R. Artigue et J. Margueron
19 Brèves
20 Cyclones dans des bulles de savon
H. Kellay
24 La transition vitreuse aux interfaces
T. Salez et É. Raphaël

Science et société

28 L'Espace des sciences à la Manufacture des tabacs de Morlaix
D. Bideau et M.-L. Brandily
30 Impact des programmes de physique au lycée sur la 1re année d'enseignement supérieur
N. Lebrun, R. Barbet-Massin, S. Magnier et D. Dumora
34 Enseigner la physique à l'université
M. Barbi, G. Blanc, F. Elias, S. Fautrat, C. de Hosson, E. Rio et F. Rouyer

Au sein et autour de la SFP

37 Actualités de la SFP
38 Prix scientifiques
40 Hommage à Roger Maynard
B. Van Tiggelen, A. Fontaine, M. Leduc et C. de Novion
42 Portrait : Barbara Romanowicz, une géophysicienne comblée
V. Pierron-Bohnes et S. Morin
44 DAMAE Médical : diagnostiquer les tumeurs cutanées sans biopsie
M. Grousson
45 Séminaire "Women in Science" à Bangalore
V. Pierron-Bohnes

Reflets de la physique et ses lecteurs

46 Tribune libre : Pour l'usage du français en science
É. Guyon et M. Petit
47 Notes de lecture

Comité de rédaction
Président : Stefano PANEBIANCO
Membres : Michel BELAKHOVSKY - Irène BUVAT - Fabienne CASOLI - David CÉBRON - Jean-Michel COURTY - Nicolas DELERUE - Olivier DULIEU - Titaina GIBERT - François GRANER - Étienne GUYON - Jean-Pierre HULIN - Agnès JACQUESY - Michèle LEDUC - Arnaud LE PADELLEC - 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 - e-mail : laetitiamorin@free.fr
Suivi de rédaction : Agathe CYMER
Service publicité : Jessica EKON - Tél. : 01 69 18 92 40
e-mail : publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 4e trimestre 2015
ISSN : 1953-793X – e-ISSN : 2102-6777
© SFP - Édité à 3200 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 : contact@sfpnet.fr
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

Derniers résultats sur le boson de Higgs au LHC

Lucia di Ciaccio[1] (lucia.di.ciaccio@cern.ch)
et **Gautier Hamel de Monchenault**[2] (gautier.hamel.de.monchenault@cern.ch)
(1) Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, CNRS et Université de Savoie, BP 110, 74941 Annecy-le-Vieux Cedex. Membre de l'expérience ATLAS.
(2) Service de Physique des Particules, Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex. Membre de l'expérience CMS.

La découverte du boson de Higgs, annoncée le 4 juillet 2012 au CERN par les collaborations internationales ATLAS et CMS, représente l'accomplissement d'une quête dont l'origine remonte aux années 1960.

Depuis cet événement, les physiciens d'ATLAS et CMS poursuivent l'étude des propriétés de cette nouvelle particule fondamentale avec l'analyse des données de collisions de protons produites au Large Hadron Collider (LHC) du CERN en 2011 et 2012.

Quelques mois après le redémarrage du LHC à l'issue de 18 mois de travaux de consolidation, cet article dresse le bilan des connaissances expérimentales sur le boson de Higgs.

Le rôle du boson de Higgs dans le modèle standard des particules

Le siècle dernier a vu l'avènement du modèle standard (MS) de la physique des particules, une théorie quantique et relativiste dans laquelle une particule élémentaire est la représentation d'un champ fonction des coordonnées d'espace-temps [1].

Dans cette théorie, les propriétés intrinsèques d'une particule sont invariantes lorsqu'on soumet le champ qui lui est associé à certaines opérations de symétrie mélangeant ses différentes composantes. Les forces (ou *interactions*) fondamentales émergent lorsqu'on impose à l'invariance d'être *locale*, c'est-à-dire vérifiée lorsque ces opérations de symétrie, dites alors *transformations de jauge*, sont également des fonctions des coordonnées d'espace-temps. On donne le nom d'*invariance de jauge* à cette propriété de symétrie locale, et l'ensemble des transformations de jauge forme le *groupe de jauge* de la théorie.

Pour satisfaire l'invariance de jauge, on introduit des bosons vecteurs (particules de *spin* 1), associés aux générateurs du groupe de jauge et médiateurs des interactions entre particules. Ainsi, le photon, les bosons W et Z, et les huit gluons, émergent par ce principe élégant de symétrie comme les médiateurs des interactions électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte. La théorie englobe les interactions électromagnétique et nucléaire faible en une interaction unifiée, dite *électrofaible*.

Cependant, on se heurte à une difficulté. La *renormalisabilité* de la théorie, qui assure sa cohérence mathématique et son pouvoir prédictif, impose aux bosons vecteurs des interactions d'être de masse rigoureusement nulle. Or la force nucléaire faible, responsable en particulier de la radioactivité β, est une interaction à très courte portée [⋆] et, par conséquent, les bosons chargés W (W^+ et W^-) et le boson neutre Z doivent être extrêmement massifs. C'est en effet le cas : les bosons W et Z, mis en évidence expérimentalement en 1984 au CERN, ont une masse élevée, de l'ordre de 100 fois la masse du proton.

Le mécanisme de Brout, Englert et Higgs (BEH), développé dans les années 1960, permet d'introduire la masse des bosons W et Z dans la théorie, tout en préservant son invariance de jauge et sa renormalisabilité. Ce mécanisme, dit de *brisure spontanée de la symétrie de jauge électrofaible*, met en œuvre un champ *scalaire* (c'est-à-dire de *spin* zéro), appelé *champ de Higgs*, et prédit l'existence de la particule à laquelle ce champ est associé, le *boson de Higgs*.

La masse des particules de matière, les quarks et les leptons chargés (électrons, positons, muons...), qui sont des *fermions* (particules de *spin* ½), résulte également de leur interaction avec le champ de Higgs qui les « retarde » dans leur propagation dans le vide. Ces fermions acquièrent ainsi une inertie, et donc une masse, proportionnelle à l'intensité de cette interaction.

De nombreuses expériences ont contribué à la quête du boson de Higgs depuis les années 1970, finalement couronnée de succès en 2012 [2, 3]. Sa découverte par les expériences ATLAS et CMS au LHC établit la réalité physique du champ de Higgs et valide le mécanisme BEH pour engendrer la masse des particules élémentaires. Depuis la découverte, les études au LHC se concentrent sur l'analyse fine des propriétés du boson de Higgs, pour les confronter aux prédictions du MS.

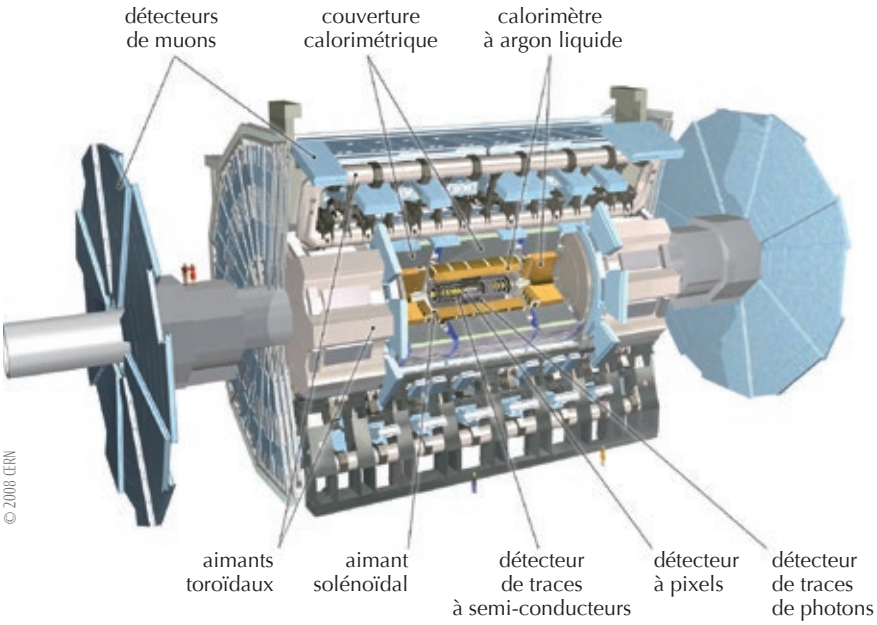
Dans la suite de cet article, après une brève introduction sur les deux expériences ATLAS et CMS (voir encadré 1), nous présenterons les mesures relatives aux propriétés du boson de Higgs, qui s'appuient sur l'ensemble des données disponibles.

›››

Les expériences ATLAS et CMS

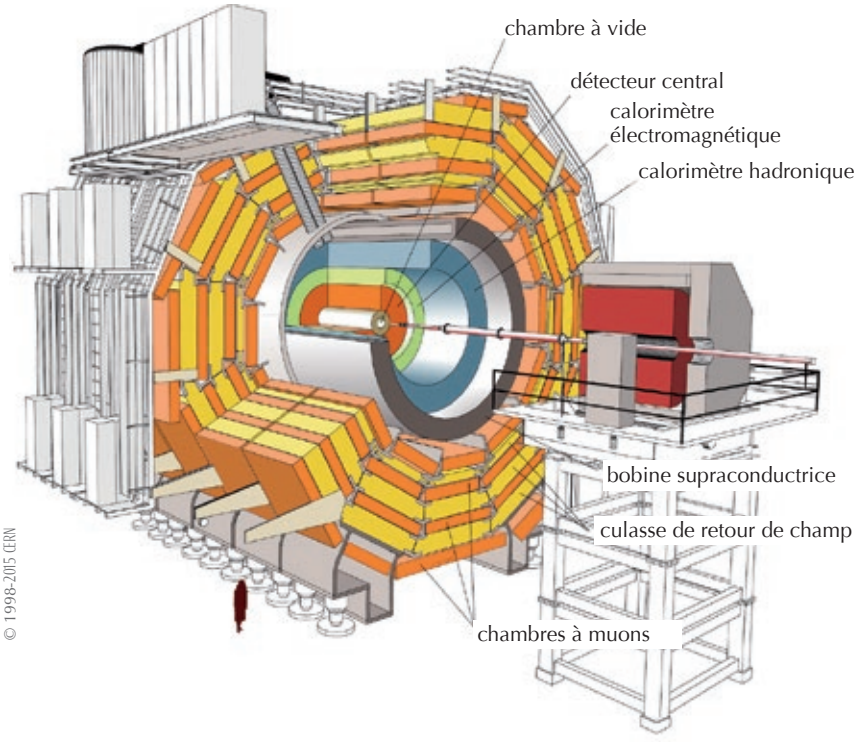
encadré 1

Le détecteur ATLAS



© 2008 CERN

Le détecteur CMS



© 1998-2015 CERN

ATLAS et CMS désignent à la fois de grands détecteurs de physique des particules et les équipes de plusieurs centaines de physiciens et ingénieurs qui les ont conçus, construits, et en exploitent les données pour produire une quantité impressionnante de résultats de physique : depuis 2010, ATLAS et CMS ont publié chacune plus de 400 articles scientifiques dans des revues à comité de lecture.

Les détecteurs ATLAS et CMS sont conçus pour mesurer les énergies et impulsions des particules produites dans les collisions proton-proton. Les deux détecteurs diffèrent dans leur conception et leur configuration magnétique, mais présentent des performances comparables, ce qui permet la vérification indépendante des observations. ATLAS est un géant de 22 mètres de diamètre et 45 mètres de long, avec un système magnétique alliant un solénoïde supraconducteur central et trois grands toroïdes supraconducteurs à air pour la mesure des muons de haute énergie, une calorimétrie électromagnétique à argon liquide et une excellente couverture calorimétrique combinée. CMS, plus compact, s'articule autour d'un aimant supraconducteur solénoïdal de 4 mètres de diamètre et 16 mètres de longueur, assurant un champ magnétique homogène et intense (3,8 teslas) dans lequel sont plongés le détecteur de traces, le calorimètre électromagnétique à cristaux scintillants et le calorimètre hadronique, et dispose d'un système de reconnaissance des muons inséré dans le fer de la culasse de retour de champ.

Un *événement* désigne un croisement de deux paquets de protons, et présente selon les périodes entre 5 et 30 collisions proton-proton réparties en moyenne sur une longueur d'environ 10 centimètres. La quantité de données pouvant être enregistrée est limitée, et ces collisions correspondent pour la plupart à des processus qui ne font pas l'objet principal d'investigation au LHC. Les systèmes de déclenchement permettent de réduire le taux d'événements de 10 mégahertz (la fréquence de croisement des paquets de protons) à quelques centaines de hertz et de sélectionner ainsi les processus (plus rares) que l'on recherche. Les quantités colossales de données sont reconstruites et analysées grâce à la grille informatique qui répartit la puissance de calcul dans les instituts et laboratoires participants autour de la planète [4].

La recherche du boson de Higgs avec ATLAS et CMS

ATLAS et CMS sont deux des quatre grandes expériences qui analysent les collisions de protons (ou d'ions lourds pour ALICE) de très haute énergie délivrées par le LHC, le grand collisionneur de hadrons, un accélérateur de particules circulaire de 27 kilomètres de circonférence qui se situe au CERN, près de Genève.

ATLAS et CMS ont entamé leur campagne de prise des données en 2010 à une énergie de collision de 7 TeV (environ 7000 fois l'énergie du proton au repos). À la fin de l'année 2011, les deux expériences ATLAS et CMS commençaient à détecter un frémissement dans la recherche du boson de Higgs, confirmé rapidement avec les premières données obtenues à 8 TeV au printemps 2012.

Le 4 juillet 2012, lors d'une conférence conjointe organisée au CERN en présence de Peter Higgs et François Englert, prix Nobel de physique en 2013, les deux expériences annoncèrent indépendamment la découverte d'un nouveau boson de masse proche de 125 GeV (133 fois la masse du proton, soit environ la masse de l'atome de xénon). Nous verrons que cette nouvelle particule a des propriétés compatibles avec celles du boson de Higgs prédit par le MS. C'est pourquoi nous l'appelons, peut-être abusivement, le *boson de Higgs*, étant conscients que d'autres particules du même type restent peut-être à découvrir.

Nous présentons ici des résultats obtenus par ATLAS et CMS avec l'ensemble des données accumulées à 7 TeV en 2010 et 2011 et à 8 TeV en 2012 [5]. Les données partielles analysées pour la découverte de juillet 2012 étaient en quantités comparables aux deux énergies. Les données aujourd'hui disponibles à 8 TeV sont en quantité environ quatre fois supérieure.

La valeur de la masse du boson de Higgs n'est pas prédite mais, pour une masse donnée, la valeur de l'intensité de l'interaction (ou *couplage*) du boson de Higgs avec les autres particules élémentaires du MS est calculable. La théorie stipule que le couplage du boson de Higgs avec une particule est proportionnel à la masse ou à la masse au carré de celle-ci, selon qu'il s'agisse d'un fermion ou d'un boson. Cette propriété unique du boson de Higgs, liée au rôle du champ de Higgs dans le mécanisme responsable de la masse des fermions et des bosons, doit être vérifiée expérimentalement.

La conséquence de cette propriété est que le boson de Higgs n'interagit notablement qu'avec les particules les plus massives : le quark top, dont la masse est 173 GeV, les bosons W et Z, de masses 80,5 et 91,2 GeV, et, dans une moindre mesure, le quark b (environ 4,5 GeV) et les leptons de troisième et deuxième génération, le lepton τ (1,8 GeV) et le muon μ (0,1 GeV), qui sont des répliques massives de l'électron (0,0005 GeV).

La durée de vie du boson de Higgs est extrêmement courte, de l'ordre de 10^{-22} s : il parcourt une distance non mesurable, bien inférieure à la taille du proton, avant de se désintégrer. Pour *reconstruire* un boson de Higgs produit dans une collision proton-proton au LHC, il faut donc en détecter les produits de désintégrations. Par chance, la masse de 125 GeV offre une variété de modes de désintégration du boson de Higgs accessibles expérimentalement, dont nous évoquerons dans la suite les cinq principaux, notés WW, ZZ, $\gamma\gamma$, bb et $\tau\tau$. Certaines de ces désintégrations (bb et $\tau\tau$) sont difficiles, voire impossibles, à extraire des bruits de fond, c'est-à-dire des processus connus du MS produisant exactement les mêmes particules finales. C'est pourquoi, pour étudier ces désintégrations, on s'intéresse à des situations rares où la production du boson de Higgs s'accompagne de particules de haute énergie dont la présence permet de réduire considérablement les *bruits de fond*. Dans l'encadré 2, nous décrivons les modes de production et les cinq canaux principaux d'observation et d'étude du boson de Higgs.

Production et désintégrations du boson de Higgs

encadré 2

Le mode principal de production du boson de Higgs au LHC, responsable de 88% des bosons de Higgs produits, fait intervenir son couplage au quark top. C'est la production par fusion de gluons, notée ggF, ainsi appelée parce que le boson de Higgs émerge d'une boucle de quarks top *virtuels*, c'est-à-dire de masse très inférieure à leur masse nominale, issue de la collision de deux gluons provenant des protons incidents [6]. Les deux autres modes de production considérés ici font intervenir le couplage du boson de Higgs aux bosons vecteurs W et Z : ce sont la fusion de bosons vecteurs (7%), notée VBF, et la production associée avec un boson vecteur (4%), notée VH. Ces derniers modes de production sont essentiels pour extraire le signal de boson de Higgs pour les désintégrations où les bruits de fond sont abondants.

Malgré sa masse relativement faible, le boson de Higgs peut se désintégrer par l'intermédiaire d'une paire de bosons vecteurs W ou Z, à condition que l'un au moins des deux bosons soit *virtuel* [6]. Les bosons W et Z sont détectés dans leurs désintégrations en leptons, où lepton désigne ici soit un électron soit un muon. Le W se désintègre en un lepton et un neutrino, lequel n'est pas détectable, et le Z en deux leptons de charges électriques opposées. En tenant compte de toutes les probabilités, la désintégration du boson de Higgs en deux leptons et deux neutrinos (WW) représente 1,1% des cas, et en quatre leptons (ZZ), 0,028% des cas. Le mode ZZ, bien que très rare, est important car les quatre leptons dans l'état final sont détectés et leurs énergies mesurées précisément. Par conséquent, l'utilisation de ce mode permet une discrimination plus aisée du signal par rapport aux bruits de fond et une mesure précise de la masse du boson de Higgs.

Le boson de Higgs peut aussi se désintégrer en une paire de photons par le truchement de boucles de quarks top et de bosons W *virtuels*. Cette désintégration, notée $\gamma\gamma$, est également très rare (0,23%), mais c'est l'une des plus importantes expérimentalement car les deux photons issus de la désintégration sont détectés et leurs énergies mesurées précisément.

La désintégration en une paire de quarks b (57,7%) est délicate à étudier expérimentalement, car la production abondante de quarks b par paires au LHC constitue un bruit de fond colossal. Une façon d'extraire un signal consiste à s'intéresser à la production VH, où l'on détecte le boson vecteur dans sa désintégration en leptons.

Enfin, le boson de Higgs se désintègre en une paire de leptons τ avec une probabilité de 6,3%. Cette désintégration est également difficile à détecter car les leptons τ, qui se désintègrent aussitôt en plusieurs particules dont au moins un neutrino, sont difficiles à identifier et à extraire des bruits de fond. Pour détecter un signal dans ce mode de désintégration, on exploite en particulier la production VBF.

Les deux expériences ATLAS et CMS déploient des techniques d'analyse sophistiquées et un traitement statistique approprié pour extraire des signaux extrêmement faibles d'une quantité astronomique de données. La théorie prévoit en effet qu'un boson de Higgs est produit en moyenne tous les 65 millions de collisions, et seule une infime partie des bosons produits est détectable. Les données correspondent environ à un million de milliards de collisions proton-proton.

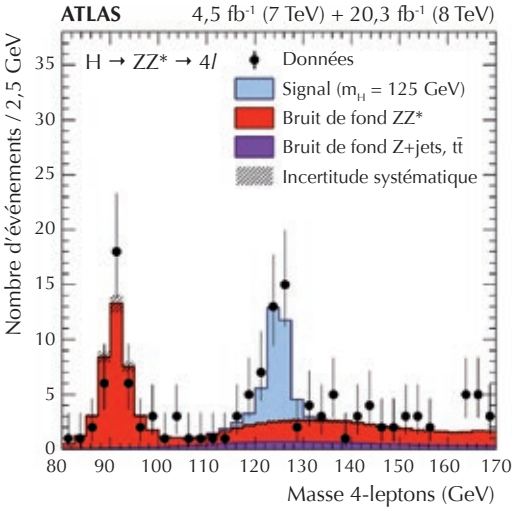
Mesure des couplages et de la masse

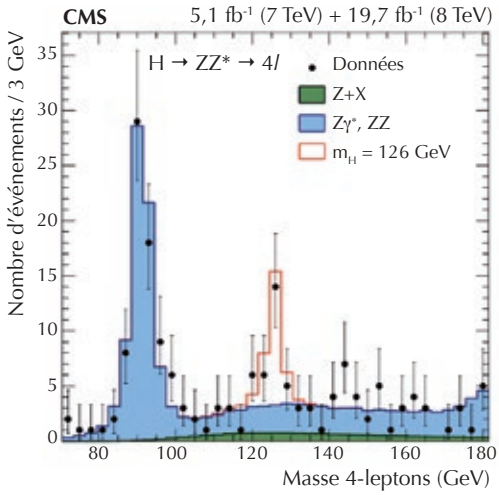
ATLAS et CMS observent indépendamment les trois modes de désintégration WW, ZZ et γγ du boson de Higgs. En exploitant la topologie des événements, les expériences estiment également les proportions des trois modes de production ggF, VBF et VH [voir encadré 2].

La production de bosons de Higgs est relativement abondante dans le mode WW, mais la mesure de masse n'est pas précise en raison de la présence des deux neutrinos dans l'état final et de bruits de fond abondants. Ce mode est important pour la mesure du taux de production du boson de Higgs et la détermination de son *spin*. À l'inverse, la production de bosons de Higgs dans le mode ZZ est faible, quelques dizaines d'événements sélectionnés par ATLAS et CMS, mais le bruit de fond est modéré et la mesure de la masse très précise (fig. 1). D'autre part, le mode ZZ permet de placer des limites directes et indirectes sur la durée de vie du boson de Higgs.

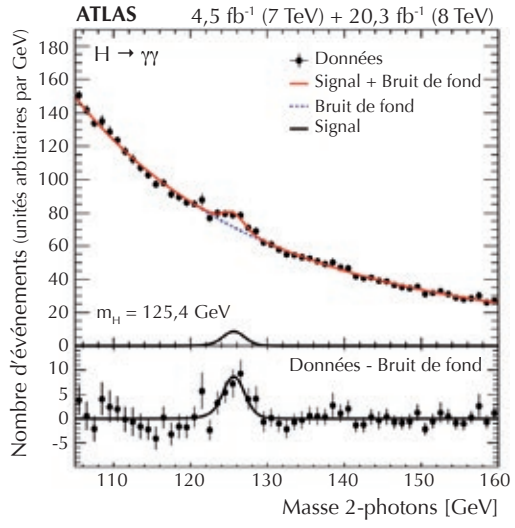
Quelques centaines de bosons de Higgs produits dans ATLAS et CMS se sont désintégrés en deux photons (γγ). Dans ce mode de désintégration, le bruit de fond est abondant, mais l'excellente résolution en masse permet aux deux expériences de détecter un signal significatif (fig. 2).

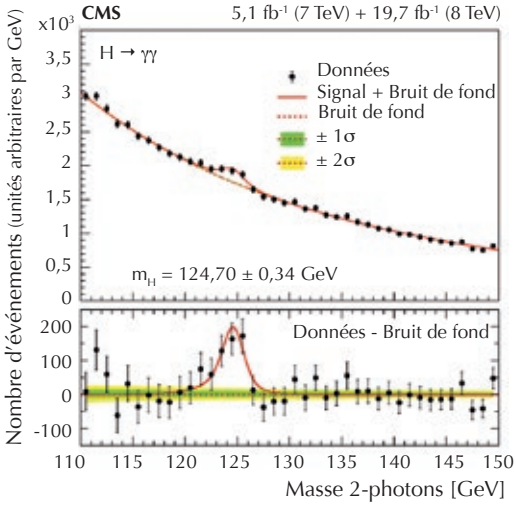
En combinant les résultats de deux analyses portant sur les modes de désintégration en bb et ττ, CMS obtient un fort indice du couplage du boson de Higgs aux fermions, et ATLAS rapporte une forte indication de désintégration du boson de Higgs en deux leptons τ. En revanche, la désintégration en deux muons n'est pas détectée. Or le muon et le lepton τ sont des leptons qui ne diffèrent que par leurs masses (la masse du lepton τ est environ dix-sept fois la masse du muon). C'est un résultat important, ›››





1. Signal du boson de Higgs dans sa désintégration ZZ : distribution de la masse combinée d'un système de quatre leptons entre 80 et 170 GeV dans ATLAS (à gauche), et entre 70 et 180 GeV dans CMS (à droite). Les pics autour de 91 GeV et 125 GeV sont respectivement les signaux des désintégrations du boson Z et du boson de Higgs en quatre leptons. Les simulations, représentées par des histogrammes colorés, décrivent les données de façon satisfaisante.





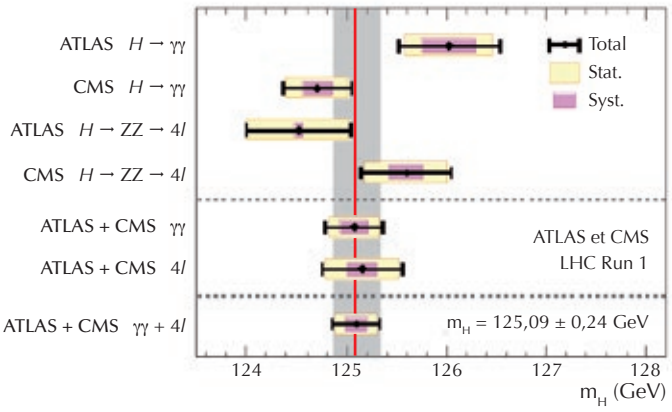
2. Signal du boson de Higgs dans le mode de désintégration γγ : distribution de la masse combinée d'un système de deux photons entre 100 et 160 GeV dans ATLAS (à gauche) et entre 110 et 150 GeV dans CMS (à droite). Les données sont représentées par des points noirs avec barres d'incertitude. Les courbes rouges représentent les ajustements des données. Les panneaux inférieurs présentent les données et les ajustements après soustraction de la fonction ajustée décrivant le bruit de fond. Le signal, clairement visible autour de 125 GeV, comprend plusieurs centaines de désintégrations du boson de Higgs en deux photons.

qui confirme que les couplages du boson de Higgs dépendent de la masse des particules. Compte-tenu du rapport des masses du muon et du lepton τ, cent fois plus de données sont théoriquement nécessaires pour observer la désintégration du boson de Higgs en deux muons.

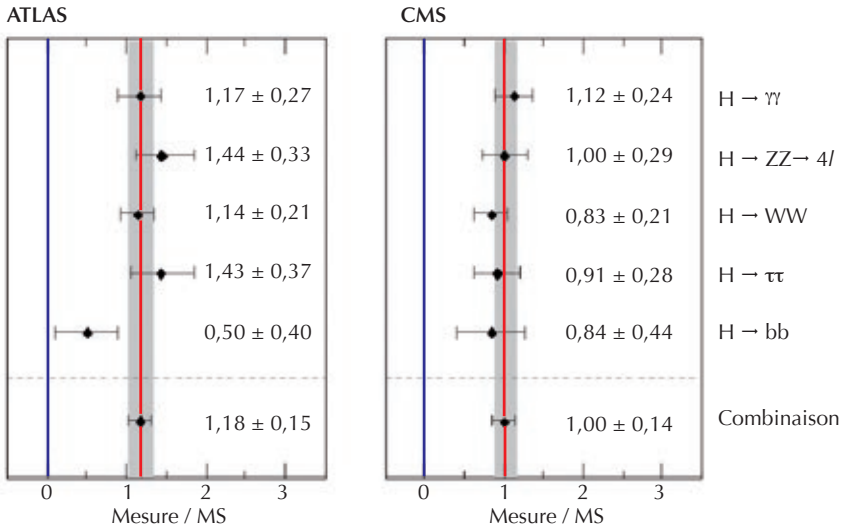
ATLAS et CMS mesurent la masse m_H du boson de Higgs, séparément dans les modes γγ et ZZ. Ces quatre mesures, statistiquement indépendantes, sont en bon accord (fig. 3) et sont combinées pour une détermination de cette masse, m_H = 125,09 ± 0,24 GeV, avec une incertitude relative de 0,2%, qui en fait l'une des mesures de masse les plus précises obtenues au LHC à ce jour.

La figure 4 présente le résumé des mesures des taux de production du boson de Higgs par ATLAS et CMS dans les cinq principaux modes. La quantité portée en abscisse, qui est le signal observé rapporté à la prédiction théorique, vaut 1 dans l'hypothèse du MS avec le boson de Higgs à la masse de 125 GeV et 0 en absence de boson de Higgs. On constate que toutes les mesures sont compatibles avec 1 et que les mesures dans les modes WW, ZZ et γγ excluent la valeur 0 avec un fort degré de confiance. Les valeurs combinées sont 1,18 ± 0,15 et 1,00 ± 0,14 pour ATLAS et CMS, respectivement. Les deux expériences observent la production et les désintégrations en accord avec la théorie avec une précision de l'ordre de 15%, ce qui est remarquable compte tenu des difficultés expérimentales et de la complexité des calculs théoriques mis en jeu.

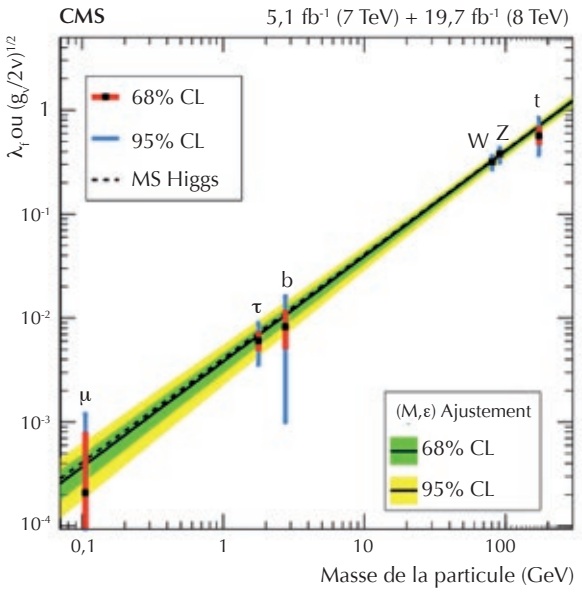
Les résultats peuvent être interprétés en termes de couplages du boson de Higgs aux particules élémentaires les plus massives (fig. 5). Le couplage au quark top intervient dans la production ggF et dans la désintégration en deux photons. Les couplages aux bosons de jauge interviennent dans les productions VBF et VH et dans les désintégrations WW, ZZ et γγ. Les couplages aux fermions découlent des observations dans les modes bb et ττ, et des limites dans le mode μμ. Les données confirment, dans les incertitudes expérimentales, que la nouvelle particule se couple aux autres particules en fonction de leur masse, comme prédit pour le boson de Higgs. Il faut maintenant vérifier que ses nombres quantiques sont conformes aux prédictions.



3. Mesures de la masse du boson de Higgs (m_H en GeV, en abscisse). Les quatre mesures indépendantes (quatre premières lignes) sont d'abord combinées par modes de désintégration du boson de Higgs (deux lignes suivantes). La mesure combinée finale (dernière ligne) est aussi représentée par une ligne verticale rouge à 125,09 GeV et son incertitude (± 0,24 GeV) par une bande verticale grise.



4. Résumé des mesures dans les cinq principaux modes de désintégration du boson de Higgs, pour ATLAS (à gauche) et pour CMS (à droite). L'axe des abscisses présente le taux de production du signal observé par rapport à celui du signal attendu dans l'hypothèse du boson de Higgs du MS. Les valeurs 1 et 0 correspondent au MS avec et sans boson de Higgs, respectivement. Toutes les mesures, représentées par des points avec barres d'erreur, sont compatibles avec la valeur 1 dans les incertitudes expérimentales. Celles-ci incluent une composante systématique, qui est dans tous les cas faible comparée à la composante statistique.



5. Vérification de la propriété fondamentale du boson de Higgs. Ici, les mesures de CMS sont interprétées en terme de couplages du boson de Higgs aux particules du MS : les bosons W et Z, les quarks t (top) et b, les leptons τ et μ. Les couplages sont correctement normalisés entre fermions et bosons (λ_f représente le couplage des fermions et $(g/2v)^{1/2}$ la racine carrée du couplage des bosons), et sont portés en fonction de la masse des particules considérées. Les échelles des deux axes sont logarithmiques. La relation de linéarité en fonction de la masse dans le MS est représentée par une ligne pointillée noire. La courbe continue noire représente l'ajustement linéaire des données, et les bandes vertes et jaunes les incertitudes à 68% et 95% de degré de confiance (CL).

Mesure du *spin* et de la parité

Comme dans tout système quantique, chaque particule possède des propriétés caractéristiques quantifiées, représentées par des nombres quantiques entiers ou demi-entiers. Par exemple le *spin* est une propriété intrinsèque, qui n'a pas d'équivalent classique, liée aux symétries d'espace-temps respectées par son champ. Une autre propriété intrinsèque d'une particule est la parité, qui est liée aux propriétés de symétrie de son champ sous une opération d'inversion des coordonnées d'espace. Le nombre quantique de parité, noté « P », peut prendre la valeur P = +1 (parité positive) ou P = -1 (parité négative).

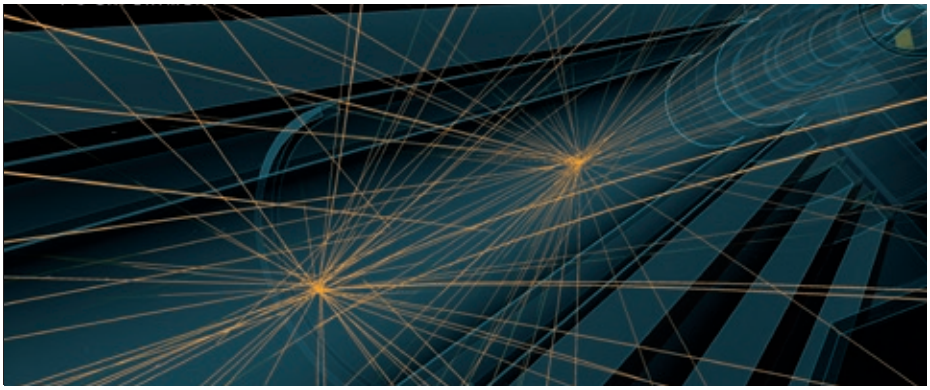
Pour établir la nature de la particule découverte en 2012 par ATLAS et CMS, la détermination de ses nombres quantiques de *spin* (J) et de parité (P), notés collectivement « J^P », est cruciale. La *spin*-parité prédite pour le boson de Higgs dans le MS est $J^P = 0^+$.

La conservation du moment cinétique angulaire dans les processus de désintégration (en particulier la désintégration γγ), et les règles de somme de *spins* en mécanique quantique, indiquent que la nouvelle particule est un boson, c'est-à-dire une particule de *spin* entier.

Pour déterminer la valeur de J^P de ce nouveau boson, les expériences ont analysé finement la cinématique des principaux modes de désintégration. Ainsi, en utilisant des fonctions de vraisemblances maximales, la probabilité pour que les distributions expérimentales observées soient compatibles avec celles attendues dans l'hypothèse que la particule découverte possède une *spin*-parité $J^P = 0^+$, est comparée avec des hypothèses alternatives ($J^P = 0^-, 1^+, 1^-, 2^+, 2^-$).

Les fonctions de vraisemblances maximales sont construites à partir de variables discriminantes, telles que les variables liées à la direction d'émission des photons ou des leptons dans l'état final.

La compatibilité des données avec l'hypothèse $J^P = 0^+$ (par rapport à une hypothèse alternative considérée) est exprimée quantitativement par la valeur d'une quantité notée « CLs », calculée à partir des fonctions de vraisemblances maximales. Ainsi une valeur faible de CLs, par exemple inférieure à 5%, indique que l'hypothèse de J^P alternative à celle du MS est rejetée avec un degré de confiance supérieur à (1-CLs) = 95%.



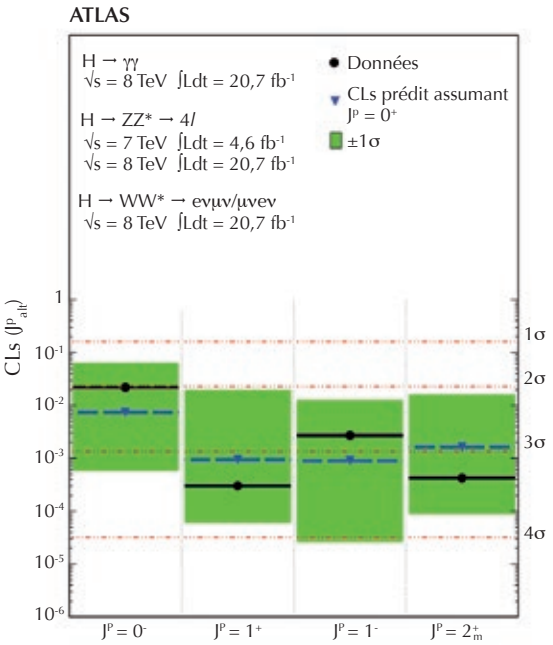
© 2015 CERN

Double collision proton-proton à une énergie de 13 TeV, enregistrée par ATLAS le 21 mai 2015.

Les expériences considèrent plusieurs modèles alternatifs au MS, qui modifient les taux de désintégration et les modes de production de la nouvelle particule. Par exemple, le calcul du CLs est effectué pour différentes valeurs relatives des taux de production par interaction quark-antiquark et par interaction gluon-gluon.

La totalité des résultats obtenus par ATLAS et CMS est en accord avec l'hypothèse selon laquelle les nombres quantiques de *spin* et de parité de la nouvelle particule sont $J^P = 0^+$, comme le prédit le MS. Les hypothèses alternatives sont toutes rejetées avec un degré de confiance supérieur à 95%, et souvent à 99%.

La figure 6 présente les degrés de confiance attendus et observés par ATLAS pour différentes hypothèses alternatives au MS. ›››



6. *Spin* (J) et parité (P) du boson de Higgs. Ici, les données d'ATLAS dans les trois modes WW, ZZ et γγ sont exploitées pour tester l'hypothèse des nombres quantiques prédits par le MS, $J^P = 0^+$, face aux différentes alternatives $J^P_{alt} = 0^-, 1^+, 1^-$ et 2^+. Les tests d'hypothèse appliqués aux données démontrent quantitativement que les hypothèses alternatives sont fortement défavorisées par rapport à celle du MS. Une valeur donnée de CLs (J^P_{alt}), extraite des données (points noirs) par des méthodes statistiques et représentée sur l'axe vertical de gauche, indique que les hypothèses de *spin* et de parité alternative au MS, représentées sur l'axe horizontal, sont rejetées avec un niveau de confiance supérieur ou égal à 1-CLs. Les valeurs représentées par les triangles en bleu sont calculées en comparant des distributions simulées de variables caractéristiques (dans l'hypothèse que le *spin* et la parité du nouveau boson est $J^P = 0^+$) avec des distributions simulées, où les valeurs de J^P sont celles reportées en abscisse. Les bandes en vert montrent les valeurs du CLs (dans l'hypothèse $J^P = 0^+$) qu'on obtiendrait dans 68% des cas, simulées en comparant avec les valeurs alternatives de J^P portées en abscisse. Les triangles bleus et les bandes vertes montrent que la simulation décrit les données. La figure soutient fortement l'hypothèse que les nombres quantiques du boson de Higgs sont ceux prédits par la théorie.

Le futur de la recherche dans le domaine du boson de Higgs

Le spectre des particules prévues par le MS est désormais complet. Les propriétés de la particule découverte en 2012 par ATLAS et CMS correspondent à la dernière pièce manquante du MS, le boson de Higgs. C'est un succès indéniable du MS, qui confirme son extraordinaire pouvoir prédictif. Néanmoins, il y a de bonnes raisons de penser que le MS n'est pas une théorie complète. Parmi les nombreuses questions encore ouvertes, on peut citer, par exemple, celle de l'origine des masses extrêmement faibles mais non nulles des neutrinos (dont il semble qu'elle ne soit pas liée au mécanisme BEH), de la nature de la *matière noire* (postulée pour rendre compte d'observations astrophysiques et cosmologiques) et de l'excès de la matière sur l'antimatière dans l'Univers observable. Enfin, il faut mentionner le fait que le MS ne traite pas le problème de la gravitation quantique.

La découverte du boson de Higgs pose d'autres questions, d'ordre théorique. Selon le MS, la valeur théorique de la masse du boson de Higgs reçoit des corrections quantiques qui sont proportionnelles à l'échelle d'énergie jusqu'à laquelle la théorie est valable, par exemple celle de la grande unification des interactions électrofaible et nucléaire forte, qui est de nombreux ordres de grandeur supérieure à l'échelle des masses des bosons vecteurs W et Z et du boson de Higgs. Un ajustement fin (*non naturel*) des paramètres du MS dans la soustraction entre termes très grands est donc nécessaire pour obtenir *in fine* la valeur physique mesurée, $m_H = 125$ GeV. D'autre part, la valeur 125 GeV de la masse est telle qu'il pourrait ne pas être nécessaire de faire intervenir de la nouvelle physique avant une énergie encore plus élevée, proche de l'énergie de Planck où la gravitation devient quantique.

Des théories alternatives et plusieurs extensions du MS évitent ces ajustements fins et tentent de répondre à certaines questions encore ouvertes. Une compréhension approfondie du mécanisme de BEH pourrait nous éclairer sur la voie à suivre pour dépasser le MS. Une liste non exhaustive des études à mener comprend les actions suivantes : compléter la mesure des propriétés du boson de Higgs (en particulier son couplage aux fermions, son autocouplage et son temps de vie), vérifier son rôle dans la diffusion des bosons W et Z à haute énergie, vérifier qu'il est une particule élémentaire et non composite, rechercher si d'autres bosons de Higgs existent.

Conclusions

Après un arrêt programmé de 18 mois, le collisionneur LHC a redémarré en juin 2015 tout d'abord à une énergie de 13 TeV avant de se stabiliser à l'énergie nominale de 14 TeV, dans le but de sonder un domaine d'énergie inexploré, avec l'espoir d'observer de nouveaux phénomènes permettant de tracer la voie au-delà du MS. On prévoit de recueillir d'ici à 2022 dix fois plus de données que la quantité obtenue depuis 2010.

Les principaux objectifs de l'étude du boson de Higgs par ATLAS et CMS seront de confirmer sa désintégration en bb et ττ (pour mesurer précisément ses couplages avec les fermions) et de mettre en évidence sa production en association avec une paires de quarks top pour tester directement son couplage au quark top, la particule la plus massive du MS.

Les autres aspects du programme, qui comprennent les mesures de la diffusion des bosons W et Z, du couplage du boson de Higgs au muon et de son autocouplage, nécessiteront une augmentation de la quantité de données par un facteur de l'ordre de 100. C'est l'objectif du programme *High Luminosity* LHC, qui devrait démarrer après 2025.

La recherche de bosons de Higgs additionnels, prédits dans certaines théories de nouvelle physique comme la supersymétrie, de la désintégration du boson de Higgs en particules hypothétiques de matière noire, ou l'étude de sa nature élémentaire ou composite, se poursuivront tout au long de ce programme expérimental.

D'autres mesures plus délicates encore, par exemple la mesure précise du temps de vie du boson de Higgs, nécessiteront probablement une nouvelle machine tel qu'un collisionneur électron-positon. Des projets très avancés sont en discussion, et l'un ou l'autre pourrait voir le jour dans un futur proche.

La connaissance des constituants ultimes de la matière et des forces fondamentales qui s'exercent entre eux avance à grand pas, mais la route est encore longue pour comprendre en profondeur les lois physiques qui régissent notre Univers. ▮

[*] La portée d'une force dépend de la masse de la particule médiatrice. Déjà, dans les années 1930, le physicien japonais Hideki Yukawa, en s'appuyant sur le principe d'incertitude de Heisenberg, avait montré qu'une interaction entre particules était liée à l'échange d'un boson massif et que cet échange donnait lieu à une force de portée inversement proportionnelle à la masse du boson. Si le boson échangé est de masse nulle, la force est de portée infinie, comme c'est le cas de l'interaction électromagnétique avec le photon. De la portée de l'interaction nucléaire forte entre nucléons (protons et neutrons), Yukawa avait déduit l'existence de bosons de masse 0,1 GeV, identifiés aux pions découverts par la suite. Cette interaction de courte portée entre nucléons découle elle-même de l'interaction forte entre les quarks qui constituent les pions et les nucléons. Celle-ci, due à l'échange de médiateurs de masse nulle, les gluons, est pourtant de portée encore plus courte : ce paradoxe découle de la propriété de confinement des quarks, dont la conséquence est que ces derniers ne sont pas observables directement à l'état libre.

Références

1• « Le Modèle Standard », *Élémentaire*, n°**6** (2008). http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/documents/numero6/N6MS.pdf

2• L. di Ciaccio et G. Hamel de Monchenault, « Derniers résultats sur la recherche du boson de Higgs au LHC », *Reflets de la physique* **28** (2012) 15-17.

3• L. di Ciaccio et G. Hamel de Monchenault, « Découverte du boson de Higgs au LHC », *Reflets de la Physique* **31** (2012) 17-19.

4• F. Malek, « Le calcul scientifique des expériences LHC - Une grille de production mondiale », *Reflets de la physique*, **20** (2010) 11.

5• Les publications d'ATLAS et CMS sur le boson de Higgs sont disponibles sur les sites suivants : https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults, https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsHIG

6• G. Bernardi, « La recherche du boson de Higgs au Tevatron », *Reflets de la physique*, **14** (2009) 10.

En savoir plus

Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro, *Le boson et le chapeau mexicain*, Collection Folio essais (n° 579), Gallimard (2013).

Daniel Denegri, Claude Guyot, Andreas Hoecker et Lydia Roos, *L'aventure du grand collisionneur LHC*, EDP Sciences (2014).

Pourquoi l'atmosphère du Soleil est-elle beaucoup plus chaude que sa surface ?

Extrait du communiqué de presse commun CNRS-CEA du 11 juin 2015

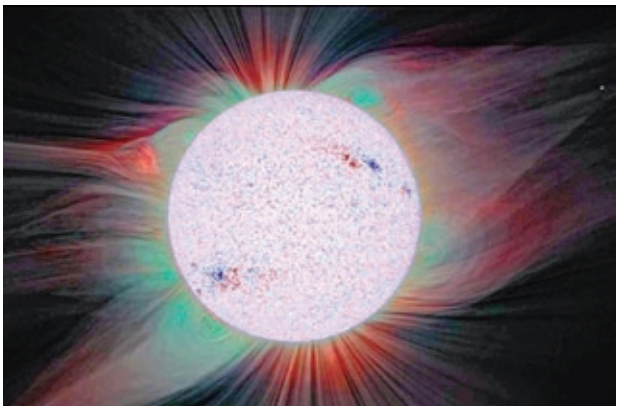
La température du Soleil, qui atteint environ 15 millions de degrés en son cœur, décroît progressivement pour chuter à 6000 degrés à sa « surface ». Elle devrait alors logiquement continuer à décroître dans l'atmosphère. Pourtant, elle atteint environ 10 000 degrés dans la chromosphère et plus d'un million de degrés dans la couronne. Quelle est la source d'énergie capable de fournir et de maintenir l'atmosphère solaire à de telles températures ? Cette question, qui représente un des grands problèmes de l'astrophysique depuis un siècle, est d'autant plus importante qu'elle est associée à la source du vent solaire qui parvient jusqu'à la Terre.

En simulant l'évolution d'une partie de l'intérieur et de l'extérieur du Soleil, des chercheurs du Centre de physique théorique (CPhT, CNRS/École polytechnique) et du laboratoire Astrophysique, Instrumentation, Modélisation (CNRS/CEA/Université Paris Diderot) ont identifié les mécanismes apportant l'énergie capable de chauffer l'atmosphère solaire [1].

Ces chercheurs se sont concentrés sur le champ magnétique à petite échelle, d'aspect « poivre et sel » en dehors des taches (fig. 1). Des modèles numériques performants et les calculateurs du CPhT et de l'Idris (CNRS) ont permis d'effectuer une simulation à partir d'un modèle constitué de plusieurs couches, l'une interne et les autres atmosphériques. Les chercheurs ont alors constaté que la fine couche sous la surface du Soleil se comporte comme une « casserole » de faible épaisseur contenant un plasma en ébullition, chauffée par le bas et formant des « bulles » associées à des granules. Ce potage de plasma en ébullition est alors responsable d'un phénomène dynamo qui amplifie et maintient le champ magnétique : ce dernier, en s'échappant vers la surface, prend une apparence poivre et sel et forme des concentrations moins nombreuses, de plus grosse taille, de durée de vie plus longue et baptisées « méso-taches » solaires, le tout concordant avec les observations.

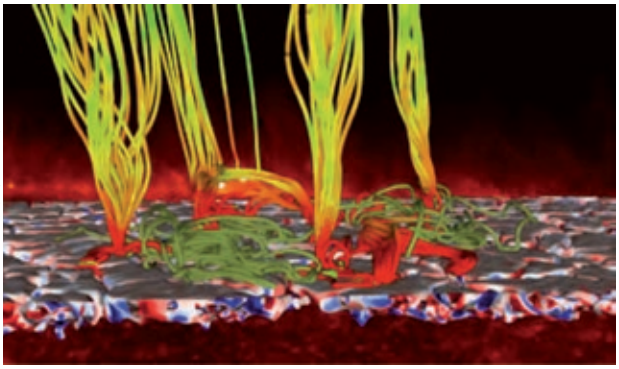
Les scientifiques ont également découvert qu'une organisation semblable à une mangrove apparaît autour des méso-taches solaires : les lignes de champ magnétique à plus grande échelle s'organisent en forme de « racines chromosphériques » enchevêtrées plongeant entre les granules, entourant des « troncs d'arbres magnétiques » qui s'élèvent dans la couronne (fig. 2).

Leurs calculs ont montré que, dans la chromosphère, le chauffage de l'atmosphère est assuré par de multiples micro-éruptions survenant dans les racines de cette « mangrove », porteuses de courants électriques très importants, au rythme des « bulles » issues du plasma en ébullition. Ils ont également découvert que des événements éruptifs plus importants et moins nombreux existent au voisinage des méso-taches, mais ne permettent pas de chauffer la couronne à plus haute et plus grande échelle.



© Tahar Amari / Centre de physique théorique et S. Habbal / M. Druckmüller

1. La surface solaire et son champ magnétique majoritairement « poivre et sel », en dehors des régions des grandes taches solaires, à partir des données du satellite SDO de la NASA.



© Tahar Amari / Centre de physique théorique

2. Modèle complet illustrant la fine casserole de plasma en ébullition, proche de la surface solaire, et responsable de la génération du champ magnétique poivre et sel en surface (bleu-rouge). En émergeant, ce champ crée toute une « végétation » rappelant une mangrove, et permet le chauffage des diverses couches de l'atmosphère solaire.

Cette dynamique éruptive engendre alors des ondes « magnétiques » le long des troncs, un peu comme un son sur une corde pincée, qui se propage le long de cette dernière. Ces ondes transportent alors l'énergie vers la couronne plus élevée, et leur dissipation progressive chauffe celle-ci. Les calculs montrent aussi qu'en retombant vers la surface, la matière éjectée forme des tornades. Des jets de plasma fins, issus de la chromosphère et arrivant dans la couronne sont également produits. Autant de phénomènes, observés jusqu'ici individuellement et inexpliqués, qui sont divers canaux d'énergie issus du plasma bouillonnant.

Les chercheurs ont constaté que le flux d'énergie de leurs mécanismes correspond à celui requis par toutes les études pour maintenir le plasma de l'atmosphère solaire à sa température : 4500 W/m^2 dans la chromosphère et 300 W/m^2 dans la couronne.

Référence

[1] T. Amari *et al.*, *Nature* **522** (2015) 188-191.

Contact

Tahar Amari (tahar.amari@polytechnique.edu)

L'avenir de la physique des hautes énergies

Dans le cadre du 40e anniversaire du Laboratoire de Physique Théorique (LPT) de l'École normale supérieure, une table ronde a réuni à Paris, le 22 janvier 2015, plusieurs physiciens éminents sur le thème « Quel avenir pour la physique des hautes énergies ? ».

Les participants en étaient François Englert (Université Libre de Bruxelles, prix Nobel 2013), Sheldon Glashow (Université de Boston, prix Nobel 1979), David Gross (KITP, Santa Barbara, prix Nobel 2004), Gerard 't Hooft (Université d'Utrecht, prix Nobel 1999), Giorgio Parisi (Université de Rome, médaille Boltzmann 1992) et Alexander Polyakov (Université de Princeton, médaille de Dirac 1986). Le modérateur était Lars Brink, ancien président du comité Nobel de physique.

Le Modèle Standard décrit avec une très grande précision les interactions fondamentales entre particules élémentaires. La dernière pierre angulaire de cette théorie, le mécanisme de brisure de symétrie de Brout-Englert-Higgs appliqué à la différentiation entre interactions faible et électromagnétique, vient d'être mise en évidence au CERN avec la découverte du très fameux « boson de Higgs » [*]. La physique des particules sera-t-elle victime de son succès ? Que faire si la deuxième phase d'exploitation du grand collisionneur hadronique, le Large Hadron Collider (LHC) du CERN [**], n'apporte pas de nouvel élément au-delà du Modèle Standard ?

Les réponses des participants étaient très diverses. Shelly Glashow a insisté sur le fait qu'on ne pourra pas progresser sans l'apport de nouvelles découvertes expérimentales. Celles-ci peuvent venir de la mise en évidence de phénomènes rares (tels que la radioactivité associée à une « double désintégration bêta » sans émission de neutrinos), ou de la découverte directe de la matière sombre de notre Univers, ou encore d'un éventuel futur accélérateur opérant à une énergie cinq à dix fois supérieure à celle du LHC (qui est actuellement de 13 TeV). David Gross, tout en étant plus optimiste sur la phase 2 du LHC, a fait remarquer que la faisabilité d'un tel collisionneur avait été déjà démontrée, faisant référence au projet américain du Superconducting Super Collider, avorté en 1993 pour des raisons budgétaires.

Mais est-on certain que gagner un facteur dix en énergie permettrait de découvrir la nouvelle physique qui pourrait ou devrait exister au-delà du Modèle Standard ? David Gross note que dans le cas des interactions fortes, il a fallu arriver à des énergies mille fois supérieures à la masse des pions pour tester le modèle des partons (quarks et gluons, constituants des nucléons) et leur propriété de liberté asymptotique. De plus, des arguments astrophysiques indiquent l'existence possible de particules de matière sombre dans la zone d'énergie de 1 à 100 TeV. Indépendamment de toute argumentation, indirecte ou théorique, si l'on a la possibilité de repousser les limites de nos connaissances il ne faut pas hésiter à le faire, le risque de non-découverte étant de toute façon inhérent à toute investigation scientifique.

François Englert remarque que ne pas trouver trace au LHC d'une supersymétrie entre bosons et fermions ne serait pas nécessairement une grande déception, les arguments en faveur de cette hypothèse lui semblant discutables. L'argument le plus fort en faveur de la supersymétrie pourrait selon lui venir de la théorie des cordes. Mais si celle-ci ne doit se manifester qu`à l'échelle de Planck, absolument gigantesque (10^{19} GeV), toute vérification expérimentale directe risquerait d'être exclue. Gerard 't Hooft a plaidé en faveur d'un autre type de symétrie, encore plus fondamentale, qui permettrait de comprendre la physique à toutes les échelles, de même que la symétrie par translation assure que les lois de la nature sont les

L'intégralité du débat peut être visionnée sur le site http://savoirs.ens.fr/expose.php?id=1999 .

[*] Voir l'article de L. di Ciaccio et G. Hamel de Monchenault, p. 4 de ce numéro.

[**] Le LHC, à nouveau en fonctionnement, a produit ses premières collisions à 13 TeV en mai 2015.

Table ronde

Les participants de la table ronde. De gauche à droite : Lars Brink, François Englert, Sheldon Lee Glashow, David Gross, Gerard 't Hooft, Giorgio Parisi et Alexander Polyakov. (Courtoisie : Jesper Jacobsen)

mêmes partout dans l'Univers. Il a fait référence aux années 1970, quand des percées théoriques (théories de jauge, renormalisation) ont conduit à un dénouement très rapide où tous les éléments du Modèle Standard ont été mis en place. Un tel changement de paradigme lui paraît nécessaire pour aborder la gravité quantique, qui est au centre de très nombreuses considérations théoriques.

Mais la recherche théorique peut-elle encore avancer sans attendre de nouveaux apports de l'expérience ? Sheldon Glashow n'y croit pas et remarque que ceci ne s'est produit qu'une seule fois dans toute l'histoire des sciences, quand Einstein a construit sa célèbre théorie de la Relativité Générale. Tous les autres participants ont cependant répondu par l'affirmative (mais attention, ce sont tous des théoriciens !). Sasha Polyakov, le plus optimiste, pense que la théorie quantique des champs cache encore une multitude de mécanismes et de phénomènes à découvrir. Il prend comme exemples la dualité gravité-fluide, l'instabilité associée à l'énergie sombre, ou le phénomène du confinement des quarks, encore insuffisamment compris. Giorgio Parisi ajoute qu'un grand défi théorique est d'appréhender le régime intermédiaire, ni perturbatif ni trop fort, des constantes de couplage entre particules. Il fait l'analogie avec les interactions fortes pour lesquelles, sans accélérateurs suffisamment puissants, on n'aurait pu tester la chromodynamique quantique que par des calculs numériques du spectre de masse des mésons et des baryons. Sommes-nous devant une telle situation pour la gravité quantique ? Englert, Gross et 't Hooft considèrent aussi que l'on ne pourra pas ignorer les problèmes et paradoxes impliquant la nature de l'espace-temps et la mécanique quantique, ainsi que la causalité, et que l'on devra continuer à les étudier, même à l'aide d'« expériences de pensée ».

La question inverse a aussi été débattue : la recherche expérimentale peut-elle progresser si elle n'est pas accompagnée par la théorie ? Aurait-t-on découvert le boson de Higgs si on ne savait pas ce que l'on cherchait ? L'extrême rareté des phénomènes recherchés rend leur découverte de plus en plus improbable en l'absence de guide théorique. Mais Glashow et Parisi ont aussi souligné qu'une trop grande dépendance vis-à-vis de la théorie ferait courir le risque de passer à côté d'une découverte véritablement révolutionnaire, qu'aucun théoricien n'aurait anticipé.

La physique des interactions fondamentales, ainsi que l'astrophysique et la cosmologie, sont des disciplines matures, comme l'a remarqué Lars Brink, qui doivent faire face à des contraintes sociétales et technologiques importantes. Les phénomènes physiques varient selon une échelle d'énergie logarithmique, alors que les coûts et les défis technologiques associés varient souvent de manière plus que linéaire. Qui plus est, l'impact de ces disciplines sur la vie quotidienne n'est pas le même qu'au siècle dernier.

Mais le LHC devrait nous apporter de nouveaux résultats à une énergie accrue, les recherches théoriques continuent à progresser rapidement, et les questions ouvertes sur l'unification des forces, l'origine de l'Univers et la matière sombre, et la nature quantique de l'espace-temps, restent toujours aussi fascinantes. Le débat s'est clos sur une note optimiste. Il ne faut pas sous-estimer la curiosité et l'ingéniosité des chercheurs, et l'avenir peut nous réserver bien des surprises.

Résumé du débat par **Constantin Bachas** (bachas@lpt.ens.fr) et **Pierre Fayet**
Laboratoire de Physique Théorique, École normale supérieure,
24 rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05

Sursauts X des étoiles à neutrons
Une façon de contraindre l'équation d'état de la matière dense

Romain Artigue (artigue.romain@gmail.com) et **Jérôme Margueron** [2] (j.margueron@ipnl.in2p3.fr)
(1) Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP), UMR 5277 CNRS,
Université Toulouse Paul Sabatier, 9 avenue du Colonel Roche, BP 44346, 31028 Toulouse
(2) Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL), UMR 5822 CNRS,
Université Claude Bernard, 4 rue Enrico Fermi, 69622 Villeurbanne Cedex

La matière la plus dense observable dans l'Univers se trouve au cœur des étoiles à neutrons. Il arrive que ce type d'astre forme un couple avec une étoile compagnon, ce système binaire se caractérisant par un transfert de masse, par accrétion, de l'étoile compagnon vers l'étoile à neutrons. L'explosion thermonucléaire de matière accrétée à la surface de l'objet donne lieu à une émission du flux en rayons X, décuplée et modulée à sa fréquence de rotation.

En sondant la courbure de l'espace-temps à la surface de l'étoile à neutrons, les pulsations ainsi observées se révèlent être un moyen direct d'investigation des propriétés de l'étoile, comme sa masse et son rayon.

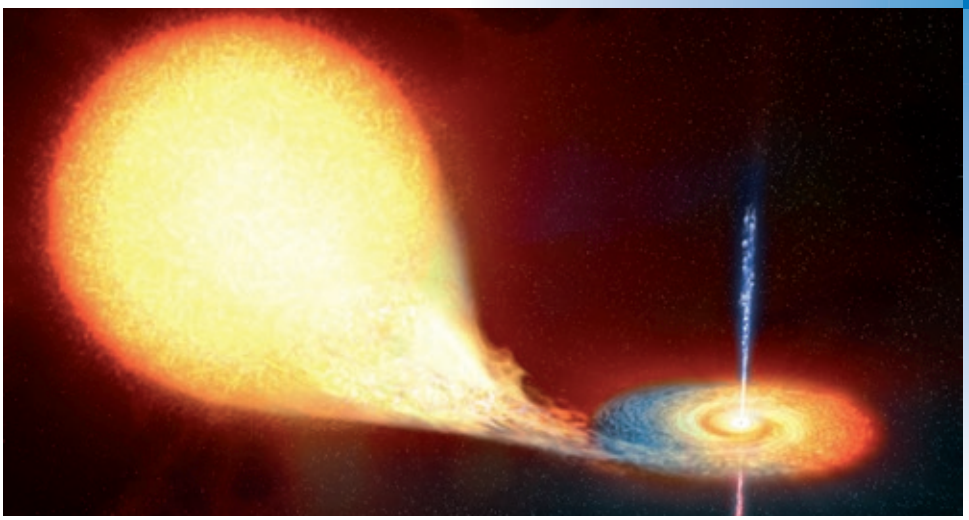
L'étoile à neutrons : un laboratoire de la physique extrême

Au cours de sa « vie », une étoile sur sa séquence principale compense son auto-effondrement naturel grâce à une pression générée par la radiation centrifuge produite par les réactions de fusion d'éléments légers. Mais en arrivant à l'épuisement de son combustible, l'étoile se contracte et une nouvelle pression apparaît : celle induite par le principe de Pauli, qui empêche deux électrons identiques d'occuper le même état. Les naines blanches résultent de ce nouvel équilibre. Après la découverte nobélisée du neutron comme particule élémentaire par James Chadwick en 1932, Walter Baade et Fritz Zwicky avancèrent l'idée selon laquelle les s*upernovae* d'effondrement gravitationnel représentent la transition d'une étoile massive ordinaire (de 8 à 30 masses solaires environ) vers une étoile à neutrons, un astre extrêmement compact qui possèderait un rayon d'une dizaine de kilomètres et une masse d'environ 1,4 masses solaires. Des astres aussi compacts sont restés longtemps inobservés, et le seraient encore s'ils n'étaient pas le site de processus très particuliers, comme par exemple le système binaire représenté sur la figure 1 et que nous détaillerons par la suite.

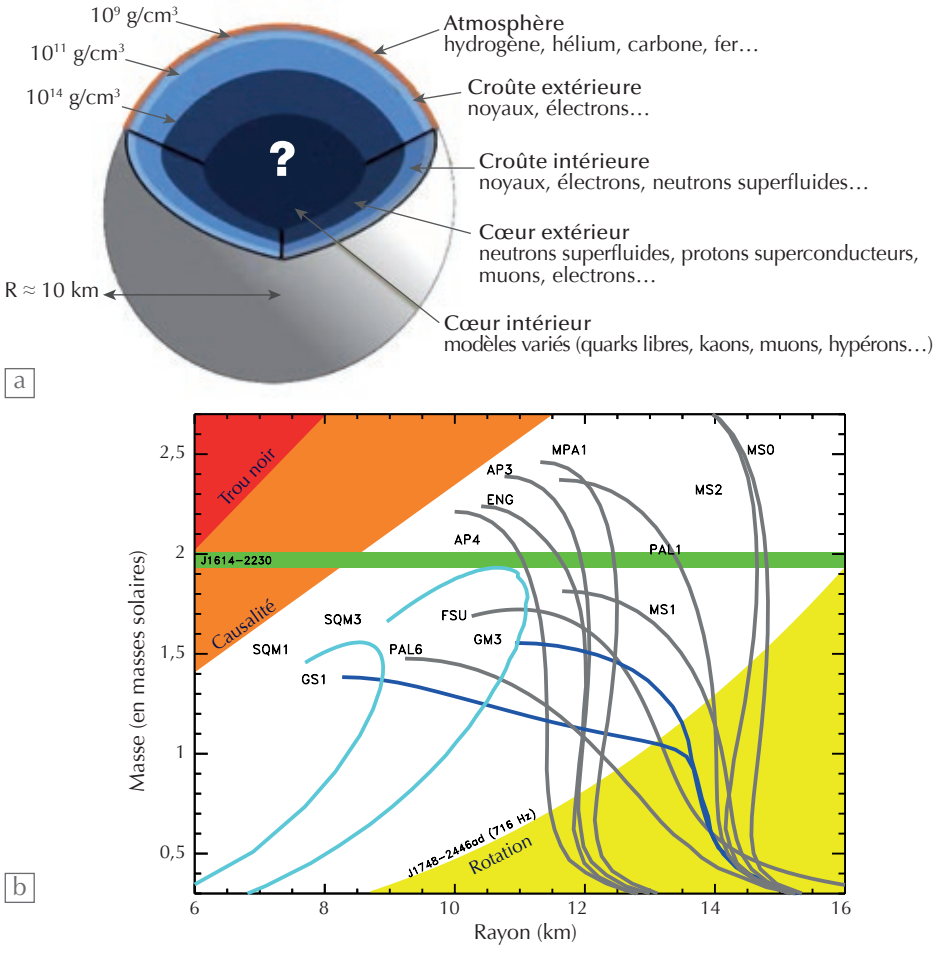
Une étoile à neutrons constitue un état d'équilibre stable entre la gravitation et l'interaction forte entre les nucléons (neutrons et protons), qui est très répulsive à haute densité. De sa surface jusqu'à son cœur, la matière s'organise sous différentes formes. L'étoile à neutrons présente une écorce d'environ un km d'épaisseur (croûtes extérieure et intérieure sur la figure 2a) et, dans sa région interne, un cœur liquide. La nature et les propriétés de la matière à la surface d'une étoile à neutrons sont raisonnablement bien comprises. Pour les couches les plus profondes, nous atteignons les limites de nos capacités prédictives basées sur nos connaissances actuelles ; plusieurs scénarios sont envisageables, dont celui d'un état de quarks déconfinés, aussi appelé le plasma de quarks et de gluons, qui est étudié grâce aux grands accélérateurs de particules tels que le Large Hadron Collider du CERN. Ces expériences en laboratoire sondent la région de haute température et basse densité du diagramme de phase. Les étoiles à neutrons sont par contre un laboratoire pour explorer la région du diagramme de phase à haute densité, qui est encore inaccessible aux expériences sur Terre.

Équations d'état de la matière dense

Le cadre théorique permettant de déterminer la structure des étoiles à neutrons fut établi par Oppenheimer et Volkoff (1939). Il s'agit de résoudre les équations d'Einstein de la relativité générale pour un fluide parfait autogravitant statique et à symétrie sphérique, c'est-à-dire une géométrie de l'espace-temps donnée par la métrique de Schwarzschild. On obtient de cette manière le système d'équations de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) qui, complété par la donnée de l'équation



1. Représentation d'un système binaire accrétant, constitué d'une étoile à neutrons (à droite) et d'une étoile compagnon de type solaire (à gauche). Le transfert de masse donne lieu à la formation d'un disque d'accrétion autour de l'étoile à neutrons, caractérisant la chute libre de la matière en spirale. (Vue d'artiste, source : ISDC.)



2. Intérieur d'une étoile à neutrons et équations d'état de la matière dense.
(a) Coupe d'une étoile à neutrons, contenant différentes couches, de la surface vers le cœur ; ce dernier est susceptible de contenir des formes exotiques de la matière.
(b) Diagramme masse-rayon des étoiles à neutrons, présentant des courbes associées à différentes équations d'état de la matière dense (cyan : modèles « étranges », à plasma de quarks ; bleu foncé : modèles exotiques à kaons, hypérons... ; gris : modèles traditionnels, à nucléons). La zone orange est exclue par le principe de causalité (de telles valeurs de masse et de rayon impliqueraient une vitesse du son supérieure à celle de la lumière). La zone rouge définit la limite de création d'un trou noir. La zone jaune est exclue, car les configurations correspondantes entraîneraient la dislocation de l'objet sous les effets de la force centrifuge (J1748 est le pulsar qui tourne le plus rapidement détecté à ce jour). La bande verte correspond à la masse maximale observée d'une étoile à neutrons (Demorest *et al.*, *Nature*, **467** (2010) 1081), par effet Shapiro dans la bande radio. Les équations d'état qui ne permettent pas d'atteindre cette masse maximale sont donc invalidées par cette observation récente.

d'état de la matière dense, décrit l'équilibre hydrostatique relativiste, l'espace-temps interne à l'étoile et la structuration de la matière. Pour une équation d'état donnée, on trouve un ensemble de solutions stables [1], qui peuvent être caractérisées par une courbe quasiment unique dans le diagramme masse-rayon. La figure 2b montre un ensemble de courbes dont chacune est associée à une unique équation d'état. La relation entre la masse et le rayon est caractéristique de l'équation d'état (voir la légende de la figure pour plus de détails).

La mesure directe d'un rayon d'une dizaine de kilomètres pour des objets distants de plusieurs kiloparsecs est impossible aux résolutions actuelles des télescopes, et le restera certainement encore très longtemps. On peut cependant ruser et plusieurs méthodes ont été proposées :

- l'étude des raies spectroscopiques du fer présent à la surface pour mesurer le *redshift* gravitationnel de l'étoile ;
- l'étude des délais temporels induits par la déformation de l'espace-temps à proximité de l'étoile (effet Shapiro : la lumière passant près de l'étoile arrive avec un délai par rapport à la lumière nous parvenant directement) dans la bande d'émission radio des pulsars ;
- l'ajustement des pulsations détectées durant l'émission persistante des binaires X ou lors des sursauts X (sujet du paragraphe suivant).

D'autres contraintes, théoriques, permettent d'exclure des régions de ce diagramme (voir légende de la figure 2).

›››

Systèmes binaires X

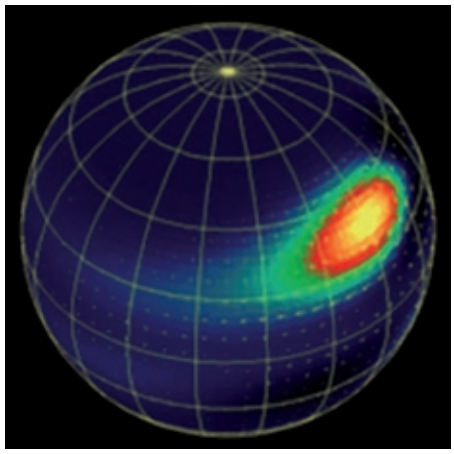
L'étoile à neutrons n'est plus une « étoile » au sens propre du terme, étant donné qu'elle ne constitue plus une source d'énergie et se refroidit irrémédiablement... sauf si elle se trouve dans un système binaire et produit des sursauts X. En effet, avec une fréquence de rotation qui peut atteindre plusieurs centaines de hertz (1 hertz = 1 rotation par seconde), et une masse supérieure à celle du Soleil, le champ gravitationnel de l'étoile à neutrons déforme l'espace-temps dans son environnement proche, si bien que toute matière passant dans son voisinage subit les effets de la relativité générale en champ fort. C'est le cas de la matière accrétée des systèmes binaires.

Les binaires X sont des systèmes stellaires doubles constitués d'une étoile à neutrons (ou d'un trou noir) et d'un compagnon stellaire en interaction (fig. 1), dont la caractéristique principale est qu'un transfert de masse du compagnon vers l'objet compact est à l'origine d'un important rayonnement X. Ils sont essentiellement observés dans le bulbe de la Voie Lactée ou au sein des amas globulaires, et restent dynamiquement stables durant plusieurs milliards d'années.

Si le compagnon possède une masse proche de celle du Soleil, le transfert de masse s'effectue à travers le point d'équilibre entre les forces de gravitation des deux systèmes (point de Lagrange L1), aussi appelé lobe de Roche. Le gaz « aspiré » possède un moment cinétique trop grand pour tomber directement sur l'étoile à neutrons ; il se met donc en orbite autour de celle-ci pour former un disque d'accrétion. Les différences de vitesse au sein du disque créent des forces de frottement visqueux qui permettent au gaz de dériver doucement en spirale vers la surface de l'objet. Localement, la température produite par cette friction du gaz peut atteindre des millions de degrés dans les régions centrales du disque pour permettre l'émission en rayons X observée [2]. Cette émission X est continue, contrairement aux sursauts que nous allons détailler maintenant.

Sursauts X

Sporadiquement, la matière accrétée peut atteindre l'étoile à neutrons. Les réactions de fusion nucléaire faisant intervenir la matière (hydrogène et hélium) s'accumulant sur la surface de l'étoile ont lieu continuellement. Localement, lorsqu'une certaine hauteur de colonne de matière est amassée, la chaleur relâchée par une réaction provoque une augmentation de la température (jusqu'à 10^{8-9} K) et ainsi une augmentation du taux de réactions, qui n'est pas compensée par le refroidissement. Un emballement thermonucléaire s'enclenche, la combustion devient instable ou explosive : on dit que c'est un sursaut X (fig. 3). Cet évènement provoque une croissance brutale du flux de rayons X durant quelques secondes ou minutes, avant une décroissance caractérisant le refroidissement de la surface (fig. 4a). L'accrétion se poursuit après le sursaut et, au bout d'un certain temps, la surface aura accumulé une colonne de matière suffisante pour générer un nouveau sursaut.



3. Modélisation d'une tache chaude issue de l'explosion thermonucléaire de matière accrétée. (Source : Spitkovsky *et al., ApJ,* **566** (2002) 1018).

Les sursauts X se manifestent sous différents aspects selon la nature des réactions nucléaires. Ceux de *type 1* concernent les allumages par combustion instable d'hydrogène seul, d'hélium seul et parfois d'un mélange des deux. Le délai entre deux sursauts X est de quelques heures. En revanche, lorsqu'une colonne de carbone accumulée est suffisante (après plusieurs sursauts de type I), sa combustion instable mène à un *supersursaut* qui peut durer plusieurs heures. Ces phénomènes sont bien plus rares, leur temps de récurrence étant de plusieurs années. Enfin, les sursauts de *type 2 (dits rapides)* peuvent être séparés de quelques minutes et sont moins énergétiques. Observés de façon assez marginale, ils sont probablement dus à des instabilités brutales du disque d'accrétion, provoquées par des effets de viscosité ou de champ magnétique.

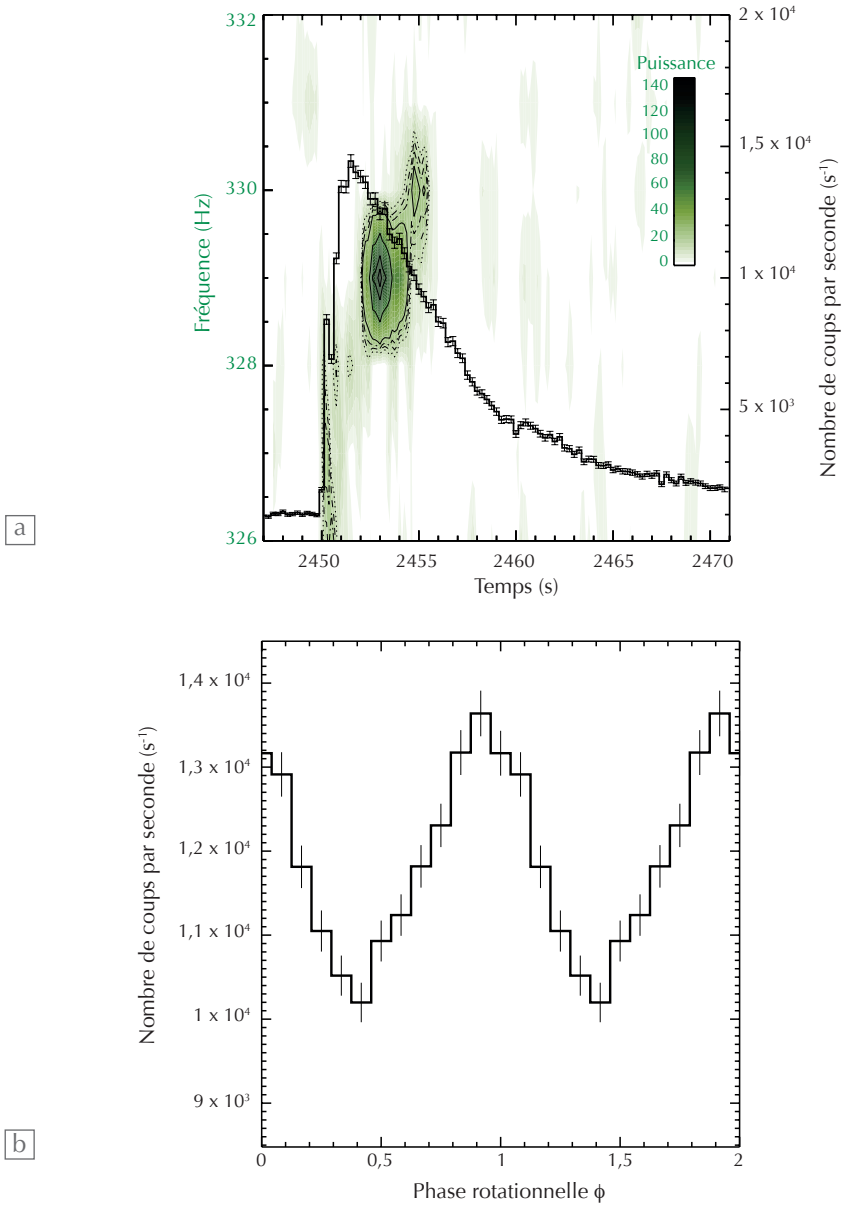
Historique de la découverte

L'observation de l'Univers en rayonnement X s'est développée très récemment. Les rayons X étant fortement absorbés par l'atmosphère terrestre, il faut en sortir pour faire des observations. En 1962, une source lumineuse, Sco X-1, fut découverte grâce aux compteurs Geiger installés dans le nez de la fusée *Aerobee* 150 de l'United States Air Force. Ainsi débuta l'astronomie X.

En 1967, dans la quasi-indifférence de la communauté, Shklovsky émit l'hypothèse que la source Sco X-1 était en fait une étoile à neutrons accrétant la matière d'une étoile compagnon. À cette époque, aucune étoile à neutrons n'avait encore été détectée. En 1967, la perspicacité d'une étudiante irlandaise, Jocelyn Bell, utilisant le radiotélescope de Cambridge, conduisit à l'observation d'une première source persistante, extérieure au système solaire et périodique à 1,337 secondes. Elle fut rapidement associée à une étoile à neutrons en rotation. Peu après, d'autres observations permirent de valider le scénario du disque d'accrétion.

En juillet 1969, le satellite *Vela 5b* observa une poussée brutale (quelques secondes) du flux de rayons X de la source Cen X-4. Mais cette émission ne fut pas associée à un sursaut X. Il fallut attendre l'observation par l'*Astronomical Netherlands Satellite* de deux sursauts de la source 3U 1820-30, relevés par Grindlay (1976), pour que paraisse le premier article concernant cette découverte. Il y eut dès lors un intérêt croissant pour la recherche de signaux pulsés générés par les sursauts X [3].

Depuis 1969, plus d'une quinzaine d'instruments ont participé à l'observation de plus de 11 000 sursauts X, émis par une centaine de sources différentes. Lancée le 30 décembre 1995, la mission *Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE)* de la NASA est à l'origine de la plupart des découvertes. Ses opérations se sont achevées le 3 janvier 2012. Ce satellite de 3 tonnes fut placé sur une orbite basse de 600 km. Il embarqua trois instruments pour la détection des rayons X, dont le détecteur principal, le *Proportional Counter Array (PCA),* couvrait la bande d'énergie 2-60 keV avec une très grande surface collectrice (6500 cm^2) et une résolution temporelle inférieure à 1 microseconde, idéale donc pour étudier les phénomènes de grande variabilité.



4. Détection d'oscillations périodiques lors d'un sursaut X.
(a) Variation du flux de rayons X en fonction du temps, lors du sursaut X de la source 4U 1702-429, observé le 26 juillet 1997 par la mission RXTE de la NASA. La croissance du flux dure environ 1,5 s, la décroissance dure plus de 15 s. Pendant le sursaut, le flux est décuplé. La couleur vert foncé est associée à la forte détection d'un signal périodique, oscillant à une fréquence proche de 329 Hz sur un segment de 2 secondes dans la queue du sursaut. (b) Profil moyen des oscillations périodiques détectées durant ce sursaut X pendant deux cycles.

Oscillations périodiques

Les oscillations périodiques du flux pendant les sursauts X ne sont pas systématiquement détectées. Elles ne sont confirmées que pour moins de 20 systèmes observés. Elles apparaissent durant la phase de croissance ou de décroissance du sursaut, ou s'étalent sur les deux. Elles montrent une grande cohérence et des amplitudes relatives atteignant environ 20% du flux total de l'émission. Les spectres de puissance dynamiques permettent de montrer l'évolution de la fréquence au cours du sursaut (fig. 4a). Des dérives en fréquence de quelques hertz sont observées jusqu'à atteindre une valeur asymptotique stable, supposée être la fréquence de rotation de l'étoile.

L'explosion thermonucléaire provoque donc l'apparition d'une région plus chaude que le reste de l'étoile. Sans connaître parfaitement sa géométrie ni sa localisation, on sait qu'elle crée une asymétrie azimutale de brillance, comme l'illustre la figure 3. Les oscillations de sursauts observées sont donc interprétées comme le résultat de la rotation d'une tache brillante à la surface de l'étoile [4]. De plus, les photons émis se propagent dans l'espace-temps relativiste déformé par l'objet compact et par la traversée d'une atmosphère diffusante. Cela affecte notablement leur trajectoire et leur énergie et laisse des signatures encodées dans la forme des oscillations, comme nous allons le voir plus loin.

En général, seuls une vingtaine de photons sont observés par cycle. Pour avoir un profil statistiquement significatif, il faut donc procéder à un empilement de phases des données à la fréquence du signal durant les segments de détection des oscillations ; il est possible de construire des profils moyens d'oscillations, c'est-à-dire des pulsations qui caractérisent le flux moyen émis lors du sursaut durant un cycle rotationnel (fig. 4b). Les profils moyens d'oscillations des sursauts X présentent une grande variabilité d'un sursaut à un autre et d'une source à une autre, en terme d'amplitude relative notamment. Cette variabilité s'explique par les différentes masses et rayons des étoiles et leur angle d'observation, mais aussi par la position, la température et la taille de la tache.

Contraindre la masse et le rayon de l'étoile

Une mesure précise à la fois de la masse et du rayon de l'étoile à neutrons permettrait de discriminer efficacement les modèles d'équation d'état de la matière dense (fig. 2b). Les trajectoires des photons émis par la surface de l'étoile et parvenant jusqu'à l'observateur empruntent les géodésiques de l'espace-temps courbé dans le voisinage de l'étoile à neutrons. Cette courbure, à travers notamment l'effet de retard du rayonnement (effet Shapiro), est d'autant plus grande que la compacité de l'étoile est importante, celle-ci correspondant au rapport de la masse sur le rayon de l'étoile. Parvenir à quantifier cette compacité en ajustant les profils d'oscillations périodiques permet donc, en théorie, une mesure des deux paramètres que sont le rayon et la masse de l'étoile (voir encadré, p. 18). L'exploitation des sursauts X devrait donc permettre de déterminer le rayon et la masse des étoiles à neutrons, et donc de mieux contraindre l'équation d'état de la matière dense (fig. 2b).

›››

Applications et perspectives

Les procédures d'ajustement des profils aux données sont très consommatrices en temps de calcul et exigent des moyens de simulation importants. Jusqu'alors, les résultats ont montré que les contraintes sur la masse et le rayon de l'étoile sont limitées par la qualité des données du détecteur *PCA*. En effet, les incertitudes de mesure sont trop grandes pour dessiner des contours fermés dans le diagramme masse-rayon, et apporter des contraintes fortes aux modèles d'équation d'état.

En décembre 2016, l'instrument spatial *NICER* (Neutron star Interior Composition ExploreR) de la NASA sera joint à la station spatiale internationale. C'est un instrument dédié à l'observation en X des étoiles à neutrons et l'on espère pouvoir collecter des données de bien meilleure qualité que celles dont nous disposons actuellement. De plus, l'agence spatiale européenne (ESA) a récemment donné son aval pour développer la mission *ATHENA+*, qui est, entre autres, dédiée à l'observation en rayons X des phénomènes liés aux systèmes binaires. Sa très grande résolution en énergie sera un atout pour l'ajustement des pulsations périodiques, et la qualité statistique des données provenant des sursauts X sera optimisée en utilisant de très grandes surfaces collectrices de photons, comme le proposent les missions spatiales qui sont régulièrement candidates à la sélection auprès de l'ESA ou de la NASA. Les simulations actuelles montrent de façon réaliste que la qualité statistique de telles données permettra de mesurer à quelques pourcents près la masse et le rayon d'un ensemble d'étoiles à neutrons [5], et d'avancer donc grandement dans la compréhension du comportement de la matière dans des milieux de densité extrême. ∎

Références

1• J.M. Lattimer et M. Prakash, *Phys. Rept.*, **442** (2007) 109-165, et références incluses.

2• W. Lewin et M. van der Klis, *Compact Stellar X-ray Sources*, Cambridge University Press (2010).

3• T. Strohmayer et L. Bildsten, "New views of thermonuclear bursts", dans ref. [2], pp. 113-156.

4• T. Strohmayer *et al.*, *ApJL*, **469** (1996) L9.

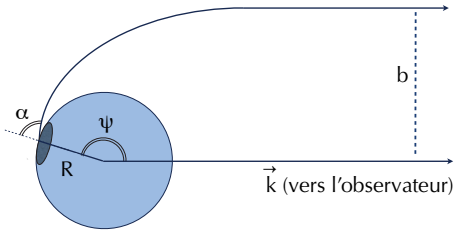
5• K.H. Lo *et al.*, *ApJ*, **776** (2013) 19.

6• C.W. Misner, K.S. Thorne et J.A. Wheeler, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco (1973).

Modélisation des oscillations périodiques d'un sursaut X

Le cadre théorique pour l'élaboration d'un modèle basé sur l'émission d'une tache brillante à la surface d'une étoile en rotation rapide fut d'abord établi en 1973 par Misner *et al.* [6]. La compacité importante de l'étoile à neutrons implique un cadre d'étude relativiste et l'utilisation d'un espace-temps dit de *Schwarzschild*, dont la déformation sous l'effet de la compacité (rapport masse/rayon) de l'étoile permet aux trajectoires des photons de se courber.

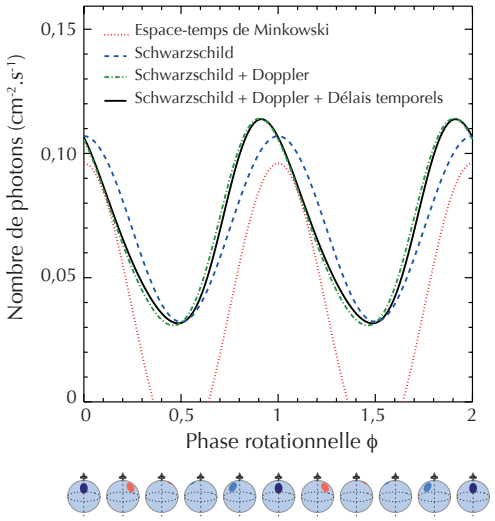
La figure E1 schématise un tel effet de courbure de la lumière. En supposant un observateur situé à une distance très grande, les conséquences de cet effet font que des photons émis par la tache lorsque celle-ci est située sur la face cachée de l'étoile parviennent tout de même jusqu'à l'observateur. Cette courbure est d'autant plus importante que la compacité de l'objet est grande.



E1. Trajectoire courbée d'un photon émis par la face cachée d'une étoile à neutrons. Cette courbure augmente avec la compacité de l'étoile.

La rotation rapide de l'étoile à neutrons a pour effet que la vitesse du point de la surface d'où est émis le photon soit proche de la vitesse de la lumière. Il faut donc calculer les effets Doppler relativistes : l'intensité du flux augmente et l'énergie des photons croît à mesure que la tache se déplace « vers » l'observateur. C'est l'inverse lorsque la tache « s'éloigne ».

Sur la figure E2, ces principaux effets sont illustrés pour un exemple typique d'étoile à neutrons (une masse égale à 1,5 masses solaires et un rayon de 12 km). La sinusoïde en pointillés rouges est calculée dans un espace pseudo-euclidien, qui ne tient pas compte des effets de la relativité générale, pour une étoile quasi statique ; le flux s'annule donc durant la période du cycle où la tache est située sur la face cachée de l'étoile. Pour la courbe en tirets bleus, on se place dans l'espace-temps de Schwarzschild ; la courbure de la lumière a pour effet que le flux ne s'annule plus et l'amplitude relative des oscillations diminue. La courbe en tirets-pointillés verts tient compte des effets Doppler ; il en résulte principalement que les profils d'oscillations deviennent asymétriques. Sous ce graphe, l'évolution correspondante de la tache au cours du cycle rotationnel est représentée. La couleur de la tache est d'autant plus bleue que sa vitesse en direction de l'observateur est importante. À l'inverse, elle est d'autant plus rouge que la vitesse d'éloignement est grande. Finalement, les délais temporels relativistes subis par les photons (effet Shapiro) lors de leur traversée du champ gravitationnel fort sont montrés sur la courbe en trait continu noir. Il s'agit d'une correction relativement mineure, qui tient compte de la distorsion du temps à proximité de l'objet compact. D'autres effets peuvent aussi modifier le profil des oscillations, comme l'angle d'observation de la tache, sa taille et sa température de surface, entre autres.



E2. Déformation des profils des oscillations de l'émission d'une tache chaude située sur une étoile en rotation rapide, sous les effets de la relativité.

Des collisions avec des ions pour la croissance de molécules au sein d'un agrégat

Actualité scientifique de l'Institut de Physique du CNRS du 27 août 2015 (extrait)

La compréhension des processus de formation des molécules complexes dans les milieux astrophysiques est un défi pour les physico-chimistes. Dans le cas de Titan, le plus grand satellite de Saturne, où la mission Cassini a observé de l'anthracène, le bombardement de la haute atmosphère par des ions oxygène dont l'énergie est de quelques keV pourrait favoriser la croissance de grosses molécules. C'est ce que viennent de montrer des physiciens du Centre de recherche sur les ions, les matériaux et la photonique – CIMAP (CNRS/CEA/Ensicaen/Unicaen), de l'Université de Stockholm et de l'Université Autonome de Madrid, grâce à des expériences menées au GANIL (Caen) et des analyses théoriques [1].

Pour cette expérience, les physiciens ont formé, sous vide, des agrégats comprenant une quinzaine de molécules de pyrène, un hydrocarbure aromatique polycyclique de formule $C_{16}H_{10}$. Ces agrégats sont alors soumis à des collisions avec des ions d'oxygène ou d'argon, dont l'énergie est de quelques keV. En analysant le résultat de ces collisions à l'aide d'un spectromètre de masse, les chercheurs ont découvert la présence de nouvelles espèces chimiques de masse supérieure à celle des molécules originales et provenant de la réaction entre deux voire trois molécules ou fragments de molécules. Une modélisation théorique à l'aide des outils de la chimie quantique a permis aux physiciens d'élucider les processus mis en jeu lors de la collision. Une partie de l'énergie de l'ion est déposée dans l'agrégat par interaction avec le nuage électronique, ce qui conduit à la dissociation de l'agrégat à l'échelle de la picoseconde. Pendant ce processus relativement lent, un mécanisme beaucoup plus rapide est à l'œuvre. La collision entre l'ion et les noyaux atomiques arrache un ou plusieurs atomes des molécules et produit des fragments très réactifs qui forment des liaisons covalentes avec les molécules voisines en quelques femtosecondes, soit bien avant que l'agrégat ne se dissocie. Le très bon accord entre les simulations numériques[(a)] et les expériences valide cette interprétation.

(a) Voir la vidéo « Quand un ion rapide soude deux molécules », sur www.dailymotion.com ou sur le site du CNRS/INP.

Référence

[1] R. Delaunay *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.* **6** (2015) 1536-1542.

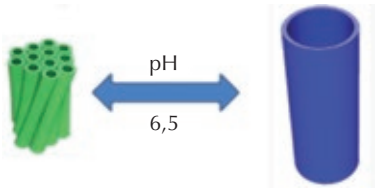
Contact

Patrick Rousseau (prousseau@ganil.fr)

Des nanotubes autoassemblés qui changent de diamètre sur commande

Actualité scientifique de l'Institut de Physique du CNRS du 25 août 2015 (extrait)

On sait aujourd'hui concevoir des objets de tailles et de formes variées, par autoassemblage de molécules en solution. Toutefois, il est impossible de modifier la morphologie de ces constructions par un stimulus externe. En utilisant la triptoréline, un peptide dont la forme change selon l'acidité de la solution dans laquelle il nage, des physiciens de l'Institut de physique de Rennes, du CEA-IBITECS, de l'université Rennes 1 et d'Ipsen ont réalisé pour la première fois des nanotubes autoassemblés, qui peuvent changer de diamètre alors qu'ils sont déjà constitués [1].



1. Schéma des nanotubes formés par autoassemblage de la triptoréline à bas pH (vert) et à haut pH (bleu).

Lorsque la poudre de triptoréline est mise dans l'eau, un gel apparait au bout de quelques heures. Les chercheurs ont tout d'abord identifié la présence dans les gels de nanotubes présentant des diamètres variables, grâce à des mesures de diffraction de rayons X effectuées au synchrotron Soleil. Par microscopie électronique, ils ont pu déterminer le diamètre des tubes formés : 10 ou 50 nanomètres, selon que le pH est inférieur ou supérieur à 6,5 (fig. 1).

Les chercheurs ont ensuite identifié le mécanisme responsable du changement de diamètre, en combinant les spectroscopies vibrationnelles avec la diffusion et la diffraction des rayons X. La clef de ce mécanisme repose sur l'un des acides aminés du peptide, l'histidine, qui, selon le pH, peut fixer ou non un proton. En milieu acide, le proton fixé par l'histidine est à l'origine d'une répulsion électrostatique qui impose une conformation particulière au peptide. Lors de la neutralisation du pH, en perdant cet hydrogène, l'histidine devient neutre, mais ne perd pas son affinité pour les protons et remplace celui de l'eau par un hydrogène appartenant à la fonction alcool d'un autre acide aminé du peptide à travers une liaison hydrogène. Cela a pour effet de bouleverser sa conformation. Les caractéristiques géométriques des autoassemblages dépendent bien évidemment de la conformation initiale du peptide, qui dépend de l'acidité du milieu. Les nanotubes s'adaptent dynamiquement au changement d'acidité en changeant de diamètre.

Référence

[1] C. Valery *et al.*, *Nature Communications* **6** (2015) 7771.

Contacts

Franck Artzner (franck.artzner@univ-rennes1.fr) et
Marie-Thérèse Paternostre (maite.paternostre@cea.fr)

Cyclones dans des bulles de savon

Hamid Kellay (hamid.kellay@u-bordeaux.fr)
Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine (LOMA), UMR 5798 CNRS/Université de Bordeaux, 351 cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

Une bulle de savon chauffée à son équateur peut être le théâtre d'une agitation importante, avec l'apparition à sa surface de différentes structures : des panaches thermiques donnant naissance à un écoulement turbulent, et des tourbillons solitaires avec une dynamique propre.

Nos expériences se sont focalisées sur les propriétés à la fois de cette turbulence, mais aussi de ces tourbillons solitaires.

Malgré la simplicité de ces objets, les résultats qu'on obtient sont parfois étonnants, notamment par leur analogie avec les cyclones terrestres.

Remerciements

L'auteur remercie F. Seychelles, F. Ingremeau, T. Meuel, M. Bessafi, C. H. Bruneau, P. Fischer et G. Prado pour leurs contributions à ces recherches, ainsi que E. Maillard et S. Bosio pour leurs réalisations des montages expérimentaux. Ce travail a bénéficié d'un financement de l'ANR pour le projet « Cyclobulle ».

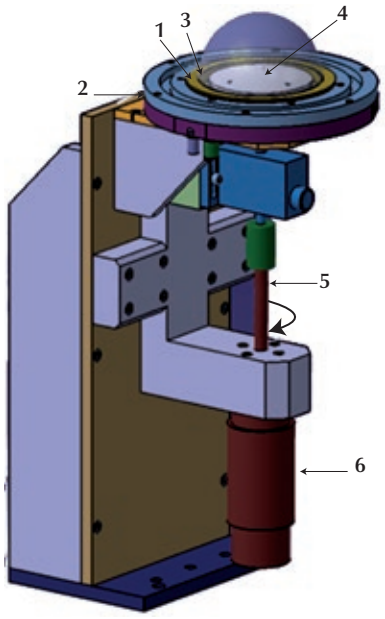
Apprivoiser la bulle

Mettez un peu d'eau savonneuse dans une assiette, prenez une paille et soufflez un peu d'air dans cette eau. Le résultat est intuitif : des bulles de savon, ou plutôt des demi-bulles de savon, se forment et flottent sur l'eau. Si l'eau est assez chaude (50 °C par exemple) et si vous observez la surface des bulles attentivement, vous remarquerez que des mouvements animent cette surface.

Partant de cette simple observation, nous avons réalisé au laboratoire des montages expérimentaux, dont la géométrie et le chauffage sont plus contrôlés (fig. 1). L'eau savonneuse est versée dans une rainure gravée dans un disque de laiton, et chauffée à la bonne température. Une pipette fixée à un tube flexible est utilisée pour souffler la demi-bulle de savon. La température de l'air ambiant autour de la bulle est contrôlée, permettant l'établissement d'un gradient de température sur la surface de la bulle entre l'équateur et le pôle. Ce gradient est mesuré soit avec un thermocouple, soit avec une caméra infrarouge.

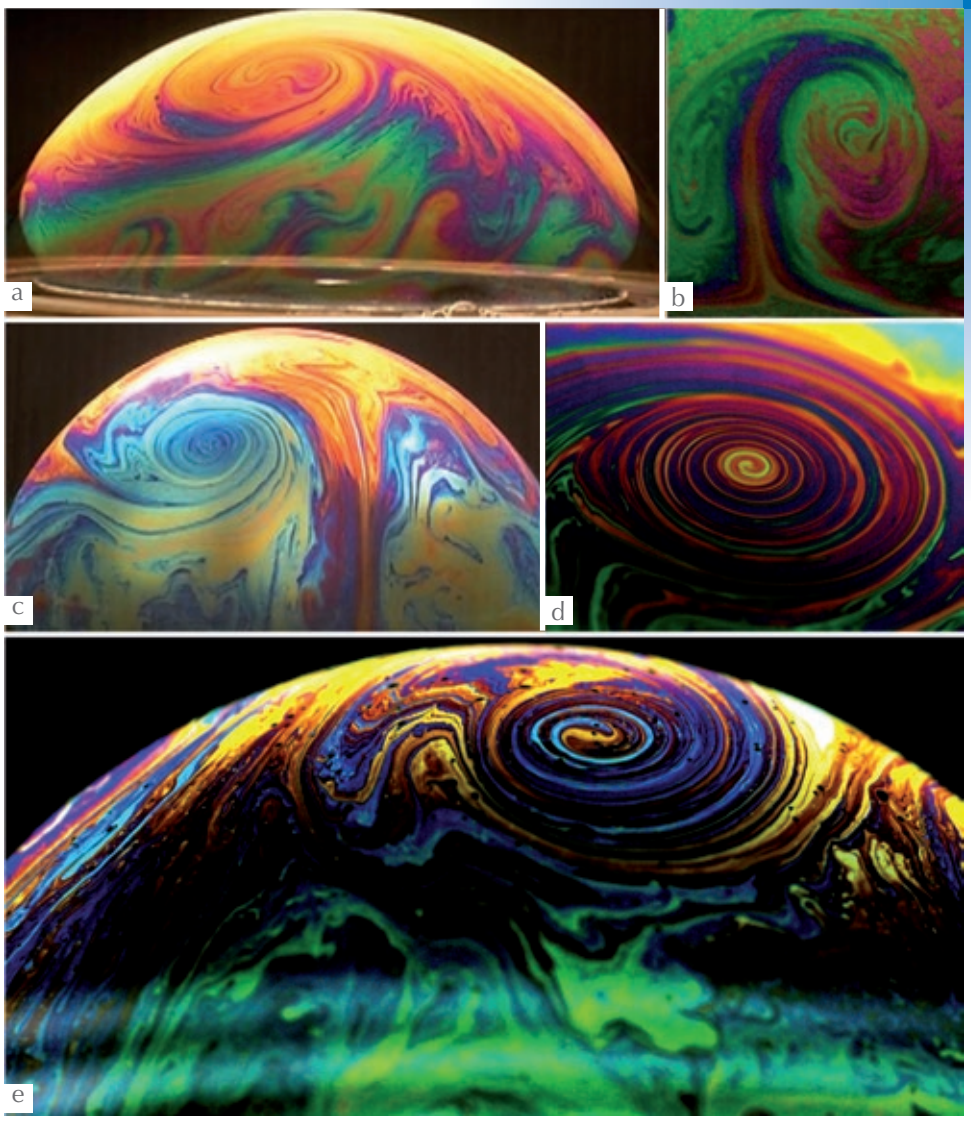
Le fait de chauffer le socle sur lequel la demi-bulle repose favorise les mouvements à la surface de cette pellicule très fine (de quelques micromètres d'épaisseur), constituée d'un film d'eau et de tensioactifs. L'origine de ces mouvements est liée aux variations de la tension superficielle de la solution de savon avec la température, mais surtout à la dilatation thermique de cette solution qui est l'effet dominant [1]. Cette agitation peut être plus ou moins intense en fonction de la différence de température entre l'équateur et le pôle.

Pour voir ce qui se passe à la surface, nous utilisons une caméra couleur et une source de lumière blanche avec un écran diffuseur pour éclairer la bulle et faire ressortir les couleurs d'interférences



1. Montage expérimental. Un disque en laiton (1) avec une rainure circulaire (3) peut tourner en utilisant un moteur (6) relié par un arbre (5). Ce disque est chauffé par la proximité d'un creux en forme d'anneau (2) relié à un bain à circulation d'eau. La bulle est soufflée à l'aide d'une pipette à travers la solution de savon dans la rainure (3). La face interne du disque de laiton est recouverte d'un revêtement de téflon de 2 mm d'épaisseur (4), afin de minimiser l'échauffement de l'air à l'intérieur de la bulle. La température à l'équateur de la bulle est régulée par la température du bain d'eau.

correspondant à des variations locales de l'épaisseur du film de savon et grâce auxquelles les écoulements à la surface de la bulle peuvent être observés (voir dans la référence [2] d'autres expériences utilisant les films de savon comme milieu bidimensionnel pour étudier les écoulements). La figure 2 montre les panaches thermiques émanant de l'équateur de la bulle : plus chauds et moins denses que les régions environnantes, ils s'élèvent vers le pôle. Ces panaches ou « plumes thermiques » sont essentiels pour transporter la chaleur



2. Photos de panaches et tourbillons observés dans des bulles de savon soumises à un gradient de température. Les images (a) et (b) montrent le détachement de panaches thermiques à proximité de l'équateur. L'image (c) montre la formation d'un tourbillon à partir d'un panache géant qui lui-même est le résultat de la fusion de plusieurs panaches de petite taille. L'image (d) montre un zoom sur un tourbillon solitaire. L'image (e) montre la bulle complète avec un tourbillon proche du pôle. Les couleurs sont des couleurs d'interférences de lumière blanche réfléchie par la mince couche d'eau, de quelques micromètres d'épaisseur, constituant la bulle. Les différentes couleurs correspondent à des épaisseurs différentes du film d'eau savonneuse. Le diamètre typique des bulles est de 12 cm.

des régions chaudes à l'équateur vers les régions plus froides au pôle. Cette convection thermique est très répandue dans plusieurs contextes industriels et naturels, allant d'une casserole d'eau bouillante à la dynamique du manteau terrestre ; elle a suscité et continue de susciter l'intérêt des scientifiques et des ingénieurs.

Que nous raconte la bulle ?

Dans notre contexte, la bulle est une cellule de convection non conventionnelle et sans murs latéraux, contrairement à la majorité des expériences effectuées jusqu'à présent. De plus, en augmentant le gradient de température au-delà d'un certain seuil, l'écoulement sur la surface de la bulle devient turbulent et des tests des lois d'échelle régissant la convection turbulente peuvent être effectués, à la fois pour les fluctuations de vitesse et pour les fluctuations de température [3]. Ce type de tests reste difficile à explorer dans les cellules conventionnelles, notamment à cause des murs latéraux.

Sur la bulle, les plumes et la convection thermique sont accompagnées de temps en temps de tourbillons solitaires qui émergent de cette agitation. Ces tourbillons se forment généralement quand un grand panache, résultant de la fusion de quelques plumes plus petites, s'élève à proximité du sommet de la bulle (photographie c de la figure 2). Une fois formés, les tourbillons peuvent être suivis en utilisant l'imagerie vidéo. Un tourbillon solitaire de ce genre est visible sur la figure 2d. On notera qu'il a un centre bien défini et se développe comme une structure en spirale, de dimensions comprises entre 1 et 2 cm. Ces tourbillons simples peuvent également être obtenus dans les simulations numériques de la convection thermique à deux dimensions sur une surface sphérique, de sorte qu'ils ne sont pas particuliers à des bulles de savon [3].

Des tourbillons solitaires tels que ceux observés ici ne sont pas très communs dans les écoulements de fluides. En général, les tourbillons viennent en paires comme dans le sillage derrière un obstacle, où une allée dite de Bénard-von Karman est produite avec des paires de tourbillons se détachant régulièrement derrière l'obstacle. Des tourbillons solitaires peuvent par contre être observés à la surface de certaines planètes et suscitent dans la communauté scientifique un débat sur leur durée de vie (comme pour la tache rouge de Jupiter), leur structure ou leur emplacement. La nature quasi bidimensionnelle des écoulements atmosphériques à grandes échelles a été évoquée comme une des raisons de la stabilité de ces structures. Dans notre cas, les raisons exactes de la formation et la présence de ces tourbillons solitaires de longue durée de vie (plusieurs secondes) ne sont pas claires, mais rappelons que le système est quasi bidimensionnel vu la faible épaisseur du film de savon. En outre, dans une cellule de convection classique, une circulation globale et persistante peut avoir lieu. Il se peut que dans notre cellule sans murs, ces tourbillons soient les analogues ou les reliquats de cette circulation globale.

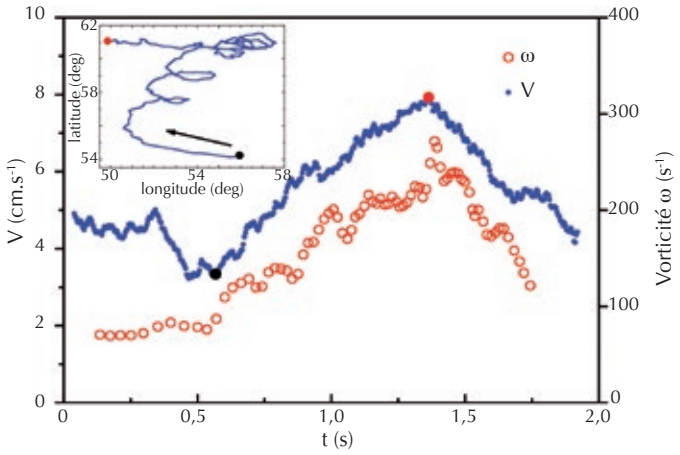
Notre système permet par contre d'étudier en détail les propriétés de ces structures. L'écoulement a lieu dans une couche très mince comparée à la taille de la bulle, la courbure est naturellement présente

›››

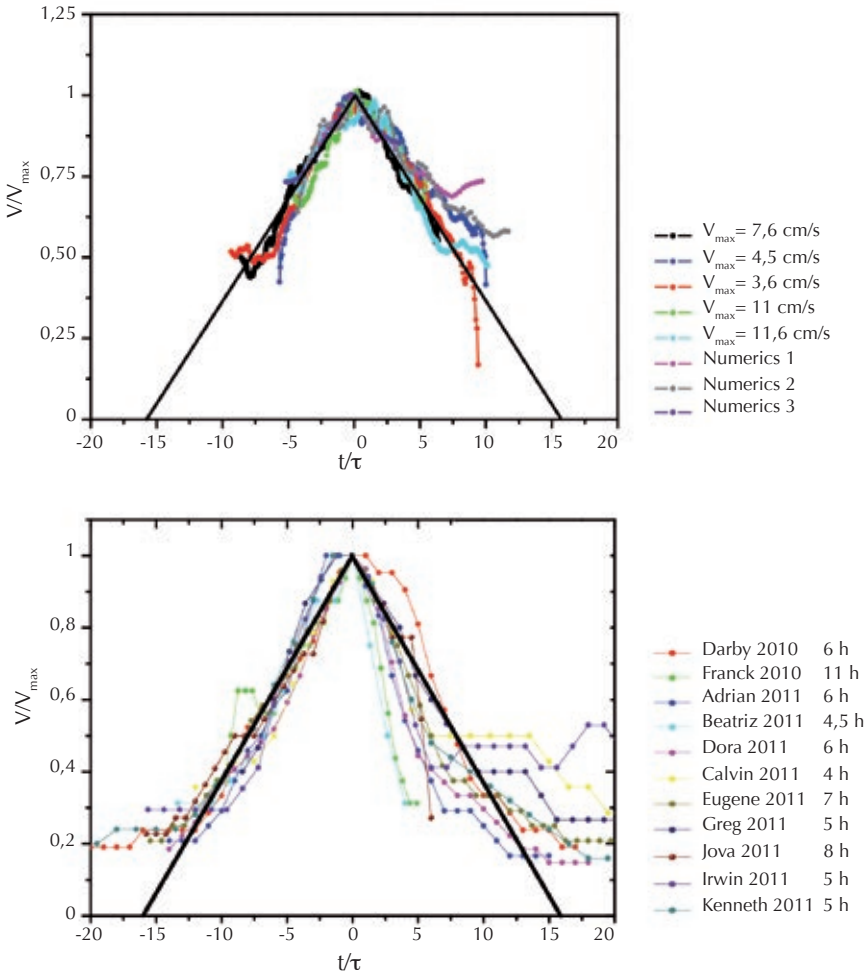
(la bulle est sphérique), et une rotation peut être ajoutée pour se rapprocher le plus possible d'un modèle de laboratoire des écoulements atmosphériques. À cet effet, le montage expérimental a été modifié de telle sorte que des fréquences de rotation allant jusqu'à deux tours par seconde puissent être imposées (voir schéma du montage dans la figure 1). L'effet de la rotation de la bulle se révèle non trivial, car cette rotation inhibe la présence de tourbillons de longue durée de vie et les confine à des régions proches du pôle [4, 5]. Tandis que le sens de rotation de ces tourbillons peut être horaire ou antihoraire avec une probabilité égale pour le cas sans rotation, la rotation de la bulle fixe le sens de rotation des tourbillons qui sont majoritairement cycloniques, c'est-à-dire qu'ils tournent dans le même sens que la bulle.

Une question importante qui peut être traitée en détail dans nos expériences concerne le champ de vitesse autour du tourbillon et sa variation en fonction de la distance au centre et du temps. Les mesures peuvent être réalisées sur de longues périodes (plusieurs fois le temps nécessaire pour faire un tour complet autour du centre du tourbillon, qui est de l'ordre de 0,1 s), car ces tourbillons peuvent persister pendant plusieurs dizaines de secondes. Elles sont effectuées par le suivi temporel d'inhomogénéités d'épaisseur de la bulle autour du tourbillon, permettant des mesures à différentes distances du centre (dans le référentiel du centre du tourbillon). L'analyse des champs de vitesses déterminés par corrélation d'images ou par suivi d'inhomogénéités d'épaisseur permet d'obtenir à la fois la vitesse et la vorticité (le rotationnel du vecteur vitesse, indiquant un taux de rotation local) autour du tourbillon. Alors que la vorticité est maximale au centre du tourbillon, la vitesse augmente, passe par un maximum et finit par décroître au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre. La dépendance trouvée est bien connue : c'est un tourbillon gaussien, dont la vitesse à grande distance (r) du centre décroît en $\exp(-r^2)$; cela permet de décrire le champ de vitesse des tourbillons dans les écoulements peu profonds, et ressemble à l'expression utilisée pour modéliser les cyclones terrestres.

Un exemple de variation temporelle de la vitesse, dans le référentiel du centre du tourbillon et à une distance fixe de ce centre, est illustré dans la figure 3.



3. Dynamique à temps longs de la vitesse tangentielle (ronds bleus pleins, axe de gauche) et de la vorticité (ronds rouges vides, axe de droite) autour du centre d'un tourbillon solitaire. La mesure de la vitesse est faite à une distance fixe (6 mm) du centre du tourbillon. L'insert montre la trajectoire du centre du tourbillon en latitude et longitude, et son mouvement trochoïdal, visible pendant la phase d'augmentation de vitesse (intensification) située entre les points noir et rouge.



4. Comparaison des dynamiques d'intensification et de déclin des tourbillons en expérience (bulles), simulation numérique et conditions réelles (ouragans). La vitesse à une distance fixe du centre du tourbillon est normalisée par la vitesse maximale, et le temps, normalisé par un temps caractéristique τ, est déplacé de sorte que la position de la vitesse maximale est à zéro. (a) Cinq événements d'intensification différents pour des fréquences de rotation de la bulle de 0,2 ou 0,6 Hz, et trois événements d'intensification de tourbillons de simulations numériques. (b) Intensification de plusieurs ouragans dans le Pacifique Nord-Est, identifiés à droite de la figure par leurs noms et leurs temps caractéristiques.

Cette variation temporelle montre une période de faible intensité (faible vitesse) suivie d'une période d'augmentation de la vitesse (dite « intensification »), puis d'une période de déclin. Le tourbillon suivi ici finit par réduire sa vitesse et, à la fin, disparaît pratiquement dans l'écoulement environnant.

Pendant la période d'intensification, la trajectoire du centre du tourbillon montre un mouvement particulier connu sous le nom de *mouvement trochoïdal* : comme on le voit dans l'insert de la figure 3, le centre du tourbillon vacille à quelques reprises autour de sa position moyenne. La période d'oscillation du centre est à peu près un temps de révolution (de l'ordre de 0,1 s). Ce type de mouvement du centre du tourbillon, circulaire ou elliptique superposé à une dérive, a été observé et documenté pour certains cyclones tropicaux et a donné lieu à beaucoup de débats sur son origine et son lien avec l'intensité (vitesse) du tourbillon. Dans notre cas, ce lien n'est pas clair, car ce mouvement trochoïdal a été observé à la fois pour la phase d'intensification comme pour l'exemple cité plus haut, mais aussi pendant la phase de déclin pour d'autres tourbillons. Différentes raisons ont été proposées pour expliquer ces oscillations : l'instabilité de l'œil du tourbillon ou l'existence d'un double œil. Nos mesures de vitesse semblent exclure l'hypothèse du double œil, car nos visualisations ne semblent pas indiquer de grandes déformations du centre du tourbillon au cours de cette phase.

Revenons maintenant à la variation de la vitesse de rotation des tourbillons en fonction du temps. Dans la figure 4a, plusieurs événements d'intensification des tourbillons sur la bulle de savon ainsi que de tourbillons issus de nos simulations numériques sont présentés. Notez que les deux ensembles de données montrent une période d'intensification où la vitesse augmente jusqu'à une valeur maximale, notée V_{max}, suivie d'une baisse de l'intensité. L'échelle de temps dans ce graphique a été translatée, de sorte que V_{max} se produit à temps zéro, et a été normalisée par un temps caractéristique τ. La vitesse a été normalisée par V_{max}. Une caractéristique surprenante de ce graphique est que par un simple changement d'échelle de la vitesse et du temps, toutes nos données se superposent sur une seule courbe. Cette superposition indique que la dynamique de l'intensification présente des caractéristiques similaires pour différents tourbillons à différentes fréquences de rotation de la bulle, ainsi que pour les tourbillons issus des simulations numériques. Le temps caractéristique τ utilisé pour adimensionner les données varie d'un tourbillon à un autre, mais se situe autour d'une valeur moyenne d'environ 0,07 s, aussi bien pour les tourbillons issus de la bulle de savon que dans les simulations numériques. Ce temps est comparable au temps de révolution de ces tourbillons (~ 0,1 s). Alors que le temps τ semble être bien défini, la vitesse maximale atteinte par le tourbillon ne semble pas suivre de règle particulière et des vitesses différentes ont été observées, allant d'environ 3 à 12 cm/s.

La dynamique à temps longs de ces tourbillons semble donc bien décrite par une relation simple : $V(t) = V_{max}(1 - |t|/16\tau)$, où la vitesse augmente linéairement avec le temps avant le maximum et décroît linéairement après le maximum. Cette relation peut être réécrite comme $dV/dt = \pm V_{max}/16\tau$, indiquant que le taux dV/dt d'intensification ou de déclin des tourbillons est lié simplement à la vitesse maximale que le tourbillon peut atteindre, et au temps τ. Si ce dernier est lié au temps de révolution de ces tourbillons comme le montrent nos expériences, la vitesse maximale que peut atteindre le tourbillon est codée dans les taux d'intensification et de déclin, i.e. dV/dt. Pour l'instant, nous n'avons pas d'explication de cette relation. De plus, nous ne connaissons pas d'autres expériences où les vitesses de rotation de tourbillons isolés sont mesurées sur des temps longs et dont la dynamique puisse être comparée à celle déduite de nos mesures.

Osons l'analogie

Un cas où cette dynamique à temps long est bien documentée est celui des cyclones tropicaux. Ces tourbillons géants ont aussi un cycle d'intensification et de déclin qui rappelle ce que nous avons observé sur les bulles. Tout en gardant à l'esprit les grandes différences dans les mécanismes ainsi que dans l'énergétique des tourbillons de savon et des cyclones tropicaux, la question de savoir si ces similitudes qualitatives (mouvement trochoïdal, intensification et déclin) peuvent être rendues plus quantitatives a été examinée.

Dans la figure 4b, nous montrons la variation de la vitesse des vents V(t) en fonction du temps t pour quelques cyclones tropicaux. Notez que cette figure utilise la même normalisation que la figure 4a pour superposer les données. La figure 4b montre que cette normalisation fonctionne raisonnablement bien pour l'ensemble des données avec des constantes de temps τ qui varient, mais qui tournent autour de 6 heures. Cette superposition des données montre qu'elles obéissent à la même règle de variation que celle trouvée pour nos tourbillons (en bulles de savon ou numériques), sauf que la constante de temps est propre à chaque système : autour de 6 heures pour les cyclones (une analyse de 171 cyclones suggère que τ a une moyenne de 6 heures avec un écart type d'environ 2 heures [4]) et autour de 0,07 seconde pour nos tourbillons. Chaque système semble donc être caractérisé par une constante de temps particulière. La superposition des données proposée ici indique que la dynamique d'intensification des tourbillons peut avoir un caractère générique indépendant de la nature exacte du tourbillon. Un tel caractère peut s'avérer très utile [6] : connaissant la constante de temps et le taux d'intensification initial, l'intensité (vitesse des vents) maximale que le cyclone ou le tourbillon peut atteindre, ainsi que le moment où elle sera atteinte, peuvent être estimés.

Ainsi, les objets du quotidien peuvent enfermer quelques secrets qu'on peut extraire si on a la patience de les apprivoiser et de les observer. Les mouvements dans la bulle de savon ont une analogie avec des phénomènes naturels trois cent mille fois plus lents, analogie qui se révèle bien plus féconde qu'on aurait pu l'imaginer au départ. ▮

En savoir plus

1• B. Martin et X.L. Wu, *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998) 1891.

2• Y. Couder, « Les tourbillons de l'atmosphère », *Science et Vie*, n°**161** (1987) 128-133.

3• F. Seychelles *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 264502.

4• T. Meuel *et al.*, "Intensity of vortices: from soap bubbles to hurricanes", *Sci. Rep.* **3**, 3455 ; DOI:10.1038/srep03455 (2013).

5• T. Meuel *et al.*, "Hurricane track forecast cones from fluctuations", *Sci. Rep.* **2**, 446 ; DOI:10.1038/srep00446 (2012).

6• "How Bubbles could help measure hurricane intensity", *Bulletin of the American Meteorological Society, News and Notes* (avril 2014), p. 505.

Le présent article est partiellement basé sur le texte anglais suivant :
www.labnews.co.uk/features/soap-bubbles-in-a-spin/

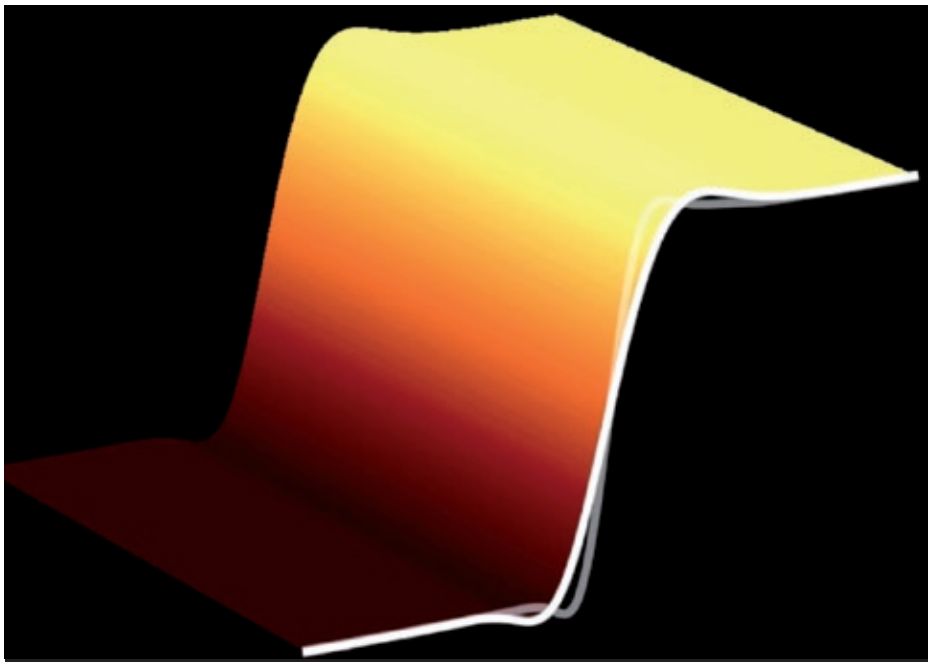
La transition vitreuse aux interfaces

Thomas Salez (thomas.salez@espci.fr) et **Élie Raphaël**
Laboratoire de Physico-Chimie Théorique, UMR CNRS 7083 Gulliver, ESPCI-ParisTech, PSL Research University, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05

Nous sommes au vingt-et-unième siècle. Tous les changements d'état de la matière sont décrits par la théorie des transitions de phases. Tous ? Non. Un phénomène résiste encore et toujours aux investigations théoriques : la transition vitreuse.

De surcroît, cette dernière semble modifiée dans les films minces de polymères, ce qui pourrait d'une part nous renseigner sur ses mécanismes intimes, et d'autre part remettre en cause l'utilisation de ces films au travers d'applications prometteuses. Il apparaît donc essentiel de mesurer et comprendre les effets du confinement et des interfaces sur la transition vitreuse.

Remerciements
Ces résultats sont le fruit d'une collaboration internationale et interdisciplinaire incluant : James Forrest (Perimeter Institute et University of Waterloo, Canada), Kari Dalnoki-Veress (McMaster University, Hamilton, Canada), Yu Chai (Waterloo University, Canada), Joshua McGraw (LPS, ENS, Paris, France), Justin Salez (Université Paris Diderot, France), Oliver Bäumchen (Max Planck Institut, Göttingen, Allemagne), et Michael Benzaquen (CFM, Paris, France). Nous les remercions vivement.



La surface d'un nanofilm vitreux relaxe dans le temps ! Image de surface (AFM, couleurs artificielles) prise au cours de la relaxation d'une nanomarche de polystyrène vitreux ($T = 40°C = T_g - 30°C$), de poids moléculaire 3 kg/mol.

La transition vitreuse

Quel est le mécanisme responsable de la transition vitreuse, ce changement d'état entre un liquide visqueux et un solide amorphe obtenu par refroidissement rapide, alors même que les structures atomiques sous-jacentes paraissent peu modifiées ? Pourquoi ce phénomène physique apparemment anodin, et maîtrisé par les souffleurs de verre depuis la Rome antique, se révèle-t-il si difficile à comprendre et tellement différent de la transition liquide-solide classique ?

Ces questions ne sont pas nouvelles et continuent de faire couler beaucoup d'encre, compte tenu de la place occupée par les verres et les plastiques dans l'art, l'industrie et les nanotechnologies, ainsi que leur grande diversité : des verres moléculaires aux verres organiques de polymères, en passant par les verres métalliques, les verres de *spins*, les verres colloïdaux ou les milieux granulaires encombrés.

Coopérativité et confinement

Malgré l'absence de théorie unifiée, un concept central s'est peu à peu imposé dans les années 1960 pour décrire la dynamique des verres : la *coopérativité*. Dans un liquide usuel, les mouvements moléculaires ne sont pas corrélés. En revanche, au sein des matériaux vitreux, la dynamique s'effectuerait *via* des régions de taille ξ dans lesquelles les molécules se réarrangeraient collectivement. Cette échelle de longueur de coopérativité, supposée diverger à température finie, a fait et continue de faire l'objet d'intenses recherches.

Malheureusement, il est illusoire d'espérer observer des réarrangements structurels macroscopiques dans l'état vitreux, en raison des temps mis en jeu qui sont colossaux par rapport à la durée d'une expérience usuelle. De même, il est impossible de traquer des molécules uniques en volume avec les techniques actuelles de

microscopie. On ne peut donc pas mesurer ξ dans un verre massif.

Une solution alternative a germé dans les années 1990 : fabriquer des échantillons de taille comparable à ξ et observer leurs anomalies. Cependant, l'unité élémentaire de mesure de ξ étant par définition une taille de molécule, il fallait pouvoir fabriquer et observer dynamiquement des échantillons stables de quelques tailles moléculaires. Tâche *a priori* impossible. Sauf avec les films de polymères, et ce pour trois raisons : d'une part, les macromolécules amplifient les tailles moléculaires ; d'autre part, leurs enchevêtrements confèrent aux films des propriétés de stabilité remarquables, comme l'ont bien remarqué les industriels ; enfin, la fabrication des échantillons est relativement aisée par enduction centrifuge[(1)].

Anomalies dans les nanofilms de polymères

Comme nombre de matériaux, un film de polymère se dilate avec la température. Cette dilatation peut être détectée et quantifiée précisément par ellipsométrie (une mesure du changement de polarisation de la lumière après réflexion sur l'échantillon). En diminuant la température, le matériau se contracte progressivement avec un coefficient de dilatation thermique constant. Puis, à une température donnée – de l'ordre d'une centaine de degrés Celsius pour le polystyrène, par exemple – la valeur numérique du coefficient de dilatation chute : c'est la transition vitreuse. Cette méthode de dilatométrie, semblable à ses consœurs telles que la calorimétrie, permet donc de mesurer la température T_g de transition vitreuse.

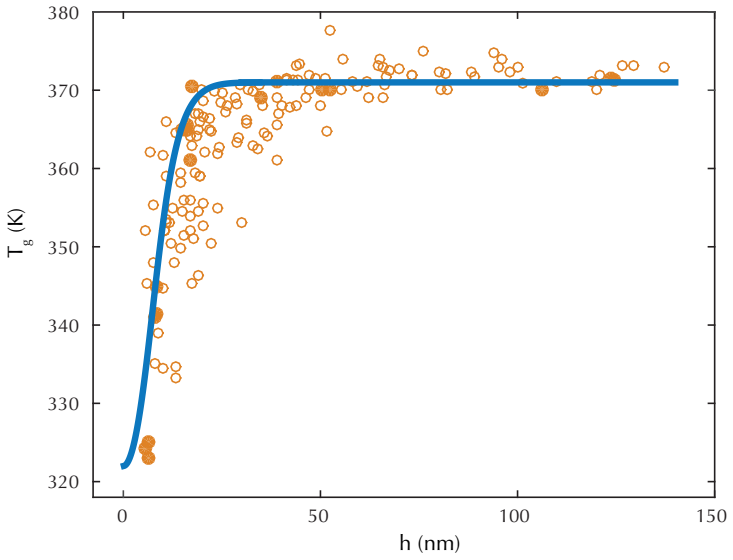
Ainsi, plusieurs équipes sont parvenues à montrer que la température de transition vitreuse d'un film de polystyrène dépend de son épaisseur moyenne, quand cette dernière est inférieure à 50 nm (fig. 1). De plus, des études de dynamique locale, réalisées par exemple à l'aide de l'enfoncement de nanoparticules d'or, de l'observation de fluctuations thermiques, ou du suivi de traceurs, révèlent une seconde anomalie dans les films : l'existence d'une couche superficielle plus mobile, de quelques nanomètres d'épaisseur. Mais l'ensemble de ces observations demeure fortement controversé. L'origine et les propriétés de cette couche sont indéterminées, et le lien avec le décalage de T_g reste hypothétique.

Enjeux des films minces et de leur rhéologie

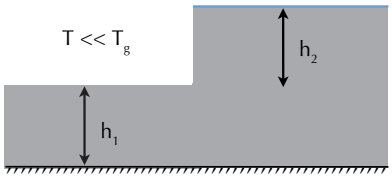
Les microfilms et nanofilms – liquides, élastiques ou vitreux – de polymères sont d'une grande importance dans de nombreux champs scientifiques interdisciplinaires, tels que la physico-chimie, la physiologie, la biophysique, la microélectronique ou la chimie des surfaces. Outre leur intérêt sur le plan fondamental, ils entrent en jeu dans des processus industriels tant optiques que mécaniques ou chimiques, au travers de la nanolithographie, de la lubrification, des peintures, des traitements de surface et des membranes élastiques. Il en ira vraisemblablement de même dans l'avenir avec le développement de l'électronique moléculaire, des dispositifs souples d'affichage multimédia, de la biomimétique, de la superadhésion ou encore des surfaces autonettoyantes. À titre d'exemple, ces films sont des candidats potentiels pour le stockage massif de données, au travers du projet *Millipede* d'IBM. Ce dernier consiste à indenter des films minces de polymères à l'échelle nanométrique afin d'y graver mécaniquement de l'information, et ainsi augmenter considérablement les densités surfaciques de stockage.

Au travers de ces applications potentielles, on conçoit aisément qu'une compréhension fine de la physique qui régit la stabilité et la dynamique de ces systèmes est une étape importante. L'épaisseur typique (10-100 nm) des nanofilms de polymères étant comparable à la taille caractéristique des macromolécules constitutives, l'effet de confinement est susceptible d'altérer fortement les propriétés de ces dernières. La nanorhéologie de ces objets soulève donc de nombreuses questions vivement débattues à ce jour, à la frontière du continu et du discret. Outre les anomalies de transition vitreuse au cœur de cette étude, citons deux exemples. Tout d'abord, les modifications des conformations intramoléculaires et des enchevêtrements intermoléculaires aux abords des surfaces et dans des géométries confinées, pourraient affecter directement la viscosité et donc la stabilité des films. Ensuite, les phénomènes interfaciaux étant dominants dans les films minces, les propriétés de ces derniers pourraient dépendre du glissement aux bords, fortement amplifié pour des polymères enchevêtrés.

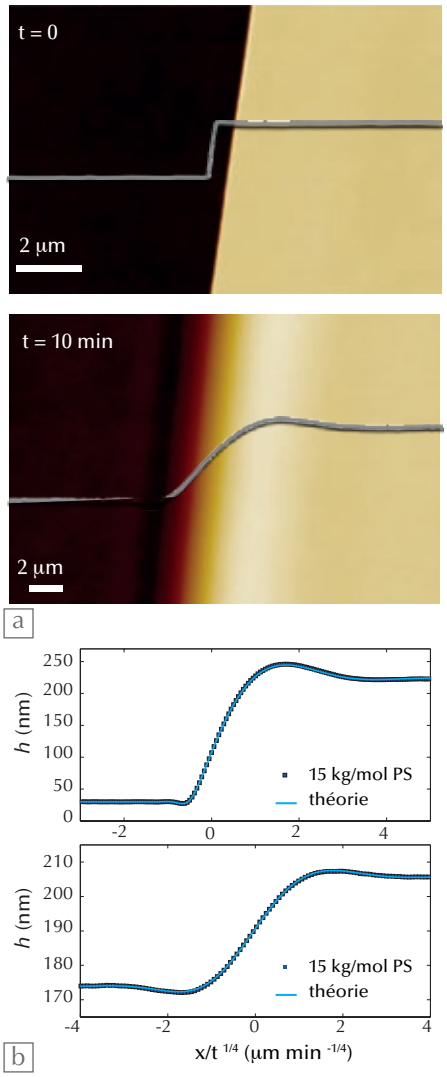
›››



1. Position du problème. Température T_g de transition vitreuse de films de polystyrène placés sur des substrats de silicium, mesurée par dilatométrie, en fonction de l'épaisseur h des films. Les ronds représentent les données de la littérature. L'hypothèse microscopique des chaînes coopératives aléatoires (voir fin de l'article) permet de quantifier la mobilité moléculaire locale et donc la température de transition vitreuse (trait plein).



2. Système et notations. Après fabrication, l'échantillon est un film de polystyrène en forme de marche d'escalier – une nanomarche – formé de deux couches d'épaisseurs h_1 et h_2 de l'ordre de 100 nanomètres, à température ambiante T très inférieure à la température de transition vitreuse T_g.



3. Observations. (a) Images en microscopie à force atomique de la relaxation d'une nanomarche de polystyrène liquide ($T > T_g$), de poids moléculaire 15 kg/mol, au cours du temps t. Les contraintes capillaires dans les coins de la marche sont telles que la pression de Laplace[2] engendre un écoulement visqueux et des oscillations de surface. (b) Comparaison entre profil expérimental h(x,t), où x est la position horizontale, et modèle hydrodynamique, pour deux hauteurs de marche à t = 10 min. Le seul paramètre ajustable est un facteur d'étirement horizontal directement relié à la viscosité du film liquide, et qui permet donc sa mesure précise.

La méthode des nanomarches

Afin de comprendre les anomalies de transition vitreuse dans les films minces, et plus généralement la rhéologie de ces objets, il faut une nanosonde, c'est-à-dire un dispositif permettant de mesurer les phénomènes physiques aux échelles nanométriques. Par exemple, pour comprendre si un matériau coule et quantifier son écoulement, il suffit de déformer sa surface et d'observer son évolution. C'est l'expérience que l'on fait instinctivement en perturbant la surface du miel dans un pot à l'aide d'une cuillère. La déformation s'estompe progressivement sous l'effet de la gravité qui tend à aplatir la surface. Cette relaxation s'opère sur un temps d'autant plus long que le liquide est froid, et donc visqueux. Ce temps caractéristique est une mesure directe de la viscosité du matériau.

À l'échelle nanométrique, le moteur est la tension de surface (qui contrôle par ailleurs la forme des petites gouttes d'eau et des bulles de savon) : elle l'emporte sur la gravité. Ainsi, en déformant l'interface libre d'un nanofilm de polymère placé sur un substrat rigide, et en observant son aplanissement capillaire sur plusieurs dizaines de minutes, on peut remonter à la mobilité interne du matériau [1]. Le dispositif développé consiste plus précisément à fabriquer des nanofilms de polystyrène fondu en forme de marches d'escalier (fig. 2), en superposant deux films plats d'épaisseur typique ~ 100 nm et de largeurs différentes, puis à observer leur relaxation à l'aide d'un microscope à force atomique (fig. 3a). L'évolution et la forme des profils étant décrites par la mécanique des fluides, on peut ainsi calibrer cette nanosonde avec précision (fig. 3b).

Mesure de la mobilité de surface

À l'aide de la méthode des nanomarches, il est alors possible d'étudier la relaxation capillaire de films de polystyrène en dessous de leur température de transition vitreuse [2]. La conclusion est surprenante : un verre mince de polymère coule ! Cet écoulement a lieu sur quelques heures, et subsiste sur plusieurs dizaines de degrés en dessous de T_g, alors qu'un échantillon épais aux mêmes températures ne semble pas relaxer pendant plusieurs années. Ces observations peuvent être comprises à l'aide d'un modèle mésoscopique simple à deux couches. Sous la température de transition vitreuse, la dynamique est hétérogène et le film présente une région de surface liquide (fig. 4a) dont l'épaisseur croît et gagne tout l'échantillon (fig. 4b) lors de la transition au chauffage. Le résultat important est que la mobilité (conductance hydraulique qui relie le débit surfacique au gradient de pression dans un écoulement visqueux plan) de cette couche de surface peut être extraite (fig. 5) d'un ajustement des données expérimentales par le modèle mésoscopique (figs. 3b, 4a et 4b).

La théorie des chaînes coopératives aléatoires

Afin de comprendre l'origine d'une telle couche liquide en surface des films vitreux, et son rôle éventuel dans les réductions de T_g observées quand l'épaisseur du film diminue (fig. 1), il faut pour finir se doter d'une théorie microscopique [3]. Au sein d'un verre, les molécules sont dans un environnement analogue à celui d'un voyageur dans un métro aux heures de pointe. Chaque molécule est prisonnière d'une cage formée par ses voisines, et possède très peu de volume libre pour se déplacer, changer de place, et donc permettre la relaxation du matériau vers l'équilibre. Dans l'impossibilité de bouger individuellement, l'alternative est le mouvement coopératif : plusieurs molécules se déplacent simultanément, comme les passagers du métro lors des réarrangements provoqués par les montées et descentes aux stations. En s'appuyant sur certaines observations faites dans les milieux granulaires et dans les simulations numériques de dynamique moléculaire, on peut même supposer que ces régions coopératives prennent la forme de trains unidimensionnels de molécules, plutôt que d'amas tridimensionnels : on parle de *chaînes coopératives aléatoires*. À l'aide d'outils de physique statistique, il est alors possible de retrouver quantitativement la phénoménologie usuelle des verres en volume.

Enfin, on peut ajouter une interface libre à la description proposée ci-dessus. On parvient ainsi pour la première fois à expliquer de manière quantitative les deux anomalies évoquées précédemment [3]. La clé réside dans le fait qu'une chaîne coopérative aléatoire qui parvient à une interface libre est tronquée par cette dernière en raison de la disparition des contraintes d'encombrement (fig. 4c). En clair, un

passager du métro proche de la porte n'a pas besoin de jouer collectif pour participer au réarrangement de la rame : il peut en sortir seul, comme une molécule dans un liquide. Ce type de passager fluidifie donc le voisinage de la porte. En invoquant une description brownienne des chaînes coopératives et leur probabilité de premier passage à l'interface, on parvient alors à quantifier le temps de relaxation local d'un film, et donc ses propriétés de mobilité (fig. 5) et de transition vitreuse (fig. 1).

Conclusion

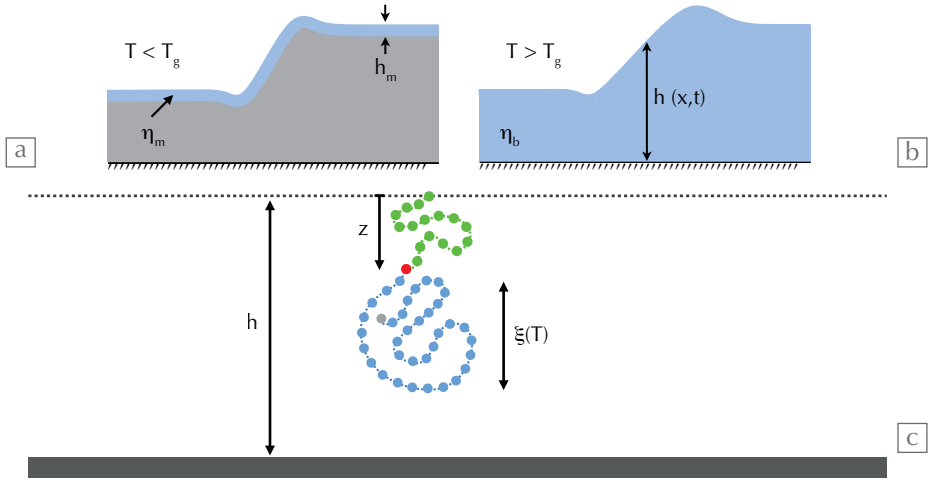
Ironie du sort, l'hypothèse erronée selon laquelle les vitraux d'églises seraient déformés en raison de leur caractère liquide, se révèle être partiellement vérifiée dans les nanofilms de polymères, aux abords de leur température de transition vitreuse. Le verre de polymères – matériau incontournable de l'industrie et des nanotechnologies – est traditionnellement apparenté à un solide amorphe... et pourtant il coule ! Du moins en surface, et sur quelques nanomètres de profondeur, ce qui a pour effet de réduire sa température de transition vitreuse effective.

Grâce à la méthode des nanomarches, il est maintenant possible de caractériser finement les propriétés dynamiques des couches superficielles des verres de polymères, en fonction de la température et pour des compositions variées. La méthode ne se limite d'ailleurs pas à ces matériaux et pourra plus généralement permettre de sonder la matière condensée molle, en confinement à l'échelle du nanomètre, là où les interfaces et les tailles moléculaires finies jouent un rôle prédominant.

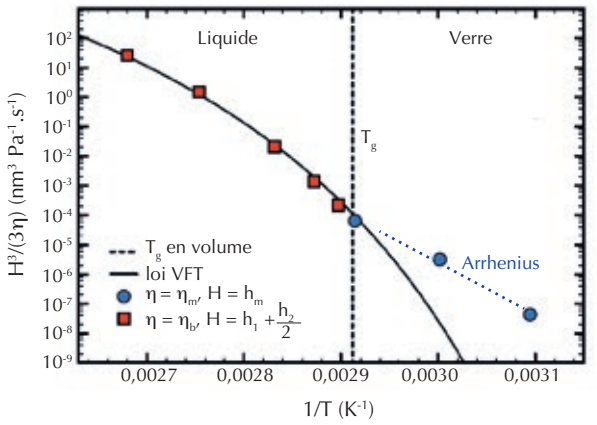
Enfin, la théorie microscopique des chaînes coopératives aléatoires possède deux avantages : sa simplicité analytique et son caractère pictural, qui pourraient contribuer à en faire un outil pratique pour l'étude de la transition vitreuse. On peut alors espérer comprendre un peu mieux les mécanismes de ce phénomène et ses anomalies dans les films, et ainsi, par exemple, guider la fabrication de verres ultra-stables, ces nouveaux matériaux en pleine émergence. ▮

(1) Enduction centrifuge ("spin coating") : technique de dépôt de couches minces d'épaisseur uniforme sur la surface lisse d'un substrat tournant à haute vitesse constante.

(2) Pression de Laplace : différence de pression entre deux milieux séparés par une interface courbe.



4. Modélisation. (a) (mésoscopique). Pour une gamme de températures inférieures à T_g, l'écoulement est localisé sur une couche superficielle (en bleu) d'épaisseur h_m de l'ordre de quelques nanomètres. Au cours de l'évolution en surface, une région initialement immobile (grise) peut se retrouver à une distance inférieure à h_m de l'interface libre et ainsi devenir liquide (bleue), ce qui explique également le réarrangement de la partie grise. (b) (mésoscopique). Pour une gamme de températures supérieures à T_g, l'écoulement s'effectue dans tout l'échantillon. (c) (microscopique). Troncature des chaînes coopératives à l'interface libre d'un film vitreux. À température T, dans un film d'épaisseur h, à distance z d'une interface libre (tirets), une molécule (rouge) peut se déplacer à l'aide d'une chaîne coopérative aléatoire (bleue) de taille ξ dans le cœur du matériau, mais elle peut alternativement le faire au travers d'une chaîne tronquée (verte) par l'interface – plus courte, donc plus probable –, ce qui accroît la mobilité de surface et réduit ainsi la température de transition vitreuse du film.



5. Mobilité $H^3/(3\eta)$ d'un film de polymère (définie *via* l'épaisseur H et la viscosité η de la région d'écoulement) en fonction de l'inverse de la température T. Fait caractéristique de la transition vitreuse, la mobilité varie sur dix décades aux abords de T_g. Lorsque $T > T_g$ (carrés), l'écoulement a lieu dans tout le film (fig. 4b), d'épaisseur moyenne $H = h_1+h_2/2$ et de viscosité en volume $\eta = \eta_b$. Cette dernière suit la loi phénoménologique de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT), caractéristique des liquides surfondus. Lorsque $T < T_g$ (ronds), l'écoulement est localisé dans une couche de surface (fig. 4a) d'épaisseur $H = h_m$ et de viscosité $\eta = \eta_m$, qui semble cette fois suivre une loi d'Arrhenius caractéristique d'un liquide simple. La viscosité η_m et l'épaisseur h_m de la couche mobile ne sont pas déterminées de façon indépendante dans cette mesure.

Références

Articles scientifiques

1• J.D. McGraw *et al.*, "Self-similarity and energy dissipation in stepped polymer films", *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 128303.

2• Y. Chai *et al.*, "A direct quantitative measure of surface mobility in a glassy polymer", *Science* **343** (2014) 994.

3• T. Salez *et al.*, "Cooperative strings and glassy interfaces", *PNAS* **112** (2015) 8227.

Articles de presse

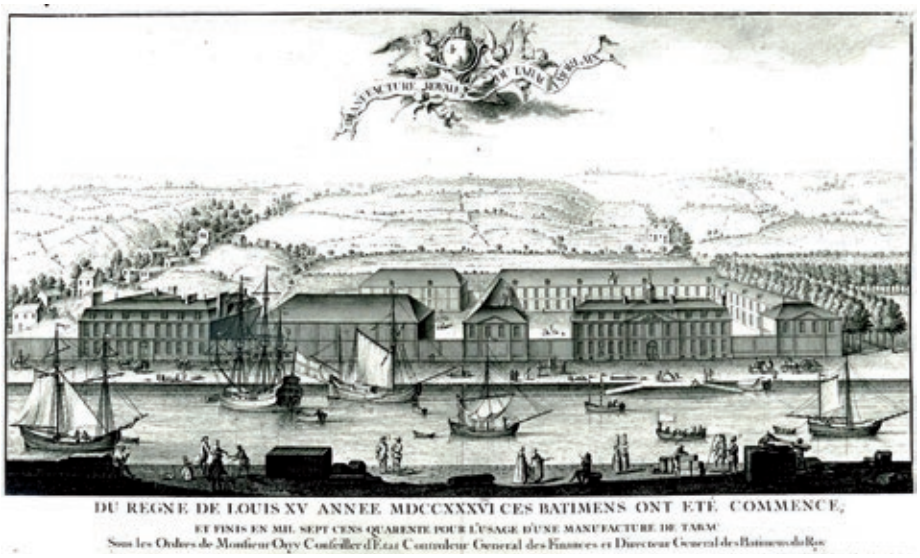
- www.lefigaro.fr/sciences/2014/03/05/01008-20140305ARTFIG00304-en-surface-certains-verres-coulent-comme-du-miel.php
- www.lemonde.fr/sciences/article/2015/06/29/le-verre-dans-tous-ses-eclats_4664100_1650684.html
- www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/actu-des-chaines-cooperatives-pour-comprendre-la-transition-vitreuse-35472.php

L'Espace des sciences à la Manufacture des tabacs de Morlaix : un projet d'avenir dans un site patrimonial d'exception

Daniel Bideau[1] (daniel.bideau@univ-rennes1.fr)
et **Marie-Laure Brandily**[2] (marie-laure.brandily@espace-sciences.org)
(1) Professeur émérite, UMR6251 CNRS-Université Rennes 1, Institut de Physique de Rennes, 35042 Rennes Cedex
(2) Chargée de projet à l'Espace des sciences, Morlaix Communauté, 2B Voie d'accès au port, 29671 Morlaix Cedex

Installé dans la capitale de la Bretagne où il est bien connu du grand public (environ 200 000 visiteurs par an), l'Espace des sciences de Rennes développe depuis 10 ans à Morlaix une antenne active [*], qui va se transformer à l'horizon 2019 en un centre de sciences dans un lieu original et porteur d'une longue histoire : la Manufacture des tabacs.

Après 10 années de fermeture, la Manufacture, qui fut créée au milieu du 18e siècle, va renaitre grâce à un projet de reconversion globale du site, porté par la communauté d'agglomération « Morlaix Communauté ».



1. La Manufacture des tabacs de Morlaix au début du XIXe siècle (gravure de 1817).

L'idée de promouvoir la culture scientifique, technique et industrielle (CSTI) dans une manufacture royale, qui plus est de tabacs, pourrait déconcerter. La Manufacture des tabacs de Morlaix (figs. 1 et 2) est considérée comme l'un des monuments historiques majeurs en Bretagne. À la manière des grands palais érigés au XVIIIe siècle, l'ensemble architectural est remarquable. Or, à l'examen de son architecture, de son histoire et de ceux qui l'ont fait vivre, ce lieu représente un terrain d'investigation exceptionnel, témoignant parfaitement de la façon dont les grandes étapes des progrès technologiques ont marqué l'histoire des constructions industrielles. Le visiteur sera donc invité à mieux comprendre ce qu'est un site industriel aujourd'hui, en appréhendant les mutations techniques dont « la manu » a fait l'objet au fil des siècles d'exploitation, et l'évolution de la productivité, avant et depuis la révolution industrielle.

Ce projet s'appuiera sur le bâtiment, mais aussi sur le corpus mobilier pour présenter les innovations majeures des manufactures des tabacs : l'avènement de la machine à vapeur, la mécanisation... le but étant de susciter l'intérêt des citoyens pour les questions liées aux progrès des techniques.

© Hervé Ronné

2. La Manufacture des tabacs de Morlaix aujourd'hui.

Contrairement à la plupart des anciennes manufactures de tabacs, celle de Morlaix a su préserver des machines, dont une partie sera présentée au public.

Un des éléments clé est une batterie de moulins à poudre, installée en 1870 pour remplacer le râpage manuel : il s'agit d'une mécanique de précision associant bois, fonte et acier. C'est une immense machine-outil qui, par la finesse de sa réalisation, a l'allure d'une œuvre d'art (fig. 3). L'ensemble est alimenté par de grandes vis sans fin. Ces moulins ont été classés « monuments historiques » en 2001, et tous les bâtiments y sont inscrits.

Servi par une scénographie originale, un parcours d'interprétation de l'architecture de cette manufacture, de son patrimoine industriel sauvegardé et de l'histoire sociale de l'usine, sera un élément fort de l'attractivité du site pour des publics de toutes les générations.

Le parcours de découverte de ce CCSTI comprendra également les modules suivants :

- une « salle d'immersion » présentant le plant de tabac ;
- un « atelier d'architecture », permettant l'interprétation des caractéristiques architecturales des manufactures et du viaduc bien connu ;
- un « laboratoire de Merlin », espace ludique d'expérimentations scientifiques et de manipulations interactives pour intriguer et surprendre le visiteur ;
- une « galerie de l'évolution des techniques », présentant les innovations techniques issues des découvertes scientifiques majeures du XIX^{e} siècle ;
- deux salles d'exposition pour traiter de thèmes scientifiques variés ;
- une « galerie de l'innovation », lieu de rencontres et d'échanges entre les chercheurs, les acteurs économiques et le public, pour expliquer l'actualité scientifique et les innovations industrielles des entreprises du territoire de Morlaix ;
- une salle d'animation pouvant être assimilée à un petit théâtre des sciences, pour mettre en place des expériences spectaculaires ou des animations, essentiellement pour un public scolaire.

Enfin, cet ensemble sera doté d'une salle de conférences de 200 places, permettant de recevoir le public local pour nos conférences du vendredi soir.

Il va sans dire que ce lieu sera ouvert à différentes initiatives liées à la diffusion de la culture scientifique. ▮

3. La salle des moulins à râper le tabac (en fonction de 1870 à 1924).

[*] Sont organisées des conférences grand public (environ une fois par mois), des animations dans les écoles du Pays de Morlaix et, bien sûr, la Fête de la Science.

Informations

www.espace-sciences.org/morlaix

Impact des programmes de physique au lycée sur la première année d'enseignement supérieur
Une enquête de la SFP

Suite au changement des programmes de physique au lycée, la commission enseignement de la Société Française de Physique (SFP) a mené en 2014 une enquête auprès des enseignants du supérieur. Malgré un comportement plus actif des étudiants, les collègues ont constaté des difficultés à résoudre des problèmes de physique. Ceci est dû à un manque de rigueur dans le raisonnement et au fait que nombre de concepts ne sont pas maîtrisés. L'absence de liens entre physique et mathématiques dans les programmes ne fait que renforcer ces tendances. Malgré un élargissement de leur culture scientifique, les connaissances des étudiants sont très cloisonnées et non consolidées.

Les résultats complets de l'enquête ont été publiés dans Le Bup, ***972*** *(2015) 319-348.*

Contexte de l'enquête

Les nouveaux programmes du lycée sont entrés en vigueur en septembre 2010 pour la classe de seconde, en 2011 pour la classe de première et en 2012 pour la terminale. Cette réforme a concerné toutes les filières, générales et technologiques. L'enseignement supérieur a ainsi accueilli à la rentrée 2013 des lycéens ayant suivi ces nouveaux programmes. La commission enseignement de la Société Française de Physique (SFP) a alors décidé, à la fin de l'année scolaire 2013-2014, de consulter les enseignants de première année de l'enseignement supérieur (classes préparatoires, IUT, Licence). Une enquête a été mise en ligne du 24 juin au 25 septembre 2014. Elle avait pour objectif de mettre en évidence le profil des étudiants au bout d'un an d'études supérieures, tant sur le plan des connaissances que sur celui des compétences acquises. Grâce à ces résultats, la SFP pourra agir avec d'autres associations (UdPPC[a], UPS[b]) pour faire évoluer les programmes, en y intégrant les prérequis nécessaires aux lycéens pour des études supérieures réussies.

Contenu et déroulement de l'enquête

Nous avons posé 36 questions autour des thèmes suivants :
- le profil des enseignants interrogés (ancienneté, domaines enseignés, filières d'enseignement) ;
- le profil des étudiants ;
- les connaissances en physique et en mathématiques et leur mobilisation ;
- le raisonnement et la rigueur ;
- les aptitudes calculatoires ;
- la résolution de problèmes ;
- la prise d'initiative et la participation ;
- les aptitudes expérimentales ;
- la démarche et la culture scientifiques ;
- les aptitudes à communiquer (oral, écrit) ;
- la préparation aux études supérieures ;
- la pratique des enseignants du supérieur, suite à ces changements de programme (exploitation des connaissances acquises au lycée, modification de l'enseignement).

Nous présentons dans cet article un résumé des 268 réponses reçues aux 36 questions de l'enquête [1]. Toutes les réponses ont été faites de manière anonyme. La répartition des répondants était la suivante : 35% d'enseignants de première année de classes préparatoires (CPGE), 15% d'enseignants d'IUT, 50% d'enseignants de Licence première année.

Évolution des connaissances et des aptitudes des étudiants

Connaissances en physique et en mathématiques

Une large majorité des personnes interrogées, quelle que soit la filière dans laquelle ils enseignent, souligne une modification dans les connaissances en physique et en mathématiques (figs 1 et 2).

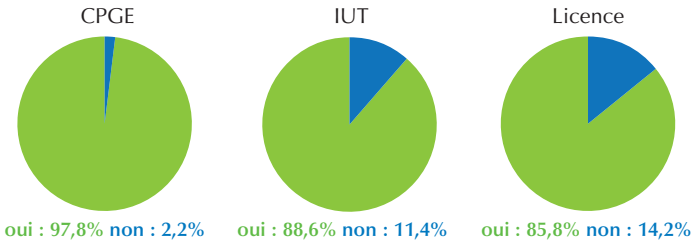
En physique, le plus gros changement concerne l'électricité, pour laquelle tout savoir-faire a quasiment disparu, mais aussi le processus de la mesure où le même déclin des connaissances est observé, et à un moindre degré la mécanique. La notion de modélisation (au sens de modèle théorique, à la fois descriptif et prédictif), pourtant considérée comme un des objectifs de la réforme, semble totalement étrangère aux étudiants.

En mathématiques, un élément souligné est la non-maîtrise des calculs de base, par exemple en trigonométrie ou dans la manipulation des fractions. En analyse, les calculs de dérivation sont souvent très laborieux, alors que l'intégration est « quasiment insurmontable ». L'absence totale de connaissances sur les équations différentielles pose problème aux étudiants. En géométrie, leurs acquis ont fortement diminué, et la manipulation des vecteurs est

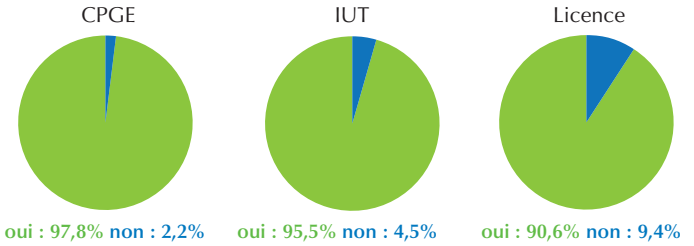
© Nomad_Soul

source de grosses difficultés. Les étudiants ont aussi du mal avec les outils statistiques. Leurs lacunes les incitent à utiliser à outrance la calculatrice et l'ordinateur.

Deux réponses, à première vue contradictoires, émergent de l'enquête. D'une part, les répondants, quelle que soit la filière, mettent en avant l'élargissement de la culture scientifique des étudiants. D'autre part, ils soulignent le cloisonnement bien plus grand entre les connaissances acquises, ce qui empêche de les mettre en relation entre elles. Les étudiants n'ont pas une vision globale des différents domaines de la physique.



1. Répartition des avis des répondants à la question : « Avez-vous identifié des modifications dans les connaissances des étudiants en physique par rapport aux années précédentes ? »



2. Répartition des avis des répondants à la question : « Avez-vous identifié des modifications dans les connaissances des étudiants en mathématiques par rapport aux années précédentes ? »

Rigueur et raisonnement

Les avis sont unanimes, la rigueur a fortement diminué. Certains répondants signalent toutefois que cette tendance n'est pas seulement liée à la dernière réforme. Elle l'est aussi au manque d'habitude à modéliser mathématiquement les problèmes étudiés (qui lui, s'est fortement accru avec la réforme). Pour un certain nombre d'étudiants, la physique se réduit à l'étude de documents.

Sur l'aptitude au raisonnement, le constat est plus partagé : le raisonnement qualitatif et la compréhension par l'analyse dimensionnelle ont progressé. Les étudiants ont davantage d'intuition et de capacité à proposer des idées, ils prennent plus d'initiatives, mais butent dès qu'il faut approfondir... Ils ont du mal à comprendre qu'une suite de calculs sans explications ne saurait constituer un raisonnement.

Aptitudes calculatoires

Une grande majorité des enseignants a noté une diminution des aptitudes calculatoires des étudiants. Il semble que la réforme actuelle conduise à l'accentuation d'une tendance installée depuis plusieurs années : la capacité des étudiants à mener un calcul même léger se dégrade, ce qui conduit souvent à un découragement rapide. Ceci renvoie à la question des connaissances en mathématiques. En CPGE, on constate de plus grandes difficultés par rapport aux élèves de l'année précédente.

Aptitudes à la résolution de problèmes

Un tiers des répondants, toutes filières confondues, constate une baisse des aptitudes à résoudre des problèmes de physique. Certains enseignants de Licence soulignent cependant une meilleure capacité à initier un questionnement et une plus grande liberté à émettre des hypothèses. Cet enthousiasme initial se trouve très rapidement mis à mal par l'absence de méthode de résolution et une incapacité à mettre en œuvre le formalisme scientifique.

›››

›››

La situation semble encore plus préoccupante en IUT. Les répondants constatent que le raisonnement se restreint à l'application aveugle d'une formule. Les démonstrations n'intéressent pas les étudiants. On signale également un manque crucial de travail personnel.

Prise d'initiative et participation

En CPGE et en Licence, beaucoup de répondants notent une prise de parole plus facile. Malheureusement, ce point qui devrait être positif, doit être tempéré par l'absence de bases théoriques pour pousser la démarche au-delà du simple questionnement. La participation des étudiants porte souvent sur des questions générales (« culture »), plutôt que sur des points précis nécessitant une argumentation.

En IUT, selon la majorité des réponses, les étudiants sont de plus en plus passifs, plutôt consommateurs, et ne témoignent pas d'intérêt pour les nouvelles disciplines enseignées.

Aptitudes expérimentales

Une évolution des aptitudes expérimentales semble plus marquée en CPGE qu'en IUT et surtout qu'en Licence.

Globalement, on observe une amélioration de l'autonomie des étudiants devant la mise en œuvre d'un protocole expérimental. Ils ont moins d'inhibition à manipuler des appareils inconnus et ils prennent plus d'initiatives. En revanche, la rédaction d'un compte-rendu est très difficile. Certains étudiants donnent l'impression de n'en avoir jamais fait. Les notions d'incertitude leur sont souvent étrangères.

Démarche et culture scientifiques

En CPGE et en Licence, les réponses sont quasi unanimes : la culture générale des étudiants est plus étendue, mais plus superficielle. Ils ont souvent une image faussée de la physique, plus technologique que physique. Le vocabulaire utilisé est fréquemment erroné. Ils pensent savoir beaucoup sur beaucoup de choses, mais ils sont incapables d'expliquer, pour en avoir entendu parler de manière « trop vague ». Il semble que cet état de fait engendre chez les étudiants un manque de confiance, en particulier vis-à-vis de la résolution d'exercices ou de problèmes. En IUT, les étudiants ont quelques éléments de culture scientifique, difficiles à quantifier.

La formation à la démarche scientifique est clairement insuffisante et en régression. Le manque d'heures est cité comme l'une des explications. La physique ne semble désormais être perçue que comme un catalogue de problèmes et de formules pour les résoudre, sans aucun lien entre eux.

Aptitudes à communiquer

Un peu plus d'un tiers des répondants, quelle que soit la filière d'enseignement supérieur, indique avoir observé des évolutions dans les aptitudes des étudiants à communiquer.

Ces derniers semblent bien mieux maîtriser la communication orale, tout au moins dans son aspect formel. Ils participent davantage, mais leur sens critique est moins développé et ils éprouvent plus de difficultés à aller à l'essentiel.

En revanche, l'expression écrite est de moins bonne qualité (certains répondants disent même « catastrophique »), tant dans la forme (orthographe, grammaire) que dans le fond (absence de capacité de synthèse, d'analyse critique des résultats...).

Adéquation des programmes du lycée en physique et en mathématiques avec l'enseignement supérieur

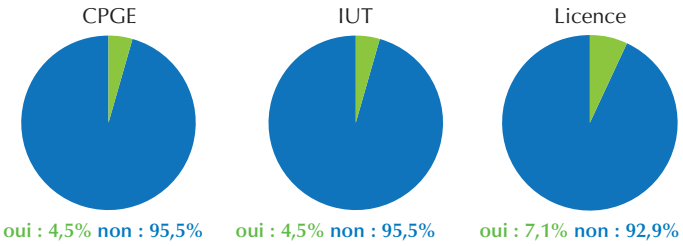
La quasi-totalité des répondants souligne l'inadéquation entre les programmes du secondaire en physique et en mathématiques et le niveau requis dans l'enseignement supérieur (fig. 3).

Le principal souhait formulé par les enseignants de CPGE est la restriction des domaines étudiés au profit d'un retour à l'approfondissement. Le « vernis » culturel se fait au détriment de l'acquisition de bases solides, et les outils mathématiques sont trop peu utilisés.

Pour les répondants d'IUT, il manque clairement une année de consolidation entre la terminale et la première année d'IUT.

En Licence, de nombreuses universités sont amenées à construire leur première année à la manière d'une terminale scientifique « ancienne formule ».

Un point très important a été plusieurs fois souligné. Alors que les nouveaux programmes ont clairement affiché pour objectif de permettre aux futurs étudiants de mieux choisir leur orientation, on constate que beaucoup d'entre eux arrivent avec une idée complètement fausse de ce qu'est la physique. Ils appréhendent celle-ci comme une matière à la frontière du littéraire, pour laquelle les connaissances se résument à des descriptions de situations et à l'application de formules pour interpréter ces dernières. Le choc ressenti par nombre d'étudiants est important lorsqu'ils constatent que rigueur méthodologique et formalisme mathématique avancé sont les outils quotidiens du physicien.



3. Répartition des avis des répondants à la question : « Selon vous, est-ce que les programmes du lycée en mathématiques et en physique sont adéquats au niveau requis par l'Université, les IUT, les classes préparatoires ? »

Pratique enseignante

L'enquête montre que la plupart des répondants, toutes filières confondues, ont modifié leur enseignement suite à la réforme des programmes de lycée, avec un pourcentage plus élevé en CPGE (96,6%).

Du point de vue des contenus, une majorité d'enseignants a été contrainte de renforcer très sérieusement les enseignements en mathématiques pour physiciens. C'est une conséquence probable de la cassure très nette apparue dans les programmes du lycée entre mathématiques, pour lesquelles un certain formalisme est maintenu, et sciences physiques, dont l'approche culturelle fait qu'elles sont de plus en plus identifiées comme « matière littéraire » par les étudiants.

Il apparaît que les enseignants ont été obligés d'adapter fortement leurs cours afin d'éveiller la curiosité des étudiants, désormais habitués à vivre la physique en spectateur/consommateur.

Conclusion

Les programmes actuels mis en place depuis 2010 dans l'enseignement secondaire, ont été construits pour permettre aux élèves de mieux comprendre les enjeux sociétaux. C'est ainsi que l'aspect culturel de la science y prend une place de plus en plus importante. Cette position peut paraître intéressante au premier abord. Cependant, dans le cas de la physique, ce qui ressort de l'enquête de la SFP montre que les étudiants maîtrisent moins bien les concepts et lois, raisonnent de manière approximative et ne possèdent pas une culture scientifique aussi développée que ce que l'on aurait pu attendre.

Selon le ministère de l'Éducation nationale, les nouveaux programmes de physique au lycée n'ont plus vocation à former des scientifiques. Mais, selon la SFP, attendre la première année du supérieur pour former des scientifiques est trop tardif. Le risque de ces programmes est de ne plus former les scientifiques de qualité dont la France a besoin, notamment en recherche et développement, pour innover et permettre aux entreprises françaises d'être compétitives au niveau international. Citons un extrait de l'enquête de 2012 réalisée par l'Institute of Physics britannique : *« […] Les entreprises qui sont tributaires de la physique contribuent davantage à l'économie nationale que le secteur de la construction, emploient plus de personnes que le secteur de la finance… [Elles] contribuent pour 8,5% à la production économique du Royaume-Uni et emploient plus d'un million de personnes. »* Une enquête de la Société Européenne de Physique (EPS) a conduit à des conclusions voisines.

Dans une lettre adressée à la ministre de l'Éducation nationale en date du 6 janvier 2014, la SFP a exprimé son inquiétude sur l'impact de ces nouveaux programmes de physique sur l'enseignement supérieur. Les résultats de l'enquête présentée ici ne font que renforcer cette inquiétude, et montrent l'urgence de retravailler sur les programmes pré-bac, de manière à ce qu'ils soient adaptés à l'entrée dans l'enseignement supérieur scientifique.

Face à ces constats, un groupe de travail interassociations (SFP, UdPPC, UPS) a été créé en 2014 pour mener une réflexion sur l'enseignement de la physique, afin de former les futurs citoyens et scientifiques dont la société a besoin, c'est-à-dire des hommes et des femmes ayant un esprit critique, sachant raisonner et possédant une bonne culture scientifique. L'objectif de ce groupe d'experts est de proposer au Conseil supérieur des programmes (CSP) une révision des programmes de première et terminale S, et au préalable de ceux de seconde, à l'horizon de la rentrée 2016. ▮

(a) UdPPC : Union des Professeurs de Physique et de Chimie
(b) UPS : Union des Professeurs de classes préparatoires Scientifiques

Nathalie Lebrun[1] (nathalie.lebrun@univ-lille1.fr),
Rémi Barbet-Massin[2], **Sylvie Magnier**[3] **et Denis Dumora**[4]
(1) Maître de conférences, Université de Lille et LDAR, Université Paris Diderot
(2) Professeur de physique en CPGE, Lycée Henri IV, Paris
(3) Professeur des universités, IUT A et Laboratoire PhLAM, Université de Lille
(4) Professeur des universités, CEN de Bordeaux Gradignan et Université de Bordeaux

Le cabinet de physique du lycée **Bertran de Born à Périgueux**

Depuis le 14 octobre 2015, la collection des 137 superbes instruments de physique du lycée Bertran de Born à Périgueux, datant du 19e siècle et classée monument historique en 2007, Trophée Diderot de l'initiation culturelle de l'AMCSTI 2006, est présentée au public dans un espace muséographique.

Entrée libre
Ouvert le deuxième mercredi de chaque mois
(hors jours fériés)
Visites programmées à 14, 15, 16 et 17 heures.

Francis Gires, Président de l'ASEISTE (Association de sauvegarde et d'étude des instruments scientifiques et techniques de l'enseignement), chargé par le ministère de l'Éducation nationale de la mission de sauvegarde du patrimoine scientifique des établissements d'enseignement, assurera les visites commentées de cet espace.

Sur la page d'accueil du site de l'ASEISTE (www.aseiste.org) :
• à l'onglet « galerie photos », il est possible de faire une visite virtuelle de cet espace ;
• à l'onglet « Inventaires », on trouve près de 5500 fiches d'instruments d'une quarantaine d'établissements, dont celles du lycée de Périgueux ;
• enfin, à l'onglet « Publications » on peut télécharger gratuitement le catalogue d'exposition « Physique impériale : cabinet de physique du lycée Impérial de Périgueux » (2004, 298 p.), avec des contributions de Nicole Hulin et Françoise Khantine-Langlois, préfacé par Yves Quéré, Georges Charpak, Claude Cohen-Tannoudj, Bernard Cagnac et Michèle Leduc, à la mémoire de Jean Brossel, ancien élève de cet établissement où il a appris les bases de la physique avec ces instruments.

Coordonnées

1, rue Charles Mangold, 24000 Périgueux
Tél. : 06 88 14 78 34 (ASEISTE)
Courriel : giresfrancis@free.fr

Enseigner la physique à l'université

Colloque régional, 6-7 juillet 2015 – Paris

Le premier colloque « Enseigner la physique à l'université », qui s'est tenu à Paris début juillet 2015, a regroupé une centaine d'enseignants-chercheurs, franciliens pour la plupart. À travers une quarantaine de présentations orales(*), un enrichissant partage d'expériences et de pratiques a été fait dans un cadre dépassant les frontières de chaque université. Loin d'être une corvée, l'enseignement s'est ainsi vu flatté comme un domaine de réflexions, d'innovations, où la réussite des étudiants, formés pour mais aussi par la physique, est au cœur des préoccupations d'enseignants enthousiastes qui mettent naturellement leurs qualités de physiciens au service de leurs enseignements.

(*) Les noms cités entre parenthèses sont ceux des intervenants, dont les présentations peuvent être trouvées sur le site internet du colloque.

Un colloque sur l'enseignement de la physique à l'université : une gageure !

Les 6 et 7 juillet 2015 s'est tenu à Paris le colloque « EPU2015 : Enseigner la physique à l'université ». Ce colloque avait pour objectif de réunir les acteurs de l'enseignement à l'université et de promouvoir une réflexion centrée sur l'enseignement d'une discipline spécifique : la physique. Cette caractéristique apparaît nécessaire : l'identité disciplinaire est une composante forte de la manière dont se façonne le métier d'enseignant à l'université dans un contexte particulier où les enseignants sont, pour la plupart, des chercheurs. La récente refonte des programmes de physique dans l'enseignement secondaire a suscité d'importantes adaptations des maquettes de licence, et de nombreuses expériences pédagogiques ont été testées dans les universités ces dernières années. Dans ce contexte, où chaque université tire les premiers bilans de ces modifications, le colloque « Enseigner la physique à l'université » se proposait de mettre en commun ces expériences nouvellement acquises dans les différents départements de physique des universités franciliennes. L'un des partis pris de cette conférence était également d'associer des enseignants issus de deux communautés : la recherche en physique et celle sur l'enseignement de la physique. Au-delà des défiances qui ont pu marquer certaines de leurs relations, physiciens et didacticiens se sont donc retrouvés autour d'échanges aussi complémentaires que constructifs.

Ces deux journées ont constitué une expérience novatrice pour la plupart des participants (et des organisateurs), qui ont eu pour la première fois l'occasion d'échanger sur leurs pratiques pédagogiques et leurs questionnements en dehors des frontières de leur université. Pour cette première expérience, où la popularité que rencontrerait cet événement auprès de la communauté visée était imprévisible, nous avions souhaité lui donner un caractère régional. Le colloque EPU 2015 a donc été annoncé essentiellement dans les universités d'Île-de-France, mais certains collègues de province s'étaient déplacés pour y participer.

Au total, le nombre d'inscrits s'élevait à 115 ; 60 à 80 participants étaient présents tout au long des deux journées, et 40 communications orales ont été présentées. Le programme des communications a été établi en alternant retours d'expériences et analyses sur le fond de certaines pratiques d'enseignement.

Les deux journées se sont déroulées dans une atmosphère de partage et de découverte. Elles ont fait ressortir une culture commune des enseignants de physique à l'université, et un souhait réel de poursuivre les échanges qui ont eu lieu autour des pratiques pédagogiques.

Sur le fond, les journées EPU 2015 ont été l'occasion de découvrir un large spectre d'expériences et des pratiques variées : par les thèmes choisis (le rôle de l'expérimentation, de la problématisation, la question de la transition lycée/université, celle de la motivation des étudiants, etc.), mais aussi par les espaces questionnés (TP, cours en amphi, TD, etc.). Le plus frappant, c'est que chacun paraissait porté par une volonté partagée de faire de l'enseignement un espace de rapprochement des étudiants avec la physique.

Enseigner : rapprocher les étudiants et la physique

Rapprocher les étudiants et la physique, c'est rapprocher les étudiants et l'enseignant lui-même, vecteur d'enthousiasme pour cette physique à laquelle il consacre sa vie de chercheur. Cela peut passer par l'installation d'une forme de complicité, de « connivence » avec l'enseignant, que semblent favoriser le travail en petits groupes au sein des TD (Lidgi-Guigui), ou les « manips de cours », dont les résultats surprenants captent l'intérêt, et dont l'enjeu (succès ou échec) renforce la complicité enseignant-étudiant (Boissé). Rapprocher les étudiants et la physique, c'est recréer de l'appétence pour une discipline délaissée par des lycéens que les sciences faisaient pourtant rêver lorsqu'ils étaient enfants (Fuchs). Rapprocher les étudiants et la physique, c'est présenter une physique plus « authentique », plus « proche de la science telle qu'elle se fait », celle qui s'incarne, par exemple, dans les nanosatellites[a] (Rambaux, Hallouin) ; une physique indissociable dans sa pratique de sa dimension expérimentale (Latour), une physique stimulante dont on va trouver trace dans le sport (Elias, voir encadré p. 36) et dans les jouets (Baumberger).

« On a les étudiants que l'on a »

Loin des poncifs souvent rebattus, les journées EPU 2015 ont laissé peu de place aux lamentations. Certes les étudiants ont un passé lycéen moins mathématique, plus culturel, moins formel (Fontaine), certes ils ne connaissent plus la formule de l'aire d'un

© Pierre Kitmacher. UPMC.

1. L'attention des étudiants lors d'une séance de résolution de problème (Photo extraite de la présentation de J.-M. Courty).

disque et peinent à citer la masse volumique de l'eau (Browaeys, Décamp & Schwemling). Mais chacun veut faire avec les étudiants qu'il a, et qui ne sont pas tels que l'on pense qu'ils sont ; qui ne sont pas davantage ceux que nous étions (Chemla). Et c'est cela qui motive la recherche de solutions : faire réussir les étudiants, quels qu'ils soient, en facilitant la transition lycée/université (Toulgoat, Brulard) pour pallier notamment le déficit de connaissances mathématiques (David). Ainsi, les plateformes numériques de travail offrent des perspectives prometteuses (Rouyer).

Un enseignement porté par les qualités du physicien

Lorsqu'il est enseignant-chercheur, et c'est le plus souvent le cas, ce qui forge l'identité professionnelle d'un enseignant d'université, c'est qu'il va puiser dans son métier de chercheur les ressources pour enseigner (de Hosson & Décamp). Il dispose non seulement des qualités nécessaires à l'exercice pédagogique d'une physique authentique et proche de la recherche (Couder & Derr), mais également d'une remarquable capacité d'adaptation, qui peut s'exercer relativement librement, notamment lorsqu'il agit dans un cadre peu contraint (option, projets, enseignements interdisciplinaires) (Pansu), mais parfois aussi dans des enseignements à plus large effectif (Rezeau, Courty). À ces qualités s'ajoute une propension au doute. Ici, pas de témoignage qui n'ait pas fait l'objet d'un examen critique réflexif : ce qui fait rêver l'enseignant n'est pas nécessairement ce qui fait rêver l'étudiant, nous dit-on, et il ne suffit pas de rendre les choses attractives pour qu'elles deviennent compréhensibles, car une « belle chair » n'est rien si elle n'est pas portée par un squelette robuste (Baumberger, Kierlik). Quant au réel, il n'est pas si facile à « mettre en boîte » (Boissé).

Des idées à diffuser

C'est donc avec la raison de l'autocritique que chacun est venu présenter ses idées, mises à l'épreuve de l'expérience *in vivo*, et engageant, par exemple, des modifications de l'ordre usuel d'exposition des concepts de la mécanique du point (Marguilies), un enseignement conçu à partir d'une approche épistémologique (Fautrat) ou reposant sur le principe de la résolution de problèmes (Courty, fig. 1) et de la pédagogie par projet (Dupuis). Et c'est avec enthousiasme que les participants ont pu tester les fameux "clickers" (Parmentier), ces petits boîtiers de vote électroniques promus au rang de facilitateurs d'interactions et de motivation (Rezeau, Ayrinhac).

Un lieu de rencontre entre physiciens et didacticiens de la physique

Les journées EPU 2015 se voulaient également un lieu de rencontre entre physiciens et chercheurs en didactique de la physique, discipline encore mal connue dont le but est d'éclairer les raisons pour lesquelles il est parfois si difficile pour un individu de donner du sens aux lois, aux concepts de la physique. En effet, la physique se construit souvent contre une intuition robuste qui dote les objets, tels que les images optiques, de propriétés matérielles, qui attribue aux corps en mouvement une force dirigée dans le sens de ce mouvement (Munier), une intuition qui vient se heurter au verdict de la troisième loi de Newton (Lebrun & de Hosson). Au-delà de l'intérêt qu'elle porte aux étudiants, la recherche en didactique s'intéresse également aux enseignants, à leurs pratiques. Que faisons-nous, par exemple,

›››

›››
lorsque nous parlons d'incertitudes de mesures (Caussarieu) ? Que faisons-nous lorsque nous évaluons (Delserieys, Horoks & Pilet) ? Avons-nous toujours conscience de l'impact de nos choix sur ce qu'ils provoquent en termes de compréhension, de réussite ? À quoi voulons-nous former nos étudiants ?

Former à la physique, former par la physique

Il ne fait aucun doute qu'un enseignement de physique à l'université doit pouvoir conduire à la formation de futurs physiciens. Mais les ressources et les connaissances acquises par l'étudiant formé par la physique traversent les frontières disciplinaires (Kolinsky, Bottani, Pansu). Être formé par la physique permet le développement de compétences hautement valorisables dans le milieu du travail : analyse numérique (Malherbe, Bouquet), modélisation, travail en groupe (Dupuis), etc. Cela permet enfin la mobilisation de qualités « d'autodéfense intellectuelle » (Fuchs), dont on pourrait souhaiter qu'elles se répandent au sein de la sphère publique. De ce point de vue, la formation à une vulgarisation appropriée a de beaux jours devant elle (Bobroff).

Les présentations des conférences sont téléchargeables

http://epu2015.sciencesconf.org/

Et la suite...

En fin de colloque, un questionnaire a été distribué pour sonder les participants sur les attentes, les appréciations et les propositions d'évolution. 59 questionnaires ont été recueillis. Pour une très grande majorité (3/4 des questionnaires), les participants sont venus au colloque pour échanger avec leurs collègues et/ou avoir des idées pratiques pour faire évoluer leur enseignement, et ils considèrent que cette rencontre a répondu à leur attente. La moitié des participants sondés aurait apprécié plus de temps d'échanges informels. La proposition d'ajouter des tables rondes ou ateliers sur des sujets précis est fréquemment faite. Aux questions concernant le renouvellement du colloque dans les années futures, les avis sont favorables à une organisation biannuelle en Île-de-France, avec une ouverture aux participants des autres régions qui le désirent. Cette fréquence n'exclue pas la possibilité d'organiser des ateliers thématiques à d'autres dates.

Maria Barbi[1], **Guillaume Blanc**[2], **Florence Elias**[1] (florence.elias@univ-paris-diderot.fr), **Sylvain Fautrat**[3], **Cécile de Hosson**[2], **Emmanuelle Rio**[4] et **Florence Rouyer**[3]
(1) Université Pierre et Marie Curie (2) Université Paris Diderot
(3) Université Paris Est Marne la Vallée (4) Université Paris Sud

(a) Satellites de moins de 10 kg à but pédagogique, fabriqués par des étudiants.

Physique et escalade en L1

Un enseignement bidisciplinaire de Physique et de Sport est proposé depuis deux ans aux étudiants de première année de Licence à l'UPMC, sous la forme d'un « atelier de recherche encadré ». L'atelier consiste à mener de front la pratique d'une activité sportive, l'escalade, encadrée par un professeur d'éducation physique, et la compréhension des principes physiques qui sont en jeu au cours de cette pratique. L'objectif est d'ancrer l'apprentissage de la physique sur une pratique ludique qui ne lui est habituellement pas associée, issue de la vie quotidienne. Du point de vue de l'enseignement sportif, l'atelier vise à améliorer l'autonomie et la sécurité dans la pratique sportive à travers une compréhension physique de l'environnement, des gestes travaillés et du matériel utilisé.

L'atelier se déroule en alternant des séances hebdomadaires de pratique sportive sur un mur d'escalade et des séances de mesures physiques (travaux pratiques) autour de postes imitant des situations rencontrées en salle : adhérence des chaussons, position du corps et répartition des forces, chute et sécurité des points d'attache. Répartis en groupes de trois ou quatre, les étudiants doivent démontrer une loi théorique, puis mesurer sur un poste expérimental les grandeurs physiques mises en relation par la loi et comparer leurs mesures à la théorie.

Après deux ans de pratique, quel est le bilan de cet enseignement ? L'accroche par le sport à la physique a manifestement bien fonctionné, surtout pour les étudiants qui avaient déjà une attirance pour l'escalade. On a pu observer le bénéfice du travail en groupe (en particulier l'apprentissage du débat scientifique). Une réaction des étudiants a toutefois attiré notre attention vis-à-vis des objectifs fixés : face à un écart entre la loi théorique et leurs résultats de mesure, le désaccord a à plusieurs reprises été attribué au fait que l'expérience n'était pas faite sur un vrai mur d'escalade. Dans les prochaines années, nous allons donc faire évoluer cet enseignement vers des mesures physiques que les étudiants pourront réaliser sur eux-mêmes, en salle, afin d'ajouter des points expérimentaux à ceux obtenus en Travaux Pratiques. Ainsi, les étudiants devraient sentir et expérimenter sur eux-mêmes un principe fondamental de la physique, souvent ignoré dans les cours magistraux : les lois de la physique sont partout les mêmes.

Florence Elias

Physique et escalade sont enseignées en parallèle (illustration issue de la présentation de F. Elias).

Alain Schuhl, directeur de l'institut de physique du CNRS

Entré en fonction le 1er février 2015, Alain Schuhl succède à Fabrice Vallée. Professeur de physique à l'université Joseph Fourier, il dirigeait, depuis 2011, l'Institut Néel (CNRS) à Grenoble.

Né en 1957, Alain Schuhl est un ancien élève de l'ENS Paris. Après une thèse de troisième cycle, il a accompli son service national comme professeur de physique à l'université de Lima (Pérou). C'est à l'université Paris-Sud, sous la direction de Jacques Friedel, qu'il a effectué une thèse d'État en sciences physiques sur l'étude du magnétisme de surface de l'hélium 3 liquide, soutenue en 1986.

En 1988, il intègre le laboratoire central de Thomson-CSF à Corbeville, puis participe à la création de l'unité mixte CNRS/Thalès. En 1999, il rejoint la ville de Nancy pour constituer une équipe de chercheurs et un parc instrumental adapté à la spintronique, au sein de l'université Henri Poincaré. Puis, en 2006, il s'établit à Grenoble. Il y dirige le laboratoire Spintec, de 2007 à 2010. Au sein de cette unité mixte CEA/CNRS/UJF, il poursuit ses travaux de recherche sur les jonctions tunnel magnétiques avec, en perspective, des applications de la spintronique aux mémoires magnétiques, aux oscillateurs radiofréquence et aux capteurs magnétiques.

Alain Schuhl est coauteur de 140 publications scientifiques et à l'origine de 21 brevets. Pour ce passionné de science, la carrière scientifique se conjugue avec celle de vulgarisateur. Depuis 2004, il a écrit, seul ou en collaboration, sept ouvrages de vulgarisation scientifique dont plus la moitié est destinée aux jeunes. Il a été président du comité exécutif des Olympiades de Physique France et a obtenu en 2010 le prix Yves Rocard de la Société Française de Physique.

Conseil d'administration
des 19 mars, 19 juin et 16 octobre 2015

Le conseil, après examen des propositions des jurys, a décerné les prix suivants :

- **Prix Joliot-Curie 2013 (champs et particules)**
  Fabrice Hubaut (CPPM, Marseille)
- **Prix Lagarrigue 2014 (physique des accélérateurs)**
  Michel Della Negra (CERN)
- **Prix René Pellat 2015 (physique des plasmas)**
  Stéphane Cuynet (GREMI, Orléans)
- **Prix Jeune chercheur Daniel Guinier 2014**
  Pauline Comini (IRFU/SPP, CEA/Saclay)
- **Prix Jeune chercheur Saint-Gobain 2014**
  Pol Grasland-Mongrain (LabTAU, INSERM, Lyon)
- **Prix Jean Ricard 2015**
  Jacqueline Bloch (LPN/CNRS, Marcoussis)
- **Prix Félix Robin 2015**
  Pawel Pieranski (Physique des solides, Orsay)

En ce qui concerne le lauréat du **Prix Holweck 2015 (IoP-SFP)**, le CA a pris acte du choix fait par l'Institute of Physics d'Isabelle Ledoux-Rak (LPQM, ENS Cachan), parmi les trois candidats proposés par la SFP.

Cotisation conjointe SFO-SFP

À partir de 2016, les personnes adhérant aux deux sociétés SFO (Société Française d'Optique) et SFP pourront bénéficier d'une cotisation globale réduite. Cette cotisation sera de 151 € (au lieu de 99 € SFP + 90 € SFO) pour les membres actifs, de 93 € pour les retraités et de 45 € pour les étudiants (voir l'encart « Adhésions, cotisations et abonnements 2016 » inséré dans ce numéro). Elle inclura les abonnements (versions papier et électronique) à la revue de la SFP, *Reflets de la physique* (5 numéros par an), à celle de la SFO, *Photoniques* (6 numéros par an), et un annuaire des formations en optique-photonique.

Évènements SFP importants, à retenir

- **Vendredi 29 et samedi 30 janvier 2016**
  Finale des 23es Olympiades de Physique France,
  Université Paris Diderot (UFR de physique, bâtiment Condorcet)
  10 rue Alice-Domon-et-Léonie-Duquet, Paris (13e)
  www.odpf.org

- **Lundi 1er février 2016**
  3e Journée « Sciences et Médias » : Quels outils médiatiques pour parler de science aux enfants et aux adolescents ?
  Amphithéâtre de la préfecture de Paris et d'Île-de-France
  5 rue Leblanc, Paris (15e)

- **Vendredi 5 février 2016**
  Assemblée générale de la SFP, journée scientifique « Regards de physicien(ne)s » et remise des prix Jeunes chercheurs Daniel Guinier et Saint-Gobain 2014,
  Amphithéâtre Paul Painlevé du CNAM
  292 rue Saint-Martin, Paris (3e)

- **Du lundi 22 au vendredi 26 août 2016**
  15es Journées de la Matière Condensée (JMC15),
  Bordeaux, dans les locaux de l'ENSEIRB, sur le Campus de Talence Pessac
  http://jmc15.sciencesconf.org/

Prix **Joliot-Curie 2013** (physique des champs et particules) : **Fabrice Hubaut**

Après sa thèse effectuée au CPPM (Centre de physique des particules de Marseille), Fabrice Hubaut est recruté en 1999 par le CNRS au LPNHE (Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies) à Paris, où il rejoint l'équipe travaillant sur l'expérience ATLAS basée au CERN. En 2002 il retourne à Marseille au CPPM, tout en continuant de travailler pour ATLAS. Il est directeur de recherche au CNRS depuis octobre 2011.

Fabrice Hubaut a contribué de manière exceptionnelle à l'expérience ATLAS, de 1999 à aujourd'hui. Ses apports couvrent un large spectre de sujets, qui ont aidé à la fondation des données d'analyses d'ATLAS ayant mené à la découverte du boson de Higgs en 2012 :

- construction et mise en œuvre du calorimètre électromagnétique ;
- études des performances de ce détecteur pour la reconstruction et l'identification des électrons et photons ;
- coordination du groupe « e-gamma » d'étude des performances combinées électrons/photons ;
- participation à l'analyse des données.

Fabrice Hubaut a démontré une rigueur scientifique remarquable dans tous ces domaines d'études, combinée à une imagination créative, à l'anticipation des besoins liés à l'évolution rapide des conditions de prise de données et à un talent rare pour l'organisation du travail au sein de son groupe. Ses activités se sont étendues à l'animation scientifique et à la gestion de la recherche au sein de son laboratoire et en France.

À l'unanimité du jury, il a été proposé pour le prix Joliot-Curie 2013 de la SFP.

Prix Jeune chercheur **Saint-Gobain 2013 : Anna Lombardi**

Titre de la thèse : **Linear and ultrafast response of individual multi-material nanoparticles,** préparée à l'Institut Lumière-Matière (Lyon) sous la direction de Natalia Del Fatti, et soutenue le 30 septembre 2013.

Anna Lombardi est spécialiste de l'étude optique en régime ultrarapide de nanoparticules métalliques individuelles. De telles particules sont d'une grande actualité, tant du point de vue des applications possibles (capteurs, santé, nano-électronique) que de la compréhension des processus fondamentaux dominant leur réponse optique.

Les premiers résultats du travail concernent la caractérisation optique et vibrationnelle de nano-objets allongés (bâtonnets et bipyramides), synthétisés en collaboration avec l'ICMCB à Bordeaux. Le résultat le plus marquant de la thèse est la démonstration expérimentale et la description théorique de l'effet de couplage dit « Fano » au sein d'un dimère composé d'une particule d'or et d'une particule d'argent. Un choix astucieux des longueurs d'onde du laser a permis de sonder préférentiellement l'or et, grâce à la résolution temporelle, de mettre en évidence ce couplage. En faisant varier la longueur d'onde du laser de pompe, la température de la particule d'or au sein du dimère a été déterminée.

Anna Lombardi est maintenant post-doctorante à l'Université de Cambridge (UK), au NanoPhotonics Centre du Cavendish Laboratory.

Prix Jeune chercheur **Daniel Guinier 2013 : Mathieu Perrin-Terrin**

Titre de la thèse : **Searches for B meson decays to purely leptonic final states,** préparée au Centre de physique des particules de Marseille (CPPM) sous la direction de Giampiero Mancinelli, et soutenue le 23 septembre 2013.

Mathieu Perrin-Terrin est un jeune physicien (27 ans), dont les expériences de thèse ont été effectuées sur l'expérience LHCb, au CERN. Le sujet de sa thèse était la recherche de la désintégration extrêmement rare (une sur 1 milliard environ) du méson B^0_s en une paire de muons. L'intérêt de cette mesure est très grand, car le modèle standard (MS) de la physique des particules permet de calculer ce rapport de branchement à mieux que 10%, tandis que les modèles incluant de la physique au-delà de ce modèle prédisent dans la plupart des cas des rapports de branchement nettement plus grands.

Dans cette grande collaboration, Mathieu Perrin-Terrin a été la clé de voûte de l'analyse qui a abouti pour la première fois à l'observation de ce signal, au niveau prédit par le modèle standard. Grâce à sa très bonne connaissance des modèles au-delà du MS, il a su exploiter ces données. Il a présenté ces résultats dans de très importantes conférences internationales et a contribué à l'écriture de tous les articles publiés sur le sujet. Enfin, il a été l'un des deux représentants de LHCb choisis par le CERN pour participer au groupe de travail chargé de combiner les résultats des trois expériences ATLAS, CMS et LHCb.

Mathieu Perrin-Terrin est maintenant employé par le CERN sur un poste de « fellow » (contrat de 3 ans).

Prix **Félix Robin 2014 : Sydney Galès**

Sydney Galès est né en 1943 à Tunis. Recruté par le CNRS, il reçoit la médaille de bronze en 1978. Il prépare sa thèse de doctorat d'État à l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO) et la soutient en 1986. Il a dirigé l'IPNO de 1994 à 2002, puis le GANIL de 2005 à 2011. Il est actuellement directeur scientifique du projet de très grand équipement européen Extreme Light Infrastructure Nuclear Physics (ELI-NP), qui doit être construit à Bucarest.

Les travaux de recherche de Sydney Galès ont principalement porté sur la connaissance du noyau de l'atome, en particulier dans les propriétés de symétrie entre ses constituants. Il a, en outre, contribué au développement du « modèle en couches », en établissant ses limites de validité. Plus récemment, il s'est intéressé à la physique des noyaux exotiques, noyaux qui jouent un rôle clé dans la formation des éléments lourds de l'Univers. Il a, à cet effet, pris part aux discussions sur l'avenir des grandes installations européennes et sur les caractéristiques des accélérateurs de nouvelle génération et de haute puissance qui pourraient être construits pour produire en abondance ces noyaux « exotiques ». Ses travaux ont donné lieu à plus de 130 publications dans des revues scientifiques à comité de lecture et à plus de 120 conférences invitées dans des écoles et congrès internationaux ; ils ont été récompensés par l'attribution du prix Flerov 2010 du JINR de Dubna (Russie) pour « sa contribution exceptionnelle à l'étude des noyaux exotiques ».

Sydney Galès a une visibilité et une réputation scientifique internationale hors du commun, aussi bien en Europe (notamment aux Pays-Bas, où il a été nommé professeur à l'Université de Groningue), qu'en Russie, aux États-Unis et au Japon. Il est ou a été membre de nombreux conseils et instances scientifiques de par le monde. Il a en particulier présidé le NuPECC (comité européen pour la physique nucléaire), de 1995 à 1999.

En résumé, Sydney Galès a un parcours et une carrière exemplaires. C'est un scientifique visionnaire et un leader charismatique. Il fait partie de la nouvelle espèce de chercheurs dont nous avons besoin, alliant une solide réputation scientifique à une capacité d'entraînement et de direction dans un contexte compétitif et complexe. C'est pour ces raisons que la SFP lui a attribué le prix Félix Robin 2014.

Prix **Jean Perrin 2014** (popularisation de la science) **: Christian Counillon**

Ancien élève de l'École normale supérieure (Ulm) et physicien, Christian Counillon a commencé son activité de recherche sur la mécanique des fluides avec Laurent Limat, à l'ESPCI. Il rejoint Belin en 1999 pour l'édition d'ouvrages scientifiques et, notamment, de vulgarisation en sciences physiques. Depuis 2013, il est directeur littéraire aux Éditions Flammarion.

Plusieurs prix – dont le Prix Roberval – ont souligné l'originalité des ouvrages que Christian Counillon a décidé d'éditer, et ce sans que son nom soit toujours mentionné. *La physique par les objets quotidiens, Bâtir en terre, Matière et matériau, La couleur dans tous ses éclats, Les nanosciences*… sont quelques exemples.

Chez Flammarion, Christian Counillon continue de développer la publication d'ouvrages de vulgarisation, essentiellement en mathématiques, physique et biologie. Il est à l'origine de deux nouvelles collections : une ligne de science accessible et ludique, ainsi qu'une collection de sciences narratives à la frontière entre littérature et vulgarisation stricte.

La Société Française de Physique a souhaité attribuer le Prix Jean Perrin 2014 à un éditeur scientifique, et non à une maison d'édition particulière, pour souligner l'importance de cette interface vitale entre les auteurs et le public. Des livres de si grande qualité n'existent que grâce à des personnes telles que Christian Counillon, qui vont chercher ou susciter des projets d'ouvrages, accompagnent les auteurs dans l'élaboration, la rédaction et les choix iconographiques, et permettent la réalisation de livres beaux et intelligents.

La cérémonie de remise du prix a eu lieu le 21 mars 2015 au Salon du Livre à Paris, en présence de Gilles Haéri (directeur général des Éditions Flammarion), Catherine Allais (directrice scientifique chez Belin), Jean-Michel Courty (président du jury du Prix Perrin 2014) et Alain Fontaine (président de la SFP).

Le directeur général des Éditions Flammarion a souligné le grand professionnalisme dont fait preuve le lauréat, maîtrisant les exigences à la fois scientifiques, littéraires et commerciales du métier. Ce prix est attribué l'année où Flammarion fête ses 140 ans, alors même que la société fut dès sa création étroitement liée à la publication d'ouvrages scientifiques.

La SFP félicite Christian Counillon et l'encourage à poursuivre son travail remarquable de diffusion de la culture scientifique au sein de la société.

Roger Maynard : un grand physicien, qui a mis ses talents au service de la communauté scientifique

Roger Maynard, président de la Société Française de Physique de 2005 à 2007, et professeur émérite à l'Université Joseph Fourier de Grenoble depuis 2003, est décédé le 30 mai 2015.

Roger Maynard est né à Nice en 1938. Après avoir effectué ses études de physique à l'Université de Marseille, il s'est installé en 1961 au Polygone scientifique Louis Néel à Grenoble, afin de commencer une thèse sur la physique de la matière condensée à basse température, sous la responsabilité du professeur Dreyfus. Depuis, il n'a plus jamais quitté ce lieu, à l'exception d'un séjour postdoctoral à Los Angeles.

En tant que scientifique, Roger Maynard est l'auteur d'une centaine de publications internationales, quelques-unes avec un indice de citation largement supérieur à 200. Toujours avec une intuition originale et innovatrice, il s'est intéressé à de nombreuses thématiques : les verres, les phonons, l'optique non linéaire, la mésoscopie des photons, la supraconductivité et la nanophysique, l'acoustique, les cristaux liquides, la théorie de l'information, la sismologie, la physique numérique... Une vingtaine de thèses ont été rédigées sous sa responsabilité. Il a soutenu un nombre incalculable de jeunes chercheurs, nombre qui dépasse probablement la centaine. Roger Maynard a été organisateur et animateur d'une vingtaine de grandes conférences et écoles internationales, aux Houches, à Cargèse, à Paris. L'école qu'il a organisée aux Houches en août 1978 avec Roger Balian et Gérard Toulouse sur la « Matière Mal Condensée » – avec l'intégration de nombreux (futurs) prix Nobel au sein des jeunes doctorants – a probablement été l'une des meilleurs écoles de physique jamais organisées, avec une formule qui a été exemplaire pour celles qui ont suivi. Roger Maynard a très activement contribué à la création d'une interface pluridisciplinaire entre la physique de la matière condensée et d'autres domaines en physique, comme l'optique et la géophysique, dont profitera encore très longtemps la nouvelle génération.

Roger Maynard a été précurseur en tant qu'enseignant et administrateur. Il a fondé l'un des deux premiers Magistères de la Physique en 1986, avec l'École normale supérieure de Paris, puis a créé l'Association des Responsables de Magistère en France et porté le projet de la Maison des Magistères de l'Université Joseph Fourier sur le Polygone scientifique de Grenoble. C'est là-bas qu'il a fondé en 1990 la jeune équipe *« Expérimentation Numérique »*, qu'il a dirigé jusqu'à sa reconnaissance en 1998 en tant qu'unité mixte de recherche de l'Université de Grenoble 1 et du CNRS. Le *« Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés UMR 5493 »* héberge actuellement de nombreux (jeunes) chercheurs et enseignants-chercheurs, et est devenu un laboratoire d'une grande excellence scientifique, porteur de la physique théorique et numérique à Grenoble.

Dans les années 1990, Roger Maynard s'est impliqué dans l'administration universitaire. De 1994 à 1998, il a été vice-président de l'Université Joseph Fourier, chargé de la recherche, dans l'équipe de Daniel Bloch. Entre 1999 et 2002, il a occupé différentes fonctions de conseiller (nanosciences) auprès du ministère de la Recherche. Autour de son 65^{e} anniversaire, en février 2003, la communauté scientifique internationale lui a rendu hommage, et plus de 150 scientifiques se sont manifestés à Grenoble, y compris des dirigeants de l'Université, du CNRS et du ministère de la Recherche. Début 2005, c'est-à-dire pendant l'Année mondiale de la physique, Roger Maynard a été élu président de la Société Française de Physique, une responsabilité qu'il exercera jusqu'à l'année 2007. Pendant les cinq années suivantes, il a présidé le Conseil d'administration d'EDP Sciences, l'éditeur scientifique français, dont les actionnaires sont les sociétés savantes de chimie (SCF), de physique (SFP), d'optique (SFO) et de mathématiques appliquées (SMAI). Jusqu'à sa mort, Roger Maynard était un membre très actif du Comité d'Éthique du CNRS (COMETS). À ce titre, il est intervenu régulièrement sur les publications scientifiques, le plagiat, les archives ouvertes.

Sa toute dernière passion scientifique était la flèche du temps. Encore tout récemment, fin avril 2015, il a fait une intervention grand public dans la section locale de la SFP à Rennes, intervention qui est postée en ligne sur YouTube.

Bart Van Tiggelen et **Alain Fontaine**,
pour le Conseil d'administration de la Société Française de Physique

Les engagements de Roger Maynard

Roger Maynard nous a quittés brusquement le 30 mai dernier. Un petit nombre de ses proches le savait affecté par une implacable maladie de la moelle, qui affaiblissait ses défenses immunitaires. Mais tous ses collègues et amis ont été pris par surprise par cette terrible nouvelle, tant Roger était resté actif, plein d'entrain et de projets jusqu'à ses derniers jours.

On savait Roger très passionné par ses recherches. Je voudrais apporter ici un témoignage sur d'autres activités auxquelles il consacrait beaucoup de son temps avec générosité. Il eut un rôle fondamental à la Mission Scientifique Universitaire au début des années 2000 : chargé d'établir les budgets de recherche de toutes les universités françaises en physique et sciences pour l'ingénieur, il fut à la fois admiré et craint pour la rigueur de sa vision. C'est à cette période aussi qu'il eut l'intuition prémonitoire de l'importance des nanosciences et lança la première Action Concertée Incitative du domaine, grâce à quelques maigres fonds que nous avions détournés de concert à partir d'autres programmes ministériels.

Nos activités communes se sont poursuivies pendant les années de sa présidence de la SFP, suivie de la mienne, fortement marquées par la loi relative aux Libertés et Responsabilités des Universités. Nous avons ensemble accompagné les innovations dans la politique universitaire par des analyses et des mises en garde, parfois écoutées. Une autre grande affaire fut le lancement par la SFP des Écoles de Physique Avancée au Maghreb, qui connurent des réalisations dans chacun des trois pays. La SFP, grâce à Roger, a tissé des liens très étroits avec la Société Tunisienne de Physique : c'est à Carthage qu'il fit l'une de ses dernières brillantes conférences sur l'irréversibilité du Temps, dans une école de métrologie coorganisée avec nos amis tunisiens.

Enfin Roger fut très actif au Comité d'éthique du CNRS, où nous nous sommes retrouvés en 2011. L'ouverture des sciences au monde et à la population le passionnait. Il a beaucoup contribué à la réflexion du CNRS sur les publications en « open access gold », pour lesquelles sa connaissance de l'édition chez EDP Sciences l'incitait à la prudence. Au sujet de la science dite citoyenne, il insistait toujours sur la nécessaire diffusion de la culture scientifique auprès de tous les publics, et aussi sur l'importance d'être à l'écoute de la population sur les sujets sensibles qui suscitent des controverses.

C'était un bonheur de travailler avec Roger : il était attentif, curieux de la pensée des autres, prêt au consensus, mais pourtant ferme sur certains principes d'un rationalisme de bon aloi. Sa gentillesse et sa patience étaient sans mesure. Sa disparition est pour beaucoup d'entre nous une perte que nous n'avons pas fini de mesurer.

Michèle Leduc

Du *Bulletin de la SFP* à *Reflets de la physique*

C'est au printemps 2005 que j'ai rencontré pour la première fois Roger Maynard, nouvellement élu président de la SFP, alors que je venais de prendre la responsabilité de la rédaction du *Bulletin de la SFP*. Roger était convaincu de l'importance, pour la Société Française de Physique, du maintien d'une revue sur papier comme vecteur de rubriques et d'articles approfondis et réfléchis (à côté d'un site internet rénové, de réactivité élevée). Mais il souhaitait que le *Bulletin*, dont le premier numéro datait de 1970 [1] et dont la présentation n'avait pas beaucoup évolué depuis, soit profondément rénové, avec des articles scientifiques plus courts et d'une pédagogie plus travaillée, une forme plus attractive, et une plus grande ouverture aux débats de science et société et aux problèmes de politique scientifique. Roger pouvait être très persuasif : il m'a rapidement convaincu.

C'est encore lui qui, à l'automne de la même année, plutôt que de se contenter d'une simple évolution du *Bulletin*, a pris la décision de faire appel pour la réalisation de cette revue rénovée, à des maquettistes professionnels sélectionnés à la suite d'un appel d'offre. Laetitia Morin et Keith Villemeur conçurent alors et mirent au point la maquette actuelle.

Enfin, c'est toujours Roger qui décida de changer le nom de la revue, pour lequel nous avons consulté une soixantaine de responsables de la SFP. Le premier numéro de *Reflets de la physique* parut ainsi en octobre 2006, avec un éditorial de Roger Maynard.

Charles de Novion

Barbara Romanowicz : une géophysicienne comblée

Interview réalisée par Véronique Pierron-Bohnes et Sandrine Morin, de la commission Femmes et Physique (F&P) de la Société Française de Physique, le 3 décembre 2014 à l'Institut de Physique du Globe de Paris.

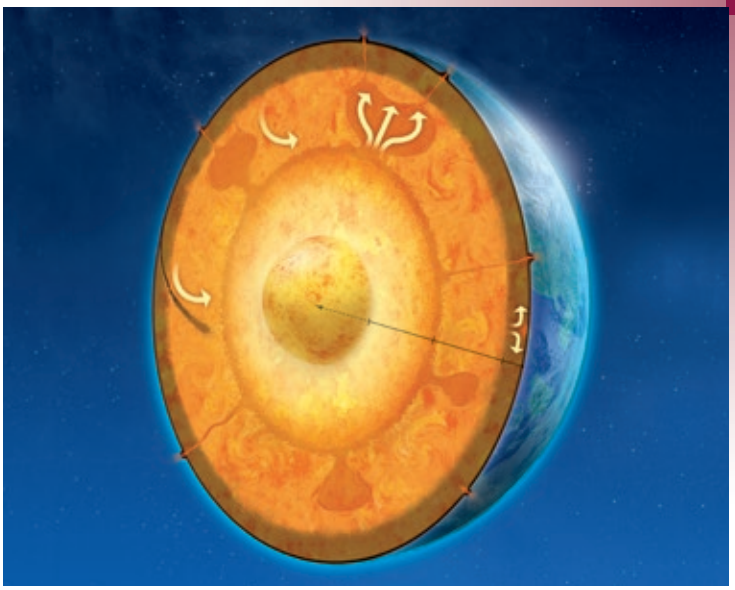
D'où vient votre vocation pour la recherche scientifique ?
Le hasard… Il n'y avait pas de scientifique dans ma famille, ma mère était écrivain. Quand j'étais petite, j'étais passionnée par l'astronomie. Je faisais répéter à mes proches le nom et la taille des planètes. À l'école, j'étais surtout bonne en maths, même si j'aimais beaucoup les langues – j'étais bilingue français/polonais – et je me voyais bien dans l'interprétariat. Mais avec un 19 en maths au bac, j'ai intégré une classe préparatoire au lycée Saint-Louis, en mathématiques. Ensuite, je suis rentrée à l'École normale en maths, jusqu'en maîtrise (1974). Et là, tout à fait par hasard, dans les couloirs de l'université de Jussieu, j'ai vu une affiche pour un DEA (M2 actuel) en astronomie fondamentale qui proposait deux semaines de stage au Pic du Midi ! J'aime beaucoup la montagne et je me suis lancée !
Dans ce DEA d'astronomie, j'ai étudié l'effet des anomalies de masses à l'intérieur de la Terre sur les orbites des satellites artificiels. À l'époque (années 1970), tout le monde s'excitait plutôt sur la Lune, sur le fait qu'on y trouvait des points de forte densité : les *mascons*. J'ai fait ensuite une thèse de 3e cycle sur ces histoires de satellites en astronomie. Pendant cette thèse, j'ai rencontré des géophysiciens et ici à l'IPGP, un Australien, Kurt Lambeck, qui m'a proposé de faire une thèse d'État sur l'utilisation des données gravimétriques pour étudier l'intérieur de la Terre. À l'IPGP, j'ai côtoyé d'autres jeunes chercheurs qui faisaient de la sismologie. L'un d'entre eux, Georges Poupinet, étudiait les vitesses de propagation des ondes sismiques et en tirait des renseignements sur la structure interne élastique de la Terre : c'était le tout début de la tomographie sismique. Ce sujet m'a beaucoup plu. J'ai terminé ma thèse d'État en sismologie (1979) et, depuis, je suis restée dans ce domaine. Cela m'a permis d'associer mon goût des mathématiques et l'aspect pratique. Les deux me plaisent toujours aujourd'hui !

Vous avez toujours travaillé sur ordinateur ou vous avez aussi été sur le terrain ?
J'ai été un peu sur le terrain pendant ma thèse à l'IPGP. J'ai le souvenir d'une semaine dans les Pyrénées, passée à récupérer dans les stations sismiques les enregistrements qui, à l'époque, se faisaient sur papier. Après mon postdoc aux États-Unis, lors de la mise en place du réseau Géoscope, j'ai beaucoup voyagé. Ma présence sur le terrain avait pour but d'explorer les sites avant de les installer, avec de nombreuses discussions diplomatiques. À Berkeley, j'ai aussi participé à des visites de terrain sur des sites californiens très intéressants. Mais pour ma recherche au quotidien, j'ai besoin d'un ordinateur et de bases de données. Celles-ci, issues de travaux en réseaux, sont très importantes en sismologie. J'ai beaucoup œuvré au cours de ma carrière à la mise en place de ces réseaux sismiques.

Dans votre premier cours au Collège de France, vous racontez qu'Inge Lehmann, géophysicienne dans les années 1930, avait le sentiment qu'elle avait souvent perdu des compétitions en face d'hommes « bien moins compétents qu'elle ». L'avez-vous ressenti au cours de votre carrière ?
Elle avait eu le mot fameux « être en compétition avec des hommes incompétents ». Moi, je n'ai jamais eu ce sentiment, même si cela existe. Inge Lehmann a découvert la Graine, le noyau interne de la Terre, en 1936, à 54 ans. Les temps ont pas mal changé depuis. Pour ma part, j'estime avoir eu de la chance d'entrer à l'École normale au moment où les filles étaient séparées des garçons. C'était, je pense, de meilleures conditions de réussite pour les filles. Ma seule anecdote de compétition homme/femme date de mon séjour à Harvard, pendant mon doctorat : j'avais eu une meilleure note qu'un étudiant et il m'avait fait tout un discours comme quoi ce n'était pas juste parce que, lui, allait avoir la responsabilité d'une famille et qu'il fallait qu'il réussisse !

Lorsque vous avez été directrice d'un laboratoire, vous avez rencontré des problèmes de ce type ?
Non, pas du tout. J'ai plutôt pas mal réussi ma carrière et je ne me plains pas. Cependant, je ressens parfois que des résultats dans mon équipe ne sont pas mis en valeur aussi bien qu'ils auraient pu l'être, par manque de culot sans doute. Cet aspect-là a joué.
Je suis consciente de ces problèmes parmi les étudiants. Les filles en général veulent vraiment être sûres de leur coup avant de présenter quelque chose, alors que les garçons présentent des résultats non encore confirmés plus facilement. Mais, finalement, ce n'est peut-être pas un désavantage !

Un des aspects difficiles pour beaucoup de femmes dans la recherche est le fait qu'elles doivent assumer la plus grosse partie des tâches familiales (enfant, logistique, parents), ce qui leur prend beaucoup de temps et les handicape pour leur carrière. Comment avez-vous concilié vie professionnelle et vie personnelle ?
J'ai eu la chance d'avoir un mari qui a bien partagé les tâches, et aussi l'aide de ma famille. Le système français est par ailleurs plutôt favorable quand on a un poste au CNRS, avec la tranquillité d'esprit.



Anatomie de la Terre : la graine au centre, puis le noyau liquide, le manteau inférieur et enfin le manteau supérieur. © CNRS Photothèque - DAGAN Antoine

Vous avez effectué votre carrière entre Berkeley en Californie et Paris. Comment comparez-vous les modes de fonctionnement de la recherche dans les deux pays ?

J'ai beaucoup aimé les années à Berkeley, d'ailleurs j'y retourne souvent. Quand on m'a proposé le poste de professeure, j'ai trouvé que c'était une expérience très intéressante. Je n'avais pas forcément l'intention de rester aussi longtemps mais, du point de vue professionnel, aux États-Unis il y avait de nombreuses opportunités d'obtenir des crédits de recherche, alors qu'en France il n'y avait pas l'équivalent. Aux États-Unis, dans les années 90 tout était possible si on avait de bonnes idées. On avait 30 à 35 % de chance d'obtenir un financement. C'était important. Aujourd'hui, c'est plutôt 10 % (équivalent à l'ANR en France).
J'ai aussi apprécié d'élever mes enfants là-bas. Ils ont fréquenté une école bilingue avec pas mal d'avantages. Les horaires étaient aussi plus sympathiques. Ils sont contents d'y être allés, mais le problème c'est que l'un a pris racine là-bas et que l'autre vit en Angleterre. Cela fait une famille écartelée. C'est aussi le risque !

Si vous regardez vos trente ans de géophysique, quelles ont été les grandes évolutions de votre recherche ?

C'est une vaste question. Les dix premières années après mon post-doc aux États-Unis, cela a été le développement du réseau sismique. Ma recherche était alors plutôt théorique, en attendant des données de qualité. Par contre, depuis que je suis aux États-Unis, j'ai construit toute une série d'outils pour la tomographie sismique à grande échelle avec, à la fois, un volet méthodologique et un volet théorique. Ces modèles sont de plus en plus performants pour permettre de découvrir plus de détails dans les structures internes et mieux comprendre la dynamique. C'est le fil conducteur.

Quel est le but ultime de votre recherche ?

C'est vraiment comprendre comment fonctionne la Terre, quelle est la machine qui provoque la tectonique des plaques, comment se fait le couplage entre la tectonique des plaques et les mouvements de convection dans le manteau sous-jacent.

Quelle sont pour vous les découvertes les plus formidables en géophysique pendant cette période ?

La découverte qui m'a le plus passionnée, c'est quand dans les années 98 on a mis en évidence la présence de modes propres de la Terre dans les enregistrements de bruit sismique. On a ensuite montré que cela venait du vent qui excite les vagues ordinaires sur les mers, vagues qui vont interagir entre elles pour former des vagues à plus longue période qui elles-mêmes interagissent avec la Terre solide. Pendant un moment, les sismologues « longue période » ne parlaient plus que de cela !
Il y a eu aussi une autre révolution : la mise au point de méthodes de corrélation de bruit. Dans cette approche, on n'attend plus les séismes, mais on utilise le bruit de fond continu pour calculer les corrélations entre les enregistrements de paires de stations. L'équipe de Michel Campillo (Grenoble) a écrit les premiers articles exploitant ainsi le bruit de fond, et maintenant beaucoup d'études de la croûte sont faites par cette méthode. À courte période, ce bruit de fond vient aussi des océans : les vagues qui déferlent sur la plage engendrent des ondes de surface de la Terre solide. Cela donne un pic de bruit de 6 à 20 secondes de période, qui contient beaucoup d'énergie et est utile pour l'étude de la structure de la croûte, mais aussi depuis peu pour celle du manteau.

Si vous deviez donner un message aux jeunes qui sont en thèse ou en postdoc, qu'est-ce que vous leur diriez ?

Je leur dirai que tout le monde n'est pas fait pour la recherche. Il faut vraiment être passionné, et s'en rendre compte assez tôt car c'est quand même un métier difficile. On passe 90% de son temps à faire des choses plutôt routinières, et on ne sait jamais quand arrivera la récompense. Donc, il ne faut pas être motivé par des résultats rapides, mais être patient et avoir confiance en soi. Si on est passionné, il faut persévérer et ne pas se laisser faire ; les bons arrivent toujours à trouver un poste, même en France aujourd'hui. Bien sûr ce n'est pas forcément facile, on n'arrive pas du premier coup, mais il ne faut pas forcément s'en inquiéter, il faut y croire. ▮

Parcours

Née le 5 avril 1950 à Suresnes dans une famille polonaise, mathématicienne de formation, Barbara Romanowicz est une sismologue géophysicienne, spécialiste de la structure et de la dynamique de la Terre.

Chercheuse à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), elle a dirigé Géoscope, un réseau sismologique français qui couvre le monde entier. Pendant vingt ans, elle a dirigé le laboratoire de sismologie de l'Université de Californie à Berkekey.

Depuis 2011, elle est professeure au Collège de France, titulaire de la Chaire de Physique de l'intérieur de la Terre, et professeure de géophysique à l'Université de Berkeley. Membre de l'Académie des sciences depuis 2013, elle a reçu de nombreuses distinctions comme la médaille d'argent du CNRS (1992), les médailles Alfred Wegener (1999) et Beno Gutenberg (2003) de l'Union européenne des géosciences, la médaille Inge Lehmann (2009) de l'Union américaine de géophysique.

© DAMAE Medical

De gauche à droite : David Siret, Anaïs Barut et Arnaud Dubois.

DAMAE Medical : diagnostiquer les tumeurs cutanées sans biopsie

Le prototype de diagnostic rapide et non invasif des cancers de la peau fondé sur l'imagerie optique proposé par DAMAE Medical est prêt. La start-up vise une commercialisation en 2016.

© LCF

Expériences au Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique.

Le diagnostic du cancer de la peau nécessite un prélèvement de tissu, analysé ensuite au microscope sous la forme de coupes histologiques. C'est la biopsie. Et si l'analyse pouvait être réalisée directement sur le patient, avec la même exigence de précision ? C'est ce que propose désormais la start-up issue du CNRS, DAMAE Medical, dont le dispositif d'imagerie optique à haute résolution fera l'objet d'essais cliniques avant la fin de l'année.

Plus précisément, celui-ci est fondé sur la tomographie par cohérence optique (OCT) [1] : une image est reconstruite par interférence de deux faisceaux de lumière, dont l'un est réfléchi par le tissu à analyser. Cette technique est notamment utilisée avec succès en ophtalmologie, où elle permet d'obtenir des images de la rétine.

Mais, contrairement à l'œil, la peau est un milieu diffusant, semblable à du verre dépoli : les rayons de lumière ne s'y propagent pas en ligne droite et perdent rapidement toute « mémoire » de leur lieu d'origine. D'où *a priori* des images totalement floues. Alors même que, si une résolution à l'échelle des couches de la rétine est suffisante en ophtalmologie, l'examen d'une tumeur de la peau s'effectue à l'échelle cellulaire. *« Un milieu diffusant, la nécessité de résoudre à l'échelle du micromètre sur un millimètre d'épaisseur, et le tout en temps réel, nous cumulons trois difficultés »,* résume Arnaud Dubois, enseignant-chercheur au Laboratoire Charles Fabry (CNRS, IOGS) et cofondateur de DAMAE Medical.

Il n'en dira pas plus sur ce qui a permis concrètement de surmonter ces difficultés. Un brevet est en effet actuellement en cours de dépôt. Cette capacité à reconstituer une image à partir des seuls photons non diffusés (environ un sur un milliard envoyés !), est l'aboutissement de plus de dix ans de recherche fondamentale.

Une chose est sûre, un prototype fonctionne désormais au laboratoire. Il sera prochainement mis en service à l'Hôpital Saint-Louis, à Paris, et au CHU de Saint-Étienne, lors d'essais cliniques. S'en suivra une étape de miniaturisation, afin que le dispositif se présente sous la forme d'une sonde portable à appliquer directement sur la peau. *« L'objectif n'est pas d'éliminer complétement les biopsies,* explique le physicien, *mais de proposer un outil en amont qui permettra de limiter cette méthode invasive aux cas potentiellement problématiques qui nécessitent un examen plus approfondi. »*

Pour que cette petite révolution annoncée en dermatologie devienne une réalité, la structure est prête. En plus de ses trois fondateurs – David Siret, Anaïs Barut et Arnaud Dubois, les deux derniers étant de jeunes diplômés de la « Filière Innovation Entrepreneurs » de l'Institut d'Optique Graduate School – DAMAE Medical emploie trois autres personnes à temps complet : deux ingénieurs, dont un ingénieur de valorisation du CNRS, et une attachée clinique qui fait le lien avec le monde médical.

Pour preuve du sérieux de l'entreprise, DAMAE a déjà été récompensée par de nombreux prix : à l'été 2014, elle a fait partie des lauréats du Concours mondial d'innovation ; puis, en juin dernier, elle a remporté le prix EDF Pulse dans la catégorie « Santé ». La Banque publique d'investissement lui a par ailleurs alloué récemment une subvention d'aide au lancement de 250 000 euros. Et, en tant que lauréate 2014 du prix international de la fondation *Altran* pour l'innovation, elle reçoit l'aide d'ingénieurs pour l'industrialisation et le montage.

De quoi faire bientôt du dépistage du cancer de la peau un geste médical presque anodin ! ▮

Mathieu Grousson, journaliste

[1] C. Boccara, *Reflets de la physique* **13** (2009) 10-13.

▸ **Contact**

Arnaud Dubois
(arnaud.dubois@institutoptique.fr)

Séminaire **"Women in Science"** à Bangalore

Du 3 au 5 févier 2015 a eu lieu à Bangalore (Inde) un séminaire franco-indien « Femmes en Sciences », soutenu par le CEFIPRA, et qui a réuni 250 participantes indiennes, 9 participantes françaises et une dizaine d'hommes. Le séminaire a mis en relief la science faite par des femmes dans le cadre de collaborations franco-indiennes en mathématiques, physique et biologie, et a été l'occasion d'une table ronde sur le problème des femmes en sciences : comment le CEFIPRA peut-il aider à améliorer leur place, en Inde en particulier ?

© CEFIPRA

Cinq chercheuses, un chercheur et quatre doctorantes françaises ont été invités. Catherine Jessus (directrice de l'Institut des sciences biologiques du CNRS), Graça Raposo-Benedetti (Institut Curie), Sylvie Rousset (MPQ, Université Paris-Diderot et CNRS), Véronique Pierron-Bohnes (IPCMS, Strasbourg, et commission « Femmes et physique » de la SFP), et Anne Pépin (directrice de la Mission pour la place des femmes au CNRS) ont présenté oralement leur travail. Quatre doctorantes françaises ont présenté un exposé oral ou un poster. 150 doctorantes et chercheuses indiennes ont présenté un poster.

Des physiciennes de renom ont donné des conférences invitées :

- **Rohini Godbole** (Indian Institute of Science, Bangalore) a présenté comment les recherches en physique des particules vont se poursuivre après la découverte du boson de Higgs à laquelle elle a participé.
- **Shobhana Narasimhan** (Jawaharlal Nehru Centre for Advanced Scientific Research, Bangalore) calcule par la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) la structure et les propriétés de nanostructures.
- **Sylvie Rousset** a présenté les résultats de son groupe sur la microscopie à effet tunnel avec analyse de polarisation de *spin*. Elle a montré les modifications de la structure électronique de molécules de C_{60} lorsqu'elles sont déposées sur un substrat magnétique.
- **Chanda Jog** (Indian Institute of Science, Bangalore), a parlé de la structure et de la dynamique des galaxies en se focalisant sur l'interaction entre les étoiles, le gaz inter-galactique et la matière noire.
- **Véronique Pierron-Bohnes** a décrit ses derniers résultats sur les nanoparticules de CoPt ainsi que les techniques de pointe qui permettent d'en étudier la structure, la morphologie, et les propriétés magnétiques et électrocatalytiques.
- **Anjana Dogra** (CSIR National Physical Laboratory, New Delhi), a parlé des nouvelles hétérostructures d'oxydes isolants où un gaz d'électrons 2D vient d'être mis en évidence.
- **Rupamanjari Ghosh** (Jawaharlal Nehru University, Delhi), a présenté les derniers résultats de son laboratoire pour manipuler les atomes avec la lumière. ▮

Véronique Pierron-Bohnes (vero@unistra.fr)

Le CEFIPRA

Le Centre Franco-Indien pour la Promotion de la Recherche Avancée (CEFIPRA) est un exemple unique de coopération bilatérale en science et technologie. Le Centre a été créé en 1987 et reçoit le soutien financier du Département de Science & Technologie du gouvernement indien et du ministère français des Affaires étrangères et européennes.

Mandat

Promouvoir les collaborations de recherche entre l'Inde et la France dans les sciences et les technologies de pointe.

Création et statut

L'idée de créer un organisme commun de promotion de la recherche entre chercheurs français et indiens a vu le jour lors d'une rencontre entre le président français Valéry Giscard d'Estaing et le Premier Ministre indien Indira Gandhi. Ce projet s'est concrétisé lors de la réunion du Comité franco-indien pour la coopération scientifique et technologique en 1982, et le CEFIPRA a été créé officiellement sous la forme d'une association de droit indien en avril 1986.

Programmes de recherche scientifique

Le CEFIPRA soutient des groupes de recherche de haut niveau dans le cadre de projets dans des domaines de pointe des sciences fondamentales et appliquées. Les domaines de coopération comprennent la physique pure et appliquée.

Moyens mis à disposition des partenaires du projet : moyens humains (postes de doctorant / postdoctorant pour les partenaires français, JRF/SRF/RA pour les partenaires indiens), achats de consommables et petits équipements pour les partenaires indiens, et déplacements (internationaux et nationaux).

Dates limites pour soumettre des projets scientifiques :

le 1er avril et le 1er octobre de chaque année.

http://cefipra.org/section.aspx?catid=876&langid=1

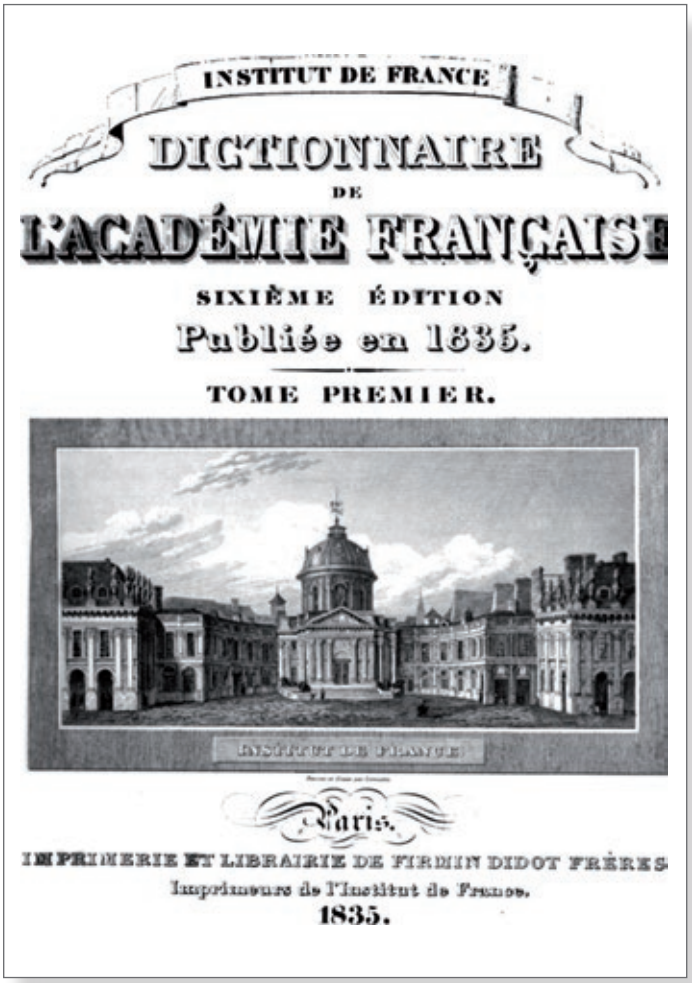
CEFIPRA

Pour l'usage du français en science

Un travail de terminologie en sciences physiques

S'il est clair que l'écriture d'articles originaux dans une langue commune – aujourd'hui l'anglais – est nécessaire dans un contexte d'échanges au niveau international, cette note est un plaidoyer pour ne pas perdre l'usage du français en sciences qu'une culture classique, que nous avons reçue en français pour une majorité d'entre nous, encourage. Voici une étape nécessaire.

L'introduction d'un vocabulaire nouveau accompagne souvent une découverte. Mais cela n'a conduit que rarement à la recherche d'équivalents français des mots nouveaux qui accompagnent cette découverte et qui seraient pourtant utiles pour une plus large audience. Cela est regrettable. Que dire des inventions de mots nouveaux par des non-francophones ? Les mots *informatique* et *logiciel* ont été de telles créations de mots nouveaux, des néologismes. On cite le groupe de travail en terminologie créé par Étienne Wolff, François Jacob et Jacques Monod pour définir un vocabulaire français qui accompagne leur recherche à l'Institut Pasteur. Dans l'histoire récente, des physiciens comme Jacques Friedel et Pierre-Gilles de Gennes ont eu ce même souci terminologique. Ludwik Leibler, inventant récemment une nouvelle classe de matériaux polymériques autoréparants, évoque son souci dans la recherche d'un néologisme qui qualifie sa découverte, les *vitrimères*. Comme le souligne le début du présent article, il y a un risque d'appauvrissement culturel qui, bien sûr, ne touche pas seulement les sciences exactes.


INSTITUT DE FRANCE

DICTIONNAIRE

DE

L'ACADÉMIE FRANÇAISE

SIXIÈME ÉDITION

Publié en 1835.

TOME PREMIER.

Paris.

IMPRIMERIE ET LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES

Imprimeurs de l'Institut de France.

1835.

Une action nationale est conduite auprès de la *Délégation générale à la langue française et aux langues de France (DGLFLF)*, qui concerne l'enrichissement de la langue française. Celui-ci porte sur le vocabulaire des sciences et techniques, mais pas exclusivement. Une vingtaine de commissions, récemment rebaptisées *groupes d'experts*, travaillent pour cet enrichissement du vocabulaire par des propositions qui accompagnent les faits nouveaux des sciences, de la technique et de la société.

Leurs néologismes sont examinés par une *Commission d'enrichissement de la langue française* (qui a remplacé depuis le 25 mars 2015 la *Commission générale de terminologie et de néologie*[1]), composée d'une dizaine de membres externes nommés et de responsables permanents. Nous en faisons partie depuis un bon nombre d'années, et nous examinons à notre tour les propositions, pour les prendre en compte et les compléter. À la suite de notre travail et d'un examen par l'Académie française, elles seront validées (en particulier, dans le *Journal Officiel* et sur le site de France Terme[2]). Ce travail en équipe autour de la terminologie et de la néologie peut être passionnant. Nous y avons souvent comme point de repère ce qui se fait au Canada francophone[3].

Tout à fait paradoxalement, le domaine des *sciences physiques* n'a pas de groupe d'experts. Une commission *chimie et matériaux* examine une partie du vocabulaire concerné, mais une vision physique en est souvent absente. Le manque de participation des physiciens couvrant des domaines d'intérêt divers est sensible.

Si vous êtes intéressé par cette démarche et que vous pensez pouvoir y être utile, nous vous proposons de participer à la constitution d'un groupe (avec Marc Lachièze-Rey), qui pourrait prendre appui sur la Société Française de Physique.

Étienne Guyon (guyon@pmmh.espci.fr), Laboratoire PMMH, ESPCI
Michel Petit (michel.petit@m4x.org), Académie des sciences

(1) https://fr.wikipedia.org/wiki/Commission_spécialisée_de_terminologie_et_de_néologie
(2) www.culture.fr/franceterme
(3) www.btb.termiumplus.gc.ca

« En cherchant Majorana – Le physicien absolu »

Étienne Klein (Équateurs Essais / Flammarion, 2013, 176 p., 17 € – Poche : Folio Gallimard, 2015, 208 p., 7 €)

Ce n'est pas qu'une biographie, pas seulement ! Pourtant, la fascination d'Étienne Klein pour la vie et les avancées conceptuelles de grands physiciens (d'Einstein à Dirac, de Pauli à Gamow) ne date pas d'aujourd'hui. Il a déjà montré tout son intérêt pour l'analyse du contexte historique, l'étude des sources, la compréhension détaillée des débats qui ont animé le monde scientifique dans la première moitié du XX^{e} siècle.

Ce regard d'historien prend une nouvelle dimension dans son ouvrage « En cherchant Majorana », publié en 2013 chez Flammarion et réédité en 2015 en collection de poche chez Gallimard. Étienne Klein sort de la peau de l'historien et essaie de rentrer dans celle d'Ettore Majorana. L'étude très approfondie des sources connues et la découverte d'écrits inédits, couplées à une rencontre avec le neveu de Majorana, servent de base au développement d'un portrait dans lequel la personne d'Étienne Klein et le personnage paradigmatique d'Ettore Majorana se retrouvent souvent mélangés. Pourtant, ils n'ont pas grande chose en commun. Majorana, physicien italien à la personnalité complexe, misanthrope et génial, est le paradigme du physicien romantique (on lit « le physicien absolu » en sous-titre du livre), envahi – au sens littéral du terme – par ses recherches dont les conséquences les plus profondes, en particulier celles sur la nature des neutrinos, occupent encore aujourd'hui la communauté des physiciens des particules.

Pour nous dresser son portrait en nuances, nous faire apercevoir le cheminement intellectuel qui l'aurait guidé et illustrer la portée révolutionnaire de ses théories, Étienne Klein nous fait passer par son propre ressenti. Et là, ce n'est ni le scientifique, ni l'historien, mais plutôt le philosophe, le pédagogue, le communicateur qui prend le relais, en nous parlant de lui pour nous parler de Majorana. Étienne Klein se voit contraint de jouer le médiateur, tant le caractère du physicien italien est insondable, et de reconstruire l'histoire d'un homme, jusqu'au célèbre mystère de sa mort, comme on écrirait un roman. Le style littéraire devient plus soigné tout en restant simple, et les nombreuses références historiques ne racontent pas une chronologie mais dressent le portrait d'un homme double, attachant et énigmatique.

C'est plus un hommage qu'une biographie, plus un roman qu'une histoire. C'est un écrit original qui nous fait apprécier la grandeur de ce physicien méconnu en France et idolâtré en Italie ; un des rares physiciens dotés du courage et de la conviction qui mènent à postuler l'existence de nouveaux objets physiques ; un physicien de son époque, mais en rupture avec ses pairs ; un visionnaire, dont les enseignements les plus étonnants sont – heureusement – encore à tirer.

Stefano Panebianco
Service de physique nucléaire, CEA/Saclay

« La planète des hommes – Réenchanter le risque »

Gérald Bronner (Presses Universitaires de France, 2014, 156 p., 13 €)

La science et les techniques, par leurs actions sur la nature, mettent-elles en danger l'Humanité ?

La réponse est positive chez le philosophe Jonas, un disciple de Heidegger, et aboutit à recommander l'abstention devant les innovations, tant qu'elles n'ont pas fait preuve de leur innocuité.

Pour le sociologue Bronner, il ne s'agit pas de nier les risques, mais de montrer que la peur est mauvaise conseillère et qu'elle paralyse l'innovation. L'idéologie qui s'appuie sur la pensée de Jonas distille la peur ou le rejet *a priori* de nombreuses techniques : OGM, ondes électromagnétiques, vaccinations, produits chimiques, engrais artificiels, produits phytosanitaires, énergie nucléaire, gaz de schistes, nanotechnologies en sont quelques exemples, où chacun d'entre nous se sent un avis autorisé. Cela aboutit à mettre en doute même la balance avantages/inconvénients de la vaccination ou à avoir près de 40% de la population convaincue des dangers des ondes électromagnétiques sur la santé.

L'humain se caractérise par l'édification de sociétés de plus en plus complexes, nécessitant une coordination croissante entre un très grand nombre de spécialités. Personne ne peut appréhender les connaissances scientifiques dans leur totalité, et il est donc nécessaire de disposer d'experts dans des domaines spécialisés auxquels on puisse faire confiance pour orienter les choix politiques. Comme les connaissances sont toujours limitées, la garantie absolue de la non-dangerosité d'une innovation ou de la maîtrise de ses effets adverses ne peut être totalement assurée *a priori*, et cela alimente la défiance systématique à l'égard de la science et de la technique.

Face à cette « heuristique de la peur », qui prend l'aspect extrême de la décroissance et de l'éloge de la pauvreté, Bronner sous-titre son livre « réenchanter le risque ». Ne pas être paralysés par la peur, oser le progrès scientifique et technique, base du progrès humain et social ! Dans la morosité ambiante, voici un petit livre salutaire que tous nos collègues physiciens devraient lire !

Frédéric Livet
Laboratoire SIMAP, INP Grenoble

Sciences | Médias

Comment parler de sciences aux jeunes

1er février 2016
à la préfecture de Paris et d'Île de France

Quels outils médiatiques pour parler de science
aux enfants et aux adolescents ?

Inscription gratuite et obligatoire

www.sciencesetmedia.org

Conception et réalisation : laetitiamorin-graphiste.fr • © Vladgrin - istock

Préfet de la Région Île-de-France

Société Chimique de France

SIF

Société Française de Physique

SFdS

SMAI

Société Mathématique de France