

de la **PHYSIQUE** *reflets*

n°14
mai 2009

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

► Physique des particules

Le LHC, grand collisionneur de hadrons

La recherche du boson de Higgs au Tevatron

► Les propulseurs à plasma

► Dans le sillage de *La main à la pâte* au collège

► La situation des femmes physiciennes en France



www.sfpnet.fr

Article disponible sur le site <http://refletsdelaphysique.fr>



Des temps difficiles

En ces périodes de contestation dans le milieu universitaire, la SFP n'a pas échappé aux turbulences. Son président Yves Petroff, nouvellement nommé, a démissionné le 3 mars à la suite de désaccords internes dans le contexte de discussions sur un éventuel rachat d'EDP Sciences par Springer. Cette affaire nous a valu de très nombreux messages ; l'enchaînement des événements vous est rapporté dans l'article pp. 29-30. Les négociations autour de cette vente sont maintenant arrêtées, avant même d'avoir vraiment commencé, et je souhaite vivement que la SFP retrouve rapidement toute sa sérénité.

Je tiens à dire d'abord que je déplore vivement, et tout le bureau de la SFP avec moi, le départ d'Yves Petroff. Il avait pris avec beaucoup de vigueur des initiatives très positives pour la SFP, comme en témoigne son éditorial d'investiture dans le précédent numéro de *Reflets*. La SFP a beaucoup bénéficié de sa vision à long terme, alimentée par sa grande expérience de la recherche au niveau international. Qu'il soit ici remercié du travail qu'il a accompli pour notre société pendant toute son année de vice-présidence. En attendant qu'une personnalité se dégage parmi nous pour reprendre le flambeau, j'ai accepté d'assurer de nouveau la présidence de la SFP pendant quelque temps.

Sans tomber dans le pessimisme qui domine en cette période de crise, il faut admettre que la situation est tendue dans le milieu universitaire. Les projets ministériels se succèdent à un rythme épuisant : dans le secondaire, puis sur les carrières dans le supérieur, et maintenant pour la « mastérisation » de la formation des enseignants. Sur toutes ces questions la SFP a travaillé, en concertation étroite avec les sociétés de mathématiques (SMF) et de chimie (SCF), pour développer des analyses, critiquer les projets, faire des propositions d'amendement, intervenir par des lettres ou des entrevues avec les ministres concernés. Toutes les positions de la SFP sont consultables sur son site (www.sfpnet.fr, page « débats »). Dans certains cas, comme pour les projets sur la classe de seconde ou la réécriture du décret sur l'évaluation des enseignants-chercheurs, nous espérons avoir un peu contribué au recul du gouvernement sur les points les plus contestables des réformes envisagées.

Pour ce qui est de la SFP elle-même, je partage les préoccupations exposées par Yves Petroff dans son éditorial. Le nombre des membres de notre société plafonne à un chiffre ridiculement bas ; la tendance est même plutôt à la baisse, comme l'indique le graphique fourni plus loin (p. 28) par notre trésorier. L'adhésion à prix très réduit pour les jeunes a certes attiré quelques centaines de doctorants, mais une grande proportion des chefs d'équipe et des directeurs de laboratoire ne se sent toujours pas motivée pour adhérer à notre société, en dépit de nos actions généralisées pour promouvoir la science. De plus, notre pénétration dans le milieu des entreprises reste très faible. Renforcer la SFP est un grand chantier qui prendra du temps, car il s'agit d'établir une tradition d'adhésion en motivant les jeunes dès le début de leur carrière, comme à l'IOP ou à la DPG, les sociétés de physique britannique et allemande. On peut aussi espérer que la création d'une fédération plus large, regroupant des sociétés d'ingénieurs avec la SFP, apportera une partie de la solution.

Élargir la base de ses membres est le moyen le plus sûr pour la SFP d'accroître et même de conserver sa visibilité. En effet, il faut être conscient que la source de revenus de la SFP provenant d'EDP Sciences est susceptible de diminuer dans l'avenir : les ventes des revues scientifiques chez EDP sont à la baisse, les bibliothèques américaines résilient leurs abonnements avec la crise, les revues en *open access* font concurrence. Sans revenir sur l'occasion manquée du rachat d'EDP par Springer, il est clair qu'il va falloir trouver de nouvelles idées pour soutenir notre filiale d'édition et maintenir son potentiel, ce qui est aussi important pour son personnel que pour la SFP elle-même.

Michèle Leduc

Présidente par intérim de la Société Française de Physique

Éditorial

- 2 Des temps difficiles
Michèle Leduc

Le mot de la rédaction

- 4 *Reflets de la physique* dispose désormais d'un site web
Charles de Noivion

Avancées de la recherche

- 5 Le LHC, grand collisionneur de hadrons
Bruno Mansoulié
- 10 La recherche du boson de Higgs au Tevatron
Gregorio Bernardi
- 15 Les propulseurs à plasma : une technologie spatiale d'avant-garde
Stéphane Mazouffre

Science et société

- 20 Dans le sillage de *La main à la pâte* :
Rencontre entre disciplines scientifiques au collège
Alice Pedregosa
- 23 La 3^e Conférence internationale sur les femmes en physique (Séoul, 2008)
Catherine Thibault
- 24 La situation des femmes physiciennes en France
Catherine Thibault, Anne Pépin, Martial Duclay, Elisabeth Giacobino, Michèle Leduc

Au sein et autour de la SFP

- 27 Actualités de la SFP

Reflets de la physique et ses lecteurs

- 29 Échec d'un rapprochement entre EDP Sciences et Springer
Roger Maynard et Michèle Leduc
- 31 Courrier des lecteurs

Comité de rédaction

Président : Jean-Pierre HULIN

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

Directeur de la publication : Sylvie MAGNIER

Rédacteur en chef : Charles de NOIVION

Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR

Réalisation graphique : Lætitia MORIN

Suivi de rédaction : Agathe CYMER

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

Dépôt légal 2^e trimestre 2009 - Commission Paritaire 0310 6 86176

ISSN 1953-793 X © SFP - Édité à 3300 exemplaires

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

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

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

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

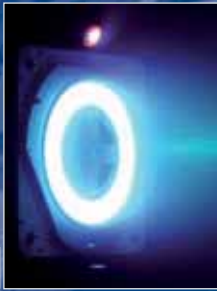
SFP Bulletin, Institut Henri-Poincaré,

11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris

e-mail : sfp-bulletin@ihp.jussieu.fr - Serveur : www.refletsdelaphysique.fr



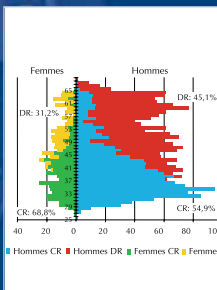
page 6



page 17



page 20



page 26



En couverture : les premiers aimants ont été installés dans le tunnel du LHC, mais ne sont pas encore connectés. Image d'arrière plan : le détecteur CMS du LHC. Crédit photos : CERN
Voir article p. 5.

Reflète de la physique dispose désormais d'un site web

www.refletsdelaphysique.fr

Développé et géré par EDP Sciences, le site est ouvert depuis fin avril. On peut y accéder à partir de la liste des revues d'EDP (<http://publications.edpsciences.org>), ou à partir du site *web* de la SFP (www.sfpnet.fr). Ce nouveau site, spécifique à notre revue, permettra de lui donner plus de visibilité et de mieux valoriser ses articles. Il sera ouvert à la publicité (matériel scientifique, annonces de postes...)⁽¹⁾.

Le site est actuellement organisé autour d'un bandeau horizontal en haut de page, comprenant trois onglets (« Tous les numéros », « Actualités » et « Chercher »), et d'un bandeau vertical à gauche, donnant accès aux informations générales sur la revue.

L'onglet « Tous les numéros » permet d'accéder aux anciens numéros de *Reflète de la physique*, classés par année de parution. Pour chaque numéro, on trouve le fichier pdf complet de la revue, et les fichiers pdf individuels (en plus haute résolution) des principaux articles. Cet ensemble sera complété par les fichiers pdf d'une sélection d'articles publiés dans les derniers numéros du *Bulletin de la SFP*.

Les articles de *Reflète de la physique* ont reçu un numéro DOI⁽²⁾; ils sont maintenant référencés à CrossRef et dans les bases de données bibliographiques internationales.

L'accès à la plupart des fichiers pdf de *Reflète de la physique* est réservé aux membres de la SFP ; pour cela, vous devez fournir un identifiant (*login*) et un mot de passe, les mêmes que pour la partie réservée (annuaire) du site de la SFP⁽³⁾. Néanmoins, pour chaque numéro de *Reflète*, l'éditorial et un article (parfois deux), indiqués « Free », ainsi que les résumés de tous les articles, sont ouverts à tous. Les pdf d'articles individuels en accès restreint peuvent être téléchargés au prix de 5 euros. Les fichiers pdf des articles du *Bulletin de la SFP* seront en accès gratuit. Pour chaque numéro de *Reflète*, il est prévu d'ajouter une table des matières complète en clair. Le dernier numéro paru de *Reflète de la physique* est accessible sur la page d'accueil du site.

L'onglet « Actualités » donne accès à des informations récentes importantes : congrès, documents, courrier adressé aux autorités de tutelle... Nous y avons ajouté l'enquête de satisfaction, qui peut être téléchargée et envoyée par courrier ou par e-mail (pièce jointe) à la SFP.



L'onglet « Chercher » permet de retrouver, à l'aide d'un moteur de recherche, les articles des revues d'EDP Sciences à partir d'un nom d'auteur ou d'un mot clé.

Le site de *Reflète de la physique* doit être amélioré. En particulier, il est prévu d'ajouter : dans le bandeau de gauche, un sous-onglet « Historique », retraçant brièvement l'histoire de la SFP et de son *Bulletin* ; une rubrique « Partenaires » (information et lien avec les sites d'organismes ou de sociétés, par exemple celles qui sponsorisent des prix SFP) ; une page « À paraître », annonçant les articles du numéro suivant, ainsi que ceux acceptés pour les numéros ultérieurs ; éventuellement, une rubrique « Documents ».

Mais il y a certainement d'autres améliorations à faire. Chers lecteurs de *Reflète*, n'hésitez pas à nous faire part de vos idées.

Je remercie le personnel d'EDP Sciences : Guillaume Drouen, Éléonore Jardillier, Catherine Vialle et Marie-Louise Chaix, qui ont élaboré et gèrent ce site, et notre graphiste, Lætitia Morin, qui a réalisé le bandeau du haut de la page d'accueil.

Charles de Novion
Rédacteur en chef de *Reflète de la physique*

(1) Pour passer une annonce dans la revue ou le site *web*, contacter aurelie.lefebvre@edpsciences.org. Les tarifs publicitaires peuvent être téléchargés à partir de l'onglet « Pour les annonceurs », en bas à gauche de la page d'accueil.

(2) DOI : *Digital Object Identifier* (identifiant d'objet numérique), mécanisme d'identification de ressources numériques, telles que des publications (articles, livres, rapports).

(3) L'identifiant de chaque membre est du type : première lettre du prénom suivie du nom ; son mot de passe, du type sfpxxxxx, où xxxxxx désigne son numéro SFP.

Le LHC, grand collisionneur de hadrons⁽¹⁾

Bruno Mansoulié (bruno.mansoulie@cea.fr)

Atlas Team Leader, IRFU, Service de physique des particules, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette

Après plus de 15 ans d'efforts, le 10 septembre 2008, le CERN a mis en service à Genève, le LHC, le plus puissant accélérateur de particules jamais construit. Nous sommes convaincus que cet instrument, quand il fonctionnera à plein régime, apportera une contribution décisive à notre connaissance des structures élémentaires de la matière.

En effet, on espère au moins compléter le *Modèle Standard* de la physique des particules, en découvrant la *boson de Higgs*, toujours inobservé. Mais nombreux sont ceux qui pensent que l'expérimentation au LHC pourrait bien ouvrir une fenêtre sur un domaine totalement nouveau, et commencer de répondre aux grandes questions de la physique d'aujourd'hui : d'où vient la masse des particules ? Quelle est la nature de la matière noire ?

(1) Hadron : particule composite sensible à l'interaction nucléaire forte. Les hadrons sont composés de quarks, d'antiquarks et de gluons. Le proton, le neutron et leurs antiparticules, ainsi que les mésons, sont des hadrons.



1. Construction du collisionneur. (a) Réalisation de la première interconnexion entre deux cryoaimants. (b) Le 1000^e cryoaimant supraconducteur en place (5 septembre 2006) : les deux taches jaunes contiguës sont des bouchons sur les deux tubes à vide où passeront les faisceaux ; juste au-dessus (et en dessous à gauche), les câbles supraconducteurs, prêts à être connectés à l'aimant suivant.

L'origine du projet LHC (*Large Hadron Collider*) remonte au début des années 1980 [1]. À ce moment, le CERN envisage de construire un grand collisionneur électron-positron, le LEP. La taille de l'anneau doit être aussi grande que possible, dans les limites du budget. Dès le début, certains pensent qu'après le LEP, le tunnel pourrait accueillir un anneau de protons. La circonférence du tunnel est fixée à 27 km. En 1984, les USA font le projet d'un collisionneur de protons de 80 km de circonférence. Ce chiffre est là pour s'assurer de dominer la future possibilité du CERN, mais aussi parce qu'avec la technologie d'aimants supraconducteurs de l'époque (atteignant un champ de 4 T), c'est la dimension requise pour explorer l'échelle d'énergie « magique » de 1 TeV (1000 GeV) dans les collisions.

Le CERN construit donc le LEP et, en parallèle, lance un programme de R&D intense dans deux directions : tout d'abord, augmenter le champ des aimants de l'accélérateur pour augmenter l'énergie des faisceaux, à tunnel fixé. La valeur atteinte, qui sera utilisée par le LHC, est de 8,4 T, plus de deux fois la valeur des machines précédentes. Ensuite, augmenter l'intensité des faisceaux, et surtout développer des détecteurs

capables de mesures très diverses et de précision dans un environnement difficile : collisions très rapprochées (25 ns) et nombreuses, rayonnements importants.

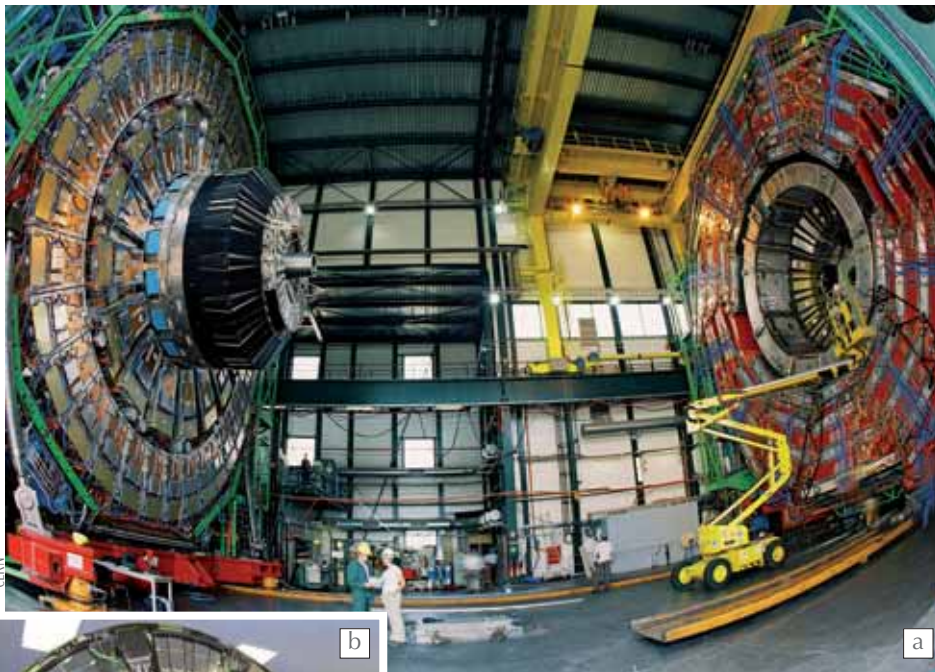
En 1993, les USA abandonnent leur projet puis rejoignent le LHC, suivis par d'autres pays non-membres du CERN (Japon, Canada, Inde...). (Voir l'encadré 1, p. 7, qui donne quelques dates et données clés sur le LHC.)

L'accélérateur

Le LHC est donc un « collisionneur » de protons : il comprend deux tubes à vide (fig. 1) dans lesquels circulent des paquets de protons, en sens inverse. Les anneaux se croisent en huit points ; en quatre de ces points sont installées les expériences qui observent les particules issues des collisions de protons. (Voir, à titre d'illustration, le schéma de la chaîne d'accélération du Fermilab aux USA, p. 11.)

Les paquets de protons (environ $3 \cdot 10^{11}$ protons, 4 cm de long) sont guidés par des aimants supraconducteurs : 1232 dipôles pour la courbure, 392 quadripôles pour la focalisation, et des milliers de petits aimants correcteurs (sextupôles,

>>>



2. Le détecteur de l'expérience CMS. (a) Avant fermeture pour test par mesure du passage des muons du rayonnement cosmique. (b) Une des parties « avant » du détecteur interne de traces. Diamètre : environ 2 m. On voit les « pétales », constitués de plaquettes de silicium. Sur chaque plaquette sont gravées environ 1000 pistes de détection lues individuellement. La surface totale de silicium du détecteur interne de CMS est d'environ 200 m² pour 75 millions de pistes et pixels.

entre un composant (quark, gluon) d'un proton et un composant de l'autre. Ceci a plusieurs conséquences importantes : tout d'abord, l'énergie mise en jeu dans la collision « élémentaire » varie d'une collision à l'autre. Ensuite, les composants « spectateurs » des protons ne restent pas totalement inactifs ! Ils sont à l'origine d'un grand nombre de particules « molles » qui s'ajoutent à celles produites par la collision « dure » : c'est l'événement sous-jacent.

Parmi les quatre expériences, **Atlas** et **CMS** sont des détecteurs polyvalents, couvrant tout l'angle solide autour du point de collision. Ils visent à explorer la physique des collisions les plus dures (et donc les plus rares), à des énergies jamais atteintes auparavant. Nous reviendrons sur ce programme de physique.

L'expérience **LHCb** étudie aussi les collisions proton-proton, mais se spécialise dans l'étude des états finals comportant des quarks *b* et les mesures de précision.

Il sera aussi possible d'accélérer des ions dans le LHC (au cours de périodes dédiées), et l'expérience **Alice** est spécialisée dans l'étude des collisions ion-ion (jusqu'à plomb-plomb), et la mise en évidence d'un nouvel état de la matière nucléaire : le plasma de quarks et de gluons.

Atlas et CMS sont typiques des expériences polyvalentes sur les collisionneurs, mais à des tailles beaucoup plus grandes que celles des générations précédentes (au LEP par exemple). Atlas mesure 26 m de diamètre et 45 m de long, et pèse ~ 7000 t ; CMS (fig. 2) est plus compacte, mais pèse 13 000 t. Toutes deux présentent une structure en oignon autour du point de collision, chaque couche étant constituée d'une partie centrale cylindrique et de deux « bouchons ». En partant du point de collision et en allant vers l'extérieur, on trouve (voir encadré 2, p. 8) :

- *Le détecteur central*, qui détecte en plusieurs points le passage des particules chargées, en les perturbant le moins possible. Il comprend un très grand nombre de détecteurs indépendants très précis (plusieurs millions), pour pouvoir séparer et mesurer toutes les particules issues des collisions (fig. 2).
- *Le calorimètre électromagnétique*, qui présente un milieu très dense dans lequel interagissent les particules, en particulier les électrons (et positrons) et photons. Les particules secondaires ré-interagissent à leur tour, formant des gerbes assez localisées dans le détecteur (quelques dizaines de cm de long sur quelques cm de diamètre). La partie chargée de ces gerbes est détectée, le signal total étant proportionnel à l'énergie de la particule initiale.

>>>

octupôles...). Les dipôles de 15 m de longueur (cylindres bleus sur l'image de couverture) comprennent deux ouvertures pour les deux faisceaux, avec des champs magnétiques opposés qui se referment l'un l'autre. Les aimants sont refroidis à 1,9 K par de l'hélium superfluide, permettant d'utiliser plus de courant (donc de champ) qu'à la température de l'hélium liquide (4 K).

À pleine intensité, 2800 paquets de protons circuleront dans chaque anneau (environ un paquet tous les 8 mètres). Les croisements de paquets se produiront donc aux points d'intersection toutes les 25 ns (40 MHz). Aux points d'intersection utilisés par les expériences, les faisceaux sont focalisés pour obtenir la taille transverse la plus petite possible, environ 15 microns, afin de provoquer le maximum de collisions.

L'énergie stockée dans les faisceaux est très importante, 360 MJ par faisceau, soit environ 60 kg de TNT. Un des défis de la machine est donc le contrôle des faisceaux, la détection de tout défaut de trajectoire, et l'extraction rapide d'un faisceau sur une zone d'abandon sûre.

Les expériences

Une « expérience » est en fait un observatoire de collisions. L'accélérateur fournit des collisions (« événements »), que l'expérience trie, enregistre, reconstruit, analyse. La statistique joue ici un grand rôle : dans un croisement de paquets, les collisions proton-proton se produisent au hasard, et leur nombre fluctue autour du nombre moyen. Ensuite, une collision de deux protons peut être plus ou moins « dure », en mécanique classique on dirait plus ou moins « frontale ». Enfin, au niveau quantique, le même état initial (la même collision) peut produire des états finals différents, suivant une loi de probabilité.

On utilise des protons parce qu'il est possible de les accélérer à des énergies très élevées, bien plus que des électrons. Mais il y a un prix à payer : les protons ne sont pas des particules élémentaires, mais sont constitués de plusieurs quarks et de gluons liés les uns aux autres, qui se partagent aléatoirement l'impulsion du proton. Les collisions les plus dures seront donc celles

- *Le calorimètre hadronique*, dense lui aussi, qui remplit la même fonction pour les autres types de particules (pions, kaons, protons, etc.)
- *Le détecteur à muons* : après les calorimètres, les seules particules qui ont traversé sont les muons (le muon est un « frère » de l'électron, de masse plus élevée). Leur passage est détecté par des chambres d'ionisation à fils.

Le détecteur central et le détecteur à muons sont plongés dans des champs magnétiques intenses. La mesure de la courbure de la trajectoire des particules chargées permet la détermination de leur impulsion.

Les deux expériences Atlas et CMS diffèrent cependant considérablement. Tout d'abord, les configurations de leurs champs magnétiques sont totalement différentes. Ensuite, les technologies choisies pour chacun des détecteurs cités ci-dessus sont différentes. Ces choix correspondent à des approches différentes des risques et des possibilités d'erreur de mesures. Il était indispensable d'avoir deux expériences concurrentes et totalement indépendantes pour garantir les résultats ; il est intéressant que les choix techniques soient aussi complémentaires.

Chacune des quatre expériences du LHC a été conçue et réalisée par une collaboration de 100 à 200 instituts du monde entier, rassemblant de 1000 à 2000 physiciens et leurs supports techniques. Les modes de communication, décision, management, de telles collaborations, essentiellement auto-gérées, sont particulièrement intéressants, mais ce serait le sujet d'un autre article...

Environnement expérimental, analyse, simulation

Les collisions « ordinaires » entre deux protons, régies en premier lieu par l'interaction nucléaire forte, ont une probabilité élevée, et produisent de nombreuses particules. En fonctionnement nominal, chaque croisement de paquets de protons sera l'occasion d'une vingtaine de collisions en moyenne. Chaque collision produira en moyenne une centaine de particules, distribuées dans tout l'angle solide. Au total, chaque croisement, toutes les 25 ns, engendre plus d'un millier de particules. Les détecteurs doivent donc être très rapides, pour ne pas confondre les événements de croisements consécutifs, et finement divisés, pour mesurer chacune des particules. Ce flux de particules impose aussi l'emploi de détecteurs et d'électronique résistant aux radiations.

Les événements « banals », issus de collisions « molles », sont extrêmement nombreux (un milliard par seconde). En revanche, les événements « intéressants » sont produits dans la collision de très haute énergie entre deux constituants de l'un et l'autre proton, lorsque chacun de ces constituants emporte une grande fraction de l'impulsion de son proton parent. La probabilité qu'un constituant emporte une impulsion élevée est très faible, et ces collisions « dures » sont donc très rares.

Le potentiel de découverte de nouvelles particules, ou d'un nouvel effet, dépend donc directement de la capacité d'une expérience à isoler de très rares événements dans un grand « bruit de fond » d'événements banals provenant d'une physique déjà connue.

Dans les cas les plus favorables, il est possible d'annoncer une découverte en ayant observé une dizaine d'événements bien identifiés, si on a prouvé que le bruit de fond (plusieurs milliards d'événements au départ), peut être réduit à moins d'un ou deux événements.

Pour concevoir le détecteur et pour imaginer une « analyse », on peut partir d'un modèle théorique, explorer les événements qu'il prédit et leurs caractéristiques, et faire en sorte qu'après mesures et analyse, les données montrent un excès d'événements

de ce type, par rapport à la physique connue.

Une aide importante est apportée par les simulations numériques. Connaissant la théorie, on simule des événements issus des collisions (avec les tirages aléatoires correspondant aux probabilités quantiques de chaque processus). On simule ensuite l'interaction des particules avec chacun des détecteurs, la réponse électronique du détecteur, le traitement du signal, sa numérisation (à nouveau avec tirages aléatoires correspondant aux résolutions des détecteurs, bruits d'électronique, etc.). On utilise ces simulations pour concevoir l'expérience en augmentant la sensibilité aux événements recherchés, puis, une fois le détecteur figé, optimiser l'analyse des données, et en mesurer l'efficacité et la réjection du bruit de fond.

Le boson de Higgs

Le grand sujet de recherche qui a motivé la construction du LHC est la recherche du boson de Higgs. Il serait trop long de décrire en détail le Modèle Standard et le rôle clé qu'y joue le mécanisme de Higgs, dont la réalisation la plus simple est l'introduction d'une particule scalaire, donc ni constituant de la matière (comme les quarks, électrons...) ni messenger d'une interaction (comme le photon, les bosons W et Z...).

>>>

Le LHC en bref

encadré 1

Quelques dates :

- 1984 : première réunion à Lausanne
- 1991 : résolution de principe sur le LHC
- 1994 : accord des pays européens (membres du CERN) pour le LHC
- 1995 : approbation des expériences Atlas et CMS
- 1997 : USA, Japon et Inde rejoignent le LHC
- 1998 : début du génie civil des cavernes des expériences
- ... Conception et construction de l'accélérateur et des expériences
- 2008 : mise en service

Quelques données :

- Anneau de collision proton-proton
- Circonférence : 27 km
- Énergie nominale par faisceau : 7 TeV
- Dans chaque sens : 2808 paquets de 10^{11} protons
- 4 points d'interactions avec 4 expériences : Atlas, CMS, LHCb, Alice
- Fréquence des collisions : 40 MHz
- Taux d'événements enregistrés par expérience : 200 Hz
- Taille d'un événement enregistré : environ 1,5 MByte
- Information enregistrée, à analyser, par an par expérience : 10^7 GByte

La participation française

- Pour l'accélérateur : conception et industrialisation des quadripôles (CEA-IRFU, CNRS-IPNO) ; cryogénie He superfluide (CEA-SBT).
- Pour les expériences :
Les équipes de physiciens, ingénieurs et techniciens du CEA-IRFU et du CNRS-IN2P3 (11 laboratoires) ont pris une part très importante à la conception, construction et mise en œuvre des détecteurs. Aujourd'hui, environ 250 physiciens de ces laboratoires préparent l'analyse des données.

>>>

Ce mécanisme permet l'unification des interactions électromagnétique et faible, et, au passage, est à l'origine des masses de toutes les particules élémentaires, constituants ou messagers [2].

Le boson de Higgs est la seule particule du Modèle Standard non encore observée. Sa masse m_H est inconnue : le LEP (en service de 1989 à 2000) ne l'a pas découverte, imposant ainsi $m_H > 114$ GeV. La cohérence de la théorie impose par ailleurs que m_H soit inférieure à environ 800 GeV. Au LHC, on recherchera donc des événements caractéristiques de la production d'un Higgs pour des masses appartenant à toute cette gamme. Le Tévatron, collisionneur proton-antiproton actuellement en service à Chicago, le recherche aussi activement, mais n'a accès qu'à la gamme 114-200 GeV [2].

Pour une masse donnée, on connaît tout du Higgs, en particulier ses modes de désintégration et leurs probabilités relatives ; on cherchera donc à mettre en évidence un mode de désintégration à la fois assez abondant et souffrant de peu de bruit de fond.

Ainsi, pour $m_H > 2 m_Z$ (où $m_Z = 91$ GeV est la masse bien connue du boson Z^0), le Higgs peut se désintégrer en deux bosons W

(70% des cas) ou deux Z^0 (30%). Le Z^0 a lui-même des modes de désintégration en e^+e^- ou $\mu^+\mu^-$ (3% chacun). Par conséquent, dans 0,1% des cas, un Higgs a pour état final 4 électrons, ou 4 muons, ou 2 électrons et 2 muons, un état final très caractéristique, très peu produit par d'autres processus, et facile à mesurer avec précision. Ce processus « plaqué or » garantirait la découverte d'un boson de Higgs standard par Atlas et CMS en un an de fonctionnement.

Les mesures actuelles des masses du boson W et du quark *top* permettent (par l'effet de corrections quantiques) une détermination indirecte de la masse du Higgs, qui favorise les basses masses : de la limite directe (114 GeV) à environ 200 GeV. Dans cette gamme, le canal $H \rightarrow ZZ$ n'est pas dominant, et on doit s'intéresser à d'autres modes de désintégration, plus difficiles à observer, comme $H \rightarrow WW$ ou $H \rightarrow \gamma\gamma$ (photon-photon). Les productions associées Higgs + W, Higgs + *top* + *antitop* seront aussi recherchées. Cette détermination indirecte, valide seulement dans le cadre strict du modèle le plus simple, renforce l'intérêt porté à cet intervalle de masse, mais ne doit

pas faire négliger les autres possibilités.

De très nombreuses études ont été faites à l'aide de simulations par les collaborations Atlas (fig. 3) et CMS. Leur conclusion est qu'un boson de Higgs standard ne peut échapper aux recherches après trois ans de fonctionnement du LHC.

Au-delà du Modèle Standard

Le Modèle Standard est aujourd'hui parfaitement confirmé par toutes les mesures dans le domaine des particules élémentaires. Il a pourtant d'importantes limitations (au-delà de la découverte du Higgs) :

- Sa relative complexité : pourquoi trois familles de particules ? pourquoi ces structures de symétrie ? pourquoi ces valeurs de paramètres libres (27 au total) ?
- L'extrapolation à haute énergie : des problèmes théoriques difficiles apparaissent si l'on tente d'extrapoler le fonctionnement du modèle à des énergies très élevées (très loin de ce qu'on peut atteindre en laboratoire). Le modèle est donc nécessairement incomplet.

Une expérience sur collisionneur : l'exemple d'Atlas

encadré 2

Les collisions ont lieu dans une petite région sur l'axe des faisceaux (quelques μm de diamètre, quelques cm de long). Le but de l'expérience est de reconstituer le point exact de l'interaction, la direction des particules qui en sont issues, leur impulsion, et si possible leur nature.

L'expérience est constituée d'un ensemble de détecteurs arrangés en couches concentriques autour de l'axe des faisceaux (pour la partie centrale), et de deux « bouchons » qui ferment le cylindre aux deux extrémités. Chaque détecteur est un ensemble répétitif de très nombreux détecteurs individuels, de façon à individualiser les particules. Un ensemble de champs magnétiques est fourni par des électroaimants supraconducteurs.

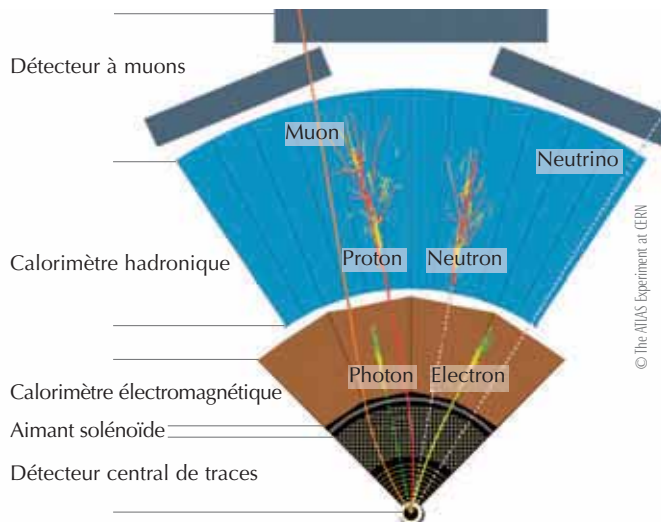


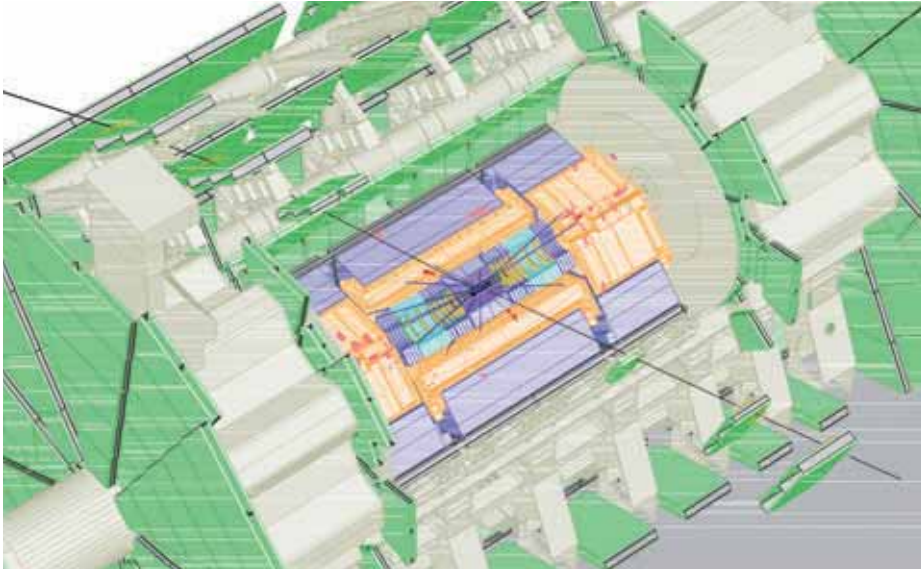
Schéma simplifié des méthodes de détection dans l'expérience Atlas, en vue transverse. Les trajectoires en pointillés ne sont pas détectées.

Certaines couches sont simplement sensibles au passage d'une particule chargée et mesurent la position de ce passage (*hit*). C'est le cas des couches les plus internes (sur la figure : « détecteur de traces »). Dans cette région centrale, règne un champ magnétique uniforme parallèle à l'axe des faisceaux, fourni par un solénoïde. À partir des *hits*, le logiciel de reconstruction peut reconstruire la trajectoire en hélice de chaque particule et en déduire son impulsion, proportionnelle au rayon de l'hélice. Parmi les particules chargées, seuls les muons atteignent la région la plus externe, où règne un champ toroïdal fourni par le grand aimant externe à huit bobines, les autres ayant été arrêtées avant par les calorimètres.

Les calorimètres sont constitués d'un assemblage de matière très dense (plomb, cuivre, fer) et de milieux détecteurs. Une particule incidente interagit avec la matière dense, engendrant des secondaires, qui elles-mêmes interagissent etc., jusqu'à ce que l'énergie des secondaires ne leur permette plus d'interagir. Le milieu détecteur interposé est sensible aux particules chargées de cette « gerbe ». La somme des signaux mesurés pour une gerbe est proportionnelle à l'énergie de la particule incidente. Noter que les calorimètres peuvent mesurer l'énergie de particules incidentes neutres.

Les tailles latérale et longitudinale de la gerbe dépendent de la nature de la particule, et les détecteurs exploitent cette différence. Le calorimètre électromagnétique mesure ainsi les gerbes fines des électrons et des photons. Le calorimètre hadronique mesure les gerbes plus étendues des hadrons. Certaines particules peuvent ne pas interagir avec aucun des détecteurs, par exemple les neutrinos, ou de nouvelles particules neutres stables. Mais leur absence peut être vue dans le bilan global des impulsions transverses, puisque l'impulsion transverse de l'état initial est nulle.

Compte tenu du taux des collisions (40 millions par seconde), tous ces détecteurs doivent donner leur signal rapidement (10 à 50 ns). Le traitement et le filtrage de ces informations est en soi un défi technologique.



3. Simulation d'un événement Higgs $ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$ dans Atlas (écorché). On distingue les traces des deux muons qui sortent du détecteur, et les impacts des deux électrons (en rouge) dans le calorimètre central (orange).

• La matière et l'énergie noires. Depuis une dizaine d'années, l'analyse d'observations cosmologiques a conduit à réaliser que la matière ordinaire (celle du Modèle Standard) ne constitue que 4% de la densité d'énergie dans l'univers. 23% seraient une forme de matière différente, le reste (73%) une forme d'énergie non-matériellement totalement inconnue [3].

De nombreuses théories ont été imaginées pour dépasser le Modèle Standard et tenter de répondre à ces questions. Même si découvrir un boson de Higgs standard serait un grand succès, de nombreux physiciens espèrent en fait que le LHC mettra en évidence une physique au-delà du Modèle Standard, en confirmant par exemple l'une des théories envisagées, ou même en révélant une surprise.

Pour n'en citer qu'une, la « Supersymétrie », théorie proposée dès les années 1970, mais jamais encore confirmée, apporte des réponses partielles aux questions ci-dessus. La particule supersymétrique la plus légère (LSP, pour *Lightest Supersymmetric Particle*) est neutre, stable, et pourrait constituer les 23% de « matière noire » de l'univers. Pour certaines valeurs des paramètres de la théorie, cette particule serait produite dans les collisions du LHC, et il serait possible de la détecter : neutre, stable, les détecteurs n'y sont pas directement sensibles, mais l'impulsion qu'elle emporte apparaîtrait comme « manquante » dans le bilan de la réaction. La concordance d'une détection au LHC avec les observations astronomiques (et pourquoi pas avec une détection au sol par une expérience de type Edelweiss [4]) serait un vrai rêve de physicien.

En tout état de cause, toutes les théories actuellement imaginées ont été explorées à l'aide de simulations, et les expériences ont été conçues pour être sensibles à leurs éventuelles manifestations.

L'état des lieux du LHC

Le 10 septembre 2008 a eu lieu la mise en service du LHC, événement très médiatisé, qui marquait l'aboutissement d'une vingtaine d'années d'efforts. Pour la première fois, un paquet de protons de 450 GeV a été injecté dans un anneau et en a fait le tour complet, puis la même opération a été effectuée pour l'autre anneau de sens opposé. Ces premiers tours rapidement maîtrisés, et les mesures effectuées, ont démontré la qualité de la machine et l'excellente compréhension de son comportement.

Le 19 septembre 2008 est arrivé un incident majeur : suite à l'échauffement d'une jonction de câbles supraconducteurs, une grande quantité d'hélium a été vaporisée, entraînant d'importants dommages mécaniques. Après examen des enregistrements, les ingénieurs ont trouvé des signes avant-coureurs du problème initial, et pensent être à même de prévenir un autre incident de ce type. Pendant les prochains mois, il faudra bien entendu faire les réparations, améliorer le système de détection de surchauffe des supraconducteurs (en particulier les connexions), et éventuellement effectuer des modifications des dispositifs de sécurité pour en accroître l'efficacité. Ce programme ne présente pas de difficulté fondamentale, mais est assez lourd en termes logistiques. Le fonctionnement devrait reprendre à l'automne 2009.

Ce retard n'est pas en soi bien important comparé à la durée du projet, lancé officiellement en 1994. Mais la concurrence existe ! L'accélérateur de Fermilab aux USA, le Tevatron, qui fournit des énergies de faisceaux bien moins élevées (1 TeV + 1 TeV) fonctionne en effet à plein régime depuis plusieurs années, et ses deux expériences (CDF et DØ) bénéficient d'une excellente connaissance de leurs détecteurs. Compte tenu de son énergie, le Tevatron pourrait détecter un premier signe (2 à 2,5 déviations standards) si le boson de Higgs a une masse comprise entre 114 et 200 GeV, précisément celle indiquée par la détermination indirecte [2]. Toutefois, une véritable découverte (5 déviations standards) ne semble pas à sa portée.

En attendant les premières collisions du LHC, les physiciens améliorent les expériences et la compréhension des détecteurs, par exemple en mesurant le passage de rayons cosmiques. Ils préparent les logiciels à l'aide de simulations et testent les transferts massifs de données, en particulier avec les « grilles de calcul ». Tous ont bien sûr hâte d'analyser les premiers événements, et d'ouvrir une nouvelle page de l'histoire de la physique de l'élémentaire.

Pour en savoir plus...

- 1 • M. Jacob, « Une brève histoire du CERN », *Bulletin de la SFP* **147** (2005) 17-20.
- 2 • Voir l'article de G. Bernardi dans ce numéro, pp. 10-14.
- 3 • V. Ruhlmann-Kleider, *Reflets de la physique* **12** (2009) 16-19.
- 4 • Voir <http://edelweiss2.in2p3.fr/> ; *Bulletin de la SFP* **155** (2006) 15-20.

www.cern.ch, et en particulier <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>

En français, le site <http://www.lhc-france.fr/> présenté par les équipes françaises.

Revues :

- « De quoi est fait l'Univers ? », Dossier *Pour La Science*, **62** (janvier-mars 2009), en particulier pp. 8 à 27.
- *La Recherche*, **424** (novembre 2008), pp. 31 à 38 (3 articles).
- « LHC : la naissance d'un géant », *Science & Vie*, Hors-Série n° **244** (septembre 2008).
- « La nouvelle conquête de l'infiniment petit », série d'articles, *Sciences et Avenir*, **735** (mai 2008).
- « Des géants pour traquer l'infiniment petit », *Pour La Science*, **361** (novembre 2007) 98-104.

Livre :

LHC : enquête sur le boson de Higgs, de Michel Davier, aux éditions du Pommier (2008).

La recherche du boson de Higgs au Tevatron

Gregorio Bernardi (gregorio@in2p3.fr)

LPNHE, IN2P3 et Universités Paris VI et VII, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05

Après une introduction au boson de Higgs, nous présentons sa recherche dans le cadre du Modèle Standard par les expériences CDF et DØ auprès du collisionneur Tevatron du Fermilab (USA). Avec les données actuellement analysées, le Tevatron exclut que la masse du boson de Higgs du Modèle Standard soit entre 160 et 170 GeV/c² ⁽¹⁾. L'analyse des prochaines données couvrira la zone entre 115 et 160 GeV/c², favorisée par la théorie et par les indications expérimentales indirectes. Nous concluons sur les perspectives de découverte de cette particule mystérieuse dans les deux ou trois prochaines années.

(1) La masse du proton est d'environ 1 GeV/c² ; dans la suite, on posera c² = 1.

La physique fondamentale, de l'infiniment petit à l'infiniment grand, se trouve aujourd'hui dans une situation paradoxale. D'un côté, il existe une théorie des particules élémentaires, le Modèle Standard (MS), achevée au milieu des années 70 et qui, depuis, n'a jamais été mise en défaut malgré un très grand nombre de tests expérimentaux de plus en plus détaillés. De l'autre, les physiciens sont conscients des limites de cette théorie, tant sur le plan conceptuel que pour appréhender l'univers dans son ensemble, comme le montre de manière éclatante l'incompréhension de la nature de la matière noire et de l'énergie noire [1]. Bien que le Modèle Standard reste inviolé à ce jour, le nombre de questions qu'il soulève permet de l'attaquer sous plusieurs angles. Puisqu'il relie par les interactions faible et électromagnétique les leptons (tel l'électron) et les quarks, la question de l'existence de trois familles de particules élémentaires, ne différant que par les masses des deux quarks et des deux leptons qui les constituent, se trouve tout de suite posée (voir tableau ci-dessous).

Seule la première famille, constituée des particules les plus légères (colonne de gauche du tableau), est présente dans les atomes formant les molécules de notre monde ; alors pourquoi d'autres familles, qui n'apparaissent que fugitivement à haute énergie ?

Le problème de la masse des particules élémentaires et le mécanisme de Higgs

Les valeurs relatives des masses des particules entre familles, ou à l'intérieur d'une même famille, suivent aussi un schéma que nous sommes incapables d'expliquer. Pour essayer de comprendre cette caractéristique fondamentale des particules, leur masse, il faut revenir à la théorie quantique sous-jacente au Modèle Standard, en particulier celle qui permet de décrire l'unification des forces faible et électromagnétique, en une force électrofaible. Cette théorie n'autorise pas dans son état fondamental l'existence de masses non nulles pour les particules élémentaires. Cela posait bien sûr problème pour la description des particules existantes, lorsque la théorie fut avancée à la fin des années 60.

L'avancée conceptuelle qui permit à cette théorie de s'imposer fut la compréhension que s'il existait une particule H supplémentaire possédant des caractéristiques singulières, celle-ci entraînerait dans les premiers instants après le *Big Bang* la brisure de la symétrie qui garde unifiées les forces faible et électromagnétique à haute énergie. Cette brisure rendrait massives toutes les particules élémentaires, la particule H se transformant en une particule observable et également de masse non nulle : le boson de Higgs. Cette brisure « spontanée » de la symétrie est le « mécanisme de Higgs », du nom de Peter Higgs, le physicien qui fut un des premiers à le formuler (avec François Englert et Robert Brout). Dans le mécanisme de Higgs, les bosons de jauge W et Z de l'interaction électrofaible acquièrent des masses respectives d'environ 80 et 91 GeV, directement à partir du champ quantique initial, tandis que le photon reste de masse nulle. Les quarks et les leptons acquièrent leur masse d'une autre manière, par interaction avec le champ omniprésent associé au boson de Higgs. Bien que ce mécanisme puisse sembler

	Fermions			Bosons
Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top	<i>γ</i> photon
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom	<i>Z</i> boson Z
Leptons	<i>e</i> neutrino électron	<i>μ</i> neutrino muon	neutrino tau	<i>W</i> boson W
	<i>e</i> électron	<i>μ</i> muon	tau	<i>g</i> gluon

Tableau représentant les particules du Modèle Standard, à l'exception du boson de Higgs qui y joue un rôle particulier, puisqu'il intervient pour briser la symétrie électrofaible et donner une masse à toutes ces particules élémentaires (excepté le photon et les gluons). Chacune de ces particules a une antiparticule associée (notée par un surlignage, par exemple \bar{p} pour l'antiproton). Rappelons que le proton et le neutron sont des combinaisons triplettes, « uud » et « udd » respectivement, soumises à l'interaction forte, par l'intermédiaire des gluons.

« incroyable », les brisures spontanées de symétrie existent souvent dans la nature : c'est, par exemple, le cas du ferromagnétisme, qui engendre un alignement de tous les moments magnétiques élémentaires des atomes dans une direction donnée, alors que le système avait une symétrie isotrope avant la brisure.

La recherche du boson de Higgs

Le mécanisme ne peut cependant pas prédire la valeur des masses des particules, et la recherche du boson de Higgs se poursuit depuis les années 70, sans succès jusqu'à présent. Comme il n'a pas été observé dans le collisionneur LEP du CERN (arrêté en 2001), ceci montre que sa masse m_H est supérieure à 114 GeV [2]. Par ailleurs, des relations théoriques indirectes dans le Modèle Standard, relie la masse du boson de Higgs à celles du boson W et du quark *top*, ainsi qu'à d'autres observables expérimentales mesurées, qui permettent d'être sûr que m_H est inférieure à environ 185 GeV. En effet, la probabilité pour que ce soit le cas est supérieure à 95% (l'on définit alors ce résultat comme une limite supérieure à 95% de niveau de confiance, C.L.). En résumé, ces contraintes montrent que m_H doit se situer entre 115 et 185 GeV.

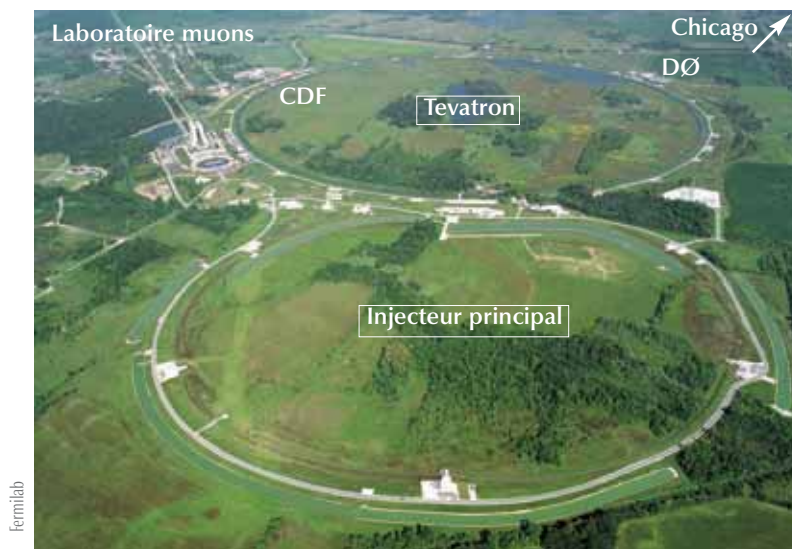
Le boson de Higgs pourrait donc être vu dans les deux ou trois années qui viennent par les collaborations CDF et DØ du Tevatron, le collisionneur proton-antiproton du Laboratoire de Fermi, près de Chicago (voir encadré). Les performances du Tevatron ont progressé de manière continue depuis 2003. Les améliorations déjà réalisées permettent de prévoir une quantité suffisante de données (soit $L=8 \text{ fb}^{-1}$, si on utilise l'unité qui permet de compter le nombre de collisions accumulées pendant la durée de la prise de données) à la fin des expériences, prévue en 2010, pour envisager une découverte du boson de Higgs, si les analyses atteignent elles aussi le degré de performances requis.

>>>

Le Tevatron au Fermilab

Le Laboratoire de Fermi (Fermi National Accelerator Laboratory) est un laboratoire national américain, situé à 70 km à l'ouest de Chicago (Illinois), dédié à la recherche fondamentale en physique des hautes énergies et disciplines associées. Inauguré en 1967, il dépend du Département de l'Énergie (DOE) et est ouvert aux chercheurs de toutes nationalités.

Le Fermilab a effectué des découvertes majeures en physique des particules : le quark *bottom* (1977) et le quark *top* (1995), composantes du Modèle Standard, puis le neutrino *tau* (2000).



Vue aérienne des accélérateurs du Fermilab

Le Tevatron, principal équipement expérimental du Fermilab, a commencé à fonctionner en 1983, et est actuellement, en attendant le démarrage du LHC (voir article de B. Mansoulié, pp. 5-9), l'accélérateur de particules de plus haute énergie au monde.

C'est un collisionneur proton-antiproton. Les antiprotons sont obtenus par collision de faisceaux de protons avec une cible métallique. Protons et antiprotons sont accélérés indépendamment à une vitesse proche de celle de la lumière, et se collisionnent (avec une énergie de 1,96 TeV dans le centre de masse) dans les deux expériences CDF et DØ.

Celles-ci font l'objet de collaborations internationales, composées d'environ 500 physiciens chacune (dont une cinquantaine de Français du CNRS et du CEA, qui travaillent en grande majorité dans DØ).

Le Tevatron a bénéficié en 1996-2001 d'un important programme d'amélioration, réalisé avec succès, et ses performances ont progressé de manière continue depuis 2003.

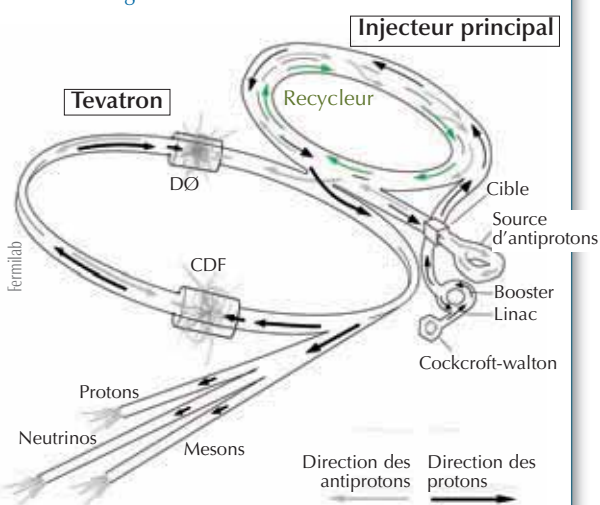


Schéma de la chaîne d'accélération du Fermilab

Production et désintégration du boson de Higgs

Le Modèle Standard prévoit qu'un boson de Higgs H se désintègre préférentiellement en une paire quark-antiquark $b\bar{b}$ s'il est « léger » ($m_H < 135$ GeV), ou, s'il est plus lourd ($m_H > 135$ GeV), en une paire de bosons W produisant un état final avec deux leptons et deux neutrinos. La stratégie de recherche au Tevatron dépend donc de la masse du boson de Higgs, et on distingue deux grands régimes : basse masse et haute masse.

La production du boson de Higgs peut se faire de manière directe, $p\bar{p} \rightarrow H$, comme l'indique la figure 1a, ou en production associée avec un boson W ou Z , $p\bar{p} \rightarrow WH$ (fig. 1b) ou $p\bar{p} \rightarrow ZH$ (fig. 1c, d). La production directe est exploitable à haute masse, car l'état final contient deux leptons et deux neutrinos, ce qui est suffisamment caractéristique pour pouvoir être bien identifié par rapport aux événements de bruit de fond. En revanche, à basse masse, seule la production associée WH ou ZH peut être séparée du bruit de fond, à l'aide des leptons de désintégration du W ou du Z et de la paire de quarks b provenant du boson de Higgs. En fait, expérimentalement, on n'observe pas directement les quarks ou les gluons, mais les jets de hadrons (tels le pion ou le proton) qui se forment immédiatement par interaction forte dans la direction du quark ou du gluon produit.

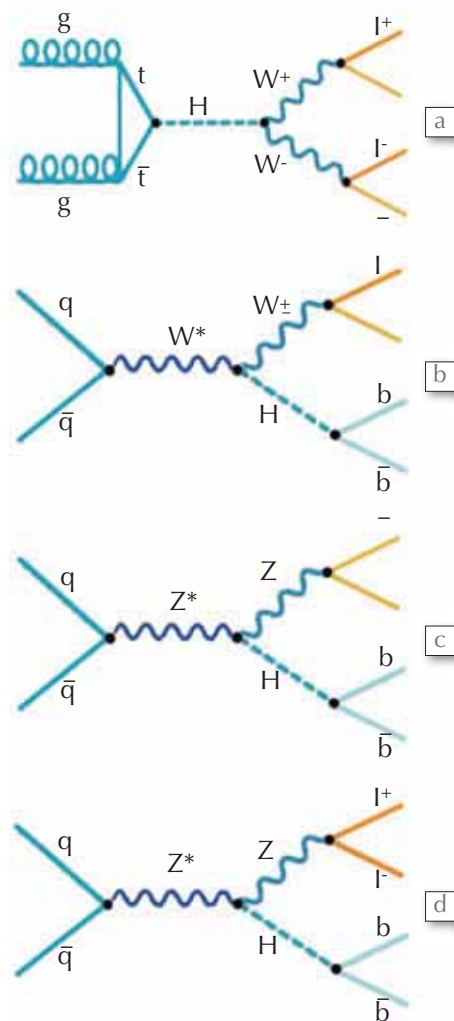
Au LHC, l'énergie dans le centre de masse est plus élevée. La recherche pourra être étendue jusqu'à des masses d'environ 1 TeV, dans le canal de désintégration $H \rightarrow Z\bar{Z}$, qui offre peu de sensibilité au Tevatron, mais qui est le canal le plus clairement visible au LHC, si la masse du boson de Higgs est supérieure à environ 130 GeV. À basse masse aussi, la stratégie de recherche au LHC est différente de celle du Tevatron, puisque les bruits de fond empêchent une recherche efficace des modes de production WH et ZH , avec $H \rightarrow b\bar{b}$. Dans ce cas, la recherche s'effectue prioritairement en détectant les désintégrations rares du Higgs en paires de photons, qui ont l'avantage de présenter un bruit de fond acceptable et de permettre une détermination précise de m_H .

Recherche du boson de Higgs à basse masse ($m_H < 135$ GeV)

À basse masse, plusieurs canaux de production-désintégration contribuent de manière importante. Le canal WH tout d'abord, mais aussi le canal ZH , dans lequel le Z se désintègre en paires de neutrinos, ou en paires de leptons chargés.

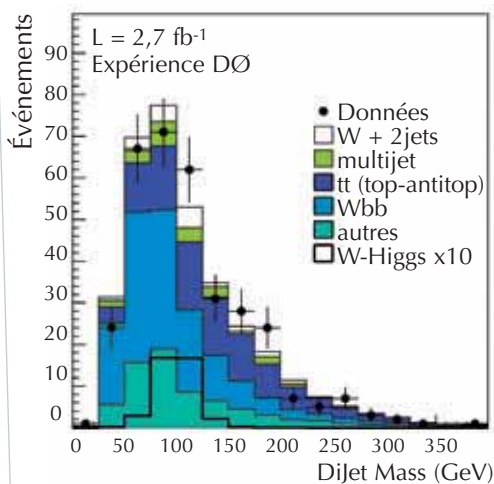
Canal WH

Dans ce canal (fig. 1b), on recherche les produits de désintégration des bosons W et Higgs, soit un lepton chargé, une paire de quarks $b\bar{b}$, et de l'impulsion « transverse » manquante due au neutrino (qui n'est pas détecté). En effet, comme les détecteurs ne sont pas totalement hermétiques dans les régions proches de l'axe du faisceau, définissant l'axe longitudinal, on ne peut mesurer précisément l'impulsion manquante que dans le plan transversal. Celle-ci est mesurée soit à partir de l'énergie déposée par les particules dans le calorimètre, soit en déterminant l'impulsion des traces chargées par la mesure de la courbure de leur direction dans le champ magnétique (voir encadré, p. 8). L'enregistrement des événements candidats s'effectue lorsque le système de déclenchement détecte un lepton de haute énergie ou lorsqu'un lepton est détecté en même temps qu'un ou plusieurs jets de particules. Une première sélection hors-ligne des événements enregistrés est ensuite effectuée, réduisant leur nombre de 30 millions à environ 65 000. À ce stade, on vérifie que la simulation du bruit de fond décrit bien ces événements, alors que la quantité d'événements W -Higgs attendue (une trentaine) est négligeable par rapport aux événements de bruit de fond.



1. Diagrammes de Feynman de production et de désintégration du boson de Higgs au Tevatron : a) gluon-gluon $H \rightarrow WW$; b, c, d) quark-antiquark WH ou ZH , avec $H \rightarrow b\bar{b}$. Les gluons, quarks et antiquarks à la gauche des diagrammes proviennent du proton et de l'antiproton qui entrent en collision. Les bosons W et Z se désintègrent en leptons chargés ($l^{+/-}$) et/ou en neutrinos ($\nu, \bar{\nu}$), comme indiqué. W^* et Z^* sont des bosons W et Z virtuels.

Pour devenir sensible aux événements « Higgs », on identifie les jets de quarks b provenant de leur désintégration, en utilisant des algorithmes dédiés. Dans la sélection finale (lepton + 2 jets de b + impulsion transverse manquante), on retient alors environ 350 événements, et environ quatre d'entre eux contiennent un boson de Higgs (s'il pèse 115 GeV), qui se désintègre en paires de quarks b . En faisant la distribution de la masse reconstruite à partir des particules provenant des quarks b , on peut donc rechercher un excès d'événements à une masse donnée. Cette distribution est représentée dans la figure 2, avec les différents bruits de fond du Modèle Standard, définis dans la légende, qui s'additionnent pour décrire correctement les données. Le signal attendu d'un boson de Higgs ayant une masse de 115 GeV est également représenté sur la figure, amplifié d'un facteur 10, ce qui montre la difficulté à extraire un signal aussi petit.



2. Distribution de la masse reconstruite à partir des deux jets de quark b (« Dijet Mass »), dans les événements $W + 2$ jets de b (fig. 1b). Les barres d'erreur sur les données sont d'origine statistique. La simulation des bruits de fond principaux provenant du Modèle Standard, telle la production $qq \rightarrow top\text{-}antitop$ ou $Wb\bar{b}$, additionnés aux autres bruits de fond simulés, reproduit bien les données. Le signal prédit dans le Modèle Standard pour un boson de Higgs de 115 GeV, et amplifié d'un facteur 10, est également représenté.

Nous utilisons donc des techniques avancées (tels des algorithmes dits « à réseaux de neurones ») pour augmenter le rapport du signal WH sur le bruit de fond du Modèle Standard. Mais, pour mettre en évidence un boson de Higgs léger, il faudra encore améliorer la discrimination signal/bruit, augmenter le nombre d'événements analysés et combiner ce type de production avec d'autres, décrits ci-dessous.

Canal ZH

Ce canal (fig. 1c et d) a deux manifestations très différentes, suivant que le boson Z se désintègre en une paire de leptons chargés ou en une paire de neutrinos.

Le canal $ZH \rightarrow l^+l^-b\bar{b}$ (fig. 1d) a un faible taux de production, car le taux de désintégration du Z en leptons chargés n'est que de 3% par type de lepton. Mais ceci est compensé par l'excellente définition de l'état final : deux leptons facilement identifiables, deux jets de quarks *b*. Tout l'état final étant reconstruit, il y a peu d'incertitude provenant d'une impulsion transverse manquante. Avec ces caractéristiques, la réjection du bruit de fond est très efficace, et permet alors de compenser en partie la faiblesse de la production initiale.

Le canal $ZH \rightarrow l^+l^-\nu\bar{\nu}$ (fig. 1c) est analysé de manière très différente, puisque les neutrinos ne laissent pas de traces dans les détecteurs ; leur production ne peut donc être déduite que par la présence d'une grande impulsion transverse manquante. Le déclenchement de l'enregistrement des événements candidats se base sur l'impulsion transverse manquante des jets, ce qui ne permet pas d'éviter de garder un grand nombre d'événements de bruit de fond produits par interaction forte. Une fois analysé, ce canal a une sensibilité semblable à celle du canal WH.

Recherche du boson de Higgs à haute masse ($m_H > 135 \text{ GeV}$)

La recherche à haute masse est effectuée en utilisant principalement la désintégration $H \rightarrow W^+W^-$ (fig. 1a). Cette analyse tire profit du caractère scalaire du boson de Higgs : le système W^+W^- étant produit dans un état de *spin* 0, les leptons chargés issus des désintégrations des deux bosons W sont préférentiellement alignés dans une direction donnée, alors que les neutrinos le sont dans la direction opposée, ce qui produit une impulsion manquante importante dans le bilan énergie-impulsion.



Fermilab

Le détecteur DØ. On voit les chambres à muons (plates, extérieures, en haut de la photo) entourant le cryostat cylindrique qui contient le calorimètre à argon liquide.

L'analyse va donc rechercher un état final avec deux leptons de charges opposées et une grande impulsion transverse manquante. Les événements candidats sont enregistrés lorsqu'un dépôt d'énergie caractéristique d'un électron ou lorsqu'une trace chargée typique d'un muon, sont détectés dans le système de déclenchement. Ils sont ensuite sélectionnés afin de reproduire les caractéristiques d'une désintégration de boson de Higgs, tout en rajoutant des conditions supplémentaires pour rejeter autant que possible le bruit de fond. Après cette sélection, l'expérience DØ a isolé environ 130 événements candidats, et si le boson de Higgs a une masse de 165 GeV, une quinzaine de ces événements seraient les produits de sa désintégration.

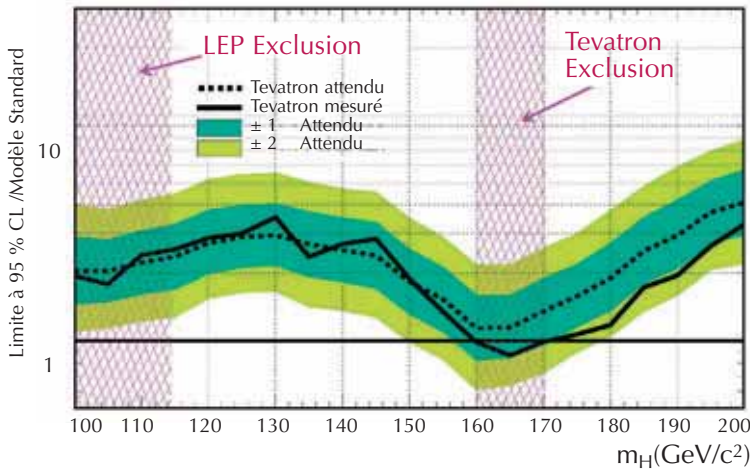
Il nous reste alors à séparer ces événements de signal de ceux du bruit de fond ; pour cela les deux expériences DØ et CDF utilisent des techniques d'analyses avancées, qui se servent des variables cinématiques des événements de bruit de fond $p\bar{p} \rightarrow W^+W^-$, et de signal $p\bar{p} \rightarrow H \rightarrow W^+W^-$.

Combinaison des différents canaux de recherche du boson de Higgs

Chaque canal de production étant statistiquement limité, les deux expériences combinent les résultats de tous leurs canaux pour obtenir la meilleure sensibilité possible. Cette combinaison utilise des techniques statistiques bien établies, et est faite en tenant compte des incertitudes statistiques et systématiques. Le résultat de cette combinaison, obtenu en mars 2009 avec en moyenne 1/3 des données (de 0,9 à 4,2 fb⁻¹ suivant les canaux) attendues à la fin de 2010, est représenté dans la figure 3 en fonction de la masse du boson de Higgs, sous la forme de la limite supérieure actuelle de la section efficace de production du boson de Higgs divisée par la valeur de cette même section efficace prédite dans le Modèle Standard. Un rapport *Tevatron attendu* inférieur à 1 signifie que l'expérience a atteint une sensibilité suffisante pour commencer à détecter le boson de Higgs. Un rapport *Tevatron mesuré* inférieur

>>>

Tevatron Run II préliminaire, $L=0,9-4,2 \text{ fb}^{-1}$



3. Limite supérieure (à 95% C.L.) de la section efficace de production du boson de Higgs, normalisée par la valeur prédite pour cette section efficace dans le Modèle Standard, en fonction de la masse du boson de Higgs recherché. Les valeurs mesurées (trait plein) et attendues en supposant l'absence de signal Higgs et de fluctuations statistiques dans les données (trait pointillé) sont représentées, ainsi que les dispersions statistiques possibles sur la limite attendue (bandes de couleurs à 1 ou 2 écarts standards).

>>>

à 1 pour une masse donnée indiquerait que le boson de Higgs n'a pas la masse en question. Un rapport *Tevatron mesuré* significativement supérieur à *Tevatron attendu* pour une masse donnée serait en faveur d'un boson de Higgs de cette masse, si la valeur *Tevatron attendu* est inférieure à 1. Dans la figure 3, on observe qu'à basse masse (115 GeV), la sensibilité actuelle se situe environ deux fois au-dessus de la prédiction du Modèle Standard et nécessite donc plus de données et des progrès supplémentaires dans les techniques d'analyses pour pouvoir être sensible à un boson de Higgs léger. En revanche, à 165 GeV, le rapport observé est de 0,8, donc l'hypothèse que le boson de Higgs ait une masse de 165 GeV est exclue. On constate aussi qu'avec cette quantité de données, si le boson de Higgs n'avait pas cette masse, on se serait attendu à un rapport un peu plus élevé, de l'ordre de 1,1 ; mais ceci reste tout à fait compatible avec l'incertitude statistique du résultat, comme le montrent les bandes colorées. On voit aussi sur la figure 3 que l'exclusion s'étend à l'intervalle 160-170 GeV.

Pour estimer quelle est la probabilité d'exclusion à haute masse, on peut représenter ce résultat d'une autre façon, comme le montre la figure 4. On constate alors que la région à plus haute masse (170-180 GeV) a aussi une forte probabilité d'exclusion, ce qui implique, en utilisant les contraintes indirectes discutées dans l'introduction, que le boson de Higgs a très probablement une masse bien inférieure à 160 GeV. C'est la première fois depuis l'arrêt du LEP en

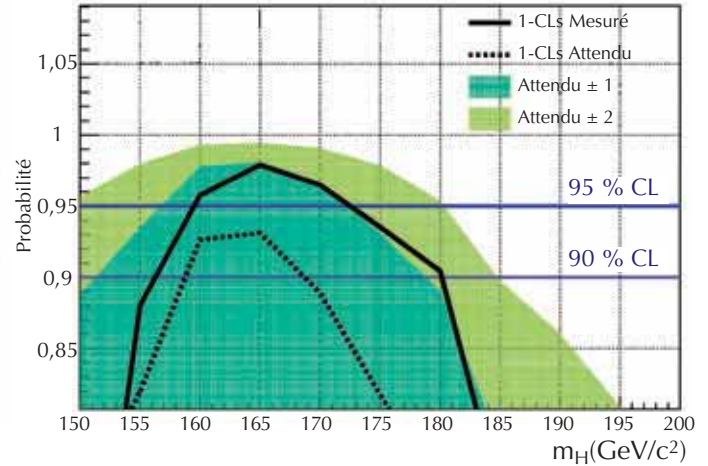
2001 que de nouvelles contraintes directes sont apportées sur la masse du boson de Higgs. Ce résultat démontre que le Tevatron peut maintenant rechercher activement cette particule, en augmentant la quantité de données analysées.

Perspectives de découverte du boson de Higgs

Les groupes de recherche du boson de Higgs au Tevatron sont en train de redoubler d'efforts pour analyser les nouvelles données enregistrées et pour améliorer encore leurs techniques d'analyse. Ils comptent en particulier sur une amélioration de la séparation signal/bruit par des développements supplémentaires des techniques avancées et, à basse masse, sur une amélioration de l'efficacité d'identification des jets de quarks *b* et un gain en résolution de la masse invariante du système $b\bar{b}$. Le gain global attendu en sensibilité a été quantifié et, avec ces améliorations et la quantité finale de données attendue, tout le domaine entre 115 et 185 GeV pourra être sondé. Un scénario particulièrement étonnant serait, par exemple, une exclusion du boson de Higgs dans tout ce domaine, ce qui serait en contradiction avec les contraintes décrites dans l'introduction de cet article, et donc remettrait en cause le mécanisme de Higgs du Modèle Standard.

Une observation à trois écarts standards devrait être possible. Cela dépendra *in fine* des performances atteintes par les analyses et par la machine, et par la durée de la prise

Tevatron Run II préliminaire, $L=0,9-4,2 \text{ fb}^{-1}$



4. Résultats de la combinaison CDF-DØ : probabilité que le boson de Higgs n'ait pas la valeur de masse en abscisse. On considère que si la probabilité dépasse 95%, la valeur est exclue, ce qui est le cas ici pour m_H entre 160 et 170 GeV. On a représenté ici les valeurs observées (trait plein) et les valeurs attendues en supposant l'absence de signal Higgs et de fluctuations statistiques dans les données (trait pointillé), ainsi que les dispersions statistiques sur les valeurs attendues (bandes de couleurs à 1 ou 2 écarts standards).

de données qui pourrait être prolongée jusqu'en 2011. Même si la découverte définitive du boson de Higgs n'était faite qu'au LHC, les recherches au Tevatron sont cependant cruciales pour la compréhension de la nature du boson de Higgs, en particulier s'il est de basse masse. Dans ce cas, il ne pourra pas être observé avant longtemps au LHC dans son mode de désintégration principal $H \rightarrow b\bar{b}$, à cause du bruit de fond prohibitif, mais pourra l'être par ses désintégrations rares, en particulier en photon-photon. L'observation au Tevatron de la désintégration en $b\bar{b}$ renforcerait alors l'hypothèse que la particule observée est bien le boson de Higgs du Modèle Standard. Les efforts des équipes françaises engagées sur ce projet depuis une décennie seraient ainsi récompensés, et ce résultat apporterait une avancée fondamentale dans la compréhension de la brisure de la symétrie électrofaible.

Pour en savoir plus...

- 1 • V. Ruhlmann-Kleider, *Reflets de la physique* 12 (décembre 2008-janvier 2009) 16-19.
 - 2 • Pour un panorama plus complet, tant théorique qu'expérimental, de la physique du boson de Higgs du Modèle Standard et au-delà, consulter : G. Bernardi, M. Carena et T. Junk, *Higgs bosons: theory and searches, Particle Data Review 2007-2008*, http://pdg.lbl.gov/2007/reviews/higgs_s055.pdf
- Pour une approche plus abordable : M. Grousson, « Boson de Higgs, "La particule de Dieu" à portée de main », *Science et Vie*, n°1088 (mai 2008) 54-70.
 - M. Davier, *LHC : Enquête sur le boson de Higgs*, Éditions du Pommier (2008).

Les propulseurs à plasma

Une technologie spatiale d'avant-garde

Stéphane Mazouffre (stephane.mazouffre@cnsr-orleans.fr)
 ICARE, UPR 3021 CNRS, 1C av. de la recherche scientifique, 45071 Orléans Cedex 2

Le contrôle de la trajectoire des satellites de télécommunication à l'aide d'accélérateurs d'ions assure une économie significative en quantité d'ergol embarquée.

Cette technologie d'avant-garde se répand, même si la propulsion chimique, plus classique, reste dominante.

Des recherches ambitieuses sur la propulsion à plasma sont engagées de par le monde pour améliorer les performances des moteurs, augmenter leur durée de vie et atteindre des poussées de plusieurs Newtons. Ces travaux font appel à la fois à des simulations numériques complexes et au développement d'outils de diagnostic élaborés. Nous détaillons ici le cas des propulseurs à effet Hall, sur lesquels se concentre la recherche en France.

Intérêt et limites de la propulsion à plasma

Une fusée ou un vaisseau spatial se propulse en éjectant de la matière : la quantité de mouvement ainsi perdue est compensée par celle gagnée dans la direction du vol. Au début du XX^e siècle, le physicien russe C. E. Tsiolkowski, un pionnier de l'aéronautique, dérive à partir de la conservation de la quantité de mouvement, l'équation fondamentale de la propulsion spatiale, connue aujourd'hui sous l'appellation "The Rocket Equation". Pour un système sans force externe et en supposant la vitesse d'éjection du fluide propulsif v_e constante, cette équation relie de manière simple la masse m_e de combustible consommé lors d'une manœuvre à la variation de vitesse v du vaisseau :

$$m_e = m_0 [1 - \exp(-v/v_e)],$$

où m_0 est la masse initiale du vaisseau. On s'aperçoit alors que plus la vitesse d'éjection du combustible, que l'on nomme ergol en astronautique, est élevée, plus la quantité consommée par un propulseur est faible⁽¹⁾.

Avec la découverte de l'électron par J. J. Thomson et la mise en évidence du proton par E. Rutherford, les scientifiques réalisent dans les années 1910 qu'ils ont à leur disposition le combustible rêvé pour les vaisseaux spatiaux. En effet, les particules chargées sont susceptibles d'être accélérées à des vitesses considérablement plus grandes que celles que peuvent atteindre des atomes neutres, même chauffés à des températures extrêmes (fig. 1). La propulsion spatiale électrique, ou propulsion à plasma, venait de naître et le premier brevet sera déposé en 1932. Outre la consommation d'ergol, la poussée, qui est égale au produit du débit d'ergol par la vitesse d'éjection, est une autre grandeur fondamentale. Mais il faudra attendre le début des années 50 et la mise au point de sources d'ions délivrant des courants de plusieurs ampères pour que la propulsion à plasma apparaisse crédible. Des progrès rapides seront accomplis dans les années 50-60, avec le développement de la physique des plasmas et des sources d'ions. Deux familles de propulseurs feront alors leur apparition.

a) Les *moteurs ioniques*, pour lesquels l'extraction, la focalisation et l'accélération d'ions produits au

sein d'un plasma sont assurées par un système de grilles polarisées à haute tension.

b) Les *propulseurs à effet Hall*, qui sont des accélérateurs d'ions sans grille utilisant avantageusement le confinement magnétique d'un plasma.

Les premiers essais en vol auront lieu dans les années 70. Dans les décennies qui suivront, le nombre de propulseurs embarqués ne fera que croître, tout comme le niveau des performances et la fiabilité. Aujourd'hui, les technologies « à grille » et « à effet Hall » occupent toujours une place prépondérante, et plusieurs dizaines de satellites sont équipés de propulseurs électriques qui assurent principalement le contrôle de la trajectoire et la correction d'altitude. Ce mode de propulsion est depuis peu employé pour des voyages interplanétaires, comme en témoignent la mission européenne SMART 1 [1] et la mission américaine Dawn.

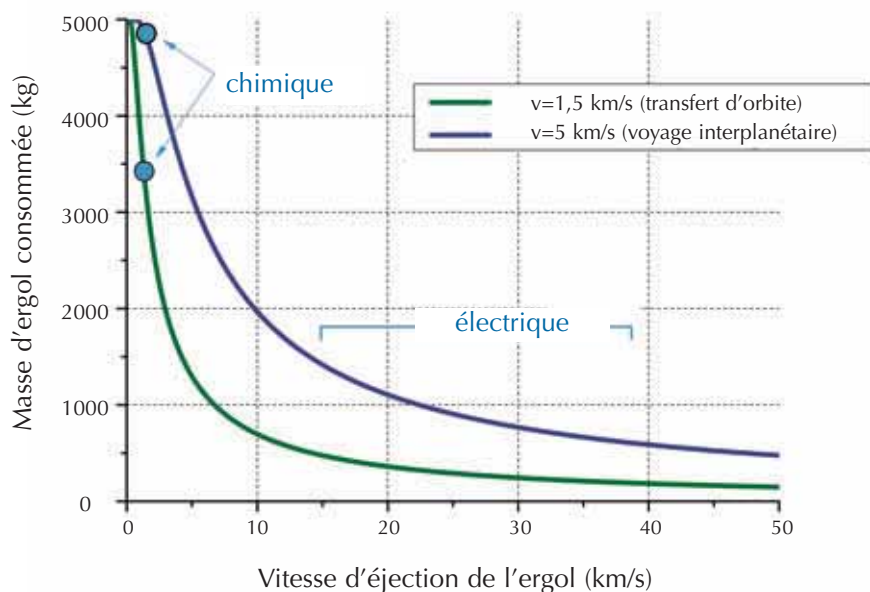
La propulsion électrique offre plusieurs avantages par rapport à la propulsion chimique : une faible consommation d'ergol (fig. 1), un rendement énergétique élevé de l'ordre de 50 %, une longue durée de fonctionnement – plusieurs centaines de jours de tir en continu – qui assure une vitesse finale élevée, et un approvisionnement en énergie qui se fait de façon externe à l'aide de panneaux solaires, pour ne citer que les points forts les plus marquants [2 – 4].

Néanmoins, il existe en contrepartie trois limitations :

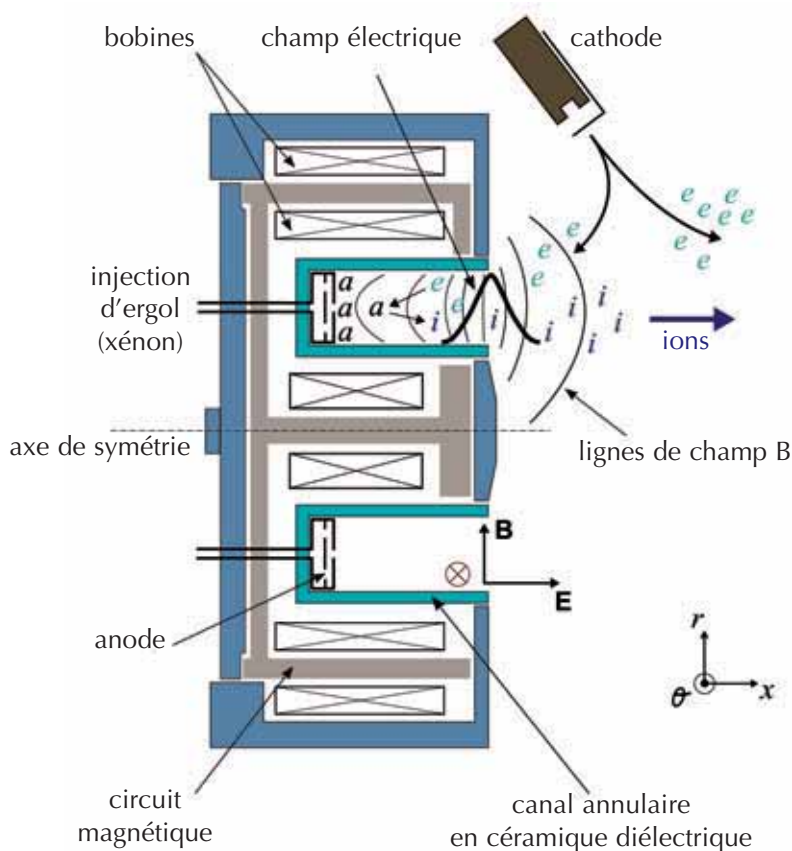
- (i) un bas niveau de poussée, de l'ordre de 100 mN (la mise en orbite terrestre d'une masse d'une tonne nécessite une poussée de l'ordre de 10^6 N : la propulsion à plasma est donc restreinte à des applications en orbite terrestre et pour des trajets interplanétaires),
- (ii) un degré de complexité relativement élevé,
- (iii) et un fonctionnement restreint à un milieu à basse pression.

Un effort de recherche significatif est donc engagé dans le domaine de la propulsion à plasma, avec comme objectifs principaux l'amélioration des performances et le développement d'une gamme élargie en puissance, qui s'étendrait du Watt à la centaine de kiloWatts, afin de répondre aux besoins des opérateurs de satellites et des agences spatiales.

>>>



1. Consommation d'ergol pour deux types de missions dans le cas d'un vaisseau spatial ayant une masse initiale de 5 tonnes, d'après l'équation de Tsiolkowski. Le terme v représente la variation de vitesse à accomplir sur la durée totale de la mission. Grâce à une grande vitesse d'éjection du fluide propulsif, la propulsion électrique autorise un gain significatif en masse d'ergol embarquée.



2. Schéma de principe d'un propulseur à effet Hall (a = atome, i = ion et e = électron). L'ensemble a une symétrie cylindrique. Les dimensions du canal annulaire d'un propulseur de 1,5 kW capable de développer 100 mN de poussée avec 5 mg/s de xénon sont typiquement : un diamètre externe de 100 mm, une largeur de 20 mm et une longueur de 30 mm.

>>>

La France a opté dans les années 90 pour la technologie des propulseurs à plasma à effet Hall, car ces derniers offrent un meilleur rapport poussée/puissance et sont mieux adaptés au domaine de la forte puissance. Les investissements réalisés depuis plus de dix ans en recherche et développement sur ces propulseurs ont ainsi conduit à l'émergence d'un domaine d'excellence, dont nous allons exposer les grandes lignes (voir encadré p. 17).

Création et accélération des ions dans un propulseur de Hall

Les grilles polarisées d'un moteur ionique (cas (a) de la section précédente) sont contraignantes pour deux raisons : leur configuration doit être parfaitement adaptée à la forme souhaitée du champ électrique, et leur érosion conduit à une dégradation des performances et en limite la durée de vie. S'en passer offre donc des avantages certains. C'est l'idée qui a conduit à la conception des propulseurs à effet Hall. Un propulseur à effet Hall est un accélérateur d'ions « sans grille », qui fait appel à une décharge plasma à basse pression baignée dans un champ magnétique [4, 5].

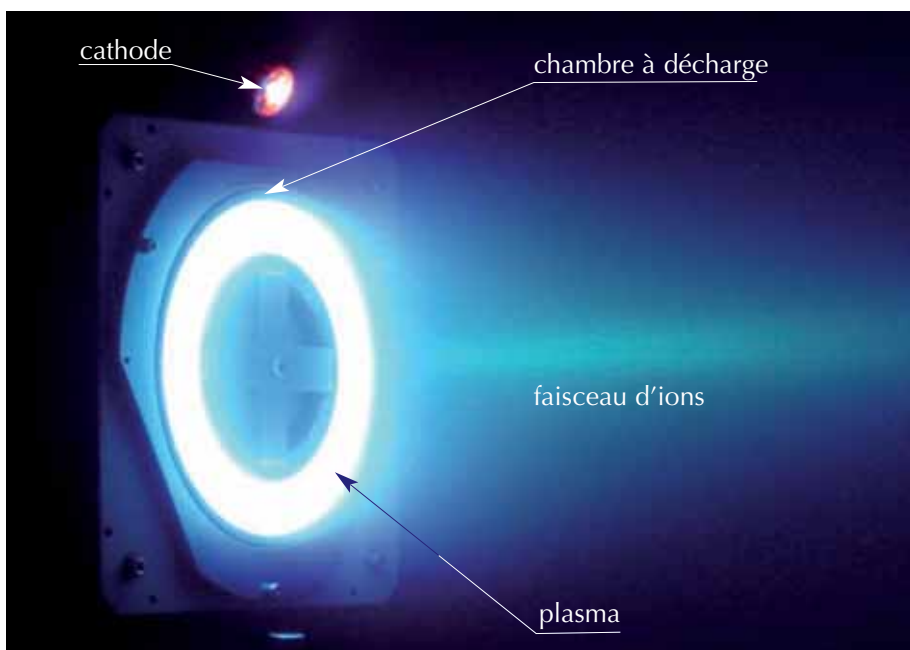
Dans un propulseur de Hall, l'ergol⁽²⁾ est ionisé au sein d'une décharge confinée dans un canal annulaire en céramique ; puis les ions créés sont accélérés dans un champ électrique E et éjectés à des vitesses de l'ordre de 20-30 km/s, ce qui génère l'effet propulsif (figs. 2 et 3). Pour garantir la neutralité électrique, le faisceau d'ions positifs est neutralisé par une grande fraction ($\sim 80\%$) des électrons émis par la cathode. L'origine du fort champ électrique accélérateur E est subtile. Les électrons qui se dirigent vers l'anode, qui joue le rôle d'injecteur de gaz, doivent traverser un champ magnétique B radial produit par des bobines ou des aimants. L'intensité du champ B (~ 200 G) est choisie telle que le rayon de Larmor des électrons soit plus petit que les dimensions caractéristiques du canal diélectrique. Au contraire, les ions ne doivent pas ressentir le champ magnétique. Les électrons se retrouvent piégés dans la zone de fort champ magnétique – on parle de barrière magnétique – située vers la sortie du canal, ce qui conduit à une forte chute de la mobilité électronique transverse aux lignes de champ B . Pour maintenir le courant électronique, un intense champ électrique de plusieurs 100 V/cm apparaît alors en sortie du propulseur, car la différence de potentiel appliquée se retrouve

concentrée dans la région où les électrons sont ralentis. La combinaison du champ électrique, principalement axial, et du champ magnétique, majoritairement radial, conduit à la formation d'un fort courant électronique azimuthal de quelques dizaines d'Ampères, dit courant de Hall, à l'intérieur du canal. Le courant de Hall permet une ionisation efficace de l'ergol, puisque 90% du débit de gaz injecté à l'arrière du canal est ionisé.

Les principes physiques fondamentaux qui régissent le comportement du plasma d'un propulseur à effet Hall sont aujourd'hui connus ; cependant, il reste des zones d'ombre qui limitent le caractère prédictif des modèles en développement. En particulier, il reste difficile de simuler les performances et de prévoir le comportement du plasma sur des longues durées. Deux mécanismes sont spécialement mal connus et non quantifiés. D'une part, les interactions entre le plasma et les surfaces, qui font intervenir l'émission d'électrons relativement froids par les parois diélectriques du canal sous l'effet du bombardement ionique. D'autre part, le transport dit « anormal » des électrons à travers la barrière magnétique. En effet, la diffusion électronique classique, assurée par des collisions entre électrons et atomes, n'explique pas l'intensité du courant recueilli : il existe un facteur de 10 à 20 entre le calcul et la mesure. Il faut donc faire appel, soit à un transport « pariétal » dû à la diffusion ou à l'émission d'électrons par les parois, soit à un transport « turbulent » lié à des fluctuations stochastiques de la densité électronique. Néanmoins, des avancées significatives ont été obtenues récemment, grâce à l'élaboration d'outils à la fois numériques et expérimentaux.

Modélisations particulière et hybride

Afin de mieux appréhender le transport des particules chargées dans la décharge d'un propulseur à effet Hall, une méthode particulière implicite 2D a été développée au CPHT de l'École polytechnique [5]. Ce modèle, qui consiste à suivre la trajectoire de chaque particule et à traiter individuellement chaque collision, permet de résoudre la dynamique du plasma au niveau de l'échelle temporelle du mouvement cyclotronique des électrons ($\sim 10^{-9}$ s). Puisqu'il s'agit d'étudier en priorité le transport des électrons, seules les coordonnées axiale x (direction du flux d'ions) et azimuthale (direction du courant de Hall) sont considérées. Les interactions plasma-parois sont



3. Photographie d'un propulseur à effet Hall de 5 kW en fonctionnement avec du xénon, dans le moyen d'essais Pivoine-2g du CNRS.

ainsi négligées. Les simulations particulières ont apporté un éclairage nouveau sur le transport anormal des électrons, en montrant que ce dernier pouvait être relié à des fluctuations stochastiques du champ électrique dans la direction azimuthale (fig. 4). Ces fluctuations spatio-temporelles, qui sont liées à des fluctuations de la densité électronique à courte longueur d'onde – de l'ordre du rayon de Larmor électronique ~ 1 mm – induisent une diffusion *in globo* des électrons dans la direction x . Le code particulier prédit également l'existence de structures à grande échelle – dont la taille est très

supérieure au rayon de Larmor des électrons – sous la forme de vortex de courant d'électrons.

Si l'approche particulière est très puissante, elle est aussi très gourmande en temps de calcul : il faut plusieurs semaines pour simuler un régime d'équilibre. De plus, la géométrie choisie ne permet ni de prendre les parois en compte ni de calculer la poussée et la divergence du faisceau d'ions. Cette approche ne peut donc pas être utilisée pour simuler systématiquement le comportement d'un propulseur. À la place, une approche numérique hybride,

>>>

GdR Propulsion par plasma dans l'espace CNRS/CNES/Snecma/Universités 3161

La maîtrise des systèmes de propulsion par plasma à effet Hall a nécessité la mise en œuvre d'une stratégie de recherche reposant sur la combinaison de simulations numériques et d'expériences conduites dans le moyen national d'essais PIVOINE-2g du CNRS à Orléans. Cette stratégie a été développée au sein d'un Groupe de Recherche CNRS/CNES/Snecma/Universités à partir de 1996, soit seulement trois ans après les premiers contacts avec le professeur A.I. Morozov qui est à l'origine du concept.

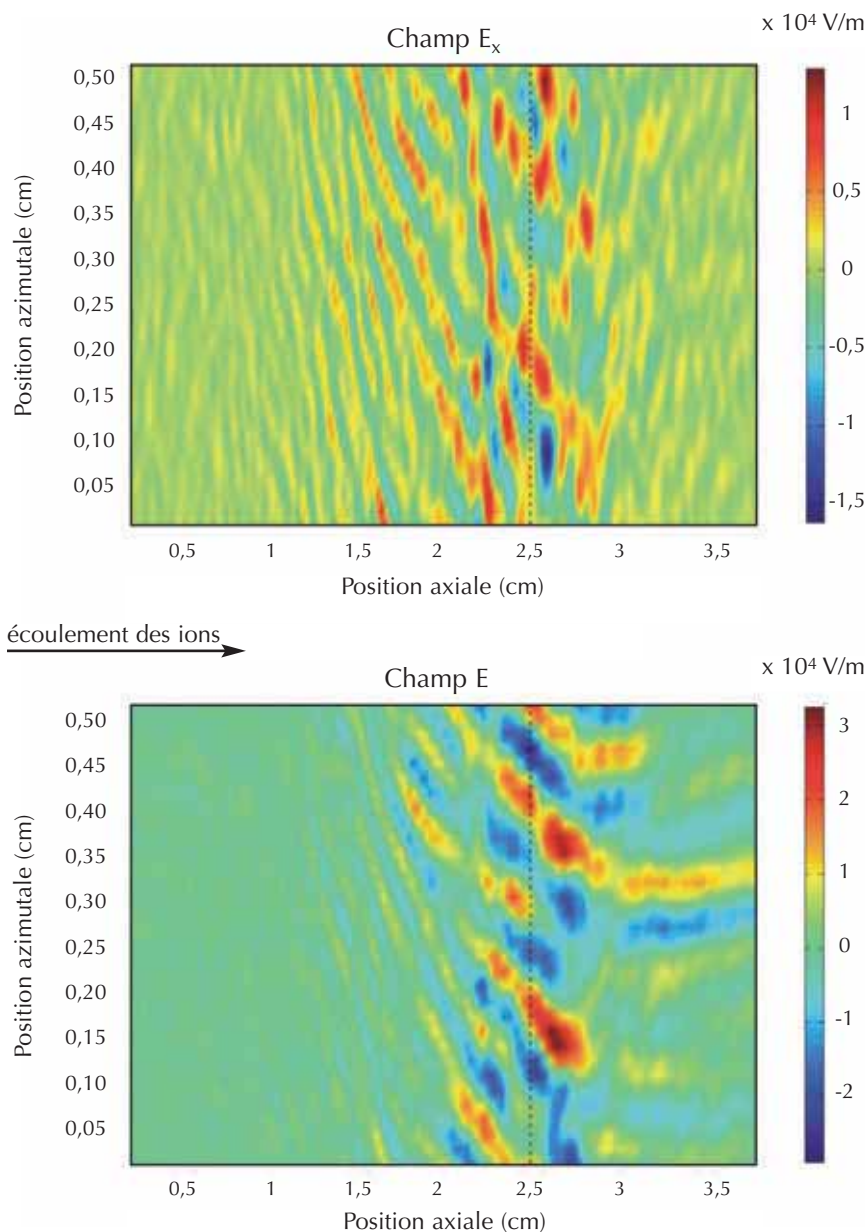
Le GdR a pour objectif premier l'élaboration d'outils de simulation à caractère prédictif, ce qui impose au préalable de comprendre au mieux les phénomènes physiques qui sont au cœur de ces décharges magnétisées. La démarche, fortement interactive, fait appel aux nombreuses équipes de recherche du GdR. Elle a permis des progrès conséquents dans la compréhension des mécanismes physiques de base et a conduit à l'obtention de résultats scientifiques appréciés et reconnus au niveau international. De plus, le GdR a soutenu l'agence spatiale française dans sa démarche de recherche et technologie, et la Snecma dans son plan de développement et de commercialisation des propulseurs. Cette politique scientifique a abouti en particulier au succès de la sonde lunaire SMART-1 de l'Agence Spatiale Européenne, première sonde à être équipée d'un propulseur à plasma, en l'occurrence le PPS®1350-G de la Snecma.

Observation du plasma

Le plasma d'un propulseur à effet Hall est difficile à sonder par une mesure intrusive, en raison du flux élevé d'énergie qui limite la durée de vie des instruments. Les techniques optiques se révèlent donc bien adaptées à l'observation de ce milieu, notamment les méthodes de spectroscopie laser qui offrent une excellente résolution spatiale, temporelle et spectrale.

La spectroscopie de fluorescence induite par laser (FIL) consiste à analyser les photons émis par des atomes après une excitation laser résonante. Cet outil a été mis en œuvre au laboratoire ICARE à Orléans [8]. En mesurant le décalage Doppler des photons de fluorescence, l'évolution de la fonction de distribution en vitesse des ions Xe^+ a pu être suivie dans l'espace et dans le temps (fig. 5). Cet outil a, par exemple, permis de mettre en évidence la forte corrélation entre les processus d'ionisation et d'accélération dans une décharge à barrière magnétique. La détermination du profil axial du champ électrique accélérateur, ainsi que son évolution spatio-temporelle, à partir de la distribution de vitesse des ions a fait progresser le niveau de compréhension de la physique de base d'un propulseur. Ces mesures ont également permis de valider l'approche qui consiste à coupler les codes particulaire et hybride (fig. 6). Enfin, en combinant expériences et simulations numériques, les chercheurs ont prouvé que des oscillations à haute fréquence du champ électrique étaient à l'origine de la création d'ions d'énergie cinétique supérieure à l'énergie fournie au système.

Une seconde technique laser sophistiquée a été spécifiquement mise en œuvre, afin d'étudier le mécanisme à l'origine du transport des électrons perpendiculairement aux lignes de champ magnétique. Il s'agit de la diffusion Thomson collective, qui consiste à analyser le signal qui résulte de la diffusion des photons d'un faisceau laser infrarouge par les fluctuations de densité d'un plasma. Si, comme prédit par les simulations particulières, la diffusion des électrons à travers le champ \mathbf{B} d'un propulseur est due à l'existence d'un champ électrique fluctuant dans la direction azimutale, il doit exister, à une certaine échelle, des fluctuations de densité électronique ayant des propriétés particulières en termes de taille et de période d'apparition. Jusqu'à récemment, ces fluctuations n'avaient jamais été observées et la question du transport « anormal » des électrons restait



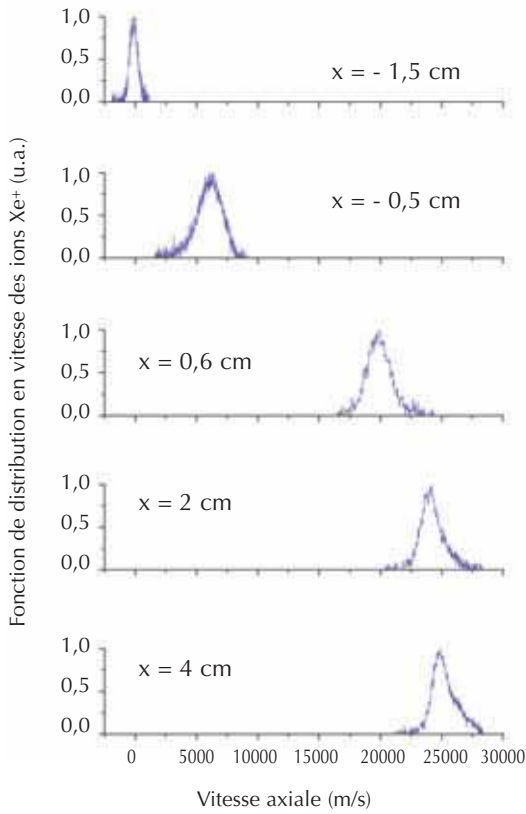
4. Cartographies des fluctuations spatiales des composantes axiale E_x et azimutale E du champ électrique, obtenues à l'aide de simulations numériques particulières d'un propulseur de Hall de 1,5 kW [6]. La sortie du canal de décharge est située à une position axiale de 2,5 cm. Dans ce modèle, les fluctuations du champ électrique dans la direction x , dont l'amplitude avoisine la valeur moyenne du champ électrique ($\sim 2 \times 10^4$ V/m), sont à l'origine de la diffusion des électrons à travers la barrière magnétique.

>>>

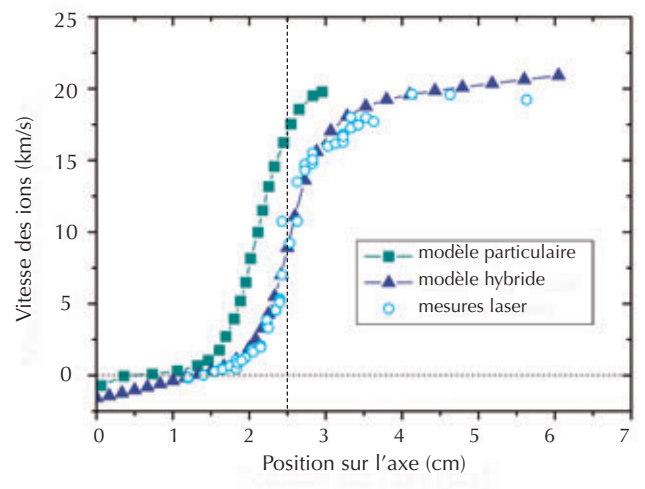
dans laquelle les ions sont traités comme des particules isolées et les électrons comme faisant partie d'un fluide maxwellien, est développée au laboratoire LAPLACE de l'Université Paul Sabatier à Toulouse [7]. Le modèle prend en considération les coordonnées axiale et radiale afin d'intégrer l'effet des parois, et fait l'hypothèse d'une symétrie cylindrique. Le transport des espèces n'est pas traité de manière autocohérente, mais il fait appel à des paramètres macroscopiques ajustables, qui quantifient la diffusion anormale des électrons ainsi que leur perte d'énergie. Cette modélisation est d'une grande utilité pour saisir la physique

intrinsèque des propulseurs, réaliser des études paramétriques et tester certaines hypothèses. C'est aussi un outil indispensable pour la réalisation en amont d'études sur des nouveaux moteurs et concepts.

Des avancées significatives ont été réalisées récemment, en combinant les méthodes particulaire et hybride. La mobilité électronique obtenue à l'aide d'une simulation particulaire a été introduite dans le code hybride à la place des habituels coefficients ajustables. Cette démarche inédite a permis d'obtenir un bon accord entre expériences et calculs, comme illustré sur la figure 6.



5. Fonction de distribution de la vitesse axiale des ions Xe⁺ mesurée par spectroscopie laser sur l'axe du canal d'un propulseur fonctionnant à 500 V. On observe une déformation de la distribution au cours de l'écoulement du fluide ionique, signature de l'interaction entre les processus d'ionisation et d'accélération.



6. Distribution de la vitesse axiale des ions Xe⁺ le long de l'axe du canal d'un propulseur de Hall de 1,5 kW opérant à 300 V. Le plan de sortie est situé à 2,5 cm. Les simulations réalisées avec le modèle hybride prennent en compte la mobilité électronique obtenue à partir de la méthode particulaire. Le décalage entre le profil simulé par le code particulaire et le profil mesuré par spectroscopie laser provient de la condition imposée au potentiel à la limite du domaine de calcul.

pleinement ouverte. Du fait de la faible densité électronique ($\sim 10^{16} \text{ m}^{-3}$), détecter les photons infrarouges diffusés par le plasma d'un propulseur de Hall constituait un réel défi que les chercheurs du LPTP de l'École polytechnique et du LPMIA à Nancy ont su relever. Les résultats obtenus en 2008 sont très encourageants. Un signal de diffusion a effectivement été enregistré dans la gamme de fréquences 1-10 MHz, domaine où des fluctuations de densité électronique sont prédites par les simulations. Cependant, les données recueillies ne permettent pas encore d'affirmer que la diffusion des électrons est contrôlée par des fluctuations stochastiques du champ électrique dans la direction azimutale. Il faudra notamment obtenir un accord entre la relation de dispersion expérimentale et celle simulée.

Amélioration des performances

Les avancées réalisées au cours des dernières années sur l'aspect fondamental de la physique de la décharge d'un propulseur à effet Hall ont permis de faire progresser les concepts actuels et en cours de développement. Ces avancées concernent principalement la diffusion des électrons à travers la barrière magnétique, la production et l'accélération des ions, l'impact des électrons secondaires produits par les parois ainsi que les lois d'échelle. La technologie a également progressé grâce aux recherches sur les matériaux, sur l'optimisation de la

cartographie magnétique, sur la réduction des pertes d'énergie aux parois et sur le comportement thermique. Les connaissances accumulées ont conduit à un accroissement du rendement et de la durée de vie, ainsi qu'à l'extension de la gamme de puissance, qui s'étend désormais de 100 Watts ($\sim 1 \text{ mN}$) à quelques dizaines de kiloWatts ($\sim 1 \text{ N}$). Cette technologie pourrait ainsi servir dans un futur proche à des manœuvres telles que le maintien en orbite basse des satellites d'observation et le transfert d'orbite des satellites de télécommunication.

Les scientifiques réfléchissent aujourd'hui à de nouveaux concepts capables de dépasser les limites imposées par l'architecture actuelle. En particulier, une meilleure séparation des processus d'ionisation et d'accélération autoriserait une plus grande flexibilité et une hausse du rendement. Le concept de propulseur à double étage s'appuie sur une séparation physique des processus : la difficulté consiste à guider les ions vers l'étage d'accélération, en limitant les pertes aux parois. Une autre approche consiste à injecter de l'énergie dans un propulseur à effet Hall par ondes radiofréquences, afin de favoriser l'ionisation et de limiter l'étalement de la zone de création des ions. Les recherches sur ces idées innovantes en propulsion par effet Hall n'en sont qu'à leurs premiers pas. Néanmoins, ces travaux d'avant-garde seront peut-être à l'origine d'un propulseur à plasma de forte puissance ($\sim 100 \text{ kW}$), qui ouvrirait la voie à l'exploration systématique du système

solaire à l'aide de sondes automatiques en réduisant significativement le temps de trajet.

- (1) En astronautique, on utilise préférentiellement la notion d'Impulsion Spécifique I_{sp} à la place de la notion de vitesse d'éjection de l'ergol. Ces deux quantités sont reliées par la formule : $I_{sp} = v_e / g$, où g est l'accélération de la pesanteur. Elle indique la durée pendant laquelle un kilogramme d'ergol produit une poussée de 9,81 N.
- (2) L'ergol le plus couramment employé en propulsion à plasma est le gaz xénon, à cause de sa masse élevée et son faible potentiel d'ionisation.

En savoir plus...

- 1 • <http://www.esa.int/SPECIALS/SMART-1>
- 2 • R. H. Frisbee, "Advanced space propulsion for the 21st century", *J. Propulsion Power* **19** (2003) 1129.
- 3 • « La propulsion du futur », *Revue scientifique et technique de la défense*, **53** (2001).
- 4 • A. Bouchoule *et al.*, « La propulsion électrique pour les missions spatiales », *Lettre AAAF* **6** (2007) 11.
- 5 • V. V. Zhurin, H. R. Kaufmann et R. S. Robinson, "Physics of closed drift thrusters", *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** (1999) R1.
- 6 • J. C. Adam, A. Héron et G. Laval, "Study of stationary plasma thrusters using two-dimensional fully kinetic simulations", *Phys. Plasmas* **11** (2004) 295.
- 7 • G. J. M. Hagelaar *et al.*, "Two-dimensional model of a stationary plasma thruster", *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 5592.
- 8 • S. Mazouffre *et al.*, "Xe⁺ ion transport in the crossed-field discharge of a 5 kW-class Hall effect thruster", *IEEE Trans. Plasma Sciences* **36** (2008) 1967.

Dans le sillage de *La main à la pâte*

Rencontre entre disciplines scientifiques au collège

Alice Pedregosa (alice.pedregosa@academie-sciences.fr)
Chargée de mission à l'Académie des sciences de Paris

Depuis 12 ans, l'équipe de *La main à la pâte*, portée par l'Académie des sciences, a œuvré pour promouvoir l'enseignement des sciences expérimentales dans les écoles primaires. Le travail se prolonge aujourd'hui au collège dans une expérimentation d'enseignement intégré de science et technologie, qui associe les trois disciplines de sciences de la nature et technologie autour d'une thématique commune. L'étude des matériaux de nos vêtements permet d'illustrer l'approche interdisciplinaire encouragée par ce projet.

Une expérimentation d'enseignement intégré de science et technologie (EIST), « Dans le sillage de *La main à la pâte* au collège », a été mise en place en septembre 2006 dans une vingtaine de collèges en France. Initiée par l'Académie des sciences, l'Académie des technologies et le ministère de l'Éducation nationale, elle veut améliorer le goût des élèves pour la science et, dans ce but, propose aux enseignants de physique-chimie, de technologie et de science de la vie et de la Terre, de rénover leurs pratiques d'enseignement en formant une équipe cherchant à mettre en cohérence les programmes disciplinaires trop cloisonnés. En quoi consiste cette expérimentation ? Peut-elle faire évoluer la vision de notre propre discipline ?

Un contexte déclencheur

Afin de comprendre les fondements de cette expérimentation, il est important de rappeler quelques éléments du contexte dans lequel elle s'est développée. Depuis 12 ans, l'expérience de *La main à la pâte* à l'école primaire a souligné la curiosité naturelle dont les enfants font preuve en découvrant par la science le monde qui les entoure [1, 2]. Quel plaisir, quelle émotion pour un professeur d'université de voir ces jeunes élèves avides de découvrir, posant des questions, s'enthousiasmant pour une expérimentation, cherchant à comprendre le phénomène qui se manifeste devant eux. Pourtant, quand l'élève arrive au collège, cette flamme s'éteint souvent trop vite [3]. Dix ans, quinze ans plus tard, ce même professeur d'université s'adresse à des étudiants fuyant absolument les premiers rangs des amphithéâtres, prêts à recevoir sans question le savoir qui leur est transmis. Effet de génération ? Peut-être est-ce le cas. Faut-il pour autant l'accepter comme une fatalité ? Le défi est bien de préserver cet enthousiasme tout au long de l'adolescence.

Rappelons, par ailleurs, ce constat qui inquiète chacun d'entre nous, au-delà même de



© Alice Pedregosa

Les élèves du collège des Graziilles à Carcassonne cherchent à comprendre pourquoi une bouteille en verre remplie d'eau s'est rompue lorsque l'eau a gelé. Roland Poss, directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) de Montpellier, et engagé dans ce projet, les accompagne dans leur expérimentation.

nos frontières. L'université déplore depuis quelques années une désaffection des jeunes pour les études scientifiques [4]. Les physiciens sont bien conscients de ce phénomène, la discipline étant particulièrement touchée par ce déclin. Il n'est donc pas nécessaire ici d'en analyser les raisons ou effets. Mûrie de l'expérience de *La main à la pâte*, notre petite équipe de la délégation à l'éducation et à la formation de l'Académie des sciences cherche modestement à s'attaquer à ces problèmes, en travaillant avec des enseignants de collèges. De multiples objectifs sont visés : atténuer la transition entre l'école primaire et secondaire [5], favoriser des pratiques expérimentales et innovantes en classe, et surtout, donner une vision unifiée et cohérente de la science et de la technologie.

Concernant ce dernier point, citons un fait saillant de la récente étude TIMSS [6] (*Trends in International Mathematics and Science Study*, réalisée en 2007 dans 50 pays, dont la France

ne fait pas partie). Cette étude a révélé que les jeunes montrent une attitude plutôt positive envers la science lorsque celle-ci est enseignée de façon intégrée. Lorsqu'une distinction disciplinaire est faite, l'enseignement de la biologie suscite un intérêt comparable, alors que celui de la physique et de la chimie serait démotivant. Cloisonnement disciplinaire, pratiques vieillottes s'éloignant des préoccupations de la vie quotidienne, enseignement d'une science présentée comme morte, énoncé de vérités du passé, nombreuses sont les hypothèses possibles pour comprendre et analyser un tel constat.

Pourtant, la science est bien vivante et dépasse les frontières disciplinaires, culturelles et nationales. Après plusieurs décennies de spécialisation des chercheurs, nous sommes dans l'ère des sciences aux interfaces : biotechnologies, biophysique, ingénierie écologique, ou neuro-informatique. La liste de nouveaux thèmes de recherche amenant les spécialistes aux marges de leurs disciplines nourrit tous les jours des projets de recherche innovants. Comment faire partager la frénésie de collaborations, bien réelle dans la communauté des chercheurs, aux enseignants du secondaire ?

« Dans le sillage de *La main à la pâte* » mis en pratique dans les classes

L'Académie des sciences, sa délégation à l'éducation et à la formation et les acteurs de *La main à la pâte* en son sein (notamment Yves Quéré et Pierre Léna), ont fait le pari d'y parvenir en amenant les professeurs de trois disciplines (physique-chimie, technologie, et sciences de la vie et de la Terre) à collaborer étroitement en classes de 6^e et 5^e. Concrètement, ils vont construire un enseignement unique de science et technologie ; puis chaque professeur aura la responsabilité d'un groupe réduit d'élèves toute l'année pendant 3,5 à 4,5 heures par semaine, pour aborder avec eux des thèmes dans leur ensemble, en multipliant les points de vue, articulant des notions de biologie, géologie, technologie, chimie et physique. Un pôle « sciences de la nature et technologie » est ainsi constitué, de poids comparable à celui des autres pôles fortement mis en avant, « mathématiques » et « français ».

Afin de faciliter le travail des enseignants, l'Académie des sciences a réuni des spécialistes de la communauté scientifique et pédagogique pour proposer aux enseignants des

guides d'accompagnement comprenant une progression cohérente et des activités interdisciplinaires pour une année scolaire [6]. Le thème « matière et matériaux » est privilégié en classe de 6^e, pour aborder ensuite le thème parallèle « énergie et énergies » en classe de 5^e.

Avec une équipe de scientifiques de disciplines variées, coordonnée par Étienne Guyon, j'ai eu la chance d'expérimenter cette confrontation de points de vue lors de l'écriture de ressources scientifiques à destination des enseignants de collèges. Enrichissant progressivement le site internet de l'expérimentation [7], ces ressources sont recueillies dans un ouvrage de culture scientifique interdisciplinaire explorant la matière et les matériaux (parution prévue à l'automne 2009).

Un exemple concret : la matière à vêtir

À titre d'illustration, voici quelques éléments d'un des thèmes interdisciplinaires que nous abordons. Il s'agit d'un matériau nous enveloppant tous les jours, thème rarement abordé à l'école et pourtant tellement proche du quotidien des élèves : nos habits, qui sont bien le résultat d'innovations technologiques, des plus lointaines aux plus récentes, faisant appel à tous les domaines de la science.

Les chercheurs de la filière fibre et textile de l'ENSISA⁽¹⁾ à Mulhouse ont répondu à nos questions de physiciens concernant la mécanique des tissus, en allant du métier à tisser Jacquard aux tests de Kawabata établissant une correspondance entre des appréciations de caractère physiologique et des mesures physiques.

Peut-on s'intéresser aux textiles sans observer d'abord le rôle de notre peau ? J'ai appris, entre autres, que plusieurs types de récepteurs cutanés nous permettent de détecter les vibrations produites par le frottement d'une surface sur notre peau. L'expérience est facile. Posez un doigt sur un tissu, la peau subit une légère déformation et la rugosité de la surface est à peine perceptible par les disques Merkel⁽²⁾. Naturellement, nous frottons notre doigt sur le tissu pour en percevoir pleinement la texture et l'éventuelle douceur. Nous stimulons ainsi d'autres récepteurs cutanés, sensibles aux hautes fréquences. Heureusement, ces derniers récepteurs cessent rapidement d'être excités. Cela explique que nous ne

sentons plus nos vêtements quelques secondes après les avoir enfilés. Notre corps est ainsi capable de définir une notion de douceur d'un tissu. Bien que paraissant relative, cette notion motive l'industrie textile à s'intéresser très largement à la fabrication de « détecteurs de la douceur » reproduisant les récepteurs de la peau [8].

Après la peau, l'étude des fibres nous amène à faire un tour dans les plantations de coton et les particularités de la cellulose, ou bien dans l'industrie pétrochimique pour nous aventurer dans le monde de la chimie des polymères. Quelle que soit la matière première, l'assemblage de ces polymères en fibres, en fils puis en tissus, présentera des propriétés mécaniques qui peuvent s'étudier de façon élémentaire. Une expérience estimant les propriétés de déformation d'un tissu nous a été présentée par l'Institut textile de Mulhouse. Prenez trois étoffes dont la trame de tissage est différente : une toile de tissage régulier, un sergé (toile de jeans) et un satin dont le nombre de croisements entre fils de chaîne et fils de trame est le plus limité. Posées sur un même volume, les propriétés de déformation de ces étoffes sont mises en évidence, comme le montre l'exemple du ballon (fig. 1). Un tissu se déforme facilement, car les fils de chaîne et de trame glissent les uns contre les autres. Ce phénomène est d'autant facilité que le nombre de croisements est réduit.

>>>

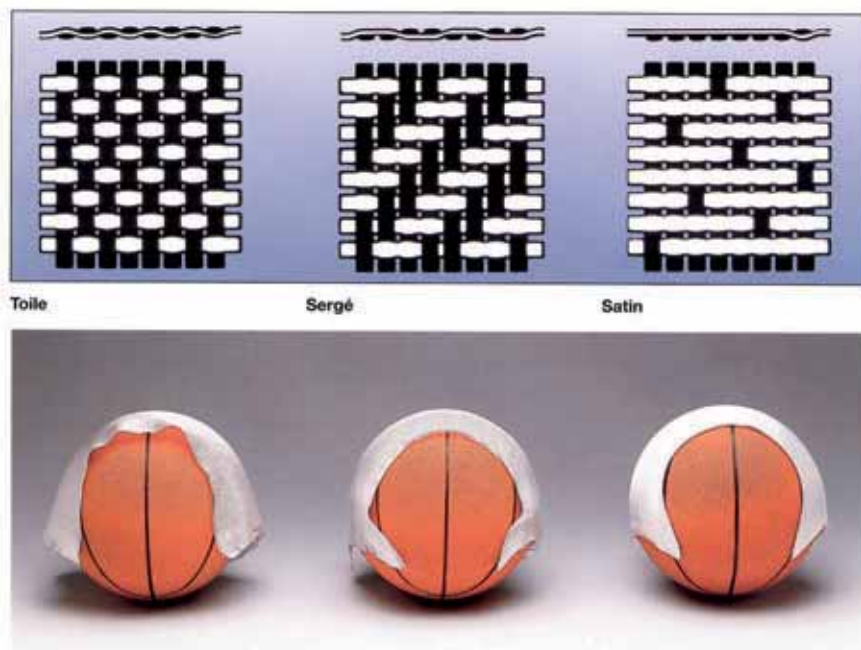
Références

- 1 • G. Charpak, P. Léna, Y. Quéré, *L'Enfant et la Science, l'aventure de La main à la pâte*, Odile Jacob (2005).
- 2 • M. Rocard *et al.*, "Science education now: a renewed Pedagogy for the future of Europe", rapport de la Commission européenne n°22845 (2007). http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/report-rocard-on-science-education_fr.pdf
- 3 • P. Léna, « Avec la main à la pâte, rénover l'enseignement des sciences », *Annales des mines*, série Réalités industrielles (mai 2007).
- 4 • *Encouraging student interest in science and technology studies*, Rapport de l'OCDE (2008).
- 5 • « L'École primaire », Rapport du Haut Conseil de l'Éducation (2007). www.hce.education.fr/gallery_files/site/21/40.pdf
- 6 • TIMSS : http://timss.bc.edu/TIMSS2007/PDF/TIMSS2007_InternationalScienceReport.pdf
- 7 • <http://science-techno-college.net/>
- 8 • M.-A. Bigué-Bueno, M. Renner, *Pour la science* n°266 (décembre 1999).

Le temps des bilans

Après bientôt trois ans d'expérimentation (depuis la rentrée 2006), il nous semble que l'engagement et le travail des professeurs pourraient porter leurs fruits. Le nombre de collègues volontaires pour tenter cette aventure a augmenté peu à peu et on en compte 40 en 2008. Certaines équipes d'enseignants témoignent déjà d'un changement d'attitude chez les élèves. Ceux-ci n'hésitent pas à prendre la parole pour partager leur opinion dans les autres enseignements qu'ils reçoivent. Ils répondent plus facilement à des questions ouvertes et semblent capables d'imaginer des stratégies pour résoudre de nouveaux problèmes. De leur côté, les professeurs sont souvent satisfaits du travail en équipe et apprécient d'avoir acquis de nouvelles connaissances.

Une évaluation est lancée fin 2008 pour croiser les regards de plusieurs partenaires : inspection générale, chercheurs de l'INRP et DEPP (Direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance ; statisticiens du ministère de l'Éducation nationale). Nous espérons ainsi obtenir des informations précises sur les gains éventuels de cette expérimentation en termes de connaissances et compétences des élèves, de leur appétence pour les sciences à l'issue du collège ou de leurs choix d'orientation. Ces données sont essentielles pour tirer de solides conclusions de l'expérimentation. En attendant, cette aventure interdisciplinaire attise la curiosité




1. Une expérimentation simple permet de mettre en évidence que selon le mode de tissage, un tissu se déforme plus ou moins facilement. Nous voyons que le tissu de satin (à droite), dont le nombre de croisements est le plus limité, est celui qui s'adapte le mieux à la forme du ballon. (Courtoisie de l'équipe du Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, ENSISA, Mulhouse.)

des enseignants de collèges et des chercheurs pour explorer des domaines inexpérimentés, des approches originales ou de nouvelles collaborations. Dans un an se posera la question de son éventuelle extension, du passage de l'expérimentation à une pratique courante dans un grand nombre de collèges,

comme, en son temps, celle de *La main à la pâte* fut posée dans l'école primaire.

(1) École nationale supérieure d'ingénieurs Sud Alsace (www.ensisa.uha.fr/)

(2) Mécanorécepteurs à adaptation lente, composés d'une extrémité nerveuse aplatie en disque, adjacente à une cellule de l'épiderme.



SFP
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

Edition 2009 du congrès général de la Société Française de Physique (SFP). Cette manifestation permet aux physiciens de toutes spécialités de faire le point sur l'évolution de la physique et ses résultats les plus récents. Elle est la seule à associer physique fondamentale, physique appliquée et sciences de l'ingénieur, tout en touchant des disciplines frontalières.

Au programme

15 conférences plénières par
Alain Aspect, David Bensahel, Leticia Cugliandolo, François Daviaud, Mathieu de Naurois, Louis Fayard, Albert Fert, Ray Golstein, John Johanolopoulos, Ludwik Leibler, David Pine, Jean-Michel Raimond, Tanya Smith, Paul Tafforeau, Wendelin Werner, Wolfgang Wernsdorfer

8 sessions parallèles couvrant largement les différents domaines de la physique.

Une conférence sur l'imagerie médicale ouverte à tous par D. Le Bihan

Une table ronde "Recherche et Mondialisation".

Une soirée débat autour du film "Les Magiciens de la lumière", sur la mesure de la vitesse de la lumière par Foucault.

Un forum "Métiers", réflexion sur les métiers du physicien, rencontre entre le monde académique et le monde socio-économique.

Des exposants du monde de l'industrie (Belin Ed., Quantel, Allectra Ltd, Amplitude Technologies SA...), et du monde de la recherche (CEA, Synchrotron SOLEIL...).


CONGRÈS

GÉNÉRAL

SFP2009

Du 6 au 10 juillet 2009
École Polytechnique, Palaiseau

Informations et inscriptions :
<http://www.sfp2009.polytechnique.fr>



La 3^e Conférence internationale sur les femmes en physique (Séoul, 2008)

Catherine Thibault (Catherine.Thibault@cnsnm.in2p3.fr)

Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse (CSNSM), Bâtiment 108, 91405 Orsay Campus

La Conférence internationale sur les femmes en physique, ICWIP2008 (*International Conference on Women In Physics*), s'est tenue à Séoul (Corée) du 8 au 10 octobre 2008. Organisée par l'IUPAP⁽¹⁾ Working Group on Women in Physics, dans lequel la France est représentée par Martial Ducloy, c'était la troisième du genre après Paris en 2002 et Rio de Janeiro en 2005.

Les sociétés de physique ou les instituts de physique, et en particulier leurs groupes de travail pour les femmes – lorsqu'ils existent – ont été sollicités pour former les délégations nationales composées de trois membres ou plus, dont un homme.



Cérémonie d'ouverture de la conférence

La délégation française était composée de cinq membres. J'étais mandatée par la Commission SFP-Femmes et par l'Association Femmes et Sciences, et, à la demande de Michèle Leduc, présidente de la SFP, j'ai assuré la coordination de la délégation en étant *team leader*. Michèle Leduc a été invitée à présenter ses travaux scientifiques, d'abord hors conférence, devant un public de jeunes étudiants très enthousiastes, puis en séance plénière. Élisabeth Giacobino, représentante de la Direction du CNRS, est intervenue à l'ouverture, et lors d'un colloque satellite sur la coopération avec l'Asie. Martial Ducloy était dans le Comité international d'organisation. Chaque pays devait préparer une communication écrite et un poster, présentant la situation des femmes physiciennes et les actions menées en leur faveur : Anne Pépin (Mission pour la place des femmes au CNRS) et moi-même avons pris en charge ce travail pour la France (voir l'article dans ce numéro, page 24).

La Conférence⁽²⁾ avait pour but annoncé de célébrer les réussites en physique de femmes du monde entier, et de promouvoir les actions menées en faveur des femmes physiciennes. 330 participants venant de 70 pays étaient présents, ce qui constituait une assistance tout à fait impressionnante par sa qualité et sa variété. Des conférences plénières, des séances de posters et des ateliers ont permis d'aborder de nombreux thèmes scientifiques ainsi que les problèmes des femmes physiciennes. Il a été montré que les difficultés rencontrées par ces dernières sont essentiellement leur faible nombre – moins de 15% à travers le monde, 20% en France – et la difficulté pour ces femmes d'atteindre les grades les plus élevés. Les six conférences plénières

ont été d'un très haut niveau. Les ateliers ont permis de discuter de façon très concrète des actions à mener sur les différents problèmes et d'identifier des expériences réussies. Les posters des délégations ont dessiné un vaste panorama de la situation des physiciennes pays par pays, et c'est avec beaucoup d'enthousiasme que les posters scientifiques ont été présentés par des femmes et beaucoup de jeunes filles de nombreux pays, incluant un grand nombre de pays en voie de développement. De nombreux contacts ont été établis, en particulier entre les *team leaders* des pays d'Europe, avec le désir très fort de travailler ensemble.

La résolution finale⁽³⁾ a été approuvée à l'unanimité. Une des recommandations essentielles est de constituer des groupes de travail sur les femmes physiciennes dans chaque société de physique. Lors de la réunion des responsables de la SFP à Orléans en décembre 2008, une vingtaine de personnes se sont déjà déclarées intéressées ; nous allons entreprendre de dresser une liste d'intervenantes et de conférencières par spécialité, afin de pouvoir faire des propositions aux organisateurs de colloques, conférences et tables rondes, désireux de faire intervenir plus de femmes. La vocation de cette liste est d'avoir un retentissement international, car le groupe de travail pour les femmes de l'IUPAP va collecter tous les fichiers établis de par le monde. Une autre recommandation est que les conférences soutenues par l'IUPAP comportent des ateliers sur le développement des carrières des femmes, et proposent au public des activités pour que filles et garçons prennent goût à la physique dès leur plus jeune âge. De tels programmes devraient pouvoir être proposés lors du congrès SFP 2011.

(1) *International Union of Pure and Applied Physics*

(2) www.icwip2008.org

(3) www.icwip2008.org/2008/resolution.php

La situation des femmes physiciennes en France

Catherine Thibault¹ (Catherine.Thibault@cnsnm.in2p3.fr), Anne Pépin², Martial Ducloy³,
Élisabeth Giacobino⁴, Michèle Leduc⁵

1 - CNSM, Univ. Paris Sud, Orsay. 2 - Mission pour la place des femmes au CNRS, Paris. 3 - Institut Galilée, Univ. Paris 13, Villetaneuse. 4 - Mission interdisciplinaire, CNRS, Paris. 5 - Laboratoire Kastler Brossel, ENS, Paris.

Lors de la conférence ICWIP2008 (voir compte rendu, p. 23), la délégation française a présenté une communication écrite et un poster [1] sur la situation des physiciennes en France et sur les actions récentes menées par les institutions, associations, entreprises et sociétés professionnelles françaises, dans le but d'améliorer cette situation.

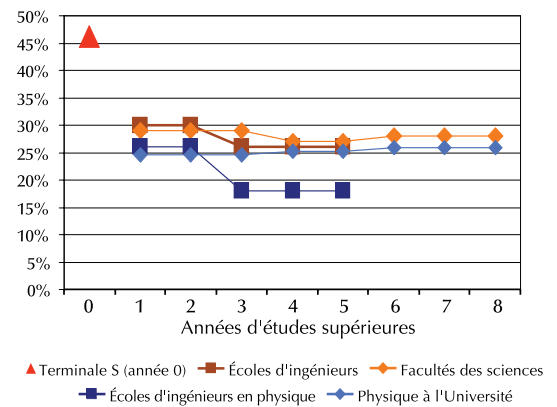
Nous présentons ici un condensé de ces deux documents, qui montrent en particulier le manque d'étudiantes entreprenant des études scientifiques et la persistance d'un « plafond de verre » pour les femmes physiciennes, et scientifiques en général.

Les graphiques proviennent de l'étude menée par A. Pépin [2].

Situation des filles et des femmes physiciennes en France

Au lycée, les filles représentent 45% des effectifs de Terminale S et leurs résultats sont légèrement supérieurs à ceux des garçons [3]. Mais elles préfèrent ensuite s'orienter vers les études médicales où elles sont majoritaires, ou vers les écoles de commerce, au détriment des sciences et particulièrement de la physique où elles ne sont que 25%. Pour les Grandes Écoles, le taux d'ingénieures diplômées en physique n'est même que de 18% (fig. 1).

Une fois dans la vie professionnelle, les conditions en France sont relativement favorables aux femmes (congés de maternité, garde des enfants), et le fait que la majorité des physiciennes travaillent dans le domaine public, avec des postes permanents obtenus vers la trentaine, est également favorable. En physique, on retrouve 21% de femmes à l'Université, et 19% de femmes au CNRS (fig. 2), ce qui est légèrement inférieur au taux de disponibilité dans le bassin français (un peu plus de 25% depuis plusieurs années). Ces proportions sont équivalentes à celles observées en Espagne ou en Grande-Bretagne, mais plus élevées qu'en Italie (17%) ou aux USA, par exemple (13%). Néanmoins, elles ne sont pas satisfaisantes et ne

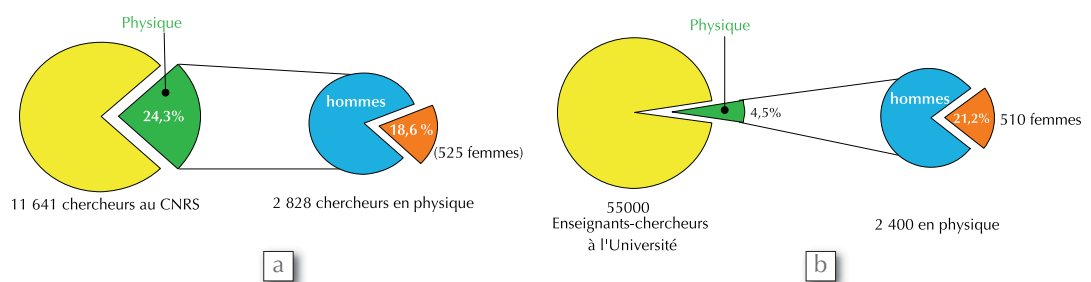


1. Pourcentage de filles selon le niveau d'études supérieures

croissent que très lentement (16% au CNRS en 1987), alors qu'aux USA elles sont en forte progression (8% en 1998).

Les concours CNRS des dernières années pour le recrutement des Chargés de recherche (CR2) et les promotions à Directeur de recherche (DR2) ne montrent pas de discrimination apparente (fig. 3).

En revanche, à l'Université, en 2007, le pourcentage de lauréates est nettement inférieur au pourcentage de candidates, qu'il s'agisse du recrutement des Maîtres de Conférence (MC) ou des promotions à Professeurs (Pr) (fig. 4).



2. Pourcentage de physiciennes au CNRS (a) et à l'Université (b). Précisons que pour le CNRS, les sections 2 à 6, 8 à 10, et 17 du Comité National ont été considérées pour l'analyse présentée ici, tandis que pour l'Université, seules les sections 28, 29 et 30 du Conseil National des Universités ont pu être prises en compte.

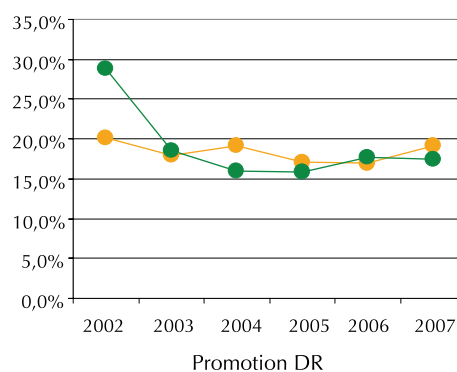
Ces différences entre CNRS et Université se retrouvent quand on considère l'avantage masculin (pourcentage de Pr ou DR parmi les hommes, divisé par le pourcentage de Pr ou DR parmi les femmes). En effet à l'Université, cet avantage atteint 2,35, ce qui est particulièrement élevé, tandis qu'au CNRS, il reste heureusement moins dramatique avec 1,44 (fig. 5).

Cependant, cette valeur non négligeable de l'avantage masculin au CNRS montre bien que les traces d'un « plafond de verre » y existent aussi. Sa persistance peut être illustrée par le fait qu'au CNRS, les femmes constituent 22% des CR et 13% des DR seulement (fig. 6). À l'Université, comme on pouvait s'y attendre, la situation est nettement plus catastrophique puisque les femmes constituent 28% des MC et seulement 10% des Pr. Cette situation est malheureusement assez générale : ainsi, le pourcentage des femmes physiciennes Pr n'est que de 5% (1,3% en 1997) en Grande-Bretagne, 6% (3% en 1998) aux USA, et 7,4% en Italie. L'Espagne, en revanche, présente une situation nettement plus favorable avec 23,5% de femmes physiciennes Pr.

Exemples d'actions

Des actions sont menées, d'une part pour encourager les filles à choisir des carrières scientifiques, et d'autre part pour améliorer l'équité femme/homme.

Les associations *Femmes & Sciences* [4], *Femmes & Mathématiques* [5] et *Femmes Ingénieurs* [6] vont dans les collèges, les lycées, les forums de métiers afin de présenter les métiers scientifiques aux jeunes et particulièrement aux jeunes filles. Elles luttent aussi contre la perpétuation de stéréotypes dans la présentation des métiers, où les femmes sont plutôt montrées dans des activités ménagères ou comme secrétaires, infirmières... que comme physiciennes ou ingénieures [7]. À la demande du ministère, ces associations ont réalisé un site internet *Elles en Sciences* [8] dédié aux filles, à leurs parents et à leurs enseignants. D'autres sites ont aussi été créés, comme *Elles bougent* [9] lancé en 2005 par les industries de l'aviation, du rail et de l'automobile, en collaboration avec les écoles d'ingénieurs. Par ailleurs, la *Mission pour la place des femmes au CNRS* a créé en 2005, à l'occasion de

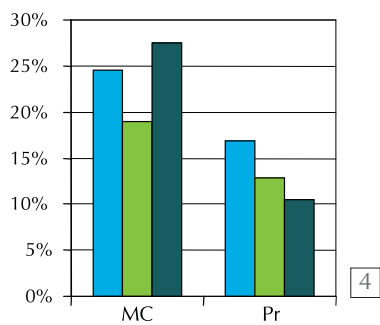


—●— % de femmes candidates —●— % de femmes lauréates

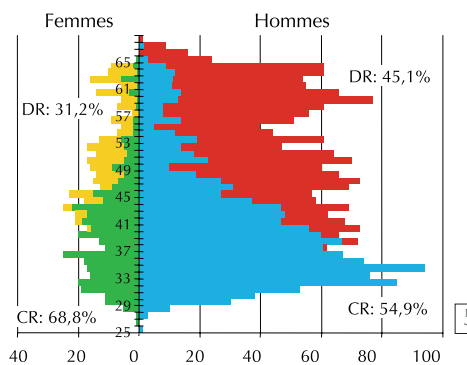
Références

- 1 • La communication écrite et le poster de la délégation française peuvent être consultés sur www.sfpnet.fr (Commissions – SFP-Femmes – Actualités). Des liens vers la résolution finale, le programme et la liste des pays sont également donnés.
- 2 • A. Pépin, *Status of Women in Physics in France (CNRS and University)*, Rapport interne CNRS (2008), incluant des données du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.
M. Crance, *La place des femmes au CNRS aujourd'hui : quelques chiffres*, www.cnrs.fr/mpdf/IM6/pdf/2006_PlacedesFemmes.pdf
- 3 • Filles et garçons à l'École sur le chemin de l'égalité (2008), www.eduscol.education.fr/D0234/filles_garcons_chiffres2008.pdf
- 4 • www.femmesetsciences.fr
- 5 • www.femmes-et-maths.fr
- 6 • www.femmes-ingenieurs.org
- 7 • Livret : *Les femmes et les sciences... au-delà des idées reçues*, www.femmesetsciences.fr/ideesrecues.htm
- 8 • www.elles-en-sciences.org
- 9 • www.ellesbougent.com
- 10 • www.cnrs.fr/mpdf/spip.php?article115
- 11 • www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pid20161/mission-parite.html
- 12 • www.cnrs.fr/mission-femmes
- 13 • www.epws.org
- 14 • Pour plus de détails, voir www.sfpnet.fr (Commissions – SFP-Femmes – Prix et bourses).

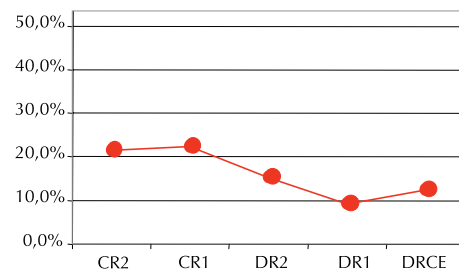
3. Pourcentages de femmes parmi les candidats et les lauréats aux concours CR2 et DR2 en physique au CNRS. Il n'y a pas de discrimination apparente aux concours CNRS pour les dernières années. Toutefois, le nombre de lauréates reste faible (moins de 15 CR2 et 11 DR2 en 2007), et l'on note de fortes disparités selon les sections et les années.



■ Candidates ■ Lauréates ■ Population actuelle



■ Hommes CR ■ Hommes DR ■ Femmes CR ■ Femmes DR



6

4. Pourcentages de femmes parmi les candidats et les lauréats aux concours MC et Pr en physique en 2007.

Le pourcentage de lauréates est nettement inférieur au pourcentage des candidates (qui est proche de celui des diplômées de master), mais la proportion de femmes professeurs est en progression.

5. Pyramide des âges au CNRS pour les chercheurs en physique (31/12/2006) [2].

On voit que la probabilité de devenir DR est plus faible pour une femme que pour un homme. L'avantage masculin en physique au CNRS est $45,1/31,2=1,44$ (l'avantage masculin global au CNRS est de 1,55).

6. Proportion de femmes parmi les chercheurs au CNRS selon le grade (2006).

l'Année mondiale de la physique, un outil pédagogique, l'exposition itinérante « Physique de femmes » [10], présentant les portraits de 15 physiciennes, qui continue de tourner en France et, depuis 2007, à l'étranger.

Il existe maintenant plusieurs structures institutionnelles destinées à promouvoir les femmes et à veiller sur un traitement équitable des genres : *Mission pour la parité* [11] créée en 2001 au ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, *Mission pour la place des femmes au CNRS*, également établie en 2001 [12], Missions pour la parité dans certaines universités, *European Platform of Women Scientists (EPWS)* [13]... Cependant, les questions d'égalité femmes-hommes, et en particulier la persistance du plafond de verre, restent d'actualité.

Plusieurs interventions sont nécessaires chaque année de la part des associations ainsi que de la SFP pour protester contre des nominations ou des promotions insuffisamment féminisées (voire exclusivement masculines !), des choix de conférencières et présidentes de session trop peu nombreux à certaines conférences, ou des paroles malencontreuses à l'égard des femmes scientifiques.

Enfin, signalons aussi qu'il existe plusieurs bourses et des prix scientifiques récompensant spécifiquement les femmes scientifiques [14] : prix et bourses l'OREAL-UNESCO lancés en 1999, prix Irène Joliot-Curie créé en 2001 par EADS et le MESR, trophée Excellencia et Prix de la jeune scientifique parisienne, créés en 2005.

INGÉNEUR
Un métier pour les filles

Panorama de carrières

Coordonné par Marie-Annick Chanel

10^e anniversaire des femmes ingénieurs Supélec
1988 - 2008

EDP

Ingénieur, c'est métier d'homme, non ?

Avoir entendu cette phrase maintes fois prononcée, tout en observant la réalité, celle de ces femmes ingénieurs occupées aux quatre coins de la planète à imaginer et construire le monde de demain, voilà ce qui a motivé l'écriture de ce livre.

À travers les facettes de ce métier protéiforme, qui couvre tant de branches d'activités, le lecteur rencontrera des femmes au travail, se faisant une idée (enfin) juste de ses dimensions et des passions qu'il engendre. Volontairement non technique, le livre s'ouvre aux témoignages vécus (parfois cocasses) et éclaire sur une toute autre réalité : les femmes ingénieurs se réalisent pleinement dans ce métier, ce que le grand public a souvent du mal à s'imaginer...

Ingénieur, un métier pour les filles est destiné à tous et toutes : enseignants, parents, étudiants, entrepreneurs, et tous ceux que la passion de construire habite. Ingénieure, c'est vraiment un métier pour les filles...

L'association Supélec au Féminin, qui fêtait ses quatre vingt dix ans fin 2008, a réalisé ce panorama de carrières de femmes ingénieurs.

• Coordonné par Marie-Annick Chanel
• Paru le 15 Janvier 2009 • 978-2-7598-0368-2 • 182 pages • 15 €

Ouvrage disponible chez votre libraire habituel et sur www.edpsciences.org

L'assemblée générale du 7 février 2009

Elle s'est déroulée, comme le veut la tradition, dans l'amphithéâtre Hermite de l'Institut Henri Poincaré, 11 rue Pierre et Marie Curie, Paris 5^e.

En début de séance, la présentation des comptes de l'an 2008 et du projet de budget pour 2009, a été faite par le trésorier sortant, Joël Le Duff (voir son message, p. 28). Ils ont été approuvés à l'unanimité.

La présidente sortante, Michèle Leduc, a donné les résultats des élections pour le renouvellement du Conseil d'administration et du Bureau (voir ci-contre). Elle a ensuite fait un bref bilan de son action depuis deux ans, en terminant par un hommage à Roger Maynard, vice-président sortant, et à Joël Le Duff et Claude Petipas, qui quittent le Bureau.

La réunion s'est poursuivie avec l'allocution du président entrant, Yves Petroff, qui a été publiée dans *Reflets* n°13 (pp. 2-3).

Yves Petroff a ensuite remis le Prix Jean Perrin (popularisation de la science) 2008 à Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik, récompensant la qualité de leur action pour diffuser les sciences en général et la physique en particulier. Les deux lauréats ont présenté des exemples de popularisation de la physique et de son enseignement (la chronique « Idées de Physique » dans *Pour la Science*), qui a enthousiasmé l'auditoire.

La matinée s'est terminée par une conférence, également de grande qualité, de Frédéric Leroy (L'Oréal), sur : « Physique de la beauté, physique pour la beauté », qui a étonné la salle par la richesse des techniques de physique utilisées pour aborder ce problème.

Nouveaux membres du Bureau



Françoise Bourée, trésorière

Françoise Bourée est agrégée de sciences physiques (1972) et docteur d'État (1983) en physique de la matière condensée. Sa carrière scientifique s'est déroulée au Laboratoire Léon Brillouin (UMR CEA/CNRS, Saclay), TGI de diffusion de neutrons, où elle a longtemps été responsable du groupe de diffraction-poudres. Spécialiste des structures magnétiques, elle a fait ou fait encore partie de Comités de sélection pour les expériences proposées dans d'autres sources de neutrons, en France (ILL) ou à l'étranger.

Une partie de son activité est liée à l'enseignement : à l'Université de Paris Sud tout d'abord, où elle a été maître de conférences pendant dix ans ; plus récemment, elle s'est impliquée dans la formation des jeunes chercheurs aux techniques de diffusion neutronique.

À la SFP, elle succède à notre précédent trésorier, Joël Le Duff. Françoise Bourée est également responsable de la nouvelle « Lettre » électronique aux adhérents, dont le premier numéro est paru en février 2009.

Amand George, responsable des relations avec les Sections locales

Ingénieur civil des Mines de Saint-Étienne (1969), Amand George a préparé à l'École des Mines de Nancy une thèse d'État (1977) sur la dynamique des dislocations dans le silicium. Chercheur au CNRS de 1973 à 2008, il a ensuite étudié d'autres aspects de la physique des comportements mécaniques, essentiellement dans les matériaux semi-conducteurs. Ces travaux ont fait appel à des observations *in situ* avec le rayonnement synchrotron.

Amand George a dirigé le Laboratoire de Physique des Matériaux de Nancy de 1991 à 1998. Il a enseigné régulièrement à l'Université Henri Poincaré et à l'Institut National Polytechnique de Lorraine. De 2000 à 2004, il a présidé la section 05 du Comité National de la Recherche Scientifique.

Il a été président de la Division Matière condensée de la SFP en 2007 et 2008, et a participé à l'organisation des JMC 11 qui se sont tenues à Strasbourg en août 2008.

À la SFP, il succède à Claude Petipas, qui a longtemps assumé avec compétence et dévouement les relations du siège avec les sections locales.

Résultats des élections

Votants : 625

Blancs et nuls : 6

Moins une voix pour le Bureau

Sont élus pour 3 ans :

Andreazza-Vignolle Caroline (500 voix)

Del Fatti Natalia (494 voix)

Cacciani Patrice (465 voix)

Boudon Vincent (458 voix)

Merle-Lucotte Elsa (449 voix)

Bassereau Patricia (436 voix)

Pottie Paul-Éric (414 voix)

Le Bureau au 7 février 2009

Petroff Yves, président

(démissionnaire le 3 mars 2009)

Leduc Michèle, vice-présidente

(présidente par intérim depuis le 3 mars 2009)

Magnier Sylvie, secrétaire générale

Bourée Françoise, trésorière

Billaud Pierre, secrétaire

Dauchot Olivier, secrétaire

George Amand, secrétaire

Mosser Vincent, secrétaire

de Novion Charles, secrétaire

Le Conseil d'administration au 7 février 2009

(200X : année d'élection)

Abadaa Asmaa (2007)

Andreazza-Vignolle Caroline (2009)

Antoine Rodolphe (2007)

Bassereau Patricia (2009)

Benlahsen Mohammed (2007)

Blanchet Valérie (2008)

Bodnar Jean-Luc (2007)

Boudon Vincent (2009)

Bremond George (2007)

Cacciani Patrice (2009)

Contreras Sylvie (2007)

Dagreou Sylvie (2007)

Del Fatti Natalia (2009)

Joussaume Sylvie (2007)

Lambert Jérôme (2008)

Loiseau Annick (2007)

Lollman Dave (2008)

Machefert Frédéric (2008)

Massacrier Gérard (2008)

Mazouffre Stéphane (2008)

Merle-Lucotte Elsa (2009)

Pascaud Jérôme (2008)

Pottie Paul-Éric (2009)

Tanguy Anne (2007)

Zarrouati Marc (2008)

Le message du trésorier

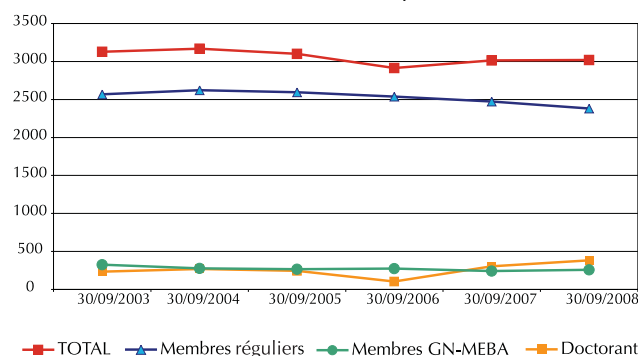
Le résultat brut de l'exercice, +96 899 €, est en nette progression par rapport au précédent. Ceci s'explique par les dividendes importants de EDP Sciences et EPL (166 764 et 16 762 €, respectivement), par une hausse des recettes en provenance des gestions de fonds extérieurs, une réduction du déficit de *Reflets de la Physique*, une réduction des dépenses en matière de « communication », et une maîtrise des frais généraux au niveau du siège.

On constate que les recettes en provenance des cotisations ont diminué de 2 486 €, confirmant ainsi la tendance à une baisse du nombre des adhérents (voir figure).

Prenant en compte les mouvements sur VMP (Valeurs Mobilières de Placements), le résultat net de l'exercice est de +73 615 €, à intégrer au bilan.

Il n'en reste pas moins que le déficit d'exploitation est de 130 346 € (soit 23,7 %). Ce résultat est obtenu sans tenir compte des produits et des charges financiers. Il démontre à quel point la SFP dépend de ses produits financiers et confirme l'extrême faiblesse des recettes en provenance des adhérents. On note toutefois que ce résultat est nettement meilleur que celui de l'exercice précédent, où le déficit avait atteint 39,4 %.

Évolution des adhérents SFP depuis l'année 2003



Le bilan présente un actif en hausse de 105 552 €. Toutefois, en ce qui concerne le passif, les fonds non affectés restent encore très supérieurs aux fonds affectés, faute de projets bien identifiés.

Les trésoreries sont confortables, y compris au niveau des sections locales, même si le résultat brut de ces dernières est négatif pour l'exercice (-32 072 €).

Les portefeuilles SFP ont un peu souffert des marchés. Une provision pour dépréciation de 35 487 € (soit 4,8 %) a été introduite dans le bilan.

Séminaire interne SFP (Orléans, 5-6 décembre 2008)

Ce séminaire rassemble chaque année les présidents et responsables des sections locales, des divisions de spécialité, des commissions et actions de la SFP. Le séminaire de décembre 2008 a réuni 62 participants.

Deux conférences invitées étaient programmées.

Arnold Migus, directeur général du CNRS, dans sa conférence intitulée : « Un organisme d'avenir pour la recherche : le CNRS », nous a présenté le point de vue de la direction de cet organisme sur son évolution dans le contexte de la Loi d'autonomie des universités. Plusieurs grands principes guident la réforme d'organisation du CNRS :

- la dévolution progressive aux universités de la gestion de la majorité des unités mixtes de recherche qui y sont hébergées (80% des laboratoires CNRS sont situés dans les universités) ;
- la responsabilisation des acteurs par la création de 9 instituts en charge de la prospective et de la programmation des grandes disciplines ;
- la focalisation de la direction du CNRS sur la vision stratégique et la pluridisciplinarité (3 pôles transverses).



Michèle Leduc et Pierre Léna au séminaire d'Orléans

Pierre Léna (Académie des sciences) a effectué un survol des développements actuels concernant l'enseignement des sciences dans le primaire et le secondaire, en France et en Europe. L'importance d'un enseignement scientifique de qualité est maintenant soulignée partout, tant pour la formation du citoyen (« sciences pour tous ») que pour préparer le vivier de futurs scientifiques, ingénieurs et techniciens. Le rapport de l'OCDE publié en 2008 (*Encouraging students interest in science and technology studies*) analyse très bien les difficultés et les initiatives encourageantes prises dans les dernières années. Une de ses conclusions est que la science intéresse les jeunes, mais qu'ils la considèrent comme quelque chose d'admirable et de lointain. Les remèdes consistent à commencer tôt (avant 12 ans), à transformer la pédagogie et donc à aider les enseignants. Le cœur du problème est la formation continue des enseignants. Un fort consensus paraît exister sur la pédagogie d'investigation. En France, l'Académie des sciences conduit depuis 1996 des efforts en direction du primaire, avec *La main à la pâte*. Elle a récemment étendu son action au collège, avec une expérimentation d'enseignement intégré de science et technologie en 6^e et 5^e (voir l'article d'A. Pedregosa, p. 20 de ce numéro).

Ces deux conférences ont vivement intéressé les participants du séminaire, mais le temps a malheureusement manqué pour une discussion approfondie. L'année prochaine, on se limitera à une seule intervention, afin de dégager du temps pour discuter de l'amélioration de la SFP.

À la suite de la présentation des bilans des sections locales, Y. Petroff a fait remarquer que les relations avec l'industrie n'étaient pratiquement jamais évoquées. Un effort devra être fait pour les développer, en particulier dans les régions à forte implantation industrielle.

Échec d'un rapprochement entre EDP Sciences et Springer

Nous pensons utile d'apporter aux membres de la SFP, lecteurs de *Reflets de la physique*, des précisions sur l'enchaînement des événements concernant un éventuel rachat de la maison d'édition EDP Sciences par Springer. Les discussions préliminaires viennent de prendre fin, sans qu'aucune vente n'intervienne et avant même que s'engagent des négociations. Toutefois cette affaire a agité notre milieu, et voici quelques éléments d'information et de réflexion.

Fondation

EDP Sciences a été fondée en 1920 sous le nom de *La Société du Journal de Physique* pour reprendre la publication du *Journal de Physique*, créé en 1872, à l'occasion de sa fusion avec le journal *Le Radium*, lui-même créé en 1904. C'est la Société Française de Physique et quelques savants et industriels renommés, qui ont fondé cette maison d'édition. À l'époque, une toute petite équipe, composée essentiellement de bénévoles, effectuait l'ensemble des activités d'édition scientifique : réception des articles, mise en forme, évaluation par des rapporteurs, retours aux auteurs et, finalement, organisation de l'impression confiée à un imprimeur. Elle était abritée à l'ESPCI, grâce à la générosité de Paul Langevin. La société, renommée « Éditions de Physique », est restée centrée sur l'édition des différentes sections du *Journal de Physique* jusque vers la fin des années 1990, date à laquelle une ouverture à d'autres domaines de la physique a été entreprise, notamment vers l'astrophysique. De même, le développement de la publication de livres date de cette époque.

De l'artisanat à la PME...

À partir de 1997, avec l'arrivée d'un nouveau directeur général, Jean-Marc Quilbé, l'entreprise se développe et prend une tout autre dimension. Cela lui permet d'obtenir le contrat d'édition de la revue *Astronomy and Astrophysics* aux dépens de Springer. Elle achète de nouveaux locaux aux Ulis et crée en janvier 2000 une succursale *E-Press* à Casablanca pour le traitement informatique des articles en Latex. Parallèlement, elle s'ouvre aux autres communautés scientifiques et change sa dénomination *Les Éditions de Physique* en *EDP Sciences* pour *Édition Diffusion Presse Sciences*. La SFP a accompagné cette stratégie d'ouverture tout au long de ces années, en cédant une partie de ses actions à la Société Française de Chimie et à la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles. La SFP détient actuellement environ 80% des actions d'EDP. En cinq ans, EDP Sciences va doubler son nombre d'employés, pour atteindre aujourd'hui plus de 50 personnes aux Ulis et une vingtaine au Maroc. Elle édite une cinquantaine de revues scientifiques et participe activement à la direction éditoriale des revues européennes *EPJ A, B, C, D, E* et *Applied*. EDP publie aussi des livres de sciences, comme la collection « Savoirs Actuels », ainsi que des ouvrages de vulgarisation. Mais c'est surtout grâce aux revues scientifiques, en particulier

European Physics Journal (EPJ) et *Astronomy and Astrophysics (A&A)*, qu'EDP Sciences réalise son chiffre d'affaires par une diffusion mondiale de ces revues.

Une concurrence vive...

Des changements considérables s'annoncent dans la politique des publications scientifiques. Le nouveau modèle de publication en *open access* se met en place progressivement, plaçant les institutions scientifiques et les éditeurs dans des situations totalement nouvelles, sans que le modèle économique soit clairement établi. Le regroupement des bibliothèques de l'ensemble des universités du monde en *consortia* donne un avantage considérable aux grands groupes d'édition. De plus, la nécessité d'utiliser des plateformes informatiques de plus en plus sophistiquées favorise les grandes maisons d'édition aux dépens des petites, par économie d'échelle. Enfin, les politiques commerciales indispensables nécessitent des moyens importants, de plus en plus hors de portée d'une petite entreprise. Ce contexte difficile pousse soit à un rapprochement ou un adossement d'EDP Sciences à un éditeur de plus grande taille, soit à solliciter une aide publique. Rappelons qu'à ce jour EDP Sciences ne reçoit quasiment pas de subvention, ni des ministères, ni des organismes de recherche. Elle doit faire face à la concurrence des grands groupes, uniquement sur ses fonds propres. Si l'entreprise, bien gérée, apparaît aujourd'hui comme très saine, il reste que son avenir est incertain.

Chronique d'un échec...

Il y a plus d'un an, la SFP a été approchée en vue d'un achat de la société EDP Sciences pour intégration dans la holding Springer. Cette proposition s'est transformée, au bout de quelques mois, en offre de fusionner EDP Sciences avec Springer-France, qui édite aussi des revues scientifiques, surtout de médecine. La direction de la SFP a considéré que l'offre méritait considération, compte tenu du contexte international actuel de l'édition scientifique et de la crise financière. Le Conseil d'Administration de la SFP, le 28 janvier 2009, a donné mandat au Bureau d'amorcer des négociations. Lorsque le personnel d'EDP Sciences et les responsables de la SFP dans les sections locales en ont été informés fin février, le projet a immédiatement entraîné de nombreuses réactions dans la communauté des physiciens. Certains collègues se sont émus de la perte de contrôle de

>>>

>>>

notre société savante sur ses journaux scientifiques, ou ont pensé qu'une vente à un éditeur privé amènerait une augmentation du coût des revues ; d'autres encore ont émis des craintes concernant le personnel de l'entreprise. À cela s'est ajoutée la position négative à l'égard de Springer du comité éditorial d'*A&A*, qui, par expérience, trouve la gestion de sa revue par EDP plus satisfaisante. Tout ceci a conduit le lundi 2 mars le bureau de la SFP à décider de ne pas entamer les négociations, jugeant que notre société risquait d'être fortement divisée par des opinions divergentes. Dans le contexte actuel où l'enseignement supérieur est agité par les réformes, la SFP n'a pas souhaité créer de tensions supplémentaires. Cette décision a entraîné la démission d'Yves Petroff, président de la SFP, convaincu que la voie d'une intégration d'EDP Sciences dans un grand groupe européen aurait au moins mérité d'être explorée à fond.

Une attitude ambiguë de la communauté scientifique...

D'un côté les chercheurs considèrent, parfois à juste titre, que les grandes entreprises de l'édition scientifique réalisent des bénéfices considérables et injustifiés sur leur dos, et proclament haut et fort leur attachement aux maisons d'édition appartenant aux sociétés savantes. Mais leur pratique ne correspond pas toujours à ces déclarations, lorsque se pose le problème du choix d'un éditeur pour la publication de leurs travaux sous forme d'article ou de livre. Combien d'entre nous préfèrent réserver aux revues américaines ou anglaises la primeur de leurs résultats les plus brillants... On a même vu récemment une prestigieuse institution française donner sa préférence à une grande

maison d'édition internationale, par ailleurs fort décriée, aux dépens d'EDP Sciences pour la publication de ses *Comptes Rendus*. Il est un peu amer de constater que tous les chercheurs n'ont pas la même cohérence dans leurs pratiques que nos collègues astrophysiciens.

Demain...

Aujourd'hui les soucis demeurent concernant le futur d'EDP Sciences. La SFP est également très concernée, car elle fonctionne en partie avec l'apport en trésorerie fondé sur les dividendes que lui fournit sa maison d'édition. EDP Sciences va devoir faire face sur ses propres ressources à l'impact de la crise économique et aux défis engendrés par les mutations de l'édition scientifique. Il faut d'abord souhaiter que nous en prenions tous conscience en tant que scientifiques, et que nous ayons à cœur de soutenir nos journaux européens tels que *EPJ* et *EPL* : si nous faisons le choix d'y envoyer de bons articles, nous contribuerons à augmenter le facteur d'impact de ces revues et par conséquent son attractivité pour les bons auteurs. À terme, il faudra imaginer des synergies susceptibles de garantir pour EDP Sciences un avenir stable, dont dépend aussi le développement futur de la SFP. Il faudra ainsi développer des collaborations avec les sociétés de physique européennes, peut-être aussi avec d'autres sociétés savantes françaises. Enfin, d'autres partenariats éditoriaux pourront aussi être envisagés sous des formes encore à définir.

Roger Maynard,
Président du Conseil d'Administration d'EDP Sciences
Michèle Leduc,
Présidente de la SFP

DOC PRO NEWS

Le magazine pour l'insertion des docteurs avec l'ABG

Cher lecteur de *Reflets de la physique*,
Nous vous proposons de découvrir le premier numéro de DOC PRO NEWS, le magazine pour l'insertion des jeunes docteurs.

Au sommaire :

- Le témoignage d'un jeune docteur : son parcours... de l'université à l'entreprise.
- Le dispositif du « doctorant conseil » décrypté : permettre à des futurs docteurs de réaliser des missions en entreprise en parallèle du doctorat.
- Les *news*, l'actualité, les rendez-vous ...mais aussi des informations et les adresses utiles pour bien préparer son entrée sur le marché de l'emploi.

Pour télécharger DOC PRO NEWS n°1 (mars 2009) :
www.aef.info/public/fr/medias/doc/2009/59_newsletter_doc_pro_1.pdf

Bonne lecture !

Le magazine DOC PRO NEWS est réalisé en partenariat avec l'Association Bernard Gregory et le ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi – Direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services.

Point de vue sur les Éditions de physique et EDP Sciences

Je viens de lire la lettre de démission d'Yves Petroff. Je la regrette, car je crois qu'il aurait beaucoup apporté à notre Société Française de Physique, mais je comprends sa réaction et je la respecte. Cela ne m'empêche pas de dire clairement ma position concernant l'avenir d'EDP Sciences.

J'ai présidé la SFP il y a 25 ans, à l'époque où le *Journal de Physique Lettres* a formé avec le *Nuovo Cimento* le noyau d'*Europhysics Letters*. J'ai mesuré alors le peu de poids qu'avaient la SFP et les Éditions de Physique (EdP) face à des partenaires anglais intraitables et à une Société européenne de physique laxiste (pour qui l'équilibre des pays membres primait sur tout). J'ai bataillé pour faire d'*Europhysics Letters* un journal exigeant, au prix de numéros un peu minces au départ : sans succès. Le résultat a été parfaitement résumé quelques années plus tard par Marty Blume, responsable des journaux de l'APS : « plus de la moitié des articles publiés par *EPL* ont été refusés par *Phys. Rev. Lett.* ». La compétition entre journaux est féroce, il ne faut pas l'oublier.

À la même époque, j'ai présidé le Conseil d'Administration des Éditions de Physique, alors État dans l'État, très mal gérées. EdP avait à l'époque mis au point un logiciel de traitement de texte très respectable, pour lequel ils voulaient créer une filiale autonome. J'étais farouchement opposé à ce projet, convaincu que ce genre de produit serait caduc en quelques années et que lutter contre des géants comme Microsoft ou autres était sans espoir. J'étais seul, hélas : mon avis a été balayé. La filiale Novedit a été créée – elle a fait faillite quelques années plus tard : EdP y a perdu son capital. Seul Bernard Cagnac, à la présidence d'EdP, a réussi quelques années après à y mettre de l'ordre : les Éditions de Physique [devenues depuis EDP Sciences, ndlr] sont aujourd'hui un succès incontestable et incontesté.

Ce bref historique montre que l'édition scientifique est un monde fragile. Quel que soit son succès actuel, EDP Sciences doit faire face à un environnement hostile : l'avenir est sombre et ne pas s'y préparer est suicidaire. La publication traditionnelle sur papier est condamnée à brève échéance : les journaux en ligne vont prendre peu à peu le dessus, moins encombrants, plus souples d'emploi. Les petits éditeurs vont disparaître au profit de gros opérateurs regroupant un grand nombre de journaux, capables d'offrir des abonnements groupés intéressants. Si les physiciens français publiaient systématiquement dans les journaux français, EDP Sciences pourrait peut-être conserver une niche (contrairement à ce qu'affirme M. Sarkozy, le rayonnement de la physique française est bien réel). Ce n'est pas le cas, hélas, nous le savons bien. L'issue du *statu quo* est inévitable : les petits journaux vont décliner, les rares auteurs étrangers iront ailleurs, et tôt ou tard EDP Sciences fera faillite. Comme l'a fait remarquer Yves Petroff, les conséquences pour son personnel, dévoué et compétent, seront dramatiques. Les bons sentiments sont une chose, le sens des responsabilités une autre.

À condition de prévoir statutairement le maintien d'activités bien définies aux Ulis, la vente à Springer était une chance inespérée d'éviter cette mort programmée. Springer est un acteur puissant, seul capable d'assumer les changements de l'édition scientifique. C'est pourquoi j'ai soutenu ce projet avec enthousiasme, lorsque Yves m'a demandé mon avis, il y a quelques mois. Mon opinion ne change pas après son départ : si elle est encore possible, la vente à Springer est la seule arme contre la débâcle. Le vrai problème est de l'encadrer pour maintenir aux Ulis une activité conforme aux talents d'EDP Sciences.

Philippe Nozières
Institut Laue-Langevin et Académie des sciences

Sous le haut patronage
de Monsieur **Nicolas Sarkozy**,
Président de la République française



3 > 5 JUNE 2009

NEW DATES • WEDNESDAY TO FRIDAY

VIPARIS PAVILLON 5

PORTE DE VERSAILLES/PARIS /FRANCE



SALON EUROPÉEN
DE LA RECHERCHE
& DE L'INNOVATION

EUROPEAN RESEARCH & INNOVATION EXHIBITION

EXHIBITION & CONGRESS

Pour bénéficier d'une
Entrée gratuite
Rendez vous sur le site

www.seri.info

en précisant le code **SERIB5**

ENERGY

HEALTH

TRANSPORT

CHEMISTRY

DEFENCE

CONSTRUCTION

SERVICES

FOOD

EQUIPMENTS

IT-ICT...



En partenariat avec

SAINT-GOBAIN

SIEMENS



LesEchos

L'USINE NOUVELLE

INDUSTRIE TECHNOLOGIES



Organized by
Fondamental Expo