reflets de la PHYSIQUE

n° 50
septembre 2016

www.refletsdelaphysique.fr

Revue de la Société Française de Physique

La physique des neutrinos

Avancées de la recherche

- ThomX : une source compacte de rayons X
- Les dichalcogénures de métaux de transition

Histoire des sciences

- Qui a découvert la fission nucléaire ?

n° 50 - septembre 2016 - 10 € - 5 numéros par an

www.sfpnet.fr

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

Les femmes dans la recherche : les actions de la SFP

Comme d'autres sciences (mathématiques, sciences de l'information...), la physique souffre actuellement d'une désaffection des jeunes, et en particulier des jeunes filles, alors que leur présence dans les laboratoires est primordiale et bénéfique à beaucoup de points de vue. De nombreuses associations(a) et institutions officielles(b) se penchent sur le problème et proposent des solutions pour améliorer la situation. La Société Française de Physique se doit de participer à cet effort général pour améliorer la place des femmes dans la recherche et augmenter leur visibilité dans les métiers de la physique. C'est à travers ces modèles que la recherche en physique attirera des jeunes femmes.

À la suite des réunions de son bureau et de son conseil (1er et 18 mars 2016), la Société Française de Physique, sur recommandation de sa commission Femmes et Physique, **a décidé d'appliquer la loi pour les jurys des prix (40% de femmes au minimum,** en essayant de viser 50%). Les présidents des différents prix de la SFP devront, au travers des processus de nomination, veiller à atteindre ces objectifs sur une période de cinq ans.
Les conférenciers pléniers ainsi que les comités scientifiques et d'organisation des congrès devront désormais comporter un minimum de 20% de femmes, et viser si possible une proportion de 40 à 50%.

La commission Femmes et Physique de la SFP œuvre pour une meilleure représentation des femmes en physique. Pour cela, entre autres actions, elle a développé et met notamment à disposition :
- une **base de données de conférencières et d'expertes** (sélectionnées sur recommandation) pour les scolaires, le grand public et les physiciens ;
- un **mentorat pour jeunes chercheuses,** qui consiste à trouver une femme d'expérience comme interlocutrice pour une femme plus jeune qui en fait la demande ; ce qui peut bien sûr être une première étape avant d'orienter cette dernière vers les services spécialisés de son organisme ;
- un **groupe facebook** « Femmes et Physique » : Femmes et Physique Public Group | Facebook.

Pour toute suggestion ou demande, écrire à sfp-femmes@sfpnet.fr. La commission Femmes et Physique fera régulièrement un bilan de toutes ces actions.

Nous invitons aussi les membres de la SFP à signer le manifeste *Pour les Femmes et la Science* de L'Oréal -UNESCO, avec lequel nous sommes vraiment en phase et dont les signataires s'engagent à :
1/ Susciter des vocations scientifiques chez les jeunes filles.
2/ Faire tomber les barrières qui empêchent les femmes de science de poursuivre une carrière à long terme.
3/ Favoriser l'accès des femmes aux postes scientifiques de haut niveau et aux postes décisionnels.
4/ Célébrer auprès du grand public la contribution des femmes scientifiques aux progrès de la science et de la société.
5/ Garantir la parité dans les instances et manifestations scientifiques (colloques, commissions et conseils d'administration) en termes de participation et de leadership.
6/ Favoriser le mentorat et l'accès aux réseaux pour les jeunes scientifiques, afin de leur permettre de planifier et de développer leurs carrières à la hauteur de leurs espérances.

Par ailleurs, début 2012, les trois associations Femmes & mathématiques, Femmes & Sciences et Femmes Ingénieurs, s'étaient unies pour interpeller les **candidat-e-s à la Présidence de la République** sur le thème « femmes, sciences et éducation ». Ces associations avaient choisi d'aborder le sujet en élaborant **vingt propositions pragmatiques** à l'efficacité reconnue, au coût marginal et nécessitant surtout une volonté politique, pour un objectif d'intérêt général.
Les vingt propositions étaient classées en quatre thèmes :
1/ Déconstruire les idées reçues de la société concernant les femmes et les sciences.
2/ Encourager l'orientation des jeunes, et plus particulièrement des jeunes filles, vers les filières scientifiques et techniques.
3/ Repenser la place des sciences et de l'ingénierie dans l'éducation.
4/ Faciliter la carrière des femmes scientifiques, techniciennes et ingénieures.
La SFP s'associe à la réflexion pour faire évoluer ces propositions pour les élections à la Présidence de la République de 2017. Afin de vous permettre de vous exprimer sur l'évolution de la situation et les points éventuels à ajouter, un questionnaire a été mis en ligne avec le lien :
https://femmesscing.evalandgo.com/s/?id=JTk1ayU5MmolOTclQjI=&a=JTk1aSU5MmklOUMlQjI=
Plus les réponses seront nombreuses dans cette première phase de réflexion, plus nous serons représentatif.ve.s. Merci d'être nombreux.ses à répondre à ce questionnaire !

Michel Spiro
Président de la Société Française de Physique

Véronique Pierron-Bohnes
Présidente de la commission Femmes et Physique de la SFP

(a) Femmes & Sciences, Femmes & Mathématiques, Femmes Ingénieurs...

(b) Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Mission pour la place des femmes au CNRS, CEA, Conférence Permanente des chargé-e-s de mission Égalité-Diversité des établissements d'enseignement supérieur et de recherche (CPED)...

▸ p. 11

▸ p. 27

▸ p. 31

▸ p. 36

© Nicolas BAKER / CPPM / CNRS Photothèque

Ingénieur en train d'intégrer la première ligne de détection du télescope à neutrinos KM3NeT/ORCA (voir article p. 4 et brève p. 9).

Sommaire

Éditorial

2 Les femmes dans la recherche : les actions de la SFP
Michel Spiro et Véronique Pierron-Bohnes

Images de la physique

4 Les neutrinos n'ont pas livré tous leurs secrets
Stéphane Lavignac et Marco Zito

Avancées de la recherche

10 Physique nucléaire fondamentale - Quelles missions ? Quelles perspectives ?
Jérôme Margueron, Javier Castillo, Amel Korichi, Carlos Munoz Camacho et David Verney

14 ThomX : un démonstrateur de source compacte de rayons X
Christelle Bruni, Marie Jacquet, Alexandre Loulergue, Hugues Monard et Fabian Zomer

21 Les dichalcogénures de métaux de transition, nouveaux matériaux bidimensionnels
Xavier Marie, Bernhard Urbaszek et Thierry Amand

26 Rupture et délamination de films minces
Joël Marthelot, Benoît Roman et José Bico

Histoire des sciences

30 Qui a découvert la fission nucléaire ?
Jacques Treiner

Science et société

36 Le concours « D'Ampère à Volta »
Cédric Détré

Au sein et autour de la SFP

37 2016 : 50e anniversaire du prix Nobel de physique décerné à Alfred Kastler

38 Prix scientifiques

40 Olympiades de Physique France – XXIIIe concours national

41 Loïc Auvray (1956-2016), l'un des fondateurs du concours des Olympiades

42 John Werner Cahn (1928-2016), théoricien majeur de la science des matériaux
Denis Gratias

42 Jean-Pierre Cotton (1941-2016), physicien au service des polymères
Annie Brûlet, Mohamed Daoud et Bernard Farnoux

43 Catherine Crouzet : la passion de l'électronique
Mathieu Grousson

Reflets de la physique et ses lecteurs

44 Tribune libre : L'innovation et la course à la nouveauté dans la recherche
Yves Bréchet

46 Notes de lecture

Comité de rédaction
Président : Stefano PANEBIANCO
Membres : Michel BELAKHOVSKY - Jean-Marie BROM - Irène BUVAT - David CÉBRON - Françoise COMBES - Jean-Michel COURTY - Nicolas DELERUE - Olivier DULIEU - Titaina GIBERT - François GRANER - Étienne GUYON - Jean-Pierre HULIN - Agnès JACQUESY - Michèle LEDUC - Arnaud LE PADELLEC - Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS - Laurence RAMOS - Sophie REMY - Christiane VILAIN - Paul VOISIN

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

Directeur de la publication : Jean-Jacques BÉNATTAR
Rédacteur en chef : Charles de NOVION
Conception : Laetitia MORIN - Keith VILLEMEUR
Réalisation graphique : Laetitia MORIN - laetitiamorin-graphiste.fr
Suivi de rédaction : Agathe CYMER
Service publicité : Jessica EKON - publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 3e trimestre 2016 - ISSN : 1953-793X – e-ISSN : 2102-6777 -
© SFP - Édité à 3200 exemplaires

Imprimerie Jouve
11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cédex 01
- Tél. : 01 44 76 54 40
Société Française de Physique
33, rue Croulebarbe, 75013 Paris
- Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19
e-mail : contact@sfpnet.fr - Serveur : www.sfpnet.fr
SFP Bulletin, Institut Henri-Poincaré,
11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris
- e-mail : sfp-bulletin@ihp.fr
Serveur : www.refletsdelaphysique.fr

Les neutrinos n'ont pas livré tous leurs secrets

Stéphane Lavignac[1] (stephane.lavignac@cea.fr) et **Marco Zito**[2] (marco.zito@cea.fr)
(1) Institut de physique théorique, Orme des Merisiers, CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
(2) Service de physique des particules, DSM/IRFU, CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Le prix Nobel de physique 2015 récompense plusieurs décennies de recherches ayant abouti à la découverte des oscillations des neutrinos, propriété que ces particules ont de se transformer les unes dans les autres au cours de leur mouvement. Cette particularité implique qu'ils ont une masse, dont l'origine, à ce jour inconnue, pourrait dépasser le cadre du Modèle Standard, la théorie de référence des particules élémentaires.

De nombreuses autres questions restent par ailleurs en suspens : quelle est l'échelle de masse des neutrinos ? Les antineutrinos oscillent-ils comme les neutrinos ? Le neutrino est-il sa propre antiparticule ? Un vaste programme expérimental vise à répondre à ces questions, et à quelques autres.

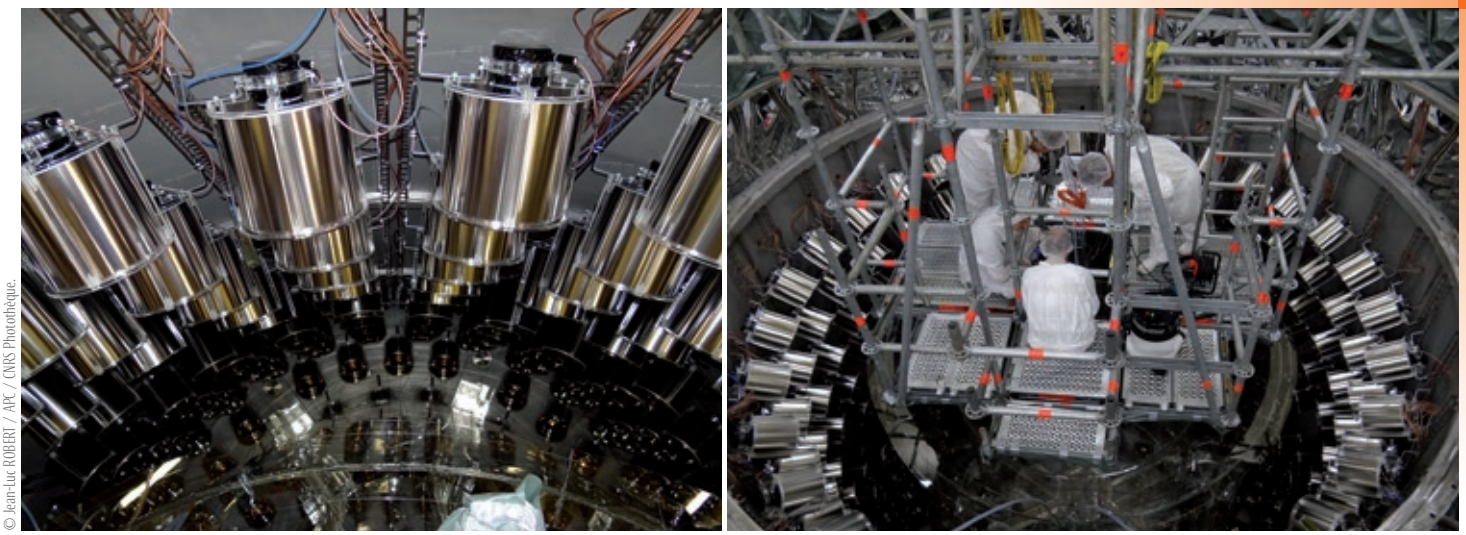
Le neutrino est une particule élémentaire de *spin* ½ (un fermion), dépourvue de charge électrique. Insensible aux interactions électromagnétique et forte, il n'entre pas dans la composition des atomes, contrairement à l'électron et aux quarks, mais est produit dans de nombreuses réactions gouvernées par l'interaction faible. Son existence fut postulée par le physicien autrichien Wolfgang Pauli en 1930. Elle expliquait le spectre continu des électrons émis par la radioactivité bêta, qui semblait violer le principe de la conservation de l'énergie. Alors que dans les autres transitions nucléaires, l'énergie de la particule émise (photon ou particule alpha) prend une valeur bien déterminée, correspondant à la différence Q entre l'énergie de masse de l'état initial et celle de l'état final, l'énergie des électrons bêta peut prendre n'importe quelle valeur entre zéro et Q. Pauli suggéra donc que dans la désintégration bêta, l'électron est accompagné par une autre particule – légère et n'interagissant quasiment pas avec la matière – avec laquelle il partage l'énergie émise dans la réaction : le neutrino. Ce dernier était alors considéré comme de masse nulle, ce qui était cohérent avec toutes les observations expérimentales avant la découverte des oscillations.

La détection des neutrinos restera impossible pendant plusieurs décennies. Deux avancées majeures permettront de les faire passer d'une hypothèse à une réalité observée et mesurable.

La première est due à Enrico Fermi qui proposa, en 1934, la première théorie de la désintégration bêta, basée sur une nouvelle force fondamentale, l'interaction faible. Grâce à cette théorie, les physiciens purent calculer le taux d'interaction des neutrinos avec la matière. Ce dernier est extraordinairement faible, inférieur, pour un neutrino d'un gigaélectron-volt (1 GeV = 10^9 eV), de quinze ordres de grandeur à celui d'un photon de même énergie.

La deuxième avancée est d'ordre expérimental. Depuis 1942, les physiciens savent construire des réacteurs nucléaires. Dans le cœur de ceux-ci, les noyaux issus de la fission de l'uranium et du plutonium, très riches en neutrons, subissent une série de désintégrations bêta, produisant d'énormes quantités d'antineutrinos (environ 5 10^{20} par seconde pour une centrale d'un gigawatt). C'est donc auprès d'un réacteur qu'aura lieu la première expérience qui détectera des neutrinos (en réalité, comme on le saura plus tard, des antineutrinos électroniques $\bar{\nu}_e$), sur le site de Savannah River aux USA, en 1956. Cette découverte vaudra le prix Nobel de physique à Frederick Reines en 1995. Ayant ainsi établi l'existence de cette particule, les physiciens se tourneront tout naturellement vers l'étude d'autres sources intenses de neutrinos, à commencer par le Soleil. Non sans avoir auparavant découvert une deuxième espèce de neutrino, le neutrino muonique ν_μ, en 1962 (prix Nobel 1988), puis, en 2000 seulement, une troisième espèce de neutrino, le neutrino tauique ν_τ.

L'observation des neutrinos solaires et atmosphériques (issus des rayons cosmiques) mettra bientôt les physiciens sur la piste des oscillations (encadré 1), dont l'étude se poursuit aujourd'hui dans le cadre de collaborations internationales, au sein desquelles les équipes françaises jouent un rôle actif. La découverte de ces oscillations a des conséquences profondes (voir l'encadré 2, p. 6).



© Jean-Luc ROBERT / APC / CNRS Photothèque.

Photomultiplicateurs tapissant les parois de la cuve du second détecteur de l'expérience Double Chooz, sur le site de la centrale nucléaire de Chooz dans les Ardennes. Cette expérience a pour but de mesurer le troisième angle de mélange des neutrinos, θ_{13} (voir pp. 7-8).

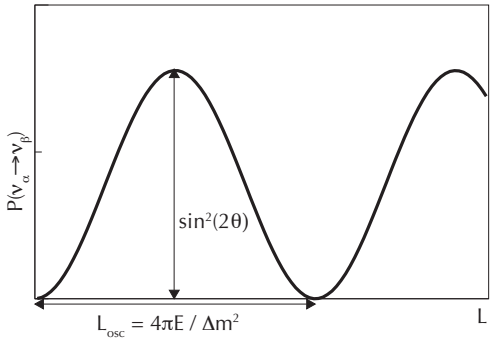
Les oscillations de neutrinos

encadré 1

Le neutrino électronique (ν_e) découvert en 1956 est le partenaire, pour l'interaction faible à l'origine de la désintégration bêta, de l'électron. Mais ce dernier possède des cousins aux propriétés identiques, à l'exception de leur masse : le muon, environ 200 fois plus lourd que l'électron, et le tau, près de 3500 fois plus lourd. Leurs partenaires respectifs sont les neutrinos muonique (ν_μ) et tauique (ν_τ). On appelle *saveur leptonique* le nombre quantique qui les distingue ; ainsi, ν_e, ν_μ et ν_τ sont des états propres de saveur.

Supposons à présent que les neutrinos aient une masse ; en général, les états propres de saveur ne coïncident pas avec les états propres de masse ν_1, ν_2 et ν_3, mais sont des superpositions cohérentes de ces derniers. Dans un cadre simplifié à deux neutrinos, on a par exemple $|\nu_e\rangle = \cos\theta\ |\nu_1\rangle + \sin\theta\ |\nu_2\rangle$, où θ est appelé *angle de mélange*. Les états propres de masse étant également des états propres du Hamiltonien (du moins en l'absence d'interactions, c'est-à-dire dans le vide), la mécanique quantique nous enseigne que chacun d'eux acquiert une phase proportionnelle à son énergie au cours du temps, de sorte qu'un neutrino produit initialement dans l'état $|\nu_e\rangle$ sera décrit par la combinaison $\cos\theta\ e^{-iE_1t/\hbar}\ |\nu_1\rangle + \sin\theta\ e^{-iE_2t/\hbar}\ |\nu_2\rangle$ après avoir parcouru une distance $L \cong ct$. Autrement dit, l'état physique du neutrino change au cours de son mouvement. Il est donc possible de le détecter dans une saveur différente de celle dans laquelle il a été produit : c'est le phénomène d'*oscillation*. La probabilité qu'un neutrino de saveur α ait oscillé en une autre saveur β après avoir parcouru une distance L est donnée par $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m^2\ L/4E)$, où $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ est la différence des carrés des masses des états propres de masse et E est l'énergie du neutrino. L'amplitude des oscillations est donc déterminée par l'angle de mélange, tandis que la longueur d'oscillation est proportionnelle au rapport $E/\Delta m^2$ (fig. E1). On notera que les oscillations ne dépendent pas directement des masses des neutrinos, mais seulement de la différence de leurs carrés.

Par ailleurs, les oscillations des neutrinos sont un exemple remarquable de conservation des propriétés de cohérence quantique sur des distances macroscopiques, puisqu'elles ont été observées pour des neutrinos ayant traversé la Terre (voir « La découverte des oscillations des neutrinos atmosphériques », p. 6).



E1. Probabilité d'oscillation en fonction de la distance L parcourue par le neutrino.

Les déficits des neutrinos solaires et atmosphériques

Les neutrinos solaires sont des neutrinos électroniques produits dans les réactions thermonucléaires à l'origine de l'énergie du Soleil, la majeure partie d'entre eux provenant de la fusion de deux protons en deutérium ($p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$). Leur spectre, qui s'étend de 0,1 MeV à 20 MeV environ, est prédit par les modèles solaires. L'expérience menée par Raymond Davis (prix Nobel 2002) dans la mine de Homestake, fut la première, dès la fin des années 1960, à détecter les neutrinos solaires. Cette expérience, qui utilisait pour cela la réaction $\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow {}^{37}Ar + e^-$, observa un tiers seulement des neutrinos électroniques prédits. Au cours des années 1990, d'autres expériences confirmèrent ce qui fut bientôt connu sous le nom de déficit ou problème des neutrinos solaires. GALLEX (en Italie) et SAGE (dans le Caucase russe), expériences souterraines utilisant la transition gallium-germanium $\nu_e + {}^{71}Ga \rightarrow {}^{71}Ge + e^-$, observèrent un déficit sur une plus grande partie du spectre des neutrinos solaires, grâce à un seuil de détection plus bas que l'expérience de Davis. Au Japon, Kamiokande et Super-Kamiokande utilisèrent une autre méthode de mesure, consistant à détecter la lumière Tcherenkov émise dans un grand volume d'eau par les électrons accélérés par leurs collisions avec des neutrinos solaires de haute énergie (diffusion élastique $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$). Le déficit des neutrinos solaires était désormais bien établi, mais la preuve expérimentale qu'il était dû à des oscillations, comme le théoricien Bruno Pontecorvo l'avait suggéré dès 1968, manquait toujours. Il fallut attendre pour

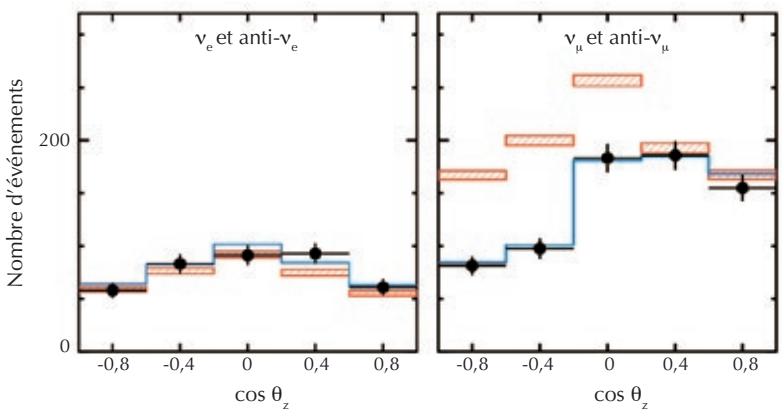
›››

›››

cela les résultats décisifs de l'expérience SNO (Sudbury Neutrino Observatory) au Canada, en 2001-2002.

Entretemps, une autre anomalie était apparue lors de l'étude des neutrinos produits par les rayons cosmiques, ces particules de haute énergie en provenance du cosmos, constituées en majorité de protons. Leurs interactions avec les noyaux atomiques de l'atmosphère produisent des gerbes de particules, notamment des pions $\pi^{\pm}$, qui se désintègrent selon les réactions $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}$ suivies de $\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e + \nu_{\mu}$. Ces neutrinos, dits *atmosphériques*, dont l'énergie s'étend de quelques centaines de MeV jusqu'à des dizaines de GeV ou plus, peuvent traverser la Terre de part en part. À partir des années 1960, les premières expériences souterraines commencent à les détecter, et certaines d'entre elles mesurent un flux de neutrinos muoniques inférieur aux prédictions.

Les expériences SNO et Super-Kamiokande allaient résoudre ces deux énigmes en prouvant qu'elles sont dues au phénomène d'*oscillation*, c'est-à-dire à la propriété qu'ont les neutrinos de différentes *saveurs* de se transformer les uns dans les autres au cours de leur mouvement (voir encadré 1).



1. Distribution, en fonction de l'angle zénithal, des événements de neutrinos atmosphériques (de type ν_e à gauche, de type ν_μ à droite) d'énergie supérieure à 1,33 GeV observés par Super-Kamiokande (d'après [1]). Les histogrammes orange représentent les prédictions en l'absence d'oscillations, les bleus représentent les prédictions avec oscillations, tandis que les points noirs correspondent aux données.

La découverte des oscillations des neutrinos atmosphériques

C'est grâce à une nouvelle expérience, Super-Kamiokande, qu'on put véritablement établir l'existence des oscillations des neutrinos atmosphériques. Son détecteur est situé dans la mine de Kamioka, dans les Alpes japonaises. La roche de la montagne, d'une épaisseur de mille mètres, fait écran aux rayons cosmiques et permet de détecter des processus rares comme les interactions des neutrinos.

Ce détecteur est constitué d'une grande cuve de 50 000 tonnes d'eau ultra-pure, observée par près de 11 000 photomultiplicateurs de grande dimension. L'interaction d'un neutrino avec l'eau de la cuve peut produire des particules chargées ultra-relativistes, notamment des électrons ou des muons. Ceux-ci se déplacent à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans l'eau et y produisent de la lumière Tcherenkov, sous la forme d'un cône de lumière autour de leurs trajectoires. Les caractéristiques de ces photons Tcherenkov permettent, entre autres, de mesurer la direction de la particule chargée, d'en estimer l'énergie si elle s'arrête dans le détecteur, et de déterminer s'il s'agit d'un muon ou d'un électron.

Super-Kamiokande permet d'étudier en détail les neutrinos atmosphériques grâce à son grand volume et aux bonnes performances du détecteur.

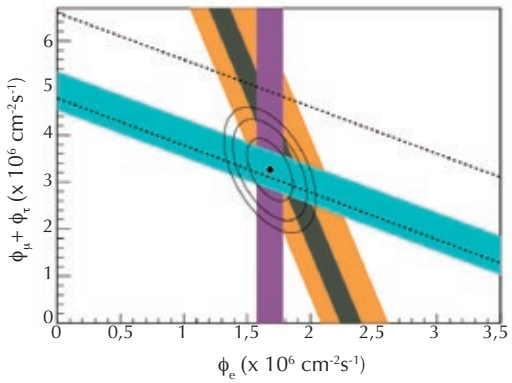
C'est à la conférence Neutrino 1998 que les résultats d'une analyse établissant l'existence des oscillations des neutrinos atmosphériques furent présentés (fig. 1). Si l'on considère la distribution des événements de type muon en fonction de l'angle zénithal θ_z des neutrinos incidents, on observe un déficit très marqué par rapport à la prédiction pour les neutrinos montants ($\cos \theta_z < 0$), mais pas pour les neutrinos descendants ($\cos \theta_z > 0$). Cela s'explique par le fait que la probabilité d'oscillation dépend de la distance. Les neutrinos descendants n'ont parcouru qu'une dizaine de kilomètres avant d'interagir dans le détecteur, tandis que les neutrinos montants ont parcouru

Une découverte aux conséquences profondes

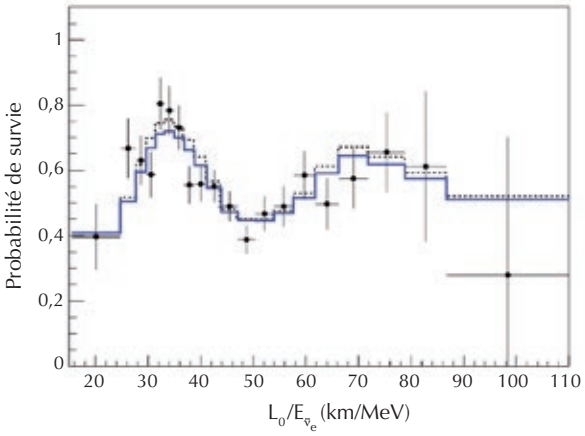
encadré 2

Le fait que les neutrinos oscillent, nous l'avons vu dans l'encadré 1, implique qu'ils ont une masse. Cette observation en apparence anodine est en fait révolutionnaire, le Modèle Standard de la physique des particules postulant que les neutrinos sont de masse nulle.

En quoi les masses des neutrinos seraient-elles différentes de celles des autres particules ? Tout d'abord, elles sont extrêmement faibles, environ 10^6 fois plus petites que celle de l'électron. Ensuite, étant électriquement neutre, le neutrino a la possibilité d'être sa propre antiparticule : on parle de *fermion de Majorana*, les autres constituants élémentaires de la matière étant des *fermions de Dirac*. Supposer que les neutrinos sont des fermions de Majorana permet d'expliquer la petitesse de leurs masses, et rend possibles de nouveaux phénomènes associés à la violation du *nombre leptonique*, dont l'origine pourrait se trouver dans une théorie plus fondamentale que le Modèle Standard, valable à haute énergie. Défini comme le nombre quantique égal à +1 pour un neutrino ou un lepton chargé négativement comme l'électron, et à -1 pour leurs antiparticules, le nombre leptonique est accidentellement conservé dans le Modèle Standard, mais violé en présence de neutrinos de Majorana (auxquels on ne peut associer de nombre leptonique, puisqu'ils sont à la fois neutrino et antineutrino). Parmi les conséquences de sa violation figure, outre la double désintégration bêta sans émission de neutrino [2], la possibilité d'expliquer l'origine de l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers par le mécanisme de la *leptogenèse* (voir l'encadré 3, p. 8).



2. Flux de neutrinos muoniques et tauiques ($\phi_\mu + \phi_\tau$) *versus* flux de neutrinos électroniques (ϕ_e) provenant du Soleil (d'après B. Aharmim *et al., Phys. Rev. C* **72** (2005) 055502). Les bandes violette, orange et turquoise correspondent à des combinaisons distinctes de ces flux mesurées par SNO *via* différentes réactions, avec leurs incertitudes expérimentales à 1σ. La bande marron est la mesure de Super-Kamiokande. L'intersection de ces bandes détermine les valeurs observées de ϕ_e et $\phi_\mu + \phi_\tau$, indiquées par le point noir et des ellipses correspondant à différents niveaux de confiance statistique (68%, 95% et 99%). Enfin, la région entre les deux lignes en pointillés est la prédiction du modèle solaire de Bahcall, Serenelli et Basu (2005), qui doit être comparée au flux total $\phi_e + \phi_\mu + \phi_\tau$ mesuré par SNO (bande turquoise).



3. Oscillations de neutrinos issus de réacteurs nucléaires. Fraction d'antineutrinos électroniques observés par l'expérience KamLAND (par rapport au flux attendu en l'absence d'oscillations) en fonction du rapport L_0/E, où L_0 est la distance moyenne parcourue par les $\bar{\nu}_e$ et E leur énergie (d'après A. Gando *et al., Phys. Rev. D* **83** (2011) 052002). Les données et les incertitudes expérimentales sont figurées par les points noirs et les barres horizontales et verticales, tandis que l'histogramme bleu correspond aux valeurs attendues en présence d'oscillations. Le deuxième maximum d'oscillation (creux vers L_0/E = 50 km/MeV) apparaît clairement dans les données.

jusqu'à 12 700 km (le diamètre terrestre). L'interprétation de ces résultats est que les neutrinos muoniques ont oscillé en neutrinos de type tau avec un angle de mélange proche de la valeur maximale π/4, et une longueur d'oscillation de l'ordre du diamètre de la Terre.

La découverte des oscillations des neutrinos solaires

Le grand apport de SNO, détecteur à effet Tcherenkov utilisant de l'eau lourde (D_2O) pour cible, fut de mesurer à la fois le flux total $\phi_e + \phi_\mu + \phi_\tau$ des neutrinos provenant du Soleil[a], grâce à la réaction $\nu + D \rightarrow \nu + p + n$ (à laquelle les trois saveurs de neutrinos contribuent de la même façon), et le flux des neutrinos électroniques ϕ_e, *via* la réaction $\nu_e + D \rightarrow e^- + p + p$. Le flux total mesuré par SNO est en accord avec la prédiction des modèles solaires, alors que le flux des neutrinos électroniques est nettement inférieur, indiquant de façon claire une transformation de ces derniers en neutrinos d'autres saveurs, comme on s'y attend en présence d'oscillations[b]. Ces résultats décisifs, illustrés par la figure 2, ont valu le prix Nobel de physique 2015 à Arthur B. McDonald, porte-parole de la collaboration SNO depuis 1990.

Oscillations avec des sources artificielles de neutrinos

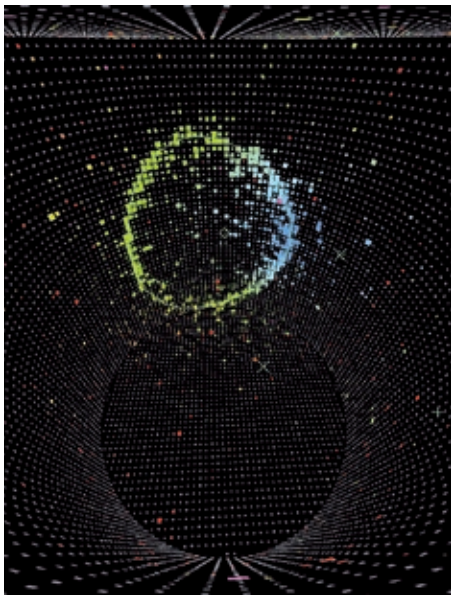
À la suite de SNO et de Super-Kamiokande, une série d'expériences s'est attachée à confirmer les oscillations observées avec des sources artificielles de neutrinos (antineutrinos électroniques issus de réacteurs nucléaires, et faisceaux de neutrinos ou d'antineutrinos muoniques produits par des accélérateurs) et à mesurer précisément les paramètres dont elles dépendent.

Les expériences K2K (au Japon) et MINOS (aux USA) ont confirmé les oscillations observées par Super-Kamiokande avec des faisceaux produits par un accélérateur, dont les caractéristiques sont mieux connues que celles des neutrinos atmosphériques. Ces faisceaux, résultant de la désintégration des pions produits par la collision de protons incidents sur une cible, parcourent ensuite plusieurs centaines de kilomètres dans la croûte terrestre avant d'être détectés. L'expérience OPERA a mis en évidence les oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ en observant la production de neutrinos de type tau dans un faisceau de neutrinos muoniques produit au CERN et dirigé vers le laboratoire souterrain du Gran Sasso, en Italie.

Les résultats de SNO ont été confirmés dès 2003 par l'expérience japonaise KamLAND, qui a observé la disparition d'une fraction des antineutrinos électroniques produits par les centrales nucléaires environnantes. Interprétées en termes d'oscillations, les données de KamLAND, de SNO et des autres expériences « solaires » s'expliquent par des valeurs communes des paramètres Δm^2 et $\sin^2 2\theta$. Par ailleurs, l'origine oscillatoire de la disparition des $\bar{\nu}_e$ est clairement visible dans les résultats de KamLAND (fig. 3).

Plus récemment, un nouveau canal d'oscillation associé à un troisième angle de mélange (appelé θ_{13}) a été mis en évidence. Les premières indications ont été données à l'été 2011 par l'expérience japonaise T2K [3], dans laquelle un faisceau de neutrinos muoniques produits par un accélérateur de protons est dirigé vers le détecteur de Super-Kamiokande, 295 km plus loin. Ces résultats ont été confirmés par une nouvelle génération d'expériences auprès de réacteurs nucléaires (dont Double Chooz en France et Daya Bay en Chine), la première mesure de précision ayant été fournie par Daya Bay. T2K a, par ailleurs,

›››



© T2K.

4. Événement observé par Super-Kamiokande, résultant de l'interaction d'un neutrino électronique du faisceau de l'expérience T2K avec l'eau de la cuve. Chaque point de couleur correspond à la détection de lumière Tcherenkov par un des photomultiplicateurs localisés sur les parois de la cuve, la couleur étant fonction de la quantité de lumière détectée. L'anneau de forme circulaire correspond à la position reconstruite du cône de lumière Tcherenkov.

›››

été la première expérience à détecter directement un changement de saveur de neutrino, en observant la transformation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (fig. 4).

L'ensemble de ces données expérimentales est parfaitement décrit dans le cadre des oscillations à trois saveurs, qui fait intervenir les deux différences de masses au carré $\Delta m^2_{21} = m_2^2 - m_1^2$ et $\Delta m^2_{32} = m_3^2 - m_2^2$, trois angles de mélange θ_{12}, θ_{23} et θ_{13}, et une phase violant la symétrie de charge-parité[(c)] CP. Rappelons que les oscillations ne déterminent pas les masses individuelles des neutrinos (leur *échelle de masse absolue*), mais seulement les différences de leurs carrés.

Questions ouvertes et nouveaux défis expérimentaux

L'étude des oscillations des neutrinos entre désormais dans une nouvelle phase, celle des mesures de précision. Pour ce faire, de nouveaux détecteurs de grande taille sont à l'étude ou en construction : détecteurs Tcherenkov à eau, chambres à projection temporelle avec de l'argon liquide (qui permettent de mesurer toutes les propriétés d'une interaction de neutrino) ou scintillateurs liquides. Ces nouveaux projets permettront de déterminer le spectre de masse des neutrinos (c'est-à-dire l'ordonnancement de leurs masses, seules les différences de leurs carrés étant connues) et de rechercher une éventuelle violation de la symétrie CP dans les oscillations (voir l'encadré 3). Pour le premier point, des approches alternatives existent, fondées sur l'étude de précision des oscillations des antineutrinos émis par des centrales nucléaires, ou sur celles des neutrinos atmosphériques.

D'autres questions fondamentales sont abordées par des expériences ne faisant pas appel aux oscillations. L'échelle absolue de la masse des neutrinos pourrait être déterminée par les observations cosmologiques (la limite supérieure actuelle sur la somme des masses, due au satellite Planck, est 0,23 eV) ou par l'étude du spectre des électrons dans la désintégration bêta. La nature du neutrino, fermion de Dirac ou de Majorana, est explorée par la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrino $(Z, A) \rightarrow (Z+2, A) + 2\,e^-$. Ce processus viole le nombre leptonique et n'est possible que pour des neutrinos de Majorana.

Enfin, certaines anomalies expérimentales restant à confirmer suggèrent l'existence d'un nouveau type de neutrino, des *neutrinos stériles*, ainsi dénommés parce qu'ils ne sont pas sensibles à l'interaction faible (ils ne seraient donc sensibles qu'à la gravité). Cette hypothèse sera testée prochainement par des expériences auprès de réacteurs nucléaires.

Objet d'étude, le neutrino est également une excellente sonde astrophysique. Son très faible taux d'interaction avec la matière en fait un messager de choix pour nous renseigner sur des phénomènes très lointains ou qui se produisent dans des milieux très denses. Ainsi, l'observation des neutrinos solaires a permis de confirmer notre compréhension de ce qui se passe au centre du Soleil. L'observation des neutrinos de la supernova 1987A a inauguré l'astronomie des neutrinos. Récemment, l'expérience IceCube (télescope à neutrinos enfoui dans la glace de l'Antarctique) a observé des neutrinos d'énergie supérieure au PeV (10^{15} eV), dont l'origine n'a pas encore été identifiée. L'Europe développe de son côté un projet de télescope à neutrinos, KM3NeT (voir la brève, p. 9).

Masses des neutrinos et asymétrie matière-antimatière de l'Univers

encadré 3

L'un des plus grands mystères de la physique et de la cosmologie contemporaine est l'origine de l'asymétrie matière-antimatière, c'est-à-dire du fait que l'Univers est essentiellement composé de baryons (protons et neutrons) et d'électrons, sans présence significative d'antimatière.

En 1967, le physicien soviétique Andreï Sakharov énonça les conditions pour la création dynamique d'une asymétrie baryonique ou *baryogenèse*. Parmi celles-ci figurent l'existence de processus qui ne conservent pas le nombre de baryons, ainsi que la violation de la symétrie CP[(c)], afin que les taux de production des baryons et des antibaryons soient différents. Bien que ces ingrédients soient présents dans le Modèle Standard, ce dernier échoue à engendrer l'asymétrie observée. Dans les années 1980, les physiciens japonais M. Fukugita et T. Yanagida ont proposé un mécanisme alternatif, la *leptogenèse*. Ce scénario fait intervenir des particules très massives, par ailleurs impliquées dans la génération des masses des neutrinos. Produites dans l'univers primordial, elles se désintègrent avec des taux différents en leptons et antileptons. Cette asymétrie leptonique est ensuite convertie en asymétrie baryonique par des processus non perturbatifs du Modèle Standard. S'il n'est guère envisageable de tester directement la leptogenèse, il est possible de vérifier expérimentalement si les conditions nécessaires sont satisfaites : la violation du nombre leptonique, intimement liée à la nature de fermion de Majorana des neutrinos, par l'observation de la double désintégration bêta sans émission de neutrino ; et la violation de la symétrie CP, par la mise en évidence de probabilités différentes pour les oscillations de neutrinos et d'antineutrinos.

C'est à cette dernière tâche que travaillent actuellement les expériences T2K au Japon et NOvA aux États-Unis, avec deux projets d'envergure prévus pour la prochaine décennie, Hyper-Kamiokande et DUNE, qui utiliseront des faisceaux de neutrinos intenses et de grands détecteurs souterrains. Ces derniers constitueront également des observatoires de neutrinos de supernovae et permettront de poursuivre la recherche de la désintégration du proton, qui est prévue par les théories de Grande Unification, dont certaines prédisent par ailleurs l'existence des états lourds nécessaires à la leptogenèse.

Conclusion

La découverte des oscillations des neutrinos a couronné des années d'intenses recherches expérimentales et permis de démontrer que ces particules ont une masse, ouvrant une fenêtre sur d'hypothétiques nouvelles lois physiques, qui pourraient être à l'origine de l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers. Cependant, en dépit de ces succès, les neutrinos n'ont pas encore livré tous leurs secrets. L'origine de leur masse reste inconnue, ainsi que leur nature (sont-ils des fermions de Dirac ou de Majorana ?). Nous ne savons toujours pas si la symétrie CP est violée dans le secteur des leptons, ni s'il existe d'autres espèces de neutrinos. De nombreuses expériences, en cours ou projetées, visent à répondre à ces questions. Elle promettent une belle moisson de résultats dans les années à venir, et, espérons-le, des surprises de taille, comme celles qui jalonnent l'histoire des neutrinos. ▮

(a) Il s'agit en réalité, comme pour l'expérience Super-Kamiokande, de la partie de haute énergie du spectre des neutrinos solaires (la réaction de dissociation du deutérium $\nu + D \rightarrow \nu + p + n$ ayant un seuil en énergie de $E_\nu = 2{,}225$ MeV), c'est-à-dire des neutrinos produits dans le centre du Soleil par la réaction $^8B \rightarrow {}^8Be + e^+ + \nu_e$ (« neutrinos du bore »).

(b) Une description précise des transitions $\nu_e \rightarrow \nu_\mu/\nu_\tau$ à l'intérieur du Soleil nécessite la prise en compte des interactions entre les neutrinos et les électrons, protons et neutrons du milieu. Ces « effets de matière » ont été étudiés par les théoriciens Lincoln Wolfenstein en 1978, et Stanislas Mikheïev et Alekseï Smirnov en 1985-1986.

(c) Une transformation de charge-parité consiste à inverser les coordonnées d'espace d'un système physique (transformation de parité) et à remplacer toutes les particules par leurs antiparticules. Dans le Modèle Standard électrofaible, la symétrie CP n'est violée que par une phase présente dans le secteur des quarks, constituants du proton et du neutron.

Références

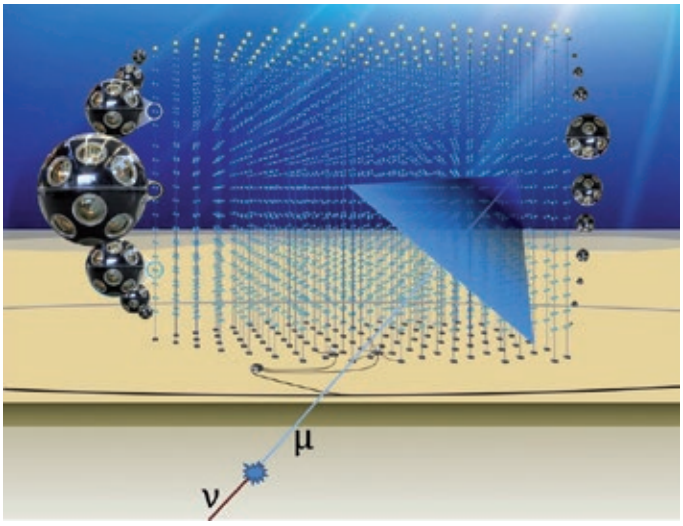
1• "Neutrino oscillations" (Scientific background on the Nobel Prize in Physics 2015, en anglais), www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/advanced-physicsprize2015.pdf .

2• C. Marquet et L. Simard, « Le neutrino est-il identique à son antiparticule ? », *Reflets de la Physique* **24** (2011) 11-14.

3• F. Vannucci, « Quelques faits saillants de la conférence Neutrino 2012 », *Reflets de la Physique* **31** (2012) 20-21.

4• J. Bouchez, « La saga des neutrinos », *Bulletin de la Société Française de Physique* **132** (2001) 9-14.

Le projet de télescope à neutrinos KM3NeT



© KM3NeT Collaboration

Impression d'artiste du télescope à neutrinos KM3NeT ancré sur le fond marin.

KM3NeT (pour Cubic Kilometre Neutrino Telescope) est un projet européen d'observatoire de neutrinos qui doit être installé en mer Méditerranée. Cette installation est conçue pour détecter la très faible lumière générée par les neutrinos ayant traversé la Terre. Deux sites sont en cours de construction, au large de Toulon en France (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss ≡ ORCA) et en Sicile (Astroparticles Research with Cosmics in the Abyss ≡ ARCA), optimisés pour la détection de neutrinos respectivement atmosphériques de basse énergie (3 GeV-100 GeV) et cosmiques de grande énergie (1 TeV- 10 PeV). Un troisième site est prévu en Grèce, au large de Pylos (côte ouest du Péloponnèse). La collaboration KM3NeT implique 42 instituts européens ; pour la France, les participants sont le laboratoire APC (Paris), le CPPM (Marseille), l'IPHC (Strasbourg) et le GRPHE (Université de Haute-Alsace).

ORCA, situé à 2500 m de profondeur et d'un volume d'environ 1 km^3, sera constitué de 115 lignes flexibles ancrées sur le fond marin et espacées de 20 m, portant des détecteurs à effet Tcherenkov distants de 9 m. Chaque capteur du télescope à neutrinos est constitué d'une sphère de verre étanche équipée de 31 photomultiplicateurs (voir la photo de couverture de ce numéro) [1].

Les objectifs majeurs de KM3NeT sont la mesure de la hiérarchie de masse des neutrinos, ainsi que la découverte et l'étude des sources astrophysiques de neutrinos cosmiques. Avec le télescope à neutrinos IceCube, situé en Antartique dans l'hémisphère sud, il sera possible d'explorer l'ensemble du ciel.

Ces installations permanentes en mer profonde offrent d'importantes opportunités de synergie avec les communautés des Sciences de la Terre, de la Mer et de l'Environnement, dans le cadre de l'infrastructure sous-marine MEUST (Mediterranean Eurocentre for Underwater Sciences and Technologies).

Référence

[1] V. Van Elewyck for the MK3NeT Collaboration, "ORCA: measuring the neutrino mass hierarchy with atmospheric neutrinos in the Mediterranean", *Journal of Physics: Conference Series* **598** (2015) 012033.

Site internet

www.km3net.org .

Physique nucléaire fondamentale
Quelles missions ? Quelles perspectives ?

Jérôme Margueron[1] (j.margueron@ipnl.in2p3.fr), **Javier Castillo**[2], **Amel Korichi**[3], **Carlos Munoz Camacho**[4] et **David Verney**[4]
(1) Institut de physique nucléaire de Lyon (IPNL), UMR 5822 CNRS/Université de Lyon, 69622 Villeurbanne Cedex
(2) Service de physique nucléaire, Irfu/DSM, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
(3) CSNSM, UMR 8609 CNRS/Université Paris-Sud, 91405 Orsay Campus
(4) Institut de physique nucléaire d'Orsay (IPNO), UMR 8608 CNRS/Université Paris-Sud, 91406 Orsay Cedex

Compte-rendu des journées de la division Physique nucléaire de la Société Française de Physique, qui se sont tenues les 25 et 26 novembre 2015 à Paris. Ces journées ont été initiées suite aux discussions entre jeunes collègues qui s'interrogent sur l'avenir de la physique fondamentale et, en particulier, sur celui de la physique nucléaire.

La multiplication des appels à projets de physique appliquée, tant en France qu'en Europe, laisse présager une orientation de la recherche qui offrirait de moins en moins d'opportunités pour les investissements à long terme que nécessite la physique fondamentale.

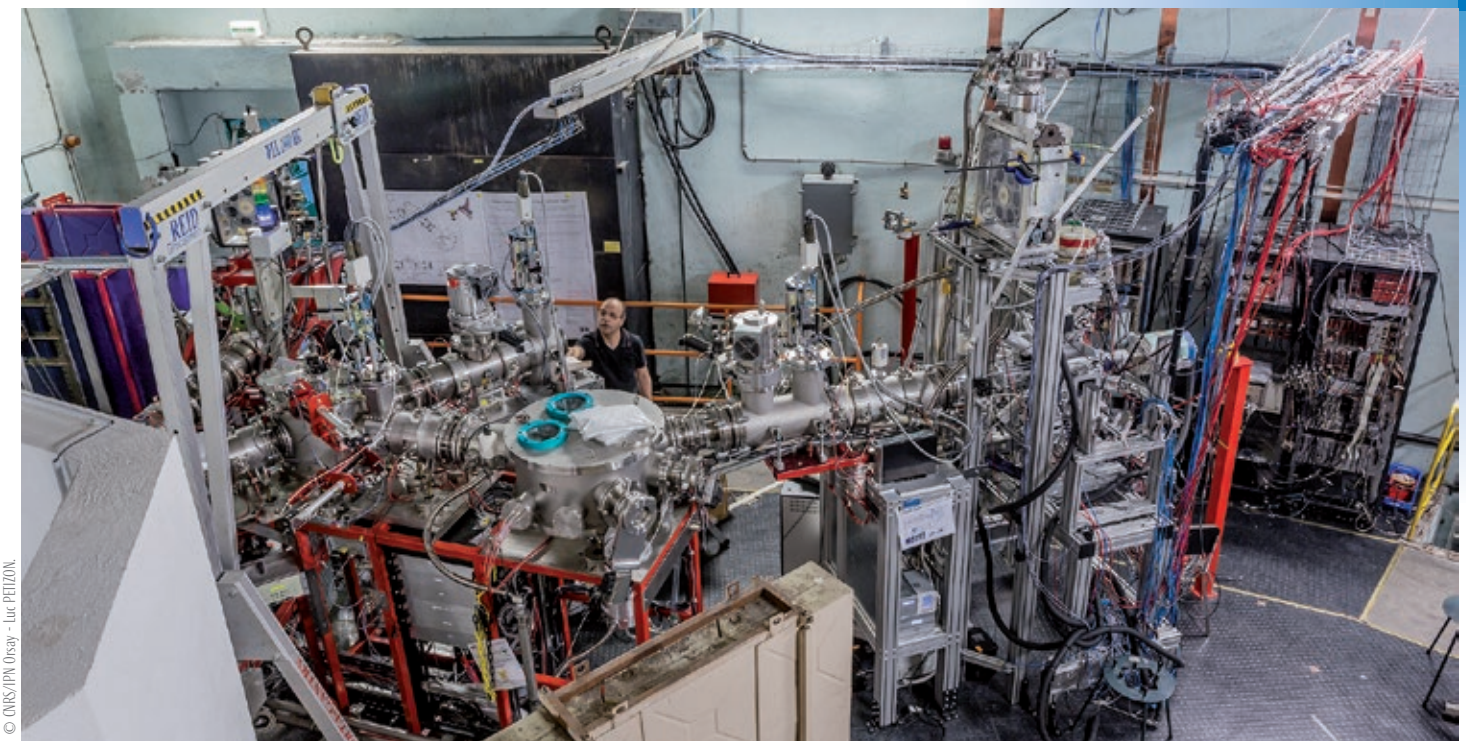
Face à ce questionnement, il nous a semblé nécessaire de mettre en relation la communauté des physiciens nucléaires porteurs de nouveaux projets expérimentaux ambitieux, avec nos tutelles qui soutiennent ces projets et avec les représentants des agences de financement qui les sélectionnent.

Physique des noyaux exotiques : GANIL, SPIRAL2 et ALTO

La physique des noyaux exotiques concerne l'étude des noyaux atomiques et de leur comportement dans des conditions extrêmes de déformation, de *spin*, d'*isospin* et de température. Les noyaux dits « exotiques », car éloignés de la vallée de stabilité, et dont l'immense majorité n'existe pas sur Terre, manifestent de nouvelles propriétés (phénomène de halo[a], peaux de neutrons, nouvelles formes) et nécessitent des instruments spécifiques pour être produits et étudiés sur des temps très courts. Le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), à Caen, est le laboratoire qui a ouvert la voie dans ce domaine, il y a une vingtaine d'années. Jean-Charles Thomas (GANIL) nous a rappelé que des découvertes de tout premier plan y ont été faites comme, par exemple, la découverte de certains noyaux à halo, de systèmes nucléaires « furtifs » (noyaux non liés, mais possédant une résonance) et très riches en neutrons comme ^{7}H, d'un nouveau mode de radioactivité par émission de deux protons, etc.

Depuis 2013, l'installation ALTO (Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay) délivre ses premiers noyaux « exotiques », comme l'a rappelé Georgi Georgiev (CSNSM), coordinateur scientifique d'ALTO. Cette installation (fig. 1) est actuellement la seule au monde équipée d'un dispositif basé sur la photofission pour la synthèse des noyaux radioactifs. ALTO dispose d'une palette de faisceaux unique en France, couvrant les noyaux de masses intermédiaires très riches en neutrons, ce qui lui permet d'offrir un programme scientifique de haute qualité pendant plusieurs années, dans la perspective de la réalisation de la phase 2 de SPIRAL2.

Avec le projet SPIRAL2, le GANIL va étendre significativement ses capacités de production de faisceaux. Hervé Savajols (GANIL), responsable scientifique du projet, a présenté ce nouvel équipement, qui sera réalisé en deux phases. La première phase, presqu'entièrement financée et en cours de construction, permettra d'accéder à un programme scientifique concernant l'étude des noyaux super-lourds, la spectroscopie des noyaux déficients en neutrons, l'étude des interactions fondamentales et l'astrophysique nucléaire ; elle proposera aussi des faisceaux intenses de neutrons, et devrait fonctionner à partir de 2018. La deuxième phase, dont la construction pourrait aboutir à l'horizon 2025, doit permettre la production « supplémentaire » de faisceaux radioactifs qui seront soit postaccélérés puis transportés vers des salles d'expériences actuelles du GANIL, soit directement conduits vers la future installation DESIR (faisceaux



© CNRS/IPN Orsay - Luc PEITZON.

1. L'usine à noyaux « exotiques » ALTO à Orsay. C'est la première installation au monde qui utilise la fission de l'uranium, induite par des photons de hautes énergies, pour la production de noyaux « exotiques ».

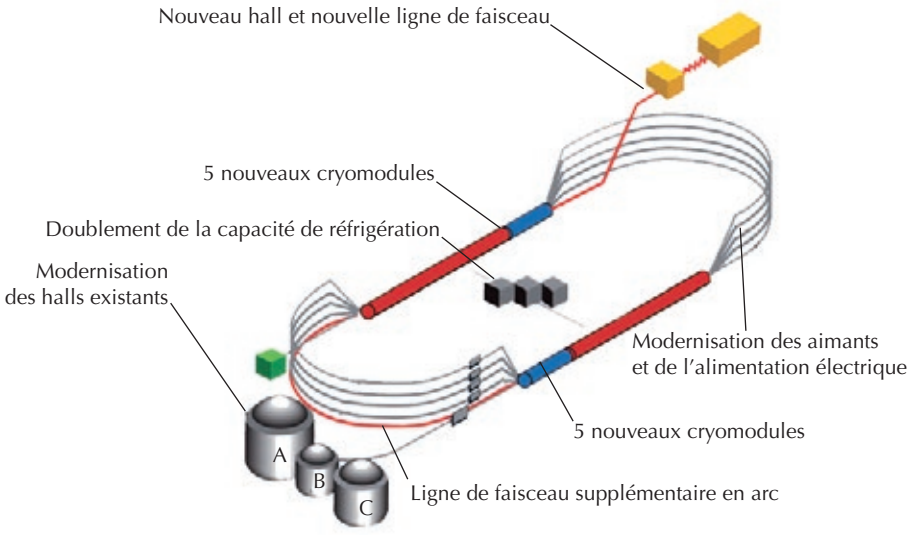
radioactifs de basse énergie). En raison du contexte budgétaire très tendu des organismes de recherche, la construction de cette deuxième phase est actuellement reportée. La communauté a donc engagé une réflexion sur des alternatives à court terme, ainsi que des améliorations à l'horizon 2025 [1].

Physique hadronique et plasma de quarks et de gluons

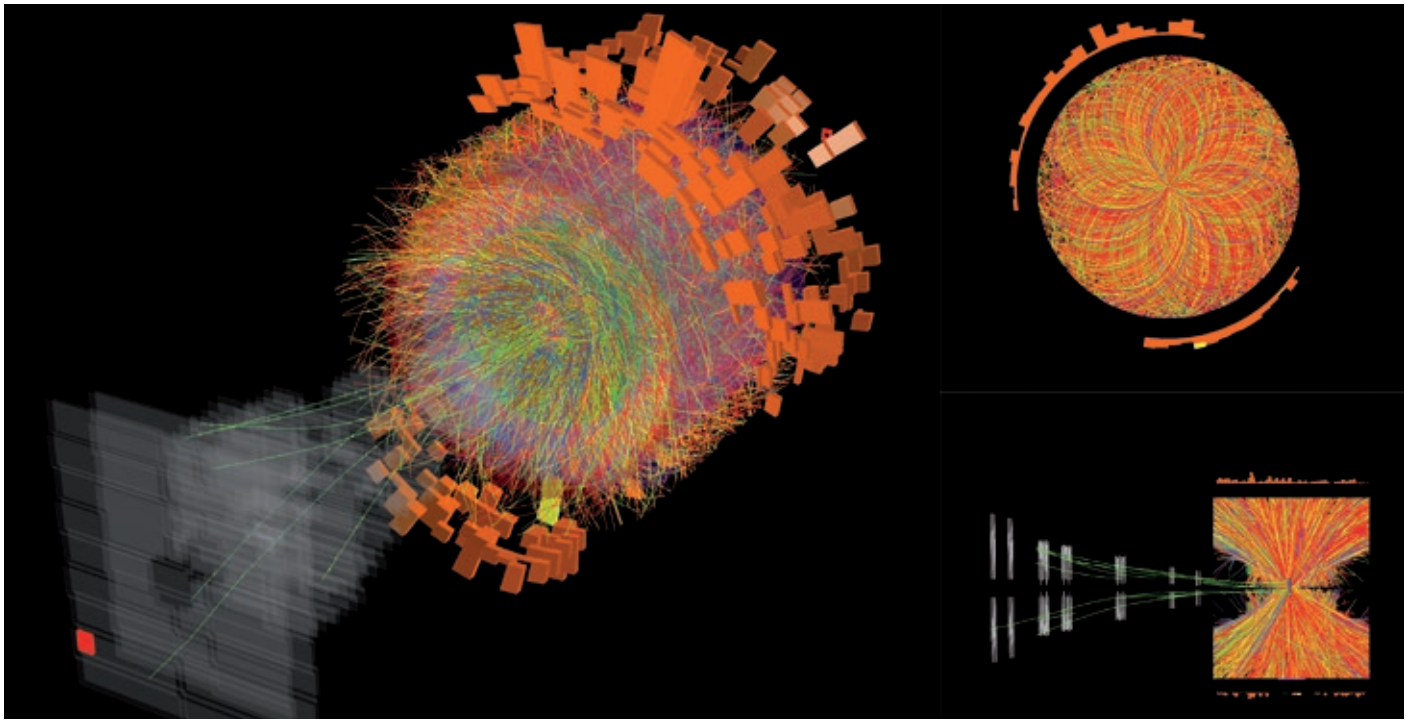
L'objectif de la physique hadronique est de comprendre les propriétés fondamentales de l'interaction forte, émergeant de la théorie chromodynamique quantique (QCD) et de la phénoménologie associée, comme par exemple la formation des mésons et des baryons. L'interaction forte, bien formalisée théoriquement, présente toute sa complexité à basse énergie dans un régime dit non perturbatif. Étudier la structure interne des hadrons avec une sonde électromagnétique est une méthode expérimentale privilégiée, comme l'a montré Fabienne Kunne (Irfu/SPhN, CEA/Saclay). Une grande partie de la communauté française s'y implique sur deux sites expérimentaux : l'expérience COMPASS au CERN [2] et le Jefferson Lab (JLab) aux États-Unis (fig. 2). À plus haute énergie, et à travers des collisions d'ions lourds ultra-relativistes, Yves Schutz (SUBATECH, Nantes) a décrit le nouvel état de la matière prédit par la QCD : le plasma de quarks et de gluons (QGP). L'étude de ses propriétés fait l'objet de l'expérience ALICE au CERN [3] (fig. 3), avec une forte contribution française.

À plus long terme, un nouveau collisionneur électron-ion (EIC) serait la machine la plus adaptée pour accéder à une physique encore mal connue, où les interactions sont dominées par les gluons. Franck Sabatié (Irfu/SPhN) propose que cette nouvelle machine, qui démarrerait aux États-Unis à l'horizon 2025, rassemble les équipes françaises travaillant en ce moment à COMPASS et au JLab. D'autres projets

›››



2. Illustration schématique de l'accélérateur d'électrons CEBAF du Jefferson Lab (Virginie, États-Unis), montrant les composants reliés à la montée en énergie du faisceau à 12 GeV [4].



© CERN.

3. Exemple de collision frontale Pb+Pb pour une énergie de 5,02 TeV dans le centre de masse, mesurée par le détecteur ALICE au CERN. À gauche, une représentation à trois dimensions. À droite, deux projections : en haut, la vue arrière et en bas, la vue de dessous. Les lignes colorées représentent les trajectoires des milliers de particules émises lors de la collision. Par exemple, les trajectoires vertes qu'on retrouve isolées vers l'avant du détecteur sont des muons ; ce sont les seules particules pouvant traverser le spectromètre de part en part, toutes les autres particules étant arrêtées par un absorbeur (indiqué en gris) situé entre l'avant et la partie centrale du détecteur.

›››

ont aussi été évoqués pendant les discussions, comme par exemple PANDA à FAIR[(b)], le projet AFTER de cible fixe au LHC et le projet à long terme FCC d'anneau de 100 km au CERN. De nombreuses voies existent donc pour l'avenir.

Discussions avec les tutelles, le ministère et l'Agence nationale de la recherche (ANR)

La physique nucléaire bénéficie d'un très grand potentiel de découvertes, et de nombreux pays investissent dans ce domaine. Au niveau national, les différentes thématiques de recherche et les moyens humains et financiers qui leur sont attribués ont été présentés par Dominique Guillemaud-Mueller (IN2P3) et Patricia Roussel-Chomaz (CEA/DSM). Le rôle du ministère dans l'élaboration de sa stratégie scientifique pour les très grandes infrastructures de recherche (TGIR) a été présenté par Christian Chardonnet (MENESR). Enfin, la table ronde animée par Navin Alahari (GANIL) et Michel Garçon (Irfu/SPhN) a donné lieu à des échanges plus approfondis. Il en ressort que les communautés liées à la physique du plasma de quarks et de gluons et à la physique hadronique sont bien structurées, et que les finances de ces thématiques ne présentent pas de problèmes insurmontables dans un avenir proche. Cependant, dans les prochaines années un positionnement clair de la France sur les différents projets (EIC, PANDA et AFTER) sera nécessaire pour permettre une implication française de premier plan.

La physique de basse énergie avec le projet SPIRAL2 fait en revanche face à de graves difficultés. En effet, si ce projet est considéré comme la priorité nationale au sein des tutelles, le financement de la phase 2 fait défaut. Dans ce contexte incertain, la participation de partenaires européens et internationaux au financement du projet pourrait contribuer à emporter la décision.

Nous avons aussi discuté avec Patrick Monfray (ANR) du rôle de l'ANR dans le financement de la recherche. Le problème principal réside dans le nombre très faible de projets retenus, environ 1/3 de pré-projets et 1/4 en sélection finale, ce qui fait environ 1/12 à l'arrivée. Ce taux est paradoxalement plus faible que celui des projets retenus par l'ERC au niveau européen. Il résulte d'une forte réduction du budget de l'ANR, 0,5 milliard d'euros cette année (alors qu'il était prévu initialement une augmentation jusqu'à 1,5 milliard d'euros), et de ce que le nombre de projets soumis est en nette croissance depuis une décennie. Tous les « défis » de l'ANR sont affectés de la même façon, et on peut déjà faire le constat d'un énorme gâchis pour l'ensemble de la communauté quant au temps de travail nécessaire pour soumettre des projets à l'ANR. En outre, encourager à déposer le plus grand nombre de projets illustre une fuite en avant qui ne sert pas les intérêts de la recherche.

Projets européens et internationaux : ENSAR2, EURISOL-DF et HPH

La communauté française est fortement impliquée sur d'autres installations européennes et internationales de faisceaux de noyaux exotiques en fonctionnement, comme ISOLDE (CERN), RIBF (RIKEN, Japon) et ISAC (TRIUMF, Vancouver, Canada). Selon Yorick Blumenfeld (IPNO), cette implication internationale est guidée

par l'émergence de nouvelles installations qui sont dans certains domaines de recherches plus performantes que celles dont nous disposons en France. Elle ne remet pas en cause les machines nationales, d'ailleurs exploitées par de nombreux chercheurs étrangers. La contribution française à la recherche internationale s'accompagne aussi d'investissements instrumentaux sur ces installations. Dans la période actuelle, la contribution française à l'international a tendance à augmenter, du fait de la réduction du nombre d'heures de faisceaux disponible au GANIL et du retard de SPIRAL2.

Au niveau européen, Marek Lewitowicz (directeur adjoint du GANIL) a présenté l'activité intégrée ENSAR2 ("European Nuclear Science and Application Research - 2"), qui fait suite à ENSAR (FP7) et est financée dans le cadre du nouveau programme-cadre Horizon 2020 (H2020) à hauteur de 10 M€. Ce projet concerne la physique et l'utilisation des noyaux exotiques. Il est coordonné par le GANIL, et a démarré en mars 2016 pour une durée de 4 ans. Un des objectifs principaux est l'accès des chercheurs aux infrastructures, en organisant la communauté des utilisateurs autour des dix sites retenus comme Transnational Access facilities (TNA), dont font partie SPIRAL2 et ALTO.

En synergie avec ENSAR2, le projet EURISOL-DF (DF pour "distributed facility") consiste à rassembler plusieurs installations européennes au sein d'une coordination unique, ainsi qu'à définir la machine ISOL ("isotope separation on line") de génération ultime en Europe. Ce projet rassemble déjà SPIRAL2/GANIL en France, HIE ISOLDE au CERN, SPES/INFN en Italie, BEC en Belgique et COPIN en Pologne.

Le projet HPH ("Hadron Physics Horizon") est l'analogue d'ENSAR2 pour la physique hadronique. Il n'a pas été retenu lors du dernier appel H2020, mais est autorisé à répondre au nouvel appel en cours. Barbara Erazmus (SUBATECH) a présenté les modifications proposées, qui portent principalement sur la cohérence globale du projet et envisage, par exemple, une réduction de la part prise par l'installation FAIR. Le nouveau projet pourrait aussi s'ouvrir davantage sur le LHC et JLab.

Coordination européenne : NuPECC et H2020

NuPECC ("Nuclear Physics European Collaboration Committee") existe en Europe depuis plus de 25 ans et est financé par l'ESF ("European Science Foundation"). Sa mission consiste à suivre l'évolution de la physique nucléaire en Europe, à favoriser la synergie entre installations de recherche et à émettre des recommandations quant à la structuration de la recherche sur le long terme. Quelques critiques ont émergé durant ces journées quant à la capacité de NuPECC à effectuer des choix stratégiques en Europe, comme le fait NSAC aux États-Unis. Selon Nicolas Alamanos (Irfu), cette demande ne correspond pas à la mission de NuPECC. Le problème viendrait plutôt de la multiplication des agences de financement en Europe qui brouille la capacité de construire des projets cohérents, quand il n'en existe essentiellement que deux aux États-Unis. Par ailleurs, il a été annoncé que NuPECC élaborera en 2016 son nouveau rapport de prospectives à long terme.

Jean-Pierre Caminade (MENESR) nous a rappelé que l'Europe se mobilise depuis les années 1980 pour l'accès transnational aux infrastructures de recherche (IR). Ces infrastructures contribuent à l'excellence scientifique européenne et l'Europe veille, au fur et à mesure de ses programmes cadres, à l'augmentation du nombre de ces utilisateurs. Décidée en 2002, la feuille de route ESFRI des IR européennes pour le 21e siècle illustre la stratégie des gouvernements européens en matière de grandes infrastructures. SPIRAL2, FAIR et ELI(c) en ont fait partie dès la première édition de la liste en 2006. L'inscription à l'ESFRI n'implique aucun financement direct ou récurrent, mais il existe, avec H2020, des appels pour accompagner l'élaboration des projets à divers stades. Le programme H2020 cherche aussi à répondre aux questions portant sur le retour sur investissement des IR, ainsi que sur leur insertion dans une société de la connaissance à logique marchande. Cela appelle à la création de nouveaux emplois dans la recherche pour pouvoir évaluer l'impact socio-économique des IR, chercher de nouveaux vecteurs de financement, proposer des régimes d'exploitation adaptée, assurer la qualité des services rendus par l'IR, défendre la propriété intellectuelle, etc. Est-ce que la recherche fondamentale pourra s'adapter à ce nouveau mode de fonctionnement, ou bien voit-on là les limites du nouveau modèle proposé par H2020 ? Il est encore trop tôt pour le savoir.

Conclusion

En conclusion, ces journées ont alimenté les réflexions de la communauté sur l'évolution de notre discipline et sa coordination autour des TGIR. Elles ont permis une meilleure compréhension des enjeux et des défis qui nous attendent, ainsi que des rôles structurants de la France et de l'Europe. Ces journées ont aussi montré la richesse et la cohésion de notre communauté, preuve de sa grande vitalité et de ses nombreuses perspectives. ▮

L'ensemble des exposés est disponible sur le site de la SFP : www.sfpnet.fr/physique-nucleaire-fondamentale-quelles-missions-quelles-perspectives

(a) Noyaux à halo : type de noyaux atomiques aux limites de la stabilité nucléaire, pour lesquels certains nucléons connaissent une extension spatiale significative de leur fonction d'onde en raison de la faiblesse de leur énergie de liaison au noyau. On les observe surtout pour les neutrons (exemple typique : le lithium 11).

(b) FAIR : "Facility for Antiproton and Ion Research", est un ensemble d'accélérateurs d'antiprotons et d'ions, en construction au GSI à Darmstadt (Allemagne). PANDA, une des expériences de FAIR, est destinée à l'étude de l'interaction nucléaire forte par annihilation d'antiprotons avec des protons ou des ions.

(c) ELI : "Extreme Light Infrastructure". Le projet ELI est une infrastructure de recherche européenne, qui hébergera les lasers les plus intenses au monde. La composante ELI-NP (NP pour "nuclear physics"), en cours de construction à Mägulele, près de Bucarest en Roumanie, comprendra deux lasers pulsés de 10 PW et une source de rayons gamma de très haute intensité, et sera consacrée principalement à la physique nucléaire et à l'étude de l'interaction laser-matière.

Références

1• H. Savajols *et al.*, « SPIRAL2 », à paraître dans *Reflets de la physique*.

2• J.M. Le Goff et F. Kunne, « Proton : COMPASS à la recherche du *spin* manquant », *Reflets de la physique* **23** (2011) 14-18.

3• P. Crochet, « Collisions d'ions lourds avec ALICE au LHC : les trois premières années », *Reflets de la physique* **39** (2014) 4-9.

4• R.D. McKeown, "Overview of nuclear physics at Jefferson Lab", arXiv:1303.6622 [phys.acc-ph] (2013).

ThomX : un démonstrateur de source compacte de rayons X

Christelle Bruni[1], **Marie Jacquet**[1], **Alexandre Loulergue**[2], **Hugues Monard**[1] (monard@lal.in2p3.fr) et **Fabian Zomer**[1]
(1) Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Université Paris-Sud et IN2P3/CNRS, 91898 Orsay Cedex
(2) Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, Saint-Aubin, BP 48, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex

La montée en puissance des lasers et l'accroissement de la finesse des cavités optiques permettent aujourd'hui le développement de sources de rayons X fondées sur la diffusion Compton inverse. Ces sources compactes fourniront des faisceaux de haute intensité, accordables en énergie dans la gamme 20-100 keV, utilisables dans divers domaines : biomédecine, préservation de l'héritage culturel, science des matériaux notamment.

Elles fonctionneront dans un environnement d'exploitation plus facile d'accès.
Des méthodes expérimentales utilisées aujourd'hui uniquement auprès des sources de rayonnement synchrotron pourront être adoptées dans le cadre d'un laboratoire, d'un hôpital ou d'un musée.

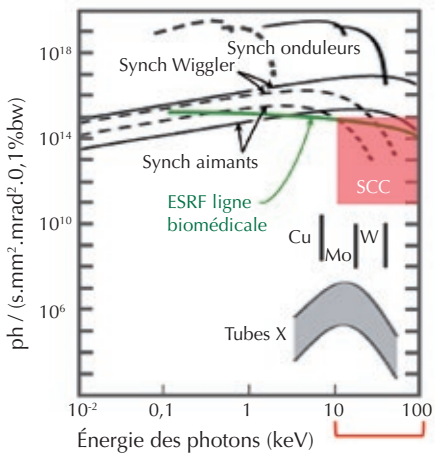
ThomX est le projet français dans ce domaine.

Les rayons X sont des photons d'énergie de ~ 100 eV à ~ 100 keV ou, de façon équivalente, un rayonnement de longueur d'onde comprise entre ~ 10 et ~ 0,01 nm. Ils sont produits de différentes façons (détaillées dans l'encadré 1) et sont utilisés dans de nombreux domaines scientifiques et techniques (voir encadré 2, p. 12). Une source de lumière est principalement caractérisée par sa *brillance* : c'est le nombre de photons émis par seconde, par unité d'aire de la source, par unité d'angle solide et dans une largeur de bande d'énergie (bw) de 0,1%. La brillance quantifie l'intensité d'une source, en tenant compte de sa pureté spectrale et de son ouverture angulaire.

Les plus performantes des sources conventionnelles et compactes ont une brillance de 10^8-10^{10} ph/s/mm^2/mrad^2/0,1%bw, à une énergie de rayons X fixe et limitée aux pics de fluorescence de l'anode ; elles ne dépassent pas 10^4 ph/s/mm^2/mrad^2/0,1%bw au-dessus de 60 keV (fig. 1) et, pour une large classe d'applications, le trop faible flux nécessite un temps d'exposition prohibitif.

Les sources de rayonnement synchrotron sont les plus performantes en termes de brillance [1] ; elles peuvent fournir jusqu'à 10^{21} ph/s/mm^2/mrad^2/0,1%bw (fig. 1) et sont actuellement les seules machines disponibles pour réaliser les analyses et les recherches les plus ambitieuses nécessitant des X dans la gamme 10-100 keV. Mais les synchrotrons sont de grandes installations dont l'accès est limité (compte tenu du grand nombre d'utilisateurs potentiels), et qui présentent de fortes contraintes d'utilisation (comme, par exemple, le coût et/ou le danger liés à la nécessité de transporter une œuvre d'art ou des cristaux refroidis à l'azote liquide).

Les sources Compton compactes (SCC) sont des machines de taille assez modeste (~ 100 m^2) qui visent une forte brillance



1. Brillances typiques des différentes sources de rayons X : synchrotrons (la ligne biomédicale de l'ESRF est en vert), sources conventionnelles (tubes X à anodes de Cu, Mo, W) et projets de sources Compton compactes (SCC, en rose).

(~ 10^{11}-10^{12} ph/s/mm^2/mrad^2/0,1%bw et jusqu'à 10^{15} pour les projets utilisant un accélérateur linéaire supraconducteur), accordables en énergie dans la gamme 20-100 keV. De nombreuses expériences effectuées aujourd'hui uniquement auprès de synchrotrons pourront ainsi être réalisées au sein d'un laboratoire, d'un musée ou d'un hôpital.

Sources Compton compactes

Dans une diffusion Compton inverse (fig. 2), un électron d'énergie E_e cède une fraction de son énergie à un photon de faible énergie E_L qui, dans le référentiel du laboratoire, est rétrodiffusé avec l'énergie :

$$E_X = 2\,\gamma^2\,E_L\,(1+\cos\theta_c)\,/\,(1+\gamma^2\theta^2),$$
$$(\gamma >> 1 \text{ et } E_L << m_e c^2) \qquad (1),$$

où $\gamma = E_e/m_e c^2$ est le facteur de Lorentz de l'électron, m_e sa masse, θ_c et θ sont respectivement l'angle d'incidence et l'angle de diffusion par rapport à la direction de l'électron incident.

Affiche de la conférence du 23 juin 2016 où ont été présentés l'état d'avancement et les projets scientifiques des instruments ThomX et Andromède, qui sont en cours d'installation dans l'« Igloo » de l'Université d'Orsay et qui constitueront le centre pluridisciplinaire IGLEX.

L'équation (1) implique une dépendance univoque entre l'énergie E_X d'un photon rétrodiffusé et son angle de diffusion θ : les rayons X présentent une distribution en forme de cônes concentriques, où l'énergie diminue lorsqu'on s'éloigne du centre. Ceux produits vers l'avant (θ = 0) ont donc le maximum d'énergie. Ainsi, par un simple diaphragme placé sur l'axe du cône Compton, une bande d'énergie peut être sélectionnée. La figure 3 illustre cette corrélation.

Avec les progrès des lasers, des cavités optiques et des accélérateurs, il est maintenant possible de produire des flux de rayons X supérieurs à 10^{12} ph/s à condition que la fréquence de répétition f_{rep} soit suffisamment élevée, c'est-à-dire dans la gamme 10-100 MHz. Donnons des ordres de grandeur : 10^{13} ph/s sont obtenus pour f_{rep} = 20 MHz, un paquet d'électrons de 1 nC, un paquet de photons de 10 mJ, et une taille transverse des paquets d'électrons et de photons au point d'interaction (IP) de l'ordre de 40 µm.

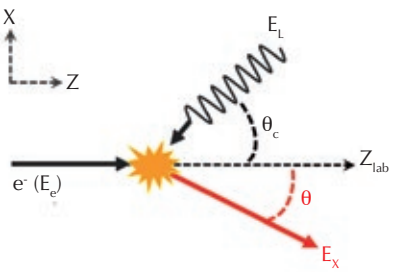
›››

Génération des rayons X

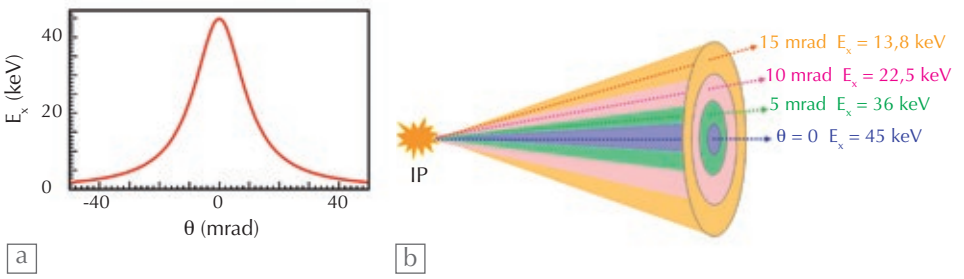
encadré 1

Les rayons X dans la gamme d'énergie 100 eV à 10 keV sont qualifiés de « mous », ceux de haute énergie (~ 10 à 100 keV) sont dits « durs ». Ils peuvent être générés de trois façons différentes :

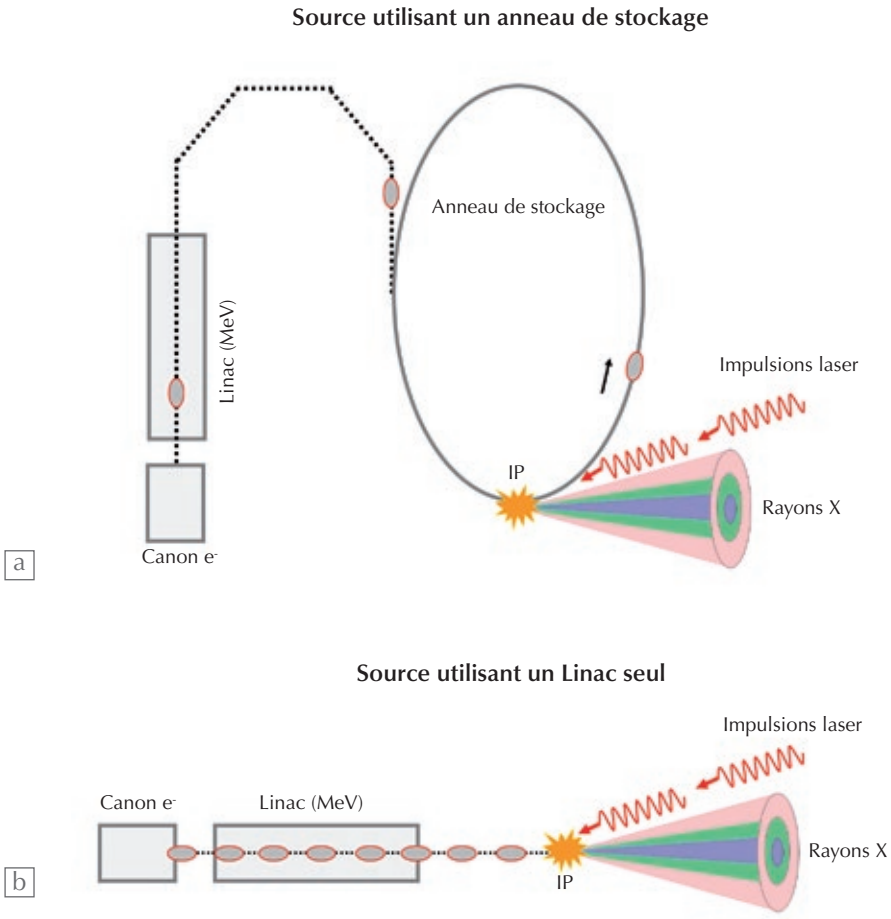
- Les « tubes à rayons X » sont des *sources conventionnelles,* où des électrons accélérés par une différence de potentiel de ~ 10 à 150 kV frappent une anode métallique (en tungstène, cuivre ou molybdène). Du freinage des électrons résulte un spectre continu de photons jusqu'aux rayons X durs, auquel se superposent des raies de fluorescence spécifiques de l'anode utilisée. Le freinage des électrons produit un dégagement important de chaleur, qui limite le flux de ce type de source.
- En stockant des électrons dans un accélérateur circulaire, la courbure des orbites entraîne un rayonnement dit *synchrotron*. Des électrons de quelques GeV émettent des photons dans le domaine des X. Les sources de rayonnement de troisième génération (SOLEIL, ESRF...) utilisent principalement le rayonnement produit par des éléments spécifiques appelés *onduleurs*.
- Lorsqu'on envoie un faisceau laser classique (photons de ~ 1 eV) sur des électrons ultra-relativistes, ce choc produit des photons rétrodiffusés de haute énergie. C'est l'*effet Compton inverse*. On obtient ainsi des rayons X durs de quelques dizaines de keV, avec un laser à 1 eV et des électrons de quelques dizaines de MeV (c'est-à-dire environ 100 fois moins énergétiques que ceux utilisés pour produire le rayonnement synchrotron). Cette diffusion Compton permet donc de concevoir des sources de rayons X compactes (installations de ~ 100 m^2), qui sont l'objet du présent article.



2. Schéma du processus de diffusion Compton inverse.



3. Répartition en énergie et en angle des photons Compton rétrodiffusés. (a) Énergie des photons Compton en fonction de leur angle de diffusion pour des collisions frontales d'impulsions laser infrarouge de longueur d'onde 1,06 µm (E_L = 1,17 eV) avec des paquets d'électrons de 50 MeV (γ ~100). (b) Illustration schématique des cônes concentriques du faisceau Compton. IP est le point d'interaction électron/photon laser.



4. Schémas de principe des SCC de haut flux avec et sans anneau de stockage, respectivement (a) et (b).
(Linac = accélérateur linéaire).

Utilisation des rayons X

encadré 2

- La gamme de longueurs d'onde des rayons X s'étendant de la dimension d'un atome (~ 0,1 nm) à celle d'une molécule (quelques nm), la *diffraction* des rayons X permet l'étude de la structure de très nombreux composés chimiques et de matériaux totalement ou partiellement cristallisés. Par ailleurs, l'énergie élevée des rayons X conduit à l'ionisation des matériaux irradiés, générant de la *fluorescence* X utilisée pour des analyses chimiques.
- Les X durs traversent facilement la matière peu dense, constituée d'éléments légers (nombre atomique Z faible), tandis qu'ils sont absorbés par la matière dense. Cette propriété permet l'*imagerie par contraste d'absorption* (la radiographie et la tomographie habituelles).
- L'absorption des rayons X par la matière biologique est faible et constitue une limitation de la radiographie. Pour améliorer les images, la réfraction, la diffraction et les interférences de rayons X sont utilisées dans l'*imagerie par contraste de phase*. Une meilleure visibilité des frontières entre des domaines présents dans un échantillon est ainsi obtenue en exploitant la phase de l'onde X. Pour cela, la source doit être transversalement quasi cohérente. Cette technique utilise les différences de phase résultant des variations spatiales de l'indice de réfraction au sein de l'échantillon. Comme le rayonnement se propage au-delà de l'échantillon, les portions de la surface d'onde qui se sont propagées de part et d'autre d'une frontière interne de l'échantillon produisent une série de franges par diffraction de Fresnel.
- La *radiothérapie* est une autre grande utilisation du rayonnement X. Les cellules tumorales se divisant plus rapidement que les cellules saines, sont plus sensibles aux rayonnements ionisants, et il est possible d'éliminer une tumeur en la soumettant à une forte dose de rayonnement.

›››

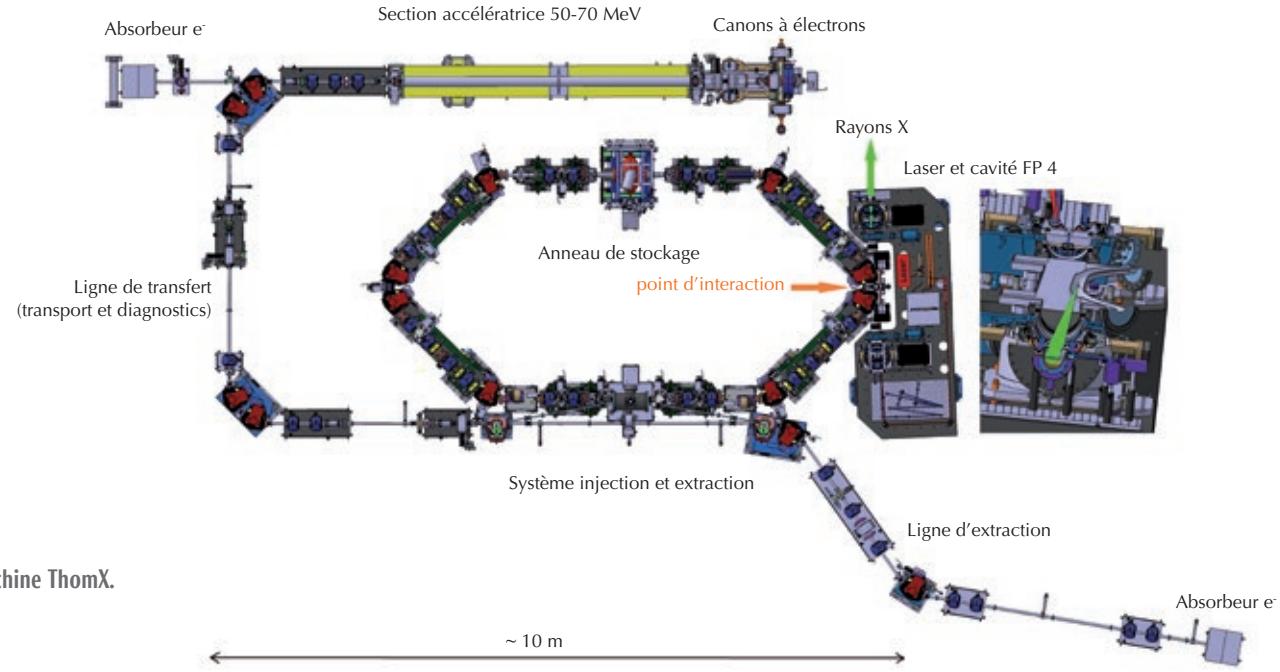
Deux conceptions de machines fondées sur la rétrodiffusion Compton permettent d'atteindre un taux de répétition élevé, selon que les photons laser entrent en collision avec des électrons provenant d'un petit anneau de stockage d'une dizaine de mètres de périmètre (fig. 4a), ou avec ceux d'un accélérateur linéaire (Linac) supraconducteur (fig. 4b) – l'une et l'autre présentant des avantages et des difficultés techniques spécifiques.

Dans le cas d'un anneau de stockage, f_{rep} est déterminée par la fréquence de révolution des électrons dans l'anneau, permettant d'obtenir une brillance de 10^{11}-10^{12} ph/s/mm^2/mrad^2/0,1%bw (bas du rectangle rose de la figure 1) et un flux de 10^{12}-10^{13} ph/s.

Dans le schéma utilisant un accélérateur linéaire sans anneau de stockage, la fréquence f_{rep} est déterminée par la fréquence de la source d'électrons qui doit nécessairement être un dispositif supraconducteur. Bien que des projets d'injecteur d'électrons de haute performance soient actuellement en développement [2], la technologie supraconductrice dans ce domaine n'est pas encore assez mature pour atteindre à la fois les cadences et le nombre d'électrons requis.

Dans les deux schémas, les impulsions d'un laser de faible puissance moyenne, de fréquence f_{rep}, sont amplifiées puis accumulées et stockées dans une cavité optique du type Fabry-Perot de finesse très élevée. (La finesse est le nombre moyen d'allers-retours qu'effectue une impulsion réfléchie dans la cavité.)

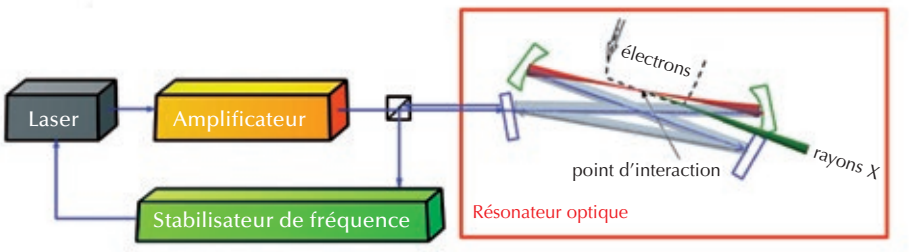
Actuellement, une seule SCC, construite par Lyncean Technologies, fonctionne dans le monde (depuis 2008). Elle utilise un anneau de stockage. La brillance de cette source est de l'ordre de ~ 10^8 ph/s/mm^2/mrad^2/0,1%bw, et ~ 10^{10} ph/s sont produits à une énergie maximum d'une trentaine de keV [3]. Plusieurs sources Compton d'intensité, de brillance et d'énergie de rayons X plus élevées sont en projet dans le monde [4]. Les paquets d'électrons de 0,1-1 nC à un taux de répétition de quelques dizaines de MHz exigés pour produire des flux supérieurs à 10^{12} ph/s ne sont pour l'instant disponibles qu'avec des anneaux de stockage. Parmi ces projets, ThomX [5] est le plus avancé et vise à produire un flux de ~ 10^{12}-10^{13} ph/s, avec une brillance de ~ 10^{11}-10^{12} ph/s/mm^2/mrad^2/0,1%bw.



5. La machine ThomX.

Angle de croisement avec le faisceau lumineux (θ_c)	2 degrés
Fréquence de répétition (f_{rep})	17,8 MHz
Fréquence d'injection	50 Hz
Énergie des électrons (E_e)	50 à 70 MeV
Charge du paquet d'électrons	1 nC
Émittance normalisée au point d'interaction (IP)	4 mm.mrad
Dispersion relative en énergie ($\Delta E_e/E_e$)	0,3 %
Dimensions transverses du paquet d'électrons à l'IP	70 µm
Longueur du paquet d'électrons	15 ps

Tableau 1. Paramètres de l'anneau ThomX.



6. Vue schématique du système optique de ThomX comprenant l'oscillateur laser, l'amplificateur fibré, la cavité constituée de quatre miroirs (résonateur optique) et le système de stabilisation de fréquence.

La machine ThomX

La source et le stockage des électrons

Pour ThomX (fig. 5), des électrons d'une énergie de quelques eV sont d'abord photo-émis par l'impact d'une impulsion laser sur une cathode ; puis ils se propagent dans un accélérateur linéaire qui porte leur énergie à 50-70 MeV. Une ligne de transfert adapte le faisceau d'électrons pour les stocker dans un petit anneau de 18 m de circonférence. Afin de maximiser le flux de rayons X, la charge du paquet est portée à 1 nC ($6{,}2\ 10^9$ électrons) en faisant varier l'énergie laser, et sa taille transverse est réduite au niveau du point d'interaction (tableau 1). À chaque tour d'anneau, l'aire transverse et la longueur du paquet d'électrons augmentent par suite d'un échauffement, dû aux collisions Compton, et de la diffusion coulombienne multiple au sein du paquet. Des systèmes de contre-réaction très rapides sont prévus pour lutter contre les instabilités (d'énergie, de longueur et d'émittance du paquet) causées par des perturbations électromagnétiques dans l'anneau et pouvant conduire à la perte du paquet. Par exemple, la position du faisceau est mesurée à chaque tour et corrigée. Au bout de 20 ms, la structure du paquet est néanmoins dégradée. Il est alors éjecté vers un blindage qui l'absorbe, et est remplacé par un nouveau paquet.

La source de photons laser et leur stockage dans une cavité optique

Le système optique de ThomX est schématisé sur la figure 6. Pour obtenir des

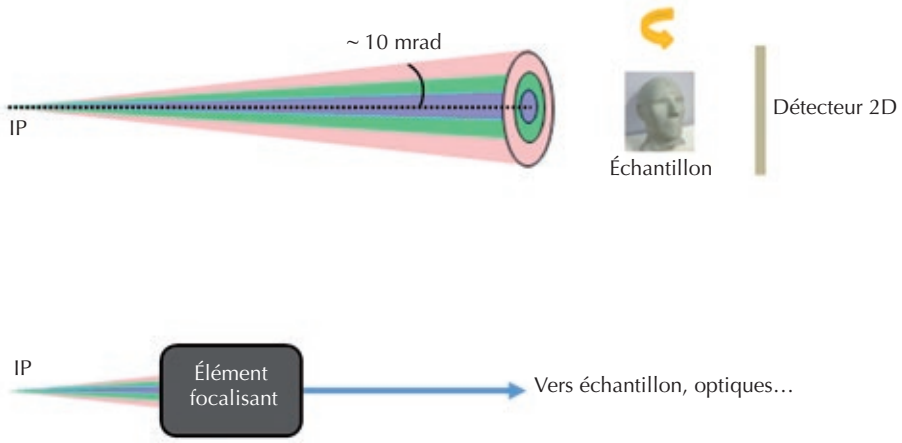
›››

›››

flux de photons exploitables, il faut amplifier la puissance d'un faisceau laser pulsé [6] et « empiler » ses impulsions. Nous avons choisi d'utiliser un résonateur (aussi nommé « cavité optique »), constitué de deux miroirs plans et de deux miroirs sphériques [7] ayant un facteur de gain G ~ 10 000 [8]. Pour atteindre cette grande valeur de G, la fréquence ν du laser doit être stabilisée avec une précision $\Delta\nu/\nu = c/(\pi\nu GL)$, où L/2 est la longueur de la cavité. Pour ThomX, il faudra atteindre $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-12}$. En outre, pour atteindre un flux de rayons X de ~ 10^{13} ph/s, les impulsions laser en amont de la cavité optique doivent être amplifiées avec un système de fibres dopées à l'ytterbium pompées par diodes – développé au CELIA à Bordeaux [7] – qui délivrera une puissance moyenne de 200 W. En positionnant la cavité optique de sorte que le trajet de la lumière croise celui du faisceau d'électrons, nous profiterons de ces deux étages d'amplification pour produire un haut flux de rayons X. Le défi technologique est de faire fonctionner le système optique sans interruption dans l'environnement d'un accélérateur d'électrons [7]. En particulier, nous appliquerons les méthodes de stabilisation de fréquence des oscillateurs laser développés en métrologie en nous assurant que l'accélérateur n'induit aucun bruit de phase ou d'amplitude qui pourrait perturber l'asservissement fréquentiel du faisceau laser. Les paramètres attendus pour le système optique sont présentés dans le tableau 2.

Finesse de la cavité optique	~ 30 000
Longueur d'onde du rayonnement laser	1,032 µm
Énergie de l'impulsion stockée dans le résonateur	3 à 17 mJ
Puissance moyenne stockée dans le résonateur	500 à 1000 kW
Longueur de l'impulsion stockée dans le résonateur	10 ps
Largeur spectrale de l'impulsion stockée dans le résonateur	< 2 nm
Dimensions transverses de l'impulsion stockée dans le résonateur à l'IP	40 µm
Puissance moyenne du faisceau laser après amplification	10 à 200 W
Fréquence de répétition des impulsions laser	35,68 MHz

Tableau 2. Paramètres du système optique (laser et résonateur) de ThomX



7. Deux utilisations d'un faisceau Compton.
En haut, un faisceau étendu et conique (couleur rose). En bas, un faisceau fin et quasi monochromatique.

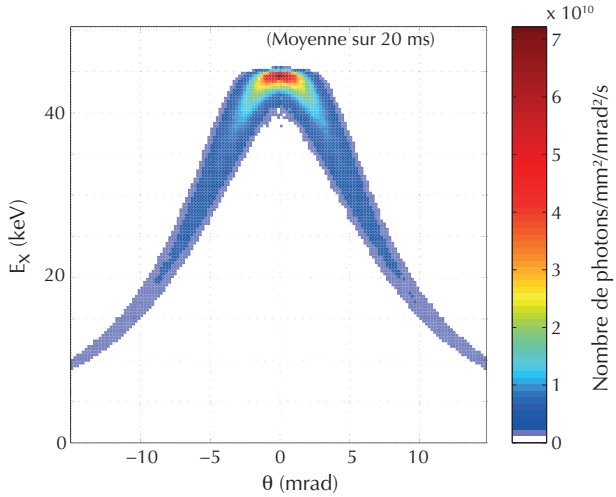
Applications potentielles

Le faisceau de rayons X

Le faisceau de rayons X disponible à la sortie de la cavité Fabry-Perot a une demi-ouverture de 10 mrad.

Dans une première configuration qui exploite la divergence intrinsèque de l'effet Compton (cf. équation (1)), un large faisceau conique est disponible (haut de la figure 7). Un tel faisceau a une largeur spectrale de quelques pourcents à plusieurs dizaines de pourcents selon l'angle solide sélectionné.

Dans une seconde configuration, seule la partie centrale du faisceau est sélectionnée et focalisée par un dispositif, tel un trans-focateur [9], situé le plus près possible du point d'interaction (IP) avant que le faisceau ne diverge trop. Ce faisceau étroit



8. Dépendance en angle et en énergie du flux spectral (code de couleurs) **attendu pour ThomX.**
Simulation réalisée avec les paramètres des tableaux 1 et 2.

(schématisé en bas de la figure 7), quasi-monochromatique, peut ensuite être envoyé dans un dispositif optique supplémentaire (miroir, monochromateur...) avant d'éclairer un échantillon.

Selon les applications, le grand faisceau conique ou, au contraire, le faisceau étroit et quasi monochromatique sera le plus approprié.

Caractérisation et expériences

La caractérisation du faisceau consistera à mesurer son intensité, sa gamme d'énergie, sa distribution spectrale et angulaire, et son degré de cohérence transverse[(a)]. Les flux spectraux seront déterminés à partir du faisceau divergent en mesurant, en un grand nombre de petits angles solides du spectre d'émission, l'énergie moyenne et le flux. Ces mesures permettront de reconstruire le flux dans l'espace énergie-angle d'émission, dont la simulation réalisée avec les paramètres des tableaux 1 et 2 est présentée sur la figure 8. Le degré de cohérence transverse sera déterminé à partir d'expériences à doubles fentes d'Young [10], dans lesquelles l'intensité des rayons X sera enregistrée en fonction de leur direction d'émission.

Les diverses caractéristiques du faisceau de ThomX dans les deux configurations de la figure 7 (divergent ou focalisé), ainsi que les principales applications correspondantes, sont présentées dans le tableau 3.

Les caractéristiques du faisceau focalisé du tableau 3, bien qu'inférieures à celles des synchrotrons, seront suffisantes pour mener à bien toute une série d'expériences dans le domaine de la science des matériaux [5] et dans celui de l'héritage culturel [11], en particulier. Le faisceau Compton conique (divergent) permettra, lui, d'illuminer un échantillon de plusieurs cm^2 sans avoir à le déplacer ce qui, en imagerie et en thérapie, présente un grand avantage sur d'autres sources pour lesquelles il est nécessaire de scanner l'échantillon en le déplaçant (dans les études cliniques réalisées à l'ESRF par exemple, le patient ou l'échantillon doit être déplacé verticalement car la taille verticale du faisceau est d'environ 2 mm). Les flux angulaires et spectraux (voir le tableau 3) permettront de faire toute une série d'études réalisables actuellement uniquement auprès des sources synchrotron. Par exemple, la dose typique délivrée pour une imagerie conventionnelle crânienne sur la ligne biomédicale de l'ESRF (ID17) est de 2,4 $Gy/s/cm^2$, à comparer à 2,0 $Gy/s/cm^2$ attendu avec le faisceau de ThomX [5]. Autre exemple : pour la radiothérapie, les 2 10^{12} ph/s délivrés par ThomX dans un disque de 5 cm de diamètre correspondent à 10^9 $ph/s/mm^2$, du même ordre de grandeur que l'intensité moyenne utilisée dans les essais cliniques de radiothérapie en cours à l'ESRF [12].

Conclusion et planning

La collaboration en charge du projet ThomX est multidisciplinaire. Elle vise à construire un démonstrateur de source X compacte à la pointe de la technologie et à établir ses performances dans le domaine médical, dans l'étude du patrimoine culturel (restauration d'œuvres d'art, contrefaçon, histoire d'une œuvre) et de la science des matériaux, avec des extensions possibles, par exemple dans le domaine de la sécurité (aéroports, douanes...) ou dans l'industrie (identification de défauts de fabrication sans détruire le matériau...).

Les différentes études et simulations sont décrites dans le *Technical Design Report* publié en 2014 [5]. L'intégration de ThomX se fera dans le bâtiment appelé « l'Igloo » sur le campus d'Orsay (voir l'affiche p. 15). Les travaux d'infrastructure du bâtiment, démarrés début 2016, devraient durer un peu moins d'un an. Durant cette période, une intégration partielle sera effectuée (pré-montage et tests des éléments de la machine) en attendant l'intégration finale dans les locaux prévue fin 2016. Après l'installation, la mise en route de ThomX permettra d'obtenir un premier faisceau de rayons X en 2017. ▮

(a) La cohérence transverse d'une source est sa capacité à envoyer des ondes spatialement cohérentes en un point donné.

	Énergie (keV)	ΔE/E	D à 10 m	Flux (ph/s)	Applications
Faisceau divergent					**Imagerie**
	~ 90	30%	10 cm	~ 5 10^{12}	• Conventionnelle
	45 - 80	2,5%	2 - 3 cm	~ 3 10^{11}	• Contrôle de phase
	45 - 90	3%	2,5 - 3,5 cm	~ 4 10^{12}	• Grandissement
	45 - 90	3 - 10%	2 - 7 cm	4 10^{11} - 2 10^{12}	• Renforcement de contours
					Thérapie
	85	10%	5 cm	~ 2 10^{12}	• Radiothérapie/Dosimétrie
	> 80				• Tests d'éléments de Z élevé
	80	0,5%	1 cm	7 10^{10}	• Traitement par activation
Faisceau focalisé	45 - 90	~ 0,1 - 1%	50 µm-1 mm	~ 10^9	**Science des matériaux** • Fluorescence • Diffraction • Spectroscopie XANES

Tableau 3. Principales caractéristiques et applications des faisceaux X issus de ThomX. ΔE/E est la dispersion relative en énergie, D le diamètre du faisceau à 10 m du point d'interaction (IP). Les flux indiqués ont été calculés au niveau de l'échantillon sur la base d'un flux total (avant sélection optique) de 10^{13} ph/s.

Références

1• M.E. Couprie *et al.*, *Reflets de la Physique*, **34-35** (2013) 18-23.
2• A. Arnold *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14** (2011) 024801.
3• M. Bech *et al.*, *J. Sync. Rad.* **16** (2009) 43.
4• M. Jacquet, *Nucl. Instrum. Methods B* **331** (2014) 1.
5• A. Variola *et al.*, *ThomX Technical Design Report* (2014) < in2p3-00971281 >.
6• L. Casano *et al.*, *Laser and Unconv. Opt. Jour.* **55** (1975) 3.
7• J. Bonis *et al.*, *JINST* **7** (2012) P01017.
8• A. Borzsonyi *et al.*, *Appl. Opt.* **52** (2013) 8376.
9• A. Snigirev *et al.*, *Nature* **334** (1996) 49.
10• D. Paterson *et al.*, *Opt. Com.* **195** (2001) 79.
11• P. Walter *et al.*, *C.R. Physique* **10** (2009) 676.
12• M. Jacquet *et al.*, *Phys. Med.* **31** (2015) 596.

Remerciements
Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes engagées sur ThomX, ingénieurs, chercheurs, techniciens et administratifs, et veulent souligner les contributions d'Alessandro Variola (initiateur du projet) et de Jacques Haissinski pour son soutien sans faille. Ce travail bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir (référence ANR-10-EQPX-51), de la région Île-de-France et du CNRS.

Du fer comprimé par laser pour comprendre le champ magnétique des planètes

Extrait de l'actualité scientifique du CNRS (INP/INSU) du 30 juin 2016

Le fer est le principal élément constituant le cœur des planètes rocheuses telle que la Terre. La connaissance de son diagramme de phase dans des conditions extrêmes de température et de pression est nécessaire pour comprendre la formation du champ magnétique terrestre.

Ainsi, depuis plus de vingt ans, de nombreux travaux ont tenté de déterminer la structure cristalline du fer ainsi que sa courbe de fusion à des pressions typiques du cœur terrestre, afin notamment de connaître précisément la température de la frontière entre la graine solide et le noyau externe liquide. Cependant, les résultats de ces études, qui ont en général été réalisées par compression à l'aide d'enclumes à cellules de diamant sur des installations synchrotron, sont en désaccord entre elles. De plus, les pressions et températures atteignables par de telles techniques de compression, dites statiques, sont limitées, et les données sur le diagramme de phase du fer apparaissent aujourd'hui contradictoires dès que la pression dépasse le mégabar.

Afin d'améliorer notre connaissance de ce diagramme de phase tout en ayant accès à des conditions de pression et de température du fer encore plus extrêmes et plus proches des conditions terrestres réelles, une solution consiste à utiliser un autre moyen expérimental, appelé compression dynamique. Dans ce cas, le matériau est à la fois comprimé et chauffé par une onde de choc, qui peut être initiée à l'aide d'un laser de puissance. C'est l'idée qui a été défendue par une équipe composée de chercheurs du LULI et de l'IMPMC, associés à des Japonais et à des Britanniques. Leurs expériences ont été réalisées à la fois sur les installations laser GEKKO XII de l'Université d'Osaka et LULI2000 de l'École polytechnique. Grâce à un dispositif expérimental inédit qui a permis, entre autre, de collecter pour la première fois du signal diffracté par le fer hautement comprimé pendant un temps très court (~ 1 nanoseconde), les chercheurs ont réussi à observer du fer solide dans sa phase hexagonale compacte à des pressions supérieures à 1,7 mégabar et une température de 4150 K dans une région du diagramme de phase encore quasiment inexplorée [1].

Référence

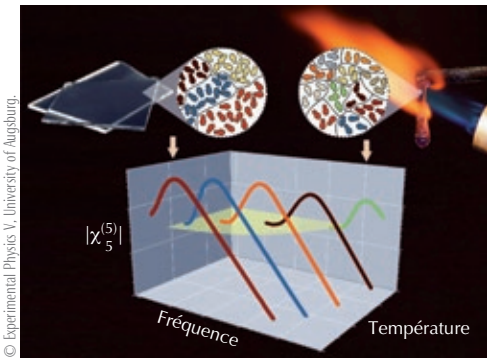
[1] A. Denœud *et al.*, "Dynamic X-ray diffraction observation of shocked solid iron up to 170 GPa", *PNAS* **113** (2016) 7745-7749.

Contact

Adrien Denœud (adrien.denoeud@polytechnique.edu),
Guillaume Morard (guillaume.morard@impmc.jussieu.fr)

L'existence d'un ordre dans les verres enfin démontrée

Extrait du communiqué de presse CEA/CNRS du 14 juin 2016



© Experimental Physics V, University of Augsburg

1. La réponse d'un matériau vitreux à un champ électrique a été mesurée en fonction de la température et de la fréquence du champ. Quand le matériau passe de l'état liquide (en haut à droite) à l'état de verre (en haut à gauche), « l'ordre amorphe » s'instaure sur des tailles de plus en plus grandes.

Existerait-il un « ordre caché » dans les verres ? Ce débat, vieux de plusieurs décennies, est très difficile à trancher expérimentalement. En effet, selon les théoriciens, il faudrait un temps de l'ordre de l'âge de l'Univers pour que cet ordre s'établisse sur un domaine dont la taille serait de dix diamètres moléculaires !

Des physiciens du Service de physique de l'état condensé, de l'Institut de physique théorique, du Laboratoire de physique statistique de l'ENS, de la société CFM et de l'Université d'Augsbourg (Allemagne), ont eu l'idée de contourner cette difficulté en exploitant une propriété très générale des phénomènes « critiques » liés aux transitions de phase. L'émergence d'un ordre lors de la transition, s'accompagne toujours de la divergence de la réponse du matériau à une sollicitation extérieure. C'est donc en mesurant la réponse non linéaire (à l'ordre 3 et 5) d'un matériau vitreux, en fonction de la température et de la fréquence d'un champ électrique appliqué, que les physiciens ont pu mettre en évidence les signes de la transition recherchée vers un ordre qualifié paradoxalement de « structurellement amorphe » [1].

Ils ont aussi démontré que l'ordre qui s'instaure correspond à une optimisation collective de l'énergie, mais sans produire aucune régularité spatiale dans l'arrangement des molécules. Les expériences montrent que la taille des domaines « d'ordre amorphe » augmente au fur et à mesure que l'on baisse la température du liquide et que l'on approche de la « transition vitreuse » (fig. 1).

Ces résultats invalident certaines approches théoriques décrivant les verres comme de simples liquides ultra-visqueux.

Référence

[1] S. Albert *et al.*, "First-order susceptibility unveils growth of thermodynamic amorphous order in glass-formers", *Science* **352** (2016) 1308-1311.

Contact

François Ladieu (francois.ladieu@cea.fr)

Les dichalcogénures de métaux de transition, nouveaux matériaux bidimensionnels

Xavier Marie (xavier.marie@insa-toulouse.fr), **Bernhard Urbaszek** et **Thierry Amand**
Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets (UMR 5215 CNRS/UPS/INSA Toulouse),
Institut National des Sciences Appliquées, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex 4

Les progrès spectaculaires sur le contrôle des propriétés électroniques du graphène (monocouche d'atomes de carbone) ont stimulé la recherche de nouveaux matériaux bidimensionnels.

Les monocouches de dichalcogénures de métaux de transition tels que le disulfure de molybdène, MoS_2 (et ses cousins $MoSe_2$, $MoTe_2$, WS_2, WSe_2...), sont apparues très récemment comme des nanostructures très prometteuses pour des applications variées à la fois dans les domaines de l'optique, de l'électronique et, à plus long terme, de la spintronique.

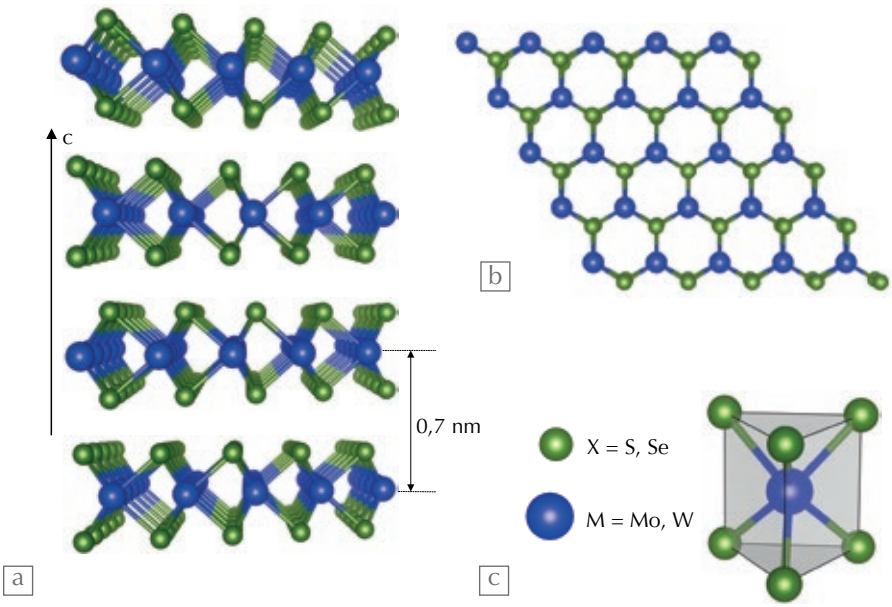
Les dichalcogénures de métaux de transition

Des matériaux lamellaires

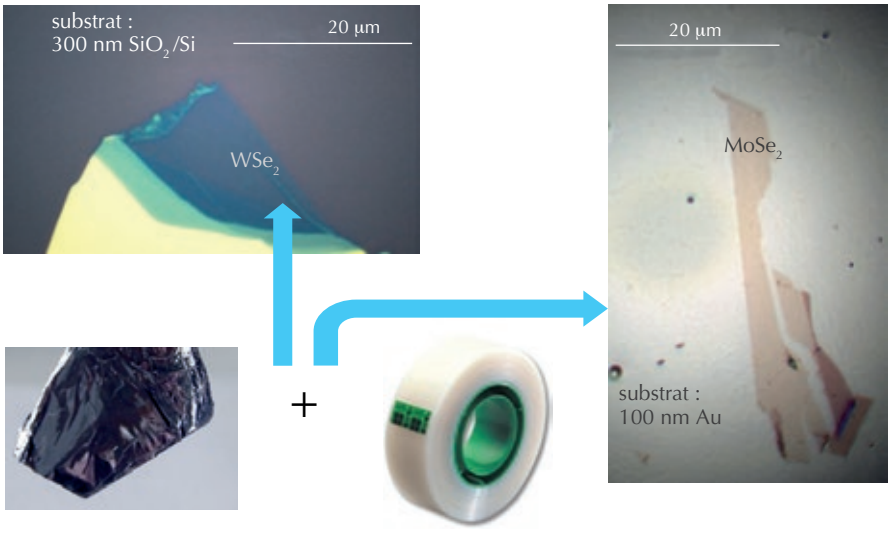
Le disulfure de molybdène MoS_2 est un matériau fort connu depuis de nombreuses années ; il est utilisé dans un grand nombre d'applications de la vie de tous les jours. Il s'agit d'un solide lamellaire, constitué d'un empilement de monocouches liées entre elles par des liaisons faibles de Van der Waals [1] (fig. 1a).

Ceci lui confère des propriétés de faible friction mécanique, exploitées dans des applications de lubrifiant de synthèse (huile de moteur) ou de fart de ski. Ce composé est également largement utilisé dans l'industrie pétrolière en tant que catalyseur. Le regain d'intérêt récent pour les dichalcogénures de métaux de transition a notamment été suscité par la réalisation de composants électroniques ultimes de type transistor ou phototransistor, exploitant les propriétés de ces matériaux. Comme dans tout semi-conducteur, les propriétés de transport électrique peuvent être modulées par l'application d'un champ électrique, permettant de faire passer ou non le courant. On a ainsi démontré des fonctionnements à haute fréquence (GHz), avec d'excellents rapports de modulation *on*/*off*, dans des transistors à effet de champ où la grille est constituée d'une simple monocouche de MoS_2.

›››



1. Arrangement cristallin des composés MX_2 (M = W, Mo ; X = S, Se). Ils sont constitués d'un empilement de monocouches, couplées par des liaisons faibles de Van der Waals.
(a) Vue transverse (la flèche verticale représente l'axe cristallographique **c**).
(b) Vue du dessus d'une monocouche.
(c) Coordination trigonale prismatique des atomes de soufre ou de sélénium autour d'un atome de métal dans MX_2.



2. Extraction d'une monocouche par exfoliation mécanique (technique du ruban adhésif) et transfert sur un substrat. Images de microscopie optique d'une monocouche de WSe_2 sur un substrat de SiO_2/Si (en haut à gauche) et d'une monocouche de $MoSe_2$ sur un substrat d'or (à droite).

›››

Fabrication et structure de feuillets monocouche

Pour isoler une monocouche de MoS_2, on exploite les techniques mises au point pour le graphène. Dès 2005, André Geim et Konstantin Novoselov (prix Nobel de physique 2010) ont montré qu'on pouvait détacher une monocouche de graphite ou de MoS_2 d'un échantillon massif avec un ruban adhésif (technique d'exfoliation mécanique), et la déposer sur un substrat de silicium pour l'étudier [2] (fig. 2). Cette recette, qui a déclenché la formidable saga du graphène [3], est aujourd'hui la technique la plus utilisée pour fabriquer des monocouches de dichalcogénures de métaux de transition. Comme pour le graphène, cette technique d'exfoliation mécanique a cependant de fortes limitations en terme de taille de feuillets, souvent restreints à quelques dizaines de microns au carré. De gros efforts de recherche sont en cours pour fabriquer des feuillets de plus grande taille, en utilisant les techniques de dépôt par CVD (Chemical Vapor Deposition) ou par épitaxie par jets moléculaires, couramment utilisées pour la fabrication de nanostructures semi-conductrices pour l'optoélectronique.

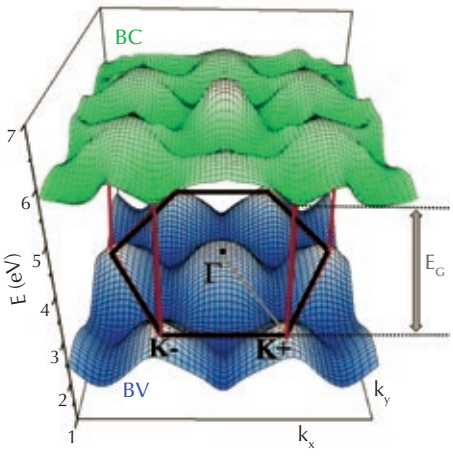
Les monocouches de dichalcogénures de métaux de transition et le graphène ont certes des points communs : issues de matériaux lamellaires, on utilise la même technique d'exfoliation mécanique pour les préparer. Mais leurs propriétés électroniques et optiques sont très différentes et peuvent se révéler complémentaires pour certaines applications. Nous présenterons ici les caractéristiques des monocouches semi-conductrices du type MX_2 qui sont actuellement les plus étudiées, *i.e.* celles où M est du molybdène (Mo) ou du tungstène (W) et X du soufre (S) ou du sélénium (Se) ; mais la famille est beaucoup plus large, avec notamment des monocouches métalliques aux propriétés supraconductrices, telles que NbS_2. Ces matériaux MX_2 sont tous des composés lamellaires, dont la structure rappelle celle du graphite. Ils sont constitués de feuillets bidimensionnels, empilés selon l'axe cristallographique ***c*** (fig. 1). Chaque feuillet est composé d'un plan de cations métalliques M inséré entre deux plans d'anions X. Les liaisons M-X à l'intérieur des feuillets sont fortes, de nature covalente. Les liaisons entre feuillets sont beaucoup plus faibles, de type Van der Waals.

Comme le graphène, les monocouches de dichalcogénures de métaux de transition ont un réseau atomique hexagonal en forme de nid d'abeille (fig. 1) ; mais elles sont formées de trois plans atomiques au lieu d'un : les atomes du métal de transition (Mo ou W) forment un plan pris en sandwich entre deux plans de chalcogènes (S ou Se, par exemple). Chaque atome de métal de transition est relié à six atomes de chalcogène. Ces anions sont en coordination trigonale prismatique par rapport aux atomes de métal. On constate aisément sur la figure 1 qu'une monocouche de MoS_2 ne possède pas de centre de symétrie d'inversion ; nous verrons que c'est une différence importante avec le graphène.

Symétrie et structure de bande

Même si de nombreuses questions restent actuellement ouvertes, des calculs basés sur des méthodes *ab initio* ont permis de déterminer les principales caractéristiques des états électroniques dans ces monocouches. Dans une représentation énergie *versus* impulsion (dans l'espace réciproque), ces états sont répartis sur des surfaces délimitant des bandes d'énergies permises et présentant un paysage constitué de dômes et de vallées. Comme dans le graphène, les minima d'énergie des états d'électrons dans la bande de conduction et les maxima dans la bande de valence sont ainsi localisés dans les vallées et les dômes repérés par les points K situés au bord de la zone de Brillouin hexagonale (fig. 3). Il y a trois vallées K^+ qui sont équivalentes, et trois vallées K^- qui diffèrent des premières par l'agencement des niveaux de *spin* (encadré 1 et fig. E1a). Par comparaison, les états électroniques équivalents dans des structures semi-conductrices bidimensionnelles bien connues, comme les puits quantiques d'arséniure de gallium (GaAs), sont dans les vallées du centre de zone, qu'on appelle le point Gamma (Γ sur la figure 3).

›››



3. Énergie des électrons de bandes de conduction (BC) et de valence (BV) en fonction de leur vecteur d'onde $\mathbf{k}(k_x,k_y)$, dans une monocouche de MoS_2.

Couplage *spin*–vallée et polarisation de vallée

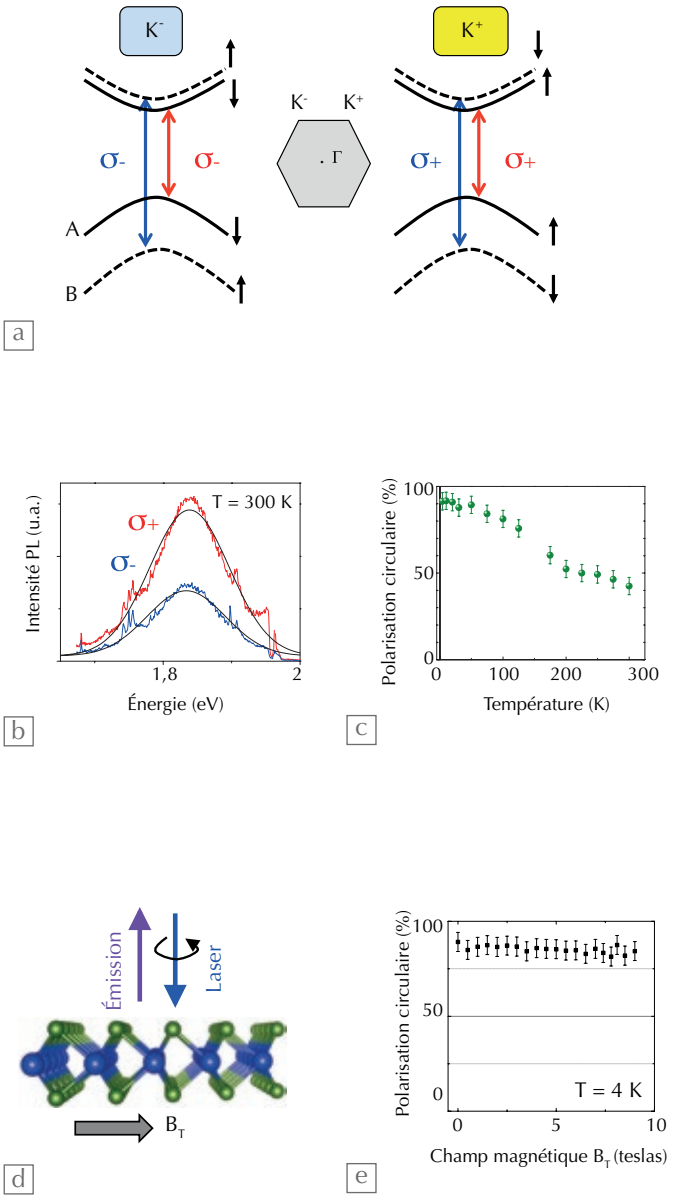
encadré 1

Depuis les travaux pionniers de Georges Lampel à l'École polytechnique à la fin des années 1960, on sait que l'absorption d'une lumière polarisée circulairement par un semi-conducteur peut conduire à la création d'une population d'électrons polarisés en *spin* (*i.e.* présentant un déséquilibre entre les nombres d'électrons de *spin* "up" et "down"). Ces techniques, dites d'*orientation de* spin *par pompage optique*, ont été largement utilisées depuis une vingtaine d'années pour élucider les propriétés de *spin* des électrons dans différentes nanostructures semi-conductrices telles que puits, fils ou boîtes quantiques, avec l'espoir d'exploiter ce degré de liberté de *spin* pour stocker et/ou traiter de l'information classique ou quantique. Ce champ d'investigation est appelé « spintronique ».

Dans les semi-conducteurs bidimensionnels à base de dichalcogénures de métaux de transition, l'absorption de lumière polarisée circulairement peut non seulement générer une polarisation de *spin*, mais également une polarisation dite de *vallée*. En effet, du fait de la symétrie hexagonale et de l'absence de symétrie d'inversion, le degré de liberté de *spin* des électrons est couplé à celui de vallée dans l'espace réciproque. Dans les solides cristallins, ces vallées correspondent à des minima d'énergie des électrons associés à des symétries particulières des états quantiques (fig. 3). La figure E1a compare les états de deux vallées K adjacentes situées sur les bords de la zone de Brillouin hexagonale d'une monocouche de MoS_2. Contrairement à la situation des semi-conducteurs classiques où, pour chaque énergie, il existe des états de *spin* "up" et "down", on observe ici que, dans une vallée donnée, un électron peut n'avoir qu'un état de *spin* ; pour trouver l'état de *spin* opposé à la même énergie, l'électron doit avoir un vecteur d'onde très différent, correspondant à la vallée adjacente. Les deux vallées sont donc non équivalentes (on les note K^+ ou K^-) et on peut associer à chacune d'elle un indice +1 ou –1, dit *indice de vallée*.

Ces propriétés de symétrie conduisent à des règles de sélection optique tout à fait inédites régissant l'interaction de la lumière polarisée avec la monocouche de MoS_2. L'absorption d'une lumière polarisée circulairement droite génère des électrons uniquement dans la vallée K^+ (et réciproquement, une lumière polarisée circulairement gauche uniquement dans la vallée K^-). On peut donc créer à la fois une polarisation de *spin* (déséquilibre des populations d'électrons de *spin* "up" et "down"), mais aussi une polarisation de vallée (déséquilibre des populations d'électrons dans les vallées K^+ et K^-).

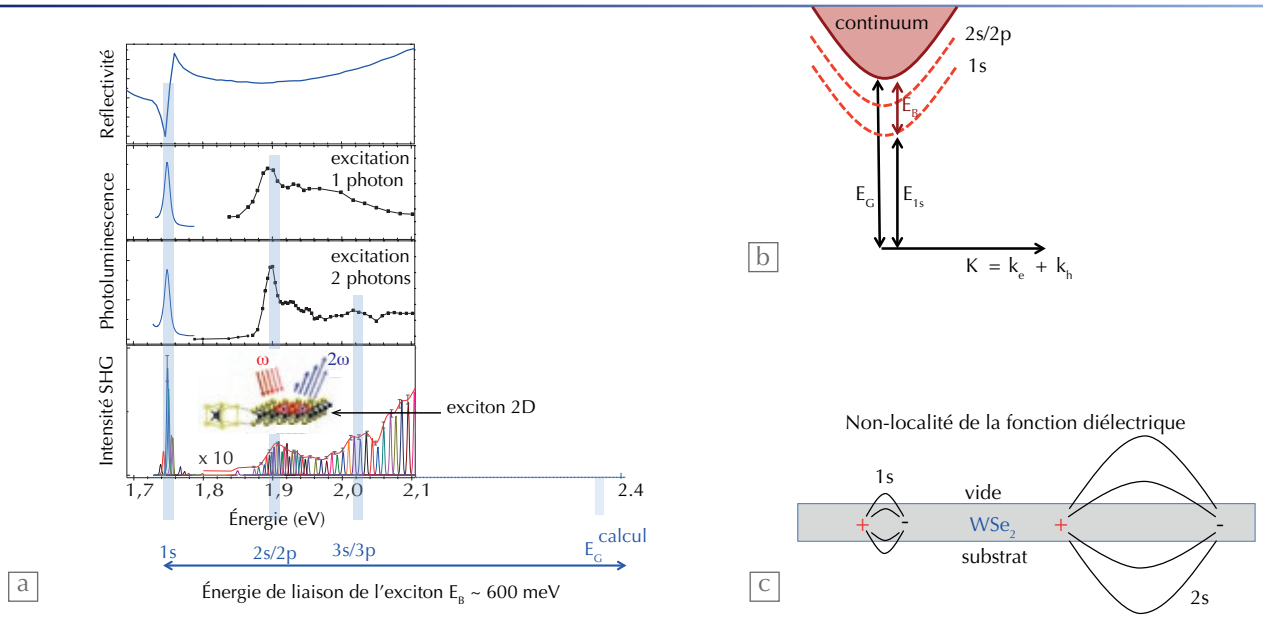
La mise en évidence expérimentale de cet effet consiste à mesurer le taux de polarisation circulaire de la photoluminescence après une excitation optique polarisée circulairement. Après une excitation polarisée circulairement droite (σ^+) par exemple, des électrons de *spin* "up" sont photogénérés dans la vallée K^+, et s'ils restent dans la même vallée (et donc conservent leur orientation de *spin*) jusqu'à la recombinaison optique, la luminescence sera également polarisée circulairement droite (fig. E1b). Vu les échelles d'énergie en jeu, cette polarisation de la photoluminescence persiste à température ambiante (fig. E1c). En outre, un champ magnétique externe transverse (appliqué dans le plan des couches, fig. E1d) est bien connu pour détruire la polarisation de *spin* du fait de la précession de Larmor des électrons : c'est ce qu'on appelle l'effet Hanle. Cette précession est ici complètement bloquée, car le champ magnétique ne peut pas coupler les vallées K^+ et K^-, compte tenu de la symétrie du cristal. Les expériences réalisées indépendamment par trois équipes en 2012 (University of Columbia, Beijing et Toulouse) ont montré l'absence d'effet d'un champ magnétique externe transverse (fig. E1e).



E1. Polarisation de *spin* et polarisation de vallée.
(a) Détail de la structure de bande des deux vallées non équivalentes K^+ et K^- (les flèches verticales noires représentent le *spin* "up" ou "down" des électrons). Les flèches verticales bleues et rouges représentent les transitions optiques autorisées avec la lumière polarisée circulairement droite (σ^+) ou gauche (σ^-). L'insert montre une représentation schématique de la zone de Brillouin hexagonale bidimensionnelle.
(b) Intensité de photoluminescence copolarisée (σ^+) ou contrapolarisée (σ^-) avec le laser d'excitation, qui est polarisé circulairement σ^+.
La polarisation circulaire de la photoluminescence présentée sur les courbes des figures (c) et (e) est définie par $P_c = [(\sigma^+) - (\sigma^-)]/[(\sigma^+) + (\sigma^-)]$.
(c) Variation de la polarisation circulaire P_c de la photoluminescence (sondant la polarisation de vallée) en fonction de la température [5].
(d) Configuration expérimentale de l'expérience de magnéto-photoluminescence en champ magnétique externe transverse B_T (effet Hanle).
(e) Polarisation circulaire de la photoluminescence en fonction du champ magnétique.

Des effets excitoniques géants

encadré 2



Dans un semi-conducteur, l'absorption d'un photon dont l'énergie est supérieure à l'énergie de bande interdite permet de promouvoir un électron de la bande de valence – initialement pleine d'électrons – vers la bande de conduction. On obtient ainsi un électron dans la bande de conduction et une absence d'électron dans la bande de valence, communément appelée un trou (de charge opposée à celle de l'électron manquant). L'interaction coulombienne attractive entre cet électron de la bande de conduction et ce trou de la bande de valence conduit à un état lié appelé « exciton » (de manière imagée, l'électron de charge négative tourne autour du trou de charge positive).

Dans les nanostructures semi-conductrices, le confinement va exalter les effets excitoniques car il réduit la distance moyenne électron-trou. Lorsque la paire électron-trou est confinée dans une seule couche de dichalcogénure de métal de transition – système bidimensionnel idéal – on s'attend donc à une énergie de liaison excitonique très importante. La figure E2 montre qu'avec une énergie de bande interdite calculée E_G = 2,37 eV et la valeur mesurée E_{1s} = 1,75 eV de l'énergie du niveau fondamental 1s de l'exciton, l'énergie de liaison de ce dernier est d'environ 600 meV dans une monocouche de WSe_2, soit plus de 50 fois celle observée dans un puits quantique de GaAs/AlGaAs/GaAs. Ainsi, les propriétés optiques (absorption, luminescence...) dans ces monocouches sont dominées par les effets excitoniques, même à température ambiante, l'énergie de liaison étant alors encore 20 fois supérieure à l'énergie thermique moyenne des électrons (~ 30 meV).

Cette énergie de liaison géante résulte d'une combinaison de facteurs : nous avons mentionné la dimensionnalité, mais il y a aussi la masse effective relativement élevée des électrons dans les vallées K des bandes de conduction et de valence ($m_c \approx m_v \sim 0{,}4\ m_0$, où m_0 est la masse de l'électron dans le vide) et une constante diélectrique effective assez faible ($\varepsilon_{eff} \sim 4$). En effet, pour un exciton bidimensionnel de type Wannier-Mott, l'énergie de liaison de l'état fondamental 1s de l'exciton s'écrit simplement : $E_{B,1} = 2\mu e^4 / (\varepsilon_{eff}\, \hbar)^2$, où μ est la masse réduite définie par $1/\mu = 1/m_c + 1/m_v$, et e la charge de l'électron. Rappelons que la masse effective représente la courbure des surfaces d'énergie dans une vallée donnée (fig. 3).

Les expériences dans les monocouches de dichalcogénures de métaux de transition ont montré que les énergies des différents états excités de l'exciton ne suivent pas la série hydrogénoïde en dimension 2 : $E_{B,n} = E_{B,1} / (2n-1)^2$ ($n \geq 1$, entier). Ceci vient de la particularité de l'effet d'écran entre les charges de la monocouche, du fait du contraste entre la constante diélectrique de la monocouche et celle de son environnement (constante diélectrique très faible de part et d'autre du feuillet, fig. E2c). Ainsi pour l'état fondamental n = 1 de l'exciton, caractérisé par un très faible rayon de Bohr (~ 0,5 nm), la constante diélectrique effective ε_{eff} est proche de celle du matériau constituant la monocouche. Par contre, pour un état excité (n = 2 par exemple) la distance moyenne entre l'électron et le trou est plus grande, les lignes de champ explorent l'environnement de faible indice, ce qui conduit à une réduction de ε_{eff} : on parle alors de non-localité de la fonction diélectrique.

E2. États excitoniques dans une monocouche de WSe_2.

(a) Du haut vers le bas :
- courbe de *réflectivité*, mettant en évidence la résonance à E_{1s} = 1,75 eV associée à l'exciton fondamental 1s ;
- spectre d'*excitation à un photon* de la photoluminescence : mesure de l'intensité de photoluminescence de l'état excitonique 1s en fonction de l'énergie des photons du laser d'excitation ;
- spectre d'*excitation à deux photons* de la photoluminescence : mesure de l'intensité de photoluminescence de l'état excitonique 1s en fonction du double de l'énergie des photons du laser d'excitation ; les pics à 1,9 eV et 2,02 eV correspondent aux états excitoniques excités n = 2 et n = 3 respectivement ;
- spectre du *signal de doublage de fréquence* du laser (SHG) en fonction du double de l'énergie des photons du laser d'excitation, montrant les résonances associées aux états excitoniques n = 1, 2 et 3 (rectangles bleus verticaux). Une monocouche de WSe_2 étant non centro-symétrique, la génération de photons à la fréquence double du laser est possible. L'intensité de ce signal optique non linéaire est exaltée lorsque l'énergie du laser est en résonance avec un état excitonique [6].

(b) Représentation schématique de la courbe de dispersion (énergie en fonction du vecteur d'onde) des paires électron-trou non liées (continuum) et des états excitoniques n = 1 (1s) et n = 2 (2s/2p).

(c) États excitoniques n = 1 et n = 2 illustrant la différence d'efficacité de l'écrantage diélectrique entre l'électron et le trou (cet écrantage étant plus faible pour l'état n = 2).

>>>

Mais, contrairement au graphène qui est un matériau sans bande interdite (les bandes de conduction et de valence se touchent aux points K), les monocouches de dichalcogénures de métaux de transition sont des semi-conducteurs avec une énergie E_G de bande interdite typiquement de ~ 2 eV [4].

D'autre part, le molybdène et le tungstène étant des atomes lourds (comparés au carbone), ils sont caractérisés par une très forte interaction *spin*-orbite, qui affecte également les monocouches de MX_2 : il s'ensuit que les états de *spin* "up" et "down" dans une vallée donnée ont des énergies qui diffèrent par plus de 100 meV. Toutes ces caractéristiques vont conduire à des propriétés électroniques tout à fait inédites pour un semi-conducteur [5] et, en particulier, à une très forte interaction avec la lumière. Une monocouche de MoS_2 (dont l'épaisseur est inférieure à un nanomètre) absorbe ainsi plus de 10% de la lumière dans le spectre visible. Des composants prototypes sur substrat souple (phototransistor, cellule photovoltaïque, LED) qui exploitent cette très forte interaction avec la lumière ont ainsi déjà été fabriqués et testés.

Les monocouches de MoS_2 : nouvelles propriétés

Des excitons bidimensionnels très robustes

Les transitions optiques (absorption ou émission d'un photon) dans les monocouches de MoS_2 mettent donc en jeu les états électroniques des vallées K. Les mesures de spectroscopie optique (voir encadré 2) ont montré que ces transitions se produisent à des énergies beaucoup plus faibles que l'énergie de bande interdite E_G. Ceci est dû à la très forte interaction coulombienne entre l'électron de la bande de conduction et le trou (absence d'électron) de la bande de valence créés par l'absorption d'un photon. L'énergie de liaison de cet état lié qu'on appelle « exciton » (fig. E2 et encadré 2) [6], vaut ici environ 600 meV, soit typiquement cinquante fois l'énergie de liaison d'un exciton bidimensionnel dans un puits quantique de GaAs ! Rappelons que ces puits quantiques (nanostructures sandwich du type GaAs/AlGaAs/GaAs) sont les structures de référence pour les composants optoélectroniques actuels. Cette extraordinaire robustesse des excitons dans les monocouches de MX_2 suggère de très belles perspectives pour l'étude du couplage fort lumière-matière, pouvant conduire à la création de condensats de Bose-Einstein à température ambiante [7].

Du couplage *spin*-orbite au couplage *spin*-vallée

Une monocouche de MoS_2 avec son réseau atomique en nid d'abeille est, d'une part, non centro-symétrique et, d'autre part, caractérisée par une forte interaction *spin*-orbite. Ceci va conduire à des propriétés de *spin* des électrons tout à fait inédites (fig. E1 et encadré 1).

D'une part, on s'attend à avoir des électrons de conduction ou de valence beaucoup moins sensibles aux effets de relaxation de *spin* ultrarapide connus pour les structures semi-conductrices bidimensionnelles comme les puits quantiques de GaAs. Par ailleurs, l'absorption d'une lumière polarisée circulairement peut générer une population d'électrons polarisés en *spin* (*i.e.* avec un déséquilibre entre les nombres d'électrons de *spin* "up" et de *spin* "down"). Enfin et surtout, l'excitation polarisée circulairement permet de contrôler la distribution de ces électrons dans une vallée ou une autre de l'espace réciproque [5]. On parle ainsi de « polarisation de vallée », et c'est ce degré de liberté que l'on cherche actuellement à mieux caractériser pour éventuellement l'exploiter dans des applications de stockage ou de traitement de l'information.

Les hétérostructures de Van der Waals : une ingénierie de la matière à l'échelle de la monocouche atomique

Les premiers résultats sur les nouvelles propriétés électroniques et optiques des monocouches de dichalcogénures de métaux de transition [8] sont aujourd'hui suffisamment encourageants pour franchir une nouvelle étape de recherche. Les perspectives sont de fabriquer des empilements contrôlés de différentes monocouches constituées de matériaux MX_2 différents, liées entre elles par des interactions de Van der Waals. Ces empilements, ou hétérostructures de Van der Waals, pourront avoir des propriétés optiques ou de transport différentes de leurs constituants élémentaires, et être conçus à la demande en fonction des propriétés visées. Ainsi, des hétérostructures constituées d'une bicouche MoS_2/WS_2 ont déjà été fabriquées et testées. Elles ont en particulier montré de très bonnes propriétés de séparation des charges : le minimum d'énergie des électrons de conduction est situé dans MoS_2, et le maximum d'énergie des électrons de valence – autrement dit, le minimum d'énergie des trous – dans WS_2. Ces caractéristiques de séparation des charges, permettant de limiter les recombinaisons radiatives, sont particulièrement désirables et utiles pour des applications de type photodétecteur, conversion photovoltaïque ou photocatalyse.

On peut aussi imaginer marier des monocouches de matériaux aux propriétés plus éloignées, en réalisant des combinaisons associant des monocouches de graphène, de nitrure de bore et de dichalcogénures de métaux de transition. Ceci est le tout début d'une nouvelle ingénierie des nanomatériaux, basée sur le contrôle de la monocouche atomique. ▮

Références

1• R.A. Bromley *et al.* "The band structure of some transition metal dichalcogenides. III. Group VIA: trigonal prism materials", *J. Phys.C: Solid State Phys.* **5** (1972) 759.

2• K.S. Novoselov *et al.*, "Two-dimensional atomic crystals", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **102** (2005) 1045.

3• J.N. Fuchs *et al.*, « Le graphène – Quand la mécanique quantique rencontre la relativité dans un trait de crayon », *Reflets de la physique* **25** (2011) 4-9.

4• K.F. Mak *et al.*, "Atomically thin MoS_2: a new direct-gap semiconductor", *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 136806.

5• G. Sallen *et al.*, "Robust optical emission polarization in MoS_2 monolayers through selective alloy excitation", *Phys. Rev. B* **86** (2012) 081301.

6• G. Wang *et al.*, "Giant enhancement of the optical second-harmonic emission of WSe_2 monolayers by laser excitation at exciton resonances", *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 097403.

7• J. Bloch et A. Amo, « Fluides quantiques de lumière dans les microcavités à semi-conducteurs », *Reflets de la physique* **49** (2016) 4-9.

8• G. Wang *et al.*, "Spin-orbit engineering in transition metal dichalcogenide alloy monolayers", *Nature Commun.*, **6** (2015) 10110.

Rupture et délamination de films minces

Joël Marthelot (jmarthel@mit.edu), **Benoît Roman** et **José Bico**
Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, CNRS UMR 7636, ESPCI, 75231 Paris Cedex 05

Les films minces qui revêtent les surfaces de nos objets quotidiens tendent à rompre selon un motif de type « boue séchée » sous l'effet d'une contraction du film. Nous décrivons un nouveau mode de rupture d'une couche mince d'épaisseur micrométrique déposée sur un substrat rigide. Ici, lorsque la couche sèche et se craquelle, elle se décolle simultanément, ce qui conduit à des fissures aux motifs étonnamment réguliers comme des spirales ou des allées oscillantes.

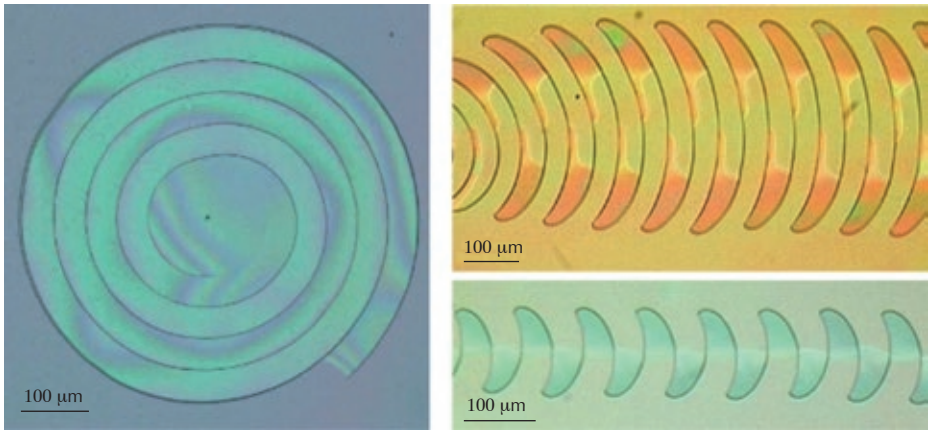
Alors que la formation d'un réseau désordonné de fissures est traditionnellement considérée comme néfaste, la grande régularité géométrique des motifs obtenus peut être un outil pour structurer rapidement des surfaces à l'échelle du micron ou du nanomètre.

Fissures oscillantes dans des couches minces

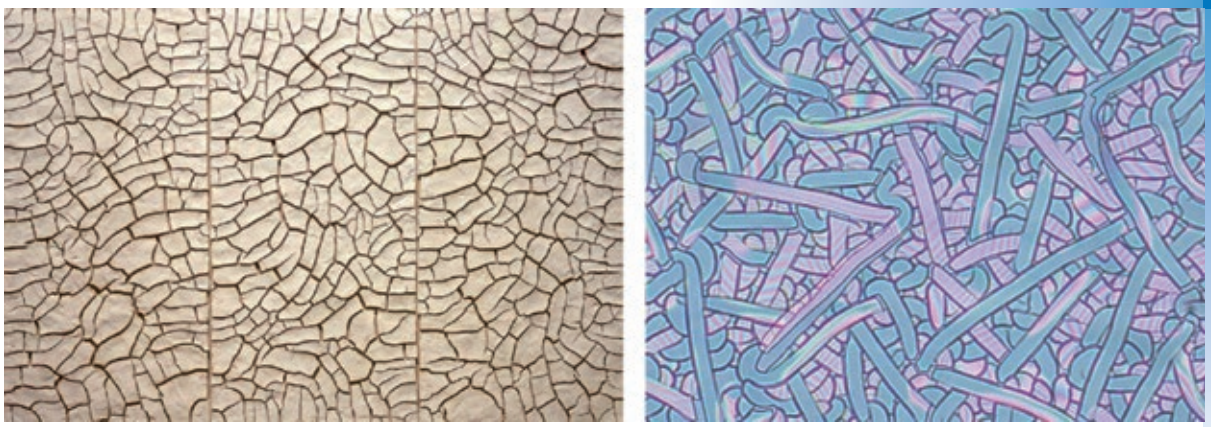
Une couche de peinture recouvrant un mur, le revêtement antireflet d'une vitre ou le film conducteur d'une puce électronique sont des couches minces dans lesquelles des contraintes mécaniques se développent pendant le processus de dépôt ou de séchage. Le film se rétracte mais reste solidaire du substrat rigide et emmagasine des contraintes de traction. Si ces contraintes sont suffisamment importantes pour excéder la cohésion du film, des fissures se propagent. Elles forment alors un réseau désordonné qui rappelle des craquelures de boue séchée. Mais lorsque nous diminuons l'énergie d'adhésion entre le film et le substrat, nous observons des chemins de fissures étonnamment réguliers qui forment des spirales et des allées de croissants (fig. 1). De telles fissures ont été récemment découvertes sur des miroirs de cavités laser ou sur des films conducteurs utilisés dans des dispositifs électroniques flexibles. Curieusement, elles apparaissent en dessous du seuil de contrainte classiquement prédit. D'un point de vue industriel, il est important de pouvoir maintenir l'intégrité de la couche. Nous avons ainsi déterminé les conditions de propagation de ces fissures et étudié leur chemin afin de pouvoir prédire les motifs [1, 2].

Propagation d'une fissure isolée : le critère de Griffith

La formation de fissures dans des films minces est pilotée par la compétition entre l'énergie élastique contenue dans le film et l'énergie de rupture du matériau. Habituellement, la fissure se propage en ligne droite et relâche les contraintes de traction dans une petite zone autour de la fissure (zone bleu clair dans la figure 3a).



1. Motifs de fissures observés au microscope optique dans des couches minces de silicate d'épaisseur 1 µm. Les zones de couleur (verte dans la figure de gauche) indiquent un décollement de la couche. La collaboration entre fissuration et délamination permet d'obtenir des chemins de fissures d'une étonnante régularité.



2. Deux exemples de motifs de rupture de couches minces. Gauche, échelle 1 m : motif de rupture désordonné observé dans une couche de kaolin et de colle vinylique (œuvre d'Alberto Burri, *Il viaggio N.4*, Fondazione Palazzo Albizzini, Pérouse, Italie). Droite, échelle 1 mm : motif de rupture surprenant que nous observons au microscope optique dans une couche mince de silicate déposée sur un substrat de silicium. Nous remarquons la propagation de bandes d'une largeur bien définie.

Pour prédire les conditions de propagation d'une fissure isolée, nous utilisons un critère énergétique développé en 1921 par Alan Griffith qui s'intéressait à la rupture du verre. Il propose l'existence d'une énergie de rupture par unité de surface G_c, analogue à la tension de surface observée dans les liquides. Néanmoins, G_c correspond physiquement à une dissipation par unité de surface localisée dans la zone d'endommagement en pointe de fissure et non une énergie de surface thermodynamique comme pour un liquide. Ces dissipations sont, par exemple, dues à l'hétérogénéité de l'interface à petite échelle ou à la plasticité du matériau. Elles sont volumiques ; mais comme la région concernée est très petite, nous supposons que sa forme demeure stationnaire lors de la propagation et que G_c est une constante caractéristique du matériau. Selon Griffith, la fissure se propage dès que le taux de restitution d'énergie élastique libérée par la propagation compense l'énergie de rupture. Dans le cas d'un film mince d'épaisseur h, de module de Young E, adhérant à un substrat rigide et soumis à des contraintes σ, l'énergie élastique libérée lors de la propagation est confinée sur une distance de l'ordre de h autour de la fissure. L'énergie relâchée autour d'une fissure de longueur L est égale au produit de la densité d'énergie élastique $\sigma \times \sigma/E$ dans le volume de film $\gamma h^2 L$ (représenté en bleu clair dans la figure 3a), où γ est un préfacteur d'ordre unité qui dépend de la différence des propriétés élastiques du film et du substrat. Il y a ainsi propagation si cette énergie est supérieure à l'énergie de fissure $G_c hL$: $\gamma h^2 L\sigma^2/E > G_c hL$.

La notion de contrainte est cependant tensorielle. Ainsi, seules les contraintes perpendiculaires à la fissure sont libérées. En conséquence, une nouvelle fissure est déviée en s'approchant d'une fissure préexistante et se branche perpendiculairement à l'ancienne. Nous obtenons ainsi les motifs de rupture familiers (fig. 2, gauche) que nous retrouvons sur les vernis, la boue séchée ou les craquelures des peintures [3].

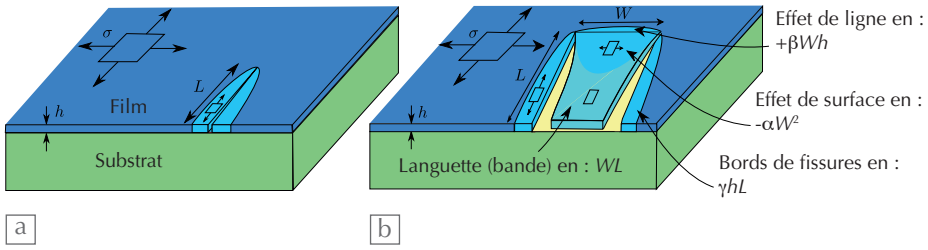
Pour une couche et un substrat donnés, la compétition entre énergie élastique et énergie de rupture sélectionne une épaisseur critique du film, $h_c = G_c E/\gamma\sigma^2$, en dessous de laquelle une fissure isolée ne peut se propager : le film est alors considéré comme stable.

Cette condition est largement acceptée et utilisée par les industriels pour la conception de nouveaux systèmes. Cependant, des fissures inhabituelles laissant apparaître des bandes de largeurs bien définies (fig. 2, droite) se propagent parfois pour des couches plus fines que cette épaisseur critique. Comment expliquer ces craquelures inattendues ?

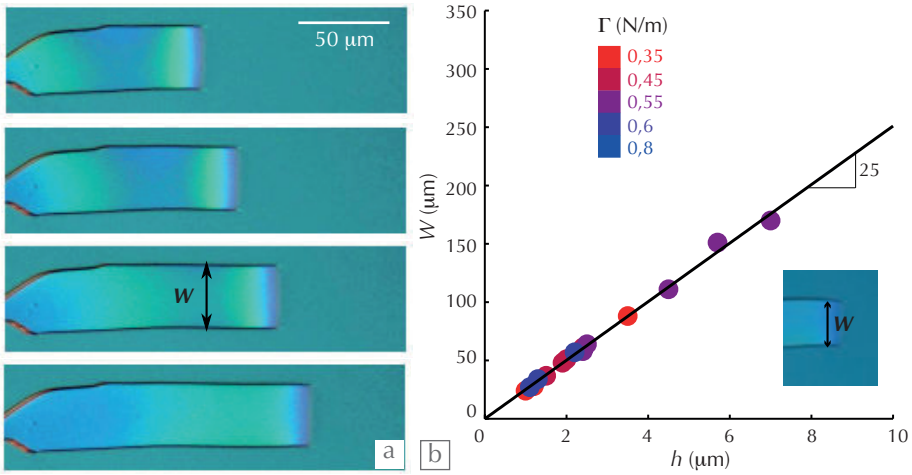
Fissure et délamination collaborent.

Nous avons étudié le mécanisme de rupture dans une couche de silicate d'épaisseur micrométrique déposée sur un substrat de silicium. De telles couches sont utilisées par exemple pour ajuster les propriétés optiques de cavités laser. Ce produit commercial est optimisé pour éviter la nucléation de fissures. Cependant, quelques points de nucléation sporadiques sont présents sur les échantillons, ce qui nous permet d'étudier des motifs de fissures bien développés et isolés les uns des autres. Au microscope optique, nous observons le phénomène de rupture en temps réel dans des films d'épaisseur inférieure à h_c (fig. 4a). Deux fissures parallèles se propagent de concert, en décollant une bande d'une largeur W bien contrôlée. L'aire libérée dans la bande, représentée en bleu clair dans la figure 3b, est beaucoup plus importante que celle relâchée autour de deux fissures isolées. Reprenons l'argument énergétique de Griffith : un duo de fissures

›››



3. Aire relâchée autour de fissures dans un film mince mis en traction biaxiale σ et déposé sur un substrat rigide.
(a) Pour une fissure isolée, l'aire bleu clair où l'énergie est relâchée est confinée dans une petite zone.
(b) Pour une bande où fissure et délamination collaborent, l'aire relâchée est beaucoup plus importante.



4. Bande formée par un duo de fissures parallèles.
(a) Propagation d'un duo de fissures distantes de W.
(b) Largeur W d'une bande formée par un duo de fissures, en fonction de l'épaisseur h du film pour différentes énergies d'adhésion Γ.

›››

peut se propager si le gain d'énergie relâchée dans la bande, $WhL\sigma^2/E$, est supérieur à la somme des coûts des deux fissures, $(2G_c - 2\gamma h\sigma^2/E)hL$, et du décollement du film, ΓWL, où Γ correspond à l'énergie d'adhésion du film sur le substrat. La propagation est donc énergétiquement possible si :

$$W \geq 2(G_c - \gamma h\sigma^2/E)h/(h\sigma^2/E - \Gamma).$$

C'est ainsi la collaboration entre la fissuration et la délamination qui permet à ces bandes de se propager dans des films prédits stables, en libérant davantage d'énergie élastique. Pour une largeur W donnée, le critère de propagation repose donc sur un simple bilan d'énergie, l'énergie élastique libérée compensant la somme de l'énergie de fracture sur les deux côtés de la bande et de l'énergie d'adhésion du film sur le substrat.

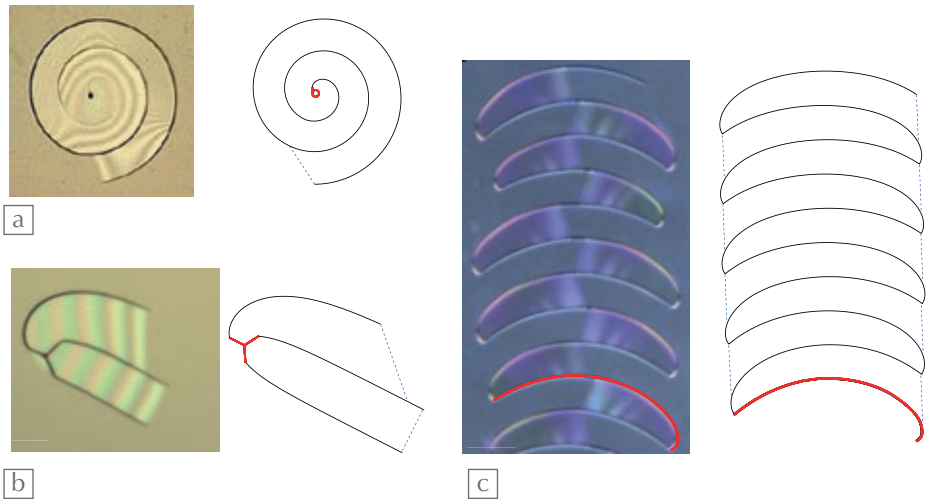
La sélection de la largeur de la bande est cependant plus subtile. Nous avons mesuré cette largeur W en régime stationnaire en fonction de l'épaisseur h du film pour différentes valeurs de l'énergie d'adhésion Γ (fig. 4b). Curieusement, W augmente linéairement avec l'épaisseur et est indépendante de l'énergie d'adhésion, mais également des propriétés élastiques des matériaux.

Si le critère de Griffith prédit le seuil de propagation, la direction des fissures est dictée par le principe de maximisation du taux de restitution d'énergie. Pour un chargement croissant, la fissure se propage dans la première direction pour laquelle l'énergie élastique libérée atteint l'énergie de rupture du matériau. Dans notre système, deux effets au premier abord insignifiants corrigent l'expression de l'énergie élastique libérée. Ils sont liés au détail des contraintes au voisinage du front de délamination. La bande décollée peut en effet se soulever, ce qui permet de libérer de l'énergie par cisaillement le long du front. Ce petit bonus est proportionnel à la largeur de la bande, βhW. Cependant, l'extrémité de la bande reste ancrée au substrat. La tension latérale est ainsi restreinte jusqu'à une distance du front de l'ordre de la largeur. Nous obtenons une pénalité proportionnelle au carré de la largeur, $-\alpha W^2$. Le gain supplémentaire l'emporte pour les petites largeurs, mais perd pour les grandes. L'équilibre des deux effets conduit à une largeur stable, qui est proportionnelle à l'épaisseur du film, $W = (\beta/2\alpha)\ h$. Les préfacteurs α et β peuvent être déterminés numériquement par un calcul en éléments finis des déformations élastiques. Alors que le préfacteur β est d'ordre unité ($\beta \sim 1{,}3$), α est petit ($\alpha \sim 0{,}025$), ce qui explique pourquoi la largeur d'équilibre de la bande est significativement plus grande que l'épaisseur du film ($W \sim 25\ h$), comme nous l'observons expérimentalement (fig. 4b).

Ce mécanisme nous permet de prédire les nouvelles conditions de stabilité du film, que nous avons validées expérimentalement en variant systématiquement l'énergie élastique et les énergies de rupture et d'adhésion du film. Ces critères sont particulièrement importants pour les nouvelles technologies comme l'électronique flexible ou les capteurs biomédicaux, pour lesquels l'adhésion entre couche et substrat est modérée.

Motifs de rupture

Pourquoi ces motifs en spirale ou en allées de croissants ? Une fissure qui se propage tend à suivre une fissure préexistante à une distance constante. À partir d'un petit défaut arrondi, la fissure se propage ainsi en formant une spirale d'Archimède. Un défaut plus allongé nous conduit en revanche à une allée de croissants. En étendant notre modèle à des géométries plus complexes, nous pouvons prédire de tels chemins de propagation (fig. 5).



5. Modélisation de chemins de fissures. Notre modèle permet de prédire les chemins de fissures observés à partir de différentes conditions initiales (en rouge) extraites de l'expérience. Une spirale se développe à partir d'un défaut localisé (a), trois fissures à partir d'une amorce à 120° (b), une allée de fissures oscillantes à partir d'un défaut allongé (c).

6. Des motifs similaires sont observés dans des écorces d'arbres d'essences courantes (ici, un marronnier rouge du parc de Sceaux, près de Paris).

Nous nous sommes concentrés sur la propagation de fissures dans un matériau dont les conditions de chargement sont bien définies. Cependant, le mécanisme de propagation collaboratif est général et nous l'observons aussi bien dans des films métalliques d'épaisseur nanométrique que dans des couches de vernis ou de peinture épaisses de quelques centaines de micromètres. Curieusement, des motifs similaires apparaissent également dans l'écorce des marronniers rouges de nos parcs (fig. 6), dans lesquels fracture et délamination semblent collaborer.

Les fissures : un outil de fabrication à petite échelle ?

Ce nouveau mécanisme de rupture est un bon candidat pour utiliser les fissures comme un outil de fabrication de structures à petite échelle. Les motifs obtenus se propagent spontanément, sont très robustes, et leur géométrie est dictée par la forme du défaut initial, lorsque les conditions de propagation des fissures sont remplies. Les réseaux de fissures régulièrement espacés peuvent être utilisés pour leurs propriétés optiques, pour fabriquer des canaux microfluidiques ou pour produire des objets (certes délicats !) à l'échelle nanométrique. Le défi majeur qu'il reste à relever est de contrôler la nucléation des motifs. ▮

Bibliographie

1• J. Marthelot *et al.*, "Self-replicating cracks: a collaborative fracture mode in thin films", *Phys. Rev. Lett.*, **113** (2014) 085502.

2• J. Marthelot *et al.*, "A new failure mechanism in thin film by collaborative fracture and delamination: Interacting duos of cracks", *J. Mech. Phys. Solids*, **84** (2015) 214-229.

3• L. Pauchard *et al.*, « Craquelures dans les couches picturales des peintures d'art », *Reflets de la physique*, **3** (2007) 5-9.

Remerciements

Ces travaux ont été effectués en collaboration avec Jérémie Teisseire et Davy Dalmas dans le laboratoire Surface du Verre et Interfaces du CNRS et Saint-Gobain Recherche, et Francisco Melo à la Universidad de Santiago de Chile. Nous remercions Mélanie Lebental qui nous a initiés à ce mode de propagation, découvert lors de sa thèse au Laboratoire de photonique quantique et moléculaire de l'ENS Cachan.

4es Rencontres des Jeunes Physicien·ne·s

Mercredi 9 novembre 2016
Collège de France, 11 place Marcelin-Berthelot, 75005 Paris

© Jean-François Dars.

Informations et inscriptions
http://rjp.sfp-paris.fr/

Ces rencontres ont pour ambition d'offrir aux doctorants en physique d'Île-de-France un vaste aperçu des problématiques d'actualité dans des domaines aussi variés que l'optique non linéaire, la cosmologie, la biophysique, les milieux granulaires ou encore les atomes froids.

La journée s'articule autour de présentations orales et d'une session poster. Les présentations sélectionnées par le comité organisateur mettent l'accent sur les enjeux généraux tout en soulignant l'esprit novateur des recherches entreprises.

La participation aux RJP est gratuite, pour les orateurs comme pour les auditeurs, mais nécessite d'avoir rempli le formulaire d'inscription. Si vous souhaitez présenter une contribution orale ou un poster, vous devez envoyer un résumé à rjp@sfp-paris.fr , en utilisant les modèles disponibles sur le site des RJP. La sélection est réalisée sur la qualité des recherches, validée par un conseil scientifique interdisciplinaire, ainsi que sur la clarté du propos.

Les exposés peuvent être présentés en anglais ou en français. Les supports de présentation doivent être en anglais. Chaque exposé dure 15 minutes, plus 5 minutes réservées aux questions. Le propos doit rester accessible à un public de physiciens non spécialistes du domaine.

Après le succès des trois premières éditions, nous vous attendons nombreux pour échanger dans un environnement stimulant et convivial !

Qui a découvert la fission nucléaire ?

Jacques Treiner (jtreiner@orange.fr)
Ancien professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris

En novembre 1945, l'Académie Nobel attribua le prix de chimie à Otto Hahn pour la « découverte de la fission des noyaux lourds », découverte faite en décembre 1938 à Berlin. Or le prix Nobel aurait dû être attribué conjointement à Lise Meitner, avec laquelle Hahn avait travaillé pendant plus de 30 ans à Berlin.
En effet, si Otto Hahn identifia, en tant que chimiste, la cassure du noyau d'uranium, c'est Lise Meitner qui comprit – avec son neveu Otto Frisch – le processus physique en jeu, et notamment l'origine de l'énergie libérée lors d'une fission.

C'est donc l'occasion de se demander : qui a découvert la fission nucléaire ? Qu'est-ce qu'une découverte ? Qu'est-ce que comprendre ?

Le texte de cet article reprend en grande partie celui paru dans *Le Bup* n° **984** (mai 2016) pp. 621-633.

Le contexte historique de l'attribution du prix

Le jury Nobel se réunit chaque année en automne, publie la liste des récipiendaires en novembre, et la cérémonie de remise a lieu le 10 décembre, date anniversaire de la mort d'Alfred Nobel. En 1945, le jury reconduisit le vote de l'année 1944 pour le prix de chimie. Mais, en 1944, l'annonce n'avait pas été officiellement faite, car l'élu, Otto Hahn, ne pouvait recevoir le prix : Hitler interdisait aux Allemands de le recevoir, depuis qu'un journaliste pacifiste et antinazi déclaré, Karl von Ossietzky, eût reçu le prix Nobel de la Paix en 1936.

En novembre 1945, l'Allemagne nazie était vaincue, et l'annonce du prix pouvait être faite. Mais il fallut encore un an pour qu'Otto Hahn puisse se rendre en Suède et délivrer sa conférence Nobel. De juillet à décembre 1945, il fut en effet retenu en Angleterre, à Farm Hall, un manoir situé près de Cambridge et appartenant à l'Intelligence Service, avec les principaux scientifiques allemands ayant participé, à divers niveaux de responsabilités, au projet allemand de bombe nucléaire. Une mission de renseignement américaine, dénommée Alsos, avait été mise en place en liaison avec le projet Manhattan, dans le but de réunir les informations sur les progrès allemands en matière de construction de réacteur et de bombe. Cette mission, placée sous la responsabilité scientifique du physicien néerlandais Samuel Goudsmit, accompagna les troupes alliées depuis le débarquement en Italie en 1943, réunit les principaux responsables du projet et les transféra d'abord en France, puis en Belgique, et enfin à Farm Hall. L'un des objectifs était tout simplement de les éloigner de la progression des troupes russes. Il s'agissait aussi de déterminer où en était l'état des connaissances des Allemands en matière d'arme nucléaire. C'est la raison pour laquelle les parties communes de Farm Hall furent truffées de microphones. Les principales conversations des « détenus » furent ainsi enregistrées, transcrites puis transférées aux responsables du projet Manhattan. Ces transcriptions, assorties de commentaires extrêmement détaillés d'un physicien nucléaire américain, Jeremy Bernstein, ont été publiées sous le titre *Hitler's Uranium Club*[(a)].

Étaient présents à Farm Hall : Otto Hahn, Walther Gerlach, Werner Heisenberg, Paul Harteck, Carl Friedrich von Weizsäcker, Karl Wirtz, Erich Baage, Horst Korsching, Kurt Diebner et Max von Laue. Leur éventail politique allait de gens proches du régime, tels Gerlach, à d'autres qui le voyaient comme un mal provisoire et peut-être nécessaire, jusqu'à un opposant déclaré comme von Laue. À la lecture de leurs conversations, on les sent inquiets pour leurs familles, incertains sur leur avenir, mais sûrs, au départ, de détenir une monnaie d'échange avec leurs connaissances en physique nucléaire. Alors lorsqu'ils apprennent à la BBC, le 6 août 1945, qu'une bombe d'une puissance inégalée a été larguée sur Hiroshima, ils n'en croient pas leurs oreilles, et, dans les premiers moments, ne peuvent accepter qu'il s'agisse bien d'une bombe atomique. Comment ! Les Américains ont réussi là où ils ont échoué ?! La science allemande, qui avait raflé le tiers des prix Nobel de physique depuis leur création, pilier de la science européenne, donc mondiale, ne pouvait qu'être en avance sur la science américaine, balbutiante dans les grandes avancées du siècle – relativité et mécanique quantique –, et voilà qu'un démenti cinglant et

Otto Hahn et Lise Meitner dans l'Institut de chimie de l'université de Berlin, en 1919.

sanglant les remettait à leur place. Jusque-là, ils étaient vaincus en tant qu'Allemands, ils se découvrent dorénavant vaincus en tant que physiciens : leur monnaie d'échange s'évanouit, les Américains en savent à l'évidence plus qu'eux. Comment se reconstruire ? Comment affronter l'échec ? Au fil des jours, on suit l'évolution de leur état mental.

L'issue viendra de Weiszäcker, descendant d'une lignée prestigieuse de diplomates, qui propose à ses codétenus l'idée que, finalement, s'ils n'ont pas réussi à faire la bombe, c'est qu'ils n'avaient peut-être *pas vraiment* envie de la faire ? N'est-ce pas une chance de ne pas l'avoir faite ? Car, après la fin de la guerre, une fois l'Allemagne réintégrée dans le giron des démocraties, ils pourront se prévaloir d'une position morale forte : eux étaient avec le diable, certes, mais ils ne lui ont pas fourni l'arme terrible qui aurait pu le faire gagner, tandis que leurs collègues travaillant pour les démocraties ont construit cette bombe terrible qui a été larguée sur des civils ! Qui, alors, a le plus de sang sur les mains ? Cette reconstruction morale *a posteriori* – d'abord contestée notamment par le responsable officiel du projet allemand, Walther Gerlach, qui ne supporte pas que l'on mette en doute sa volonté de réussir – sera finalement adoptée par tous, car elle leur permet de gommer un passé dérangeant. Attitude renforcée lorsqu'ils apprennent, toujours à la BBC, que le prix Nobel de chimie est délivré à Otto Hahn, quelques mois après le largage des bombes sur Hiroshima et Nagasaki.

Retour en arrière : l'absorption des neutrons par les noyaux

Ce qui nous amène à reprendre toute l'histoire de la découverte de la fission nucléaire.

Prenons comme point de départ la découverte du neutron par Chadwick, en 1932. Cette découverte ouvrit une perspective nouvelle à la physique nucléaire de l'époque. En effet, on disposait, avec cette particule neutre, d'un outil pour aller explorer au plus près le noyau atomique, puisqu'elle pouvait s'en approcher, jusqu'à y être absorbée, alors qu'un proton ou une particule alpha subit la répulsion coulombienne des protons du noyau. Inspiré par la découverte de la radioactivité artificielle par les Joliot à Paris en 1934, Enrico Fermi constitua à Rome un groupe de jeunes physiciens (Segré, Rasetti, Pontecorvo, Amaldi) qui entreprit de bombarder tous les noyaux de la table des éléments par des neutrons, et de provoquer ainsi des transformations nucléaires. Le neutron peut être absorbé par un noyau de masse atomique A, formant un isotope A+1 dans un état excité. Ce noyau se désexcite soit par émission bêta – auquel cas on obtient un isotope de l'élément suivant du tableau périodique – soit par émission d'une particule alpha – auquel cas on obtient un isotope de l'élément décalé de deux colonnes. Ces transformations peuvent se représenter par les équations suivantes (l'étoile symbolise un état excité, e^- un électron, α un noyau d'hélium)[(b)] :

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X^{\star} \rightarrow {}^{A+1}_{Z+1}Y + e^{-} $$

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X^{\star} \rightarrow {}^{A-3}_{Z-2}Y + \alpha $$

Au cours de ces études, l'équipe se demande quelles sont les meilleures conditions pour que le neutron soit absorbé par un noyau, et pour cela interpose sur le chemin du neutron divers obstacles, de façon à changer sa vitesse. Et un matin, Fermi, qui avait prévu d'interposer une feuille de plomb entre la source de neutrons et le matériau à irradier, est pris d'un mouvement brusque, incontrôlé, non préparé – raconté par la suite comme un de ces moments de jaillissement spontané d'une idée juste – et introduit à la place un bloc de paraffine. À la surprise de toute l'équipe, l'absorption, mesurée par la désintégration des noyaux produits dans la cible, augmente à des taux jamais vus auparavant. Chacun rentre chez soi pour le déjeuner – c'était la règle imposée par « le patron » – et dans l'après midi, Fermi revient avec l'explication : la paraffine contient beaucoup d'hydrogène. Lors des chocs avec ces noyaux légers, le neutron cède peu à peu son énergie, un peu comme, au jeu de boules, une boule cède son énergie lors d'un choc avec une autre boule. En revanche, dans le cas d'un noyau de plomb, d'une inertie beaucoup plus grande, le neutron rebondit élastiquement : il conserve son énergie. Or la longueur d'onde de l'onde quantique associée au neutron est d'autant plus grande que le neutron est lent (c'est la relation de de Broglie $\lambda = h/p$, avec h la constante de Planck et p la quantité de mouvement du neutron), et l'extension spatiale de l'onde est au moins de l'ordre de cette longueur d'onde. En conséquence, le neutron « explore » une plus grande région de l'espace autour de lui lorsqu'il

›››

›››

est lent que lorsqu'il est rapide. Sa probabilité de rencontrer un autre noyau est donc plus grande, et c'est la raison pour laquelle son absorption augmente[c].

Remontant ainsi la table de Mendeleiev, l'équipe de Rome parvient à l'uranium. Fermi pense fabriquer des « transuraniens », qui n'existent pas à l'état naturel, selon le schéma de la première équation ci-dessus, mais l'identification est compliquée. Entre-temps – nous sommes en 1938 – Fermi reçoit le prix Nobel de physique pour l'ensemble de ces études. Il se rend à Stockholm, mais ne revient pas à Rome. Sa femme Laura, d'origine juive, est menacée, et les Fermi décident d'émigrer aux États-Unis. Pendant quelques mois, son activité de recherche est ralentie.

D'autres groupes ont suivi la piste qu'il a ouverte. Notamment Irène et Frédéric Joliot-Curie à Paris, et Lise Meitner et Otto Hahn à Berlin. Ils buttent sur le cas de l'uranium, car ils ont du mal à identifier les noyaux produits. La signature est toujours l'activité nucléaire. Ils identifient ainsi les diverses périodes radioactives qui, en général, se superposent : on peut par exemple se trouver en présence de plusieurs désintégrations bêta en cascade. Il faut donc décomposer le signal en plusieurs exponentielles, avec des temps caractéristiques (durées de vie) distinctes et deviner la nature du noyau père. Comme les nouveaux noyaux sont produits en petite quantité, il faut les concentrer. Diverses méthodes chimiques sont utilisées pour cela, par exemple celle de Marie Curie pour identifier le radium : la cristallisation fractionnée. On dissout la cible à l'aide de différents types de solvants, et on ajoute au mélange un *entraîneur*, susceptible d'« entraîner » une substance chimique appartenant à la même colonne du tableau périodique qu'elle. Lorsque le mélange cristallise, la phase solide et la phase liquide n'ont *a priori* pas la même activité, car l'entraîneur – et donc l'entraîné – ne se répartissent pas de façon égale entre les différentes phases. On conserve alors la phase la plus active, qui concentre le noyau cherché, et on recommence.

La fission de l'uranium

Dans le cas de l'uranium, les noyaux résultant de l'irradiation aux neutrons peuvent être des transuraniens, obtenus par désintégration bêta, ou des noyaux plus légers, obtenus par émission alpha. Or, justement, l'addition de baryum comme entraîneur semble suggérer que l'un des noyaux produits est du radium, qui appartient à la même colonne du tableau. Mais pour cela, il faudrait que le noyau d'uranium intermédiaire formé émette deux alpha : en effet, le noyau de radium possède 88 protons, soit 4 de moins que le noyau d'uranium. Or l'émission alpha procède par effet tunnel sous la barrière coulombienne du noyau – on savait cela depuis 1927, année où Georges Gamow avait proposé cette explication – et un neutron thermique ne peut apporter suffisamment d'énergie d'excitation pour que deux particules alpha franchissent cette barrière.

La situation semble donc inextricable, d'autant que Lise Meitner n'est plus à Berlin en cette fin d'année 1938. Juive d'origine autrichienne, elle n'est plus protégée par sa nationalité depuis que l'Autriche a été annexée par l'Allemagne en mars 1938. Aidée par des amis physiciens hollandais, elle a fui en juillet 1938 un pays où elle a vécu et travaillé pendant 30 ans. Mais elle reste en contact avec Hahn, et pour tenter de démêler l'écheveau de l'uranium, elle le fait inviter par Niels Bohr à Copenhague, où elle se rend elle-même pour le rencontrer le 13 novembre 1938. Bohr partage l'avis de Meitner : l'émission successive de deux particules alpha est très improbable. Une nouvelle série d'expériences est décidée, et Hahn repart pour Berlin. Un mois plus tard, Hahn fait part de sa consternation à Meitner. Malgré tout le soin apporté, il ne parvient pas à séparer du baryum ce qui devrait être des isotopes du radium. « Nos isotopes du radium se comportent comme du baryum » lui écrit-il le 19 décembre. « Nous sommes convenus avec Strassmann [un jeune chimiste qui les

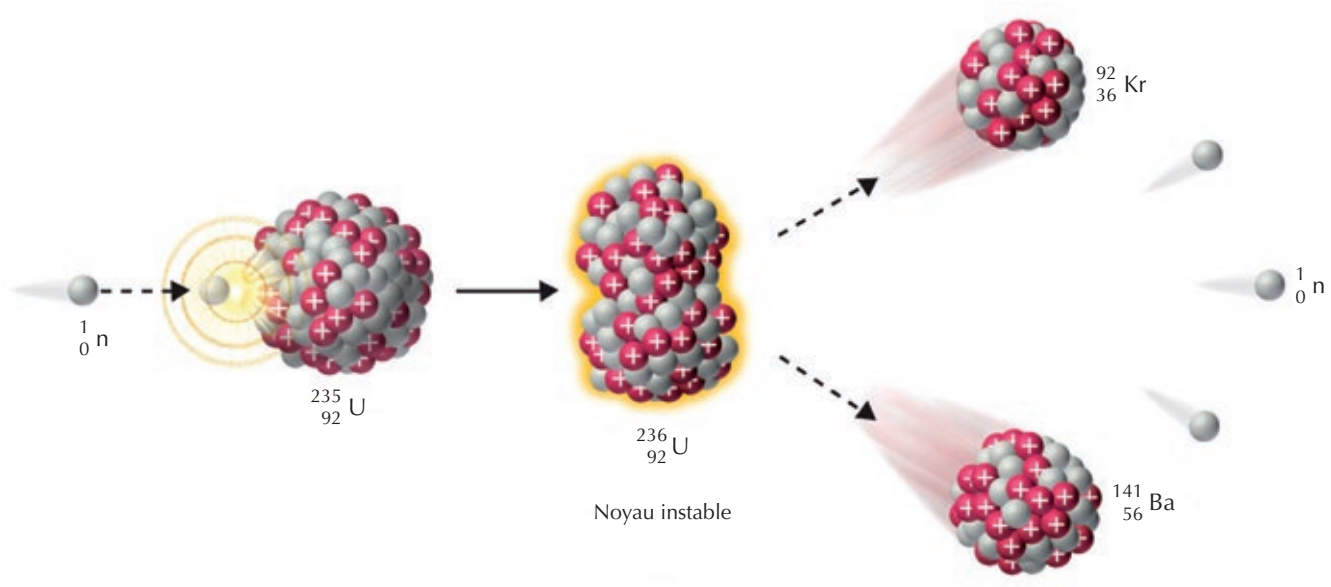


Schéma de la fission nucléaire de l'uranium 235. Un neutron est absorbé par un noyau d'uranium 235, le transformant en un noyau d'uranium 236. Ce dernier, instable, se divise en deux éléments légers (krypton 92 et baryum 141) appelés fragments de fission, et libère trois neutrons. Des rayons gamma de haute énergie (non indiqués sur la figure) sont également produits. (Source : vevansphysics.wikispaces.com)

a rejoint quelques années auparavant] que nous n'allons en parler à personne d'autre qu'à toi. […] Avant que l'Institut ne ferme pour les vacances [de Noël], nous voulons vraiment écrire quelque chose pour *Naturwissenschaften* à propos des supposés isotopes du radium, car nous avons de très belles courbes de décroissance radioactive. Réfléchis à la question de ton côté. Si tu peux trouver une explication publiable – peut-être un isotope du baryum avec une masse atomique très supérieure à 137 ? – ce serait comme si nous travaillions encore tous les trois ensemble. »

La lettre parvient à Meitner le 21, et elle répond immédiatement : « Tes résultats concernant le radium sont très surprenants. Une réaction avec des neutrons lents qui conduirait à du baryum ! […] L'hypothèse d'une rupture du noyau aussi importante me paraît très difficile à tenir aujourd'hui, mais nous avons rencontré de telles surprises en physique nucléaire qu'on ne peut pas dire de façon certaine : c'est impossible. » Hahn reçoit cette lettre encourageante le 23, le lendemain du jour où il a déposé un article à la revue. Cet article est d'une construction inhabituelle. Après avoir décrit leurs expériences, Hahn donne une première interprétation en termes de formation d'isotopes du radium. Puis, aux deux tiers de l'article, changement brutal : après avoir décrit à nouveau la méthode de cristallisation fractionnée, Hahn explique qu'ils ne parviennent à obtenir aucun enrichissement. La conclusion qui en découle, présentée « avec hésitation » en raison de son caractère « étrange », est la suivante : « En tant que chimistes, nous devrions dire en fait que les nouveaux produits ne sont pas du radium, mais du baryum, car des éléments autres que le radium et le baryum sont hors de question. » Plus loin, il reprend l'argument en le plaçant dans un contexte plus large : « En tant que chimistes, nous devrions vraiment réviser le schéma de désintégration présenté ci-dessus. […] Cependant, en tant que chimistes nucléaires, travaillant à proximité du champ de la physique, nous ne pouvons nous résoudre à franchir un pas aussi crucial, qui vient contredire toute l'expérience passée de la physique nucléaire. Il se pourrait qu'une série de coïncidences inhabituelles nous ait mis sur une fausse piste. » Après réception de la lettre de Meitner, il a téléphoné au directeur de la revue pour lui demander de rajouter un paragraphe où il donne plus de corps à l'hypothèse du baryum. L'origine de la prudence de l'article de Hahn et Strassmann est donc clairement identifiée : aucun physicien de l'époque n'a imaginé, depuis que ces expériences de capture neutronique ont été développées, qu'un neutron pouvait conduire à la rupture du noyau atomique. L'explication va venir de Lise Meitner et de son neveu Otto Frisch. L'épisode est connu dans ses détails, car il a été raconté par Frisch lui-même dans son livre de mémoires, *What little I remember*.

L'ancien Institut de chimie Kaiser-Wilhelm à Berlin, fondé en 1912, où la fission nucléaire a été découverte en 1938.

Frisch, jeune physicien, fait un séjour à Copenhague, et rend visite à sa tante en Suède à Noël. Il la trouve absorbée par la lettre de Hahn du 19 décembre faisant état du baryum. Sa première réaction est sceptique. Mais Meitner lui assure que Hahn est trop bon chimiste pour s'être trompé dans l'identification du baryum. Tout en continuant de discuter, ils sortent faire une promenade dans la neige, lui à ski de fond, elle à pied. Évoquant les différents mécanismes possibles, ils explorent l'image de Bohr, selon laquelle le noyau est comme une goutte liquide chargée. « Nous savions, se souvient-il, que des forces intenses s'opposeraient à une telle évolution, comme la tension superficielle d'un liquide ordinaire s'oppose à sa fragmentation en gouttelettes plus petites. Mais les noyaux différaient de gouttes ordinaires par un aspect important : ils étaient électriquement chargés, et il était connu que cela diminue l'effet de la tension superficielle. À ce moment nous nous arrêtâmes et nous assîmes sur un tronc d'arbre et nous mîmes à faire quelques calculs sur un morceau de papier. Il nous apparut que la charge du noyau d'uranium était suffisante pour annuler presque complètement l'effet de la tension superficielle, de sorte que le noyau pouvait se présenter comme une goutte d'une forme molle, instable, prête à se diviser en deux à la moindre pichenette (comme l'impact d'un neutron). Mais il y avait un autre problème. Lorsque les deux gouttelettes se formaient, elles se repoussaient fortement à cause de leur charge électrique, et acquéraient ainsi une grande énergie, environ 200 MeV au total ; d'où venait l'énergie ? Heureusement, Lise Meitner se rappelait comment calculer la masse des noyaux à partir de ce qu'on appelle la formule de masse, et de cette façon elle trouva que la masse des deux fragments serait plus petite que celle du noyau d'uranium initial d'une quantité égale à environ le cinquième de la masse du proton. Or, à chaque fois que de la masse disparaît, de l'énergie apparaît, selon la formule d'Einstein $E = mc^2$, et un cinquième de la masse du proton correspond justement à 200 MeV. C'était donc là l'origine de l'énergie, tout concordait. »

Deux jours plus tard, Frisch retourne à Copenhague et raconte à Bohr en quelques mots ce que Lise et lui viennent d'imaginer. « Quels idiots avons-nous tous été, commente Bohr en se frappant le front ! Mais c'est magnifique ! Pas de doute, il faut bien qu'il en soit ainsi ! Avez-vous déjà écrit un article sur le sujet ? » Frisch et Meitner se mettent au travail, affinant le texte lors de longues conversations téléphoniques. Parlant avec un biologiste, Frisch lui demande comment s'appelle le processus

›››

›››

par lequel une cellule se divise en deux. « La fission », répond celui-ci. C'est ainsi que le terme « fission nucléaire » fut introduit dans l'article, puis universellement accepté. Quelques semaines plus tard, tous les groupes qui, de par le monde, travaillaient sur cette physique avaient confirmé les résultats du groupe de Berlin et accepté l'interprétation de Meitner et Frisch.

Qu'est-ce que « comprendre » ?

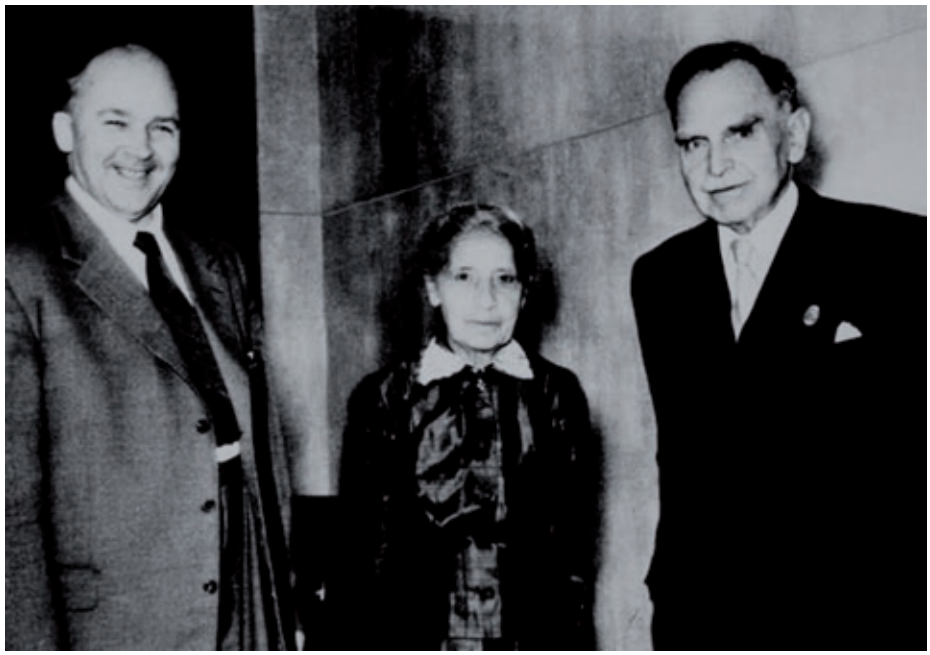
Nous pouvons à présent aborder notre interrogation initiale : qui a découvert la fission nucléaire ?

On pourrait dire que la fission est découverte lorsqu'on s'aperçoit que l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium produit un noyau de baryum. Mais, au sens strict, ce qui est observé, c'est l'impossibilité d'identifier – au moyen de la technique d'entraînement décrite plus haut – un autre noyau que le baryum. Cette impossibilité est *interprétée* comme une cassure du noyau d'uranium. Mais Hahn lui-même, dans son article, évoque la possibilité de « coïncidences inhabituelles », et demande à Meitner de trouver une *explication* quelconque : il n'est donc pas absolument sûr de ce qu'il a observé car il n'en a pas l'explication !

Le malaise que l'on perçoit chez Hahn n'est pas anodin, il renvoie à la nature même du travail scientifique, qui ne consiste pas à accumuler des « faits », mais bien à concevoir des « explications » qui légitiment les faits. L'expérimentation et l'observation viennent faire le tri entre les diverses explications possibles d'un phénomène. Il peut certes s'écouler beaucoup de temps entre la formulation d'une conjecture théorique et le verdict de l'expérience – laquelle, bien sûr, appelle d'autres conjectures. L'observation des satellites de Jupiter par Galilée en 1610 confirme à ses yeux la vision héliocentrique de Copernic publiée en 1543. La découverte de la supraconductivité en 1911 par Gilles Holst au laboratoire de Kammerlingh Onnes ne recevra d'explication qu'en 1956 par la théorie BCS[d], mais il s'agissait à l'époque de répondre à la question : comment un métal conduit-il l'électricité à très basse température[e] ? Dans le cas de la fission, quelques jours seulement ont séparé l'observation de Hahn et Strassmann de l'explication de Meitner et Frisch.

Une explication permet de créer une représentation abstraite de la réalité, qui fonctionne… comme la réalité. En ce sens, comprendre, c'est être capable de recréer le monde par la pensée. Une bonne explication – une bonne théorie, si l'on préfère – doit répondre à trois critères :

1. Elle doit s'appliquer au plus grand nombre de phénomènes possible, en les mettant en relation les uns avec les autres.
2. Elle doit permettre de faire des prédictions testables.
3. Elle doit être difficile à modifier.



Fritz Strassmann, Lise Meitner et Otto Hahn (de gauche à droite).

Illustrons ces trois conditions avec le cas de la fission.

En expliquant l'origine de l'énergie cinétique des fragments de fission par la perte de masse, selon la formule d'Einstein, Meitner et Frisch réalisent une synthèse d'autant plus convaincante qu'elle est inattendue. Un tel accord ne peut être fortuit, il rapproche l'inconnu du connu en unifiant deux secteurs de la physique, sans qu'il soit nécessaire d'inventer un mécanisme spécifique. Il permet aussi de considérer l'émission alpha comme une fission... très asymétrique.

Le deuxième critère est rempli une première fois quelques jours seulement après la discussion de Meitner et Frisch : l'observation directe par Frisch des fragments de fission animés de grandes vitesses. Mais d'autres conséquences plus subtiles suivront bientôt, comme la compréhension par Bohr du fait que c'est l'uranium 235 qui fissionne sous l'effet des neutrons lents, pas l'uranium 238. Détaillons un peu ce point.

Lorsqu'un noyau se déforme, son énergie de surface augmente et son énergie coulombienne diminue (car les protons sont en moyenne plus éloignés les uns des autres que dans une configuration compacte). Pour de petites déformations, c'est l'énergie de surface qui l'emporte, et c'est ce qui stabilise le noyau et l'empêche de se fragmenter. Mais pour de larges déformations, la diminution de l'énergie coulombienne finit par l'emporter, car elle varie comme le carré du nombre de charges. Il existe donc une « barrière de fission », de quelques MeV, que le noyau doit traverser pour fissionner. Considérons à présent le cas de l'uranium. L'uranium 236 qui résulte de l'absorption d'un neutron par l'uranium 235 est un noyau pair-pair, alors que l'uranium 239 est un noyau pair-impair. Or un noyau pair-pair a une énergie de liaison plus grande qu'un pair-impair, donc l'énergie d'excitation de l'uranium 239 est inférieure à celle de l'uranium 236. Les quelques MeV de différence suffisent pour que l'uranium 239 ne puisse traverser la barrière et fissionner ! Lorsqu'il absorbe un neutron, il subit deux désintégrations bêta qui conduisent à un noyau de plutonium 239.

Le troisième critère d'une bonne théorie est bien rempli. Il est impossible de trouver une explication du phénomène de fission qui s'intègre de façon aussi harmonieuse à tout ce que l'on sait déjà, tout en prévoyant des phénomènes nouveaux confirmés par l'expérience.

Conclusion

Ces considérations conduisent à s'interroger sur la non-attribution du prix Nobel de physique à Lise Meitner. Son rôle déterminant dans toutes les phases préparatoires de la découverte, et son rôle non moins déterminant dans la compréhension du phénomène ne font aucun doute. D'ailleurs Bohr lui-même a fait tout ce qui était en son pouvoir pour tenter, sans y parvenir, de convaincre l'Académie Nobel de lui attribuer le prix, et ceci pendant plusieurs années après l'attribution du prix Nobel de chimie à Otto Hahn. Comment expliquer une telle injustice ? Nous n'aborderons pas ici cette question, qui relève plus de la sociologie, voire de la politique, que de la science…

Hahn, Strassmann et Meitner finiront par recevoir ensemble, en 1966, la plus haute distinction délivrée par le Département de l'énergie des États-Unis (le DOE), le prix Enrico Fermi. Hahn et Meitner sont cités pour « leurs recherches pionnières dans l'étude de la radioactivité naturelle et leurs intenses études expérimentales culminant avec la découverte de la fission ». Ce prix est d'habitude délivré lors d'une cérémonie qui se tient à Washington. Mais ni la santé de Meitner ni celle de Hahn ne leur permettaient de faire ce déplacement (ils avaient alors plus de 85 ans). Il fut décidé que la cérémonie aurait lieu à Vienne, et que Glenn Seaborg, alors président du DOE, se déplacerait pour remettre le prix. Mais Meitner ne put s'y rendre, et ce fut Frisch qui vint à sa place. Meitner écrivit à Hahn qu'elle était heureuse pour lui et Strassmann, mais qu'elle éprouvait quant à elle des sentiments contradictoires, tout en ressentant une « forme de plaisir ». « Pourquoi seulement une forme de plaisir ? », demanda Hahn à Frisch. Pensait-elle avoir quitté Berlin trop tôt ? Pas du tout, répondit Frisch. Elle avait des sentiments contradictoires à cause de la bombe. ▮

(a) La pièce *Fission*, jouée au théâtre de la Reine Blanche du 8 avril au 22 juin 2016, retrace cet épisode, en le replaçant dans le contexte de la découverte de la fission nucléaire et de la fission de la communauté des physiciens européens consécutive à l'arrivée au pouvoir des Nazis.

(b) L'antineutrino émis lors de la première réaction n'est pas représenté ici (il n'était pas connu à l'époque).

(c) D'où l'importance de la distinction entre neutrons lents, « thermiques », c'est-à-dire dont l'énergie cinétique correspond à l'agitation à la température ambiante, et neutrons « rapides », tels qu'ils émanent d'une transformation nucléaire. Un autre phénomène viendra ensuite compléter cette première explication, lorsqu'on s'aperçoit que l'absorption des neutrons lents est très sélective. Le noyau A+1 comporte des états excités de basse énergie, appelés résonances de neutron ; et lorsque le neutron incident possède l'énergie correspondant à l'une de ces résonances, la section efficace de capture devient très grande.

(d) Bardeen, Cooper et Schrieffer.

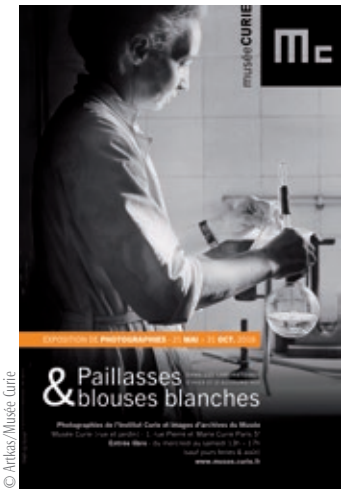
(e) On pouvait penser que la résistivité augmenterait à l'infini car, à basse température, les électrons ne pourraient plus quitter les atomes ; ou que la résistivité s'annulerait car l'agitation thermique ne viendrait plus gêner le mouvement des électrons. Il est intéressant de constater que la découverte de la supraconductivité ne valut pas de prix Nobel à son découvreur, tandis que la théorie BCS fut, elle, récompensée.

Bibliographie

- O. Hahn et F. Strassmann, "Concerning the Existence of Alkaline Earth Metals Resulting from Neutron Irradiation of Uranium", traduction de l'article original de janvier 1939, dans *American Journal of Physics* (janvier 1964), pp. 9-15.
- O. Frisch, *What little I remember*, Cambridge Paperbacks (1979), Canto (1991).
- R. Lewin Sime, *Lise Meitner, A life in physics*, University of California Press (1996).
- B. Fernandez, *De l'atome au noyau*, Ellipses (2006).
- O. Treiner et J. Treiner, *Fission* (2008), Éditions Nucléon.

Paillasses et blouses blanches
Dans les laboratoires d'hier et d'aujourd'hui

Exposition de photographies, du 21 mai au 31 octobre 2016
Musée Curie, 1 rue Pierre-et-Marie-Curie, Paris 5e



© Artlas/Musée Curie

Donner l'impression de pousser la porte des laboratoires d'hier et d'aujourd'hui, de s'immerger dans leur intimité, c'est le sujet de l'exposition temporaire 2016 du Musée Curie. Elle présente 65 photographies inédites sur l'univers des paillasses, passé et présent. Une rétrospective photographique d'un siècle de recherche. Un voyage visuel dans le quotidien des blouses blanches.

À découvrir sous les tilleuls de Marie Curie, dans le jardin du musée, 35 photographies d'archives qui dévoilent ce qui se passait derrière les murs des pavillons entourant ce jardin, là où Marie Curie, Irène et Frédéric Joliot-Curie avaient leurs laboratoires et où aujourd'hui des chercheurs de l'Institut Curie continuent leur œuvre.

Une série de 30 photographies est accrochée sur les grilles du musée, rue Pierre-et-Marie-Curie. On y découvre l'univers des chercheurs du 21e siècle. L'Institut Curie, centre de recherches de renommée internationale, rassemble plus de 1100 collaborateurs dont les travaux visent à comprendre le fonctionnement complexe de la cellule normale ou cancéreuse pour initier des pistes thérapeutiques innovantes contre le cancer.

Ces images, rarement diffusées, mettent en lumière le travail des chercheurs et devraient susciter l'intérêt des jeunes.

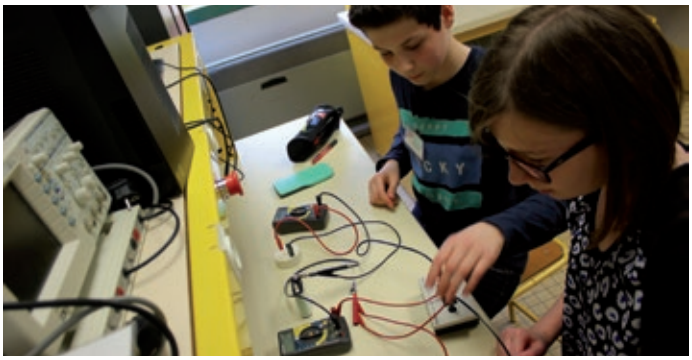
Le concours D'Ampère à Volta

En 2008, face à la désaffection des élèves envers les sciences, une équipe d'enseignants de Saint-Quentin crée le concours « D'Ampère à Volta ». Elle propose ainsi aux élèves des classes de quatrième sélectionnés de se défier sur des épreuves de travaux pratiques (TP). Cette initiative contribue à la promotion des sciences et techniques auprès du jeune public. Suite au succès de la première édition, l'association Ampère à Volta[(a)] est créée et propose depuis, chaque année, une nouvelle édition de son concours. Le concours D'Ampère à Volta[(b)] est soutenu par la Société Française de Physique.

Tous les ans, les sélections se déroulent au cours de la Fête de la science courant octobre, grâce à un questionnaire à choix multiple (QCM) envoyé à tous les collèges de l'Aisne et à quelques collèges des autres départements picards. Les questions portent sur les connaissances théoriques de physique, chimie et technologie. Les deux élèves de chaque établissement ayant obtenu les meilleurs résultats sont qualifiés pour représenter leur établissement lors de l'épreuve pratique.

Celle-ci réunit tous les participants un mercredi après-midi. Les équipes tirent au sort le jour même un sujet de TP parmi des sujets d'électricité, d'optique, de mécanique, de technologie ou de chimie. Un second temps fort de cet après-midi est de proposer une animation à caractère scientifique qui valorisera les sciences et l'association qui y participe. Ainsi cette année, l'association d'astronomie Repères[(c)] présentait un planétarium. La moitié des participants concourt pendant une heure, pendant que l'autre moitié profite de l'animation.

Les élèves sont essentiellement évalués sur leurs capacités expérimentales et leur aptitude à travailler ensemble en respectant le protocole donné. Ces épreuves expérimentales sont novatrices, car elles permettent aux élèves d'utiliser leurs compétences dans une pratique différente de celles rencontrées en classe. Les sujets sont volontairement d'un niveau élevé, pour permettre de départager les meilleures équipes.



Deux des participants concourent sur un TP d'électricité.

L'investissement de tous les bénévoles de l'association permet de clôturer cet après-midi scientifique par l'annonce du classement et la remise des récompenses aux lauréats. Cette dernière étant rendue possible grâce aux partenariats qui se sont construits au cours des années, les trois premiers binômes repartent avec des coupes, des livres, des places de spectacles... et peut-être une future vocation !

En une décennie, le concours est devenu un rendez-vous incontournable pour les élèves et les enseignants de physique, chimie et technologie. Le nombre de participants est ainsi passé de 20 à 58 élèves. Cette action a pour but de promouvoir les sciences et techniques auprès d'un jeune public. C'est pourquoi les membres de l'association Ampère à Volta investissent toute leur énergie à transmettre leur passion des sciences. ▮

Cédric Détré (cedric.detre@free.fr)
Professeur au lycée Henri Martin de Saint-Quentin.

(a) « Ampère à Volta » (www.ampere-volta.com) est une association de type loi 1901, créée en 2008 à l'initiative de deux professeurs de sciences physiques, Fabrice Dupuy et Cédric Détré.
(b) Pour tout renseignement sur le concours, contacter le coordonnateur et responsable administratif, Jean-Philippe Joannes (Jean-Ph.Joannes@ac-amiens.fr), Collège Marthe Lefèvre, avenue Pierre Choquart, 02100 Saint-Quentin.
(c) L'association Repères (Réseau d'échanges et de partages d'éducation et de recherches pour l'environnement et les sciences, www.reperes-astro.fr) est une association d'astronomie amateur, fondée à Vendeuil-Caply, dans le nord de l'Oise.

L'ensemble des participants de la finale 2016 à l'Espace scolaire Condorcet de Saint-Quentin.

Les vainqueurs de cette édition 2016 : Théo Basol et Corey Salesse, du collège Victor Hugo à Ham, dans la Somme.

2016 : 50e anniversaire du prix Nobel de physique décerné à **Alfred Kastler**

© ENS

En 1966, Alfred Kastler reçoit le prix Nobel de physique pour ses recherches et sa méthode permettant de contrôler l'état des atomes à l'aide de la lumière : « le pompage optique ». En 2016, le laboratoire Kastler Brossel (CNRS/ENS/UPMC/Collège de France) rend hommage à l'homme de science, poète et humaniste, profondément attaché à la transmission des savoirs et des connaissances et militant en faveur de la construction européenne civile et scientifique.

Né le 3 mai 1902 à Guebwiller, dans une Alsace alors allemande, Alfred Kastler entre à l'École normale supérieure (ENS) à Paris en 1921, où il étudie la physique. Agrégé, il enseigne plusieurs années dans divers lycées avant de poursuivre dans l'enseignement supérieur et de préparer parallèlement une thèse d'État, soutenue en 1936. Au cours de ce travail, A. Kastler cherche à mesurer les échanges de moment cinétique entre la lumière polarisée et les atomes et, dès lors, maîtrise les idées essentielles qui le conduiront quinze ans plus tard à inventer le « pompage optique », pour lequel il recevra le prix Nobel de physique. Sa thèse obtenue, il est nommé maître de conférences à l'université de Clermont-Ferrand, puis professeur à celle de Bordeaux avant de rejoindre Paris au titre de professeur à l'ENS et à l'université. Il y restera jusqu'à la fin de sa carrière en 1972.

Un physicien précurseur

Dès les années 1950, ses idées novatrices et ses travaux, en particulier sur le pompage optique qui permet de contrôler le moment cinétique des atomes par l'action de la lumière polarisée circulairement, renouvellent profondément la physique atomique. Ils ouvrent de nouvelles perspectives scientifiques, établissant ainsi les fondements des recherches actuelles sur les lasers et l'interaction lumière/matière. L'équipe qu'il forme avec Jean Brossel, son étudiant et plus proche collaborateur à l'ENS, ainsi qu'avec leurs collègues français et étrangers, acquiert progressivement une reconnaissance mondiale, couronnée de nombreuses distinctions, dont le prix Nobel en 1966.

Dans leur grande majorité, les applications fondamentales du pompage optique ont contribué à une meilleure connaissance des structures internes des atomes ou de leurs interactions. Parmi les applications techniques qui en découlent, notons la construction de standards de fréquence ou d'horloges de haute précision avec des atomes froids, la mise au point de magnétomètres très précis couramment utilisés en géophysique, ou les applications médicales en imagerie par résonance magnétique (IRM) grâce à l'utilisation de gaz d'hélium 3 fortement polarisé par pompage optique.

Alfred Kastler, l'humaniste engagé

Physicien et enseignant hors pair, il n'a de cesse d'œuvrer pour la paix, la défense des droits de l'homme et la solidarité envers le tiers-monde. Également poète de langue allemande, il s'est engagé pleinement dans la construction d'une Europe civile et scientifique, n'hésitant pas à prendre position publiquement. C'est à cette personnalité plurielle et remarquable que rend hommage cette année le laboratoire qui porte son nom.

Contacts

Marie Signoret
Communication de l'Institut de physique du CNRS (marie.signoret@cnrs-dir.fr)
Delphine Charbonneau
Communication du LKB (delphine.charbonneau@lkb.ens.fr)

Manifestations pour découvrir Alfred Kastler en 2016

- **Une exposition** « ***Kastler, un physicien humaniste*** »,
  du 10 octobre au 31 décembre,
  Hall d'entrée du Département de physique de l'École normale supérieure, 24 rue Lhomond, Paris 5e
  Bibliothèque des sciences expérimentales de l'ENS, 29 rue d'Ulm, Paris 5e.
- **La fête de la science,**
  les 15 et 16 octobre,
  Université Pierre et Marie Curie - 4 place Jussieu, Paris 5e.
  L'expérience de résonance optique qu'Alfred Kastler utilisait en support de cours à ses étudiants sera reproduite.
- **Un symposium scientifique international,**
  le 1er décembre 2016
  ENS Paris,
  pour faire le point sur les avancées scientifiques majeures issues du travail d'Alfred Kastler, réunissant de grands noms de la physique quantique mondiale.

Voir également l'ouvrage de Bernard Cagnac, *Alfred Kastler, portrait d'un physicien engagé*, préfacé par Claude Cohen-Tannoudji, paru en 2013 aux éditions Rue d'Ulm.

Informations

Toutes les informations sont sur le site dédié au 50e anniversaire du prix Nobel de physique décerné à Alfred Kastler (programme des célébrations, expérience de résonance optique, vidéos d'archives...), à l'adresse : www.alfredkastler.fr .

Site LKB : www.lkb.science - Site ENS : www.ens.fr/actualites/agenda/

Prix **Jeune chercheur Saint-Gobain 2014** : **Pol Grasland-Mongrain**

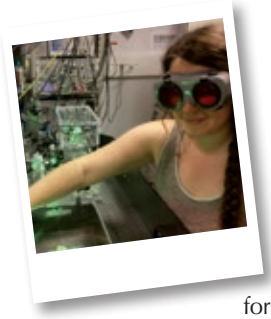
Titre de la thèse : **Applications de la force de Lorentz en acoustique médicale**, préparée au laboratoire Thérapie et applications des ultrasons (Lyon) sous la direction de Cyril Lafon, et soutenue le 12 décembre 2013.

Ancien élève de l'ENS Cachan, Pol Grasland-Mongrain travaille sur les nouvelles techniques multiphysiques d'imagerie médicale.

Au cours de sa thèse, il a utilisé la force de Lorentz de manière très originale, puisque la génération de courant électrique par déplacement mécanique est appliquée dans un premier temps pour réaliser des hydrophones permettant de mesurer des champs ultrasonores de très forte amplitude et résistant aux phénomènes de cavitation bien connus dans le domaine de la thérapie ultrasonore. La force de Lorentz a ensuite été adoptée pour proposer une méthode intéressante d'imagerie d'impédance électrique. Enfin, la génération d'un déplacement mécanique par la circulation d'un courant électrique dans un champ magnétique a été choisie pour créer des ondes de cisaillement dans les tissus mous et ainsi proposer une technique d'imagerie ultrasonore d'élasticité par force de Lorentz.

Pol Grasland-Mongrain a ainsi abordé le domaine de l'instrumentation en ultrasons biomédicaux par une approche sortant des sentiers battus et utilisant des concepts de physique fondamentale encore peu employés dans le domaine de l'imagerie ultrasonore.

Il est actuellement en séjour de recherche postdoctoral au Canada, au Centre hospitalier de l'université de Montréal.



Prix **Jeune chercheur Daniel Guinier 2014** : **Pauline Comini**

Titre de la thèse : **Étude de la formation d'antihydrogène neutre et ionisé dans les collisions antiproton-positronium**, préparée au Service de physique des particules du CEA-Saclay sous la direction de Paul-Antoine Hervieux et Yves Sacquin, et soutenue le 23 octobre 2014.

Pauline Comini a réussi le tour de force, en collaborant avec trois équipes différentes, de contribuer significativement sur tous les aspects reliés à l'expérience GBAR (pour Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest). Cette expérience consiste à déterminer l'effet de la gravité terrestre sur la trajectoire d'atomes d'antihydrogène subissant une chute libre.

Sur le plan théorique, les calculs de sections efficaces qu'elle a menés en faisant l'acquisition en profondeur d'une méthode de calcul ardue, lui ont permis de proposer une amélioration significative de la stratégie expérimentale envisagée par la collaboration GBAR. Cette amélioration a été obtenue grâce à la mise au point de simulations de différentes configurations, portant notamment sur le design de la chambre de réaction.

Sur le plan expérimental, sa contribution est également très significative puisqu'elle a conçu et mis en œuvre un laser dédié à l'excitation du positronium dans l'état 3D, dont elle a montré théoriquement l'intérêt pour produire des atomes d'antihydrogène. Son jury a souligné le caractère exceptionnel de la richesse des résultats obtenus.

Pauline Comini effectue actuellement un stage postdoctoral au Laboratoire de physique des particules élémentaires de l'ETH Zurich.

Prix **Jeune Chercheur René Pellat 2014** (physique des plasmas) : **Ilya Marinov**

Titre de la thèse : **Plasmas dans l'eau et aux interfaces**, préparée au Laboratoire de physique des plasmas (École polytechnique, Palaiseau) sous la direction d'Antoine Rousseau et Svetlana Starikovskaïa, et soutenue le 2 décembre 2013.

Lors de la première partie de sa thèse, Ilya Marinov a étudié la génération et la propagation de plasmas impulsionnels nanosecondes dans l'eau. Il a mis en place le dispositif expérimental. Par imagerie et spectroscopie nanoseconde, il a ainsi pu caractériser, et c'est une première, les mécanismes d'initiation de la décharge en phase condensée. Il a pu montrer que, sur des temps caractéristiques aussi courts que la nanoseconde, le plasma est créé directement dans un milieu dense. Les pressions initiales sont extrêmement élevées, de l'ordre du GPa, ce qui conduit à des plasmas « froids » très particuliers.

En parallèle, Ilya Marinov a travaillé sur les applications biomédicales des plasmas, avec deux équipes de biologistes et de médecins. Il a été moteur pour débuter deux collaborations avec le milieu biomédical, l'une avec une équipe de l'Hôpital Saint-Louis sur les potentialités de traitements dermatologiques par plasma, et l'autre avec une équipe de l'Institut Gustave Roussy, sur la réaction cellulaire à l'exposition à un plasma.

À la suite de sa thèse, Ilya Marinov a travaillé comme post-doctorant dans un laboratoire de recherche de l'Institut Gustave Roussy (Villejuif). Il enseigne maintenant le management de l'innovation dans la Grande école d'économie de Saint-Pétersbourg.

Prix Yves Rocard 2015 de la Société Française de Physique

Imagerie en rayons X à comptage de photons avec sélection de l'énergie

© CPPM

De gauche à droite : Yves Farge (président du jury), Pierre Delpierre, Michel Spiro (président de la SFP), Bernard Dinkespiler, Christian Morel et Marc Stehle (SFP).

Le prix Yves Rocard 2015 a été remis le jeudi 24 mars 2016, au Palais de la découverte à Paris, par Michel Spiro, président de la SFP, à l'occasion de la journée « Inventeurs à l'honneur ». Les lauréats, Pierre Delpierre, Bernard Dinkespiler et Christian Morel, sont récompensés pour le développement de « détecteurs de rayons X à comptage de photons avec sélection d'énergie » au Centre de physique des particules de Marseille (CPPM, UMR 7346 du CNRS et d'Aix-Marseille Université), et pour le succès du transfert de technologie entre le laboratoire et la société imXPAD.

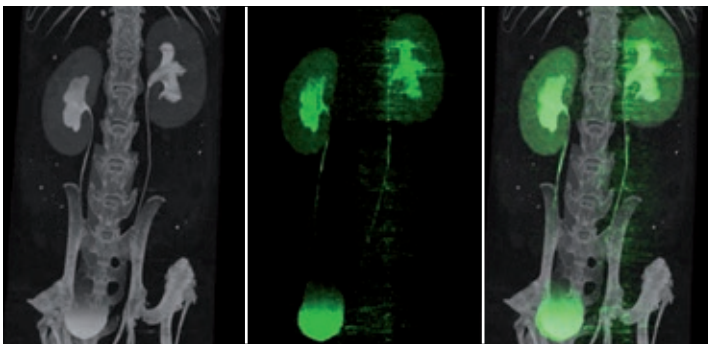
Le jury était composé de représentants de l'Académie des technologies, du CNRS, du CEA, de l'université Paris 6 et de la SFP, dont plusieurs dotés d'expériences industrielles. Les lauréats, tous trois du CPPM, sont Pierre Delpierre, initiateur du concept et du développement de détecteurs à pixels hybrides, Bernard Dinkespiler, chef de projet électronique au CPPM, et Christian Morel, responsable du groupe d'imagerie X et gamma « imXgam » et professeur à l'université Aix-Marseille.

Ces détecteurs à pixels hybrides (ou caméras X) possèdent une propriété unique : la capacité de chacun des pixels à compter les photons en ne prenant en compte que ceux qui donnent une impulsion correspondant à l'énergie désirée. Ceci donne la possibilité de faire des images d'un élément chimique seul, sélectionné par ses propriétés atomiques (seuil d'absorption K), de supprimer le bruit parasite et d'améliorer considérablement le contraste des images. (La sélection de l'énergie de la lumière est impossible avec les imageurs actuels, car ils accumulent cette énergie avant de la numériser.)

Développés initialement pour les expériences de physique des particules (expérience ATLAS au LHC) et les synchrotrons (fig. 1), les détecteurs à pixels hybrides à base de silicium et de tellurure de cadmium ont, depuis, engendré des caméras autorisant une nouvelle approche d'imagerie tomographique des petits animaux (fig. 2). Dans le futur, la technologie équipera une nouvelle génération de scanners médicaux capables de distinguer plusieurs agents de contraste (iode, gadolinium ou nanoparticules d'or), tout en imageant simultanément l'anatomie du patient.

La société imXPAD a été créée en 2010 par B. Dinkespiler (premier président) et P. Delpierre (PDG actuel), avec la contribution des autres actionnaires fondateurs. Sur la base de deux brevets, le service de valorisation du CNRS a apporté son soutien à cette *startup via* l'incubateur local IMPULSE. La société a déjà vendu plus de vingt détecteurs, et une levée de fonds de 0,6 M€ est en cours afin de poursuivre son développement. Le chiffre d'affaires de la société imXPAD s'est élevé à 0,8 M€ en 2015 et devrait doubler en 2016.

1. Détecteur « XPAD-WOS », fabriqué par la société imXPAD et installé sur la ligne D2AM du synchrotron de l'ESRF (Grenoble). D2AM est un CRG français consacré à la diffraction et la diffusion anomales de rayons X multilongueurs d'onde.

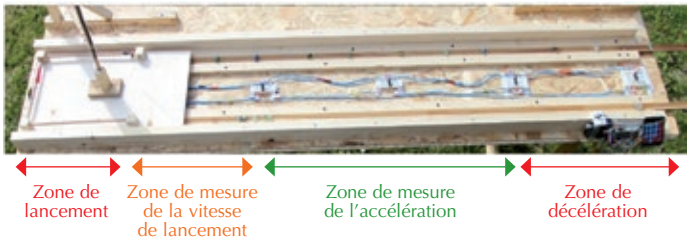


2. Projections du maximum d'intensité (MIP) d'une souris marquée à l'iode, calculées à partir (à gauche) d'une tomodensitométrie à comptage de photons classique et (au centre) d'une image au seuil d'absorption K de l'iode acquise avec des pixels composites permettant d'identifier l'accumulation de l'iode dans les reins de la souris et son excrétion par les uretères vers la vessie. À droite : superposition des deux MIP.
(Source : thèse de Carine Kronland-Martinet, CPPM, 2015.)

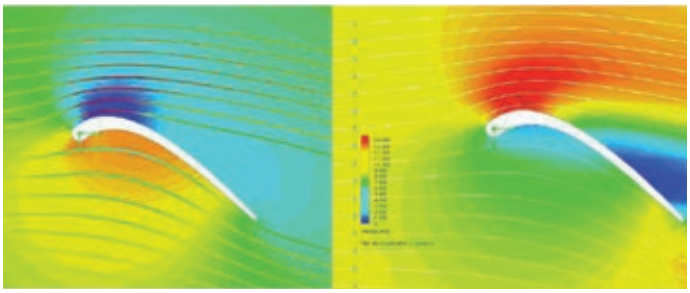
Olympiades de Physique France
XXIII[e] concours national

© Olympiades de Physique France
La marraine Françoise Combes visite les stands.

C'est en acceptant l'invitation de Loïc Auvray(*), et avec l'active collaboration de François Gallet (directeur de l'UFR de physique du laboratoire Matière et systèmes complexes), que la finale du concours a été accueillie par l'Université Paris-Diderot, les 29 et 30 janvier 2016. Cette 23[e] édition du concours national, qui a rassemblé 25 équipes sélectionnées en France et dans les établissements français de l'étranger grâce à l'implication de l'AEFE (Agence pour l'enseignement français à l'étranger), a été parrainée par Françoise Combes, membre de l'Académie des sciences, professeure au Collège de France.



Lycée Gustave Eiffel : maquette de la voile et des capteurs.


Pression et lignes de courant — Vitesse et lignes de courant

Lycée Gustave Eiffel : simulation de voile idéale

Bon parcours pour une équipe lauréate des XXII[es] Odpf

L'équipe du lycée La Mennais de Guérande, lauréate des XXII[es] Odpf, dont nous avions relaté le projet dans notre compte-rendu de l'an dernier (*Reflets de la physique* **44-45** (2015) 8), a participé au concours international Intel ISEF de Pittsburgh. Sous le titre : "Detection of cosmic particles using balloons", issu du développement du projet d'Olympiades « 32 km en ballon », l'équipe a obtenu un "Special Award" de l'association d'astronomie de l'Amérique et du Pacifique.

(*) Tristement disparu peu après et auquel nous rendons hommage page 41.

Nous présentons ici deux projets, sur lesquels les équipes ont effectué un magnifique travail expérimental, et qui ont été couronnés d'un premier prix. On rappelle que le jury favorise l'originalité de la démarche, le soin accordé aux réalisations expérimentales, la rigueur des conclusions et la qualité de la présentation et des démonstrations effectuées devant lui.

La totalité des mémoires est accessible à l'adresse : www.odpf.org/archives.html .

Les voiliers, plus rapides que le vent ?

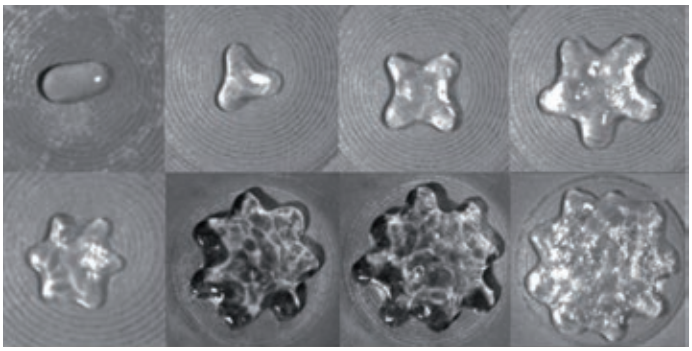
Lycée Gustave Eiffel, Bordeaux

Les voiliers les plus rapides dépassent 40 nœuds (74 km/h). Comment peuvent-ils atteindre de telles vitesses et surtout, peuvent-ils aller plus vite que le vent ?

L'équipe de Bordeaux a choisi d'aborder ce sujet de façon expérimentale : réalisation d'une maquette de voilier – sur roulement à billes – mue par des ventilateurs, et installation de capteurs (optocommutateurs) permettant les mesures de vitesse. Après les avoir identifiés, les lycéens ont agi sur les principaux paramètres influençant la vitesse du voilier (réglages de la voile par rapport au vent, « allures » du voilier – vent arrière, largue, travers, près...) mais n'ont jamais réussi à dépasser la vitesse du vent. Ils ont ensuite décidé d'améliorer les performances de la maquette à l'aide d'une meilleure voile (bombage de la voile, creux de la voile...), dont ils ont déterminé les caractéristiques à l'aide de simulations de fluides (prenant en compte les effets Bernouilli et Venturi) effectuées grâce au logiciel de modélisation 3D SolidWorks. Cette nouvelle voile a été imprimée en 3D et installée sur une maquette de voilier améliorée, se déplaçant sur coussins d'air. À l'aide d'un système de mesure par effet Doppler, qu'ils ont programmé eux-mêmes, ils ont à nouveau essayé de vérifier si leur bateau pouvait dépasser la vitesse du vent, sans y réussir. Leur étude n'est pas terminée, ils y travaillent encore !

Le fonctionnement des Olympiades est assuré grâce aux partenaires financiers : *ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, AEFE, Université Paris Diderot Paris 7, Intel, CNRS, Fondation Nanosciences, Labex Palm (Physique, Atomes, Laser, Matière), National Instruments, Saint-Gobain, Université Pierre et Marie Curie, Ixcore, First TF.*
Le Comité des Olympiades remercie tous les partenaires, les laboratoires ayant accueilli les candidats et les donateurs qui ont contribué au succès de la XXIII[e] édition du concours. Sa reconnaissance s'adresse aussi à tous les acteurs bénévoles de cette réussite.

L'équipe du lycée Vauvenargues présentant son projet au jury.



Oscillations d'une goutte d'eau : les différentes étoiles observées.

Oscillations d'une goutte d'eau

Lycée Vauvenargues, Aix-en-Provence

Étudiant le phénomène de caléfaction, les trois lycéens ont piégé une goutte d'eau dans le creux d'une plaque de cuisson chaude. Ils ont alors observé l'apparition spontanée de formes oscillantes d'étoiles, présentant jusqu'à dix branches. Intrigués, ils ont cherché d'autres méthodes pour générer des gouttes étoilées.

Ils en ont observé, en faisant vibrer une goutte posée sur un verre poreux présentant une surface super hydrophobe incurvée et traversé par un flux d'air pulsé constant. Ils ont également utilisé la lévitation acoustique ultrasonore pour piéger une goutte d'eau et étudier ses modes de vibration. Après de nombreuses expériences, des mesures de rayons et de fréquences, ils ont comparé les résultats obtenus par les différentes méthodes et parfait la compréhension du phénomène.

De nombreuses observations, des mesures de rayons et de fréquences, et la comparaison des résultats selon les procédés leur ont permis de conclure à un bon accord avec la modélisation des oscillations d'une goutte libre ou posée, et avec les études trouvées dans diverses publications. *« Une goutte liquide a une tension de surface qui la pousse à reprendre sa forme d'équilibre quand elle est déformée (force de rappel) et une masse qui lui confère une certaine inertie quand elle est en mouvement. Une goutte liquide est donc un oscillateur, qui a une fréquence propre résultant de ces deux effets… »* [1].

Le comité national
www.odpf.org

[1] Anne-Laure Himbert Biance, *Gouttes inertielles : de la caléfaction à l'étalement*, Thèse de doctorat, soutenue en 2004 à l'Université Paris VI.

Disparition

Loïc Auvray,
l'un des fondateurs du concours des Olympiades de Physique France

Nous avons eu la grande tristesse d'apprendre la disparition de Loïc Auvray, survenue le 8 juin 2016 à l'âge de 60 ans, à la suite d'une longue et terrible maladie.

Après des recherches théoriques sur les polymères et les microémulsions dans le laboratoire de Pierre-Gilles de Gennes au Collège de France, Loïc Auvray a intégré le laboratoire Léon Brillouin au CEA/Saclay en 1985, où il était l'un des piliers du groupe de diffusion de neutrons aux petits angles. Puis il a rejoint en 2002 l'université d'Évry-Val-d'Essonne, où il a cofondé le laboratoire Matériaux polymères aux interfaces. Depuis 2010, Loïc Auvray était le directeur du laboratoire Matière et systèmes complexes (CNRS et Université Paris Diderot) ; il le serait encore si sa maladie ne l'avait contraint à mettre un terme à son mandat.

Directeur de recherche au CNRS, ses travaux sont marqués par une évolution thématique permanente et couvrent de nombreux domaines : polymères aux interfaces, polymères confinés et nanostructures, microémulsions, biophysique des lipides, de l'ADN et des canaux protéiques, vecteurs polymères pour la thérapie génique. Ses contributions (plus de 130 publications) sont considérées comme majeures et font référence dans la communauté scientifique internationale.

Loïc avait un sens aigu des responsabilités : il a été membre du bureau de la SFP de 1990 à 2000.

Très engagé dans la diffusion de la culture scientifique, il a fait partie à la fin des années 1980 de la commission mixte SFP-UdPPC qui a imaginé puis mis en place le concours national des Olympiades de Physique à destination des lycéens, dont le premier s'est tenu en 1993. Il était présent à la finale du 23e concours national, les 29 et 30 janvier dernier.

Loïc Auvray a été maître de conférences, puis professeur chargé de cours au Département de physique de l'École polytechnique, de 1990 jusqu'en 2006. Il y a enseigné dans les domaines de la physique statistique et de la physique du solide.

Unanimement apprécié par ses collègues et ses élèves pour sa compétence, ses dons pédagogiques et son amabilité personnelle, il nous a donné depuis deux ans une leçon de courage, de joie, de volonté et de générosité que nous retiendrons.

John Werner Cahn (1928-2016), théoricien majeur de la science des matériaux

John Cahn (à gauche) et Michel Fayard dans la demeure de ce dernier en juin 2012, à l'occasion d'une journée organisée en son honneur par l'Académie des sciences.

Le professeur John Werner Cahn vient de s'éteindre à l'âge de 88 ans dans sa demeure de Seattle (USA), terrassé par une longue maladie.

Né en Allemagne près de Cologne en 1928, John Cahn émigra aux États-Unis à l'âge de onze ans par l'un des tout derniers bateaux transatlantiques en partance d'Amsterdam. Il fit ses études à l'université du Michigan et sa thèse en chimie à l'université de Californie Berkeley sous la direction de Richard Powell. Il y fit deux rencontres capitales : Anne Hessing qui allait devenir la compagne de sa vie, et Cyril Stanley Smith qui lui donna le goût de la métallurgie et le fit venir à l'université de Chicago. Il rejoignit ensuite General Electric au laboratoire de recherche de Schenectady de 1952 à 1964, puis fut professeur au MIT jusqu'en 1976, année où il intégra le National Bureau of Standards (aujourd'hui National Institute of Standards and Technology) à Gaithersburg (Maryland) jusqu'à sa retraite.

John Cahn est l'un des plus éminents théoriciens de notre époque dans les domaines de la thermodynamique, cinétique des transformations de phase, décomposition spinodale et solidification. Bien connu par les céramistes pour ses travaux sur le facettage, il est reconnu par les cristallographes pour ses contributions séminales dans le domaine des quasicristaux, en particulier l'article fondateur dont il fut le rédacteur principal. Les mathématiciens le connaissent au travers des fameuses équations de Cahn-Hillard et de Allen-Cahn. Enfin, en temps que physicien, il est l'un des pères fondateurs des développements dans le mouillage critique, les interfaces diffuses, la thermodynamique des surfaces et tous les concepts issus de la notion de décomposition spinodale dans les solides.

John Cahn a reçu un grand nombre de récompenses, parmi lesquelles les plus récentes sont le prix de Kyoto (Japon), le prix Bower, la Médaille Nationale pour la Science (USA), la récompense Michelson-Morley et le prix Harvey. Il fut membre de nombreuses académies et sociétés savantes dans le monde entier. Il comptait de nombreux amis et collaborateurs en France, dont le professeur Michel Fayard, et avait formé de brillants élèves, dont notre regretté collègue Francis Larche (Université de Montpellier) avec lequel il a signé des articles majeurs sur la thermodynamique des solides.

Denis Gratias
Académie des sciences

Jean-Pierre Cotton (1941-2016), physicien au service des polymères

Jean-Pierre Cotton, décédé le 20 janvier 2016, a été un acteur majeur des études de la matière molle par diffusion des neutrons aux petits angles (DNPA). Tous ses collègues sont profondément attristés par sa disparition.

Jean-Pierre Cotton

Entré au CEA-Saclay en 1969, à sa sortie de Supelec, il rejoint Gérard Jannink qui proposait un programme d'études de la conformation des polymères en solution. Après les premières mesures, Jean-Pierre Cotton comprend tout de suite la nécessité d'un équipement expérimental adapté et fait réaliser à Saclay en 1973, un détecteur original à anneaux concentriques équipant le premier spectromètre de DNPA. Il joue un rôle majeur dans la création d'un groupe réunissant l'équipe de neutroniciens de Saclay, des chercheurs du Centre de recherche sur les macromolécules de Strasbourg (Henri Benoît) et du Collège de France (Pierre-Gilles de Gennes). L'expertise scientifique ainsi réunie a permis d'utiliser pleinement les capacités expérimentales de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble. Les résultats sur la conformation de polymères dans les années 70 s'enchaînent et seront tous des premières : polymères en solution (sujet de sa thèse d'État en 1973), polymères amorphes fondus, polyélectrolytes et copolymères... Ces travaux seront récompensés en 1986 par le prix CEA, avec Bernard Farnoux, Mohamed Daoud et Gérard Jannink.

Du début des années 80 à la fin des années 90, il dirige le groupe « Diffusion aux Petits Angles » du Laboratoire Léon Brillouin (LLB) créé en 1974. Une activité de recherche foisonnante et productive marquera toute cette période. En 1999, il organise la publication du cours *Diffusion de Neutrons aux Petits Angles* de l'école thématique de la Société Française de la Neutronique et ouvre la voie à une série de livres. C'est une grande partie de la communauté française de neutronique qu'il aura contribué à former.

Annie Brûlet (LLB, CNRS), **Mohamed Daoud** (CEA), **Bernard Farnoux** (CEA)

© LPCNO/CNRS.

Catherine Crouzet : la passion de l'électronique

Technicienne supérieure à l'Institut national des sciences appliquées de Toulouse, Catherine Crouzet oscille entre enseignement et soutien de la recherche, deux activités complémentaires dont elle apprécie le caractère concret.

Comme chaque matin, Catherine Crouzet est sur le pied de guerre. De son atelier, elle doit gérer un effectif imprévu pour un TP ; en même temps, elle intervient sur les pannes et autres petits problèmes techniques auxquels les étudiants, dont elle a la charge, sont confrontés. *« J'aime la bidouille et quand ça marche ! »*, lâche-t-elle. Une chose est sûre, cette technicienne supérieure est tombée dans l'électronique quand elle était petite : *« Mon grand-père passait son temps à réparer des télévisions ou des radios, j'adorais ça ! »*

C'est donc tout naturellement que, le bac en poche, Catherine Crouzet s'oriente vers un BTS d'électronique. Attirée par l'enseignement, elle enchaîne une licence et une maîtrise, mais opte finalement pour l'industrie avant d'être recrutée, deux ans plus tard, à l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Toulouse.

Depuis, elle y partage son temps entre l'enseignement et une activité de support technique auprès des chercheurs du Laboratoire de physique et chimie des nano-objets (LPCNO). Sous sa première casquette, Catherine Crouzet participe à la mise en place et à l'animation des travaux pratiques d'optique et d'électronique pour les étudiants de 1re année. Elle assure également une partie du suivi des projets d'électronique des 4e et 5e années, la partie qu'elle préfère de ce métier d'électronicien. *« Le contact avec les étudiants est très enrichissant,* explique-t-elle. *Leurs idées et leurs questions sont autant d'occasions de remettre en cause ses habitudes et de se renouveler. »* Une chose est sûre, cette activité ne lui laisse aucun répit : *« 350 élèves-ingénieurs, et rien ne doit être en panne »*, résume-t-elle.

Avec les chercheurs, c'est un peu différent. Comme l'explique pour plaisanter l'électronicienne, *« ils sont beaucoup plus capables de se débrouiller tout seuls ! »* Il n'empêche, une fraction significative de son travail au laboratoire consiste en des tâches de dépannage multiples. *« La spécificité réside surtout dans le spectre large des activités du laboratoire, où les différents groupes possèdent des cultures et utilisent des outils différents »*, précise Catherine Crouzet.

Mais ce qui la motive le plus depuis son arrivée au laboratoire, il y a onze ans, c'est son interaction avec le groupe de nanomagnétisme, dont l'un des projets concerne la destruction de cellules cancéreuses *via* des nanoparticules chauffées par des champs magnétiques. Dans ce cadre, Catherine Crouzet a réalisé différents bobinages pour la génération des champs magnétiques. Mais surtout, elle a mis au point un appareillage permettant de maintenir les cultures cellulaires à une température de 37 °C pour des tests *in vitro*. *« Au départ, il y a un cahier des charges,* détaille la technicienne. *Puis de nombreuses discussions afin d'articuler au mieux des contraintes de tous ordres, aussi bien expérimentales que financières. La dernière version a trois ou quatre ans, mais elle est en évolution constante. Il n'y a jamais de version définitive ! »*

Ainsi, entre enseignement et recherche, le cœur de Catherine Crouzet balance pour le meilleur. Elle réfléchit : *« Actuellement, si on m'en donnait l'occasion, je serais ravie de pouvoir me consacrer à 100 % à ce projet de recherche contre le cancer pendant plusieurs mois. »* Plaisir de participer à l'aventure scientifique au long cours, mais surtout à un projet dont la finalité est évidente : *« Le cancer touche tout le monde. Il y a ici un objectif, celui d'essayer de guérir, ça me touche particulièrement, c'est concret »*, confie-t-elle. Tout comme l'étaient les téléviseurs de son grand-père. Ou comme le sont encore les problèmes d'oscilloscopes de ses étudiants, ces derniers n'en finissant pas de défiler depuis le matin, les uns après les autres, dans son atelier... pour son plus grand plaisir ! ▮

Mathieu Grousson, journaliste

L'innovation et la course à la nouveauté dans la recherche

Cette tribune concerne l'innovation à motivation sociétale ou économique. L'innovation à motivation purement scientifique, telle que celle concernant l'amélioration des détecteurs en physique des particules par exemple, n'est pas concernée par cette analyse.

L'innovation technique et la science

Il ne fait pas de doute que l'innovation (ici technique) est un atout essentiel d'une industrie compétitive. L'innovation est ce qui permet d'augmenter la performance des dispositifs, de mieux contrôler la fiabilité des procédés, de ménager la matière et l'énergie. L'innovation permet de remplir de nouveaux besoins, voire d'en créer de nouveaux, de capter des marchés, de conquérir des secteurs applicatifs. Tant que nous vivons dans une économie industrielle et libérale, c'est un ingrédient essentiel du succès industriel.

La science est par nature innovante, en ce sens qu'elle porte un regard neuf sur le monde. Sa démarche s'appuie sur la preuve, la vérification et l'évaluation par les pairs. Et s'il est une chose qui est constitutive de notre métier, c'est cette patiente progression, de conjectures en preuve et de preuve en réfutation, qui fait de l'énoncé scientifique une valeur universelle dont la richesse est autant dans la façon de l'élaborer que dans le contenu même.

Dans cette société, la science et la technologie jouent un rôle essentiel, constitutif du progrès technique. Mais nous dénonçons ici une dérive, la contagion du culte de l'innovation depuis le monde industriel, où elle est vitale, vers le monde de la recherche...

La recherche sous l'empire du culte de l'innovation

Les demandes d'applications sociétales ou de rattachement à des « domaines d'intérêt majeur » sont omniprésentes dans les appels d'offres de la recherche. Et le vocable « innovation » semble envahir toutes les sources de financement, au niveau régional, national, ou européen. Pourquoi donc ce culte de l'innovation, cette obsession de la nouveauté qui semble irriguer toute la politique scientifique actuelle ?

Entre tous les sujets potentiellement scientifiquement intéressants, le choix se porte vers ceux que la communauté, scientifique ou plus généralement la société, reconnaît comme « valorisants ». Même s'il est bon en recherche d'emprunter des chemins nouveaux, considérer la nouveauté comme une valeur *per se* a des conséquences sur les modes de fonctionnement de la communauté scientifique – sans toutefois invalider la scientificité des résultats.

Examinons trois effets pervers du culte de la nouveauté et de l'innovation : la « dévalorisation du capital de connaissances acquises », les « effets de mode et bulles spéculatives scientifiques », et enfin la « survalorisation de la culture de projet par rapport à la culture de compétences ».

Première perversion : la dévalorisation du « second capital scientifique »

J'entends par « capital scientifique » l'acquis culturel que donne une formation scientifique et sur lequel se construit une pensée créatrice. Seuls les historiens lisent les documents originaux de Newton ou de Maxwell, mais tous les physiciens ont intégré les résultats de Newton et Maxwell sans passer par les constructions géométriques du premier ou les engrenages fictifs du second. La mécanique classique et l'électromagnétisme font partie du « premier capital scientifique » de tout physicien. Ce « premier capital scientifique » est stable.

Mais le « capital scientifique » se décline en plusieurs niveaux. Dans chaque spécialité existe un *corpus* de connaissances qui est plus proche, et qui mérite qu'on aille le chercher à sa source. Le culte de la nouveauté ou de l'innovation a des effets immédiats sur la formation des jeunes chercheurs en dévalorisant ce « second capital scientifique » : il n'est pas assez ancien pour avoir été « sacralisé » et ensuite « banalisé », et il est trop vieux pour mériter une attention qu'on ne donne plus qu'à la nouveauté.

Une façon de se convaincre qu'on est innovant est de simplement négliger de connaître ce qui a déjà été fait. Si la seule chose qui compte est de faire du neuf, et que l'on imagine « faire la course en tête », il suffit de se tenir au fait de ce qui vient juste d'être publié pour identifier ce qui va bientôt être publié ! Il suffit donc de suivre l'actualité ! Et du coup, on peut en toute bonne conscience « réinventer la roue ».

Deuxième perversion : effets de modes et bulles de spéculation intellectuelle

Un second aspect, plus grave, du culte de l'innovation, est un biais sur le choix des sujets scientifiques qu'une communauté va mettre en avant. Ce serait une grande naïveté que de penser que le choix d'un domaine de recherche est exclusivement individuel ; ne serait-ce que par la nécessité de disposer des moyens nécessaires à sa recherche, le choix du scientifique s'intègre à une procédure collective. La conséquence des procédures de choix pilotées par le culte de l'innovation est de générer des phénomènes de « bulles spéculatives ». C'est-à-dire des situations dans lesquelles la valeur attribuée par une communauté à un objet n'a qu'un vague rapport avec sa valeur réelle, et que l'attirance pour cet objet résulte essentiellement d'un phénomène d'autoamplification. Le phénomène se produit chaque fois que l'intérêt d'un objet est amplifié par le nombre d'acteurs intéressés. Cet effet de mode, cet engouement collectif n'est pas nécessairement dommageable et irrigue toute l'histoire des sciences (c'est le cas, par exemple, des études sur le graphène et sur les supraconducteurs à haute température critique).

Mais son amplification hors limite quand les procédures de rétroaction deviennent inopérantes, est relativement récente. La croissance de telles bulles spéculatives est progressive, avec une sortie brutale : il s'agit d'un processus intrinsèquement instable.
Les rétroactions possibles résultent des critères secondaires de choix. Entre tous les sujets d'intérêt possibles, ceux qui retiendront préférentiellement l'attention et les activités d'une communauté scientifique structurée seront fortement influencés par ce que la société ou la politique scientifique souhaite valoriser ; interviennent alors dans ce choix les critères secondaires que sont la nouveauté intellectuelle, les applications potentielles, la demande sociétale immédiate.
Examinons, pour chacun de ces critères « secondaires », les mécanismes amplificateurs qui font qu'à un moment donné, une communauté scientifique choisit collectivement de concentrer une part importante de ses efforts à un sujet qui a souvent une « durée de vie » assez réduite, laquelle semble relativement indépendante de la solution ou non du problème. Le culte de l'innovation a pour effet de faire émerger des sujets par le seul fait qu'ils soient nouveaux, et d'en faire disparaître simplement pour avoir été trop longtemps étudiés. Il justifie ses choix par un raisonnement étrangement circulaire : on lance un programme confortablement doté, qui attire les chercheurs faméliques, et on en déduit que puisqu'il intéresse tant de monde, il était donc juste de doter ainsi ce programme.
Des critères de choix des sujets scientifiques qui ont été déclinés plus haut, seul le premier, « l'attirance pour la nouveauté intellectuelle », est autorégulé : un sujet nouveau ne le reste pas longtemps, et l'aiguillon de la reconnaissance pour un chercheur s'émousse souvent dès qu'un autre chercheur l'obtient.
Selon le critère « applications potentielles », la dynamique de recherche peut aussi être régulée dès lors que les acteurs économiques sont effectivement impliqués et que la puissance publique n'endosse pas la totalité des risques. Mais sans cette solide assise économique, le risque existe de comportements spéculatifs sans contre-réaction. Il est en effet facile de s'autoconvaincre du potentiel d'une technologie simplement en lançant de grands programmes dont la seule justification est, *in fine*, la forte demande de la communauté scientifique pour y participer.
Le critère de la « demande sociétale » est hautement déstabilisant quand il est, comme de plus en plus souvent, la réponse à une crainte de la société ou de tel ou tel groupe de pression. Il est certes du devoir des chercheurs d'éclairer les débats et les controverses. Mais il peut se produire que la multiplicité des études – prenons le cas des OGM – ne conduise qu'à accentuer l'inquiétude : un laboratoire public chargé d'étudier la nocivité potentielle d'un produit ne pourra pas garantir son innocuité totale, un doute subsistera.
L'apparition des « bulles spéculatives », plus ou moins violentes suivant la maigreur des subsides récurrents (qui induit le terme déstabilisant) et l'intensité du terme de rétroaction (minimal dans le cas des exigences sociétales), a des conséquences importantes sur le bon usage des deniers publics. Mais il y a une conséquence plus grave du culte de l'innovation... Plus grave, car elle porte sur le mode de travail même de la communauté scientifique.

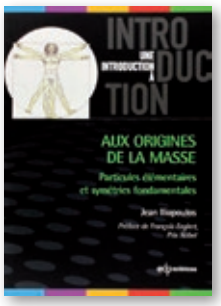
La perversion ultime : la déstructuration du socle de compétences

Dans une logique de pilotage par « projets innovants », les thématiques « porteuses » mobilisent des compétences, mais n'aident pas nécessairement à les ressourcer. La créativité ne se nourrit pas d'une succession de "success stories" d'innovation, elle a besoin du terreau scientifique issu de la dynamique propre de la science, la première de nos trois motivations. Le risque de voir disparaître le socle scientifique sans lequel il est simplement impossible de répondre à la société ou au marché n'est pas négligeable.
L'économie de la connaissance qui est devenue un lieu commun à tous les politiques a pour effet de voir transférer d'un côté à l'autre de l'Atlantique, de Washington à Bruxelles, les mêmes mots clés, les mêmes thématiques prioritaires. La création de revues de plus en plus spécialisées, la pression sur les revues généralistes de chercher le sujet "sexy" qui fera remonter son indice de citation est à terme une incitation à la fragmentation des disciplines, alors que l'idée nouvelle résulte souvent de la comparaison. L'obligation de choisir ses sujets non plus dans une dynamique propre à la science ou à ses domaines applicatifs, mais dans une relecture de ses domaines *via* un prisme politique ou économique a un effet très tendancieux : le scientifique par la force des choses, ne choisira plus ses sujets que par procuration. Il devient virtuose dans l'art de repeindre ses projets de la couleur appropriée, amplifiant *de facto* les effets de mode.

Conclusion

Les conséquences majeures des « bulles spéculatives » résultant du culte de l'innovation sont de déstructurer les disciplines scientifiques, de mobiliser toutes les forces sur un sujet identifié comme prioritaire. Il est impératif de sortir d'une analyse de pertinence des sujets uniquement en termes d'objectifs, pour réintroduire la notion de compétences. Faute de quoi les compétences s'étioleront et l'on ne pourra plus répondre aux objectifs que par un psiccatisme de mots clés.
C'est en développant un corpus de compétences, disciplinaires ou interdisciplinaires, que la communauté scientifique est en état de répondre aux demandes de la société et de l'économie. C'est en insistant à nouveau sur cet aspect, et en y consacrant une part importante des financements, que l'on pourra éviter les conséquences les plus délétères des effets de mode.
Cibler la structure de financement de la recherche en suivant uniquement des grilles de lecture « projets innovants » aurait pour effet à moyen et long terme d'éteindre ce qui rend l'innovation réelle possible : un socle scientifique disciplinaire solide et construit dans la durée.

Yves Bréchet
Membre de l'Académie des sciences



« Aux origines de la masse »

Particules élémentaires et symétries fondamentales

Jean Iliopoulos

Préface de François Englert, prix Nobel

(EDP Sciences, collection *Une introduction à...*, 2015, 126 p., 19 €)

La découverte du mythique boson de Higgs, annoncée au CERN en juillet 2012, a été l'objet de plusieurs livres grand public, justifiés par l'impact scientifique considérable de ce résultat et par l'envergure exceptionnelle du programme expérimental mis en œuvre. L'ouvrage de Jean Iliopoulos se concentre sur les concepts théoriques ayant conduit à l'élaboration du Modèle Standard des interactions entre les particules élémentaires, en mettant l'accent sur l'origine des masses. L'ambition de l'auteur est de les présenter de façon très concise (seulement 83 pages pour le corps principal de l'ouvrage) et accessible à un large public. La gageure est tenue, ce qui est remarquable compte tenu de la complexité et de l'abstraction du sujet.

Une des clés de cette réussite est d'avoir habilement mêlé les aspects historiques, agrémentés de photographies de physiciens illustres avec de courtes biographies parsemées d'anecdotes amusantes, et les notions les plus abstraites, rendues accessibles par des raisonnements simples et des analogies. On mesure ainsi le chemin parcouru depuis Euclide jusqu'à Brout-Englert-Higgs en passant par Einstein et les grands fondateurs de la physique quantique, tout en découvrant le rôle important des symétries de l'espace-temps, puis celui capital des symétries locales menant aux théories de jauge. Le problème des masses des particules fondamentales est alors posé, dans la mesure où ces théories de jauge réclament des bosons de masse nulle. Si ceci est bien réalisé pour le photon de l'interaction électromagnétique, il n'en est rien pour les bosons massifs W et Z de l'interaction faible. Par contre, l'argument avancé pour justifier que la masse des quarks et des leptons devrait être aussi *a priori* nulle me pose problème dans la mesure où le concept non intuitif de chiralité est ici défini comme la projection du *spin* sur la vitesse, c'est-à-dire l'hélicité, qui est facile à visualiser, mais différente de la chiralité pour un fermion massif.

La partie introduisant le concept de brisure spontanée de symétrie est d'une grande clarté. Si les exemples d'une poutre verticale en compression et du ferromagnétisme permettent une bonne introduction, les choses se compliquent un peu avec le théorème de Goldstone, pourtant essentiel pour comprendre le mécanisme de brisure des symétries de jauge et sa résolution par Brout, Englert et Higgs, en introduisant un champ scalaire. On sait que c'est en exploitant ce mécanisme que Weinberg et Salam ont pu construire le secteur électrofaible du Modèle Standard à partir des symétries de jauge mises en avant par Glashow. La brisure de la symétrie de jauge par un champ scalaire à quatre composantes laisse un degré de liberté disponible correspondant au fameux boson de Higgs (baptisé ainsi par Weinberg, qui s'était mépris sur l'ordre chronologique des publications de Brout-Englert et de Higgs). L'auteur ne suit pas cet usage remontant à 50 ans et parle à juste titre du boson BEH (d'ailleurs la préface du livre a été écrite par François Englert).

Un court chapitre est consacré aux avancées spectaculaires de la cosmologie, tant au plan théorique qu'au plan observationnel, choix très judicieux tant les connections sont essentielles entre la physique des particules et l'évolution de l'Univers primordial. Enfin, deux appendices complètent l'ouvrage : l'un présentant les progrès des connaissances sur les particules fondamentales, l'autre donnant aux lecteurs plus entraînés un bref aperçu de la théorie mathématique des groupes.

Un très bon livre donc, qui peut être lu à plusieurs niveaux et devrait satisfaire les lecteurs désireux d'avoir une vue d'ensemble concise et claire des interactions fondamentales et ceux qui s'accrocheront aux aspects les plus subtils. Peu de critiques : j'ai regretté que Dirac, fondateur de la mécanique quantique relativiste avec la prédiction de l'antimatière, ne fasse pas partie du panthéon des physiciens mis en avant par l'auteur ; l'inflation est absente de la figure montrant les différents stades de l'expansion de l'Univers ; enfin, Davis et Koshiba ont reçu le prix Nobel 2002 pour la détection des neutrinos solaires, mais il a fallu attendre 2015 pour que Kajita et McDonald soient récompensés pour la mise en évidence des oscillations de neutrinos.

Michel Davier
Professeur émérite à l'Université Paris-Sud (Orsay)

ERRATUM

Dans l'entretien de Jean-Pierre Bourguignon, président de l'ERC, avec Michèle Leduc, paru dans le numéro 49 de *Reflets de la physique*, la note (c) page 27 est incorrecte.

Le texte correct doit faire référence à l'institution-hôte et non pas au pays :

« (c) Un chercheur bénéficiant d'un contrat ERC peut changer d'institution-hôte en Europe dès la signature du contrat. »

« Climat : y voir clair pour agir »

Sébastien Balibar

(Éditions Le Pommier, collection *Manifestes*, 2015, 200 p., 17 €)

Le réchauffement climatique est un sujet qui, en quelques années, a progressivement envahi les ondes et les écrans, les discours politiques, pour finalement entrer dans toutes les consciences. L'inquiétante question du climat représente une équation difficile à résoudre, comme a pu en témoigner la conférence COP21 en décembre dernier.

Comment s'y retrouver parmi toutes les données, les avis et les prédictions énoncés par les médias, dirigeants et scientifiques ? Que nous soyons simple citoyen ou responsable politique, comment pouvons-nous réagir face à cette myriade d'informations ? Sébastien Balibar, physicien et membre de l'Académie des sciences, y répond sans détour dans son dernier livre : « Climat : y voir clair pour agir ».

Clair, concis, allant droit au but, le titre donne le ton de l'ouvrage qui, en moins de 200 pages, fournit au lecteur non initié les clés pour comprendre les enjeux et débats actuels. Par le biais d'une expression à la première personne, donnant à l'ouvrage une dimension plus humaine, Sébastien Balibar nous parle et nous livre ses craintes ; il nous interpelle et nous démontre par les nombreuses données du GIEC qu'il est désormais indispensable d'agir : *« J'ai écrit ce livre parce que je me refuse à baisser les bras… J'y essaie de secouer les consciences. »*

Y voir clair : les nombreuses données avancées par l'auteur, comparées aux différents arguments des climato-sceptiques, témoignent de l'évidence d'un réchauffement climatique d'origine anthropique. Le lecteur acquiert le vocabulaire, les repères et les chiffres indispensables pour comprendre le fonctionnement du climat (composition de l'atmosphère, évolution de la température, effet de serre, aérosols, etc.), pour ainsi mieux apprécier ses évolutions. Dans la section *« Qui pollue, comment, pourquoi ? »*, l'auteur nous invite à aller au-delà des apparences en soulignant ce que les classements internationaux peuvent cacher : problèmes de fluctuation des énergies renouvelables, électricité plus ou moins « propre » (selon son mode de production), blanchiment d'énergie sale, etc. Un pays peut produire une grande quantité d'énergie renouvelable mais compenser les fluctuations (*i.e.* les déficits ponctuels) avec des énergies très polluantes. L'Allemagne par exemple, mieux classée que la France en terme d'énergies renouvelables, émet pourtant deux fois plus de CO_2 qu'elle !

La section traitant des différentes sources d'énergie offre au lecteur non scientifique la possibilité d'acquérir une vision d'ensemble fort utile pour appréhender le sujet du changement climatique. Bien qu'intéressante, la partie sur l'énergie nucléaire (dont l'auteur se dit partisan) aurait gagnée à être enrichie de contre-arguments, ne serait-ce que pour mieux guider le grand public craignant particulièrement cette technologie.

Agir : oui mais comment ? Là est toute la force du livre, qui met en lumière l'état des connaissances actuelles mais qui se montre également force de proposition en dressant, à destination des politiciens, une série de mesures concrètes :

- en premier lieu, tous les pays devront se limiter d'ici 2050 à une émission maximum de 1,5 tonnes de gaz à effet de serre (en équivalent CO_2) par an et par habitant ;
- en second lieu, si chaque pays doit être libre de décider de sa propre politique énergétique (politique qui dépendra de sa situation géographique, économique et sociale), chacun devra néanmoins obéir à une autorité mondiale de l'énergie (à mettre en place).

Plusieurs autres recommandations portent sur : la réduction des émissions de gaz produites par l'industrie du ciment et par la déforestation ; l'équipement obligatoire de chaque nouvelle centrale électrique brûlant des combustibles fossiles d'un système de capture-stockage de CO_2 ; le renforcement de la sécurité nucléaire avec une autorité mondiale transparente et contraignante ; le soutien accru de la recherche en sciences du climat ; et la préparation collective aux conséquences de ce changement climatique (sécurisation des zones à risques, approvisionnement en eau, anticipation des conflits, etc.).

Ce manifeste représente une indispensable boîte à outils permettant à chacun de prendre la mesure des efforts restant encore à échafauder. Si la solution réside dans la capacité de chaque être humain à s'éveiller et s'activer, elle passe également par la lecture d'ouvrages permettant de le faire. Celui-ci en fait partie.

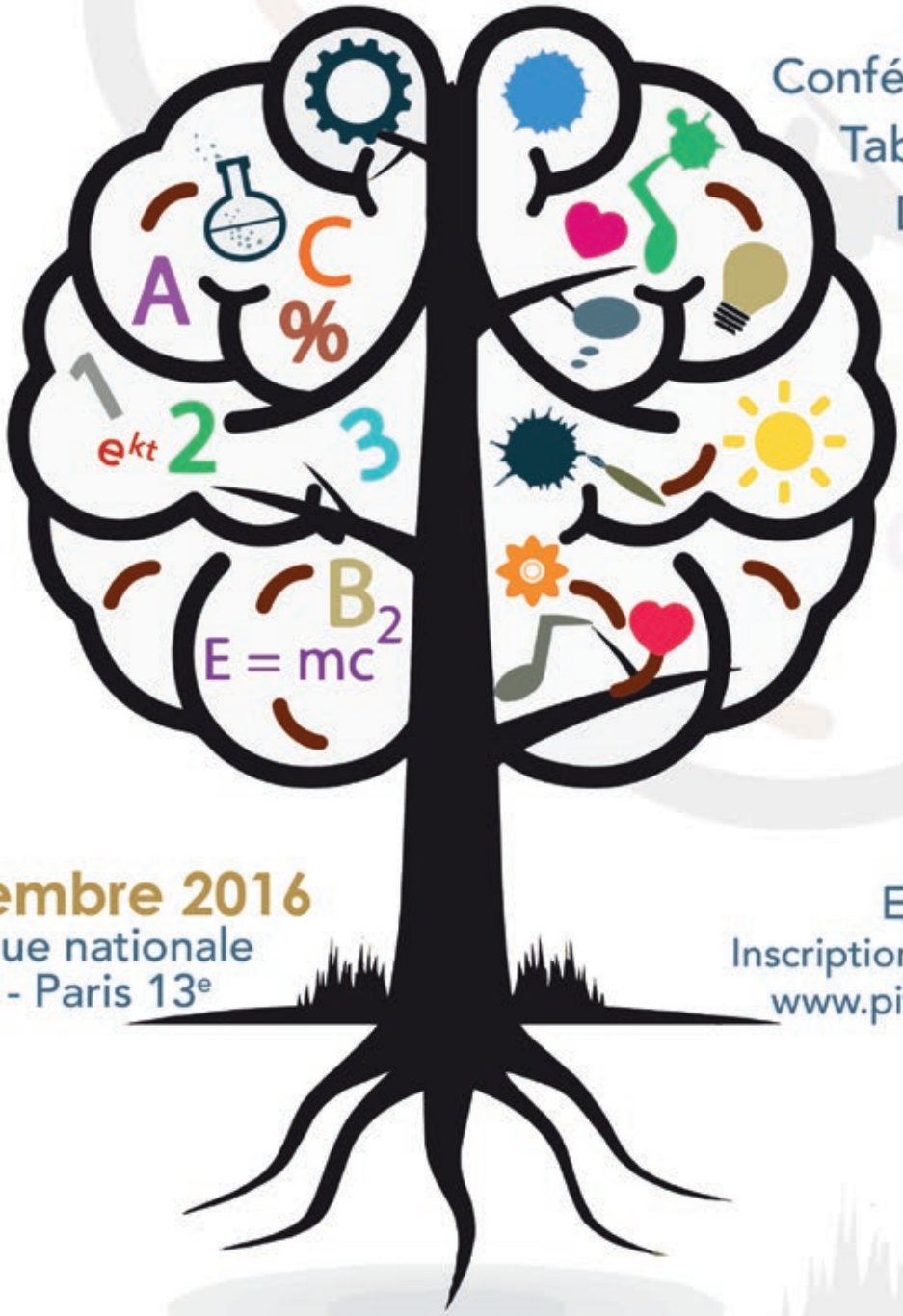
Mayline Gautié
Chargée de communication de la Société Française de Physique

Société Française de Physique

BnF

LA SCIENCE, L'INFORMATION, LA CONNAISSANCE

15e rencontre "Physique et Interrogations Fondamentales"



Conférences
Table ronde
Débats

19 novembre 2016
Bibliothèque nationale
de France - Paris 13e

Entrée libre
Inscription obligatoire
www.pif15.sfpnet.fr

cnrs cea ILP Fondation Daniel Iagolnitzer MAIRIE DU TREIZIÈME SCIENCES AVENIR POUR LA SCIENCE France info Ferme des étoiles