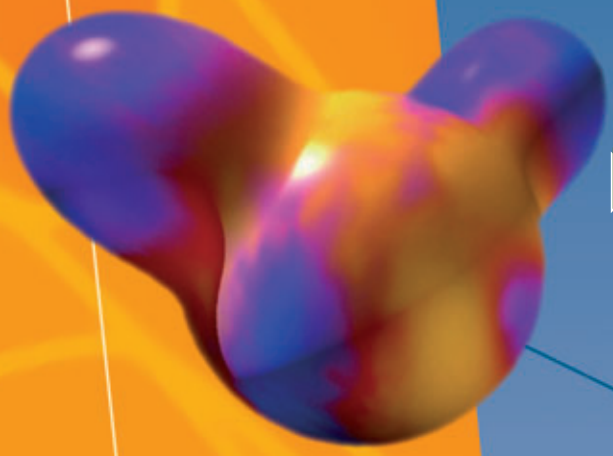
reflets de la PHYSIQUE

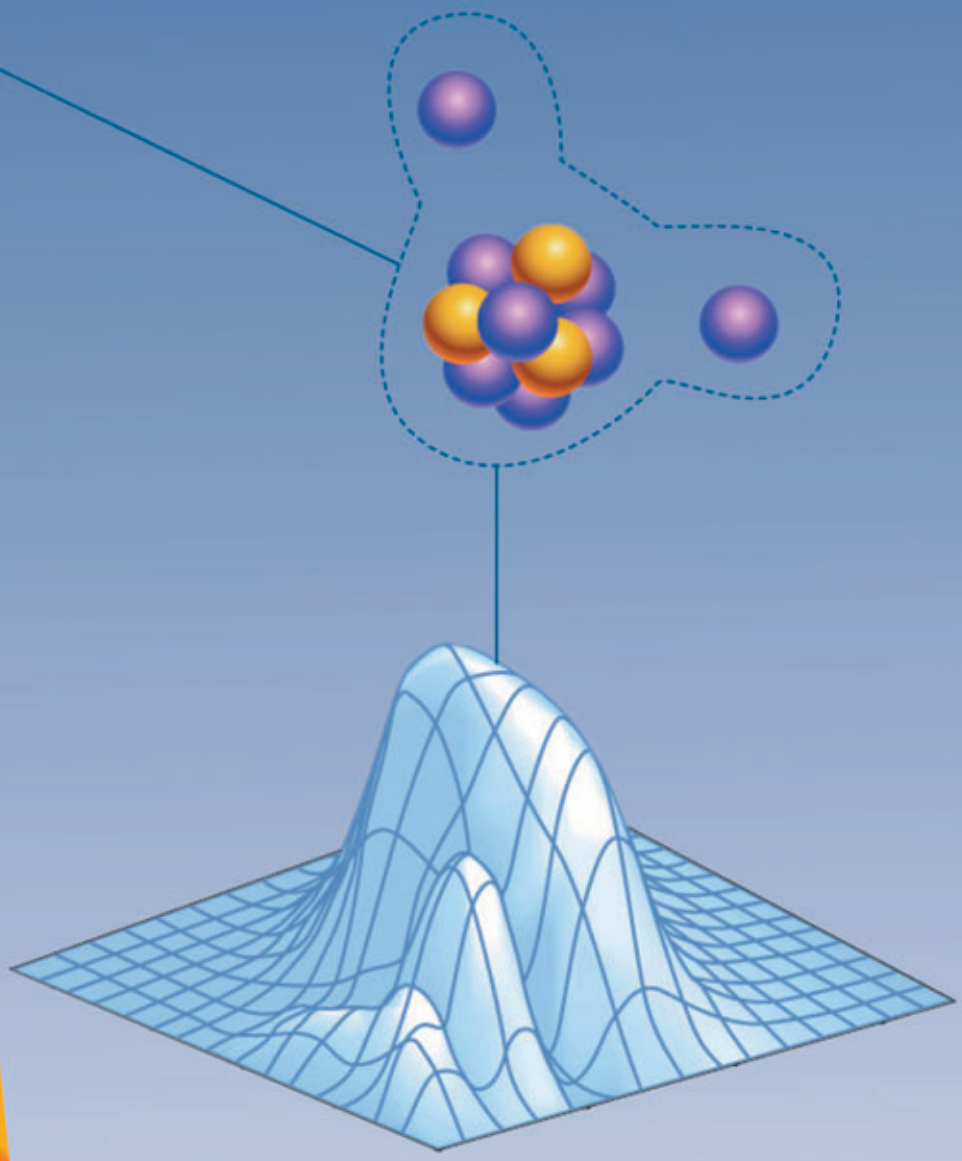
n°8
mars 2008

Bulletin de la Société Française de Physique

Fragilité des matériaux : causes et remèdes
Les matériaux multiferroïques
La fusion des noyaux à halo

Femmes et sciences : les enseignements de l'histoire
Faut-il enseigner la physique en école d'ingénieurs ?





n°8 - mars 2008 - 10 € - 5 numéros par an

www.sfpnet.fr

L'audience de la SFP doit s'élargir

La SFP compte environ 3000 membres et ce nombre n'augmente pas depuis des années, quelle que soit la stratégie mise en œuvre par les responsables de notre société. Cette situation contraste fortement avec celle de l'Allemagne et du Royaume-Uni, où les sociétés de physique (la DPG et l'IOP) sont fortes de plus de 30 000 membres chacune, ce qui leur donne un poids dont nous sommes bien loin en France. La DPG est fréquemment consultée par le gouvernement fédéral allemand sur les priorités en investissements de recherche ou pour des expertises scientifiques. L'IOP a les moyens de réaliser et de publier de vastes études, par exemple sur les questions d'éducation, à partir desquelles le ministère britannique peut prendre des décisions.

Pourtant, du point de vue de la production scientifique les trois pays sont de taille comparable. La différence est que la DPG et l'IOP recrutent non seulement dans le milieu académique, comme la SFP, mais aussi chez les enseignants du secondaire et surtout chez les ingénieurs. La faiblesse de la SFP tient à de multiples causes historiques maintes fois analysées, qui sont liées aux particularités de notre système d'enseignement supérieur et, avant tout, à l'existence des grandes écoles. Celles-ci produisent des ingénieurs qui ne se considèrent pas eux-mêmes comme des physiciens, bien qu'une grande partie de leur formation repose sur la physique ; ils ont donc une préférence pour des associations de type professionnel, qui sont bien structurées et remplissent une fonction très appréciée.

Les bouleversements en cours dans les universités appellent à des analyses et des interventions de la part de la SFP, que limite toutefois la faiblesse de ses bases. C'est pourquoi, depuis quelques mois, un partenariat s'est établi entre la SFP, la SMF (mathématiques) et la SFC (chimie). Conjointement, après notre questionnaire aux candidats aux élections présidentielles(1), nous avons rédigé une analyse critique rendue publique de la loi LRU sur la nouvelle université(2). Des articles des trois sociétés sont parus dans *Le Monde* et dans *Le Figaro*. Récemment, nous avons réagi aux propositions de la commission Attali pour la libération de la croissance(3). Le fait d'être trois sociétés réunies, représentant assez bien les acteurs des sciences « dures », nous a permis d'être reçus et écoutés, si ce n'est suivis, par les cercles politiques où les réformes se mettent en place.

Cette expérience a convaincu la SFP qu'il est urgent d'accroître son audience, d'une part en trouvant le moyen de recruter de nouveaux membres – c'est l'objectif de l'action « jeunes » qui va s'intensifier en 2008 –, d'autre part en s'alliant aux sociétés d'ingénieurs au sein d'une association de grande taille, qu'on pourrait nommer par exemple « Collège des sciences physiques ». Il faut commencer par définir avec netteté les objectifs d'un tel Collège et faire une liste des actions communes possibles. Ensuite, on pourra commencer par un rapprochement entre un petit nombre de sociétés, pour en démontrer le bénéfice. Ce processus est déjà amorcé entre la SFP, la SFO (Société Française d'Optique) et la SEE (Société d'Électricité et d'Électronique). Les échanges entre la SFP et la SEE ont démarré avec l'invitation d'Alain Bravo, président de la SEE, au séminaire d'Orléans de la SFP (cf. page 26). Ils devraient se préciser, et associer la SFO en 2008. Pour la SFP, les discussions seront menées avec Yves Petroff, vice-président entrant, qui apportera le concours de sa grande expérience des négociations, acquise à la direction de l'ESRF et de l'IUPAP. Les sociétés de sciences physiques ont beaucoup à gagner à se présenter ensemble, si elles veulent devenir les interlocuteurs des décideurs, ce qui n'implique pas qu'elles abandonnent leur rôle dans leurs champs professionnels respectifs. De plus, vis-à-vis de l'Europe, dont on ne peut plus ignorer l'importance, nous devons gagner du poids face aux représentants des autres grands pays. C'est donc tout un chantier qui s'ouvre, pour lequel la SFP, seule association de caractère généraliste, aura un rôle central à jouer.

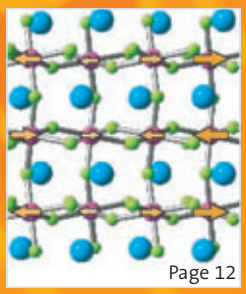
M. Leduc

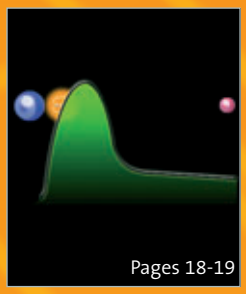
Michèle Leduc

(1) Voir *Reflets de la physique* n°4, page 4.
(2) Voir *Reflets de la physique* n°6, page 4.
(3) Voir *Le Figaro* du 11 février 2008, page 16.

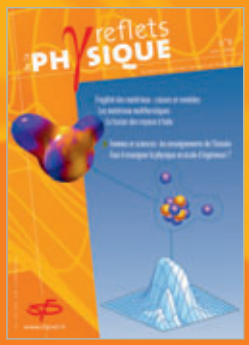
Sommaire

Page 5


Page 12


Pages 18-19

Page 22



En couverture :
Un exemple de noyau à halo, le lithium 11, constitué d'un noyau de lithium 9 entouré d'un halo de 2 neutrons.
Voir article p. 17.

Éditorial : L'audience de la SFP doit s'élargir — 2
M. Leduc

Le mot de la rédaction : Un questionnaire sur *Reflets de la physique* — 4
S. Magnier, C.H. de Novion

Avancées de la recherche — 5

Fragilité des matériaux : causes et remèdes — 5
T. Rouxel

Les matériaux multiferroïques :
I – Le défi du couplage entre magnétisme et ferroélectricité — 10
J. Kreisel, W. Kleemann, R. Haumont
II – Des composés massifs aux couches minces — 14
W. Prellier, M.P. Singh, C. Simon, B. Raveau

L'insoutenable légèreté du halo — 17
J.L. Sida

Science et société — 21

Les femmes et les sciences : les enseignements de l'Histoire — 21
N. Hulin

Faut-il encore enseigner la physique en Écoles d'ingénieurs ? — 23
V. Mosser

Au sein et autour de la SFP — 26

Vie de la SFP — 26
La SFP à Mesurexpo 2007 — 27
Vie d'EDP Sciences — 28

Reflets de la physique et ses lecteurs — 29

Portrait – Cédric Louis : Pluridisciplinarité et *start up* — 29
Notes de lecture — 30

Comité de rédaction
Président : Jean-Pierre HULIN
Membres : Patricia BASSEREAU - Michel BELAKHOVSKY - Jacques CHOMILIER - Anne DAVAILLE - David GUÉRY-ODELIN - Étienne GUYON - Pascale HENNEQUIN - Georges LANDA - Roland LEHOUCQ - Jérôme MARGUERON - Charles de NOVION - Sophie REMY - Claude SÉBENNE - José TEIXEIRA - Guy TREGLIA - Jean VANNIMENUS - Christophe YÈCHE
Directeur de la publication : Sylvie MAGNIER
Rédacteur en chef : Charles de NOVION
Secrétaire de rédaction : Agathe CYMER
Graphistes-Maquettistes : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR
dépôt légal 1er trimestre 2008 - Commission Paritaire 0310 G 86176 - ISSN 1953-793 X © SFP
Édité à 2500 exemplaires - IMP Blanchard, 92350 Le Plessis-Robinson - 01.41.07.97.97
Société française de physique, 33, rue Croulebarbe, 75013 Paris - Tél. : 01.44.08.67.10. Fax : 01.44.08.67.19
e-mail : sfp@sfpnet.org - Serveur : http://www.sfpnet.fr
SFP Bulletin, Institut Henri-Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris
e-mail : sfp-bulletin@ihp.jussieu.fr

Un questionnaire sur *Reflets de la physique*

Voici maintenant un peu plus d'un an (7 numéros) que *Reflets de la physique* a remplacé le *Bulletin de la SFP*, avec un contenu et une forme profondément renouvelés.
Nous avons publié des articles d'avancées de la recherche, de science et société, un dossier sur le photovoltaïque, des débats (sur la politique de la recherche et sur l'insertion professionnelle des doctorants), quelques interviews et portraits, etc.
Nous pensons que c'est le moment de faire le point avec l'ensemble de nos lecteurs. Nous avons donc préparé un questionnaire, que vous trouverez ci-dessous, et qui sera également mis dans la page « publications » du site *internet* de la SFP **(www.sfpnet.fr)**.
Merci de bien vouloir y répondre et de nous le retourner, soit par courrier postal à SFP/Reflets de la physique, 33 rue Croulebarbe, 75013 Paris, soit par courriel à **secretariat@sfpnet.org**
Vos opinions, dont la synthèse sera publiée dans un prochain numéro de *Reflets de la physique*, nous permettront d'améliorer notre revue et sa diffusion.

Sylvie Magnier
Directeur de la publication

Charles de Novion
Rédacteur en chef

QUESTIONNAIRE

▶ Êtes-vous satisfaits de la présentation actuelle de *Reflets de la physique* ? À savoir :
- Nouvelle maquette
  Oui ❑ Non ❑ Moyen ❑
- Esthétique de la revue
  Oui ❑ Non ❑ Moyen ❑
- Couverture
  Oui ❑ Non ❑ Moyen ❑
- Police et taille des caractères
  Oui ❑ Non ❑ Moyen ❑
- Taille et qualité des figures
  Oui ❑ Non ❑ Moyen ❑

Commentaires :

▶ Le poids relatif des quatre rubriques de *Reflets de la physique* : « Avancées de la recherche », « Science et société » (y compris histoire de la physique), « Au sein et autour de la SFP » et « *Reflets de la physique* et ses lecteurs », vous convient-il ?
Oui ❑ Non ❑ Moyen ❑
Y a-t-il des domaines qui n'ont pas encore été abordés et que vous aimeriez voir traiter ?
Commentaires :

▶ Le niveau des articles d'avancées de la recherche est-il :
Satisfaisant ❑ Trop élevé ❑ Pas assez élevé ❑
Avez-vous des remarques sur la longueur des articles ?

Sur leur illustration ?

▶ *Reflets de la physique* a publié dans les numéros 5 et 6 un dossier sur le photovoltaïque. Cette formule vous a-t-elle plu et doit-elle être renouvelée ?
Oui ❑ Non ❑ Peut-être ❑
Si oui, à quelle fréquence ?

Avez-vous des thèmes à proposer ?

▶ Êtes-vous intéressé par plus de débats, plus d'interviews ou de portraits, des reportages dans des laboratoires ?
Oui ❑ Non ❑
Précisez :

▶ Nous pensons que les Divisions de spécialité et les Sections régionales devraient intervenir plus souvent. Quelle forme vous paraîtrait la plus judicieuse ?

▶ Avez-vous des propositions pour valoriser la notoriété et le contenu de la revue ? (mise en ligne sur site internet SFP, diffusion, etc.)

Fragilité des matériaux : causes et remèdes

Tanguy Rouxel (Tanguy.Rouxel@univ-rennes1.fr), LARMAUR, FRE-CNRS 2717, Université de Rennes 1, campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex

La fragilité et son contraire, la ductilité, ne sont pas des propriétés intrinsèques des matériaux. Le temps, au travers de la durée d'observation ou de la vitesse de sollicitation, est un facteur déterminant. La pression et la température sont d'autres paramètres importants. L'homme l'a souvent appris à ses dépens, en faisant naviguer des navires dans des eaux trop froides, leurs coques métalliques devenant fragiles. Aujourd'hui encore, cette problématique suscite de nombreux travaux dans les domaines du génie civil et de la métallurgie.

Un matériau est dit « fragile » lorsque la résistance qu'il oppose à l'initiation (à partir d'un défaut préexistant) et à la propagation d'une fissure – ou ténacité* – est faible. L'homme a su parfois tourner la fragilité des matériaux à son avantage, pour tailler des coins en silex et pour façonner des lames tranchantes en obsidienne(1) au paléolithique, ou encore pour extraire des blocs de pierre pour creuser des citernes dans l'antiquité (des pieux de bois introduits dans des failles étaient aspergés d'eau et le gonflement engendré provoquait l'ouverture des failles et l'avancée des fissures). C'est aussi la fragilité du verre qui permet au verrier de découper une plaque suivant un contour prédéfini à l'aide d'une simple rayure préalable. Cependant, la ductilité des matériaux est le plus souvent recherchée pour façonner des objets. L'homme s'est d'abord intéressé à l'argile et au cuivre, façonnables à température ambiante, puis à l'acier et au verre, ductiles à chaud. C'est l'écoulement du verre* à relativement basse température (dès 600°C pour le verre à vitre), autorisant la mise en œuvre par soufflage ainsi que les procédés de moulage et d'étirage, qui est à l'origine du formidable essor de cette famille de matériaux.

À toute surface correspond une énergie spécifique. Un matériau qui ne peut accommoder une sollicitation mécanique en se déformant – comme le ferait un matériau ductile – dissipe l'énergie par création de nouvelles surfaces en produisant des fissures et en se fracturant : c'est un matériau fragile. C'est le cas du verre qui, sous charge concentrée ou à l'occasion d'un impact, donne naissance à de multiples fissures ou à des éclats sans engendrer de déformation permanente visible (on peut recoller les morceaux !).

La figure 1 illustre ces deux types de comportements, fragile et ductile, pour une expérience d'indentation courante, telle qu'elle est pratiquée pour évaluer la dureté des matériaux. Dans cette expérience, une pointe pyramidale à base carrée en diamant est amenée en contact avec la surface de l'échantillon et chargée pendant environ 15 s. Il en résulte une empreinte permanente, dont les dimensions reflètent la dureté, ainsi qu'un endommagement par fissuration (de petites fissures qui partent des coins de l'empreinte sont visibles en surface) et écaillage (cas des fortes charges). L'écoulement (au sens de l'apparition d'une déformation irréversible) est d'autant plus facile que l'énergie de liaison est faible. Inversement, la fragilité augmente lorsque la nature de la liaison change, de Van der Waals (cas des liaisons intermoléculaires dans les polymères) à métallique, à ionique et à covalente. Le verre de chalcogénures, constitué d'unités structurales très covalentes, répond à l'indentation par un endommagement mécanique important, se manifestant par des fissures radiales et un écaillage nettement visible sur la figure 1a. Dans les mêmes conditions d'indentation, le verre à vitre, présentant des liaisons interatomiques mixtes ioniques et covalentes, s'endommage beaucoup moins. Seules des fissures radiales

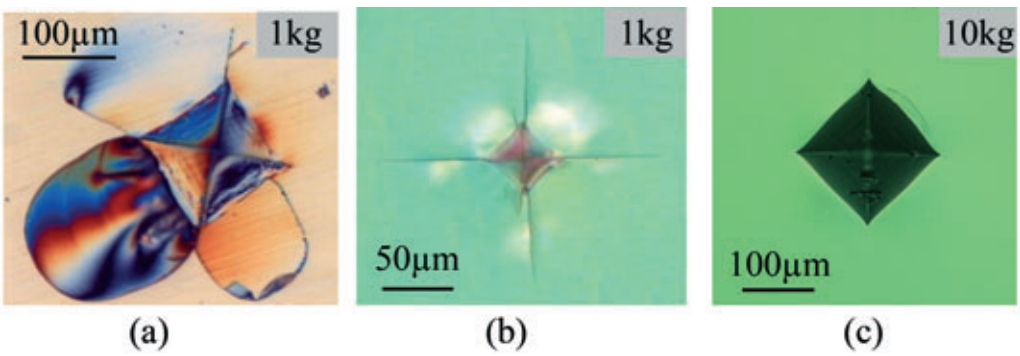


Figure 1 : Indentations réalisées à la surface de verres de différentes compositions à l'aide d'un diamant de forme pyramidale (indentation Vickers). a) Verre de chalcogénures à base de germanium et de sélénium, transparent dans l'infrarouge. b) Verre à vitre, principalement constitué de silice (70 %) et d'oxydes de calcium, de sodium et de magnésium. c) Verre métallique massif à base de zirconium. (Clichés : Jean-Pierre Guin et Vincent Keryvin, LARMAUR, Université de Rennes 1).

* Les termes suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire, p. 8.

(1) Verre rencontré sur les flancs des volcans et principalement constitué de silice.

sont visibles sur la figure 1b. Le verre métallique (fig. 1c), beaucoup moins fragile, se déforme plus aisément et offre donc une bonne résistance à la fissuration, même sous de fortes charges. Ainsi, fragilité et ductilité n'expriment que le résultat de la compétition permanente entre l'écoulement (au sens large : plasticité, viscosité★, fluage★) et la fissuration, auxquels un matériau ou une structure est confronté pendant sa mise en forme (injection-extrusion, emboutissage, fonderie, etc.) et auxquels il doit faire face pendant sa durée de vie en service.

La transition fragile-ductile, qui revêt une importance pratique considérable, a été très étudiée dans le cas des métaux. Chez ceux-ci, l'apparition de ductilité lorsqu'on élève la température coïncide avec l'activation de la mobilité des dislocations★ et s'accompagne d'une élévation apparente brutale de la ténacité. La température de transition est alors contrôlée par le taux de nucléation de sources de dislocations au voisinage du défaut le plus sévère (microfissure) et/ou par la vitesse à laquelle les dislocations s'éloignent du défaut, conduisant le plus souvent à son émoussement. Au-dessus de cette température, la contrainte d'activation des dislocations est plus faible que la contrainte de rupture, si bien que le matériau se déforme et ne rompt pas. Cette température est proche de 425°C pour le silicium, 160°C pour le tungstène, -150°C pour un acier doux (teneur en carbone inférieure à 0,4 %).

Dans ce qui suit, l'accent est mis sur les matériaux pour lesquels la relaxation des contraintes à la source de l'apparition de ductilité procède par écoulement visqueux ou diffusionnel de la matière, et en particulier sur le cas du verre, qui est un modèle de matériau fragile à l'ambiante.

Une question de température et de vitesse de déformation

Temps de relaxation et nombre de Déborah

Le verre à vitre est fragile, cassant, quasiment parfaitement élastique à l'ambiante, mais il commence à s'écouler de manière visible au-dessus de sa température de transition vitreuse★. Toutefois, si l'on impose une déformation rapide à cette même température, le verre se fracture de manière fragile : la matière n'a pas eu le temps de se réorganiser pour accommoder la sollicitation imposée. Ainsi, c'est le comportement à une température donnée, eu égard à une vitesse de chargement ou un temps d'observation qui importe, comme cela est illustré schématiquement dans la figure 2. Généralement, la vitesse considérée se situe à l'échelle de l'activité humaine. Mais elle peut être parfois plus rapide (mise en forme par superplasticité à grande vitesse ou par explosion, comportement aux chocs) ou plus lente (échelle de la géologie : tectonique des plaques, évolution des cratères).

Le rapport entre le temps de relaxation caractéristique (τ_r) (voir encadré, p. 8) du matériau à la température T et le temps d'observation (τ_0) gouverne le comportement. Ce rapport porte le nom de nombre de Déborah, $D = \tau_r / \tau_0$, en référence à un cantique rapporté dans l'Ancien Testament (Livre des Juges, ch. 5, verset 5) et attribué à la prophétesse Déborah, selon lequel « …les montagnes s'écoulèrent devant le Seigneur… ». Le sens de cette phrase est double : d'abord tout s'écoule, même les montagnes ; mais Déborah ajoute « devant le Seigneur » car, aux yeux des hommes, le temps d'observation est trop court pour déceler un quelconque changement.

Le nombre D peut donc s'interpréter aisément : si $D < 1$, le comportement est ductile et l'écoulement est éventuellement observé ; si $D > 1$, alors la cinétique des déplacements microscopiques est insuffisante et le comportement gagne en fragilité. Pour un matériau cristallin, la distinction entre les états solide et liquide est très claire, tandis qu'elle est nettement moins évidente pour un verre, lequel est souvent perçu comme un solide de grande viscosité. Dans ce dernier cas, le paramètre D permet d'apprécier l'état dans lequel le matériau se trouve : un solide correspond à $D > 1$, tandis que pour un liquide $D < 1$. En construction mécanique ou dans le domaine du génie civil, le paramètre τ_0 peut être remplacé par la durée de vie en service.

Un modèle rhéologique viscoélastique linéaire élémentaire (voir encadré, p. 8), supposant que le comportement est simplement le résultat de la combinaison de contributions élastique et visqueuse, autorise une estimation grossière rapide de τ_r : $\tau_r = \eta/\mu$, où η est le coefficient de viscosité linéaire (rapport entre une contrainte et la vitesse de déformation qu'elle induit) et μ le module élastique de cisaillement (rapport entre une contrainte de cisaillement et la distorsion angulaire γ engendrée). À de rares exceptions près, η et μ décroissent quand T augmente, mais l'influence de la viscosité, qui varie de plusieurs ordres de grandeur sur quelques dizaines de degrés, l'emporte très largement. On trouve ainsi (tableau 1) que pour le bitume à -5°C, $\tau_r \sim 10$ s, tandis que $\tau_r \sim 0{,}1$ s pour le verre à vitre à 600°C et $\tau_r \sim 1$ jour pour ce même verre à 500°C. L'influence de la température sur la valeur de τ_r est représentée sur la figure 3 pour des matériaux variés, pour lesquels il existe des données de viscosité et d'élasticité à chaud. La transition entre un comportement fragile et un comportement ductile est souvent assez brutale et se situe au voisinage de la transition vitreuse (température T_g) pour un verre. On observe que le temps de relaxation correspondant à la transition vitreuse est de l'ordre de la minute pour la plupart des matériaux étudiés (fig. 3). Le verre basaltique, avec une composition proche de celle d'une lave volcanique, s'écoule au-dessus de 750°C ; en dessous de 600°C, le temps de relaxation atteint plusieurs millénaires et la lave peut être considérée comme figée.

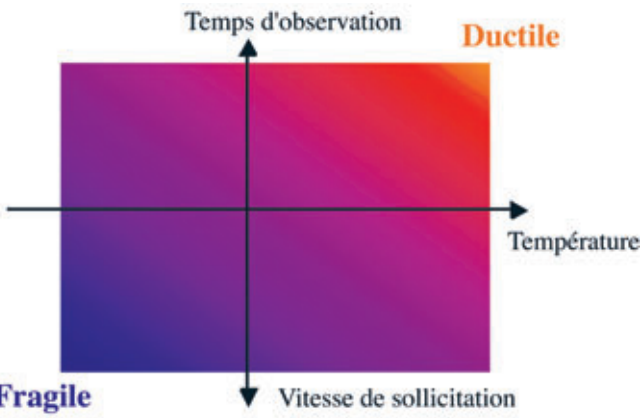


Figure 2 : Ainsi que le démontre le couplage entre la température et la vitesse de sollicitation (ou inversement le temps d'observation), fragilité et ductilité ne sont pas des propriétés intrinsèques des matériaux et des structures. Il est généralement possible de réduire la fragilité d'un matériau, soit en élevant la température, soit en diminuant la vitesse de sollicitation.

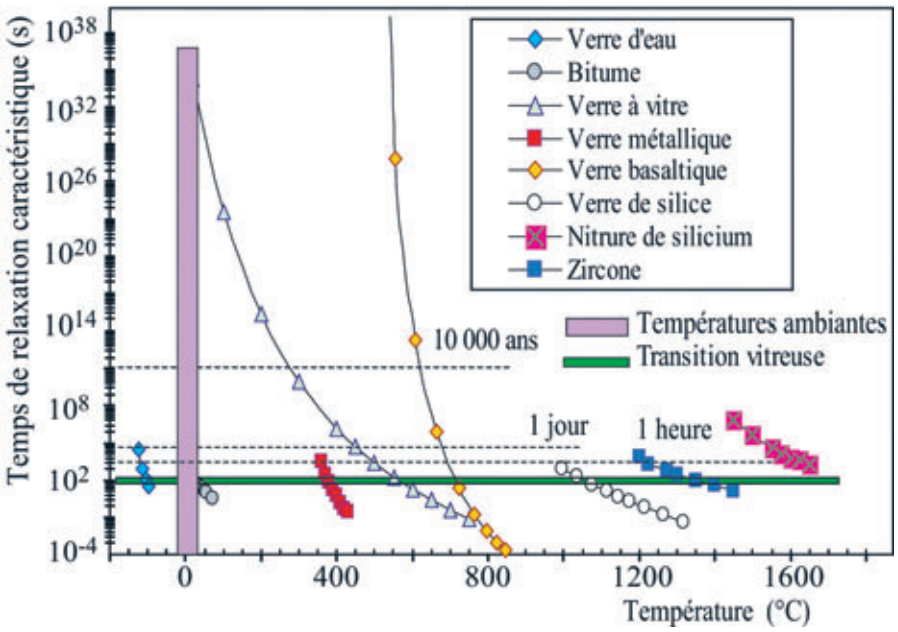


Figure 3 : Influence de la température sur le temps de relaxation caractéristique. La transition vitreuse correspond conventionnellement à une viscosité de $10^{12,6}$ Pa.s. Les données rassemblées sur cette figure semblent indiquer qu'elle se manifeste pour un temps de relaxation d'environ 10^2 s.

À propos de l'écoulement du verre des vitraux des cathédrales…

Le cas du verre à vitre est intéressant, car on peut décrire un vaste domaine de températures, du solide viscoélastique au liquide (surfondu). Au voisinage de T_g, $\eta \sim 10^{12,6}$ Pa.s (valeur conventionnelle), tandis que $\mu(T_g) \sim \mu(20°C)$ (μ vaut respectivement 29,3 et 27,2 GPa à 20 et 562°C), si bien que $\tau_r \sim 37$ s à T_g, c'est-à-dire un temps à l'échelle de la durée des essais mécaniques réalisés classiquement au laboratoire. À l'ambiante, le temps de relaxation caractéristique du verre, prédit par extrapolation à 20°C des courbes de viscosité et d'élasticité obtenues au-dessus de 530°C, serait au moins de quelques dizaines de milliers d'années (une valeur de l'ordre de 10^{23} années a été avancée récemment). L'écoulement du verre à vitre à l'ambiante est donc insignifiant ; cela s'applique (contrairement à une idée reçue) aux vitraux de cathédrale, dont le fluage est d'ailleurs beaucoup plus lent que celui du plomb servant à les sertir (pour une taille de grains de l'ordre du mm, on trouve pour celui-ci une constante de temps de quelques siècles).

Les enrobages routiers : des matériaux *high-tech* pour conditions extrêmes

Remarquons que pour les liants bitumineux, matériaux viscoélastiques complexes adoptant un comportement voisin de celui des polymères amorphes, les valeurs de τ_r indiquent qu'un même liant peut manifester un comportement élastique, éventuellement fragile, au cœur de l'hiver, tandis qu'un comportement ductile (fluide visqueux) apparaît dès que les températures se font plus douces. Ainsi, dans les régions les moins tempérées du globe (Sibérie, Finlande, Alaska…), il n'existe pas encore d'enrobages routiers bitumineux capables de résister tout à la fois à la fissuration ou au craquèlement en hiver, lorsque la température descend en dessous de -20°C, et à la déformation viscoplastique en été, quand la température dépasse 35°C. Dans ces régions, il faut donc refaire les enrobages routiers chaque année. La température de transition fragile-ductile des bitumes se situe généralement entre 20 et 7°C. La proximité de cette température avec la température ambiante fait qu'un enrobage routier qui se fissure au passage d'un poids lourd peut parfois guérir (phénomène d'autoréparation) sur la période séparant deux passages successifs.

Ductilité : vers la mise en forme des matériaux

La figure 3 indique aussi que même dans le cas des matériaux les plus fragiles à l'ambiante, tels que les verres et les céramiques, on peut trouver un domaine de températures exploitable pour tenter une mise en forme de pièces par déformation à chaud. L'exemple de la zircone (ZrO_2), largement utilisée aujourd'hui pour la fabrication d'implants biocompatibles, de filtres, de billes ou d'outils coupants, est frappant : dès 1400°C, ce matériau peut se prêter à une mise en forme par emboutissage, et manifeste un comportement

Matériau	$\tau_r = \eta / \mu$
Verre médiéval (vitraux des cathédrales) à ~ 20°C	2×10^{23} a
Manteau terrestre	10^6 a
Plomb fondu – Taille des grains = 1mm, à ~ 20°C	500 a
Glace à – 98°C	120 a
Verre à vitre à 400°C	32 a
Plomb extrudé – Taille des grains = 50 µm, à ~ 20°C	5 a
Verre à vitre à 500°C	1 j
Glace à – 5°C	1 j
Cuivre à ~ 20°C	10 h
Matériaux composites Si_3N_4 /SiC à 1600°C	1 h
Bitume à – 5°C	10 s
Verre à vitre à 600°C	0,1 s
Bitume à 40°C	1 ms
Résine (époxy) à ~ 20°C	1 ms
Eau à ~ 20°C	1 ns

Tableau 1 : Valeurs des constantes de temps de relaxation caractéristiques, $\tau_r = \eta / \mu$. Estimations grossières sur la base d'un modèle rhéologique simple (Maxwell), en utilisant les données d'élasticité et de viscosité de la littérature ou, à défaut de coefficient de viscosité, d'extrapolation à partir des données de fluage des matériaux. (ns : 10^{-9} s, h : heure, j : jour, a : année).

(2) Prix Nobel de physique 1965.

superplastique (possibilité d'obtenir plus de 100 % d'allongement). Il est néanmoins nécessaire que la taille des grains soit suffisamment fine et que la microstructure soit dense et homogène.

Ce qu'il ne faut pas faire...

De manière générale, pour qu'un matériau polycristallin n'adopte pas un comportement fragile, il faut éviter la précipitation d'inclusions dures et fragilisantes et faire en sorte que la taille des grains soit suffisamment petite, typiquement en deçà de 0,1 mm. Les échantillons d'acier prélevés sur l'épave du Titanic (naufrage du 2 avril 1912) en 1985 par une équipe d'investigation franco-américaine ont révélé des teneurs en soufre et en phosphore très au-dessus des teneurs habituelles des aciers modernes, avec un rapport manganèse/soufre de 7 contre 200 pour les aciers courants d'aujourd'hui. S'ajoute à la déficience en manganèse, élément améliorant la ductilité, une taille des grains deux fois plus grande que celle qui est préconisée. Certes, ce navire d'exception (270 m de longueur pour 46 000 tonnes) a « malencontreusement » percuté à pleine vitesse un iceberg de 3 à 6 fois son poids. Mais la situation fut grandement aggravée par la méthode de rivetage utilisée pour assembler les tôles, avec des trous réalisés par choc à froid, ainsi que par la fragilité de l'acier employé (y compris pour les rivets, faits d'un acier ordinaire contenant environ 9 % de précipités de silicates de fer), dans lequel de nombreuses inclusions de sulfure de manganèse (MnS) ont été observées. Les résultats d'essais de résistance aux chocs mécaniques (essais « Charpy ») sont clairs : la température de transition fragile-ductile de l'acier choisi pour réaliser la coque du Titanic est d'environ 32°C, tandis qu'elle vaut sensiblement -27°C pour les aciers modernes. Sachant que l'eau était à -2°C la nuit du naufrage, autant dire que la coque de ce paquebot s'apparentait à une coque de verre ! D'ailleurs, le frottement tangentiel du flanc tribord immergé de la coque sur l'iceberg a produit une fissure étroite sur 76 m de long, se propageant de rivet en rivet, comme on déchire une feuille de papier en suivant les pointillés, et présentant donc des caractéristiques proches de celles d'une rupture fragile (fissure étroite avec peu ou pas de déformation permanente).

Bien que de nombreuses structures artificielles produites au cours des deux derniers siècles (ponts, navires, etc.) aient été ruinées d'un seul coup un jour de grand froid en raison de la fragilité de l'alliage utilisé, l'homme continue d'apprendre à ses dépens ce que « fragilité » veut dire. Ainsi, dans l'explosion de la navette spatiale américaine Challenger, le 28 janvier 1986, après seulement 1 minute de vol, la fragilité du joint torique assurant l'étanchéité de l'un des réservoirs fut-elle mise en cause par R.P. Feynman[2], qui montra que ce joint perdait sa plasticité (ductilité) lorsqu'on le plongeait dans de l'eau glacée. Plus près de nous, le 18 mars 2002, le Lake Carling, un vraquier transportant 25 000 tonnes de minerai de fer, manqua de sombrer pendant la traversée du golfe du St-Laurent au Québec, après qu'une fissure de 8 mètres de longueur

Glossaire

Verre
Solide non cristallin (amorphe) présentant le phénomène de transition vitreuse. Matériau obtenu par trempe d'un liquide, c'est-à-dire par figeage de la structure atomique désordonnée.

Coefficient de viscosité
Coefficient traduisant la relation de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement (σ) et la vitesse de distorsion angulaire ($d\gamma/dt$) résultante : $\sigma = \eta\, d\gamma/dt$ (loi de la viscosité linéaire ou newtonienne). Par abus de langage, η est appelé viscosité.

Transition vitreuse
Domaine de température centré sur T_g, qui marque le passage entre le liquide et le verre (liquide surfondu figé) et correspondant sensiblement à une viscosité de $10^{12,6}$ Pa.s ($10^{13,6}$ poises).

Superplasticité
Aptitude que présentent certains matériaux polycristallins à pouvoir être déformés de plus de 100% en traction. Il s'agit généralement de matériaux denses à grains fins.

Ténacité
La ténacité est la valeur critique du facteur d'intensité des contraintes au voisinage d'un défaut (entaille, inclusion, microfissure, etc.) ou d'un front de fissure, à laquelle la fissure progresse rapidement, entraînant une rupture catastrophique dans la plupart des cas. La ténacité est une mesure de la fragilité des matériaux, qui s'exprime en $Pa.m^{1/2}$.

Dislocation
Défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. La mobilité des dislocations est à l'origine de la déformation plastique des matériaux cristallins.

Fluage
Évolution de la géométrie d'une structure sous charge constante. Phénomène thermiquement activé.

Élasticité, viscosité, cinétique de relaxation et nombre de Déborah

Le comportement élastique correspond à la proportionnalité entre la déformation et la contrainte. La viscosité pure se manifeste par la proportionnalité entre la vitesse de déformation et la contrainte appliquée. Le coefficient de viscosité s'obtient en mesurant la vitesse de déformation pour une contrainte appliquée donnée. La cinétique de relaxation de la contrainte est déterminée en imposant une déformation et en suivant la décroissance de la contrainte avec le temps.

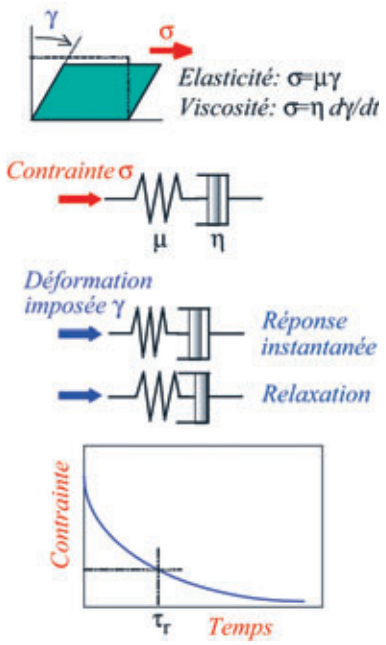
Une façon simple d'estimer le temps de relaxation caractéristique consiste à exprimer la déformation totale comme la somme d'une composante élastique (module d'élasticité en cisaillement μ (Pa)) et d'une composante visqueuse (viscosité η (Pa.s)), représentées schématiquement par un ressort et un amortisseur en série : c'est le modèle dit de Maxwell.

À l'instant t, en utilisant le modèle de Maxwell, le rapport de la contrainte à la contrainte initiale vaut $\exp(-t/\tau_r)$, où τ_r est le temps de relaxation caractéristique du processus défini par : $\tau_r = \eta/\mu$.

On peut donc estimer τ_r, soit directement à partir d'un essai de relaxation, soit à partir des valeurs de la viscosité et du module de cisaillement.

Le nombre de Déborah (D) permet de déterminer rapidement si, à l'échelle de la durée d'observation retenue (τ_0), la matière semble figée ou au contraire en mouvement, et donc si le matériau adopte un comportement en apparence fragile ou ductile : $D = \tau_r/\tau_0$.

La ductilité correspond à $D < 1$, la fragilité à $D > 1$.



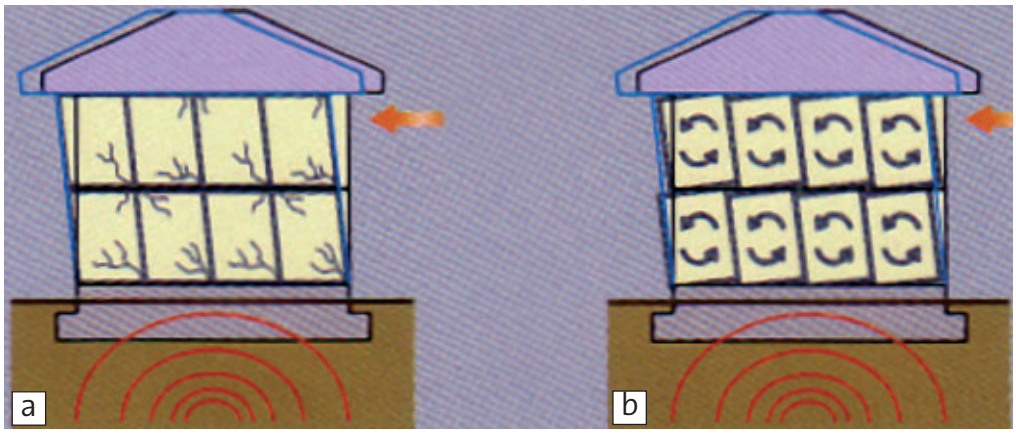


Figure 4 : Habitat antisismique innovant, construit par assemblage d'éléments, capable d'accommoder un mouvement latéral périodique de forte amplitude par rotation et glissement des éléments les uns par rapport aux autres. Le bâtiment traditionnel (a) constitué de blocs assemblés de manière rigide se fissure, tandis qu'en autorisant des mouvements relatifs entre les blocs (b) l'édifice gagne en souplesse et sa résistance à l'endommagement augmente. (Dyne-Concrete Life, Documentation Technique, Sekisui House, Japon – www.sekisuihouse.com)

soit apparue au niveau de l'une des cales. De nouveau, la température de transition fragile-ductile de l'acier, identique à celle du Titanic, a été incriminée. Cette situation fut aggravée par un chargement mal équilibré ayant entraîné une flexion excessive de la coque, ainsi que par une température ambiante en dessous de zéro.

À l'inverse, une ductilité excessive peut aussi avoir des conséquences désastreuses sur la tenue en service. Par exemple, avec une taille de grains (d) millimétrique typique de celle du plomb élaboré par coulée, la constante de temps de relaxation à l'ambiante est de plusieurs siècles. Mais si la taille de grains vaut quelques dizaines de microns, ainsi que c'est le cas pour les conduites d'eau en plomb « mou » réalisées par extrusion à l'époque victorienne (99,5% de plomb avec ajouts d'antimoine et d'étain), alors le matériau flue 1000 fois plus vite et τ_r est ramené à quelques années. La vitesse de déformation croît lorsque la taille des grains diminue et est typiquement proportionnelle à σ^n/d^p. Les valeurs des exposants n et p, classiquement entre 1 et 3, renseignent sur le mécanisme de déformation. Cette description reposant sur la taille des grains trouve néanmoins une limite physique à l'échelle atomique, soit, typiquement, en dessous d'une dizaine de nanomètres.

L'ingéniosité de la nature et celle des constructeurs

La nature a souvent trouvé des solutions ingénieuses au problème de la fragilité : le squelette osseux, relativement fragile, est protégé par de la matière vivante souple et résistante aux chocs. Dans le cas de la boîte crânienne, peu protégée, les sutures entre les différents os constituant le crâne sont des dispositifs de déviation de fissures qui augmentent l'énergie nécessaire à la fissuration et réduisent donc la fragilité. Dans le cas de l'œuf, au contraire, la fragilité est recherchée afin de faciliter l'éclosion. La coquille est donc monobloc. La structure fibreuse des arbres et celle en feuillets des coquillages, sont d'autres remèdes efficaces à la fragilité, par dissipation de l'énergie apportée (chocs, agression) le long des interfaces fibres-matrice (bois) ou dans des plans de clivage facile (coquille d'huître). Les hommes s'inspirent de plus en plus des solutions trouvées par les organismes vivants et inventent aussi des matériaux et des structures originaux. Le cas des matériaux composites à fibres ou des structures en nids d'abeilles utilisés dans l'aéronautique en est une bonne illustration.

Afin d'accroître la vitesse de mise en forme des tôles en alliages légers (avions, voitures, emballages), les métallurgistes recherchent des matériaux ductiles mais résistants, et des procédés de mise en forme par déformation plastique rapide. Récemment, des céramiques à grains très fins, de dimension nanométrique, ont été développées afin de réduire la fragilité et d'envisager une mise en forme par superplasticité à des températures compatibles avec les outils industriels actuels. À l'échelle macroscopique, des structures métalliques hélicoïdales ont été imaginées pour accroître la « ductilité » (ou plus précisément la souplesse) d'habitats en béton construits dans des zones à risques sismiques, en leur permettant d'accommoder des mouvements brusques en prévision de tremblements de terre. Au Japon, des architectes et des ingénieurs du bâtiment travaillent à la mise au point d'une architecture d'habitat antisismique révolutionnaire avec une ossature composite constituée de blocs capables de glisser et de pivoter les uns par rapport aux autres (fig. 4), à la manière des grains dans les matériaux superplastiques. ■

En savoir plus...

Sur la transition fragile-ductile

1 • F. Louchet et Y. Bréchet, "Physics of toughness", *Phys. Stat. Sol.* (a) **131** (1992) 529-537.

2 • T. Rouxel et J-C. Sanglebœuf, "The brittle to ductile transition in a silico-soda-lime glass", *J. Non-Cryst. Sol.* **271** (2000) 224-235.

Sur la rhéologie du verre et sur le nombre de Déborah

3 • A.K. Varshneya, *Fundamentals of inorganic glasses*, Academic Press Inc., New-York, London (1994). Voir aussi : M. Reiner, "The Deborah Number", *Phys. Today*, **62** (1964) 46.

4 • E. Zanotto et P. K. Gupta, "Do cathedral glasses flow? - Additional remarks", *Am. J. Phys.* **67** (1999) 260-262.

Sur les liants bitumineux

5 • Jean-François Corté et Hervé Di Benedetto, *Matériaux routiers bitumineux - 1 : Description et propriétés des constituants*, chapitre 3 : « Les liants hydrocarbonés », Hermes-Lavoisier (2004), pp. 39-176.

Sur les catastrophes maritimes et l'explosion de la navette spatiale américaine Challenger

6 • S. Hill, "The mystery of the Titanic: A case of brittle fracture?", *Materials World* **4** (1996) 334-335. Voir aussi : www.si.edu/resource/faq/nmah/titanic.htm

7 • R. P. Feynman, *What do you care what other people think? Further adventures of a curious character*, Bantam Doubleday Dell Pub (1992).

Sur les modules d'élasticité à chaud et sur le fluage et la superplasticité des matériaux à grains fins

8 • T. Rouxel, « Superplasticité », dans *Nanosciences - Tome 2, Nanomatériaux /Nanochimie*, sous la direction de M. Lahmani, C. Bréchignac et P. Houdy (Belin, 2006).

Les matériaux multiferroïques

I – Le défi du couplage entre magnétisme et ferroélectricité

Jens Kreisel[1] (Jens.Kreisel@inpg.fr), Wolfgang Kleemann[1, 2], Raphaël Haumont[3]
1 Laboratoire des Matériaux et du Génie Physique (CNRS), INP Grenoble - MINATEC, 38016 Grenoble
2 Angewandte Physik, Universität Duisburg-Essen, 47048 Duisburg, Allemagne
3 Laboratoire de Physico-Chimie de l'État Solide, ICMMO, CNRS, Université Paris XI, 91405 Orsay

L'origine du couplage de différentes propriétés physiques au sein d'un même matériau est un sujet central de la physique de la matière condensée et interpelle les scientifiques depuis des siècles. Nous nous intéressons ici à une classe de matériaux qui possèdent simultanément plusieurs propriétés dites *ferroïques* (*ferro*magnétisme, *ferro*électricité et/ou *ferro*élasticité), dont le couplage dépend de la mise en forme, de la structure cristallographique et de l'arrangement des *spins* magnétiques, et constitue un sujet qui combine un fascinant défi scientifique avec un grand potentiel d'applications.

Un matériau est généralement considéré comme « fonctionnel » s'il possède une propriété physique utilisable dans une application. Actuellement, un grand nombre de recherches se concentrent sur l'étude de matériaux *multi*-fonctionnels, dans lesquels plusieurs propriétés peuvent être potentiellement exploitées. Une des questions clés pour le futur développement et la compréhension des matériaux multifonctionnels concerne le couplage mutuel entre les différentes propriétés physiques. Par ailleurs, si un tel couplage existe, il faudra aussi se demander s'il est fort, quels sont les mécanismes mis en jeu, et s'il est exploitable dans des applications.

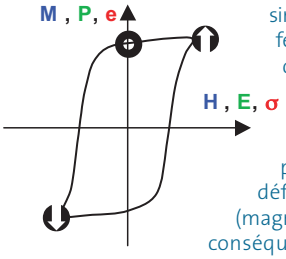
Afin de répondre à de telles questions, nous nous intéressons particulièrement à une classe de matériaux appelés *multiferroïques*, qui attirent actuellement un intérêt considérable [1-4]. Les multiferroïques sont des matériaux multi-fonctionnels par excellence, puisqu'ils possèdent simultanément plusieurs propriétés dites *ferroïques* : *ferro*magnétisme, *ferro*électricité et/ou *ferro*élasticité. Le préfixe *ferro* fait historiquement référence au fer, qui montre une aimantation spontanée M qui peut être contrôlée (et notamment être renversée) par un champ magnétique. De la même manière, la polarisation électrique P d'un matériau ferroélectrique est contrôlée par un champ électrique, de même que la déformation ferroélastique e_{ij} l'est par une contrainte mécanique (voir encadré 1, p. 11). La classe des multiferroïques a été élargie aux matériaux présentant des propriétés *antiferroïques* : *antiferro*magnétisme, *antiferro*électricité. Les matériaux ferroélectriques-ferroélastiques ont été étudiés depuis longtemps et sont à l'origine de nombreuses applications. Un des exemples phares de cette classe est le standard industriel $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ (PZT), dans lequel le couplage entre déformation et polarisation électrique conditionne une forte réponse piézoélectrique qui dépasse largement celle du quartz.

Cependant, les matériaux qui sont à la fois ferroélectriques *et* ferromagnétiques ont été beaucoup moins étudiés. À ce jour, il n'existe aucune application qui profite d'une telle multi-fonctionnalité, bien qu'il ait été suggéré, par exemple, que l'aimantation magnétique M et la polarisation électrique P pourraient indépendamment encoder une information dans un seul *bit* de mémoire. La réelle faisabilité d'une telle mémoire à quatre états (deux magnétiques $M_{\downarrow\uparrow}$ et deux ferroélectriques $P_{\downarrow\uparrow}$) n'a d'ailleurs été démontrée que très récemment [5], et on peut espérer des vitesses de réponse assez grandes pour des applications pratiques. À noter que le fonctionnement d'une telle mémoire ne demande pas de couplage entre ces deux propriétés physiques : un fort couplage serait même désastreux. Au contraire, pour certains matériaux, il faut considérer que l'ordre magnétique et la ferroélectricité puissent être couplés ; la polarisation électrique P serait alors contrôlable par un champ magnétique et l'aimantation M contrôlable par un champ électrique : on parle de *couplage magnéto-électrique*. Si un tel couplage des deux grandeurs physiques existe au sein d'un matériau à la fois magnétique et ferroélectrique, on peut alors envisager un autre fonctionnement original d'une mémoire : écrire une information électriquement et la lire magnétiquement.

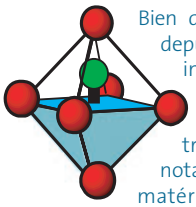
Le peu d'études du passé sur les ferroélectriques-magnétiques s'explique par le fait que ces deux propriétés semblent s'exclure. En effet, la présence d'électrons d des éléments de transition (favorables au magnétisme) défavorise une hybridation avec l'oxygène et donc un déplacement cationique (nécessaire pour la ferroélectricité, voir encadré 1) [6]. De plus, un ferroélectrique doit être isolant pour que les charges mobiles ne détruisent pas la polarisation électrique, alors que la plupart des ferromagnétiques sont des conducteurs. Enfin, si les *multiferroïques* ferroélectriques-magnétiques se font rares, ceux qui présentent un couplage des deux propriétés – on les appelle *multiferroïques magnéto-électriques* – le sont encore bien plus.

Les matériaux dits « ferroïques »

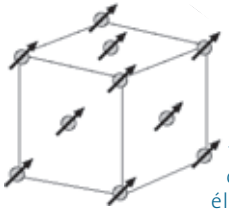
encadré 1



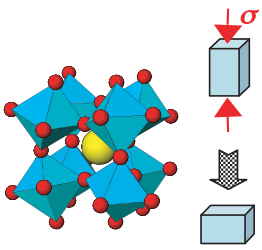
Le terme « ferroïque » unifie des aspects similaires des matériaux ferromagnétiques, ferroélectriques et ferroélastiques. Une des propriétés clés, commune à ces trois classes de matériaux, est la présence d'un cycle d'hystérésis (cf. figure) qui traduit le contrôle d'une caractéristique physique (aimantation, polarisation, déformation) par un champ extérieur (magnétique, électrique, mécanique). Deux conséquences importantes découlent d'un cycle d'hystérésis : 1) la caractéristique physique reste non nulle – rémanente ou spontanée – en champ nul (⊙) ; 2) l'inversion du champ permet de renverser le signe de la caractéristique physique (↓↑).



Bien que le phénomène correspondant ait été étudié depuis le 17e siècle, le terme **ferroélectricité** n'a été introduit qu'en 1912 par Erwin Schrödinger. La ferroélectricité a été longtemps considérée comme un phénomène rare. Mais on connaît aujourd'hui un très grand nombre de matériaux ferroélectriques, notamment sous forme de pérovskites ABO_3. Un matériau ferroélectrique est caractérisé par une polarisation électrique spontanée *P* dont la direction peut être renversée par un champ électrique *E*. Cette polarisation macroscopique est à l'échelle microscopique directement liée à un déplacement des cations chargés positivement (en vert sur la figure) par rapport au barycentre des anions chargés négativement (en rouge).



Le **ferromagnétisme** est la plus ancienne des propriétés ferroïques connues, utilisée par exemple dans la boussole inventée par les Chinois en 100 avant J.C. Un matériau ferromagnétique montre une aimantation *M* spontanée qui peut être contrôlée par l'application d'un champ magnétique *H*. Le mouvement des électrons dans le nuage électronique est responsable de l'existence d'un magnétisme dit orbital, alors que leur rotation sur eux-mêmes est responsable du magnétisme de *spin* qui est généralement l'effet prépondérant.



La déformation **ferroélastique** a été pendant longtemps considérée comme une propriété liée au ferromagnétisme (donnant lieu à la magnétostriction) et à la ferroélectricité (électrostriction). Ce n'est que dans les années 70 que la ferroélasticité a été réellement reconnue comme une propriété indépendante. La figure ci-contre illustre le mécanisme microscopique d'une déformation ferroélastique permanente, même en absence d'une contrainte, à l'exemple de la pérovskite $SrTiO_3$ (en jaune le Sr, en rouge les oxygènes, les Ti étant aux centres des octaèdres). Une contrainte mécanique σ peut modifier l'angle et la direction de la rotation des octaèdres (à gauche), et donc l'état de déformation macroscopique *e* du matériau (à droite). Tout comme pour les autres propriétés ferroïques, un cycle d'hystérésis ferroélastique est ainsi obtenu en appliquant un cycle de contrainte uniaxiale.

Différents matériaux – différents mécanismes

En conséquence, la recherche de nouveaux systèmes modèles est la condition *sine qua non* pour mieux comprendre la physique relative au couplage magnéto-électrique et pour envisager d'éventuelles applications. On observe aujourd'hui essentiellement deux démarches pour répondre à cet objectif.

(i) La première démarche, qui connaît actuellement un essor considérable, consiste à construire des *multiferroïques artificiels* en combinant un matériau ferroélectrique avec un matériau magnétique, sous forme d'une hétérostructure de couches minces ou de diverses formes de composites (multiferroïque extrinsèque). Le lecteur se référera à l'article de Prellier *et al.* (pp. 14-16) pour plus de détails et les références sur cette démarche.

(ii) La deuxième démarche vise à trouver des nouveaux systèmes *multiferroïques intrinsèques*, c'est-à-dire des multiferroïques dans lesquels les propriétés ferroélectriques et magnétiques existent au sein du même matériau. Pour répondre à cet objectif, les chercheurs s'intéressent notamment à la synthèse de nouvelles formulations chimiques dans des matériaux sous forme massive ou de couches minces. Le très grand effort de recherche des dernières années a en effet conduit à la découverte de nouveaux matériaux multiferroïques magnéto-électriques. L'étude de ces différents matériaux a notamment permis de mettre en évidence une grande variété de mécanismes de couplage. Discutons deux exemples instructifs pour illustrer comment il est possible d'anticiper qualitativement l'apparition et le type de couplage magnéto-électrique selon le matériau considéré.

Il existe une première famille de matériaux où l'ordre magnétique et l'ordre ferroélectrique sont associés avec deux cations différents. On peut alors anticiper intuitivement que le couplage entre aimantation magnétique et polarisation électrique n'est que faible. Prenons le cas de la pérovskite $BiMnO_3$ (BMO) où le magnétisme est associé aux électrons 3*d* du Mn^{3+}, alors que la ferroélectricité est conditionnée par le déplacement du cation Bi^{3+}. BMO montre une transition ferroélectrique vers $T_{FE} = 800$ K et une transition ferromagnétique vers $T_{FM} = 110$ K, au-dessous de laquelle l'aimantation et la ferroélectricité coexistent. Néanmoins, cette coexistence ne suffit pas à en faire un matériau multiferroïque avec un fort couplage magnéto-électrique : en effet, l'évolution de la constante diélectrique ε ne montre qu'une très faible anomalie autour de T_{FM} et elle n'est que très peu dépendante d'un champ magnétique. Aussi, il apparaît vraisemblable qu'un couplage fort nécessite un ingrédient supplémentaire : il faut que le matériau soit également ferroélastique, afin de favoriser un couplage des ordres magnétique et ferroélectrique à travers le sous-système élastique.

Dans un deuxième type de matériaux, la (faible) ferroélectricité n'est pas directement associée à une instabilité structurale, mais est induite indirectement par un ordre de charge et/ou un ordre magnétique particulier, comme illustré sur la figure 1. On considère aujourd'hui que les matériaux avec des dipôles électriques induits par un ordre magnétique présentent potentiellement un couplage magnéto-électrique fort, puisque ces dipôles électriques peuvent être directement ajustés par l'application d'un champ magnétique [7]. En effet, un tel contrôle de propriétés électriques par un champ magnétique a été démontré dans des systèmes à magnétisme frustré, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels une compétition des interactions magnétiques empêche la mise en place d'un ordre magnétique simple [7]. Est-ce que l'inverse est vrai ? Malheureusement, les forts effets d'un champ magnétique sur la polarisation électrique et sur la constante diélectrique ne conditionnent pas forcément

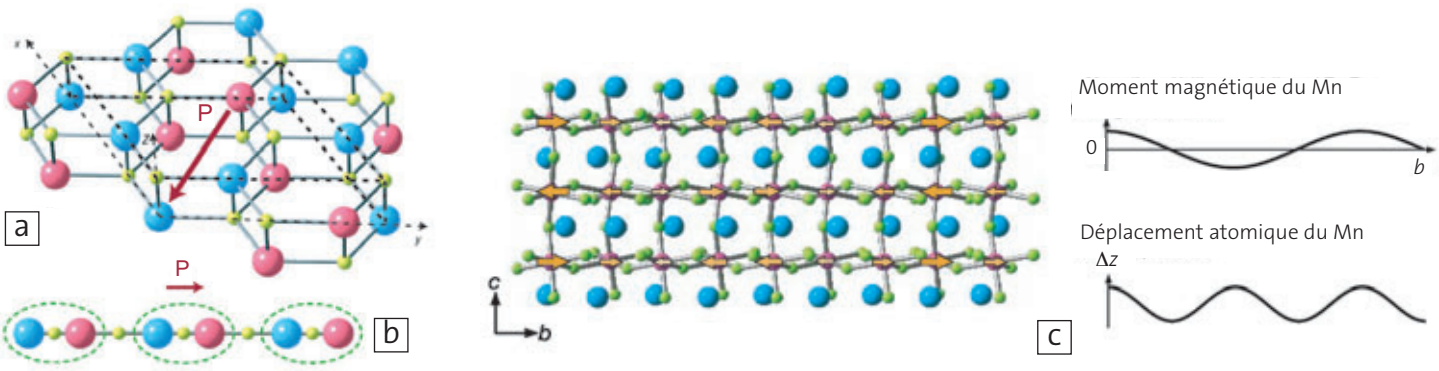


Figure 1: Ordre de charge et structure magnétique comme origine de ferroélectricité.
a,b) Illustration schématique d'une ferroélectricité induite par deux types d'ordre de charge (les cations rouges et bleus portent une charge positive plus ou moins importante). La flèche rouge représente le vecteur de polarisation électrique P résultant du déplacement atomique induit par l'ordre de charge. [Figure d'après S-W. Cheong et M. Mostovoy, Nature Materials ***6*** *(2007) 13.]*
c) Illustration d'une modulation de la ferroélectricité par une structure magnétique. La figure de gauche représente schématiquement la structure cristalline de $TbMnO_3$ (en bleu : Tb, en rouge : Mn, en vert : O) et la modulation de la structure magnétique (direction et taille des flèches oranges). Les deux figures de droite illustrent la corrélation entre la variation du moment magnétique du cation Mn et son déplacement ferroélectrique selon l'axe b du composé. [Figure d'après T. Kimura et al., Nature ***426*** *(2003) 55]*

une forte dépendance des propriétés magnétiques envers un champ électrique. En effet, des exemples pour lesquels une structure magnétique complexe peut être contrôlée par un champ électrique restent très rares. Néanmoins, de très récents résultats montrent qu'un champ électrique peut, dans certains cas, contrôler le sens – horaire ou anti-horaire – d'une hélice magnétique, suggérant que l'on peut encore s'attendre à des effets tout à fait surprenants.

Les deux exemples ci-dessus illustrent comment il est possible, qualitativement, d'anticiper un couplage magnéto-électrique dans un matériau. Néanmoins, il faut souligner que l'existence ou non d'un tel couplage ne peut formellement être comprise et prévue que par des considérations de symétrie (structurale et magnétique). Une telle analyse permet de prévoir si le couplage est direct (linéaire ou non linéaire) ou indirect par le sous-système élastique (électrostriction/piézoélectricité ou magnétostriction/piézomagnétisme) – voir l'encadré 2 pour plus de détails.

Un des défis actuels des multiferroïques magnéto-électriques est l'observation expérimentale du couplage. Parmi toutes les approches explorées, la recherche d'une excitation fondamentale, dite *électromagnon*, qui résulterait directement du couplage magnéto-électrique, paraît particulièrement intéressante. L'existence d'un électromagnon permettrait notamment de mieux estimer les constantes du couplage magnéto-électrique, similairement aux magnons pour le magnétisme ou encore aux vibrations du réseau (phonons) pour les distorsions ferroélectriques ou ferroélastiques. Bien que déjà prédits théoriquement dans les années 80, ce n'est que récemment [8] que de tels électromagnons ont été observés.

Applications multiferroïques ou magnéto-électriques – Réalité et défis

La rareté des matériaux multiferroïques magnéto-électriques n'a pas découragé les chercheurs à réfléchir sur leurs applications potentielles en « spintronique » (technologie utilisant les *spins* et leurs moments magnétiques plutôt que les charges des électrons).

D'un côté, les travaux récents [5] sur le multiferroïque $Bi_{0,9}La_{0,1}MnO_3$ (ferromagnétique-ferroélectrique, mais sans couplage magnéto-électrique) ont ouvert le chemin pour l'introduction d'une logique quaternaire, qui a le potentiel de révolutionner la technologie des ordinateurs. Néanmoins, un sévère désavantage de ce système reste sa température de Curie ferromagnétique trop basse, $T_c \approx 100$ K.

Par ailleurs, certains matériaux magnéto-électriques (mais pas multiferroïques) offrent un

« Coupler ou ne pas coupler, telle est la question... »
ou « Le rôle éminent de la symétrie »

encadré 2

La multifonctionnalité des matériaux magnéto-électriques (ME) est basée sur la relation entre les champs électrique ***E*** et magnétique ***M*** et les propriétés physiques des matériaux, respectivement la polarisation ***P*** et l'aimantation ***M*** :

$$P_i^{ME} = \chi_{ij}^{EM} H_j \quad \text{et} \quad M_i^{ME} = \chi_{ij}^{ME} E_j \quad \text{où} \quad \chi_{ij}^{EM} = \chi_{ji}^{ME} \quad \text{sont les tenseurs des susceptibilités.}$$

Il a été montré qu'une susceptibilité ME non nulle n'est autorisée que dans peu de cristaux magnétiques, possédant un groupe ponctuel particulier. De façon générale, ni une symétrie d'inversion ni une symétrie d'espace-temps ne sont autorisées pour un matériau magnéto-électrique. En conséquence, un système magnéto-électrique est souvent polairement et magnétiquement ordonné, comme par exemple l'antiferromagnétique trigonal Cr_2O_3. Dans les cas où la symétrie n'autorise pas l'existence d'un couplage direct, les termes de couplage d'ordres supérieurs interviennent. De façon générale, ces termes sont souvent inférieurs aux termes linéaires ; aussi, le couplage s'effectue plutôt par le biais d'un couplage indirect contrainte-tension, c'est-à-dire que les ordres ferroélectrique et ferromagnétique se produisent par et s'accompagnent de contraintes électrostrictives et magnétostrictives. Ce mécanisme est tout aussi valable pour les multiferroïques intrinsèques que pour les multiferroïques *composites* – lesquels sont constitués d'une phase ferroélectrique (électrostrictive) mêlée intimement à une phase ferromagnétique (magnétoélastique).

Références

[1] M. Fiebig, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** (2005) R1-30.
[2] W. Eerenstein *et al.*, *Nature* **442** (2006) 759.
[3] W. Kleemann & J. Kreisel (eds), "Current Progress in Multiferroics and Magnetoelectrics", *Phase Transitions* **79** (12) (2006) (special issue).
[4] N. Mathur & M. Bibes (eds), "Multiferroic and magnetoelectric epitaxial thin films and devices", *Philosophical Magazine* **87** (3-4) (2007) (special issue).
[5] M. Gajek *et al.*, *Nature materials* **6** (2007) 296-302.
[6] N.A. Hill, *J. Phys. Chem. B* **104** (2000) 317-338.
[7] S.W. Cheong & M. Mostovoy, *Nature materials* **6** (2007) 13-20.
[8] A.B. Sushkov *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 027202.
[9] P. Borisov *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 117203.
[10] X. Chen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 202508.

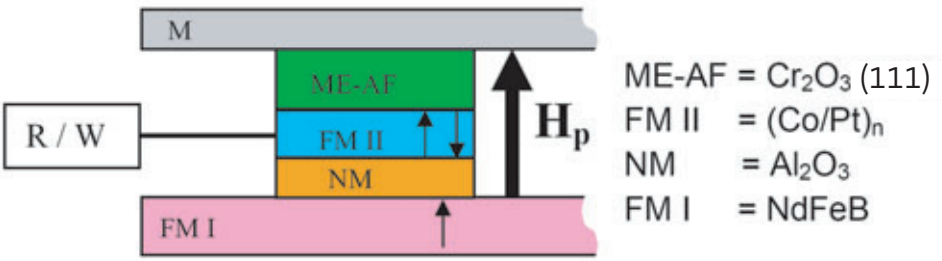


Fig.2 : Architecture d'une mémoire RAM magnéto-électrique (MERAM). Le champ magnétique H_p et l'aimantation de la couche ferromagnétique épaisse (FM I) restent "up" en permanence. Pour écrire, une tension électrique positive ou négative est appliquée entre la ligne lire/écrire (R/W) et l'électrode métallique M. L'information ("0" ou "1") est stockée dans la structure de domaine antiferromagnétique de la couche ME-AF de Cr_2O_3, qui joue le rôle de mémoire, et qui contrôle l'aimantation de la multicouche ferromagnétique FM II, parallèle ou antiparallèle à celle de FM I. Les données sont lues, tout comme dans une RAM magnétique, en mesurant la magnéto-résistance « géante » de valeur basse ("0") ou élevée ("1"), respectivement, entre la ligne R/W, le long de l'électrode FM II, une couche non magnétique isolante (NM) et l'électrode FM I. On peut s'attendre à un temps de réponse en dessous de 100 ns, en utilisant des cellules MERAM de taille 130 nm. Pour plus de détails, voir Chen et al. *[10].*

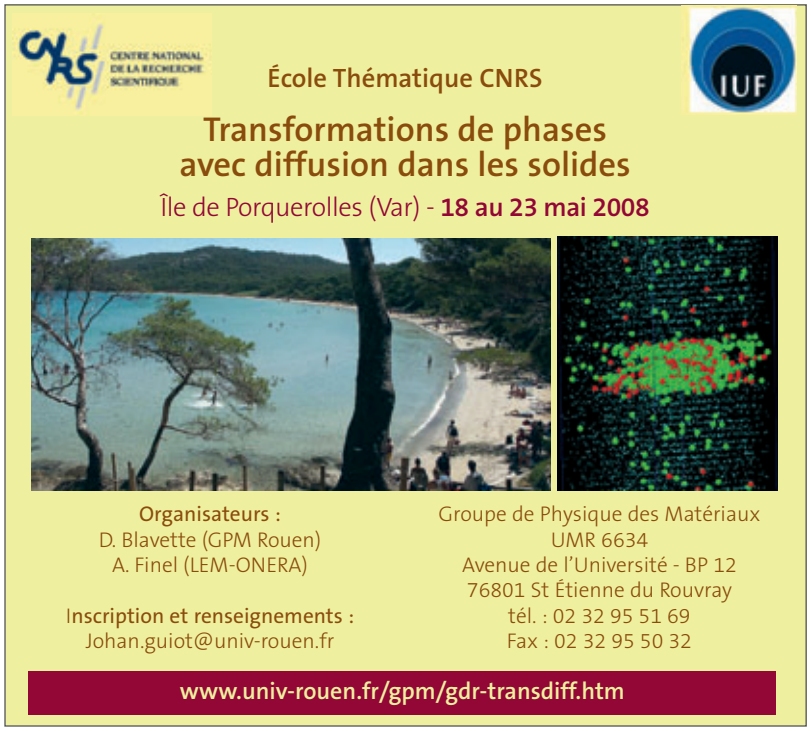
chemin alternatif. Un des matériaux prometteurs est l'oxyde Cr_2O_3, qui n'est ni ferromagnétique ni ferroélectrique, mais magnéto-électrique et antiferromagnétique en dessous de sa température de Néel, T_N = 307 K. De façon surprenante, cette combinaison de propriétés est avantageuse : un *refroidissement magnéto-électrique* (application simultanée d'un champ électrique et d'un champ magnétique à une température inférieure à T_N) conduit à un domaine antiferromagnétique qui peut tourner l'aimantation d'un dépôt ferromagnétique "up" et "down", selon l'arrangement de ses *spins* par des interactions d'interfaces ("exchange bias") [3, 9]. La figure 2 illustre l'architecture d'une mémoire RAM magnéto-électrique (MERAM) basée sur ce principe, et qui permet de répondre à la demande d'une dissipation minimale de chaleur des futures mémoires RAM à haute densité et à trois dimensions.

Défis futurs

La vraie solution d'un composant multiferroïque à fort couplage magnéto-électrique n'a pas encore été trouvée et ce défi va continuer à motiver des chercheurs du monde entier, toujours à la recherche du « Graal ». Certains chercheurs voient le multiferroïque historique $BiFeO_3$ [3] comme le « Graal magnéto-électrique », mais ce matériau n'est qu'antiferromagnétique. Cependant, sa remarquable polarisation ferroélectrique fait de $BiFeO_3$ un matériau phare de la dernière génération des mémoires ferroélectriques (*Ferroelectric RAM – FERAM*). Concernant son potentiel magnétique, $BiFeO_3$ sera probablement dépassé par des matériaux dérivés d'un composé chimiquement similaire : $BiMnO_3$.

La demande d'une symétrie suffisamment basse pour permettre la magnéto-électricité implique une symétrie cristalline et une structure de *spin* particulières. En conséquence, il ne serait pas surprenant de découvrir des matériaux désordonnés qui répondraient aux espoirs de trouver un couplage magnéto-électrique à température ambiante, et pourquoi pas même à une température bien supérieure. Un autre espoir réside sur les avancées faites dans le domaine des *multiferroïques artificiels*, comme l'expose W. Prellier dans l'article suivant.■

Remerciements
Nos recherches sur les matériaux multiferroïques sont effectuées dans le cadre de différents réseaux et actions.
JK remercie le réseau européen d'excellence *FAME* (www.famenoe.org/), le STREP européen *MaCoMuFi* (www.macomufi.eu/) et l'ANR pour le soutien financier. WK remercie le STREP européen *Multiceral* (http://multiceral.web.ua.pt/).
Ce manuscrit a été préparé pendant le séjour sabbatique de WK en tant que professeur invité à l'INP Grenoble.



II – Des composés massifs aux couches minces

Wilfrid Prellier (prellier@ensicaen.fr), **Mangala P. Singh, Charles Simon et Bernard Raveau**
Laboratoire CRISMAT, CNRS UMR 6508, ENSICAEN, 6 Bld Maréchal Juin, 14050 Caen

L'élaboration des matériaux multiferroïques sous forme de couches minces permet l'obtention de phases chimiques métastables ou sous contrainte, et la conception de nouveaux matériaux artificiels, composites ou multicouches, ouvrant une voie très prometteuse pour les applications dans l'électronique intégrée.

La demande croissante d'appareils électroniques sophistiqués embarqués, portables ou insérables dans d'autres systèmes, a conduit l'industrie microélectronique à fabriquer des circuits intégrés de plus en plus petits, avec des fonctions de plus en plus complexes. Cette complexité croissante incite au développement de matériaux multifonctionnels, combinant des fonctionnalités connues en un seul composé.

Des matériaux très intéressants dans ce contexte sont les oxydes multiferroïques, lesquels sont simultanément ferroélectriques et ferromagnétiques (voir article précédent). La ferroélectricité et le ferromagnétisme de ces matériaux peuvent être couplés au point que l'aimantation peut être modifiée par un champ électrique, et la polarisation électrique par un champ magnétique. Dans la plupart des cas, ce couplage magnéto-électrique a lieu *via* une interaction avec les propriétés élastiques : par exemple, la magnétostriction du matériau aimanté induit une contrainte qui se traduit en polarisation par l'effet piézoélectrique [1, 2].

L'utilisation de matériaux multiferroïques dans de futures mémoires MRAMs permettrait de stocker des données magnétiquement, et les lire et écrire électriquement. On combinerait la robustesse du stockage magnétique avec la polyvalence et la résolution spatiale de l'écriture par une pointe électrique, en utilisant un seul matériau multifonctionnel. Alternativement, on pourra concevoir des mémoires à quatre états, de capacité supérieure aux mémoires actuelles.

Matériaux massifs

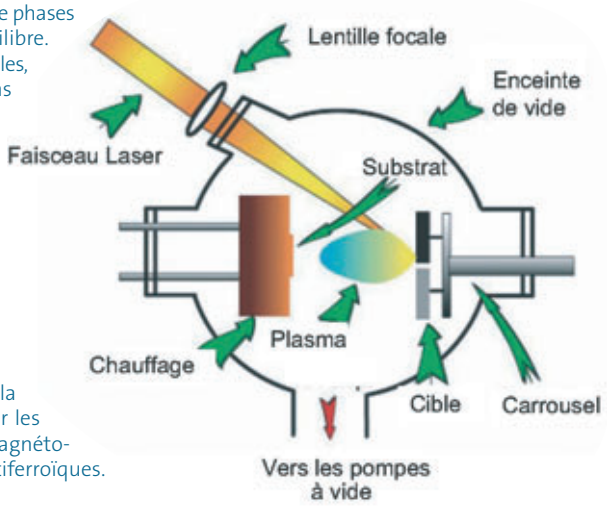
Les matériaux multiferroïques ont été étudiés depuis les années 1950, avec les travaux de Smolensky *et al.* sur les pérovskites pseudo-cubiques $Pb_2(M, M')_2O_6$, où M = Fe, Mg, Co et M' = W, Nb, Ta [3]. Dans la décennie suivante, Ascher *et al.* mirent pour la première fois en évidence un effet ferromagnéto-électrique dans la boracite $Ni_3B_7O_{13}I$ [4]. Mais ce n'est qu'au début des années 2000 que de nouvelles études ont été entreprises, sur des composés manganites pérovskites de type $AMnO_3$. On en connaît deux grandes familles : $BiMnO_3$ (BMO) et $REMnO_3$ (où RE indique un élément de type terre rare).

Comme détaillé dans l'article précédent, la relative rareté des matériaux multiferroïques vient du fait que la plupart des composés ferromagnétiques et antiferromagnétiques ont une structure cristalline centro-symétrique, ce qui exclut toute propriété ferroélectrique. Cette symétrie est levée dans le BMO par la distorsion monoclinique due au déplacement de l'ion Bi^{3+}. La famille des composés $REMnO_3$ se décline en deux classes avec des propriétés différentes. Dans les perovskites orthorhombiques $TbMnO_3$ et $DyMnO_3$, c'est la mise en ordre magnétique qui induit une distorsion structurale

La technique de dépôt par laser pulsé

Le dépôt par laser pulsé, aussi désigné « ablation laser », permet la croissance de phases d'oxydes en tirant parti du fait que le processus est un phénomène hors d'équilibre. Cette technique peut donc être utilisée pour la stabilisation de structures métastables, déposées à des températures relativement basses. Le principe en est montré dans la figure ci-contre.

Une cible d'un matériau donné, possédant le plus souvent la composition cationique désirée, est irradiée par un faisceau laser focalisé (typiquement KrF, $\lambda = 248$ nm). L'ablation a lieu grâce à la conjonction de températures et de pressions extrêmes et très inhabituelles, créées pendant la courte durée de l'impulsion laser (20 ns). Au-dessus du seuil d'ablation, des particules de différentes natures sont éjectées de la surface et transférées vers le substrat au travers d'un plasma. La croissance du film a lieu par condensation du plasma sur un substrat placé en vis-à-vis et maintenu à haute température (> 600°C). Le nombre d'impulsions du laser détermine l'épaisseur du film. La cristallisation de celui-ci dépend essentiellement de l'énergie du laser, de la température de dépôt et de la pression d'oxygène dans l'enceinte. La technique a d'abord été développée pour les supraconducteurs à haute température critique et pour les manganites à magnéto-résistance géante ; elle est maintenant utilisée pour le dépôt de matériaux multiferroïques.



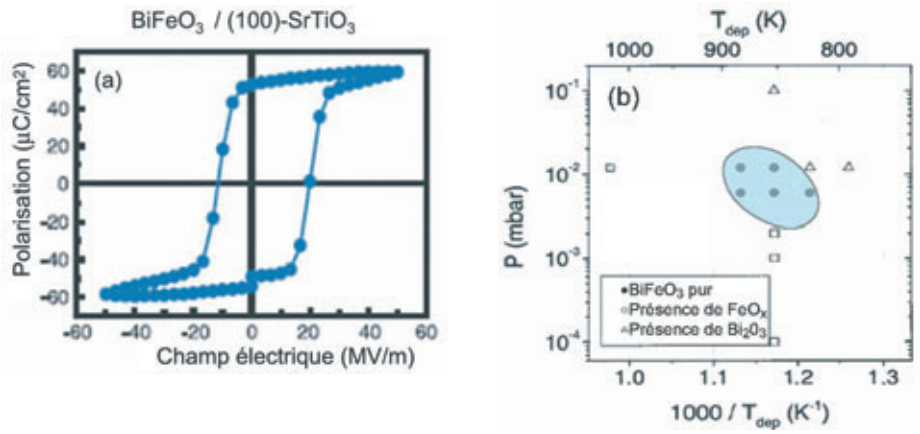


Figure 1 : (a) Évolution des cycles de polarisation en fonction du champ électrique pour un film mince de $BiFeO_3$ déposé sur un substrat de $SrTiO_3$, montrant une valeur de la polarisation à saturation (60 µC /cm²) supérieure d'un ordre de grandeur par rapport au composé massif, confirmant l'influence du substrat et du processus de fabrication sous forme de films minces. (b) Diagramme de phase pression-température de dépôt pour des films de $BiFeO_3$. La fenêtre de stabilisation (cercles) de la phase $BiFeO_3$ est très réduite. Figures adaptées d'après [5, 6] et H. Béa et al., Appl. Phys. Lett. ***87*** *(2005) 072508.*

et l'apparition d'une faible polarisation électrique. Ainsi, il a été démontré récemment par Kimura *et al.* que, dans $TbMnO_3$ la phase ferroélectrique coexiste avec une structure magnétique en spirale avec modulation transverse, qui joue un rôle clef dans la levée du centre de symétrie (voir fig. 1c de l'article de J. Kreisel *et al.*, p. 12). Dans les manganites hexagonaux de terres rares $REMnO_3$ avec RE = Y, Ho, Er, Yb, c'est la frustration géométrique de la structure hexagonale qui donne lieu à la ferroélectricité. Les bipyramides MnO_5 qui caractérisent la structure sont inclinées de telle manière que les centres de gravité des charges positives et négatives ne coïncident pas. Le composé $YMnO_3$ devient ferroélectrique en dessous d'environ 900 K et antiferromagnétique vers 70 K. D'autres composés intéressants sont les vanadates $Ni_3V_2O_8$ et $Co_3V_2O_8$ [8], où le magnétisme vient des cations Ni^{2+} ou Co^{2+}. Dans ces composés, deux phases magnétiques incommensurables apparaissent en fonction de la température, ainsi qu'une phase antiferromagnétique commensurable. La phase incommensurable de basse température présente un moment ferroélectrique qui peut être renversé par un champ magnétique. C'est le caractère magnétique hautement frustré de ces oxydes qui est à l'origine de leurs propriétés complexes.

Actuellement, le nombre de matériaux multiferroïques reste très limité. La difficulté principale des matériaux massifs est que les effets intéressants observés jusqu'ici sont le plus souvent trop faibles, ou se manifestent à des températures trop basses pour être utilisables dans les dispositifs industriels. De plus, il y a les problèmes de synthèse : le BMO, par exemple, doit être élaboré sous haute pression (5 GPa), ce qui en limite les applications.

Couches minces

C'est là que la fabrication des oxydes multiferroïques sous forme de couches minces, incontournable lorsqu'il s'agit de leur intégration dans des dispositifs, notamment en microélectronique, présente de nombreux intérêts. Premièrement, les méthodes de dépôt de couches minces permettent l'élaboration de phases chimiques métastables ou de phases sous contrainte. Cette contrainte peut être contrôlée par l'adaptation plus ou moins bonne du paramètre de maille à celui du substrat. Au-delà, ces méthodes permettent la conception de nouveaux matériaux artificiels. Des résultats récents montrent qu'à l'état de couches minces, il est possible de synthétiser des super-réseaux de matériaux magnétiques et ferroélectriques, ce qui permet de générer de nouveaux multiferroïques et de se rapprocher de possibles applications.

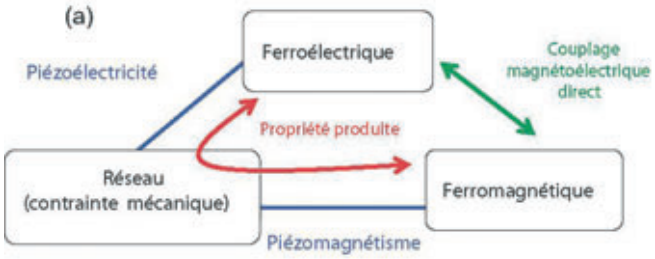
Compte tenu de la difficulté à isoler de nouvelles phases, des méthodes de plus en plus complexes ont été nécessaires pour la synthèse de films minces d'oxydes multiferroïques, dont un grand nombre ont une faible stabilité. Un procédé de choix, qui est largement utilisé dans les laboratoires, est le dépôt par laser pulsé (voir encadré, p.14).

Le principal matériau qui a été étudié sous forme de couches minces est le composé $BiFeO_3$ (ou BFO) [5]. Les premiers travaux, réalisés par l'équipe de l'Université du Maryland (États-Unis) et qui ont suscité l'intérêt pour ces matériaux, ont montré que sous forme de couche mince, la polarisation électrique spontanée du BFO, 60 µC/cm² (fig.1a), était bien plus importante que sous forme massive, 6,1 µC/cm². L'aimantation est également plus grande dans le cas d'un film mince.

Récemment, des études publiées par l'UMR Thales/CNRS, ainsi que par l'Université de Cambridge, ont montré que ces anomalies sont très certainement liées à un déficit en oxygène [6]. Du point de vue de la croissance, il apparaît que de nombreux paramètres influent sur la qualité des films. Par exemple, il a été montré que la pression d'oxygène et la température de dépôt jouent un rôle primordial ; une phase pure n'est obtenue que dans une gamme très restreinte de températures et de pressions, située autour de 580°C et 0,01 mbar (fig. 1b). On constate que la présence de phases parasites, formées dans des conditions de croissance non optimales, dégrade fortement les propriétés multiferroïques (comme par exemple l'aimantation) des films. Enfin, les films minces de BFO, correctement oxygénés (c'est-à-dire sans phase parasite), présentent un très faible moment magnétique (de l'ordre de 0,01 μ_B/ formule unité), du même ordre de grandeur que le matériau massif, confirmant qu'une valeur élevée de l'aimantation (donc un caractère ferromagnétique) est due aux phases parasites. Néanmoins, ce composé reste un très bon ferroélectrique (jusqu'à une épaisseur de 2 nm en couche mince), avec une polarisation proche de celle de $Pb_{1-x}Zr_xTiO_3$. Actuellement, les recherches de matériaux s'orientent vers l'optimisation de nouveaux composés comme les manganites hexagonales ; une autre voie consisterait à doper un matériau métallique avec un élément ferroélectrique.

Multiferroïques artificiels

Nous en venons maintenant au concept de la « propriété produite », obtenue par la mise en contact, de manière artificielle, de deux matériaux, ferroélectrique et ferromagnétique, le tout sous forme de films



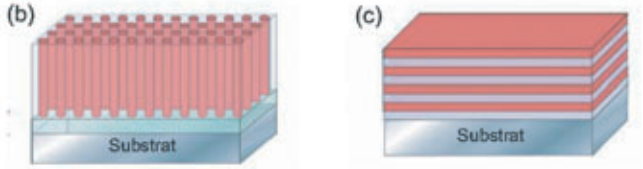


Figure 2 : (a) Schéma de principe de la propriété produite. Les flèches indiquent la nature du couplage entre les différents types de propriétés. (b, c) Représentation schématique des structures obtenues à partir de deux phases distinctes : (b) nano-composite, (c) super-réseau.

minces. Dans cette configuration, le moment ferroélectrique du premier matériau est engendré par la déformation due à l'effet du ferromagnétisme du second matériau sur le réseau cristallin (fig. 2a). La piézoélectricité du matériau ferroélectrique fait que celui-ci est polarisé électriquement sous l'action de la contrainte mécanique exercée par le ferromagnétique. Réciproquement, le matériau ferroélectrique se déformera mécaniquement lorsqu'on appliquera un champ électrique, et, en se déformant, agira sur le ferromagnétique. Cette notion a été développée dans les années 1970 par les Laboratoires Philips pour préparer des composites [7]. Le groupe de l'Université du Maryland a adapté cette stratégie aux films minces [8] en déposant, par ablation laser, un matériau composite ayant une phase ferromagnétique (le spinelle $CoFe_2O_4$) et une phase ferroélectrique ($BaTiO_3$).

La structure schématique « auto-assemblée », représentée dans la figure 2b, montre que la structure spinelle est répartie de façon ordonnée à l'intérieur de la matrice pérovskite. En contrôlant la croissance, on peut indifféremment obtenir des cylindres de spinelle dans une matrice de pérovskite ou inversement. Du point de vue des propriétés, les chercheurs du Maryland obtiennent une anomalie sur la courbe d'aimantation, à la même température que la transition ferroélectrique de $BaTiO_3$. Cela confirme la corrélation entre propriétés ferroélectriques et magnétisme.

Une autre façon d'utiliser la notion de « propriété produite » est de réaliser des super-réseaux, c'est-à-dire des empilements de deux matériaux le long de l'axe de croissance du film (fig. 2c). Cette approche a été développée par de nombreux laboratoires, dont le CRISMAT, le LPS (Orsay), l'Université de Genève, et à Darmstadt, pour la production de nouveaux matériaux supraconducteurs. Elle est maintenant adoptée pour les matériaux multiferroïques, produits en réalisant des hétérostructures alternant, à l'échelle de la maille atomique, des couches ferroélectriques et ferromagnétiques. De nouveau, la phase ferroélectrique peut être le $BaTiO_3$. Pour la phase ferromagnétique, on choisit un manganite à magnéto-résistance colossale, comme $La_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$ [9]. Les premiers résultats montrent que l'on peut effectivement obtenir des multicouches de très bonne qualité, présentant simultanément des propriétés ferromagnétiques et une forte constante diélectrique. Notamment, on observe une anomalie sur la dépendance en température de l'aimantation, à une température proche de la transition du composé ferroélectrique (fig. 3). Cela suggère un couplage ferroélectrique/magnétique, similaire à ce qui avait été reporté dans les films obtenus à partir de l'approche « matériau composite ».

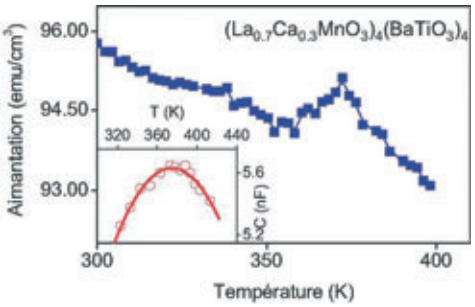


Figure 3 : Évolution de l'aimantation en fonction de la température pour un super-réseau obtenu par l'empilement alterné de 4 mailles du composé ferromagnétique ($La_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$) et de 4 mailles du composé ferroélectrique ($BaTiO_3$). En insert, est indiquée l'évolution de la capacité en fonction de la température d'un film mince de $BaTiO_3$ de même épaisseur. La transition n'est pas très nette, ce qui est dû aux contraintes du substrat. On remarque que l'anomalie sur la courbe d'aimantation apparaît au voisinage de la température de Curie ferroélectrique (370 K), confirmant le couplage.

Conclusion

Un regain d'intérêt est apparu depuis quelques années pour l'étude des matériaux multifonctionnels. Parmi ces matériaux, les composés multiferroïques, qui sont simultanément ferromagnétiques et ferroélectriques, font actuellement l'objet de nombreuses études dans la communauté scientifique, car ils sont susceptibles d'être utilisés pour des applications dans l'électronique intégrée, comme les mémoires à « 4 états ». Cet intérêt croissant est largement confirmé par le nombre de publications parues ces dernières années. Du point de vue de la recherche de matériaux, la préparation de nouveaux composés métastables stabilisés grâce aux contraintes, ainsi que des matériaux « composites » sous forme de films minces en contrôlant précisément la croissance, présente une voie très prometteuse. ■

Références

[1] H. Schmid, *Ferroelectrics* **162** (1994) 317, et **221** (1999) 9.
[2] W. Prellier *et al.*, *J. Phys. Condens. Mat.* **17** (2005) R.803.
[3] G.A Smolensky *et al.*, *Sov. Phys. Solid State* **1** (1959) 149, *Isvest. Akad. Nauk SSSR, Ser Fiz.* **25** (1961) 1333.
[4] E. Ascher *et al.*, *J. Appl. Phys.* **37** (1966) 1404.
[5] J. Wang *et al.*, *Science* **299** (2003) 1719.
[6] W. Eerenstein *et al.*, *Science* **307** (2005) 1203a.
[7] J. Van Suchtelen, *Philips Research Reports* **27** (1972) 28.
[8] H. Zheng *et al.*, *Science* **303** (2004) 661.
[9] M.P. Singh *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **87** (2005) 022505.
[10] http://www.macomufi.eu/

Remerciements
De nombreuses personnes ont également participé à ce travail, dont : L. Méchin (GREYC, ENSICAEN) et B. Mercey (CRISMAT, ENSICAEN), ainsi que L. Bizouarne dans la préparation du manuscrit. Ces recherches sur les matériaux multiferroïques sont effectuées dans le cadre du réseau européen d'excellence *FAME* et du STREP *MaCoMuFi* [10] soutenu par la Commission Européenne et le CNRS.

L'insoutenable légèreté du halo

Jean-Luc Sida (jean-luc.sida@cea.fr)
CEA/DAM Île-de-France, 91680 Bruyères-le-Châtel
pour la collaboration EFFE (Étude de la Fusion avec des Faisceaux Exotiques)

Il ne faut pas moins qu'une étoile ou bien qu'un « tokamak » pour réussir à faire fusionner une population de noyaux, à cause de la forte répulsion coulombienne qui les repousse loin les uns des autres. Dans nos laboratoires, nous pouvons étudier le processus de fusion de couples de noyaux en utilisant un accélérateur de particules. Cette étude est particulièrement intéressante aux énergies pour lesquelles le processus se produit par effet tunnel. Ce processus a été étudié dans les années 1980 pour les noyaux stables. Nous présentons ici l'une des premières études faites pour des noyaux étranges, découverts à la fin des années 80 : les noyaux à halo.

"The neutron halo sleeps" : c'est avec ce titre que la revue *Nature* a résumé les résultats obtenus par une collaboration, principalement franco-belge, sur la fusion de deux noyaux, dont l'un possède la propriété inattendue d'avoir des neutrons peu liés, sous forme d'un halo. Ces travaux viennent de valoir à l'un des collaborateurs, Riccardo Raabe, le prix 2007 de la SCK-CEN, l'équivalent belge de notre prix Joliot-Curie. Vous n'allez pas comprendre ce travail si l'on ne retourne pas à sa genèse.

Il était une fois, en 1991…

1991. Premiers pas d'un post-doc

Saclay, une bibliothèque mal éclairée ; mon responsable de post-doctorat, Nicolas Alamanos (CEA, Saclay), et Wolfgang Mittig (GANIL, Caen) me demandent de les rejoindre. Ils me parlent d'un projet de physique nucléaire qui allie l'improbable à l'inconcevable. Improbable, car la réaction à étudier, la fusion à des énergies inférieures à la barrière de répulsion coulombienne (voir la figure 1 pour les détails), ne peut être réalisée que par un processus très peu probable en mécanique quantique, qui est l'effet tunnel. Inconcevable, parce qu'avant 1989, on n'imaginait pas que les nucléons d'un noyau pourraient circuler dans un nuage allant très au-delà de la portée de l'interaction forte. Ce phénomène de « halo » nucléaire semblait être une propriété des noyaux à la frontière de la stabilité, pour lesquels les derniers neutrons liés ont une énergie dix à cent fois plus faible que l'énergie de liaison des nucléons dans un noyau stable. Cette faible énergie leur confère une grande extension spatiale et ils vont explorer des régions de l'espace allant au-delà des nucléons qui ne participent pas au halo (voir l'illustration de la figure 2). À l'heure actuelle, seule une poignée de noyaux à halo, dits « légers » (car de masse inférieure à une vingtaine de nucléons), ont été observés. Après la découverte de ces noyaux, une bataille d'idées a commencé sur leur probabilité de « fusion ».

Que se passe-t-il pour des noyaux « normaux » ?

Quand les noyaux ont suffisamment d'énergie pour pouvoir se toucher, ils fusionnent. L'interaction forte est tellement dominante qu'il suffit que les nucléons de surface des noyaux cible et projectile se « sentent » pour que les deux noyaux soient irrémédiablement attirés vers une symbiose nucléaire. Il y a cependant quelques conditions énergétiques à respecter. Si, par exemple, l'un des noyaux est envoyé avec une énergie cinétique plus grande que l'énergie de liaison des nucléons, la collision casse les deux noyaux et ils ne pourront pas fusionner. Pour des énergies inférieures à cette valeur, mais plus grandes que la barrière coulombienne, les noyaux peuvent se rapprocher suffisamment et fusionneront. La probabilité d'un tel phénomène est gouvernée par des considérations purement géométriques : c'est le principe du « touché-fusionné ». Pour des énergies inférieures à la barrière, le processus va être gouverné par l'effet tunnel au travers de la barrière.

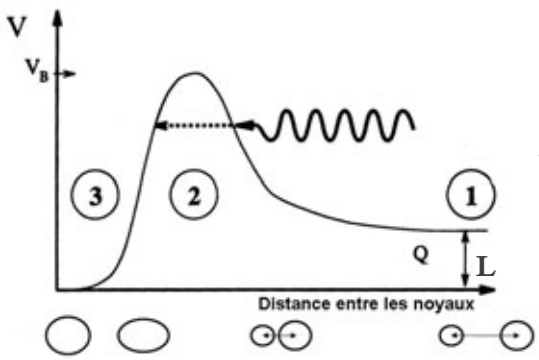


Figure 1 : Représentation schématique de la barrière de potentiel en fonction de la distance L entre les noyaux, lors de la collision de deux noyaux dans le cas d'un choc frontal. Dans la zone 1, les deux noyaux, représentés par les cercles, sont loin l'un de l'autre, le potentiel est purement coulombien. La quantité Q représente la différence entre la somme des énergies de masse des deux noyaux projectiles dans leur état initial, à l'infini l'un de l'autre, et celle du noyau fusionné ; elle peut être positive ou négative. Dans la zone 2, les deux noyaux sont à portée de l'interaction forte et celle-ci réduit la répulsion coulombienne. La zone 3 correspond au potentiel du noyau composé, représenté par une ellipse.
Comme le système est régi par les lois de la mécanique quantique, le noyau projectile peut être assimilé à une onde qui va sonder le potentiel. Ainsi, si son énergie cinétique est inférieure à la hauteur de la barrière (V_B), la fusion ne pourra être réalisée que par effet tunnel.
La mesure de l'effet tunnel pour différentes énergies incidentes permet donc d'obtenir une image point par point du potentiel d'interaction entre les noyaux.

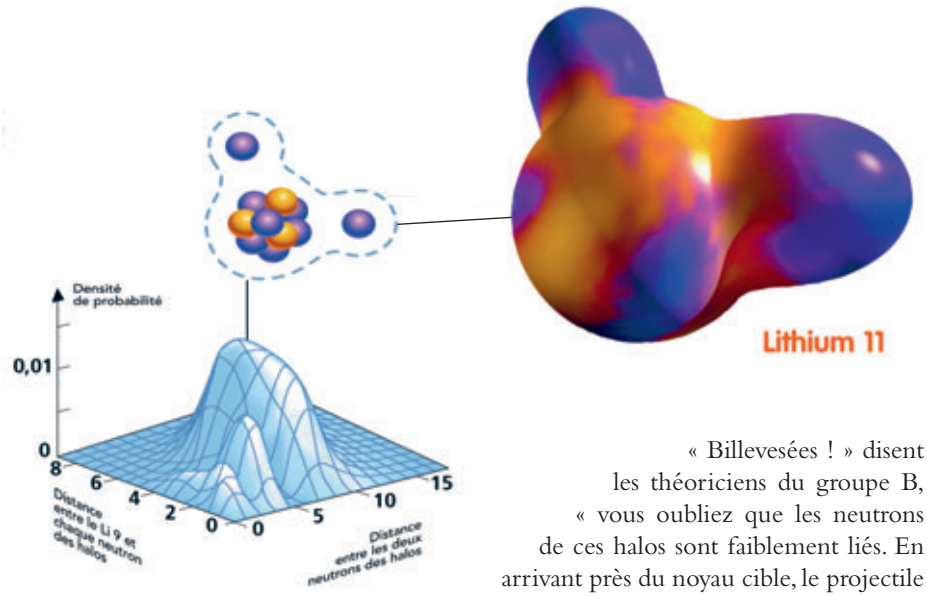


Figure 2 : Un exemple de noyau à halo, le lithium 11. Le lithium 11 est constitué d'un lithium 9 entouré d'un halo de deux neutrons. Sa structure est déterminée d'après les distances les plus probables entre le lithium 9 et les deux neutrons, ainsi qu'entre ces deux derniers. On voit clairement que la distance (en fermi, i.e. 10^{-15} m, sur les axes) entre les neutrons du halo, ainsi que celle entre le halo et le cœur, sont supérieures à la portée de l'interaction forte (de l'ordre du fermi). Les autres noyaux à halo connus sont les bérylliums de masse 11 et 14, les carbones 16 et 19 et les héliums de masse 6 et 8.

À quoi pouvait-on s'attendre si l'un des noyaux possède un halo ?

Suivant la logique précédente, la grande extension spatiale du halo modifie le recouvrement géométrique entre les noyaux et augmenterait donc la probabilité de fusionner avec d'autres noyaux. Cet effet devrait être amplifié si la réaction a lieu à des énergies légèrement inférieures à la hauteur de la barrière coulombienne. En effet, le halo étant constitué de particules neutres, il jouera le rôle de « sondeur-attracteur » : les neutrons du halo peuvent atteindre le noyau cible sans ressentir la répulsion coulombienne (rôle de sondeur) et, lorsque ses neutrons ressentent l'attraction forte, ils entraînent l'ensemble du noyau vers la fusion (rôle d'attracteur). Le halo agit ainsi comme une langue de caméléon. Ceci est la thèse du groupe de théoriciens que nous appellerons A.

« Billevesées ! » disent les théoriciens du groupe B, « vous oubliez que les neutrons de ces halos sont faiblement liés. En arrivant près du noyau cible, le projectile se brisera et sera éjecté par la répulsion coulombienne bien avant que la fusion puisse avoir lieu. » Ainsi, ces théoriciens prédisent, au contraire, une forte diminution, de plusieurs ordres de grandeur, de la probabilité de fusion pour une énergie voisine de la barrière coulombienne (indiquée sur la figure 3 par une flèche), si un des partenaires est un noyau à halo. Les prédictions de ces deux écoles sont représentées sur la figure 3.

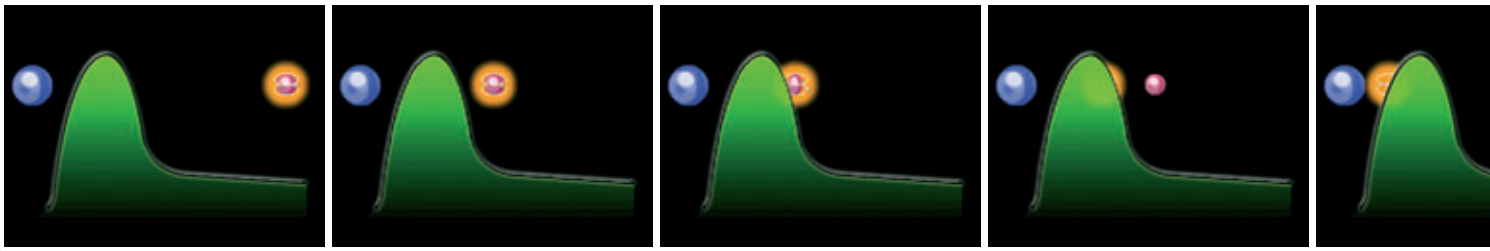
« Observons ! », me disent donc Nicolas et Wolfi. Puisque les théories s'opposent, l'expérience tranchera. La Physique nucléaire n'en est pas encore au stade des théories prédictives : elle ne permet pas de prévoir les caractéristiques d'un noyau, elle permet encore moins d'expliquer le comportement de deux noyaux au cours d'une réaction ; le physicien nucléaire reste l'observateur d'un monde qu'il ne comprend pas. Nicolas et Wolfi me proposent de prendre la responsabilité de ce travail et de définir l'expérience qui pourrait donner tort et raison. Cette expérience était loin d'être triviale, car ces noyaux exotiques à halo sont produits en très faible quantité et les probabilités de réaction par effet tunnel sont faibles. Il fallait donc obtenir des temps de faisceau hors norme. De plus, pour étudier le processus à différentes énergies, il était nécessaire de modifier le réglage du cyclotron, ce qui augmentait d'autant le temps nécessaire à l'expérience. Pour vous donner une idée des statistiques, nous avions, pour certaines énergies, de l'ordre d'un événement par heure. Le temps total de faisceau nécessaire était trois fois plus important que la moyenne des durées d'expérience au GANIL, mais le jeu en valait la chandelle.

Je passe sous silence le chemin, qui a été long, pour arriver à un protocole simple et efficace (pour plus de détails, voir la référence [1]). Sachez juste que les premières expériences ont eu lieu au GANIL(1) avec un faisceau de ^{11}Be, mais que nous n'avons pas réussi à répondre sans ambiguïté à la question.

2000. La bonne piste

Alinka Lépine, physicienne brésilo-hongroise, se trouve en séjour longue durée en Belgique, non loin de l'accélérateur de Louvain-la-Neuve. « Jean-Luc, tu devrais venir voir ce qu'ils font ici. Ils ont un très bon faisceau de ^{6}He. Tu pourrais peut-être faire ta manip dans de bien meilleures conditions qu'au GANIL. »

Au GANIL, avant l'arrivée de SPIRAL(2) en 2001, les faisceaux de noyaux exotiques étaient réalisés par la cassure d'un noyau projectile de haute énergie (20% de la vitesse de la lumière) sur un petit noyau cible qui agissait comme un scalpel. Les particules résultantes avaient des vitesses de l'ordre de la vitesse du noyau incident, beaucoup trop élevées car dix fois supérieures à la barrière coulombienne. Il fallait donc ralentir ces faisceaux en leur faisant traverser de la matière, ce qui dégradait leurs qualités optiques. Du coup, nous avions des faisceaux très dispersés en énergie, en angle et en position, qui rendaient les expériences imprécises. À Louvain-la-Neuve, les faisceaux de noyaux exotiques étaient produits par une technique différente : la technique ISOL *(Isotope Separation on Line)*. Le faisceau primaire (dans notre cas des protons) interagit avec une cible de production (dans notre cas du fluorure de lithium). Les espèces d'intérêt sont extraites grâce à une source d'ions, puis accélérées dans un cyclotron. Le faisceau secondaire



a donc les qualités d'un faisceau « usuel », bien que de très faible intensité. L'intensité maximale des faisceaux dont nous avons disposé était d'environ un million de particules par seconde. Il faut comparer ce nombre avec le nombre d'Avogadro pour se rendre compte du peu de matière « exotique » dont nous avons disposé pour faire l'expérience.

Le voyage de Caen à Louvain nous met sur la bonne piste. Le projet est accepté par les experts du comité d'expériences, et nous commençons à réfléchir au dispositif expérimental adapté à ces conditions de faisceau. Cette expérience nécessite de travailler étroitement avec les ingénieurs de la machine, car elle impose de nombreux changements d'énergie et de source. Nous choisissons d'utiliser une cible d'uranium, car ce noyau possède la propriété de « fissionner » à chaque collision nucléaire comme, par exemple, lorsqu'il fusionne. Cela peut paraître étrange de mesurer la fission quand on veut étudier la fusion, mais c'était la conclusion naturelle de nos réflexions. Pourquoi ?

• Premièrement, nous avions besoin d'une cible générant la barrière coulombienne la plus élevée possible pour optimiser le domaine de fonctionnement en énergie de l'accélérateur. La hauteur de barrière dépend directement du produit des charges du projectile et de la cible. Pour le projectile, la charge est fixée, elle est de 2 (le nombre de protons de l'hélium). Pour la cible, dans la nature, l'élément avec le nombre de protons le plus élevé est l'uranium (Z = 92). Nous aurions aussi pu travailler avec des noyaux dans la région du plomb (Z = 82).

• Deuxièmement, il était inenvisageable d'identifier directement le noyau composé car, d'une part, sa vitesse de recul étant très faible, il reste dans la cible et, d'autre part, il se désexcite dans des temps extrêmement courts (< 10^{-20} s). Seuls les produits de décroissance du noyau composé peuvent être mesurés. La quantité mesurée dépend donc de la probabilité de fusion, mais aussi des probabilités de désexcitation du noyau composé dans les différents états possibles. Pour une cible de plomb, les probabilités de décroissance sont toujours plus faibles que la probabilité de fusion elle-même : donc la quantité mesurée est inférieure à celle de la fusion seule. De plus, ses probabilités de

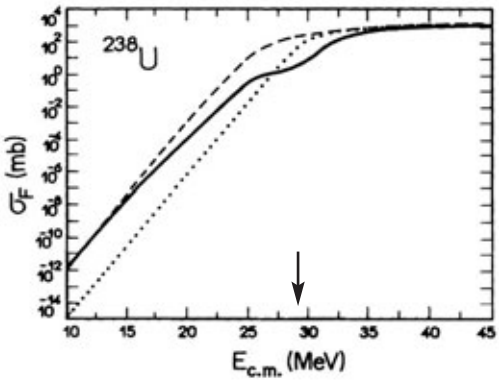


Figure 3 : On montre ici la probabilité de fusion du ^{11}Li sur une cible de ^{238}U en fonction de l'énergie cinétique du projectile dans le centre de masse selon différents scenarios. La prédiction des théoriciens A, pour lesquels la présence du halo augmente la probabilité de fusion, est représentée en tirets ; le calcul des théoriciens B, pour lesquels le halo peut se casser avant d'atteindre la cible, est en trait plein. À basse énergie, le halo ne se casse jamais et les prédictions A et B sont égales. Enfin, la courbe en pointillés correspond au cas d'un noyau normal. La flèche indique la position de la barrière coulombienne. Attention à l'échelle, les variations attendues selon les différentes théories sont de plusieurs ordres de grandeur.

décroissance sont mal connues. Par contre, pour une cible d'uranium, quelle que soit la réaction (ou presque), le noyau composé fissionne. La mesure de la fission nous permet ainsi d'accéder à une quantité qui est supérieure à celle résultant de la fusion seule. Pour des projectiles stables, les deux quantités sont équivalentes dans le domaine d'énergie qui nous intéresse. En mesurant la probabilité de fission, on mesure une quantité qui inclut donc le processus de fusion. Que pourrons-nous donc conclure ? Si la probabilité de fission d'un système impliquant un noyau à halo est plus faible que sans halo, alors c'est la victoire des théoriciens B. À l'inverse, si elle est plus grande, nous ne pouvions pas être sûrs que cette augmentation de la fission provienne d'une augmentation de la probabilité de fusion…

• Dernier point, tout aussi crucial : il est facile, à faible coût, de détecter les fragments de fission en mesurant les énergies totales et les positions des particules émises. Si l'on observe deux particules en coïncidence, émises dos-à-dos avec une énergie cinétique totale supérieure à 100 MeV, on est sûr d'avoir observé un événement de fission.

Le protocole était donc basé sur la mesure du nombre de fissions induites par un faisceau de noyaux à halo et cela pour différentes énergies incidentes. Ce nombre devait être comparé avec celui obtenu pour des noyaux projectiles sans halo. Dans cette expérience, nous utilisions l'isotope exotique de masse 6 de l'hélium, qui présente un halo de deux neutrons, et l'isotope de masse 4, la particule alpha, qui est très lié et ne possède pas de halo.

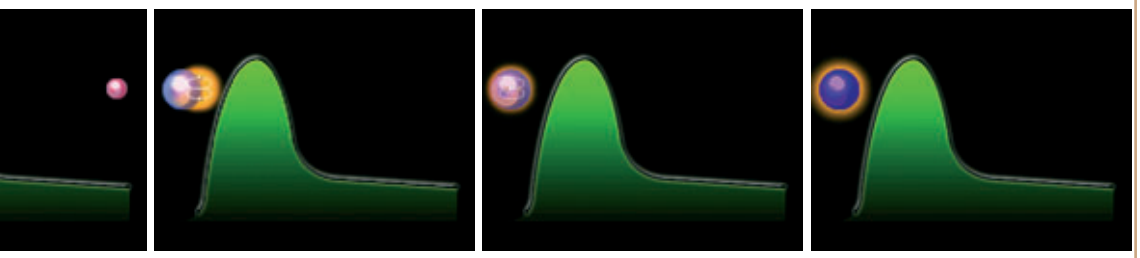
Monica Trotta est une jeune physicienne italienne en thèse à Naples. Cette expérience sera son aventure. Décembre 1999 : à peine

(1) GANIL : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, situé à Caen. Laboratoire d'accueil CEA-CNRS, le GANIL fournit des faisceaux d'ions (de l'hélium à l'uranium) de moyenne énergie (20 à 100 MeV par nucléon), permettant d'étudier les noyaux atomiques.

(2) SPIRAL : Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne, situé au GANIL, qui délivre depuis 2001 des faisceaux d'atomes exotiques n'existant pas sur Terre.

Références

[1] J.L Sida, mémoire de HDR, Université Paris 7 (2005).
[2] M. Trotta *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 2342.
[3] R. Raabe *et al.*, *Nature* **431** (2004) 823.
Un article de revue est à paraître dans *Progress in Particle and Nuclear Physics* : http://arxiv.org/nucl-ex/0702038



Séquence d'images illustrant le processus de transfert du halo vers la cible, décrit page 20.
En bleu : le noyau cible.
En rose : le cœur du noyau projectile.
En jaune : le halo du noyau projectile.
En vert : la barrière de potentiel.

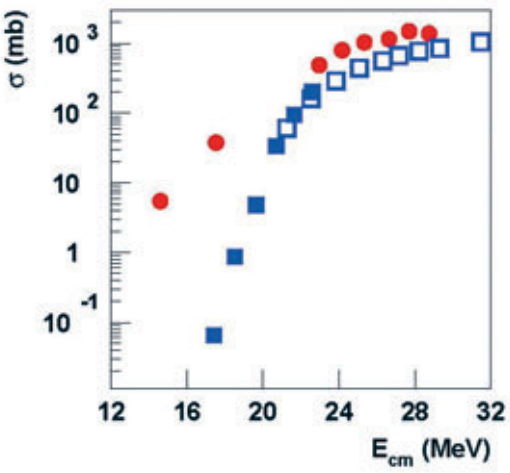


Figure 4 : Résultats des mesures expérimentales de la probabilité de fission des noyaux composés dans les réactions $^{4}He + ^{238}U$ (en carrés bleus) et $^{6}He + ^{238}U$ (en cercles rouges), en fonction de l'énergie cinétique du projectile dans le centre de masse. Les mesures représentées par des symboles ouverts correspondent à des travaux d'autres auteurs (voir détails dans [2]). Aux énergies inférieures à la barrière coulombienne, la probabilité de fission augmente jusqu'à trois ordres de grandeur pour les noyaux à halo.

débarquée du soleil napolitain dans le froid pluvieux de la campagne wallonne, elle se joint à l'équipe, physiciens et ingénieurs de la machine frémissant quand les noyaux obèses flirtant avec l'uranium génèrent les premiers signaux dans nos détecteurs. Après trois semaines de prises de données, Monica commence le soigneux travail d'analyse pour faire émerger le résultat : le nombre de fissions générées par les noyaux à halo est plus important que pour leurs *alter ego* « normaux » (fig. 4). On serait prêts à conclure que les théoriciens A sont les meilleurs, et nous le disons dans un article publié dans *PRL* [2], qui a été cité une centaine de fois depuis 2000.

Seul bémol, la fission peut être induite par la fusion, mais elle peut aussi l'être par de nombreuses autres réactions comme la diffusion inélastique ou le transfert de quelques nucléons. Il nous faut donc aller un pas plus loin pour séparer la fusion des autres réactions.

2002. La conclusion de l'Européen

Riccardo Raabe a participé à l'expérience de 2000 en tant que doctorant et il vient faire un post-doc au CEA Saclay. Riccardo est italien, fils d'un père allemand, a fait sa thèse en Belgique et sa petite amie est hongroise. Il fait partie d'une génération de vrais Européens, pleins d'envie et d'espoir. Nous élaborons un nouveau détecteur plus complet. Il devait être capable de détecter les noyaux produits lors de la fission, mais aussi les noyaux légers qui accompagnent toutes les réactions nucléaires, excepté la fusion complète. Ainsi, si l'on détectait un noyau léger en plus des deux fragments de fission, nous rangerions la réaction dans « ceci n'est pas un événement de fusion ». À l'inverse, si aucun résidu léger n'était observé, c'est qu'une fusion venait d'avoir lieu. Simple dans le principe, mais un peu plus compliqué à réaliser en pratique. Par exemple, il était nécessaire de détecter les résidus légers tout autour de la cible. Ce nouveau détecteur était donc composé de 40 jonctions silicium couvrant tout l'angle solide.

Nous sommes retournés à Louvain-la-Neuve pour reprendre des données plus précises. Les résultats sont publiés dans *Nature* [3] et ont fait l'objet d'articles dans les presses belge et brésilienne. *"The neutron halo sleeps"*, nous avons la réponse ! Claire et limpide : la présence d'un halo ne change rien au phénomène de fusion ; c'est comme s'il ne participait pas, comme s'il dormait, à moins qu'il ne rêve, insoutenable légèreté.

Ainsi, la grande probabilité de fission observée par Monica venait de réactions de transfert entre le projectile et la cible. Dans ce processus, seuls les neutrons du halo atteignent la cible, le cœur étant chassé par la répulsion coulombienne. On observe donc en coïncidence deux fragments de fission et une particule alpha (le cœur du noyau de ^{6}He). Aux énergies inférieures à la barrière, tous les fragments de fission que nous avons observés étaient accompagnés d'une particule alpha. Avant de conclure, il fallait être sûr que cette particule alpha était bien le cœur du projectile et non une particule émise par le noyau composé ou bien par les fragments de fission. On touche ici à la magie, à l'émotion que peut faire ressentir la science : on en était sûr parce que le cœur avait « vu » le noyau cible. En effet, si la particule alpha provenait d'une émission secondaire, elle était émise de façon isotrope. Par contre, si c'était bien la particule alpha du cœur, alors on devait observer un phénomène non isotrope. Ainsi, aux énergies supérieures à la barrière, on attendait les alphas aux angles avant, alors qu'aux énergies inférieures à la barrière, les alphas du cœur allaient buter sur le noyau cible et repartir en arrière. Dans notre expérience, nous avons vu que les particules alpha accompagnant la fission passaient des angles avant aux angles arrière au fur et à mesure que l'énergie du faisceau décroissait. Nous avions là une signature non ambiguë d'une réaction de transfert du halo et non d'une émission de particules du noyau composé. En faisant cela, moi, homme de l'échelle du mètre, j'avais l'impression fascinante de voir le noyau à son échelle de 10^{-15} m.

On peut résumer nos observations en disant que la présence d'un halo de neutrons ne change pas la probabilité de fusion, mais qu'elle rend possible d'autres réactions comme le transfert du halo vers la cible. C'est là que se trouve la découverte la plus intéressante, celle que personne n'avait prédite : quand le halo interagit avec le noyau cible, il n'entraîne pas le cœur comme cela était évoqué par les théoriciens A, il n'est pas non plus éjecté comme le prédisaient les théoriciens B, mais au contraire il s'acoquine avec la cible pendant que le cœur est éjecté par le champ coulombien, « arrache-cœur plutôt qu'attrape-cœur » (voir la séquence d'images en bas des pages 18 et 19).

2007. C'est déjà l'avenir

Nous pouvons douter du caractère général de nos conclusions, dans la mesure où nous n'avons étudié qu'un seul couple de noyaux, ^{6}He et ^{4}He. À l'avenir, nous allons poursuivre l'étude de la série des isotopes d'hélium, en allant auprès de l'installation européenne SPIRAL du GANIL, et découvrir les surprises que nous réserve le plus exotique d'entre eux, celui de masse 8. Comme il a plus de constituants, sa densité de matière est supérieure à celle de l'hélium 6, elle-même supérieure à celle de l'hélium 4. Par contre, paradoxalement, alors que ce noyau d'hélium 8 est plus « exotique » (il est plus riche en neutrons), ses neutrons sont plus liés que ceux de l'hélium 6. Les paris sont lancés quant aux effets de ces caractéristiques sur la fusion. Les résultats de notre étude précédente nous laissent envisager une probabilité de fusion plus grande pour l'hélium 8 que pour l'hélium 6 et l'hélium 4, car il est à la fois plus gros et plus lié…

Ainsi, nous pouvons imaginer que le halo de l'hélium 8 sera le "neutron halo that never sleeps".■

Les femmes et les sciences : les enseignements de l'Histoire

Nicole Hulin (nicole.hulin@normalesup.org)
Maître de conférences honoraire, Université Paris VI, Centre Alexandre Koyré

Pour attirer les jeunes filles vers les carrières scientifiques, il convient de vaincre certains blocages d'ordre culturel. La connaissance de l'Histoire peut aider à atteindre ce but, en montrant tout le chemin déjà parcouru en un siècle pour gommer les différences entre filles et garçons dans le domaine de l'enseignement. Elle devrait inciter ainsi à franchir une dernière étape en comblant le déficit dans les choix d'orientation vers les études scientifiques supérieures.

Le constat d'une certaine désaffection pour les études scientifiques supérieures a induit une focalisation de l'intérêt sur le vivier féminin. Mais, pour attirer plus de jeunes filles dans la voie scientifique, il convient de vaincre certains blocages, blocages dus en partie, pensons-nous, à l'atavisme des générations auxquelles on déniait de bonnes capacités pour les sciences. Pour atteindre ce but, il peut être déterminant de souligner la progression indéniable et régulière accomplie. En un siècle, l'évolution a été spectaculaire, allant de la constitution d'un enseignement secondaire spécifique – ne menant pas au baccalauréat et donc ne permettant pas l'accès aux facultés – avec la loi Sée de 1880, à la mixité et la fusion complète des agrégations scientifiques masculines et féminines dans les années 1970. L'histoire de ce parcours, trop souvent méconnue ou mal connue, pourrait inciter les générations nouvelles à s'investir pour poursuivre la progression et à se mobiliser pour gommer le dernier décalage [1] existant, celui de l'orientation vers les carrières scientifiques.

En France, les femmes ne représentaient en 1996 que 23% des étudiants des écoles d'ingénieurs ; mais ce chiffre est en progrès constant, quoique lent, avec 9% en 1973 et 19% en 1988. Toutefois, il faut mesurer le chemin parcouru en quelques décennies : en 1933, une seule femme était admise au concours d'entrée à l'École centrale et deux femmes en sortaient avec le diplôme d'ingénieur. Ce n'est que peu à peu que les grandes écoles ont introduit la mixité : l'École polytechnique, fondée en 1794, l'a introduite en 1972, mais en 2000 on n'y comptait encore que 15% de filles admises.

Le rôle des pionnières, qui se sont présentées aux examens et concours masculins, est à souligner, car elles ont aidé à convaincre de la légitimité des transformations à opérer. Il convient de noter aussi le rôle de certains hommes qui ont aidé de leurs conseils et influences leurs collègues femmes à obtenir cette égalité complète dans l'enseignement, mais aussi la tiédeur de certaines femmes attachées à la spécificité de leur enseignement et à sa pédagogie propre.

La faiblesse du pourcentage d'options pour les études scientifiques ne résulte pas d'une inaptitude féminine pour les sciences, mais de choix d'orientation. Comme le souligne Stephen G. Brush [2], les femmes ont apporté leur contribution au développement de la science moderne, certaines se sont illustrées par leurs contributions théoriques, d'autres par leur travail expérimental. Les raisons de la désaffection des femmes pour les carrières scientifiques ont fait l'objet de diverses analyses. À aptitudes égales, les jeunes filles s'orientent moins volontiers que les garçons vers les filières scientifiques. Il s'agit donc de « promouvoir l'image de la science chez les femmes et l'image des femmes dans les sciences pour inciter les jeunes filles à s'engager dans les carrières scientifiques et techniques »(1).

Il peut être éclairant de montrer l'évolution de la place occupée par les femmes dans le milieu scientifique, en se plaçant à l'interface de l'enseignement et des sciences et en s'intéressant à celles qui ont été investies de responsabilités, soit en qualité d'inspectrice générale, soit comme présidente d'une association de spécialistes ou d'une société savante. C'est seulement depuis 1945 que les femmes ont accédé à l'inspection générale et, avec une nomination pour les sciences physiques en 1957, Madeleine Courtin a été la première pour l'ensemble des disciplines scientifiques. Avec une désignation en 1945, elle a aussi été la première présidente de l'Union des physiciens, et c'est une cinquantaine d'années plus tard que vont se succéder sans interruption trois autres présidentes (de 1993 à 2005). Un siècle après leur création au début des années 1870, la Société française de physique et la Société mathématique de France confient leur présidence à une femme : à la SFP en 1972, Huguette Mathieu-Faraggi (voir encadré, p. 22), à la SMF en 1975, Yvette Amice. C'est une vingtaine d'années plus tard que d'autres femmes leur succèderont.

Beaucoup de chemin a été parcouru depuis que ces pionnières du XIXe siècle ont montré d'excellentes capacités, en particulier pour les mathématiques : Liouba Bortnicker avec l'agrégation masculine en 1885, Dorothée

(1) Tel est l'objectif de l'association « Femmes et sciences », constituée en 2000.

« Si elle était mieux connue, l'Histoire pourrait ici jouer un rôle en montrant l'engagement et les succès des pionnières.»

Henriette Mathieu-Faraggi (1915-1985)

Directeur de recherches au CEA, première femme élue Présidente de la Société Française de Physique (1972-1973).

Élève d'Irène Joliot-Curie à l'Institut du Radium, puis entrée au CEA en 1951, sa carrière a été entièrement consacrée à la Physique nucléaire. Elle a apporté de nombreuses contributions, souvent fondamentales, aux progrès de cette science ; en particulier, elle a initié la technique « autoradiographique » par irradiation d'émulsions photographiques, qui sera à l'origine d'applications importantes en métallurgie et en biologie. Par ailleurs, elle a assuré des responsabilités de gestion scientifique, en premier lieu la direction du Département de Physique Nucléaire du CEA, de 1972 à 1978. Pendant la même période, elle a été présidente du Comité de physique nucléaire de l'IUPAP. Convaincue très tôt de l'importance de la physique des ions lourds de haute énergie, elle a joué un rôle important dans la prise de décision (en 1975) de la construction du grand accélérateur national GANIL, à Caen.

Klumpke avec le doctorat en 1893. Paul Dupuy n'écrivait-il pas en 1884 : « Les sciences conviennent [...] à merveille à l'esprit féminin, et les sciences abstraites toutes les premières [...] Ce domaine dont on les a tenues éloignées de parti préconçu, c'est, à vrai dire, leur terre promise. » ?

Toujours est-il qu'en ce début du XXIe siècle, on note un déficit de vocations scientifiques chez les filles. Le Haut Conseil de la science et de la technologie (HCST), installé en septembre 2006 et sollicité pour un « avis sur la désaffection des jeunes pour les études scientifiques », constate que, si la disproportion entre les nombres de filles et de garçons est relativement faible dans les séries scientifiques de l'enseignement secondaire, celle-ci s'amplifie au niveau de l'enseignement supérieur. Alors que le pourcentage des femmes dans les universités a été de 58% en 2006, les femmes ne représentent qu'à peine plus du quart des étudiants dans les sciences fondamentales et les sciences de l'ingénieur. Le Haut Conseil, présidé par Serge Feneuille, avance des raisons d'ordre culturel pour expliquer le phénomène : « préjugés au sein des familles et dans la société, autocensure, manque de modèles à suivre... » [3]. Il souligne que cette question des différences observées entre filles et garçons dans les sciences nécessite une réflexion approfondie. Une piste, suggérée dans le rapport [4] remis en juin 2007 par la Commission européenne présidée par Michel Rocard, est celle d'un renouveau de la pédagogie scientifique pour accroître l'intérêt des filles pour les sciences et leur faire acquérir plus d'assurance dans ce domaine.

Vaincre les blocages d'ordre culturel soulignés par le Haut Conseil est une nécessité incontournable. Si elle était mieux connue, l'Histoire pourrait ici jouer un rôle en montrant tous les progrès réalisés et les acquis obtenus, l'engagement et les succès des pionnières. Désormais, l'identification complète des deux enseignements masculin et féminin est réalisée, la mixité établie. Il reste un dernier défi à relever, qui se situe au niveau de l'orientation vers les carrières scientifiques. ■

Références

[1] Nicole Hulin, *L'Enseignement secondaire scientifique en France d'un siècle à l'autre (1802-1980). Évolution, permanences et décalages,* INRP, 2007. Voir le chapitre « Féminin-Masculin : le décalage », pp. 111-125.

[2] Stephen G. Brush, "Women in physical science: from drudges to discoverers", *The physics teacher*, janvier 1985, pp. 11-19.

[3] *Avis sur la désaffection des jeunes pour les études scientifiques supérieures.* http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/conseil/hcst/avisenergie.pdf

[4] *Science education now: A renewed pedagogy for the future of Europe*, European communities, 2007.

Commission « Femmes et Physique » de la SFP

Le but de cette Commission est d'attirer l'attention sur les femmes scientifiques, de donner des informations les concernant et de favoriser leur participation à la vie scientifique.

Pour en savoir plus, consultez la page « Commission et débats → SFP-Femmes » du site *internet* de la Société Française de Physique (www.sfpnet.fr).

Vous y trouverez :

- Une liste de diaporamas, DVD, expositions itinérantes.
- La liste des Prix, bourses et subventions pour les femmes scientifiques.
- Une bibliographie et un ensemble de documents téléchargeables.
- Des liens extérieurs vers les sites d'associations, réseaux et comités divers.

Vous pourrez y télécharger au format pdf la « Lettre ouverte aux Femmes Savantes » du Prix Nobel français Pierre-Gilles de Gennes, parue dans le journal *Le Monde* du 22 février 2007.
Dans cette lettre, P.G. de Gennes nous parle d'une scientifique allemande de la fin du XIXe siècle, Agnes Pockels, qui a eu les plus grandes difficultés à faire connaître ses travaux sur les gouttes d'eau, simplement parce qu'elle était une femme et n'avait pu s'inscrire à l'Université. Mais elle a finalement réussi et a fait les premières mesures fondamentales de capillarité.

Faut-il encore enseigner la physique en Écoles d'ingénieurs ?

Vincent Mosser (vincent.mosser@itron.com)
ITRON SAS, 76 Avenue Pierre Brossolette, 92240 Malakoff

Nous publions ici le compte rendu d'une Table ronde qui s'est tenue le 10 juillet 2007, dans le cadre du Congrès général SFP de Grenoble.
Après une analyse des raisons de la baisse de la place de la physique dans les cursus des écoles d'ingénieurs, les participants font ressortir les arguments en faveur du maintien d'une formation adéquate en physique des futurs dirigeants et experts.

Le titre, volontairement percutant, de cette Table ronde du Congrès général de la SFP de Grenoble a été compris de manières très différentes par l'assistance : provocation pour certains, remise en cause tout à fait factuelle et pertinente pour d'autres. Précisons-le tout de suite : cette Table ronde n'était pas conçue pour être un « plaidoyer pour la physique », alors que l'on constate la diminution des enseignements de physique dans beaucoup d'écoles d'ingénieurs. Il s'agissait plutôt de s'interroger sur la désaffection pour un certain modèle de formation scientifique et technique des ingénieurs (dont le métier de base, défini par la Commission des Titres d'ingénieurs, est rappelé dans l'encadré 1). Cette désaffection n'est d'ailleurs pas cantonnée à la France, allant à l'encontre des conclusions du rapport de Lisbonne(1) qui demande le renforcement du contenu scientifique et technique des formations en Europe. En filigrane, la question était donc : quelle physique faut-il enseigner et comment l'enseigner ?

La Table ronde a permis aux représentants (cf. encadré 4, p. 25) de quelques-unes, parmi le paysage très varié, des écoles d'ingénieurs françaises, du réseau universitaire européen *Cluster* (encadré 3), d'une société multinationale et d'une ex-*start-up* innovante à croissance rapide, d'exprimer le point de vue des formateurs et des employeurs. Ces interventions ont été enrichies de fructueuses contributions de la salle.

La place actuelle de la physique dans les cursus

Un premier constat est fait par tous les intervenants des écoles et universités : les situations sont très diverses concernant la faible présence de la physique dans les cursus. L'enseignement, essentiellement de la physique classique, porte sur les deux premières années, ainsi que le décrit M. Schlenker. Les enseignements plus appliqués sont souvent privilégiés, essentiellement pour trois raisons.

D'abord, J. M. Gillet et Z. Toffano soulignent la difficulté de disposer de temps pour approfondir la physique. Ils expliquent que l'emploi du temps n'est pas indéfiniment extensible et que, la physique étant dans un environnement concurrentiel, sa part baisse nécessairement.

D'un autre côté, la physique n'a pas toujours très bonne presse auprès des élèves ingénieurs : « Parfois on les force », souligne Z. Toffano. « Ils veulent de l'appliqué. » Est-ce en réaction aux souffrances provoquées par ce qui est perçu comme un excès d'abstraction en classes préparatoires ? M. Schlenker cite une enquête, menée à l'échelle européenne à l'initiative de l'université d'Helsinki, qui souligne que "The engineering students have a poor mathematical background when they enter the university. They have also a poor motivation to study physics". Pour J.M. Gillet, les élèves sont très demandeurs d'enseignements moins scientifiques. J. Joseph, directeur des études de Centrale Lyon, le confirme : « l'option la plus choisie est les services financiers ». Sont-ils aussi guidés par le sentiment que ce ne sont pas leurs compétences scientifiques qui leur obtiendront les rémunérations les plus attrayantes ? D'autant plus que tous les emplois des centraliens ne sont pas dans des domaines techniques et que les industriels appuient cette demande.

On en vient ainsi à la troisième raison, celle qui semble primordiale : le besoin et la demande des entreprises. « Si la science est reine, le marché est roi », selon le mot d'A. Maruani, expliquant ainsi que ce précepte économique s'applique aussi à l'offre de formation des écoles. Il poursuit son argument en disant que les dirigeants des entreprises doivent demander plus de physique s'ils estiment que ce qui est enseigné ne convient pas, ainsi que cela a été fait pour les mathématiques.

(1) http://europa.eu.int/comm/research/conferences/2004/sciprof/index_en.html

Note de la rédaction.
Les photos des participants de cette Table ronde ont été réalisées par Serge Claisse (ILL, Grenoble). S. Claisse est aussi l'auteur des photos du Congrès général de Grenoble, publiées dans le numéro 7 de *Reflets de la physique*. Nous lui présentons nos excuses pour avoir omis de le signaler dans ce numéro.

Le métier de base de l'ingénieur

encadré 1

Il consiste à résoudre des problèmes de nature technologique, concrets et souvent complexes, liés à la conception, à la réalisation et à la mise en œuvre de produits, de systèmes ou de services. Cette aptitude résulte d'un ensemble de connaissances techniques d'une part, économiques, sociales et humaines d'autre part, reposant sur une solide culture scientifique (Commission des Titres d'Ingénieurs). **www.cefi.org/EMPLOIS/EC_JOBS.HTM**

La double échelle

encadré 2

La « double échelle » (en anglais "Dual Ladder") est un système mis en place dans plusieurs grands groupes pour permettre à des experts chevronnés, triés sur le volet, d'avoir une progression de carrière similaire à celle qu'ils auraient à des postes de *management*. Ces experts développent leurs compétences scientifiques et techniques au service de leur entreprise. Ce système préserve des passerelles dans les deux sens entre l'échelle plus classique de la carrière managériale et l'échelle technique. Quel que soit le chemin choisi, la progression au sein de la société ainsi que le niveau de responsabilité et de reconnaissance sont équivalents.

« La physique doit faire partie intégrante de la culture des cadres scientifiques et techniques capables de mener les projets innovants, voire de développer les industries *high-tech* qui créeront la richesse de demain. »

Le point de vue des industriels

Les industriels présents justifient, mais modèrent un peu, cette réalité : en rappelant les origines de leurs sociétés respectives, ils soulignent le besoin avéré de connaissances en physique, même s'il faut que les futurs cadres aillent au-delà. C. Mazuré assure qu'une entreprise comme Soitec a besoin de cadres qui intègrent ces compétences de physicien et qui, en plus, possèdent des qualités qu'on n'apprend pas à l'école : la vision, la créativité et le goût du risque. L'expertise scientifique et technique est donc très recherchée et précieuse, car c'est elle qui permet l'innovation et la création de valeur. C'est d'ailleurs aussi la philosophie de Schlumberger : M. Lüling explique que cela a permis à sa société de rester *leader* dans son domaine, grâce à son avance technologique. Toutes les branches de la physique ont été mises à contribution pour la prospection et les mesures utiles à l'industrie pétrolière. Les ingénieurs et les physiciens ne sont pas des citoyens de seconde zone dans l'entreprise. Grâce au système de « double échelle » (voir encadré 2), un expert peut accéder à de hautes responsabilités dans la détermination des stratégies industrielles de la compagnie, et acquérir une large visibilité professionnelle à l'extérieur, que ce soit auprès des clients ou du monde académique.

Pour illustrer son propos, M. Lüling raconte l'histoire d'un général de l'armée américaine qui, devant enseigner la physique à des élèves-officiers, leur apprenait les trois lois d'Ohm :
$U = R.I$, $I = U/R$ et $R = U/I$!
M. Lüling conclut en posant la question :
« Voulons-nous travailler comme physiciens avec des chefs de projets et des ingénieurs qui ne sont experts que des trois lois d'Ohm ? »

Enseigner une physique moderne

La discussion porte ensuite sur les compétences essentielles que doivent acquérir les élèves ingénieurs. Il faut trouver un moyen de susciter un besoin pour ces compétences, réfléchir à la cohérence de l'enseignement.

R. Maynard (SFP) relève une différence importante dans la formation des ingénieurs en France et ailleurs en Europe, pas nécessairement en notre faveur : dans les classes préparatoires, la physique est une matière de sélection dans l'optique de réussite aux concours, et elle est enseignée par des professeurs de qualité, certes, mais qui ne pratiquent pas la recherche. Cela peut donner aux élèves le sentiment qu'elle est une matière scholastique, et non plus une discipline de formation à une méthodologie de réflexion. Pour rebondir, C. Schlenker, de l'ENSPG, souligne que dans le système français, on enseigne en classes préparatoires la physique du 19e siècle. Si, ensuite, on n'enseigne pas de physique moderne, on forme des ingénieurs qui n'auront pas du tout de culture de la physique moderne. C'est inquiétant. Il devrait y avoir une façon de leur présenter cette physique moderne pour la rendre attrayante. « On les gave, peut-être faudrait-il les affamer un peu ? » s'interroge J. M. Gillet pour qui c'est un *challenge* de faire comprendre à l'élève ingénieur, futur ingénieur et futur *manager*, que la physique fait partie de sa culture.

Les représentants des écoles indiquent qu'il existe ou qu'on a remis, quelquefois dans l'urgence d'après A. Maruani, des enseignements de physique moderne, essentiellement de la physique quantique et de la physique statistique, sans lesquels il est quand même difficile de parler de nanodispositifs, de cryptographie quantique ou de télécommunications optiques.

La physique pour former l'esprit

P. Averbuch rappelle que la physique permet avant tout de faire le lien entre, d'une part, la pensée abstraite et la théorie et, d'autre part, les résultats qui sont sur le cahier d'expériences. Ces jeunes gens d'à peine plus de 20 ans, sans expérience humaine longue, ont été sélectionnés sur leur capacité d'abstraction. Il faut leur apprendre à asseoir leur abstraction sur une réalité concrète observée. C'est quelque chose de nécessaire, quoi qu'on fasse ultérieurement : du *management*, des sciences humaines, de la biologie ou autre. Il s'agit là, non de former les gens à « savoir la physique », mais bien de leur former l'esprit, dans le sens de la *Bildung* de la tradition universitaire allemande. Il y aurait tant de choses à enseigner. Le choix à faire est de donner les clefs.

Une réponse développée à l'École Centrale de Paris est la création de cours d'applications pluridisciplinaires, dont le module électif de « Conception intégrée d'une ligne de lumière synchrotron », avec des interventions et des recherches personnelles en physique, matériaux, thermique, mécanique, CAO et sciences humaines. J. M. Gillet observe que les étudiants étrangers de Centrale (100 sur 450 par promotion) sont beaucoup plus attirés que les Français par ce module. D'après lui, ceci pourrait suggérer que la perception de la physique des élèves étrangers n'est pas entachée par cet aspect de sélection, et l'on peut souhaiter qu'ils entraînent les Français dans leur enthousiasme. J. Joseph précise de ce côté que, pour garder le rôle de formation à un enseignement de physique, il faut beaucoup de travaux pratiques, et que c'est la politique de Centrale Lyon.

À trop privilégier les enseignements appliqués ou non techniques, le risque est évoqué que les grandes écoles généralistes forment des gestionnaires adaptés à des grands groupes matures, plutôt que des créateurs visionnaires aptes à la prise de risques. Alain Maruani relève que les grandes écoles sont à l'origine de peu de *start-up*, si l'on excepte les *dot.com* bas de gamme.

Alain Aspect va plus loin : si les industriels très *high-tech* ont évidemment besoin d'ingénieurs et de physiciens compétents en physique moderne, la question maintenant est de savoir si la physique est une discipline assez importante pour mériter d'être enseignée à des gens qui n'en auront pas besoin ? À la raison de la formation de l'esprit déjà évoquée, il ajoute que la physique nous enseigne que le monde n'est pas magique mais obéit à des lois, et est donc intelligible. C'est à ce titre que nous devons revendiquer une place pour la physique dans les grandes écoles : « J'aimerais bien qu'aucun polytechnicien passé par mon amphi ne se fasse avoir par les avions renifleurs. » Par ailleurs, il est extrêmement important que les décideurs de demain, confrontés au problème de l'énergie, aient intégré que le premier principe de la thermodynamique est incontournable. J. Joseph pose la question : les « ingénieurs financiers » auront-ils besoin de la physique ? Oui. Ils sauront faire des modèles qui relient réel et abstraction. Pour l'analyse de risques, une branche importante de la finance, il faut savoir appréhender la réalité physique. Ce n'est pas à HEC qu'on apprend ça. Il insiste que même dans les services, qui représentent les deux tiers de l'économie, on a besoin d'ingénieurs.

Conclusion

Si l'on doit tirer un message de ces débats, il se dégage de façon évidente que la physique doit faire partie intégrante de la culture des cadres scientifiques et techniques capables de mener les projets innovants, voire de développer les industries *high-tech* qui créeront la richesse de demain. Une formation adéquate en physique, souhaitable pour le *manager* de demain, jouera pleinement ce rôle si elle contribue à l'appréhension du réel *via* le travail expérimental et la mise en situation. Il faut ajouter qu'il serait préjudiciable à la dynamique des entreprises de dissocier la formation des futurs dirigeants de celle de futurs experts qui seraient cantonnés à des rôles subalternes. Même si une part importante des élèves de Grandes Écoles a vocation à évoluer vers des carrières managériales, c'est le plus souvent la réussite d'un projet technique qui permet au jeune ingénieur de faire ses preuves et de lancer sa carrière.

Traditionnellement, la fonction recherche et développement a constitué un vivier de talents pour les entreprises. Il serait paradoxal qu'au moment où la compétition mondiale s'exacerbe, les écoles se détournent des enseignements de haut niveau dans les disciplines scientifiques. Cette désaffection aurait deux conséquences néfastes, très différentes : d'une part, elle priverait notre vivier de chercheurs d'une source potentielle d'éléments brillants (les élèves d'écoles d'ingénieurs) ; d'autre part, elle dévaluerait la qualité de nos décideurs de demain. Est-ce que l'ensemble des responsables et des enseignants des écoles d'ingénieurs est conscient de cela ? ■

« Il serait paradoxal qu'au moment où la compétition mondiale s'exacerbe, les écoles se détournent des enseignements de haut niveau dans les disciplines scientifiques. »

CLUSTER

Consortium Liant des Universités de Science et de Technologie pour l'Enseignement et la Recherche

CLUSTER a été créé à l'initiative de l'INP Grenoble en 1990. Ce réseau facilite l'échange d'étudiants ou d'enseignants ainsi que l'établissement de projets de recherche communs (www.cluster.org). Il regroupe 12 établissements de 11 pays : UPC Barcelona, TU Darmstadt, TU Eindhoven, INPG Grenoble, TKK Helsinki, UKa Karlsruhe, EPFL Lausanne, IST Lisbonne, Imperial College London, UCL Louvain, KTH Stockholm, PoliTo Torino.

encadré 3

Intervenants

encadré 4

© Serge Claisse

Jean-Michel Gillet
École Centrale de Paris, Professeur responsable des enseignements de physique de tronc commun

Michel Schlenker
Professeur émérite à l'INPG Grenoble, réseau CLUSTER d'universités de science et technologie européennes

Zeno Toffano
Supélec, Professeur et responsable d'enseignements de physique

Modérateur :
Vincent Mosser,
Société Française de Physique

Alain Maruani
Télécom Paris, inspecteur du Concours Commun Mines-Ponts et animateur du groupe de réflexion sur les mathématiques dans les concours d'écoles d'ingénieurs, un des initiateurs des TIPE (Travaux d'Initiative Personnelle Encadrée)

Carlos Mazuré
Directeur des Recherches Avancées, SOITEC

Martin Lüling
Physics Métier Manager, Schlumberger SRPC

Nouveau Bureau de la SFP

Lors de l'assemblée générale du 2 février 2008, **Yves Petroff** a été élu Vice-Président de la SFP, en remplacement de Roger Maynard. Le nouveau Bureau sera présenté dans le prochain numéro de *Reflets de la physique*.

Séminaire interne SFP

(Orléans, 30 novembre - 1er décembre 2007)

Ce séminaire annuel a réuni 59 participants. Cette année, deux sujets étaient à l'ordre du jour : le positionnement de la SFP sur les problèmes de l'enseignement supérieur et de la recherche, et le rapprochement de la SFP avec les autres sociétés savantes de physique.

Le premier sujet a été introduit par un exposé de Jean-François Méla, ancien Président de l'Université Paris XIII et de la Société Mathématique de France, qui nous a présenté les enjeux et les perspectives de la loi sur les universités. Le lecteur intéressé trouvera le texte de sa conférence sur son site *blog* (http://jfmela.free.fr/jfm.blog/?p=20), et pourra aussi lire l'article qu'il vient de faire paraître dans la revue *Pour la science* (« Universités : faut-il avoir peur de l'autonomie ? », n°363, janvier 2008, pp. 16-17).

La nécessité d'un rapprochement avec les autres sociétés savantes de physique, dans le cadre d'un futur « Collège des sciences physiques », résulte directement du constat que la SFP a un périmètre trop petit vis-à-vis des pouvoirs publics (voir éditorial, p. 2). La discussion s'est articulée autour d'une intervention d'Alain Bravo, Président de la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) et Directeur général de Supélec. Après une présentation de la SEE, A. Bravo a évoqué les thèmes possibles de collaboration avec la SFP.

Chronologiquement, le séminaire avait commencé par la revue des activités des sections locales. Notons la publication de deux livres par la section Auvergne : « La physique au quotidien » et « La physique en Auvergne », qui peuvent être obtenus auprès de Jean-François Mathiot.

Lors du tour de table des divisions de spécialité, la discussion a porté sur le périmètre des divisions : est-il opportun de créer de nouvelles divisions pour favoriser les thèmes interdisciplinaires en émergence, ou au contraire de regrouper certaines d'entre elles en ensembles plus conséquents ? S'est posé aussi le problème des relations de plusieurs divisions thématiques avec des sociétés proches. Il est clair que toute décision dans ce domaine est délicate et mérite une réflexion approfondie des acteurs concernés.

Pour les commissions et les actions, signalons la création d'une nouvelle commission « Diffusion de la culture scientifique », présidée par Daniel Bideau. D'autre part, il est apparu nécessaire d'épauler l'action de C. Thibault dans la commission « Femmes et physique » par une équipe constituée de représentants des sections locales et des divisions de spécialité.

Enfin, une discussion a porté sur l'évaluation de *Reflets de la physique*, par le biais du questionnaire présenté en page 4 de ce numéro. Les résultats en seront intégrés au bilan de l'enquête élargie à l'ensemble du lectorat de *Reflets*.

Philippe Meyer (1925-2007)

Professeur de Physique Émérite de l'Université de Paris XI.

Au début de la Seconde Guerre mondiale, sa famille avait émigré aux États-Unis et Philippe fut admis à l'Université d'Harvard en 1941. En 1943 il interrompt ses études, s'engage dans les FFL et participe au débarquement en Provence comme sous-lieutenant. Il obtient la Croix de Guerre pour ses faits d'armes.
Rentré en France, il est admis comme stagiaire de recherche au CNRS en 1948. En 1953, il intègre le groupe de physique théorique de l'ENS, fondé par Maurice Lévy ; il soutient sa thèse d'état en 1955, avec une étude sur la contribution des courants d'échange dans la photodésintégration du deutéron.
En 1957, à l'occasion d'une visite au CERN, il se tourne vers la physique des particules élémentaires. Puis il opte pour une carrière universitaire. Au sein du Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Énergies de l'Université d'Orsay, qu'il a dirigé de 1966 à 1969, Philippe Meyer a établi avec Claude Bouchiat un groupe de recherche très actif, qui a su attirer et former de nombreux jeunes physiciens. Plusieurs d'entre eux sont devenus des chercheurs reconnus, jouant un rôle important dans le développement d'une école de physique théorique en France. Un article, cosigné par Meyer, sur l'annulation des anomalies entre leptons et quarks colorés, fait partie des articles de base du Modèle Standard. En 1974, Jean Brossel fait appel à lui et à C. Bouchiat pour établir un nouveau laboratoire de Physique Théorique à l'ENS.
En 1987, Philippe Meyer a reçu le Prix des Trois Physiciens, créé en l'honneur des trois Professeurs de physique de l'École Normale, morts en déportation.
Meyer n'a jamais cherché des postes de responsabilité politique. La seule exception fut un bref passage, après mai 68, au cabinet d'Edgar Faure, alors Ministre de l'Éducation Nationale. On lui doit la loi qui autorise des étrangers à être nommés Professeurs dans les universités françaises.
Il était un enseignant doué et dévoué et un remarquable directeur de laboratoire. Sous sa direction, le DEA de Physique Théorique, au début spécialisé dans la physique des particules élémentaires, s'est développé pour couvrir une grande partie de la physique fondamentale.
Une autre activité de Philippe Meyer était le soutien des musées d'art en France. C'est seulement aujourd'hui, après sa mort, que le Musée d'Orsay vient d'annoncer la création d'une salle, portant son nom, et consacrée à sa donation.

Tous ses amis se souviennent de son esprit fin et de sa grande honnêteté intellectuelle. Avec sa disparition, la physique théorique française perd un de ses membres, qui a beaucoup œuvré pour son développement.

La SFP à MESUREXPO 25-26-27 septembre 2007, Paris Expo - Porte de Versailles

© EXPOSIUM-APFOUCHA.

De gauche à droite : Alain Fontaine, directeur du Centre de Compétence Nanosciences, Philippe Gillet, Directeur du Cabinet de la Ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Michèle Leduc, Présidente de la SFP et Jean-Claude Mialocq, Président du Comité d'Exposition de la SFP.

L'édition 2007 du salon MESUREXPO a été marquée par une progression significative du nombre de visiteurs et d'exposants. MESUREXPO a accueilli 7375 visiteurs contre 5900 en 2006 (+25%). En participant à cette réussite, la Société Française de Physique a obtenu une visibilité accrue auprès des exposants et du monde industriel. En organisant des journées de conférences qui ont connu une rare affluence, elle a fait la preuve de sa représentativité du monde de la recherche. Les physiciens, chercheurs, ingénieurs et techniciens, acteurs de la recherche publique ou privée, sont en effet venus nombreux participer aux conférences, rencontrer les exposants et découvrir les nouveautés en instrumentation sur MESUREXPO, mais aussi sur les trois salons concomitants OPTO, FORUM DE L'ÉLECTRONIQUE et VISION-SHOW. La synergie des quatre salons a permis de rassembler 11 137 visiteurs et 650 exposants sur environ 10 000 m^2.

Sur son stand, animé par Véronique Lemaître et Jean Montambaux, la SFP a présenté ses activités et son nouveau périodique *Reflets de la Physique*. Pendant tout le salon, Jacques Gierak et Ralf Jede ont montré quelques éléments de l'outil de structuration à faisceaux d'ions ultra-haute performance « NanoFIB », pour lequel ils ont reçu le Prix Yves Rocard 2007 (voir *Reflets de la physique* n°7, p. 26). Marie-Claude Vitorge représentait la Société Française de Chimie. La division de Chimie-Physique, commune aux deux sociétés, a remis le prix Instrumentation.

Les fichiers des présentations des conférences invitées sont accessibles sur le site **http://sfp.in2p3.fr/expo/**

Journées Nanosciences et Nanotechnologies

25, 26 et 27 septembre 2007

Avec le concours de la SFP, les Centres de compétence Nanosciences (C'nano) et le Réseau National en Nanosciences et en Nanotechnologies (R3N) ont organisé ces journées, dans le prolongement de la Journée C'nano « les Nanosciences au cœur des Technologies Convergentes », mise sur les rails en 2005 (NTC) et 2006 (NTC2) sur Mesurexpo, et des journées J3N du R3N. Le nombre de 724 inscrits couvre bien au-delà de la seule communauté des « nanos », réunie ainsi pour des conférences invitées de haut niveau et des communications par affiche où ont été illustrés les grands thèmes du domaine et les avancées les plus récentes. L'approche a été à la fois thématique (électronique moléculaire et quantique, nanophotonique et information quantique, électronique de *spin*, nanochimie, nanobiosciences), transversale (composants, matériaux, micro et nanosystèmes, instrumentation, enjeux de société) et ouverte vers les applications industrielles, les *start-up* et la politique de recherche européenne.

Les conclusions des journées ont été tirées par Michel Lannoo (Président des C'nanos et directeur scientifique du département MPPU du CNRS), Jacqueline Lecourtier (Directeur de l'ANR) et Yves Caristan (Directeur des Sciences de la Matière au CEA).

Les mesures pour la fusion contrôlée et le projet ITER

Mercredi 26 septembre 2007

Cette journée, organisée par Clément Laviron (CEA Cadarache, DRFC), a permis de présenter le projet ITER et les outils de mesure nécessaires aux expériences. Chaque système de mesure est un ensemble unique, conçu spécifiquement en alliant instrumentation, physique associée et codes de calcul, afin de caractériser les paramètres du plasma ainsi que les composants qui lui font face. Sans entrer dans les détails de chacun de ces instruments, un aperçu global et quelques exemples ont été présentés.

Contrôle non destructif par voie optique infrarouge

Jeudi 27 septembre 2007

Organisée par la SFP et la Société Française de Thermique, et coordonnée par Jean-Luc Bodnar (Université de Reims Champagne-Ardenne) et Philippe Hervé (Université de Ville-d'Avray), cette journée de conférences a permis de faire le point sur les mesures thermographiques, différents types de détecteurs infrarouge, les térahertz (infrarouge lointain) comme nouvel outil d'analyse. Des applications nombreuses concernent les mesures dans des conditions extrêmes, l'imagerie infrarouge, le contrôle non destructif de l'isolation thermique des bâtiments et la restauration des œuvres d'art.

Jean-Claude Mialocq[1], Bernard Mouton[2], Véronique Lemaître[3]
1 - Président du Comité d'Exposition de la SFP (jean-claude.mialocq@cea.fr)
2 - Adjoint au Président du Comité d'Exposition de la SFP (mouton@lal.in2p3.fr)
3 - Agent Général de la SFP (sfp@sfpnet.org)

Prochain rendez-vous,
en septembre 2008,
au **Parc d'expositions**
de **Paris-Nord Villepinte**,
et non plus à la Porte de Versailles.

Dernières parutions

(1) François Arago, un savant généreux – Physique et astronomie au XIXe siècle, *James Lequeux. Coll. Sciences & Histoire, janv. 2008, 538 pages, 35 €.*

(2) Un nouveau regard sur la nature – Temps, espace et matière au siècle des Lumières, *Jacques Debyser. Coll. Sciences & Histoire, nov. 2007, 432 pages, 35 €.*

(3) Comment devient-on scientifique ? Enquête sur la naissance d'une vocation, *Florence Guichard, préface de Pierre-Gilles de Gennes, nov. 2007, 216 pages, 16 €.*

Un Comité Éditorial pour valider les manuscrits

EDP Sciences confirme l'ouverture de sa ligne éditoriale à des secteurs jusqu'alors peu traités dans leurs publications ; outre les secteurs traditionnels comme la physique, les mathématiques et la chimie, qui sont toujours au centre des projets de publication, ce sont de nouveaux secteurs scientifiques qui voient naître de nouveaux livres : les sciences du vivant, la santé, l'actualité de la recherche et de la science.

Pour encadrer soigneusement la qualité de ces nouvelles parutions, le Comité Éditorial a connu récemment un renouvellement et un élargissement de ses membres : Robert Luft, professeur honoraire de chimie à l'Université de Nice, et Jean-Pierre Camilleri, ancien Directeur médical de l'Institut Curie, ont rejoint le comité. EDP Sciences recherche actuellement un nouveau membre, pour prendre en charge les questions éditoriales traitant des sciences du vivant. La physique, quant à elle, est encadrée par Roger Maynard, José Teixeira, Bernard Bonin et Henri Métivier.

Nouveaux manuscrits

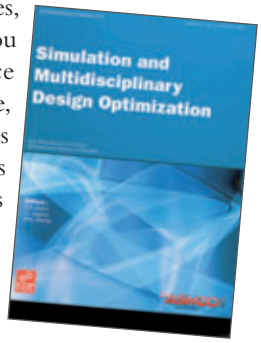
EDP Sciences reçoit et accueille de nouveaux projets de livres et des manuscrits, qui lui parviennent le plus souvent par la poste. Les envois sont nombreux (plus de 20 chaque mois), de niveaux et d'approches très hétérogènes. Un grand nombre traite de l'histoire des sciences, thème qui semble passionner les scientifiques écrivains.

La stratégie éditoriale d'EDP Sciences s'oriente à la fois vers plus d'ouvrages grand public (un récent livre « Pourquoi les vaches ne peuvent-elles pas descendre les escaliers ? » a dépassé les 20 000 exemplaires vendus), et vers la poursuite d'une politique de publication d'ouvrages de référence.

À côté du flux régulier de nouvelles propositions qui viennent alimenter une partie de la production originale d'EDP Sciences, certains secteurs restent peu traités, alors que de nouveaux manuscrits prenant en compte ces sujets seraient particulièrement bien accueillis. Ce sont par exemple les questions traitant des trous noirs, de l'imagerie médicale ou de la robotique/cybernétique. EDP Sciences encourage les écrivains sensibilisés à ces sujets à prendre contact *via* **www.edpsciences.org**, site des Livres, puis rubrique « Manuscrit ».

IJSMDO, nouvelle revue de référence sur les méthodes d'optimisation

En partenariat avec EDP Sciences, l'ASMDO* lance sa publication trimestrielle.



Les stratégies d'optimisation s'appliquent à de nombreuses disciplines, le plus souvent pour améliorer un produit, un coût de fabrication, ou encore le poids d'une structure. Les premières applications après la finance sont la masse ou la raideur des matériaux – en aéronautique, automobile, ingénierie civile, nucléaire ou navale. L'utilisation systématique de méthodes rigoureuses d'optimisation est justifiée par la concurrence mondiale dans les différents secteurs de l'industrie, et par le développement des moyens informatiques de calcul et de simulation.

La revue IJSMDO – *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization* – a pour but d'être une plate-forme internationale d'échange entre les industriels et les instituts de recherche universitaire. **www.ijsmdo.org**

* Association for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization

Nouveau site et *Open Access* pour J3eA

J3eA – *Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes* – a son nouveau site web : **www.j3ea.org**. À cette occasion, la revue passe à l'*open access*. L'ensemble des articles peut être consulté gratuitement.

Dédiée à l'enseignement post-baccalauréat des sciences et technologies de l'information et des systèmes, J3eA permet aux enseignants-chercheurs de faire connaître leurs travaux de recherche pour la formation en électronique, électrotechnique, automatique, traitement du signal et de l'image, informatique industrielle et télécommunications. J3eA est diffusée exclusivement en ligne : les auteurs peuvent introduire dans leurs articles des outils multimédia tels qu'animations, sons, logiciels. Le premier numéro publié en 2008 comprend une sélection d'articles du CETSIS 2007 (Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes).

Plus convivial et ergonomique, le nouveau site propose une information en temps réel sur les articles publiés, *via* un fil RSS et un service d'alerte e-mail.

Cédric Louis : Pluridisciplinarité et *start-up*

Cédric Louis a 33 ans.

- **Décembre 2004**
  Doctorat de chimie « Synthèse et caractérisation de nanoparticules hybrides à cœur d'oxyde de gadolinium » à l'Université Claude Bernard - Lyon 1.

- **Depuis 2004**
  Créateur, co-fondateur et président de la société Nano-H, qui produit et commercialise des nanomatériaux hybrides multifonctionnels innovants.

De formation universitaire, j'ai obtenu une maîtrise de chimie inorganique à l'Université de Savoie Technolac au Bourget-du-Lac, puis (en 2001) un DEA de chimie inorganique à l'Université Claude Bernard – Lyon 1 (UCBL). J'ai ensuite finalisé mon cursus par une thèse en synthèse et caractérisation des matériaux, dont les travaux ont été effectués au Laboratoire de Physico-chimie des Matériaux Luminescents de l'UCBL, et qui a été soutenue en 2004.

Au cours de ces trois années de recherche, j'ai pu mener à bien un projet interdisciplinaire, qui m'a conduit à ouvrir mes compétences de chimiste à des domaines comme la physique et la biologie. En effet, le but de ma thèse était de développer de nouveaux matériaux nanométriques hybrides, associant des propriétés physiques permettant une bonne détection (luminescence, magnétisme) à une bonne furtivité biologique. J'ai ainsi réussi à synthétiser et j'ai caractérisé des nanohybrides à cœur minéral (oxyde de gadolinium luminescent et magnétique), habillés par une « coquille » de silice (favorisant la dispersion et la compatibilité avec une grande variété de milieux) et fonctionnalisés en surface par greffage de molécules organiques présentant une compatibilité et un ciblage biologiques.

La multifonctionnalité et l'adaptabilité de ces nouveaux matériaux hybrides permettaient d'envisager un avenir appliqué : sondes luminescentes en biologie, agents de contraste en IRM et même utilisation en « neutron-thérapie » (GdNCT, i.e. destruction de cellules cancéreuses par capture de neutrons par le gadolinium). La troisième année de thèse m'a donc permis parallèlement d'étudier la valorisation de ces matériaux, de valider certains d'entre eux et de déposer trois brevets (création de propriété industrielle).

Après avoir pris contact avec un incubateur d'entreprise en biotechnologie (Créalys à Villeurbanne), nous avons (avec mon directeur de thèse, O. Tillement, et deux autres partenaires académiques, issus de l'INSA de Lyon et de l'UCBL) jugé opportun de déposer un dossier pour le concours ouvert par le Ministère délégué à la recherche. Le projet a été lauréat du concours en création développement, ce qui m'a permis avec les trois autres co-fondateurs, de créer en décembre 2004 la *start-up* Nano-H, dont j'ai pris la direction.

Depuis trois ans, cette société développe des nanopoudres (oxydes simples ou mixtes, métaux), des solutions colloïdales, des poudres nanostructurées et des nanohybrides inorganiques-organiques, correspondant à l'adaptation et à l'amélioration des matériaux à l'origine de la création de la société, avec trois grands domaines d'application :

- traçabilité (anti-contrefaçon, suivi de fabrication, authentification par incorporation de particules codantes dans les produits),
- détection (détection biologique de haute résolution, imagerie magnétique et optique, particules luminescentes, agents de contraste multidétectables),
- diagnostic et thérapie (IRM, vectorisation, marquage cellulaire, GdNCT).

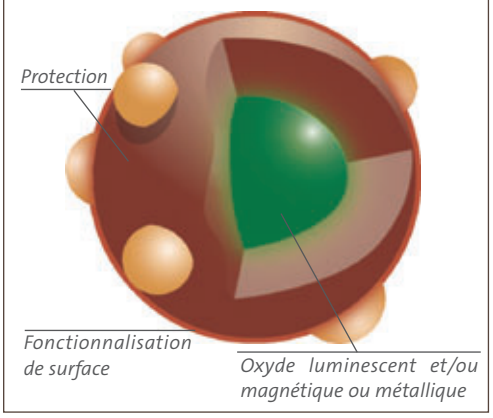
Une des originalités de Nano-H est sa relation étroite avec ses clients : les solutions de Nano-H sont « faites sur mesure ». Nano-H étudie la faisabilité d'une idée ou d'un matériau dans le domaine des nanoparticules, et peut adapter ses produits ou en développer de nouveaux en vue de l'application souhaitée par le client.

En conclusion, tout au long de mon cursus, j'ai eu tout à la fois le souhait et la possibilité de gérer des projets interdisciplinaires situés entre la chimie, la biologie et la physique, et de créer des interfaces entre la recherche universitaire et la valorisation de travaux innovants.

Cédric Louis
c.louis@nano-h.com

Entité nanométrique hybride et multifonctionnelle

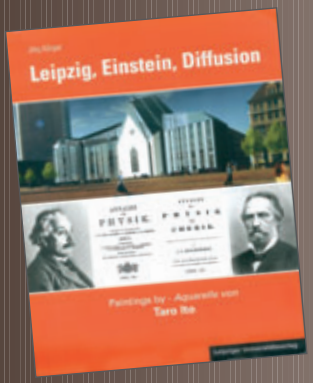
Un coeur nanoparticulaire entouré par une coquille protectrice adaptable en surface – Taille de 5 à 500 nm.



nano-h
Value-Added Nanotechnology
23, rue Royale
69001 Lyon
contact@nano-h.com
www.nano-h.com

« Leipzig, Einstein, Diffusion »

Jörg Kärger (Leipziger Universitätsverlag, 2007, 206 p., 19 €)



Voici un guide original de Leipzig. Il nous promène à travers la ville, ses anciens monuments, le département de physique de l'Université et… divers aspects théoriques et expérimentaux de la diffusion.

L'origine de ce petit ouvrage réside dans un congrès international « Diffusion Fundamentals », qui eut lieu en 2005 pour célébrer le 150e anniversaire de l'article d'Adolf Fick qui établissait les lois quantitatives de la diffusion, et le centième anniversaire de l'article d'Albert Einstein sur le mouvement brownien. Il se trouve que ces deux papiers furent publiés dans des périodiques imprimés et édités à Leipzig, respectivement « Annalen der Physik und Chemie » et « Annalen der Physik », dont les pages de garde ainsi que les portraits des deux protagonistes ornent la couverture du livre.

Malgré les destructions de la Seconde Guerre mondiale, Leipzig conserve de beaux restes, notamment les églises Saint-Thomas, illustre par le souvenir de Jean-Sébastien Bach, et Saint-Nicolas, célèbre pour ses prières pour la paix, suivies des processions pacifiques avant la chute du Mur.

Un peu de tourisme et quelques rappels historiques ne déparent pas la série de huit articles scientifiques, quatre consacrés aux lois de la diffusion et du mouvement brownien, à l'histoire de l'élaboration de ces concepts et, peut-être moins familiers, à leur extension à la migration des animaux, des hommes et des idées, ou aux réseaux complexes (WEB, cellules, relations humaines…). Suivent trois papiers plus spécialisés, décrivant des études de diffusion moléculaire basées sur la résonance magnétique nucléaire, une technique développée très tôt à Leipzig, comme le rappellent quelques pages d'histoire – ces études portent sur la diffusion dans les zéolites et autres milieux nanoporeux, ainsi que dans les membranes biologiques.

Un autre article retrace l'histoire du département de physique de l'Université de Leipzig : on y voit une copie d'une lettre de candidature d'Albert Einstein datée de Zurich du 9 mars 1900, en vue d'un poste en ce département – une lettre qui ne reçut aucune réponse ! Que se serait-il passé si sa candidature avait été acceptée ? En tout cas, le patron du département soutint vigoureusement la nomination d'Einstein au prix Nobel qui lui fut décerné en 1921.

Le livre est agréablement illustré d'aquarelles du physicien japonais Taro Ito. Sa lecture est à la fois agréable et stimulante. J'ai apprécié cette forme originale de mêler l'histoire et la physique – et l'occasion de lire un peu d'allemand, puisque cette lecture en est facilitée par une impression en deux colonnes, anglais et allemand face à face.

Jean Philibert
Professeur Émérite à l'Université de Paris XI

« Passion chercheur »

Jacques Duran (Belin-Pour la Science, 2005, 192 p., 17 €)

Après « Sables émouvants. La physique du sable au quotidien », où il présentait une quinzaine d'expériences étonnantes quoique simples, Jacques Duran nous propose un livre d'esprit différent, où il parle de sa vocation de physicien, et surtout des conditions de travail (difficiles) des chercheurs. Il illustre son propos d'anecdotes savoureuses (la Cour des comptes et la 2 CV !) et de situations vécues au cours d'une carrière bien remplie de chercheur et de responsable – successivement directeur de laboratoire, vice-président de l'Université Paris 6, directeur des études de l'ESPCI auprès de P.G. de Gennes. Étant maintenant « hors cadre », comme disent les militaires, il peut s'exprimer librement et dire tout haut, sans langue de bois, ce que beaucoup de collègues pensent. Un exemple : j'ai vécu en tant que directeur de labo la situation cauchemardesque créée par la crise des crédits de paiement du CNRS, à l'automne 1994, sous le gouvernement Balladur, et je partage les sentiments de Duran sur cet épisode, révélateur de la façon dont certains politiques et administratifs considèrent les chercheurs. Ses remarques sur les relations avec les entreprises, plus difficiles en France qu'à l'étranger, faute d'interlocuteurs formés par la recherche, sur la façon pour le moins étrange dont sont attribués certains marchés publics, ou encore sur la rigidité de la bureaucratie européenne, font mouche. Sur ce dernier point, il rejoint d'ailleurs les propos assez désabusés tenus par l'ex-commissaire européen à la Recherche, le physicien Philippe Busquin, qui m'avait fait forte impression lors d'un colloque d'Orléans de la SFP.

Ce livre vient à point au moment où le SFRI (« système français de recherche et d'innovation ») vit de profondes réformes et suscite de vifs débats. La création de nouvelles agences, l'ANR et

l'AERES, ainsi que de l'ERC au niveau européen, va-t-elle stimuler la recherche française, ou au contraire l'étouffer sous la bureaucratie ? L'avenir le dira, mais Duran en a une vision pessimiste, où les chercheurs-proies ne parviendront plus à survivre aux administratifs-prédateurs*. Il est tentant pour ces derniers de juger les chercheurs sur des critères essentiellement quantitatifs, nombre de contrats obtenus et publications, ce qui n'est pas fait pour stimuler l'originalité – on risque de favoriser les Bouguereau aux dépens des Monet. Leo Szilard, physicien ami d'Einstein, avait déjà évoqué ce risque, dans un texte décapant (un extrait en est cité par N. Witkowski dans « Une histoire sentimentale des sciences »). Il avait prévu l'existence d'un taux critique de succès des demandes de contrat, en dessous duquel la recherche créative est stérilisée. Ce « point de Szilard » se situe entre 15 et 20 %, et on n'en est pas très loin pour certains appels d'offres de l'ANR ou pour les contrats européens (voir par exemple la lettre de Jacques Vigué, publiée dans *Physics World* de septembre 2004).

« Passion chercheur » ne s'adresse pas au même public que le livre de Sébastien Balibar, « La pomme et l'atome», dont Michèle Leduc a rendu compte dans le n°5 de *Reflets* : pour convaincre votre nièce qui hésite à s'engager dans une carrière scientifique, il vaut mieux lui offrir celui de Balibar, mais faites lire celui de Duran aux énarques ou aux cadres supérieurs de votre connaissance. Vous pouvez aussi l'offrir à votre député !

Jean Vannimenus

* Suggestion personnelle : exiger des énarques qu'ils aient passé une thèse ou eu une expérience de terrain s'ils veulent rejoindre un cabinet ministériel.

« Sécurité et utilisation hostile du nucléaire civil. De la physique à la biologie »

(Rapport à l'Académie des sciences)
Robert Dautray (Éditions TEC et DOC, Paris, 2007, 176 p., 40 €).

Ce rapport traite – du point de vue scientifique et technique – des problèmes de la prolifération nucléaire, tant sous forme d'armes nucléaires que de la dissémination volontaire de corps radioactifs, par des États ou des groupes terroristes, ainsi que de ses conséquences éventuelles pour la population française. La possibilité que de telles matières puissent provenir de notre propre industrie nucléaire est prise en considération. L'auteur explique qu'un tel danger subsistera pendant les deux décennies à venir, tant que l'essentiel de ces matériaux (notamment les « déchets » qui s'accumulent) ne sera pas stocké d'une manière ultime et sans possibilité d'accès.

Robert Dautray, ancien Haut-commissaire à l'énergie atomique, a divisé son ouvrage (qui fait suite à ses deux précédents rapports de 2001 et de 2005) en deux grandes parties : « La France face à la prolifération nucléaire » et « Les effets de la radioactivité sur l'homme ». Il discute un large éventail de questions, allant des problèmes du retraitement des combustibles aux effets de l'ingestion du césium 137. L'auteur trace des pistes de futures recherches nécessaires en physique, techniques et biologie. Dans la deuxième partie, qui s'appuie sur nos connaissances en biologie, sont présentés des éléments de radioprotection, les définitions des différentes unités utilisées et une discussion des risques d'effets dangereux pour les humains ; l'auteur souhaite que l'on utilise le terme de « probabilité » de façon plus rigoureuse et à bon escient. Cette partie demande davantage d'attention au physicien.

Le livre est agréablement divisé en courts chapitres et sous-chapitres qui en facilitent la lecture. Il donne beaucoup d'exemples très parlants et des données chiffrées. Il comporte de nombreuses notes très documentées de bas de page qui contiennent d'abondantes informations [(1)].

Dans sa conclusion, évoquant le rôle d'une autorité internationale, notamment en situation de crise, Robert Dautray met en garde :

« … dans le futur, si une grave action belliqueuse répand des produits radioactifs quelque part dans le monde, cela deviendra une pression internationale. Il faut nous y préparer du point de vue des bases scientifiques et techniques nécessaires pour sauvegarder alors les intérêts de la France, qui possède et exploite tous ses équipements de production de matériaux nucléaires et a démontré qu'elle l'a fait, et continue à le faire, dans une parfaite sécurité.

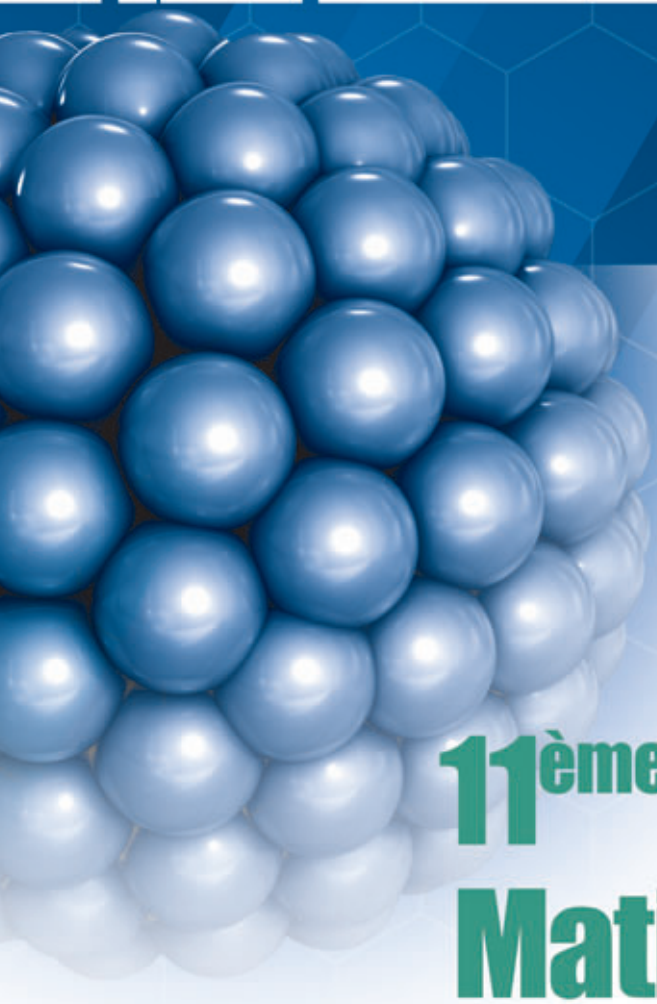
»… Il faut toutefois que les Français sachent que, dans le cadre international, la France est parmi les pays dont le nucléaire civil, fonctionnant en régime nominal, est le plus simple et le plus robuste (un seul type de réacteur, un seul constructeur, un seul exploitant, un seul service de recherche à long terme, un seul service de R&D-ingénierie, un seul grand laboratoire d'expertise de la sûreté et de la radioprotection, une seule Autorité de sûreté et de radioprotection, etc.). Pour qu'il continue d'en être ainsi, il reste à traiter les possibilités signalées dans le présent rapport et dans les deux précédents. »

Ce livre doit susciter la réflexion et de nouveaux travaux.

Pierre Radvanyi

« Un rapport qui impose l'attention. »

(1) Cependant, note 129 : les premiers nouveaux radioéléments découverts par Marie et Pierre Curie ont été successivement le polonium 210 de période 138 jours et le radium 226 de période 1600 ans.



JMC 11

Strasbourg
août 2008

11èmes Journées de la Matière Condensée

25 au 29 août 2008 - Université Louis Pasteur - Strasbourg

http://jmc11.u-strasbg.fr

INSCRIVEZ-VOUS

Société Française de Physique

CONSEIL GENERAL DU BAS-RHIN

Strasbourg Communauté Urbaine

Région Alsace

CNRS CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ulp UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR STRASBOURG

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE