

Rédactrice en chef invitée : Véronique Pierron-Bohnes

Femmes scientifiques : une richesse ignorée des médias de l'éducation

« Actuellement, **une seule femme** a l'honneur de voir son nom figurer sur la liste officielle des philosophes à étudier en Terminale : Hannah Arendt. Est-elle donc la seule femme philosophe ? Ou bien la seule qui vaille la peine qu'on l'étudie ? » La pétition de la jeune bachelière de Bordeaux pendant l'été 2014, dénonçant la faible présence des femmes dans les manuels scolaires, a rencontré un vif succès. Pouvons-nous espérer un changement radical dans les années à venir ?

Nous, physiciens, ne pouvons pas tourner le dos à cette désespérante réalité, qui n'est pas spécifique au domaine des lettres. Le nombre de « références » femmes-scientifiques est bien inférieur à celui retenu, déjà anormalement faible, des grandes philosophes, émergeant d'un vivier pourtant beaucoup plus riche.

« Parmi les "grands hommes", il y a très peu de femmes, souligne Roland Courteau, sénateur, auteur d'un rapport sur les stéréotypes sexistes dans les manuels scolaires remis au Sénat en juin 2014. Sur 3346 personnages cités dans les manuels, seuls 670 ne sont pas des hommes. »

Permettez-moi de rebondir sur ces messages et d'aborder quatre points fortement corrélés à ces omissions désastreuses.

- La reconnaissance de la contribution des femmes scientifiques dans les manuels destinés aux jeunes, au collège et au lycée, ne reflète pas leur apport au développement de la science. Même quand elles ont marqué de fortes ruptures scientifiques, elles sont souvent ignorées. Faut-il rappeler l'histoire de Rosalind Franklin, dont les résultats ont été « confisqués à son insu » par trois chercheurs, certes brillants Prix Nobel de Médecine 1962, pour la découverte de la structure de l'ADN, publiée dans *Nature* en 1953 par Watson et Crick ? Son nom ne fut prononcé qu'une seule fois, par Wilkins lors de la cérémonie de Stockholm qui eut lieu quatre ans après la mort de Rosalind Franklin.
- Combien d'entre nous ont-ils plaisir à souligner que leur vocation a été amorcée, amplifiée, déterminée par nos professeurs ou parents qui, par leur exemple, nous ont donné la capacité de nous projeter dans un profil professionnel scientifique ? Le profil professionnel se forge sur l'image de ces modèles, qui séduisent l'adolescent et l'aident à construire son futur. Être privé de modèles « femmes scientifiques » est un handicap énorme pour la moitié des étudiants, une faute de civilisation qui écarte de la soif de la connaissance et de ses frontières une moitié de la jeunesse, confrontée trois fois durant ses études à des choix déterminants, souvent irréversibles : à la fin du collège, à l'issue du baccalauréat et à la fin de la licence.
- L'emploi scientifique est un autre levier important, source de déséquilibre hommes-femmes en science, déséquilibre absent de l'enseignement secondaire. Très nettement, dans les métiers offerts par l'apprentissage de la physique, qui s'ouvrent sur les champs technologiques, fort heureusement bien au-delà du seul corps enseignant et de chercheurs, l'Europe se classe en deux régions : autour de la Méditerranée, les pays accueillent plus facilement les femmes que les pays s'appuyant sur le modèle anglo-saxon. Le contexte social de chaque modèle engendre des mécanismes, fidèles aux traditions, qui amplifient le déséquilibre hommes-femmes de nos professions de physiciens. Ouvrir les concours de postes permanents lorsque le physicien approche de quarante ans, tradition au cœur du modèle anglo-saxon, est une politique sexiste qui ne peut que décourager les femmes qui désirent des enfants. Heureusement, des exemples de réussites de femmes scientifiques existent, qui maintiennent des lueurs d'espoir dans notre pays. On ne peut que se réjouir et féliciter ces pionnières, qui ont franchi ces obstacles où les chances de réussite sont biaisées par l'appartenance au genre. Les données statistiques sont riches, et témoignent sans ambiguïté de la nature inégalitaire du cycle de sélection vers l'emploi... et du signe alarmant de sa dérivée.
- Il n'est pas question ici de nier le rôle, nécessaire et positif, d'un emploi postdoctoral de deux ou trois ans, souvent à l'étranger, qui permet au jeune thésard de se forger une forte conviction de son goût pour la recherche et se prouver son efficacité professionnelle dans un environnement nouveau, sur un sujet dont la réussite dépend très fortement de son investissement personnel. La confiance en soi ainsi gagnée est irremplaçable. Mais basculer, comme depuis dix ans, dans un soutien à la recherche, de plus en plus sur projets déposés auprès d'agences de financement, engendre, par la masse salariale introduite par cette politique « de couleur anglo-saxonne », une longueur toujours croissante du statut de postdoc (CDD), conduisant à recruter tardivement l'enseignant-chercheuse(r), la(e) chercheuse(r) sur postes permanents.

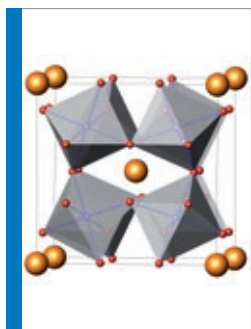
Au-delà du diagnostic, que tenter pour quitter cette spirale ? Développer un plan pluriannuel de bonnes pratiques pour défier les sources de ce déséquilibre est une obligation. Construire un socle de connaissances et développer des outils efficaces pour donner des chances à ce combat à livrer chaque jour, justifie pleinement les travaux de la Commission Femmes & Physique de la SFP et de la Mission pour la place des femmes au CNRS en faveur de l'égalité professionnelle. Encourager la moitié de nos jeunes à rejoindre les physiciennes pionnières dans la diversité des métiers ouverts par l'apprentissage centré autour de la physique, à exprimer leurs talents dans notre champ professionnel, est un immense devoir et une leçon de vie, dont la construction, la puissance et la réussite bénéficieront à l'Europe et bien au-delà.

Alain Fontaine

Président de la Société Française de Physique



► p. 13



► p. 21



► p. 45



► p. 48



Mosaïque de portraits de femmes en physique aux côtés de I. Joliot-Curie, L. Meitner (à gauche de la photo n°4), É. du Châtelet, M. Goepfert-Mayer.

De gauche à droite, puis de haut en bas : © Jean-François Dars ; Musée Curie (coll. ACJO) ; CNRS Photothèque/Emmanuel Perrin ; Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz ; CNRS Photothèque/Frédérique Plas ; CNRS Photothèque/Cyril Fresillon ; Studio Sébert ; CNRS Photothèque/Christophe Lebedinsky ; Bettmann/CORBIS ; CNRS Photothèque/Claude Delhaye ; CNRS Photothèque/Hubert Raguet ; Éric Descarpentri/Université Paris Diderot.

Éditorial

- 2 Femmes scientifiques : une richesse ignorée des médias de l'éducation
Alain Fontaine

Femmes et physique

- 4 Un numéro spécial Femmes et physique
Charles de Novion et Véronique Pierron-Bohnes
- 6 Chercheur-chercheuse : un métier de plus en plus lourd, en particulier pour les femmes
Michèle Leduc et Roger Maynard
- 8 Actions de la Mission pour la place des femmes au CNRS en faveur de l'égalité professionnelle et de la pleine participation des femmes en physique
Anne Pépin
- 10 Des nouvelles de la commission Femmes & Physique de la SFP
Véronique Pierron-Bohnes
- 11 Dix portraits de physiciennes pour l'égalité professionnelle

Avancées de la recherche

- 12 Explorer l'évolution du climat grâce aux glaces de l'Antarctique et du Groenland
Valérie Masson-Delmotte et Amaëlle Landais
- 18 La recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques
Sylvie Hébert
- 24 Théorie des excitations électroniques : une histoire complexe
Lucia Reining
- 30 Photographier une réaction chimique avec des impulsions laser ultra-brèves
Valérie Blanchet
- 36 Étudier la structure des membranes biologiques : l'intérêt des systèmes modèles et des neutrons
Giovanna Fragneto
- 42 Une gamma-caméra miniaturisée pour la cancérologie
Stéphanie Pitre-Champagnat

Science et société

- 46 Faire des sciences avec les petits : une approche "bottom-up"
Estelle Blanquet et Éric Picholle

Parcours de physiciennes

- 52 À l'interface entre la recherche académique et l'industrie : Emmanuelle Guillard
Alexandra Pihen
- 54 Une jeune physicienne européenne qui réussit : Francesca Ferlaino
Interview par Michèle Leduc

Ce numéro comporte, en encart, l'appel des cotisations et abonnements 2015 de la Société Française de Physique, inséré dans l'ensemble des exemplaires.

Comité de rédaction

Président : Stefano PANEBIANCO
Membres : Michel BELAKHOVSKY - Irène BUVAT - Fabienne CASOLI - Jean-Michel COURTY - Anne DAVAILLE - Nicolas DELERUE - Olivier DULIEU - François GRANER - Étienne GUYON - Jean-Pierre HULIN - Agnès JACQUESY - Michèle LEDUC - Stéphane MAZOUFFRE - Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS - Laurence RAMOS - Sophie REMY - Jean VANNIMENUS - Christiane VILAIN - Paul VOISIN

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

Directeur de la publication

Rédacteur en chef : Charles de NOVION
Conception : Laetitia MORIN - Keith VILLEMEUR
Réalisation graphique : Laetitia MORIN
web : laetitiamorin-graphiste.fr - e-mail : laetitiamorin@free.fr
Suivi de rédaction : Agathe CYMER
Service publicité : Jessica EKON - Tél. : 01 69 18 92 40
e-mail : publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 4^e trimestre 2014
ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777
© SFP - Édité à 3400 exemplaires

Imprimerie Jouve

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



© Stéphane Cardinale / People Avenue

Un numéro spécial Femmes et physique

Pour donner une meilleure visibilité aux femmes physiciennes, la Commission Femmes & Physique de la SFP a proposé à la rédaction de *Reflets de la physique* de publier un numéro spécial, dont les articles seraient uniquement écrits par des femmes. Cette proposition a été acceptée avec enthousiasme par le Comité de rédaction de la revue et le Conseil d'administration de la SFP, puis vivement soutenue au CNRS par la Mission pour la place des femmes et par l'Institut de physique.

Il a été décidé que ces articles porteraient surtout sur des thématiques aux interfaces de la physique avec les autres sciences (sciences de la Terre, sciences des matériaux, chimie, biologie, médecine...).

Les auteures ont été proposées par la commission F&P, et les articles acceptés par le Comité de rédaction sur la base d'un plan et d'un résumé détaillé. Tous les articles ont été « référés » sur les plans scientifique et pédagogique.

C'est ce numéro que vous avez actuellement entre les mains. Il se divise en trois parties.

La première partie est plus « politique ». Dans son éditorial, Alain Fontaine, président de la SFP, souligne plusieurs points qui aggravent ce déséquilibre hommes-femmes en science : une reconnaissance insuffisante de la contribution des femmes scientifiques qui induit un manque de « modèles » pour les étudiantes, et la précarité actuelle du statut de postdoctorant. Dans une Tribune libre, Michèle Leduc et Roger Maynard insistent sur les tensions qui résultent de l'évolution du métier de chercheur, pesant tout particulièrement sur les femmes.

Anne Pépin, directrice de la Mission pour la place des femmes au CNRS, et Véronique Pierron-Bohnes, présidente de la commission Femmes & Physique de la SFP, présentent une synthèse des actions en cours et prévues dans ces deux institutions pour attirer, encourager et promouvoir les femmes dans les métiers de la physique.

La seconde partie constitue le cœur du numéro avec six articles scientifiques, écrits par des physiciennes en pleine activité dans des laboratoires situés en France : au CNRS, au CEA, à l'université et dans un organisme international (l'Institut Laue-Langevin). De courtes biographies des auteures sont présentées page 5.

Dans le premier article, Valérie Masson-Delmotte et Amaëlle Landais montrent comment l'analyse de la composition isotopique des carottes de glace extraites en Antarctique et au Groenland a permis de révolutionner notre connaissance des évolutions du climat et de l'atmosphère depuis près d'un million d'années. Ces informations permettent de tester les modèles numériques du climat et offrent un cadre pour situer les changements climatiques en cours et évaluer les risques futurs.

Puis, Sylvie Hébert fait le point sur les matériaux thermo-électriques. Les modules thermoélectriques offrent des perspectives très intéressantes comme nouvelles sources d'énergie « propre » (modules Seebeck) ou pour refroidir des composants électroniques (modules Peltier). De nouveaux matériaux (structures à cages, matériaux à fortes corrélations électroniques...) ont permis une nette augmentation des performances.

Toujours en physique du solide, l'article de Lucia Reining vise à nous faire comprendre, de manière très pédagogique, les approches théoriques utilisées pour décrire les excitations électroniques, quand on tient compte des interactions coulombiennes entre particules. Les progrès récents permettent de reproduire, de façon de plus en plus précise, les spectres expérimentaux, par exemple de photoémission.

L'article de Valérie Blanchet décrit des techniques spectroscopiques (de type pompe-sonde) poussées à l'extrême pour photographier, avec une résolution temporelle femtoseconde, une réaction chimique, par exemple une photodissociation initiée par une impulsion laser ultra-brève : l'imagerie de vecteurs vitesses et la spectroscopie d'harmoniques.



Deux journées par an de contributions sur Wikipédia sont organisées par la Fondation L'Oréal, en partenariat avec Wikimédia et Universcience, afin de sensibiliser le grand public aux réussites féminines dans l'histoire de la science, et inciter à contribuer à la visibilité des femmes scientifiques.

Giovanna Fragneto s'intéresse à la structure et à la dynamique des membranes biologiques entourant les cellules, éléments essentiels dans tout être vivant. Pour cela, elle utilise les différentes techniques de diffusion de neutrons thermiques, associées à la substitution isotopique hydrogène $\leftrightarrow$ deutérium, en privilégiant des systèmes modèles, plus simples et mieux contrôlés.

Enfin, Stéphanie Pitre-Champagnat décrit une gamma-caméra miniature, dite POCl, conçue pour améliorer le diagnostic et guider le traitement chirurgical de certains cancers. Une évaluation récente, statistiquement significative, a montré que cette caméra apporte un gain important en temps de comptage et en résolution spatiale par rapport aux gamma-caméras standards.

La troisième partie du numéro comprend un article sur l'enseignement, un reportage et une interview.

Estelle Blanquet et Éric Picholle proposent une nouvelle approche, dite *bottom-up*, partant des pratiques observées dans les classes, pour faire des sciences avec les petits (dernière année d'école maternelle). Cette approche est basée sur l'utilisation de « critères de scientificité », un outil qui aide l'enseignant dans la préparation et l'analyse de son travail pédagogique.

Alexandra Pihen a effectué un reportage sur l'unité mixte de recherche Saint-Gobain/CNRS et interviewé sa nouvelle directrice, Emmanuelle Gouillart, prix Jeune chercheur 2008 de la SFP. Cette dernière se passionne pour un travail situé à l'interface de la recherche académique et de l'industrie.

Enfin, pour comparer la situation française à celle d'autres pays européens, Michèle Leduc a interviewé une jeune chercheuse italienne, récemment installée en Autriche, Francesca Ferlaino. Celle-ci explique de quelle manière elle s'est adaptée à ce changement de milieu et comment elle arrive à maintenir un équilibre satisfaisant entre sa famille et son travail. ■

Charles de Novion et Véronique Pierron-Bohnes

► Les auteures

Valérie Masson-Delmotte et **Amaëlle Landais** sont respectivement directrice de recherche CEA et chargée de recherche CNRS au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Saclay. Valérie Masson-Delmotte fait partie du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et a obtenu le prix Irène Joliot-Curie, comme femme scientifique de l'année 2013. Amaëlle Landais a reçu la médaille de bronze du CNRS en 2011.

Sylvie Hébert, après une thèse sur les supraconducteurs, a été recrutée par le CNRS au Laboratoire de cristallographie et sciences des matériaux (CRISMAT) à Caen. Elle y est directrice de recherches. Depuis 2011, elle dirige le groupe de recherche du CNRS sur la thermoélectricité.

Après des études en Allemagne et une thèse en Italie, **Lucia Reining** devient directrice de recherche CNRS au Laboratoire des solides irradiés, à Palaiseau. Elle a reçu la médaille d'argent du CNRS en 2003 pour ses recherches en physique théorique de la matière condensée, et est vice-présidente de l'European Theoretical Spectroscopic Facility (ETSF).

Valérie Blanchet est chargée de recherches au CNRS, d'abord au laboratoire Collisions, Agrégats, Réactivité (LCAR) à Toulouse, puis au Centre Lasers intenses et applications (CELIA) à Bordeaux. Ses recherches sur les phénomènes ultrarapides dans les molécules et la matière condensée l'ont conduite à de nombreuses collaborations à l'étranger.

Giovanna Fragneto a fait ses études à Naples, un PhD obtenu à Oxford (UK) et un stage postdoctoral à l'Institut Curie, avant d'être recrutée à l'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble. Elle y est maintenant Senior Fellow et responsable du groupe matière molle.

Stéphanie Pitre-Champagnat, après une thèse de physique nucléaire, a été recrutée comme chargée de recherches CNRS à l'IR4M (Imagerie par résonance magnétique médicale et multimodalités), à Orsay. Elle a reçu en 2008 le trophée de la Femme en Or, catégorie recherche et innovation.

Estelle Blanquet est professeure agrégée de physique et formatrice à l'École supérieure du professorat et de l'éducation (ESPE) de Nice Célestin Freinet, où elle prépare les futurs professeurs des écoles à l'enseignement des sciences par la démarche d'investigation.

Michèle Leduc est directrice de recherche émérite CNRS au laboratoire Kastler Brossel à l'ENS Paris, où elle s'intéresse plus particulièrement à la physique des atomes froids. Elle est actuellement présidente du Comité d'éthique du CNRS, et a présidé la SFP de 2007 à 2009.

Anne Pépin est directrice de recherche au CNRS. Après avoir travaillé dans le domaine des nanosciences, elle dirige actuellement la Mission pour la place des femmes au CNRS.

Véronique Pierron-Bohnes est directrice de recherches à l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS). Elle travaille, expérimentalement et par simulation numérique, sur les couches, multicouches et nanostructures d'alliages anisotropes.

Alexandra Pihen est titulaire d'une maîtrise de physique et termine une formation de journaliste scientifique à l'École supérieure de journalisme de Lille.

Chercheur-chercheuse : un métier de plus en plus lourd, en particulier pour les femmes

La recherche publique est en profonde mutation. Si la motivation des chercheurs et leur enthousiasme restent généralement intacts, l'exercice du métier avec toutes les activités qu'il comporte devient de plus en plus lourd. Les tensions qui en résultent, tout particulièrement pour les enseignants-chercheurs, pèsent sur tous et surtout sur les femmes.

Chacun peut constater que le temps consacré à la recherche proprement dite a nettement diminué depuis une dizaine d'années. Une des raisons principales est la nécessité de trouver des financements extérieurs, avec la diminution des crédits récurrents et la multiplication des dossiers en général longs et complexes à constituer pour répondre à des appels à projets multiples, toujours à recommencer car les financements sont insuffisants et les durées des contrats trop courtes. En outre, les taux de succès sont faibles et d'ailleurs en baisse constante ces dernières années en France, comme l'attestent les désastreux résultats de l'Agence nationale de la recherche (ANR) en 2014, qui affiche moins de 9% de taux de réussite. À ceci s'ajoute le temps passé à évaluer les projets des autres, sans compter les interminables rapports d'activité à rédiger pour les multiples tutelles des laboratoires et les agences d'évaluation. Et remarquons que la difficulté croissante pour obtenir des bourses de thèse accroît la charge de travail des permanents, qui peuvent moins facilement partager leur travail avec des doctorants. Il faut bien noter aussi que la lourdeur des tâches administratives et de gestion s'est accrue avec l'arrivée de l'autonomie des universités (loi LRU) depuis 2007, qui fait peser sur le personnel chercheur une partie des fonctions qui devraient revenir à un secrétariat de haut niveau, en nombre notoirement insuffisant. Ces tâches s'ajoutent à celles de l'enseignement, dont le volume horaire est rarement diminué malgré les dispositifs à options prévus par la loi LRU.

Ceci pénalise particulièrement les femmes qui ont des enfants en bas âge, dont les journées se trouvent de fait raccourcies par le soin des enfants et les soucis de la vie domestique, bien que beaucoup de pères modernes y participent. En outre, l'obtention d'un poste permanent n'est possible qu'après plusieurs années de postdoctorat passées à l'étranger, et l'âge moyen de recrutement des chercheurs et enseignants-chercheurs recule sans cesse.

Les jeunes chercheuses s'en trouvent particulièrement pénalisées, car souvent cela retarde d'autant l'âge où elles décident de fonder une famille et décale leurs maternités, qu'elles démarrent ainsi précisément à la période supposée la plus créative et où les carrières décollent.

D'ailleurs, en ce qui concerne les évolutions de carrière, les règles de l'évaluation ne sont pas favorables aux femmes dans la recherche, comme l'atteste le pourcentage de plus en plus faible de femmes quand on s'élève dans la hiérarchie des organismes ou des universités (*voir l'article d'Anne Pépin, p. 8*), et ce malgré le travail attentif de certaines sections du Comité national de la recherche scientifique. D'abord l'évaluation individuelle reste prioritairement centrée sur les résultats de la recherche, ce qui peut pénaliser les femmes qui ont interrompu, même brièvement, leur carrière à l'occasion de leurs maternités. En outre, on déplore dans toutes les disciplines, en physique comme dans les autres, que l'évaluation fasse un usage excessif des indicateurs de la bibliométrie et que la longueur de la liste des publications reste en général *in fine* le critère principal pour les promotions.

L'évaluation individuelle des chercheurs se fonde aussi sur un décompte du nombre de conférences internationales invitées. Là aussi, les jeunes femmes chercheuses sont souvent défavorisées. Il faut bien constater que dans les domaines de la physique, des mathématiques et même de la chimie, les comités scientifiques des grandes conférences scientifiques internationales sont presque entièrement masculins et qu'ils « oublient » aisément de « trouver » des femmes chercheuses confirmées à inviter (on note toutefois une amélioration relative en France dans certains secteurs). C'est bien ce que cherche à corriger la commission Femmes & physique de la SFP (*voir l'article de Véronique Pierron-Bohnes, p. 10*). Si aujourd'hui les jeunes chercheuses réussissent en général à aménager leur vie familiale pour des conférences à l'étranger, elles



Alignement de cible et mise en place de diagnostics par deux jeunes chercheurs dans la salle d'expérience de l'installation laser de puissance LULI2000, à Palaiseau.

rencontrent tout de même plus de difficultés que leurs collègues masculins lorsqu'il s'agit de partir un an, ou même quelques mois, en congé sabbatique. Pourtant c'est bien la possibilité de bouger, de faire des rencontres, d'éviter la routine, voire de bifurquer, qui favorise l'entrée dans les cercles d'excellence en recherche.

On remarque aussi que les femmes chercheuses en physique se battent moins que leurs collègues masculins pour obtenir des postes très compétitifs. Elles sont proportionnellement moins nombreuses qu'eux à se présenter à l'Institut Universitaire de France (IUF) au niveau junior dans les sections de sciences exactes, ce qui pourtant offrirait une bonne solution pour leur problème de temps et étofferait leur dossier recherche. De plus, quand elles présentent un dossier IUF-junior, leur taux de succès est inférieur à celui de leurs collègues masculins : sans faire de discrimination positive, le jury pourrait tenir compte du fait qu'à qualité égale la liste de publications d'une femme peut être un peu moins longue que celle d'un homme du même âge, du fait de ses maternités. Les femmes sont de même assez peu nombreuses à se présenter aux concours des *Starting Grants* de l'European Research Council (ERC) proportionnellement à leur nombre dans leur discipline, comme l'a constaté l'un de nous (ML) qui a siégé cinq ans dans le panel de physique fondamentale. (Il n'est pas d'ailleurs certain que les jurys ERC, considérés pourtant comme l'étalon-or de l'évaluation, soient totalement exempts de biais psychologiques défavorables aux femmes). Faut-il invoquer le manque de temps pour préparer un dossier à risques ? Ou bien parler d'un relatif défaut de confiance en soi chez certaines de nos collègues ? Ou plutôt d'un goût moins poussé pour la compétition exacerbée qui résulte des pressions croissantes sur les chercheurs ? On peut d'ailleurs se demander si la course obligée à l'excellence qui caractérise notre époque est bien la meilleure façon de développer une vraie créativité scientifique. Comme le souligne

l'enquête faite au CNRS et rappelée ici par Anne Pépin (p. 8), les femmes en recherche sont moins enclines que les hommes à solliciter des postes à responsabilité. Soucieuses de faire leur travail au mieux, elles sont souvent un peu réticentes à sortir de leur domaine de compétence.

En France, pourtant, les conditions de travail des femmes en recherche sont considérées comme bien meilleures que dans les pays anglo-saxons. Il y a plus de crèches, l'école fonctionne l'après-midi, la misogynie affichée n'est plus politiquement correcte. Les mentalités ont certes beaucoup évolué dans les laboratoires depuis l'époque où les auteurs de cet article préparaient leurs thèses, époque où un patron déclarait alors qu'une étudiante demandait à préparer une thèse dans son groupe : « si cette "fille" vient dans mon laboratoire, c'est moi qui pars (*sic*) »... Néanmoins, comme l'esquisse cet article, et comme le confirme notre vécu, tout indique que les femmes sont encore loin d'être traitées comme les égales des hommes dans les métiers de la recherche et qu'il reste une forte marge de progression à effectuer dans les mentalités, celles des hommes surtout, mais également parfois celles des femmes elles-mêmes. Pourtant, les jeunes générations font beaucoup bouger les lignes, et il faut avoir confiance en elles. ■

Michèle Leduc et Roger Maynard
Membres du Comité d'éthique du CNRS

En savoir plus

Voir les avis récents du Comité d'éthique du CNRS :

- « Problèmes éthiques pour les métiers de la recherche publique en mutation » : www.cnrs.fr/comets/IMG/pdf/avis-metiers-recherche-mutation-120214.pdf
- « La politique de l'excellence en recherche » : www.cnrs.fr/comets/IMG/pdf/avis_excellence.pdf

Actions de la Mission pour la place des femmes au CNRS en faveur de l'égalité professionnelle et de la pleine participation des femmes en physique

Placée auprès de la présidence du CNRS, la Mission pour la place des femmes agit comme un observatoire chargé de concevoir et de piloter le plan d'action destiné à favoriser l'égalité professionnelle entre femmes et hommes au sein de l'organisme. La promotion des carrières scientifiques et techniques auprès des jeunes, et plus particulièrement des jeunes filles, relève également de son champ d'action, tout comme la valorisation des recherches de genre. En s'appuyant sur ce qui constitue l'essence même du CNRS – la recherche – la Mission pour la place des femmes a en effet pour objectif de tirer profit des enseignements qu'apportent les études de genre et de les traduire en mesures concrètes dans les politiques que mène le CNRS.

La transversalité de son action conduit la Mission à travailler en étroite collaboration avec l'ensemble des instituts scientifiques, directions, instances et délégations régionales du CNRS. L'ambition, partagée par le Comité de pilotage pour l'égalité professionnelle entre femmes et hommes au CNRS créé en 2011, qui valide les propositions de la Mission, est de mobiliser l'ensemble des énergies au service de l'égalité professionnelle au sein de l'établissement.

La Mission a également développé des partenariats fructueux au niveau national comme international. Elle coordonne entre autres deux projets européens soutenus par le 7^e PCRD, qui portent sur l'égalité professionnelle et la prise en compte du genre dans la recherche : le projet INTEGER (pour "INstitutional Transformation for Effecting Gender Equality in Research") [1], lancé en 2011 et qui s'achèvera fin juin 2015, et l'ERA-NET GENDER-NET (pour "Promoting gender equality in research institutions and the integration of the gender dimension in research contents") [2], lancé en octobre 2013 pour une durée de trois ans.

Le projet INTEGER

Le projet INTEGER vise, plus spécifiquement, à créer un changement structurel durable au sein des établissements de recherche et d'enseignement supérieur partenaires (Trinity College Dublin, Irlande ; Siauliai University, Lituanie ; CNRS, France) afin d'y améliorer l'égalité professionnelle entre chercheuses et chercheurs. Un quatrième partenaire, l'organisme allemand GESIS-Leibniz Institute for the Social Sciences, est chargé d'évaluer la mise en œuvre des plans d'actions élaborés par chacun des trois établissements.

Au CNRS, le projet INTEGER cible plus particulièrement les deux instituts les moins féminisés : l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (INSMI) et l'Institut de physique (INP). Un laboratoire est spécialement ciblé au sein de chaque institut. À l'INP, c'est l'Institut Néel (UPR 2940, Grenoble) qui a été choisi. Des équipes de mise en œuvre travaillent à la direction de l'INP, comme au sein de l'Institut Néel.

Rappelons quelques chiffres : globalement, le CNRS compte 42,6% de femmes parmi ses personnels permanents et 32,9% de femmes parmi ses personnels chercheurs, toutes disciplines confondues. L'Institut de physique (INP) du CNRS compte aujourd'hui 20,9% de femmes parmi les quelque 1210 personnels chercheurs qui sont rattachés à ses laboratoires. Toutefois, si l'on considère la population évaluée par l'ensemble des sections de physique du Comité national de la recherche scientifique (sections 2, 3, 4 et 5), soit environ 1110 personnes, la proportion de femmes y est alors de 18,4%. Globalement, plus on monte dans la hiérarchie des corps et des grades, moins on trouve de femmes. Entre 2010 et 2013, la proportion de femmes parmi les chargé-e-s de recherche de 2^e classe a par ailleurs un peu baissé (de 26% à 22%), tandis qu'elle a légèrement augmenté chez les chargé-e-s de recherche de 1^{re} classe (passant d'environ 22% à 24%). C'est le cas également chez les directeurs/trices de recherche, où elle passe de 17% à 18%.

L'enquête

Afin d'affiner le diagnostic quantitatif réalisé par la Mission et publié annuellement dans le livret *La parité dans les métiers du CNRS* (fig. 1), en complément du *Bilan social du CNRS*, une enquête en ligne a été menée en 2012 auprès des personnels chercheurs de l'INP (taux de réponse global de 23%, et de 43% parmi les chercheuses).

Cette enquête a, entre autres, indiqué que :

- Parmi les répondant-e-s de l'INP, alors que 53% des femmes disent que des facteurs relatifs à leur environnement de travail ont freiné leur progression de carrière, seuls 23% de leurs collègues masculins donnent cette réponse. Globalement, pour les femmes, ces freins tiennent principalement à l'« isolement professionnel », à l'« attitude des collègues » ou encore au « manque de soutien/encouragements ». Les hommes invoquent, quant à eux, majoritairement des « possibilités d'avancement réduites ».
- Seules 38% des chercheuses de l'INP sont d'accord pour dire que leur laboratoire est non sexiste, contre 74% des hommes ; et 47% des femmes déclarent avoir déjà eu à subir des blagues, questions intrusives ou remarques à caractère sexuel et/ou sexiste dans leur cadre de travail actuel.

1. Couverture du livret *La parité dans les métiers du CNRS 2012*.

Photo : Jacqueline Bloch, directrice de recherche, et Alberto Amo Garcia, chargé de recherche, mènent une expérience d'optique au Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN), Marcoussis.

© CNRS Photographie – Cyril Frétilon



La parité dans les métiers du CNRS 2012

- Un tiers des répondantes de l'INP disent avoir rencontré des difficultés lors de la reprise de leur activité après une interruption de carrière (principalement un congé de maternité). Seuls 17% des répondants hommes de l'INP déclarent avoir déjà pris un congé de paternité, et le taux de prise de congé parental est très faible.
- Parmi les répondant-e-s n'en exerçant pas encore, ce sont 41% des femmes et 45% des hommes qui souhaiteraient exercer par la suite des fonctions de direction/responsabilité scientifique. Pourtant seules 19% des femmes (contre 46% des hommes) croient pouvoir y parvenir.
- Proportions de femmes et d'hommes « d'accord » ou « tout à fait d'accord » avec les phrases suivantes :

✓ J'ai le sentiment que ma contribution au laboratoire est reconnue.	54	86
✓ J'ai l'occasion de participer à des commissions/projets importants.	61	83
✓ J'ai dû travailler plus que mes collègues pour être perçu-e comme un-e chercheur/euse reconnu-e en tant que tel-le.	49	18
✓ Je me sens constamment jugé-e par mes collègues.	56	33

■ parmi les femmes ■ parmi les hommes

Les actions

En s'appuyant sur ce diagnostic, sur le cadre législatif et réglementaire français en évolution, sur les exemples de bonnes pratiques développées en Europe ou encore en Amérique du Nord, un plan d'action pluriannuel a été élaboré et validé par la gouvernance du CNRS. Parmi les actions clés mises en œuvre dans le cadre du projet INTEGER, soulignons les suivantes.

Au niveau de l'organisme :

- Modules de sensibilisation à l'égalité professionnelle et au poids des stéréotypes sociaux, délivrés aux dirigeant-e-s, conseils scientifiques, équipes de direction de délégations régionales, etc.
- Sensibilisation des sections du Comité national, avec l'élaboration de fiches d'indicateurs sexués pour chacune des sections, et la

création d'un groupe de travail sur l'égalité femmes-hommes dans l'évaluation des personnels chercheurs, les processus de recrutement et de promotion, l'attribution des distinctions scientifiques, impliquant les président-e-s de sections ainsi que les directeurs/trices adjoint-e-s scientifiques de chacun des instituts.

Plus spécifiquement, au niveau de l'INP :

- Sensibilisation aux enjeux de l'égalité professionnelle femmes/hommes et aux poids des stéréotypes de genre menée auprès des directeurs/trices d'unité, des nouveaux/elles entrant-e-s (JEPHY 2013 et 2014).
- Élaboration d'un kit de communication comprenant dix clips vidéo de physiciennes (voir article, p. 11).
- Communication régulière sur la place des femmes en physique.
- Affichage du retour de congé maternité/adoption/parental comme un des critères d'attribution des accueils en délégation CNRS aux enseignant-e-s chercheurs/euses.
- Attention à la représentation des femmes parmi les orateurs des conférences et colloques financés par l'INP.

Plus spécifiquement, au niveau de l'Institut Néel :

- Modules de sensibilisation à l'égalité professionnelle et au poids des stéréotypes sociaux, menés auprès des acteurs/trices clés de l'Institut Néel : direction générale, direction des départements scientifiques et pôles techniques, membres du laboratoire participant au Comité national ou au CNU.
- Programme de formation Springboard[®] dédié aux jeunes chercheuses et enseignantes-chercheuses. Adapté au milieu de la recherche, il a pour objectif de donner des clés pour exprimer tout son potentiel et mieux piloter sa carrière.
- Mise en place d'entretiens avec le directeur de laboratoire (ou responsable d'équipe) pour femmes et hommes avant et après un congé de longue durée (maternité/adoption/parental/maladie), afin d'évaluer les besoins et faciliter la reprise d'activité. ■

Anne Pépin (anne.pepin@cnrs-dir.fr)

Directrice de la Mission pour la place des femmes au CNRS

[1] www.cnrs.fr/mission-femmes/integer - [2] www.gender-net.eu

Des nouvelles de la commission Femmes & Physique de la SFP

Cette commission a été réactivée en 2011 avec plusieurs objectifs. Elle fonctionne maintenant avec une réunion annuelle à Paris et des réunions régulières en visioconférence ou *via* Skype depuis plusieurs villes. Toutes les femmes et tous les hommes de la SFP sont invité(e)s à nous rejoindre. Pour cela, envoyez un courriel à vero@unistra.fr ; votre adresse électronique sera ajoutée à notre liste de diffusion. Vous serez ainsi informé(e)s de nos réunions et de nos actions, et pourrez participer activement à celles qui vous motivent.

Actuellement, les actions sont les suivantes :

- Organiser, lors des congrès SFP, des **minicolloques** ayant pour thème « la place et les carrières des femmes en physique ».
 - Le premier a eu lieu à Montpellier en 2012 pendant les *Journées de la Matière Condensée* et a rencontré un grand succès. La conférence introductive a été donnée par Mme Catherine Thinus-Blanc du Laboratoire de Psychologie Cognitive de Marseille : « Femmes et sciences : la menace des stéréotypes de genre ». ⁽¹⁾
 - Le deuxième a été organisé pendant le *Congrès général 2013* à Marseille. La conférence introductive a été donnée par Mme Frédérique Pigeyre, professeure en sciences de gestion à l'Université Paris-Est Créteil, « Les carrières des physiciennes à l'Université : quelques motifs d'inquiétude ». La table ronde avait pour thème : « Physicienne, bien dans sa peau, bien dans son métier ». De nombreuses intervenantes, toutes docteures en physique, qui ont choisi divers métiers après leur thèse, ont échangé avec le public. ⁽²⁾
- Établir une **liste de conférencières** à proposer aux organisateurs de conférences pour différents publics : public de spécialistes, grand public de physiciens (conférences SFP locales, par exemple), publics scolaires ⁽³⁾ et grand public (société). Si vous organisez des conférences, nous vous enverrons volontiers cette liste ; demandez-la par courriel à sfp-femmes@sfp.net. Si vous avez apprécié une conférence très pédagogique donnée par une femme, proposez-nous de la mettre sur nos listes !
- Proposer, à la demande du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, une liste de femmes capables d'**intervenir dans les médias sur des sujets de physique**. Si vous désirez figurer sur cette liste, merci d'envoyer vos coordonnées (dont un numéro de téléphone) à sfp-femmes@sfp.net, accompagnées de mots clés des sujets sur lesquels vous pouvez intervenir. Notez que le CNRS, le CEA et certaines universités organisent des formations sur la manière de « communiquer avec les médias sur les enjeux scientifiques ».
- Motiver les femmes à se présenter aux **élections** dans les différentes sections du Comité national de la recherche scientifique (CoNRS) ou du Conseil national des universités (CNU).
- Adresser des courriers aux différentes **instances** (CNRS, CEA, CoNRS, CNU) pour les sensibiliser à la place des femmes en physique.
- Adresser des courriers aux **organisateurs de conférences** pour leur demander de veiller à maintenir la proportion d'oratrices invitées au niveau de la proportion de femmes dans leur sous-discipline, leur demander d'évoquer la démarche et ses résultats dans la conférence de bilan du colloque.
- Avancer des noms et des dossiers de femmes aux différents **prix scientifiques** (dont ceux de la SFP).
- Mettre en place un système de **mentorat** pour aider les femmes dans la gestion de leur carrière et trouver une interlocutrice en cas de problème. L'adresse sfp-femmes@sfp.net a été créée pour être votre interlocuteur.
- Donner une **meilleure visibilité** aux femmes physiciennes : ce numéro spécial de *Reflets de la Physique*, qui publie des articles écrits uniquement par des femmes, est notre première action, soutenue par l'équipe des *Reflets* et par le CNRS. Nous écrivons aussi des pages *wikipédia* sur des physiciennes, notamment celles proposées sur nos listes d'oratrices.

Véronique Pierron-Bohnes (vero@unistra.fr)

Directrice de recherche au CNRS, Présidente de la commission Femmes & Physique de la SFP
IPCMS, BP 43, 67034 Strasbourg Cedex 2



(1) Les présentations des intervenantes peuvent être consultées sur www.sfpnet.fr/commission/femmes-et-physique.

(2) Une retranscription des interventions peut être consultée sur www.sfpnet.fr/commission/femmes-et-physique.

(3) Pour combattre les stéréotypes et la désaffectation des carrières scientifiques par les jeunes et les jeunes filles, il est important que des femmes physiciennes interviennent dans les classes pour que les jeunes voient des femmes scientifiques – et notamment physiciennes – et envisagent ce type de métier.

Dix portraits de physiciennes pour l'égalité professionnelle



© Perrine Maillier, Leslie Marchand, Samantha Chou.

**Découvrez le kit
« Femmes en physique »
le 5 décembre au siège
du CNRS.**

Informations sur le site de l'INP
(www.cnrs.fr/inp), journée sur inscription.

Le kit sera disponible en ligne
sur le site du CNRS :
www.cnrs.fr/femmesenphysique
à partir du 5 décembre 2014.

Mosaïque de couverture du kit. Chaque photo permet d'accéder à un portrait. Les portraits sont accompagnés d'éléments relatifs aux stéréotypes de genre et inégalités professionnelles : par exemple des chiffres sur les femmes en physique, un quizz qui permet d'amorcer la discussion en classe, etc.

Comment combattre les inégalités de genre en sciences dures et donner envie aux jeunes filles de s'engager dans une carrière scientifique ? Peut-être tout simplement en commençant par donner à voir. C'est le sens du kit de communication « Femmes en physique », proposé par l'Institut de physique (INP) du CNRS et la Mission pour la place des femmes au CNRS. Soit dix portraits de physiciennes sous la forme d'autant de petits films qui en disent plus long qu'un grand discours !

Originalité du projet : avoir confié la réalisation de cet outil de sensibilisation à trois étudiantes du Master SACIM (Sciences, Arts, Culture, Innovations, Multimédia) de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, soit trois apprenties réalisatrices étrangères au monde scientifique. « Pour une sensibilité au plus proche de celle du public visé, nous souhaitons que ces portraits soient le fruit du regard de jeunes femmes sur un milieu a priori totalement inconnu pour elles », explique Catherine Dematteis, responsable de la communication de l'INP et à l'origine du kit.

Cet outil s'insère dans le cadre du projet européen INTEGER, porté par la Mission pour la place des femmes au CNRS (voir article, p. 8). « Cofinancé par l'Europe et lancé au printemps 2011, il regroupe le CNRS et deux universités en Irlande et en Lituanie

et vise à développer l'égalité professionnelle dans les carrières scientifiques », détaille Anne Pépin, directrice de la Mission. Cette action, portée par l'INP, s'insère dans le volet « recrutement » du plan d'action égalité professionnelle du CNRS. »

Concrètement, les trois réalisatrices ont d'abord été immergées dans les arcanes de la physique au CNRS. Puis, après sélection des physiciennes, elles ont reçu une feuille de route légère et quelques conseils de la part d'un réalisateur professionnel. « Mais le plus important était qu'elles conservent toute la fraîcheur de leur regard », insiste Catherine Dematteis. « Pour le niveau de vulgarisation, nous nous sommes prises comme référence, et pour la réalisation et le montage, nous avons essayé de réaliser des films les plus dynamiques possible », ajoute Perrine Maillier, étudiante et coréalisatrice.

Finalement, dix portraits de physiciennes passionnées. Elle font partager leur cursus, leur activité et leur regard dans un milieu très masculin. Dix films destinés à devenir un outil à disposition des physicien-ne-s lors de leurs interventions dans les lycées et, plus largement, de toute la communauté de la physique (enseignant-e-s, animateurs/trices scientifiques...), fraction masculine comprise !

Mathieu Grousson, journaliste

► Contacts

Institut de physique du CNRS : Catherine Dematteis, responsable de la communication, inp-communication@cnrs-dir.fr

Mission pour la place des femmes au CNRS : Anne Pépin, directrice, anne.pepin@cnrs-dir.fr

Explorer l'évolution du climat grâce aux glaces de l'Antarctique et du Groenland

Valérie Masson-Delmotte (valerie.masson@lsce.ipsl.fr) et **Amaëlle Landais**

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA-CNRS-UVSQ/IPS), Bât. 701, L'Orme des Merisiers, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

L'analyse des carottes de glace obtenues par les forages profonds en Antarctique et au Groenland permet de connaître précisément l'évolution du climat polaire et de la composition atmosphérique globale.

Ces données ont révélé l'ampleur et la récurrence d'instabilités rapides du climat pendant les périodes glaciaires. Un couplage étroit a été mis en évidence entre variations de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone et climat antarctique, à l'échelle des variations glaciaires-interglaciaires*.

Les informations recueillies permettent d'évaluer la capacité des modèles numériques de climat à simuler les mécanismes de ces changements.

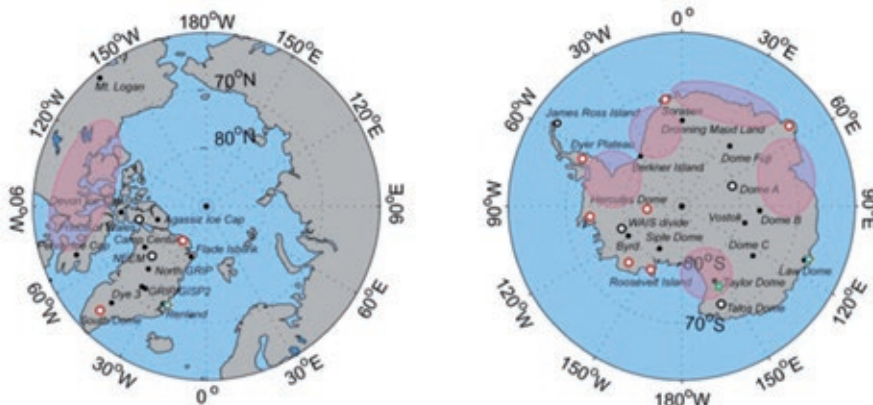
Les termes suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire, p. 17.

Des réseaux de forage

Depuis les années 1960, un ensemble de forages profonds a été effectué au Groenland et en Antarctique (fig. 1). L'âge de la glace au fond d'un forage dépend de l'accumulation moyenne annuelle de neige et de la déformation des couches de glace. Plus l'accumulation est faible, plus l'âge au fond du forage sera élevé. De plus, des études sont maintenant menées afin d'optimiser le choix des sites de forage. Grâce notamment à des mesures radar, il est possible de connaître la topographie du socle rocheux, et de repérer et suivre des couches de glace de même âge (isochrones), afin de choisir des sites peu perturbés par l'écoulement de la glace, c'est-à-dire présentant une stratigraphie de la glace la plus horizontale possible.

Au Groenland, le forage le plus profond a été effectué à NorthGRIP, atteignant 3085 mètres et donnant accès à 123 000 ans d'enregistrements. Ces enregistrements ont récemment été étendus grâce au forage NEEM (fig. 2), remontant jusqu'à 128 000 ans sur une profondeur de 2540 mètres.

En Antarctique, le climat est plus froid et plus sec. Grâce à une accumulation annuelle de neige plus faible qu'au Groenland, il est possible d'extraire, sur des profondeurs comparables, des enregistrements plus anciens. Le forage le plus profond reste celui de Vostok, où la profondeur de 3770 mètres a été atteinte, couvrant 400 000 ans d'histoire du climat sur 3623 mètres de glaces issues de précipitations anciennes, puis de la glace formée par le regel d'un lac sous-glaciaire. Plus récemment, le forage américain WAIS a atteint 3405 mètres



1. Carte des sites de forages profonds au Groenland et en Antarctique.

Depuis 50 ans, un ensemble de forages profonds (cercles noirs pleins) a été réalisé au Groenland (à gauche) et en Antarctique (à droite). Les forages les plus récents apparaissent en cercles noirs et blancs, et les forages en cours ou prévus en cercles rouges et blancs. Les sites où il est prévu de refaire des forages apparaissent en astérisques verts et blancs. Les ellipses roses soulignent les zones d'intérêt où les sites exacts de forages n'ont pas encore été identifiés. (Source : International Partnership for Ice Core Science (IPICS)).



2. Le camp de forage NEEM au Groenland.



3. Carotte de glace, à la sortie de la tige de forage, extraite dans le cadre du programme EPICA, au Dôme C sur la base franco-italienne Concordia, en Antarctique.

de profondeur, mais il ne couvrira que les derniers 70 000 ans, du fait d'une accumulation annuelle de neige plus élevée en Antarctique de l'Ouest. Les carottes de glace les plus anciennes ont été extraites lors du forage EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) au Dôme C (800 000 ans sur 3260 mètres) (fig. 3) et du forage japonais au Dôme Fuji (720 000 ans sur 3035 mètres). Des efforts importants sont en cours pour identifier des sites de forage permettant de remonter au-delà d'un million d'années.

Dater la glace

Quand l'accumulation de neige annuelle est suffisante (typiquement, une dizaine de centimètres d'équivalent eau par an), il est possible d'identifier les couches d'été et d'hiver par leur signature isotopique et chimique et donc de dater les carottes de glace par comptage de cycles annuels. Cette méthode a été appliquée en Antarctique de l'Ouest, sur la côte de l'Antarctique de l'Est et au Groenland. Pour le Groenland, l'erreur maximale de comptage est de l'ordre de 100 ans pour les derniers 11 700 ans (la période interglaciaire actuelle), et augmente de façon cumulative pour atteindre 800 ans il y a 40 000 ans.

Pour les sites de faible accumulation, et pour les périodes plus anciennes, il faut modéliser l'accumulation de neige annuelle (à partir des relations entre composition isotopique de l'eau, température et pression de vapeur saturante, voir encadré, p. 14), et l'amincissement des couches annuelles de neige (à partir de modèles d'écoulement de la glace).

L'enregistrement dans les glaces de dépôts d'aérosols volcaniques fournit la possibilité de marqueurs d'âge absolu (quand l'éruption est datée) ou relatif (pour synchroniser différents forages). De même, les excursions ou inversions de champ magnétique terrestre entraînent une augmentation de la production de beryllium-10, formé dans la haute atmosphère par spallation, sous l'effet du rayonnement cosmique, des éléments légers de l'atmosphère. L'âge de ces changements de champ magnétique, déterminé indépendamment par des mesures sur des laves, peut alors être attribué aux pics de beryllium-10 mesurés dans les carottes de glace.

Les variations des concentrations en gaz à effet de serre (méthane, dioxyde de carbone) et la composition isotopique du dioxygène de l'air sont également utilisées pour synchroniser les enregistrements issus de différentes carottes de glace. Cependant, deux échelles d'âge doivent être produites pour chaque site : l'une pour la glace, et l'autre pour l'air piégé dans la glace. Le piégeage de l'air se fait essentiellement à la transition névé-glace, à une centaine de mètres sous la surface de la calotte. À une profondeur donnée, l'air est donc systématiquement plus jeune que la glace qui l'emprisonne. Cette différence d'âge est aujourd'hui de l'ordre de 200 ans au Groenland, mais elle peut atteindre 5000 ans pour l'Antarctique de l'Est lors des périodes glaciaires, la densification étant plus lente dans des conditions très froides et sèches. Cette différence d'âge peut être estimée à l'aide de modèles de densification du névé, et également grâce aux isotopes du diazote (voir encadré, p. 14).

Les variations passées d'ensoleillement, liées aux changements des **paramètres orbitaux*** de la Terre, laissent leur signature dans le rapport dioxygène/diazone et la composition isotopique du dioxygène de l'air piégé dans la glace. Dans le premier cas, le mécanisme à l'œuvre est local, puisque les changements d'ensoleillement modifient le métamorphisme de la neige de surface, ce qui affecte ensuite les processus de piégeage des différentes molécules de l'air. Dans le second cas, le mécanisme tient à des modifications du cycle de l'oxygène global. Celui-ci, à travers la photosynthèse et la respiration, est en effet sensible aux changements des moussons et à la productivité de la biosphère, eux-mêmes modifiés par les changements passés d'ensoleillement. Au-delà de 60 000 ans, ces méthodes de datation dites « orbitales » sont déterminantes.

Tirant parti de cet ensemble d'informations sur l'âge absolu et sur la synchronisation de différents forages, des méthodes statistiques permettent d'estimer de façon objective et robuste l'incertitude de la chronologie : de l'ordre de 2000 ans pour des échantillons datant de 125 000 ans, elle peut atteindre 6000 ans au-delà.

Variabilité du climat au cours des derniers millénaires

Au Groenland, les carottes de glace donnent accès à une cartographie de la variabilité climatique avec une résolution saisonnière à annuelle, sur un ensemble de forages superficiels. D'une saison à l'autre, cette variabilité est dominée par un mode de la circulation atmosphérique appelé



► Marqueurs de température dans la glace

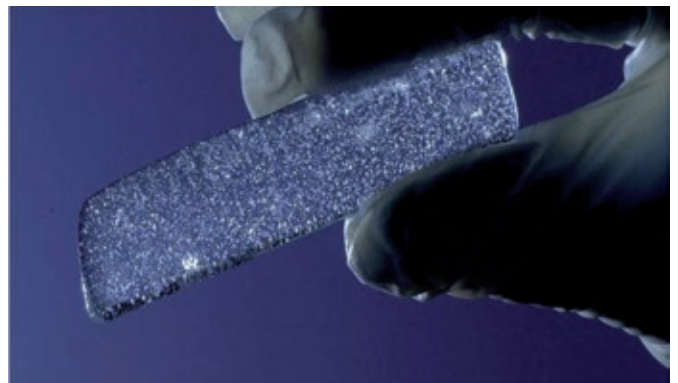
Depuis les années 1950, la spectrométrie de masse a permis de mesurer précisément l'abondance relative des différentes formes isotopiques de la molécule d'eau (H_2^{16}O , H_2^{18}O , HDO et H_2^{17}O) dans des échantillons de quelques millilitres de précipitations. Lors du transport d'humidité depuis les régions tempérées vers les régions polaires, le refroidissement impose la condensation de la vapeur d'eau, et génère donc un processus de « **distillation** » atmosphérique* qui se traduit par son appauvrissement progressif en isotopes plus lourds. Dès les années 1960, l'analyse isotopique d'échantillons de neige de surface prélevés lors de raids allant de la côte au centre de la calotte glaciaire au Groenland et en Antarctique, a permis d'établir quantitativement une relation empirique entre composition isotopique de la neige et température de surface.

Ce « thermomètre isotopique » a rapidement été utilisé pour évaluer les changements passés de température polaire, à partir de l'analyse de carottes de glace de plus en plus anciennes. Cependant, la relation entre composition isotopique des précipitations et température varie au cours du temps, du fait de changements des régions d'évaporation, de transport atmosphérique, de changements du profil vertical de température atmosphérique, de saisonnalité ou d'effets post-dépôt^(a). Ces biais sont abordés en étudiant les processus de fractionnements isotopiques actuels, et en confrontant les changements de composition isotopique des carottes de glace à différentes estimations des changements passés de température, issues d'autres méthodes.

Afin de mieux comprendre les processus de fractionnements isotopiques dans les régions polaires, nous bénéficions, depuis les années 2000, de méthodes de spectroscopie optique permettant la mesure continue, *in situ*, de la composition isotopique de la vapeur d'eau à quelques mètres au-dessus de la surface. Des mesures très récentes effectuées au Groenland montrent un signal piloté par la trajectoire des masses d'air et le processus de « distillation » atmosphérique, ainsi que par les échanges entre neige de surface et atmosphère. Cette nouvelle technologie optique permet également d'analyser en flux continu, sur place, la composition isotopique des carottes de glace, avec une précision qui se rapproche de celle de la spectrométrie de masse en laboratoire.

Une autre façon d'évaluer la validité et les limites du thermomètre isotopique est d'utiliser l'outil de modélisation. La modélisation de la composition en isotopes stables de l'eau était initialement effectuée à l'aide de modèles de « distillation » atmosphérique qui calculent l'évolution du rapport isotopique de la vapeur et de la précipitation à partir d'une source d'évaporation et d'une trajectoire uniques. Elle est à présent couramment intégrée dans les modèles numériques de la circulation générale de l'atmosphère, comme celui qui est développé au Laboratoire de météorologie dynamique, en France.

D'autres méthodes permettent aussi de mieux estimer les changements de température passés. D'abord, en restant dans le domaine des isotopes stables de l'eau, l'analyse conjointe des quatre isotopes permet d'accéder à des paramètres isotopiques de second ordre résultant de la combinaison de deux rapports isotopiques, comme l'excès en deutérium ou l'excès en oxygène 17. Les variations de ces paramètres de second ordre reflètent les fractionnements cinétiques qui se produisent lors de l'évaporation de l'eau, et qui dépendent de la température de surface de la mer et de l'humidité relative de surface. Ces mesures permettent alors de déterminer l'ampleur des changements passés des sources d'humidité, et de corriger les estimations de changements de températures passées effectuées classiquement avec un seul rapport isotopique.



Photographie d'une tranche fine d'une carotte de glace antarctique.

Ensuite, la diffusion de la chaleur depuis la surface des calottes polaires laisse une empreinte des variations climatiques passées dans le profil vertical de température à l'intérieur de la calotte. L'inversion de profils de températures mesurés très précisément le long des trous de forage permet donc d'estimer les variations lentes de température à l'échelle des dernières décennies, des derniers millénaires, et l'amplitude des **variations glaciaires-interglaciaires***.

Enfin, les variations du gradient de température dans le névé polaire, ainsi que les variations d'accumulation, affectent le piégeage de l'air à travers des processus de fractionnement gravitationnel (lié à l'épaisseur du névé) et thermique (lié à l'existence de gradients transitoires de température). Le rapport isotopique entre ^{15}N et ^{14}N de N_2 dans l'atmosphère étant constant à l'échelle du dernier million d'années, ses variations dans l'air piégé dans la glace dépendent uniquement des processus de fractionnement physique (thermique et gravitationnel) dans le névé, et notamment des changements passés de température. Cette méthode offre ainsi la possibilité de quantifier l'amplitude des changements rapides de température au Groenland.

Ces différentes méthodes ont montré que, pour le Groenland, la composition isotopique de la glace est un bon indicateur qualitatif des variations passées de température. Cependant, le « thermomètre isotopique » varie au cours du temps, essentiellement du fait de changements de la saisonnalité des précipitations^(b). Sur le plateau central antarctique, le « thermomètre isotopique » actuel est adéquat pour les climats plus froids, mais pourrait conduire à une sous-estimation de l'ampleur des réchauffements passés. Les informations climatiques ainsi extraites des carottes de glace sont confrontées aux simulations de climats passés, ce qui permet de tester le réalisme des modèles de climat et de comprendre les mécanismes des changements climatiques passés.

(a) Le dépôt du signal climatique ne se fait que lors des événements de précipitation, permettant au mieux d'enregistrer un signal de température pondéré par la distribution des précipitations. Des effets post-dépôt peuvent ensuite altérer ce signal initial, comme le mélange des couches de neige ou leur érosion par le vent, ou le métamorphisme de la neige de surface associé à une diffusion isotopique produite par une succession de processus de sublimation et recondensation. En effet, si le processus de sublimation n'est pas associé à un fractionnement isotopique, la condensation vapeur-solide va modifier fortement le signal isotopique de la neige.

(b) Au centre du Groenland, le dépôt de neige actuel s'effectue tout au long de l'année. Lors des périodes glaciaires, ces chutes de neige ont probablement lieu essentiellement en été. De ce fait, la composition isotopique de la neige est biaisée vers les températures estivales, ce qui modifie la relation entre composition isotopique et température moyenne annuelle.

>>>

oscillation nord-atlantique*. Les données issues des carottes de glace permettent de caractériser la variabilité de cette oscillation nord-atlantique au cours du dernier millénaire. Le réchauffement récent du Groenland, très marqué depuis les années 1990 (+1,5°C), sort de la gamme des variations de température reconstruites (voir encadré) pour le dernier millénaire. Il atteint le niveau des températures estimées d'il y a environ 4000 ans. Le lent refroidissement du Groenland au cours des derniers 8000 ans est dû à une baisse graduelle de l'ensoleillement d'été aux hautes latitudes nord, du fait des modifications lentes des paramètres orbitaux de la Terre. Le début de la période interglaciaire actuelle est marqué par un événement froid au Groenland, il y a 8200 ans. Les informations tirées d'autres archives du climat en domaine marin et continental, ainsi que les simulations climatiques montrent que cet événement est dû à une vidange brutale d'un lac recueillant l'eau de fonte de la calotte glaciaire nord-américaine, dont l'afflux a ponctuellement perturbé la circulation océanique de l'Atlantique Nord, ralentissant le transport de chaleur vers les hautes latitudes.

La variation récente du climat en Antarctique est également affectée par la variabilité de la circulation atmosphérique régionale, et particulièrement par le **mode annulaire*** austral. Des études de modélisation ont montré que cette circulation a probablement été modifiée, au cours des derniers 50 ans, par la diminution de l'ozone stratosphérique antarctique. En Antarctique de l'Ouest, les données issues des carottes de glace montrent un réchauffement au cours du 20^e siècle, cohérent avec les observations météorologiques de la péninsule Antarctique. En Antarctique de l'Est, la synthèse des données disponibles ne montre pas de tendance forte au cours du dernier millénaire. Il est indispensable de disposer de nouveaux forages pour mieux identifier la structure spatio-temporelle de la variabilité naturelle du climat périantarctique. Le signal le plus remarquable en Antarctique, au cours de la période interglaciaire actuelle, est un maximum isotopique il y a 12000 à 8000 ans (fig. 4). Cet événement peut être expliqué par des réorganisations des circulations océanique et atmosphérique régionales, à la fin de la dernière déglaciation.

Instabilités du climat glaciaire

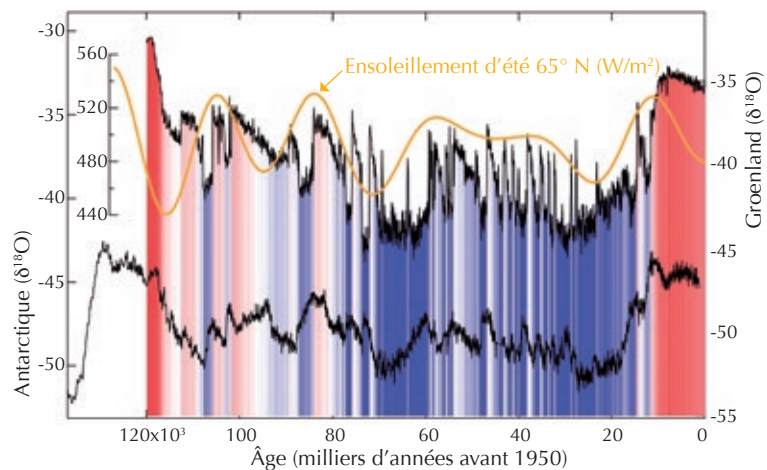
Lors de la dernière période glaciaire, entre il y a 115 000 et 11 700 ans, le climat du Groenland a été marqué par une succession d'instabilités rapides. Ces instabilités sont caractérisées par des réchauffements très rapides (8 à 16°C en quelques décennies), de brèves phases chaudes (appelées interstades), puis par un retour plus graduel à une phase froide et plus stable (appelée stade) (fig. 4). La signature de ces événements est détectée dans toutes les archives du climat de l'hémisphère Nord. Ils sont parfois associés à de larges débâcles d'icebergs en Atlantique Nord, identifiées dans les sédiments marins. Dans les tropiques, ils coïncident avec des déplacements de la zone de **convergence intertropicale*** associés à des changements contrastés de mousson entre hémisphère Nord et hémisphère Sud. Ainsi, les phases froides du Groenland correspondent à des moussons plus faibles en Asie du Sud-Est et, à l'inverse, des moussons plus intenses en Amérique du Sud.

Les modifications hydroclimatiques à la surface des continents entraînent des variations parallèles de la teneur en méthane et de la composition isotopique du dioxygène de l'atmosphère, ce qui permet la synchronisation précise, à

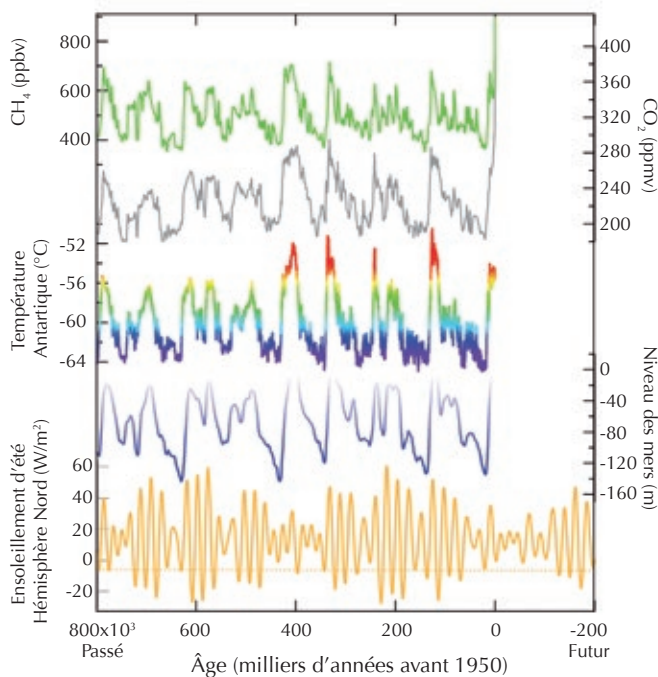
quelques siècles près des enregistrements du Groenland et de l'Antarctique. Ce cadre chronologique précis permet de comparer la séquence des événements entre climats du Groenland et de l'Antarctique. Ainsi, les phases froides (stades) du Groenland correspondent à des réchauffements dans l'hémisphère Sud. Ces réchauffements antarctiques graduels sont interrompus lors des réchauffements rapides du Groenland, puis cèdent la place à des refroidissements graduels autour de l'Antarctique. Cette structure de « bascule inter-hémisphérique » peut être expliquée par des modifications de la circulation méridienne de l'océan Atlantique, modulant le transport d'énergie inter-hémisphérique, et par l'inertie thermique de l'océan Austral, qui produit des changements de température de surface plus graduels dans ce secteur.

Si ces instabilités rapides du climat sont de mieux en mieux décrites, leur cause exacte reste incertaine. Certains travaux suggèrent qu'elles pourraient être intrinsèques à la circulation océanique en climat glaciaire. D'autres études mettent en évidence des interactions entre circulation océanique et dynamique des calottes de glace de l'hémisphère Nord. Souvent attribuées à la circulation océanique, ces instabilités mettent également en jeu des modifications

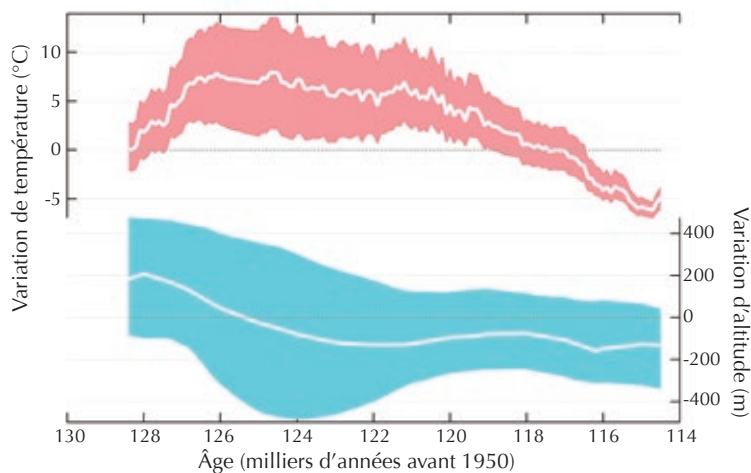
>>>



4. Comparaison de la variation de la composition isotopique en oxygène-18 enregistrée au Groenland (à NorthGRIP, courbe noire du haut) et en Antarctique (EPICA Dronning Maud Land, courbe noire du bas) sur une échelle de temps commune couvrant les derniers 125 000 ans, incluant la dernière période glaciaire. Les barres verticales en couleurs sont proportionnelles à la composition isotopique mesurée au Groenland (bleu : phases froides ; rouge : phases chaudes). Elles soulignent que les phases froides au Groenland coïncident avec les réchauffements en Antarctique, caractérisant une bascule inter-hémisphérique lors des instabilités glaciaires rapides (à l'échelle millénaire). Les changements de température sont beaucoup plus importants au Groenland (20°C depuis la dernière glaciation, jusqu'à 16°C pendant les réchauffements abrupts) qu'en Antarctique (8°C depuis la dernière glaciation, moins de 4°C à l'échelle millénaire). La courbe jaune indique les variations de l'ensoleillement d'été (en W/m²) à la latitude de 65° Nord, calculées à partir des variations périodiques des paramètres astronomiques de l'orbite terrestre.



5. 800 000 ans d'enregistrements climatiques extraits du forage EPICA Dôme C, en Antarctique, en fonction du temps (de gauche à droite, du passé vers le présent, en milliers d'années avant 1950). De haut en bas : évolution de la composition atmosphérique (vert, teneur atmosphérique en méthane, en parties par milliards en volume, ppbv ; gris, teneur atmosphérique en dioxyde de carbone, en parties par millions en volume, ppmv) et de la température antarctique (arc-en-ciel, estimée à partir de la composition isotopique de la glace). En bleu, changements de niveau des mers estimés à partir de l'analyse de sédiments marins. En jaune, changements d'ensoleillement (W/m^2) d'été à 65°N (proche du cercle polaire arctique) calculés à partir des variations lentes (passées et futures) des paramètres de l'orbite terrestre et reflétant les changements de précession (tous les 20 000 ans) et d'excentricité (tous les 100 000 et 400 000 ans). La ligne horizontale jaune en pointillé souligne le seuil à partir duquel les glaciations passées ont démarré.



6. Évolutions de la température et de l'altitude au nord-ouest du Groenland lors de la dernière période interglaciaire, déduites de l'analyse du nouveau forage NEEM. Pendant la dernière période interglaciaire, les estimations de température (à altitude fixe, en rose) indiquent un intervalle de réchauffement du Groenland, par rapport au climat préindustriel, entre 128 000 et 118 000 ans. Ce réchauffement est dû à une augmentation de l'ensoleillement local d'été, en réponse aux changements des paramètres orbitaux de la Terre. Il y a 128 000 ans, l'altitude de la calotte au site de NEEM (en bleu) était plus élevée qu'aujourd'hui d'environ 200 mètres. Cet épaissement est probablement dû à une augmentation de l'accumulation annuelle de neige. L'altitude à NEEM a ensuite régulièrement diminué jusqu'à atteindre 130 mètres de moins qu'aujourd'hui il y a 122 000 ans. Cet amincissement reflète une réduction du volume de la calotte du Groenland, en réponse à ce réchauffement de plusieurs millénaires.

>>>

rapides de l'extension de la glace de mer (banquise) aux deux pôles, ainsi que des réorganisations rapides de la circulation atmosphérique, depuis les régions tropicales jusqu'aux régions polaires. Le réseau de forages récemment effectués ou prévus (fig. 1) permettra de mieux caractériser la structure régionale de ces réorganisations.

Variabilité glaciaire-interglaciaire du climat

Au cours des derniers 800 000 ans, les enregistrements issus des glaces de l'Antarctique montrent une grande cohérence entre les températures locales, le niveau moyen des mers (reflétant l'englacement des continents de l'hémisphère Nord) et les teneurs atmosphériques en dioxyde de carbone et en méthane^(c) (fig. 5). Ces enregistrements révèlent également le caractère exceptionnel des perturbations de la composition atmosphérique en CH₄ et CO₂, liées aux activités humaines depuis la période industrielle (courbes verte et grise au voisinage du zéro sur l'axe des abscisses de la figure 5).

À cette échelle de temps, le moteur des variations climatiques réside dans la redistribution de l'énergie solaire incidente selon les saisons et les latitudes, du fait des variations des **paramètres orbitaux de la Terre***. Les mécanismes de réponse du climat à cette perturbation impliquent des rétroactions rapides (modulant la réponse du climat à l'échelle de l'année au siècle) ainsi que des rétroactions plus lentes faisant intervenir la **cryosphère*** et le cycle du carbone. En agissant sur l'**albédo*** et l'effet de serre, ces dernières rétroactions modifient en effet le bilan radiatif terrestre global^(d).

L'amélioration de la datation de l'air et de la glace des carottes de glace antarctiques a récemment permis de mieux préciser la séquence des événements lors de la dernière déglaciation, qui a démarré voici environ 19 000 ans. L'augmentation de la température en Antarctique et celle de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone se sont produites en phase, à quelques siècles près, et ont précédé le réchauffement du Groenland. Les variations glaciaires-interglaciaires de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone font intervenir un ensemble de processus, parmi lesquels les changements de circulation de l'océan Austral jouent un rôle déterminant pour stocker ou dégazer du dioxyde de carbone.

Les données issues des carottes de glace peuvent enfin apporter des contraintes précises sur l'évolution passée de la topographie des calottes polaires, en particulier sur leur vulnérabilité lors des périodes chaudes passées. Au cours de la dernière période interglaciaire, il y a 130 000 à 115 000 ans, les données issues de coraux fossiles montrent que le niveau moyen des mers était plus élevé d'environ 6 mètres par rapport au niveau actuel. Le nouveau forage NEEM fournit le premier enregistrement du climat de cette période au Groenland, et indique des variations modestes d'altitude au nord-ouest du Groenland (fig. 6). Les simulations d'écoulement de l'inlandsis compatibles avec les données de NEEM montrent que la calotte du Groenland a fourni une contribution de l'ordre de 1,4 à 4,3 mètres à la montée des mers de cette période. Ce résultat implique une déglaciation partielle de l'Antarctique, qui reste à ce jour très mal contrainte, et pourrait avoir contribué à produire un climat plus chaud. L'obtention de nouveaux forages en Antarctique, remontant à la dernière période interglaciaire, sera donc déterminante pour évaluer les modifications régionales de sa topographie.

Conclusion

De nombreuses questions restent ouvertes : pourquoi le « niveau moyen » est-il différent d'une période interglaciaire à une autre ? Quelles sont les relations entre variations climatiques « lentes » et instabilités rapides du climat ? L'acquisition de nouvelles données, la combinaison d'informations issues des carottes de glace et des autres archives du climat, ainsi que les hypothèses testées grâce à la modélisation du système climatique, sont autant d'outils pour répondre peu à peu à ces questions.

Enfin, l'obtention de carottes de glace plus anciennes en Antarctique sera certainement l'élément crucial pour comprendre pourquoi les cycles glaciaires-interglaciaires ont subi des réorganisations majeures il y a environ 1 200 000 ans, passant de périodes glaciaires peu intenses mais fréquentes, avec une périodicité de 41 000 ans, à des périodes glaciaires à la fois froides et plus longues (100 000 ans). Le défi d'identifier, extraire et exploiter des carottes de glace très anciennes en Antarctique mobilise la communauté scientifique internationale. ■

Glossaire

Albédo : coefficient sans unité, défini comme la fraction d'énergie solaire réfléchiée par une surface. Un miroir parfait aurait un albédo égal à 1. La neige fraîche a un albédo de 0,9, tandis que la surface de la mer a un albédo de 0,1. L'albédo moyen terrestre est de 0,30.

Cryosphère : composante du système climatique, qui englobe l'eau sous sa forme gelée à la surface terrestre. La cryosphère comporte donc le manteau neigeux, les glaciers, les calottes polaires, le pergélisol, ainsi que la glace de mer, de lac et de rivière.

« **Distillation** » **atmosphérique** : lors du transport des masses d'air depuis les régions sources d'humidité vers les régions polaires, le refroidissement graduel de la température entraîne des condensations successives. Lors de chaque épisode de condensation, la phase liquide ou solide formant les précipitations est enrichie en isotopes lourds par rapport à la vapeur d'eau résiduelle, qui est donc progressivement appauvrie en isotopes lourds. De ce fait, les précipitations formées successivement à partir de cette vapeur montrent également une composition isotopique de plus en plus appauvrie le long de la trajectoire des masses d'air.

Mode annulaire : structure hémisphérique de variabilité de la circulation atmosphérique, qui se traduit par des déplacements nord-sud de la masse de l'atmosphère entre les régions des moyennes latitudes et les régions polaires. Cela correspond à des déplacements nord-sud de la position des vents d'ouest. On identifie deux modes annulaires, l'un autour de l'Antarctique (austral) et l'autre autour de l'Arctique (boréal) ; ce dernier correspond à l'oscillation nord-atlantique. Ces modes annulaires fluctuent à l'échelle d'une dizaine de jours, et montrent aussi une variabilité interannuelle et décennale.

Oscillation nord-atlantique : variations de pression de surface de signe opposé entre l'Islande et les Açores. Elles correspondent à des fluctuations de l'intensité des vents d'ouest qui traversent l'océan Atlantique en direction de l'Europe ou du Groenland, qui affectent les trajectoires des passages dépressionnaires, et donc températures et précipitations. L'oscillation nord-atlantique est marquée par une forte variabilité interannuelle à décennale.

Paramètres orbitaux de la Terre : la répartition de l'ensoleillement intercepté par la Terre dépend de trois paramètres astronomiques. L'excentricité de l'orbite terrestre fluctue avec des périodicités autour de 100 000 et 400 000 ans. L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre, ou obliquité, fluctue tous les 41 000 ans environ. La précession climatique module la position des saisons sur l'orbite terrestre, et donc la répartition saisonnière de l'ensoleillement, avec une périodicité autour de 20 000 ans.

Variations glaciaires-interglaciaires : au cours des derniers millions d'années, le climat de la Terre est caractérisé par des variations importantes du volume des glaces continentales, minimum pendant des phases chaudes (appelées interglaciaires), d'une durée typique de 10 000 à 20 000 ans, et maximum pendant des phases froides (appelées glaciaires), d'une durée plus longue (typiquement, 80 000 ans au cours du dernier million d'années). Les périodes glaciaires sont marquées par un niveau des mers bas dû à la formation d'énormes calottes de glace en Amérique du Nord et au nord de l'Eurasie, un refroidissement global, une atmosphère plus sèche, ainsi qu'une diminution des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone (davantage stocké dans les océans) et en méthane (dont la production par les zones humides diminue en climat froid et sec). Le moteur des transitions glaciaires-interglaciaires tient aux changements des paramètres orbitaux de la Terre, dont les effets dépendent du volume des glaces et des teneurs en gaz à effet de serre. Les modifications de la surface englacée et du cycle du carbone, à travers l'impact de leur albédo et de leur effet de serre, jouent un rôle déterminant dans l'ampleur des variations climatiques glaciaires-interglaciaires.

Zone de convergence intertropicale : zone de basses pressions de surface et de forte couverture nuageuse, s'étendant sur quelques centaines de kilomètres de latitude, qui entoure la Terre près de l'équateur. Elle provient de la convergence de transport d'air chaud et humide en surface, donnant lieu à des mouvements convectifs et des précipitations intenses.

En savoir plus

- C. Jeandel et R. Mosseri, *Le Climat à découvert*, CNRS éditions (2011).
- J. Jouzel, C. Lorius et D. Raynaud, *Planète blanche : les glaces, le climat et l'environnement*, Odile Jacob (2008).
- D. Hauglustaine, J. Jouzel et V. Masson-Delmotte, *Atmosphère, atmosphère*, Éditions Le Pommier, Paris (2008).
- J.R. Petit, *Vostok, le dernier secret de l'Antarctique*, Éditions Paulsen, Paris (2013).
- D. Walton, *Antarctica, Global Science from a Frozen Continent*, Cambridge University Press (2013).
- Site du projet de forage NEEM (carnets de terrain, étapes du projet...) : www.neem.dk.
- Site de PAGES (Past Global Changes)/IPICS (International Partnership for Ice Core Science) : www.pages-igbp.org/ipics.
- Site de l'Institut polaire français Paul-Émile Victor : www.ipev.fr.

(c) Ces analyses ont été réalisées, en particulier, au Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement (LGGE), à Saint-Martin d'Hères.

(d) À partir de synthèses globales de température de surface, utilisant un ensemble d'archives du climat, il est possible d'estimer la sensibilité du climat, c'est-à-dire la réponse de la température de surface à une perturbation radiative donnée, qui résulte des rétroactions rapides (vapeur d'eau, nuages, glace de mer, océan de surface...).

La recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques

Sylvie Hébert (sylvie.hebert@ensicaen.fr)

Laboratoire CRISMAT, UMR 6508 CNRS et ENSICAEN, 6 Bd du Maréchal Juin, 14050 Caen Cedex

Les effets thermoélectriques permettent de transformer une différence de température ΔT en une différence de potentiel électrique ΔV via l'effet Seebeck, ou ΔV en ΔT via l'effet Peltier. Ces deux effets sont de bonnes sondes de la structure électronique des matériaux, et peuvent également être utilisés pour transformer la chaleur perdue en électricité (mode Seebeck) ou pour fabriquer des refroidisseurs (mode Peltier).

Limitée pour le moment à des secteurs très spécialisés comme le spatial, la thermoélectricité connaît un regain d'intérêt depuis les années 1990 – 2000, suite à différentes propositions visant à améliorer les performances des matériaux thermoélectriques.

Remerciements

Je souhaite remercier mes collègues du laboratoire CRISMAT qui contribuent à l'étude de ces matériaux thermoélectriques (oxydes, sulfures et séléniures), ainsi que Jiri Hejtmanek (Institute of Physics, Prague), Véronique Brouet, Julien Bobroff et Philippe Mendels (LPS Orsay), et Patrice Limelette (GREMAN Tours) pour leur collaboration sur ce sujet.

Les effets thermoélectriques ont été découverts au cours du 19^e siècle. Les deux plus « célèbres » sont l'effet Seebeck et l'effet Peltier (encadré 1), mais il existe de nombreux autres effets thermoélectriques, associés à l'application simultanée d'un champ magnétique ou d'un courant électrique, tels l'effet Nernst, l'effet Thomson ou l'effet Ettinghausen [1]. Ces différents effets thermoélectriques sont très étudiés en physique de la matière condensée, car ce sont des propriétés de transport extrêmement sensibles à la structure électronique du matériau (encadré 2). Ils constituent de bonnes sondes d'étude des porteurs, de leur densité d'états et de leurs différents mécanismes de diffusion (diffusion des charges sur le réseau atomique *via* les phonons, diffusion par les *spins*, diffusion entre charges...).

La conversion $\Delta T \rightarrow \Delta V$ *via* l'effet Seebeck ou $\Delta V \rightarrow \Delta T$ *via* l'effet Peltier permet de plus d'envisager des applications de ces matériaux dans les domaines de la production d'électricité ou de la réfrigération. L'efficacité d'un module thermoélectrique pour ces applications est rappelée dans l'encadré 3, où est défini le « facteur de mérite » ZT . Elle est comparée au rendement de Carnot (rendement idéal d'un dispositif thermodynamique fonctionnant entre une température chaude T_c et une température froide T_f et défini comme $(T_c - T_f) / T_c$). Pour des modules Seebeck, le rendement maximal peut atteindre 10 % du rendement de Carnot pour $\Delta T = 700$ K, avec $T_f = 300$ K et $ZT = 1$ (18% si $ZT = 2$).

À l'heure actuelle, les modules thermoélectriques sont employés dans des domaines de niche, tels que l'espace ou les zones éloignées des circuits classiques de distribution électrique (en montagne, pour des systèmes de communication sur des pipelines...). Ces générateurs sont très utilisés dans les applications spatiales, en particulier ceux à base de PbTe ou de SiGe embarqués dès 1961 par la NASA,

ou plus récemment pour la mission Curiosity vers Mars. Dans ce domaine, la technologie thermoélectrique a montré toute son efficacité, puisque des thermogénérateurs fonctionnent depuis 30 ans, avec de faibles pertes de puissance, par exemple dans les sondes Voyager. De plus, un intérêt de cette technique est que les modules ne sont soumis à aucun mouvement mécanique et n'utilisent pas de fluide (contrairement à la réfrigération classique), rendant cette technologie très fiable et robuste. Une autre application à grande échelle est la climatisation de sièges de voitures aux États-Unis et au Canada par refroidisseurs Peltier : seuls les sièges utilisés sont actifs, ce qui évite de climatiser tout l'habitacle du véhicule.

Toute chaleur perdue est aussi potentiellement une source d'électricité grâce à des thermogénérateurs Seebeck, dont l'utilisation paraît très attractive comme nouvelle source d'énergie « propre ». La thermoélectricité a connu un regain d'intérêt depuis une quinzaine d'années, et de nombreux projets sont en cours d'étude. Ainsi, il est possible d'équiper des cuisinières, des chauffe-eaux ou des lampes de thermogénérateurs, servant ensuite à alimenter de façon autonome de petits équipements électriques. Le corps humain et les gradients thermiques à sa surface peuvent également servir à alimenter des capteurs de surveillance médicale. En Europe et aux États-Unis, différents projets existent dans le domaine automobile pour recycler la chaleur en sortie du pot d'échappement. Dans le domaine de la microélectronique, la dissipation thermique des composants est le paramètre essentiel qui limite l'amélioration des performances, et des composants à effet Peltier pourraient être utilisés dans la gestion de la chaleur perdue.

L'efficacité d'un matériau (et donc d'un module) dépend de son facteur de mérite ZT . Les trois grandeurs définissant ZT

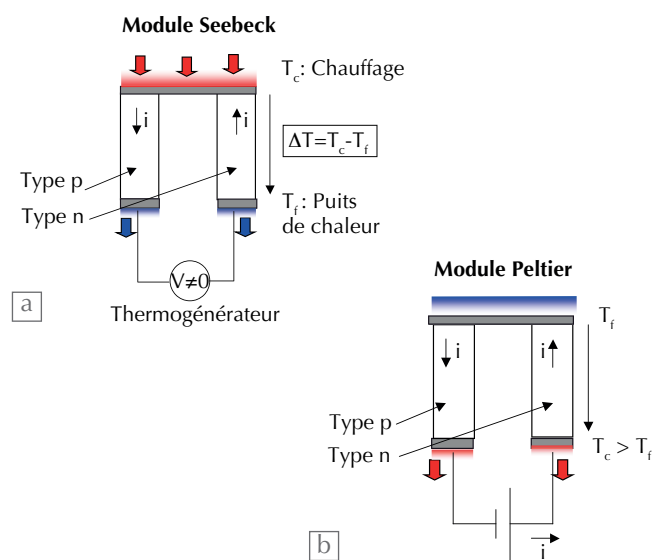


► Effet Seebeck et effet Peltier

encadré 1

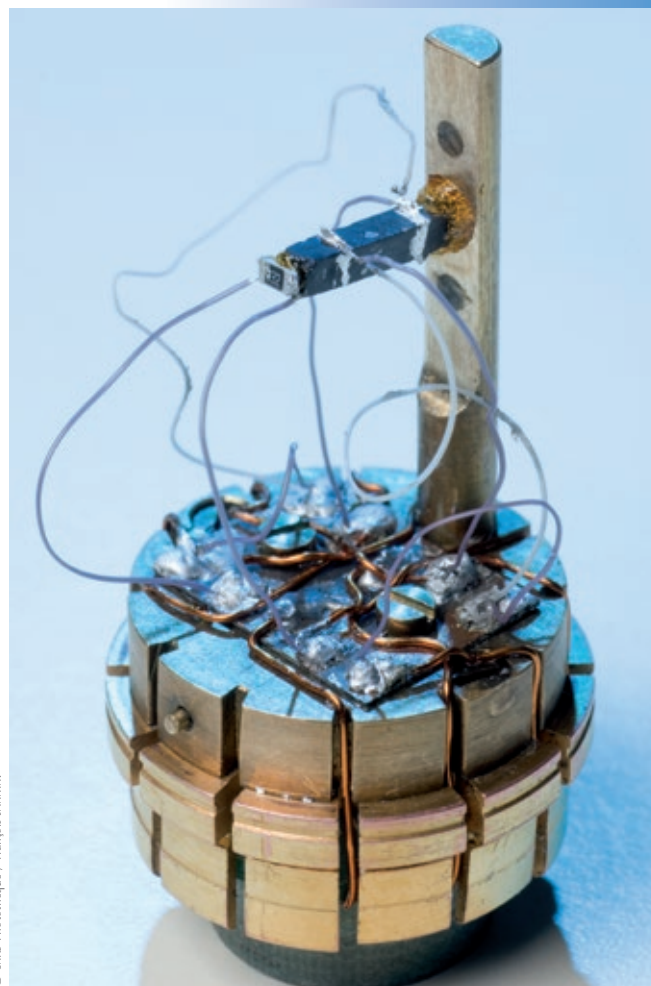
Lorsque les deux bornes d'un matériau sont soumises à une différence de température ΔT , une différence de potentiel électrique ΔV y apparaît : c'est l'effet Seebeck, découvert en 1823 par Thomas Johann Seebeck. Le coefficient Seebeck est défini à une température T par $S = \Delta V / \Delta T$, dans la limite $\Delta T \rightarrow 0$. Inversement, lorsqu'un matériau est soumis à une différence de potentiel ΔV , une différence de température ΔT apparaît à ses bornes, via l'effet Peltier, découvert en 1834 par Jean-Charles Athanase Peltier. Ces deux effets peuvent être utilisés pour fabriquer des thermogénérateurs qui vont générer une tension électrique à partir de la chaleur perdue (mode Seebeck, fig. E1a), ou inversement refroidir des matériaux ou des composants électroniques (mode Peltier, fig. E1b).

Les effets thermoélectriques sont décrits par la thermodynamique des processus irréversibles. Une description très simplifiée est que lorsqu'un matériau est soumis à une différence de température ΔT , les porteurs de charge du côté chaud se déplacent vers le côté froid pour revenir vers un état d'équilibre, créant un courant de diffusion. Pour un matériau en circuit ouvert, ce courant est nul ; il y a donc création d'une tension ΔV , s'opposant à l'établissement de ce déplacement, tension à l'origine du coefficient Seebeck.



E1. (a) **Module thermoélectrique en mode Seebeck.** On impose une différence de température ΔT aux bornes de deux matériaux dopés p et n, ce qui induit une différence de potentiel ΔV permettant de générer un courant i dans le circuit extérieur branché aux bornes du thermogénérateur.

(b) **Module thermoélectrique en mode Peltier.** Un courant électrique i traverse le module, permettant d'induire un refroidissement du côté de la source froide T_f .



© CNRS Photothèque / François JANNIN.

Porte-échantillon utilisé au CRISMAT pour des mesures de thermoélectricité sur une céramique.

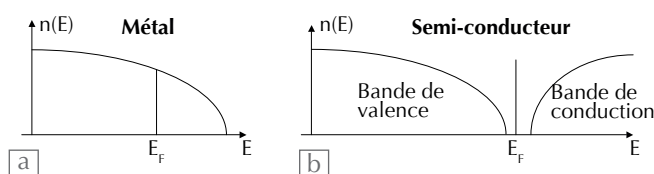
► Effet Seebeck et structure électronique

encadré 2

Dans un solide, les porteurs de charge (trous ou électrons) peuvent être décrits par leur densité d'états $n(E)$, qui définit le nombre de particules (par unité d'énergie) possédant une énergie E . E_F , l'énergie de Fermi, est l'énergie maximale des particules. Les densités d'état $n(E)$ caractéristiques d'un métal et d'un semi-conducteur sont schématisées sur la figure E2. On peut montrer que le coefficient Seebeck d'un métal, dans un modèle semi-classique, est donné par la formule de Mott :

$$S = -\frac{\pi^2 k_B^2}{3e} T \left(\frac{\partial \ln \sigma(E)}{\partial E} \right)_{E=E_F}$$

avec T la température et $\sigma(E) = en(E)\mu(E)$ la conductivité électrique (e est la charge des porteurs et $\mu(E)$ leur mobilité). S est donc très sensible aux porteurs dont l'énergie est proche de E_F . Sa valeur et son signe dépendent directement de leur mobilité, de leur nature (trous ou électrons, selon le remplissage des bandes) et de la densité d'états. Il sera maximal si $n(E)$ présente une pente élevée $dn(E)/dE$.



E2. **Densité d'états électroniques $n(E)$ en fonction de l'énergie E pour un métal (a) et pour un semi-conducteur (b).** E_F est l'énergie de Fermi. Dans le cas (a), le coefficient Seebeck dépend de la dérivée $(dn(E)/dE)_{E=E_F}$. En thermoélectricité, les meilleurs matériaux présentent une énergie de Fermi proche des bords de bande de conduction ou de valence (semi-conducteurs dégénérés ou semi-métaux).

► Le facteur de mérite ZT

encadré 3

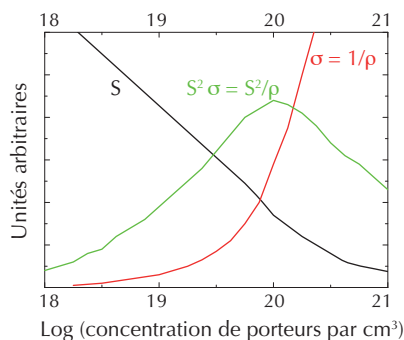
Un module thermoélectrique est constitué de nombreux couples de matériaux (tels que ceux représentés dans les figures de l'encadré 1), l'un dopé en électrons et l'autre en trous, et associés en série électriquement, et en parallèle thermiquement. Pour chaque matériau inclus dans le module, on définit un « facteur de mérite » : la quantité sans dimension $ZT = S^2 T / (\rho \kappa)$, avec S le coefficient Seebeck, ρ la résistivité électrique et κ la conductivité thermique. Le facteur ZT caractérise l'efficacité du matériau, et le critère $ZT \geq 1$ est généralement retenu pour des applications.

L'efficacité η du module dépend des propriétés thermoélectriques des matériaux dont il est constitué, ainsi que de la différence de température $\Delta T = T_c - T_f$ auquel il est soumis, *via* la formule :

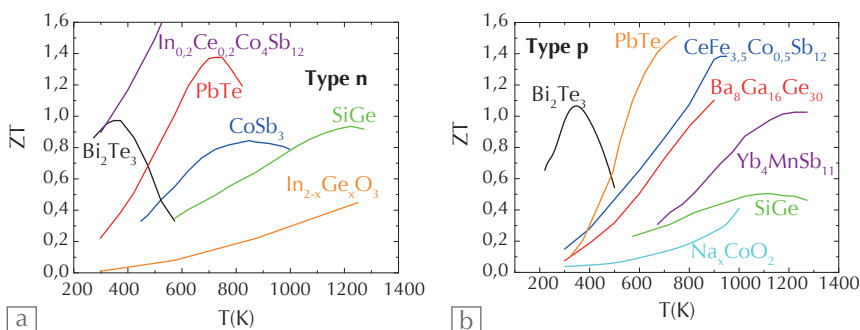
$$\eta_{\max} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + (T_c / T_f)}$$

où T_m est la température moyenne et ZT_m est proche du facteur de mérite moyen des matériaux. Cette efficacité peut se trouver fortement réduite en cas de mauvais contacts électriques ou thermiques, qui limitent l'établissement des gradients thermiques ou qui génèrent de la dissipation par effet Joule.

Les trois grandeurs S , ρ et κ sont liées *via* la concentration de porteurs (fig. E3), et il faut trouver un compromis entre elles pour maximiser ZT . Dans un métal, ρ est très faible, mais S est typiquement de quelques $\mu\text{V/K}$, rendant la grandeur S^2/ρ (appelée « facteur de puissance ») très faible. Inversement, dans un semi-conducteur ou un isolant, S est très élevé (quelques mV/K), mais la très forte valeur de ρ rend aussi le rapport S^2/ρ quasiment nul. Généralement, il existe un taux de porteurs optimal ($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) où le terme S^2/ρ est maximal (fig. E3) : il s'agit de matériaux présentant un comportement de type « semi-conducteur dégénéré » ou « semi-métal ». La figure E4 présente les valeurs de ZT des meilleurs matériaux, dopés aux électrons (S négatif) ou aux trous (S positif).



E3. Évolution du coefficient Seebeck S , de la conductivité électronique $\sigma (= 1/\rho)$ et du facteur de puissance S^2/ρ en fonction de la concentration de porteurs.



E4. Variation en fonction de la température du facteur de mérite ZT pour quelques-uns des meilleurs matériaux thermoélectriques, dopés aux électrons (a) et aux trous (b). (D'après C. Godart, « Matériaux à effets thermoélectriques », Dossier des Techniques de l'Ingénieur (juin 2009) et J. Snyder, www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/index.html.)

>>>

sont très fortement liées entre elles *via* la concentration de porteurs, et varient de façon contraire (encadré 3). Il existe classiquement une plage de dopage de $\sim 10^{19} - 10^{21}$ porteurs par cm^3 pour optimiser ZT , et la recherche de matériaux thermoélectriques s'est longtemps focalisée sur des semi-conducteurs fortement dopés ou des semi-métaux, tels que SiGe (pour des applications spatiales avec $T_c \sim 1000^\circ\text{C}$) ou Bi_2Te_3 (pour des applications à température ambiante).

Ces matériaux « classiques » de la thermoélectricité présentent des valeurs de ZT proches de 1, mais leur utilisation peut être relativement contraignante et restreinte : problèmes d'oxydation pour SiGe, rareté du tellure qui empêche d'envisager l'utilisation de Bi_2Te_3 pour des applications à grande échelle... Il est donc nécessaire de poursuivre la recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques afin d'augmenter ZT , et de trouver des matériaux facilement utilisables à l'air, constitués d'éléments abondants et non toxiques. Cette recherche a connu un fort regain d'intérêt depuis le début des années 1990, suite à différentes propositions décrites dans cet article.

Comment optimiser le facteur de mérite ZT ?

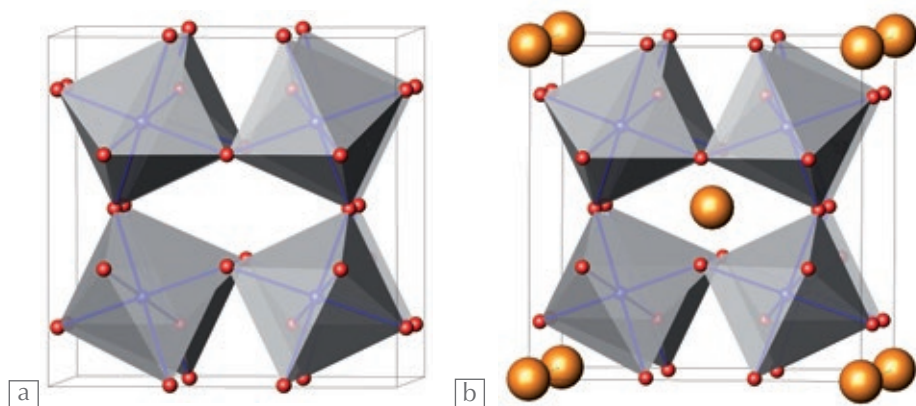
Les effets thermoélectriques combinent des effets électriques et thermiques et, pour améliorer les performances thermoélectriques, il faut optimiser ces deux effets indépendamment, en minimisant la conductivité thermique κ et en maximisant le facteur de puissance S^2/ρ .

1 - Réduction de la conductivité thermique

La conductivité thermique est la somme de deux termes (conduction par les électrons/trous et conduction par les modes de vibration des atomes, les phonons) :

$$\kappa = \kappa_{\text{électronique}} + \kappa_{\text{phonons}}$$

Le terme $\kappa_{\text{électronique}}$ étant inversement proportionnel à ρ (qui doit rester faible), le seul moyen de diminuer κ est donc de diminuer κ_{phonons} . L'approche dite du « verre de phonons / cristal d'électrons » a été proposée par Glen Slack en 1995 [2]. Il s'agissait de réduire κ_{phonons} sans augmenter $\kappa_{\text{électronique}}$, en introduisant dans différentes familles de « matériaux à cages » des atomes lourds. Ces derniers modifient les modes de vibration des atomes dans la structure cristallographique, réduisant la



1. Structure cristallographique de (a) la skutterudite CoSb_3 , et (b) la skutterudite remplie $\text{ACo}_4\text{Sb}_{12}$ avec, en rouge l'antimoine, en bleu l'élément de transition (Co, Fe), et en jaune l'atome lourd (A = Pr, Ce, La...).

propagation des phonons et donc κ_{phonons} . L'une des plus célèbres structures « à cages » est celle des skutterudites, matériaux de formule générique MSb_3 avec $\text{M} = \text{Co}$ ou Fe , dans lesquels un atome lourd A est introduit ($\text{AM}_4\text{Sb}_{12}$) (fig. 1). Il a ainsi été montré, dès 1995, que l'insertion du cérium dans FeSb_3 entraîne une forte réduction de κ à 300 K, d'environ $10 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour FeSb_3 à $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ dans $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ [3]. La valeur de ZT, initialement proche de 0,2 dans CoSb_3 , peut atteindre 1,2 – 1,4 à 1000 K dans les skutterudites « remplies » (fig. E4b). Il faut noter que même si la conductivité thermique est réduite d'un facteur 10, ZT n'est pas multiplié par 10, car l'insertion d'un atome lourd, outre son effet sur les phonons, peut aussi modifier S et ρ , via un effet de dopage. Le choix de l'élément d'insertion doit donc prendre en compte tant l'aspect thermique que l'aspect électrique.

Le phénomène de réduction de κ est observé dans d'autres familles prometteuses de composés à cages, comme les clathrates à base de germanium ou de silicium. Des conductivités thermiques extrêmement faibles ont été rapportées, en particulier pour $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$ ($\kappa \sim 0,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 100 K). Ces valeurs et la dépendance en température de $\kappa(T)$ sont très proches de celles obtenues pour des verres [4]. Dans tous ces matériaux, l'effet de réduction de κ est clairement observé, et les études en cours visent à optimiser le choix et la concentration de l'atome lourd. L'apport de la diffusion inélastique de neutrons est primordial, afin de mieux comprendre comment les modes de phonons sont affectés [5].

Dans cette recherche de « verres de phonons / cristal d'électrons », une autre approche peut être utilisée. À partir d'un bon matériau thermoélectrique comme Bi_2Te_3 , il est possible, en modifiant la microstructure (insertion d'inclusions micrométriques, par exemple), de réduire κ sans affecter ρ , si le libre parcours moyen des électrons est plus faible que celui des phonons. En jouant sur les inclusions et sur des effets de joints de grain, de fortes réductions de κ ont été obtenues, conduisant à un ZT record de 2,2 à 900 K dans PbTe [6]. À une échelle encore plus petite, la réalisation de nanostructures telles que des super-réseaux (empilements de différentes couches d'épaisseur nanométrique) ou des nanofils est également explorée. L'un des grands défis du domaine est la mesure des propriétés thermoélectriques dans ce type de nanostructure ; des techniques spécifiques ont été développées, telle que la thermoréflexance, pour sonder la conductivité thermique et les effets d'interfaces dans les super-réseaux [7].

2 – Augmentation du facteur de puissance

Historiquement, il a été proposé dès 1993 que la nanostructuration de matériaux thermoélectriques allait permettre de fortement augmenter la valeur de ZT, en jouant sur le facteur de puissance. En effet, la nanostructuration peut en théorie induire des densités d'états $n(E)$ présentant des pics, associées à une forte augmentation de S, via la formule de Mott (encadré 2) [8]. Cette idée a été testée dans de nombreux matériaux synthétisés sous forme de super-réseaux ou de nanofils. Une augmentation de S a effectivement été observée dans des

nanofils de bismuth : S est multiplié par 1000 en passant du Bi « volumique » à des nanofils d'un diamètre de 9 nm [9]. Cependant, dans la plupart des cas, l'augmentation de ZT vient principalement de la réduction de la conductivité thermique décrite dans le paragraphe précédent, alors que l'effet sur le facteur de puissance S^2/ρ n'est pas aussi clairement établi.

Une autre piste pour augmenter S est d'utiliser des matériaux à fortes corrélations électroniques. Parmi ceux-ci, les oxydes n'étaient traditionnellement pas étudiés en thermoélectricité, leur résistivité étant trop élevée. En 1997, il a cependant été montré qu'un coefficient Seebeck élevé ($\sim 100 \mu\text{V/K}$) était obtenu dans un oxyde relativement métallique, Na_xCoO_2 ($x \sim 0,7$) [10], alors que le facteur S^2/ρ à 300 K était équivalent à celui de Bi_2Te_3 . Comme, de plus, κ est faible, cet oxyde a été classé dans la catégorie « verre de phonons / cristal d'électrons ». Ce résultat a entraîné une forte activité dans la recherche de nouveaux oxydes thermoélectriques : en effet, ils peuvent être utilisés à haute température, sous air pour la plupart d'entre eux, et peuvent être constitués d'éléments abondants et non toxiques.

Dans ces matériaux, la bande de conduction est relativement étroite, et les modèles utilisés pour les matériaux thermoélectriques classiques ne s'appliquent pas. Une forte augmentation de la pente dS/dT , résultant des corrélations électroniques, peut être observée à basse température [11]. De plus, pour ces oxydes, il est possible d'évaluer la limite du coefficient Seebeck S à haute température via la formule de Heikes (encadré 4), dans laquelle S est une mesure de l'entropie associée à chaque porteur. Le métal de transition (fer, cobalt, manganèse...) est source d'entropie via son *spin* et son remplissage des orbitales, entropie qui contribue à augmenter S [12]. La résistivité des oxydes restant souvent trop élevée, des sulfures, sélénures ou oxysélénures, plus covalents, sont actuellement étudiés afin de réduire ρ , en essayant de conserver des corrélations relativement fortes.

Il faut noter que dans ces oxydes, le taux de porteurs est plus élevé que pour les matériaux thermoélectriques classiques ($\sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$), ce qui montre que leurs propriétés sont souvent très différentes de celles décrites par la formule de Mott, et que ces oxydes nécessitent des modèles spécifiques, toujours en cours de développement [13].

»»»

Conclusion

La thermoélectricité connaît actuellement un fort regain d'intérêt comme éventuelle source d'« énergie propre », les sources de chaleur perdue étant abondantes ; mais les applications à grande échelle ne seront réalisables que *via* l'optimisation des matériaux et des modules. Cette recherche de nouveaux matériaux nécessite un travail très interdisciplinaire, alliant chimistes, physiciens, thermiciens... et a déjà permis une forte augmentation des performances, puisque des valeurs de ZT proches de 1,9 à 2,2 ont été rapportées. Ces exemples montrent qu'il est intéressant d'aller au-delà de la physique classique des semi-conducteurs, et qu'une compréhension plus microscopique des phénomènes est à présent envisageable grâce aux progrès des techniques expérimentales (techniques de synthèse pour modifier la micro- ou la nanostructure, étude de la structure de bandes par photoémission, mesure du spectre de phonons par diffusion de neutrons...) et aux développements théoriques récents (développement de la formule de Kelvin, amélioration des calculs de structure de bandes...).

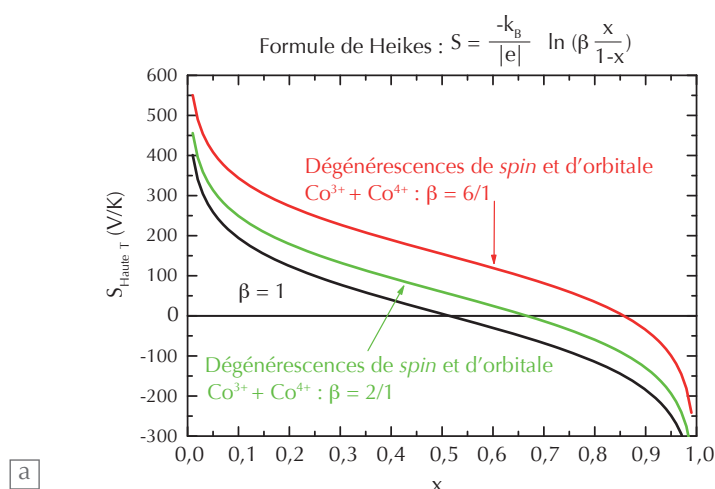
Références

- 1• *Thermoelectrics Handbook : macro to nano*, édité par D.M. Rowe, CRC Press, Taylor and Francis (2006) ; B. Lenoir *et al.*, « Thermoélectricité : des principes aux applications », dossier des Techniques de l'Ingénieur (mai 2010) ; C. Goupil *et al.*, « Thermoélectricité - Thermodynamique et applications », dossier des Techniques de l'Ingénieur (avril 2013).
- 2• Glen A. Slack, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, chapitre 34, édité par D.M. Rowe, CRC Press (1995).
- 3• D. Morelli et G. P. Meisner, *J. Appl. Phys.* **77** (1995) 3777.
- 4• M.A. Avila *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008) 041901.
- 5• M.M. Koza *et al.*, *Phys. Rev. B* **84** (2011) 014306.
- 6• K. Biswas *et al.*, *Nature* **489** (2012) 414.
- 7• M. M. Rojo *et al.*, *J. Appl. Phys.* **113** (2013) 054308.
- 8• L.D. Hicks et M.S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* **47** (1993) 12727.
- 9• J.P. Heremans *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 216801.
- 10• I. Terasaki *et al.*, *Phys. Rev. B* **56** (1997) R12685.
- 11• K. Behnia, D. Jaccard et J. Flouquet, *J. Phys.: Condens. Matter* **16** (2004) 5187.
- 12• S. Hébert *et al.*, *Phys. Status Solidi A* **210** (2013) 67.
- 13• L-F. Arsenault *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 086401.

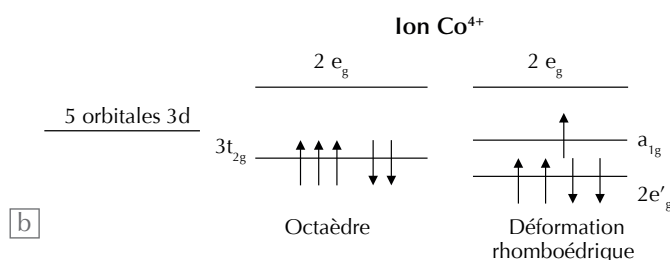
► Pouvoir thermoélectrique des oxydes de métaux de transition : la formule de Heikes

encadré 4

Pour des matériaux possédant des bandes de conduction très étroites (tels ceux à fortes corrélations électroniques), les approches semi-classiques ne sont plus valables et des modèles spécifiques ont été développés. On peut montrer qu'à haute température, le coefficient Seebeck S est directement une mesure de l'entropie par charge dans le système ; pour maximiser S , il faut alors maximiser cette entropie. L'intérêt des oxydes est que les métaux de transition tels que le cobalt, le fer, le manganèse... peuvent générer de l'entropie *via* leurs *spins* et leur dégénérescence orbitale. Le coefficient Seebeck peut être bien décrit à haute température par la formule de Heikes, qui dépend des dégénérescences de *spin* et d'orbitale des ions de métaux de transition. Un exemple est montré dans la figure E5 : dans le cas d'un oxyde à valence mixte $\text{Co}^{3+} / \text{Co}^{4+}$, au terme lié au taux de porteurs (courbe noire, $\beta = 1$) s'ajoute le terme de dégénérescence de *spin* et d'orbitale (courbes rouge ou verte). La validité de la formule de Heikes est théoriquement restreinte aux hautes températures, mais un développement plus rigoureux (formule de Kelvin) montre qu'elle représente une bonne approximation de S dans une large gamme de températures.



a



b

E5. (a) Coefficient Seebeck S à haute température T , en fonction du taux x d'ions Co^{4+} , calculé par la formule de Heikes pour des oxydes de cobalt présentant une valence mixte $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{4+}$, et (b) les dégénérescences de *spin* et d'orbitales associées.

Pour un ion cobalt en environnement octaédrique, les cinq orbitales 3d sont séparées en deux orbitales e_g et trois orbitales t_{2g} . Une déformation des octaèdres lève la dégénérescence des orbitales t_{2g} en deux niveaux e'_g et un niveau a_{1g} . Pour l'ion Co^{3+} ($3d^6$), il n'y a pas de dégénérescence, les trois orbitales t_{2g} sont occupées. Pour l'ion Co^{4+} ($3d^5$), la dégénérescence est de 6 si les trois orbitales t_{2g} sont dégénérées (un trou sur trois orbitales, avec *spin* ↑ ou *spin* ↓), et de 2 s'il y a levée de dégénérescence (un trou sur l'orbitale a_{1g} , avec *spin* ↑ ou *spin* ↓). Donc, $\beta = \text{dégénérescence}(\text{Co}^{4+}) / \text{dégénérescence}(\text{Co}^{3+}) = 6/1$ (sans déformation) ou $2/1$ (avec déformation). $S_{\text{haute } T}(x)$ est alors donné par les courbes rouge et verte de la figure (a).

► Pour en savoir plus

Cours d'Antoine Georges au Collège de France, printemps 2013
www.college-de-france.fr/site/antoine-georges/course-2012-2013.htm

Les acteurs français de l'évolution de la place des femmes en physique

Extrait traduit du poster présenté par Véronique Pierron-Bohnes à la 5th IUPAP International Conference on Women in Physics en août 2014

En France, plusieurs entités travaillent pour améliorer la place des femmes en physique.

► 4 associations indépendantes

	Commission "Femmes et Physique" de la SFP ✉ vero@unistra.fr sfp-femmes@sfp.net	La commission F&Φ (www.sfpnet.fr/commission/femmes-et-physique) de la Société Française de Physique (SFP) est composée de 20 membres actifs environ (dont 2 hommes), de différentes villes universitaires. Nous suscitons la réflexion sur la place des femmes en physique, en organisant des colloques aux conférences de la SFP. Ces colloques sont une occasion pour les physiciennes de s'exprimer et de se rencontrer. Nous tentons aussi d'influencer les décisions des institutions, ainsi que le ressenti des jeunes filles et de leurs parents à propos de la physique, par des conférences, des expositions et une meilleure visibilité des physiciennes.
	WiN France (Women in Nuclear) ✉ vpontier@assystem.com win@sfn.org	L'organisation WiN France (www.win-france.fr/), membre de la Société Française de l'Énergie Nucléaire (SFEN), est un réseau qui regroupe des femmes (550 membres) travaillant dans tous les domaines d'application des sciences et techniques nucléaires. Elle fait partie des réseaux internationaux WiN Europe et WiN Global, représentés dans 100 pays. Ses objectifs principaux sont de promouvoir les carrières et les professions nucléaires, de démontrer leur accessibilité aux femmes, et de contribuer au développement de la diversité et de l'égalité des chances dans les professions nucléaires.
	Association "Femmes & Sciences" ✉ sylvaine.turck-chieze@cea.fr	L'association Femmes & Sciences (www.femmesetsciences.fr) est multidisciplinaire. Ses objectifs sont les suivants : améliorer la position des femmes en science et en technologie, dans les secteurs public et privé ; promouvoir une image positive de la science et des femmes en science ; encourager les jeunes, et en particulier les femmes, à faire des études en science ou en technologie et à poursuivre des carrières dans ces disciplines. F&S est membre de l'European Platform of Women Scientists (www.epws.org/).
	Association "Femmes Ingénieurs" ✉ femmes_ingenieurs@yahoo.com	Association loi de 1901, Femmes Ingénieurs (www.femmes-ingenieurs.org/) possède une double mission : 1. Promouvoir les métiers d'ingénieurs auprès des jeunes filles dans le monde de l'éducation et de l'enseignement supérieur. 2. Promouvoir la place de la femme ingénieur dans le monde du travail et dans les conseils d'administration. Ses membres sont des personnes morales et des personnes physiques ingénieur-e-s et diplômé-e-s de l'enseignement supérieur, exerçant une activité de cadre dans tous les secteurs d'activité du privé et du public, à des postes fonctionnels, stratégiques ou opérationnels.

► 3 unités dédiées ou réseaux en relation avec la gestion des ressources humaines des institutions de recherche

	La Mission pour la Place des Femmes au CNRS ✉ anne.pepin@cnrs-dir.fr	Placée auprès de la Présidence, la Mission pour la place des femmes au CNRS (8 personnes à plein temps) est chargée d'impulser, de conseiller et d'évaluer la prise en compte du genre dans la politique globale de l'établissement (www.cnrs.fr/mpdf/spip.php?article15). Son action s'articule selon trois axes principaux : agir pour l'égalité professionnelle au sein du CNRS ; valoriser les carrières scientifiques et techniques auprès des jeunes, notamment les filles ; développer les partenariats européens et internationaux. Un plan d'action pluriannuel pour l'égalité professionnelle a été récemment adopté (www.cnrs.fr/mpdf/spip.php?article651).
	PDF (Parité, Diversité & Femmes) au CEA ✉ anne-marie.joncquiere@cea.fr reseau_pdf@cea.fr	Le réseau PDF a été créé en 2008. Il est composé d'une centaine d'hommes et de femmes du CEA, partageant le même souhait de faire évoluer la place des femmes et leur contribution à l'efficacité de l'organisme. Le groupe s'attache à valoriser les talents féminins du CEA, et à faire progresser la diversité des profils – chercheurs, techniciens et managers – au sein des équipes. Sur un mode de convivialité et d'échanges ouverts, le réseau PDF est un levier pour faire promouvoir de nouvelles pratiques d'entreprise en faveur d'équipes mixtes et d'un équilibre entre vie professionnelle et vie personnelle pour tous.
	CPED (Conférence Permanente des chargé-e-s de mission Égalité Diversité des établissements d'enseignement supérieur et de recherche) ✉ isabelle.kraus@unistra.fr	Le réseau CPED (www.unistra.fr/index.php?id=cped) comprend 65 membres qui représentent 3/4 des universités françaises, ainsi que quelques écoles d'ingénieurs. La Conférence est un lieu de débat et de partage de bonnes pratiques, afin de promouvoir et favoriser l'égalité entre hommes et femmes dans l'enseignement supérieur et la recherche. Il a mis en place 6 groupes de travail : indicateurs statistiques ; utilisation des termes des deux genres dans les textes français publiés dans les universités ; comités pour plus de parité dans les processus de recrutement ; harcèlement sexuel et violence dans l'enseignement supérieur ; genre et culture ; lois de l'enseignement supérieur en France.

Ces différentes entités travaillent en concertation à leurs différents niveaux d'influence.

Théorie des excitations électroniques : une histoire complexe

Lucia Reining (lucia.reining@polytechnique.fr)

Laboratoire des solides irradiés, UMR 7642, École polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex

Un sujet de grande importance en physique est la réponse d'un matériau soumis à un rayonnement, que ce soit la couleur d'un objet dans la lumière du soleil, les dégâts d'irradiation ou l'utilisation de la spectroscopie pour sonder la matière. La tâche d'un(e) théoricien(ne) consiste à structurer ce problème complexe, et à trouver des approximations qui permettent de franchir le grand pas séparant les modèles simples des matériaux réels.

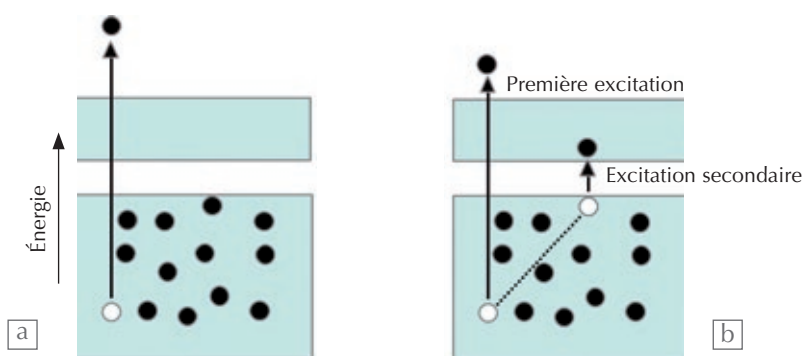
Cet article donne un aperçu des défis actuels, du langage que nous utilisons pour aborder le problème, et des applications possibles.

Comprendre l'interaction entre rayonnement et matériau est un des grands défis auquel est confrontée la théorie de la matière condensée : il s'agit en effet de décrire, comprendre et prévoir comment un système collectif de l'ordre de 10^{23} électrons réagit à une perturbation. Or, les électrons ne sont pas indépendants, mais interagissent fortement entre eux *via* l'interaction coulombienne : on dit qu'ils forment un **système corrélé**.

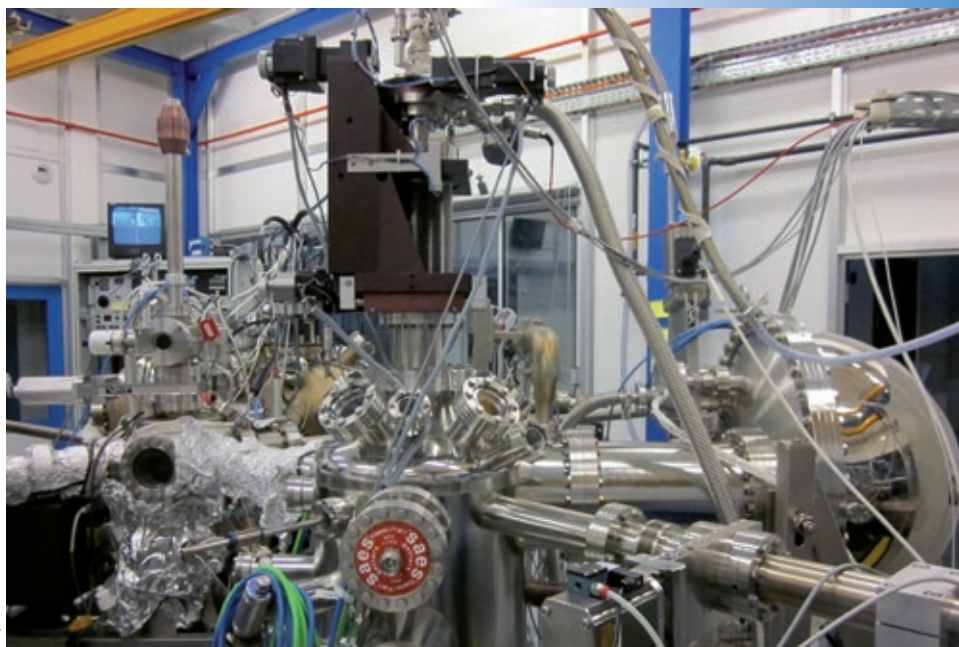
Il existe plusieurs méthodes pour aborder ce problème ; on en rencontre ainsi en chimie ou en physique, dénommées par des sigles tels que CI (Configuration Interaction), QMC (Quantum Monte Carlo), MBPT (Many-Body Perturbation Theory), DMFT (Dynamical Mean Field Theory), et bien d'autres [1]. Il serait intéressant de comprendre et comparer toute cette « zoologie » – mais ici, nous essaierons juste de nous focaliser sur l'essence du problème. En effet, la première question qui se pose est tout simplement : qu'est-ce qu'un « effet de corrélation » ?

Interactions, corrélations et observations

Trop souvent, le mot « corrélation » est utilisé pour dénommer tout ce que l'on ne comprend pas. On peut se faire une idée du problème en considérant les excitations électroniques. Dans un matériau dans lequel les particules sont supposées indépendantes, chaque électron occupe un niveau d'énergie. Une excitation (par exemple, l'absorption d'un photon) se traduit par le passage d'un électron de son niveau initial (où il laisse un trou) à un niveau vide dans le matériau, voire en dehors si l'énergie transmise est assez grande. Les autres électrons restent spectateurs (fig. 1a). Mais dans la réalité, chaque excitation affecte l'ensemble des électrons. En revenant à l'ensemble des particules représenté sur la figure 1, on peut s'imaginer que l'on excite un électron, mais que le système entier réagit. Par exemple, comme illustré par la figure 1b,



1. Illustration schématique d'une excitation dans un système d'électrons indépendants (a) et dans un système d'électrons en interaction (b). Les rectangles verts représentent l'ensemble des états occupés (en bas) et inoccupés (en haut), séparés par une bande interdite, dans l'état initial d'un matériau semi-conducteur. Les électrons et les trous sont indiqués respectivement par des cercles noirs et blancs.



La ligne de lumière CASSIOPÉE du synchrotron SOLEIL, dédiée à la spectroscopie à haute résolution des électrons photoémis par les solides excités par des rayons X mous.

© Synchrotron SOLEIL

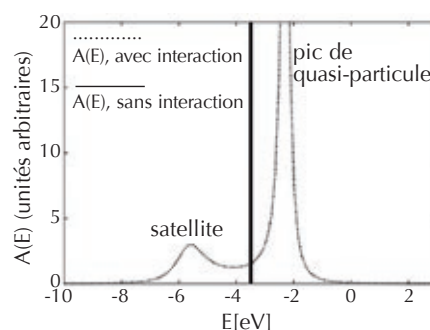
le premier électron excité peut aussi céder de l'énergie à un autre couple électron-trou *via* l'interaction coulombienne (indiquée par un trait en pointillés). Ainsi, la première excitation a une durée de vie finie et d'autres excitations apparaissent.

On mesure les excitations électroniques en faisant de la spectroscopie, par exemple dans une expérience de photoémission où un photon de haute énergie éjecte un électron du matériau (voir encadré 1). On peut aussi injecter un électron et mesurer l'énergie des photons émis : c'est la photoémission inverse, qui donne des informations sur les niveaux électroniques inoccupés situés au-dessus du niveau de Fermi.

La figure 2 montre schématiquement le spectre, ou « fonction spectrale », que l'on obtient dans une expérience de photoémission. Sans interaction, on trouverait simplement une raie étroite (correspondant à l'énergie de l'excitation dans la figure 1a).

Les interactions entraînent un déplacement en énergie, car le système peut se relaxer pour minimiser son énergie. De plus, l'excitation a une durée de vie τ finie. La relation de Heisenberg $\tau \Delta E = \hbar$ entre durée de vie et incertitude en énergie ΔE prévoit alors un élargissement de la raie. On obtient ce qu'on appelle un pic de « quasi-particule », pour souligner le changement par rapport au point de départ, la raie étroite correspondant à l'excitation d'une seule particule. On voit aussi un « satellite » à énergie plus basse. Les satellites sont dus aux excitations secondaires comme, par exemple, celle montrée dans la figure 1b : comme une partie de l'énergie reste dans le matériau sous forme d'excitations, l'électron émis sort avec une énergie plus faible. Finalement, on trouve un continuum d'excitations possibles, donnant lieu en général à une fonction spectrale assez complexe, qui montre bien l'effet de la corrélation !

»»»



2. Fonctions spectrales $A(E)$ en fonction de l'énergie de liaison dans le cas typique d'un solide.

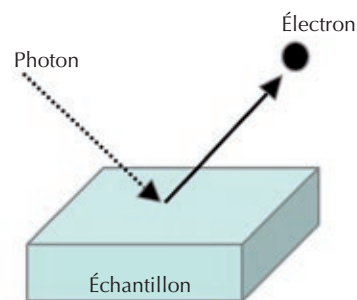
Ligne verticale : excitation d'une particule dans un système sans interaction. Courbe en pointillés : fonction spectrale d'un système en interaction. On voit le pic de « quasi-particule » vers -2 eV et un « satellite » vers -6 eV. Leur distance, quelques eV, est de l'ordre de grandeur de l'énergie d'une excitation collective (« plasmon ») dans un métal simple (voir par exemple la figure 5a).

► La photoémission

encadré 1

La photoémission, ou spectroscopie de photoélectrons (fig. E1), est fondée sur l'effet photoélectrique : elle consiste à irradier un échantillon avec un faisceau lumineux monochromatique d'énergie suffisante pour arracher des électrons, typiquement des rayons X ou de la lumière ultraviolette. On mesure l'énergie cinétique des électrons émis. La différence entre l'énergie des photons et cette énergie cinétique nous renseigne sur la variation d'énergie de l'échantillon, entre avant la mesure et après avoir perdu l'électron.

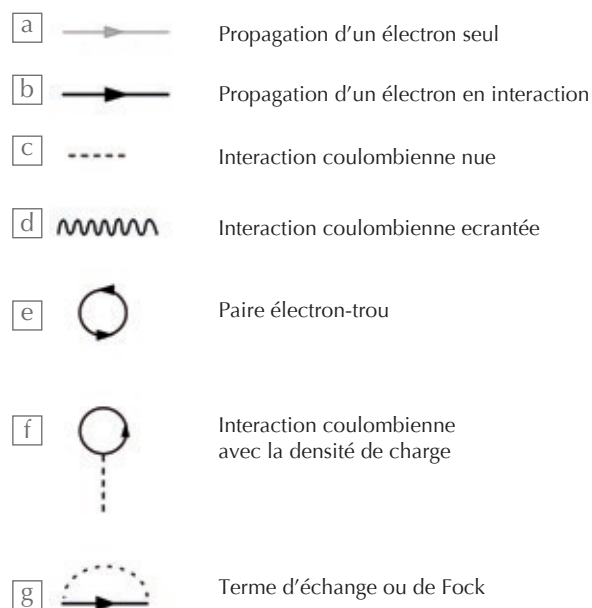
Dans un schéma avec des particules indépendantes (fig. 1a), cette différence d'énergie correspond simplement au niveau d'énergie que l'électron arraché occupait dans le matériau. Le résultat de la mesure (nombre de photoélectrons en fonction de leur énergie) sera alors une « fonction spectrale » $A(E)$, formée d'un seul pic (« fonction δ ») à l'énergie en question, indiqué par le trait vertical dans la figure 2. Si on tient compte des interactions, la fonction spectrale devient la distribution en énergie des excitations de l'échantillon ayant perdu un électron (courbe en pointillés de la figure 2), conformément au dessin de la figure 1b. L'abscisse de la fonction spectrale est typiquement l'énergie initiale des électrons émis par rapport à celle d'un électron au niveau de Fermi. Cette énergie, qui est donc négative, s'appelle « énergie de liaison ».



E1. Schéma de principe d'une expérience de photoémission.

La physique d'un système à plusieurs électrons peut se décrire en termes de processus de propagation, de diffusion, d'échange et de polarisation. Les équations qui décrivent ces processus et leurs possibles combinaisons sont complexes. Pour avoir une représentation plus compacte et pour faciliter l'interprétation, on peut utiliser un langage graphique, les *diagrammes*. Cet encadré en présente les briques de base (fig. E2), qui sont utilisées dans les équations représentées dans la figure 3.

La fonction de Green à une particule représente la propagation dans le temps d'une particule d'un endroit à un autre. Nous représentons ceci par un vecteur. Pour un électron isolé, c'est le premier diagramme de la figure E2, le vecteur fin (a). Pour un électron en interaction avec d'autres électrons, nous utilisons un vecteur gras (b). L'interaction coulombienne elle-même est représentée par une ligne pointillée (c). Par contre, dans un matériau, l'interaction effective est écrantée ; on utilise alors la ligne ondulée (d). Cet écrantage est l'effet d'une polarisation, autrement dit, de la création de paires électron-trou : ce sont deux fonctions de Green qui forment une paire (une pour l'électron, l'autre pour le trou) ; il s'agit d'une boucle, car on représente la propagation du trou dans le sens opposé à la propagation d'un électron (e). Finalement, les deux derniers éléments sont deux processus de base : le premier montre l'interaction coulombienne avec la densité de charge, qui apparaît dans le potentiel classique de Hartree (f). Le deuxième est le terme d'échange, propre aux fermions, dû au fait qu'on ne peut pas les distinguer (g).



E2. Les principaux éléments des diagrammes de Feynman.

>>>

L'interaction a donc des effets qualitatifs, bien au-delà et bien plus intéressants qu'un simple déplacement en énergie du spectre. Les conséquences de ces effets d'interaction peuvent être très importantes, influant sur des phénomènes tels que les transitions de phase ou la supraconductivité.

Comprendre les mécanismes : une question de langage

Est-il possible de calculer et de prévoir ces effets ? En principe, nous savons ce qu'il faudrait faire : résoudre l'équation de Schrödinger « multi-particules ». Cependant, avec 10^{23} électrons, ce n'est pas réaliste [2]. Le travail d'un(e) théoricien(ne) dans notre domaine consiste donc à réécrire cette équation en trouvant des approximations astucieuses qui contiennent la physique qui nous intéresse, tout en rendant possible le calcul de la solution – le plus souvent par ordinateur.

Pour trouver une bonne formulation, il faut tout d'abord mettre en place un langage. Celui que nous avons adopté entre dans le cadre des « fonctions de Green ». Ces fonctions sont les briques de base de ce que nous voulons décrire :

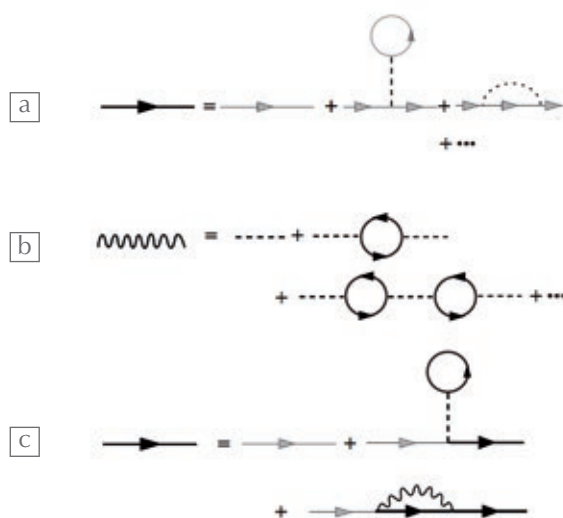
l'histoire des électrons qui se déplacent dans le matériau. Une « fonction de Green à une particule » est l'objet mathématique qui décrit la propagation d'une particule dans le système en présence de toutes les autres (il y a aussi une fonction de Green à deux particules qui décrit la propagation de deux électrons, deux trous ou d'une paire électron-trou, et ainsi de suite). Bien sûr, ce sont des objets plutôt compliqués sur le plan mathématique, peu adaptés à une première approche du sujet ! Cependant, il suffit parfois de changer de langage pour mieux se faire comprendre... et pour notre problème, on peut trouver une formulation compacte et intuitive avec un langage « diagrammatique » introduit par Feynman. Il s'agit d'une approche graphique pour représenter les formules – bien trop longues [3]. L'encadré 2 présente les différents éléments de ce langage.

Ces éléments sont alors combinés pour écrire l'histoire de la propagation d'un électron, comme le montre la figure 3a. On voit que cette propagation (le vecteur gras) est différente de celle d'un électron seul (vecteur fin), car il y a l'interaction coulombienne (ligne pointillée) classique de notre particule avec la densité de

charge de tous les électrons, c'est-à-dire la « contribution de Hartree ». De plus, les électrons étant des fermions, on ne peut pas les distinguer. Pour cette raison, on peut échanger des bouts de fonctions de Green, ce qui donne le diagramme suivant (dit « terme de Fock »).

Est-ce tout ? Bien sûr que non. Imaginons la particule qui se propage dans le système comme un bateau sur l'eau (fig. 4a). L'eau porte et freine le bateau (effet similaire au terme de Hartree), mais elle n'est pas inerte : le bateau crée des ondes, qui elles-mêmes vont avoir un effet important sur le bateau (il suffit de penser au mal de mer...).

De même, la particule qui se propage influence le système. Si on s'imaginer en première approche la densité électronique comme une matière continue et déformable, comme l'eau, alors on comprend que des ondes se forment, par exemple quand on introduit un trou ou un électron dans le système (fig. 4b). Chaque particule transporte alors avec elle une déformation de la densité de charge – la « quasi-particule » est cet ensemble. C'est cette quasi-particule qui crée le pic principal en pointillés dans la figure 2. L'interaction effective entre



3. Les processus qui ont lieu pendant la propagation d'un électron dans un matériau peuvent être représentés dans le langage des diagrammes.

(a) La première ligne montre les premières contributions (dites « Hartree » et « Fock ») à la propagation d'une particule. La deuxième ligne (b) montre l'écrantage de l'interaction coulombienne par la création de paires électron-trou (approximation appelée « RPA »). La troisième ligne (c) montre une équation de Dyson dans une approximation appelée « GW », avec le terme de Hartree et le terme de Fock écranté.

quasi-particules est différente, et généralement plus faible, que l'interaction coulombienne entre particules isolées car elle est écrantée. Cet écrantage est dynamique, comme les ondes. On appelle les ondes de densité de charge des « plasmons ».

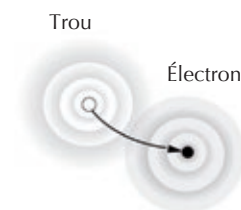
Dans notre langage diagrammatique, si l'interaction coulombienne nue est représentée par les pointillés, l'interaction effective, écrantée, est décrite par une ligne ondulée. Quel est le lien entre les deux ? L'effet de l'interaction est de déplacer les particules. Il y a donc, par rapport au système initial, un endroit où une particule vient de disparaître (on parle d'un trou), et un autre endroit où une particule apparaît. On dit qu'on crée des paires électron-trou. La modification de l'interaction qui en résulte est montrée dans les diagrammes de la figure 3b. Il s'agit d'une description simplifiée, appelée « approximation de la phase aléatoire » ou « RPA ». On néglige le fait que chaque électron et chaque trou dans les paires ainsi créées interagissent à leur tour. Les formules correspondant aux diagrammes RPA peuvent être évaluées numériquement et donnent souvent des résultats assez satisfaisants.

Des mots aux résultats

Les ondes de densité de charge, ou plasmons, peuvent être créées par la propagation d'un électron du système, mais aussi par une perturbation externe telle que des rayons X ou un faisceau d'électrons dans un microscope électronique. C'est un peu comme la perturbation d'un ensemble de personnes dans une salle : un mouvement collectif peut être causé par une personne qui commence à courir, ou bien par une influence extérieure, comme le dessert qui arrive... Si on utilise une perturbation externe, on peut directement mesurer la réponse collective. Par exemple, un faisceau d'électrons ou de rayons X interagit avec l'échantillon et est réfléchi ou transmis. Il perd alors de l'énergie, car il excite le matériau. En réflexion, on peut décrire une telle expérience en partant de la figure E1 de l'encadré 1, et en interprétant les deux flèches, incidente et réfléchie, soit comme des rayons X soit comme des électrons. On mesure la différence en énergie des deux faisceaux, qui correspond à l'énergie des excitations induites dans le matériau, et on reporte l'intensité du faisceau réfléchi en fonction de la perte



(a)



(b)

4. Perturbation d'un milieu par un objet qui s'y propage.

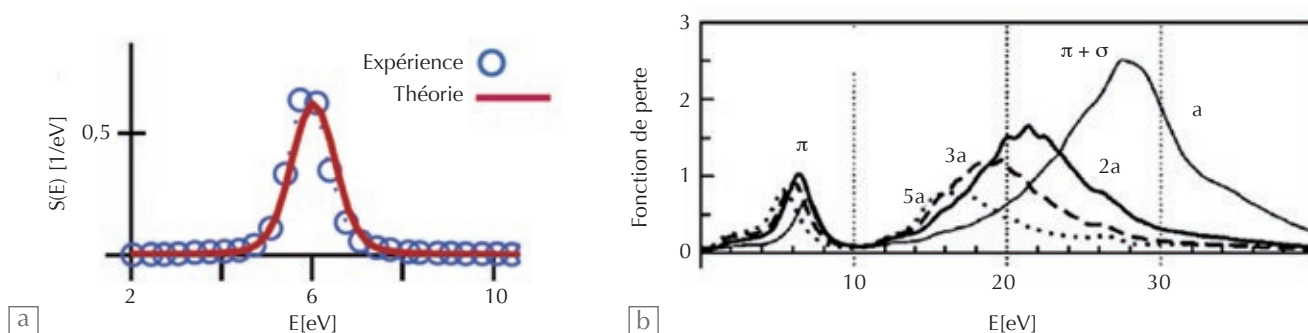
(a) Une particule qui se propage dans un système perturbe ce dernier, comme un bateau crée des ondes dans l'eau (permission L. Sponza).
(b) Dans un système d'électrons, ce sont des ondes de densité de charge qui apparaissent quand on crée une paire électron (cerle noir)-trou (cerle blanc).

d'énergie. Ceci donne la « fonction de perte », ou le « facteur de structure dynamique » qui lui est proportionnel.

La figure 5a montre le facteur de structure dynamique obtenu par diffusion inélastique des rayons X pour le sodium. Ce métal est presque homogène, et correspond donc bien à l'image de l'eau avec une onde bien définie. On voit en effet dans le spectre un pic unique vers 6 eV : il correspond à l'excitation d'un plasmon. Le calcul (ligne rouge) reproduit bien le résultat expérimental (cercles bleus).

Le plus souvent, cependant, la structure atomique et la composition chimique des matériaux donnent lieu à des spectres plus complexes. La figure 5b montre la fonction de perte calculée pour le graphite, semi-métal composé de couches empilées de carbone : deux structures bien distinctes apparaissent, correspondant aux oscillations de différents groupes d'électrons. À basse énergie, ce sont les électrons π , qui forment les liaisons (assez faibles) entre plans de carbone. À plus haute énergie, s'ajoutent les électrons σ , qui sont responsables des fortes liaisons entre atomes de carbone





5. Spectres de plasmons. (a) Comparaison entre la théorie (courbe rouge) et le facteur de structure dynamique $S(E)$ mesuré par diffusion inélastique des rayons X (cercles bleus) réalisée sur le sodium (M. Cazzaniga *et al.*, *Phys. Rev. B* **84** (2011) 075109). (b) Comparaison entre les fonctions de perte théoriques obtenues pour différentes distances entre les plans de graphite, multiples de la distance d'équilibre a . On voit deux structures plasmoniques, la première ayant une position relativement stable, tandis que la seconde est très sensible à la distance entre plans. (A.G. Marinopoulos *et al.*, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 245419).

>>>

dans un plan. Après avoir vérifié que le calcul est en bon accord avec des mesures, nous pouvons analyser différents effets. Par exemple, on peut tester l'importance de l'interaction entre plans de graphite, en étudiant comment le spectre change lorsqu'on éloigne les plans. Les calculs montrent que le plasmon constitué des électrons π et σ bouge beaucoup, tandis que le plasmon π ne bouge presque pas (fig. 5b). On peut ainsi modifier aisément les paramètres dans le calcul pour comprendre l'influence de différents facteurs, contrairement aux expériences !

Revenons à la propagation d'une particule. Elle perturbe le système, ce qui peut exciter des plasmons, et donc donner lieu à des satellites (fig. 2). Ceci passe par la polarisation dynamique du système, créée par une superposition de nombreuses paires électron-trou. Cette information est contenue dans l'interaction écrantée, schématisée dans la figure 3b.

Pour en tenir compte, quand on veut décrire la propagation d'un électron, on remplace l'interaction nue dans le diagramme d'échange par l'interaction écrantée. Finalement, chaque processus peut apparaître plusieurs fois : la particule se propage, rencontre les autres, change sa propagation, fait une nouvelle rencontre, etc. L'histoire de la propagation, qui est la somme de toutes ces possibilités, donne alors lieu à une équation appelée « équation de Dyson », qui se traduit en diagrammes comme celui de la figure 3c.

Pour être précis, cette figure est encore loin de correspondre à l'équation de Dyson complète : elle représente l'approximation dite « GW » (du fait qu'elle se construit

de façon simple avec la fonction de Green appelée G , et l'interaction écrantée appelée W) [4]. Cette approximation est très bonne en général pour calculer des propriétés liées aux quasi-particules, comme les bandes interdites dans les solides ; mais elle est plutôt mauvaise pour les satellites. Un de nos centres d'intérêt est d'améliorer la description des satellites ; nous développons donc des méthodes pour prendre en compte plus de processus (autrement dit, plus de diagrammes) qui sont importants dans ce contexte. La figure 6 montre un de nos travaux récents : il s'agit du spectre de photoémission du silicium en volume.

Les bandes de valence du silicium se situent entre 0 et -12 eV. Cette partie du spectre correspond donc qualitativement à ce que l'on attendrait dans un schéma avec des électrons indépendants ; ce sont les quasi-particules. Tout le reste du spectre expérimental (croix bleues) est constitué par des satellites plasmoniques. Le calcul GW donne la courbe rouge, très satisfaisante pour les bandes de valence, mais non pas pour les satellites. Notamment, un seul satellite est présent, tandis que l'expérience en montre clairement au moins deux. Pour trouver cette création de plasmons multiples, il faut aller au-delà de l'approximation GW. Dans une première étape, nous avons adapté au contexte des calculs modernes une approche historique, dite « de développement en cumulants » (du fait qu'on peut l'obtenir à partir d'un développement d'une fonction exponentielle). Le résultat est la courbe verte. On voit apparaître la forme du spectre attendue. Finalement, si on inclut d'autres phénomènes tels que la perte d'énergie d'un

électron sur son chemin pour arriver au détecteur, on obtient la courbe noire, en très bon accord avec les expériences.

Notons que ces satellites et autres excitations secondaires sont intéressants du point de vue fondamental, mais aussi technologique : on peut penser par exemple à la création de paires électron-trou multiples par un seul photon, un des espoirs pour le photovoltaïque.

Pas si simple : ce qui reste à faire

Est-ce tout ? Loin de là. Regardons de nouveau le bateau de la figure 4a. Nous considérons l'eau comme une matière continue et homogène, tout en sachant qu'elle est composée de molécules. Ceci ne nous semble pas important – par rapport à la taille du bateau, les molécules et la distance entre elles sont très petites. Mais pour l'électron qui se propage dans le système, une telle différence de taille n'existe pas, surtout si le système électronique n'est pas très dense. On voit alors apparaître des phénomènes qui vont au-delà de ce que l'on peut décrire avec des ondes classiques.

Pour comprendre ceci, regardons un système très simple : un dimère modèle (fig. 7a). Il s'agit d'un système composé de deux sites, chacun avec une orbitale qui peut contenir deux électrons. Ces orbitales s'hybrident et forment deux états, l'état liant de plus basse énergie, et l'état anti-liant de plus haute énergie. Supposons qu'il y ait déjà un électron dans le système – qui ressemble donc à la molécule H_2^+ –, et qu'on y introduit un deuxième électron, de *spin* opposé. Que va-t-on observer

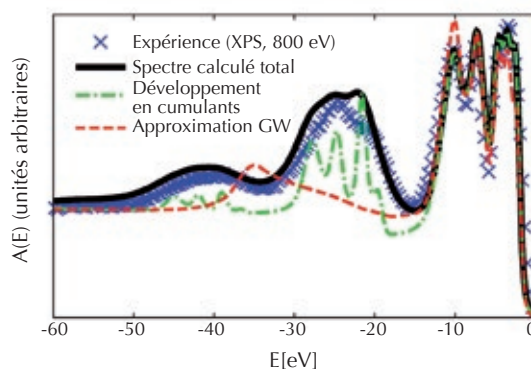
dans une expérience de photoémission inverse ?

Si les deux sites sont proches, on va pouvoir représenter le premier électron, qui se trouve dans l'état liant, comme une densité classique distribuée sur les deux sites (fig. 7a). L'introduction du deuxième électron va donner lieu à ce que nous avons vu auparavant : un pic de quasi-particule et un satellite dû à l'excitation de la densité existante.

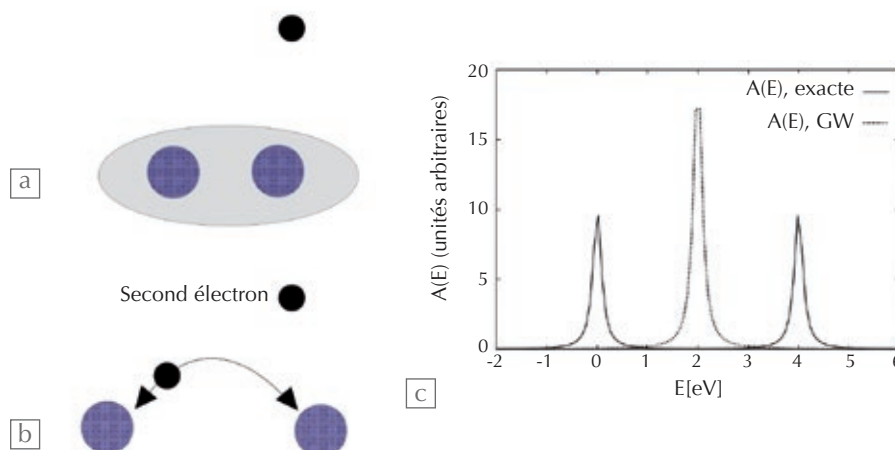
En revanche, si les sites sont éloignés, les énergies des états liant et antiliant se rapprochent, l'hybridation des orbitales sur les deux atomes disparaît, et le premier électron est soit à gauche, soit à droite, avec la même probabilité (fig. 7b). Le deuxième électron va donc, avec la même probabilité, arriver soit sur un site vide, soit sur un site déjà occupé où il sera soumis à une répulsion coulombienne. La fonction spectrale montre alors deux pics aux énergies bien distinctes (fig. 7c). Un tel effet n'est pas prévu par l'approximation GW, qui ne « voit » pas les électrons du système en détail et ne prévoit donc qu'un seul pic, au milieu, car elle interprète la densité – qui est toujours symétrique – comme une distribution de charge classique. Nous entrons ici dans le domaine des phénomènes que l'on peut appeler « de corrélation forte », car il faut explicitement corréler le mouvement d'au moins deux particules.

Bien sûr, pour améliorer l'approximation GW, on pourrait continuer à ajouter des diagrammes à la théorie, en rendant l'histoire toujours plus « vraie », et les calculs toujours plus complexes... mais on comprend aisément qu'une telle procédure rencontre rapidement ses limites.

Actuellement, notre but est de mettre en place une approche alternative [5]. Nous partons pour ceci d'une équation différentielle fonctionnelle pour la fonction de Green en présence d'un potentiel externe dépendant du temps. Cette équation est connue depuis des décennies, mais elle a essentiellement servi à produire des séries limitées de diagrammes (l'approximation GW, par exemple). Notre idée est de tenter une solution directe de l'équation différentielle, bien sûr approchée, en évitant les hypothèses courantes (qui sont par exemple soit une interaction faible, soit une interaction locale). La figure 6 est en fait un premier résultat de cette stratégie. Pour aller au-delà, nous devons abandonner le langage des diagrammes qui nous a accompagnés jusqu'ici. Mais ça, c'est une autre histoire... ■



6. Spectre de photoémission du silicium en volume. Croix bleues : résultats expérimentaux. Rouge : calculs GW. Vert : fonction spectrale obtenue par des calculs utilisant des cumulants. Courbe noire : spectre total (voir texte) basé sur un développement en cumulants (M. Guzzo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 166401).



7. Excitations électroniques d'un dimère modèle, avec un électron qui occupe une liaison moléculaire, correspondant à l'ion H_2^+ .

- Quand les atomes sont proches, on peut penser que la charge de l'électron, indiquée par la région entourée par une ellipse, est distribuée de façon symétrique sur les deux atomes.
- Quand on dissocie la molécule, on réalise qu'on trouve l'électron soit à droite soit à gauche, comme le montre la flèche, avec la même probabilité : on ne peut plus interpréter la densité électronique comme une distribution de charge classique.
- Fonction spectrale calculée du dimère de la figure (b), correspondant à H_2^+ avec une grande distance entre les atomes. On ajoute un second électron, ce qui correspond à la photoémission inverse. Pour une grande distance entre atomes, il faut tenir compte du fait que l'électron du système se trouve soit à droite, soit à gauche. L'électron ajouté peut alors tomber soit sur un site vide (pic d'énergie zéro), soit sur un site déjà occupé par le premier électron (pic déplacé plus haut en énergie par l'interaction coulombienne). L'approximation GW ne peut pas reproduire cet effet : elle crée toujours un seul pic, au milieu (courbe en pointillés). (P. Romaniello *et al.*, *J. Chem. Phys.* **131** (2009) 154111).

Références

- P. Fulde, *Correlated Electrons in Quantum Matter*, World Scientific (2012).
- W. Kohn, "Nobel Lecture: Electronic structure of matter-wave functions and density functionals", *Rev. Mod. Phys.*, **71** (1999) 1253.
- Parmi les bons livres sur ce sujet, voir par exemple, l'introduction très abordable dans R.D. Mattuck, *A Guide to Feynman Diagrams in the Many-Body Problem*, Dover Books on Physics (1992).
- L. Hedin, "New Method for Calculating the One-Particle Green's Function with Application to the Electron-Gas Problem", *Phys. Rev.* **139** (1965) A796-A823 ; "On correlation effects in electron spectroscopies and the GW approximation", *J. Phys. C*, **11** (1999) R489.
- G. Lani, P. Romaniello et L. Reining, "Approximations for many-body Green's functions: insights from the fundamental equations", *New J. Phys.*, **14** (2012) 013056.

Photographier une réaction chimique avec des impulsions laser ultra-brèves

Valérie Blanchet (blanchet@celia.u-bordeaux1.fr)

CELIA, UMR CNRS 5107, Université de Bordeaux, 33405 Talence Cedex

Une réaction photochimique est la réorganisation d'un édifice moléculaire, suite à l'absorption d'un photon. Les acteurs principaux de cette réorganisation sont les électrons de valence qui induisent des réarrangements extrêmement rapides des noyaux à l'échelle de l'angström, avec des vitesses de ~ 1 km/seconde.

Une résolution femtoseconde (10^{-15} s) est donc nécessaire pour suivre les différentes étapes de cette réorganisation.

Cet article présente les techniques expérimentales mises en œuvre, par exemple pour étudier une photodissociation. Elles sont basées sur l'imagerie de vecteur vitesse, qui permet des bilans d'énergie et d'impulsions des particules ionisées, ou sur la spectroscopie d'harmoniques, une technique d'imagerie attoseconde (10^{-18} s).

Suivre en temps réel, pas à pas, le déroulement d'un phénomène physique apporte souvent un regard complémentaire à celui d'une mesure statique. Parmi les exemples les plus récents, citons la coalescence et la rupture de gouttes d'eau où la dynamique peut être observée jusqu'à des échelles sub-millisecondes, remettant alors en cause les lois continues établies aux échelles de temps plus longues [1].

Quelle démarche suivre si la dynamique à filmer est une réaction chimique ? Quelle caméra serait à même de résoudre l'échelle spatiale subnanométrique et les échelles de temps s'étalant de la femtoseconde ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) à la milliseconde, inhérentes à un tel processus ? Pour le physicien ou la physicienne, une réaction chimique est la « mise en contact » de réactifs, générant une ou plusieurs nouvelles liaisons chimiques. Le moteur d'une telle réorganisation est le « nuage électronique » et, plus particulièrement, les électrons de valence. Le changement de configuration électronique génère des forces sur les noyaux atomiques, entraînant leurs mouvements très rapides. Est-il envisageable de filmer en temps réel de tels phénomènes, vues les résolutions temporelle et spatiale nécessaires ?

La difficulté de suivre le déroulement d'une réaction chimique

Toute histoire commence par « il était une fois », et dans une réaction chimique ceci correspond à la rencontre de deux réactifs ou encore à l'instant « $t = 0$ ». Les interactions électrostatiques entre les réactifs ayant souvent une longue portée (plusieurs nanomètres), très supérieure à la taille de la

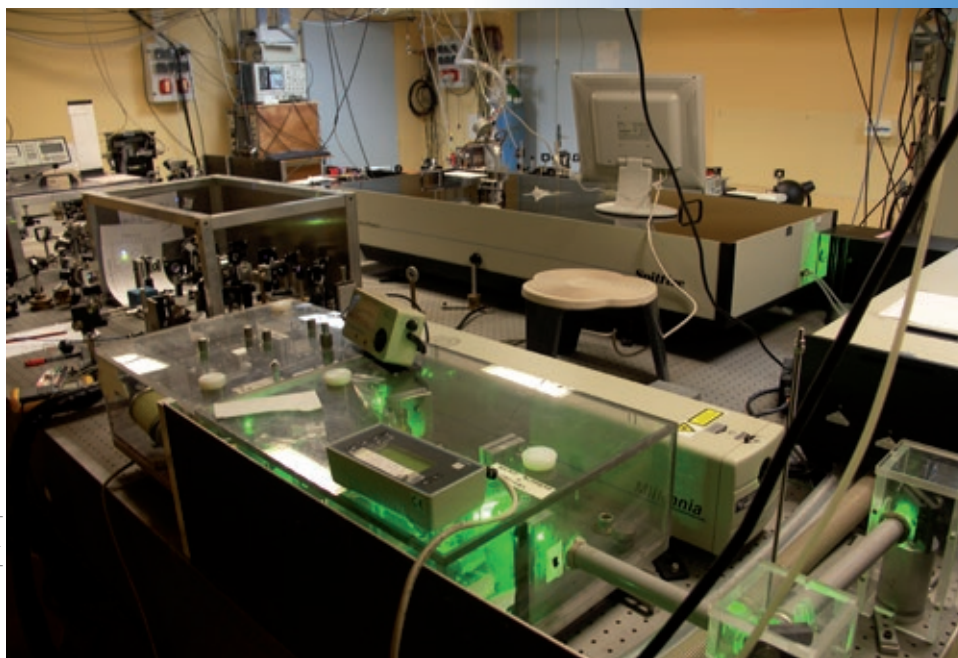
liaison chimique, où pouvons-nous placer la « rencontre » de ces réactifs ? Une difficulté supplémentaire réside dans le fait que leurs orientations relatives dans l'espace doivent être prises en compte. Ainsi une multitude de « films », correspondant à chacune de ces orientations, devrait être enregistrée. Une première simplification serait bien sûr d'aligner les réactifs le long d'un axe donné ou de les orienter l'un par rapport à l'autre, pour limiter le nombre de films. Si cela est possible pour des petites molécules linéaires ou planes, « orienter/aligner » un réactif polyatomique dans l'espace représente un défi expérimental [2]. Dans tous les cas, malgré les efforts récents dans les expériences d'alignement et d'orientation, la durée d'approche des réactifs s'étale sur une centaine de picosecondes ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) du fait des potentiels de longue portée et de l'orientation relative. Cette distribution initiale picoseconde empêche de filmer les différentes étapes menant des réactifs vers les produits finaux.

La solution : la demi-réaction ou le film « tourné à l'envers »

Pour contourner cette difficulté, il est possible d'enregistrer le film « à l'envers ». L'instant « $t = 0$ » correspond alors à une molécule liée, appelée « parente », et les instants infinis à la formation des fragments ; nos réactifs deviennent des produits. Dans l'exemple qui suit, ClN_3 est la molécule parente constituée de Cl et N_3 ou encore de NCl et N_2 . Le top départ « $t = 0$ » est alors donné par l'absorption d'un photon excitant les mouvements internes (électroniques, vibrationnels et rotationnels) de la molécule parente. L'énergie déposée par ce photon

Chaîne laser amplifiée femtoseconde pour des études de dynamique ultrarapide au LCAR (Toulouse). En vert est visible le laser de pompe. Grâce aux lasers femtoseconde, les chercheurs sont capables de visualiser la vibration des molécules ou de les briser de manière contrôlée.

© CNRS Photothèque / Jacques CHAUGADE



est suffisante pour dissocier ClN_3 en deux fragments. L'énergie absorbée se convertit partiellement en énergie de translation entre les produits, soit de manière instantanée si la dissociation est directe, soit par diverses étapes de relaxation si des couplages complexes internes à la molécule sont mis en jeu pour provoquer la dissociation. On étudie ainsi la photodissociation de ClN_3 , mais aussi les réactions $\text{Cl} + \text{N}_3 \leftarrow [\text{ClN}_3] \rightarrow \text{NCl} + \text{N}_2$ et leurs inverses, qui impliquent les mêmes propriétés internes de la molécule. La photodissociation ou photoréaction est aussi appelée demi-réaction, car elle représente soit l'inverse de l'approche des réactifs, soit la séparation des produits de réaction.

La femtochimie : observer la chimie par l'approche « pompe-sonde »

Le top départ « $t = 0$ » de la demi-réaction est d'autant mieux défini que le photon absorbé fait partie d'une impulsion lumineuse ultra-brève, qui est typiquement de l'ordre de la dizaine de femtosecondes à la centaine d'attosecondes ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$, le record actuel est de 60 as). Cette impulsion lumineuse est dite **impulsion pompe**. Aux échelles de temps plus longues (centaine de picosecondes), la dynamique de relaxation de la molécule parente sera régie par l'énergie déposée, le nombre de degrés de liberté, leurs symétries, les détails de la structure moléculaire, soit en résumé une multitude de facteurs qui confèrent un comportement statistique à la dynamique [3]. Au contraire, aux échelles de temps les plus courtes (as à fs), c'est plutôt la mécanique quantique qui pilote la dynamique, avec les concepts de paquet d'ondes électroniques et

vibrationnelles, de cohérence, d'interférence et de localisation de l'énergie.

Déclencher, même à l'envers, une photoréaction, n'est jamais difficile, ceci correspondant simplement à l'absorption d'une impulsion laser. Le problème réside plutôt dans la question suivante : que doit-on ou peut-on filmer, et comment ? L'instrumentation électronique la plus rapide est à ce jour limitée à la picoseconde (avec des fluctuations de $\sim 300 \text{ fs}$). C'est donc une seconde impulsion lumineuse, issue du même laser et si possible aussi courte que l'impulsion pompe, que l'on va utiliser pour sonder la réaction déclenchée, d'où son nom d'**impulsion sonde**. Résoudre temporellement la relaxation d'énergie initiée par ce schéma d'excitation **pompe-sonde** est l'objectif de la **femtochimie**, domaine de recherche né il y a maintenant trois décennies. Ainsi, en principe, toutes les demi-réactions chimiques peuvent être observées, de la simple photodissociation à la photo-isomérisation (réaction au cours de laquelle la molécule ne change pas de formule chimique globale, mais où les liaisons entre les atomes qui la constituent ont été échangées).

Les techniques de sonde

Deux techniques de sonde peuvent être envisagées : par diffraction de photons XUV (de longueur d'onde λ comprise entre 10 et 50 nm) et par absorption de photons visible/ultraviolet/ultraviolet du vide (λ comprise entre 800 et 50 nm).

La diffraction a pour principal avantage de révéler directement, comme en cristallographie, la position des noyaux sans aucune connaissance préalable des niveaux d'énergie

de la molécule en fonction de ses coordonnées internes. Les nouvelles sources intenses femtoseconde dans le domaine X (XFEL : *X free electron laser*), bien que peu nombreuses et extrêmement coûteuses, promettent pour demain, par leur cadence et leur résolution temporelle, des avancées significatives dans la compréhension des phénomènes ultrarapides en phase condensée comme en phase diluée. Par extension, il existe aussi la diffraction d'électrons, où l'impulsion sonde est un paquet d'électrons ultracourt – record actuel de 80 fs [4].

Contrairement à la diffraction, les expériences basées sur l'absorption, comme toute spectroscopie, requièrent une connaissance la plus étendue possible de la structure interne de la molécule et des **moments de transition** entre ses états. Un moment de transition dipolaire électrique est un vecteur déterminant comment les charges d'une molécule interagissent avec un champ électrique oscillant de polarisation et de fréquence données. L'amplitude du moment de transition est d'autant plus importante que la transition est autorisée, et sa direction indique comment les charges vont se déplacer au sein de la molécule lors de l'absorption d'un photon.

Les états ioniques, créés lorsque le photon absorbé arrache un électron à la molécule, sont les états les plus facilement caractérisables expérimentalement, en enregistrant la distribution d'énergie des électrons émis. Ainsi, les expériences alternatives à la diffraction les plus largement utilisées jusqu'à ce jour sont basées sur la spectroscopie de **photo-ionisation** résolue en temps. L'impulsion sonde photo-ionise la molécule parente et donc les produits de réaction émergents, produisant alors des espèces

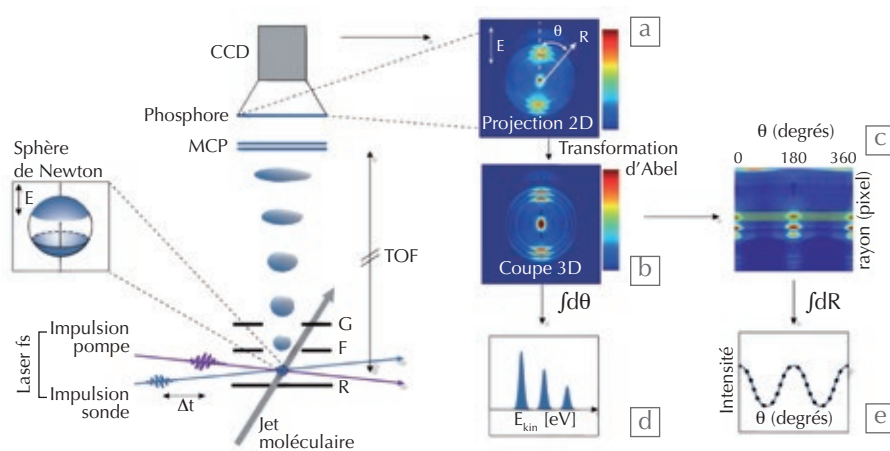
»»»

► Imageur de vecteurs vitesses (VMI)

Son principe est schématisé à gauche de la figure E1. Un imageur de vecteurs vitesses est constitué de trois éléments principaux : (i) trois lentilles électrostatiques (R, F, G), qui focalisent vers la zone de détection les fragments ionisés résultant de l'interaction des molécules contenues dans le jet moléculaire avec les impulsions pompe et sonde ; (ii) une zone de temps de vol (TOF pour "time-of-flight"), qui permet de discriminer les masses des fragments ; (iii) un détecteur bidimensionnel constitué de deux galettes de microcanaux (MCP pour "microchannel plate") couplées à un écran phosphorescent et d'une caméra CCD, qui enregistrent les images. Lors de leur création à un instant bien précis dans le volume d'interaction, les fragments commencent à migrer du fait de leur énergie cinétique E_{kin} en série de sphères concentriques, les **sphères de Newton**, dont le rayon dépend de E_{kin} et dont la distribution angulaire dépend de la durée de dissociation, de la structure interne de la molécule initiale, et de la polarisation (E) de l'impulsion pompe pour les photofragments ou de l'impulsion sonde pour les photoélectrons. Les lentilles électrostatiques permettent de focaliser les particules chargées produites avec le même vecteur vitesse sur le même microcanal du détecteur, quel que soit l'endroit où ces particules ont été produites dans le jet, éliminant ainsi l'incertitude correspondante. La sélection en masse est obtenue en ajustant l'instant d'activation du détecteur avec celui de l'arrivée d'un fragment de masse donnée, ce qui permet d'enregistrer des images ne provenant que de la même masse.

Les images enregistrées correspondent à l'intégration le long de l'axe de temps de vol des différentes sphères de Newton. Par exemple, l'image (a) de la figure E1 montre la projection en deux dimensions (2D) de trois sphères reliées à des vecteurs vitesse différents. L'image (b) montre une coupe (et non plus une projection) de la sphère 3D, obtenue par une procédure mathématique dite « inversion d'Abel » de l'image (a), sous condition d'une symétrie cylindrique autour d'un axe parallèle au plan du détecteur image. Cette condition impose que les polarisations des impulsions pompe et sonde (E) soient toutes deux parallèles au détecteur. L'image (b) en coordonnées cartésiennes peut être également représentée en coordonnées polaires, pour donner l'image (c), en fonction du rayon R associé aux composantes du vecteur vitesse et de l'angle θ d'émission des fragments ou des électrons par rapport à la polarisation E des impulsions pompe ou sonde. Ainsi, le module et la direction des vecteurs vitesses peuvent être reconstitués, donnant accès à la distribution d'énergie cinétique (en eV) des particules (image (d), par intégration angulaire de l'image (c) sur θ et avec la relation $R^2 \propto E_{\text{kin}}$) ou à leur distribution angulaire (image (e) par intégration selon un domaine d'énergie, c'est-à-dire un domaine de R donné).

On peut montrer que la courbe de l'image (e) peut être décrite (pour une transition à un photon) par la fonction $I(\theta) \sim 1 + \beta P_2(\cos\theta)$, où P_2 désigne le polynôme de Legendre d'ordre 2. Le paramètre d'anisotropie β caractérise la distribution angulaire des particules : $\beta = 2$ correspond à des particules émises le long de la polarisation E du laser, $\beta = -1$ à des particules émises perpendiculairement à E, et $\beta = 0$ à une distribution isotrope.



E1. Principe de l'imagerie des vecteurs vitesses.

>>>

chargées telles que les photoélectrons et les fragments ionisés. Ces particules sont ensuite enregistrées par coïncidence [5] (non traité ici), ou par **imagerie de vecteur vitesse** (en anglais, Velocity Map Imaging (VMI)) [6]. Une des alternatives émergentes pour sa sensibilité à la symétrie du système étudié et pour sa cohérence est la **spectroscopie d'harmoniques**, dont la première étape est aussi une ionisation, mais cette fois produite par un champ laser très intense (ionisation tunnel [7]). Cette ionisation est suivie d'une recombinaison électron-ion qui produit un rayonnement cohérent XUV sous la forme d'harmoniques de la fréquence laser (c'est-à-dire de composantes de fréquences multiples de la fréquence initiale), et pouvant s'étendre jusqu'à des ordres très élevés (plusieurs dizaines à centaines d'harmoniques).

Selon la technique utilisée, les observables filmées en fonction du délai pompe-sonde sont : les vecteurs vitesses des photoélectrons et des photofragments ionisés, ou encore les photons XUV harmoniques. En résumé, on enregistre de façon exhaustive toutes les observables pour une demi-réaction, renversée dans le temps. Nous conviendrons aisément que nous sommes loin des conditions usuelles de la chimie de paillasse, d'autant plus que les molécules sont isolées en phase gazeuse. Notons toutefois que pour simuler un environnement, la molécule parente peut être éventuellement déposée sur une surface ou produite sur/dans un agrégat [8].

Détection des produits par imagerie des vecteurs vitesses

Les imageurs de vecteurs vitesses (VMI) sont devenus l'instrument de détection de prédilection des expériences de femtochimie en phase gazeuse depuis une dizaine d'années. Les VMI permettent de « filmer » le module et la direction des vecteurs vitesses de toutes les particules chargées produites, donnant alors accès à un bilan temporel de la distribution angulaire et de l'énergie de translation des particules émises lors de la demi-réaction. Le principe de cette méthode est décrit en détail dans l'encadré ci-contre.

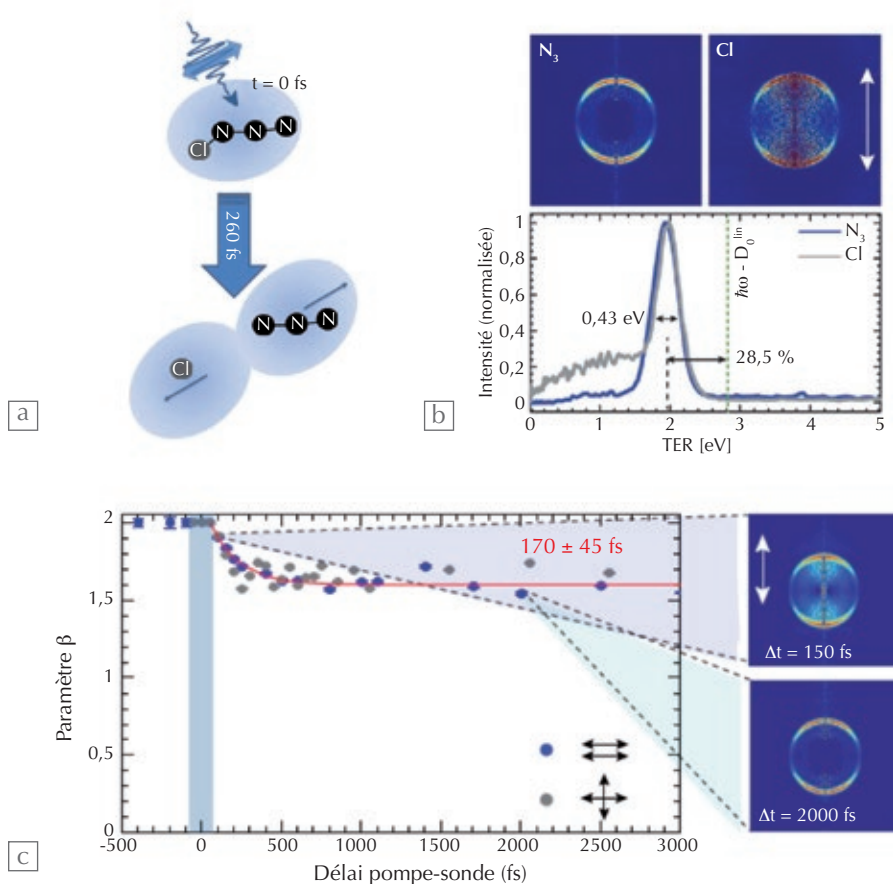
La figure 1 illustre l'application de ce dispositif à la dissociation de ClN_3 , initiée par une impulsion pompe à 4,6 eV (268 nm), énergie de photon ultraviolet facile à produire. Ici, l'impulsion sonde, centrée à 800 nm, photo-ionise en régime très multiphotonique : 8 à 9 photons sont

nécessaires pour photo-ioniser les fragments N_3 ou Cl. La principale voie de dissociation est $ClN_3 \rightarrow Cl + N_3$. Les deux fragments ont la même énergie de translation (TER pour Translational Energy Release) dans un référentiel lié au centre de masse de la molécule-parente, qui dépend de l'énergie cinétique E_{kin} et de la masse de chacun des fragments selon la formule :

$$TER = (m_{ClN_3}/m_{N_3}) \times E_{kin}(Cl) = (m_{ClN_3}/m_{Cl}) \times E_{kin}(N_3).$$

Ils sont émis selon un même axe de recul dont la distribution des orientations dans l'espace est déterminée par la polarisation de l'impulsion pompe, et par le moment de transition (c'est-à-dire le changement de l'orientation moyenne du nuage électronique) entre l'état électronique fondamental et l'état excité par l'impulsion pompe. La quantité de fragments est collectée en fonction de leur énergie cinétique TER et du délai pompe-sonde Δt . Les fragments sont émis avec $TER = 2$ eV (fig. 1b), soit une énergie inférieure à l'énergie maximale possible de 2,8 eV si aucune énergie n'était déposée dans N_3 pour exciter ses mouvements internes. Les fragments apparaissent en un temps moyen de 260 fs, sans changement notable de leur énergie cinétique (non illustré sur la figure 1). Ce temps de dissociation est neuf fois plus long que celui correspondant à une simple rupture de liaison Cl-N. Cela laisse donc largement le temps pour provoquer des redistributions du nuage électronique induites par le dépôt dans la molécule, avant même que la dissociation ne commence.

La distribution angulaire des fragments est caractérisée par un paramètre d'anisotropie $\beta = 1,61 \pm 0,07$ (défini dans l'encadré et sur la figure 1c), proche de $\beta = 2$ et qui correspond donc à des fragments émis principalement le long de l'axe de polarisation de l'impulsion pompe. Au vu de cette valeur, nous pouvons affirmer que le moment de transition est contenu dans le plan moléculaire suivant un axe Cl... N_3 . Cette anisotropie peut également être enregistrée en fonction du délai pompe-sonde, comme illustré sur la figure 1c : les tout premiers fragments sont produits parfaitement le long de l'axe de la molécule ($\beta = 2$), tandis que les derniers fragments se distribuent moins anisotropiquement autour de cet axe ($\beta \sim 1,6$). Cette variation du paramètre d'anisotropie β résulte directement d'un changement de géométrie relative des atomes au sein de l'édifice ClN_3 avant la dissociation [9].



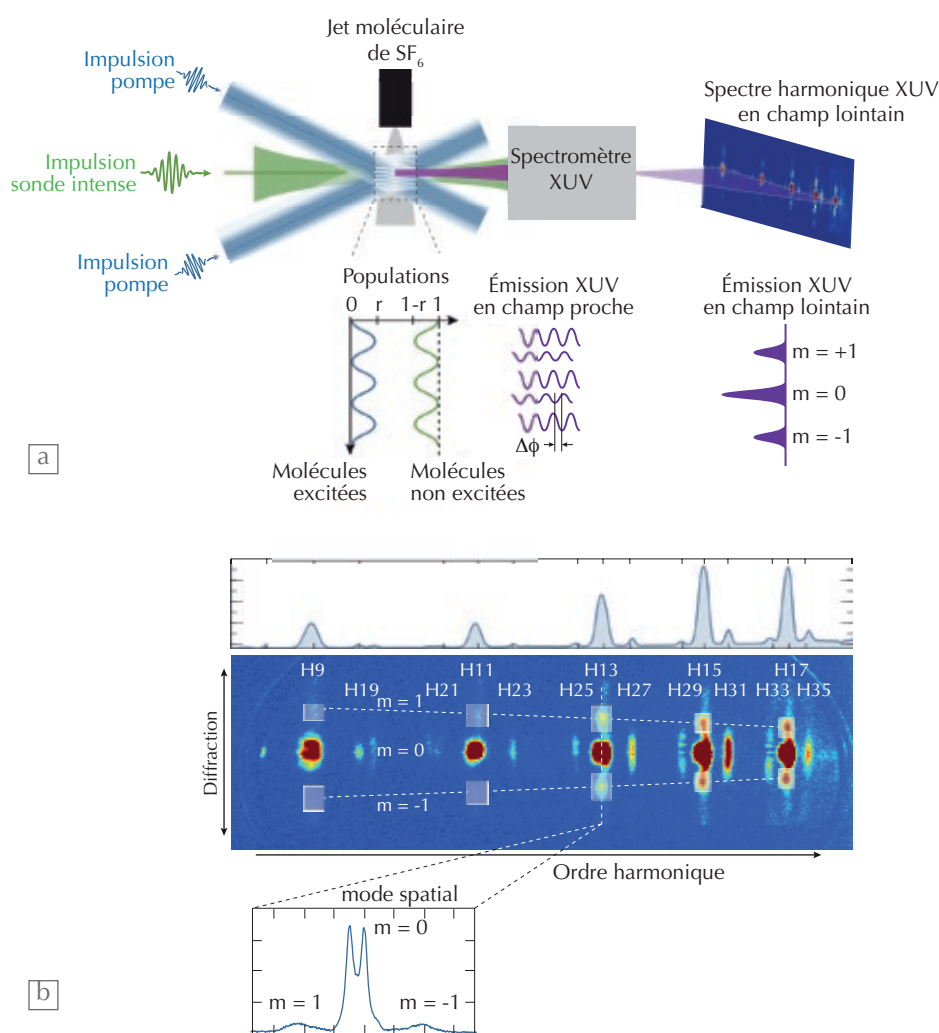
- (a) **Schéma de la photodissociation de ClN_3** initiée par une impulsion pompe à 268 nm (4,6 eV), conduisant à la dissociation en deux fragments, Cl et N_3 .
- (b) Coupes des sphères de Newton des fragments Cl et N_3 , qui donnent la distribution d'énergie cinétique translationnelle (TER) conférée aux fragments. Ces distributions sont centrées autour de 2 eV, avec une largeur de 0,43 eV. Le graphe montre que 28,5% de l'énergie initiale disponible (2,8 eV) est déposée dans N_3 . La composante à 2 eV apparaît sur les deux fragments en 260 fs, ce qui correspond au temps de dissociation.
- (c) Évolution, en fonction du délai Δt entre les impulsions pompe et sonde, de la coupe de la sphère de Newton du fragment N_3 , qui permet d'en déduire l'évolution du paramètre d'anisotropie β . La position relative des fragments au sein de l'édifice ClN_3 est instaurée sur 170 fs (correspondant à la constante de temps de la décroissance de β), bien avant que la photodissociation ne prenne place sur 260 fs. Cette préorientation ne dépend pas de la polarisation relative des impulsions pompe et sonde (parallèles en points bleus, ou perpendiculaires en points gris).

Détection des produits de réaction par spectroscopie d'harmoniques

Tout comme dans l'imagerie de vecteurs vitesses, les expériences sont effectuées en phase gazeuse, avec une ou plusieurs impulsions pompe déclenchant une dynamique moléculaire. Un exemple est proposé dans la figure 2a. L'impulsion sonde est maintenant constituée par une impulsion laser intense (10^{13} - 10^{14} W/cm², correspondant à un champ électrique de 10^8 - 10^9 V/cm induisant une force sur les particules proche des forces de liaison des électrons de valence aux noyaux). Il en résulte un abaissement transitoire de la barrière d'énergie potentielle coulombienne qui retient les électrons de valence au cœur ionique. Un électron peut alors s'échapper

par effet tunnel au travers de cette barrière, dont les propriétés dépendent de l'orientation relative entre la direction moyenne du nuage des électrons de valence et la polarisation linéaire de l'impulsion sonde. Cet électron quasi libre est accéléré par le champ laser sonde et accumule de l'énergie cinétique avant de revenir vers l'ion parent lorsque le signe du champ laser oscillant s'inverse, et de se recombiner avec le cœur ionique. La molécule, alors très fortement excitée (entre 10 et 50 eV d'énergie interne), se relaxe instantanément vers l'état fondamental neutre en émettant un rayonnement XUV (fig. 2). Ce processus d'émission encode donc les moments de transition entre état initialement excité et état fondamental dans le rayonnement lumineux émis.

►►►



2. Exemple d'expérience utilisant la spectroscopie d'harmoniques pour la détection des produits de réaction.

(a) Deux impulsions pompe (en bleu) interfèrent spatialement pour créer un réseau transitoire d'excitations Raman de molécules SF_6 . Dans la zone d'intersection des deux impulsions, la fraction de la population des molécules vibrationnellement excitées est illustrée par la courbe oscillante bleue qui reproduit le profil du réseau créé : une fraction maximale « r » des molécules est excitée aux maxima d'intensité lumineuse de la figure d'interférences (laissant donc une fraction « $1-r$ » de molécules non excitées). Cette modulation spatiale transitoire de l'excitation vibrationnelle des molécules est mise en évidence par une impulsion sonde intense (en vert) de longueur d'onde centrée autour de 800 nm (ou 1,55 eV). Cette impulsion sonde génère un rayonnement dans le domaine XUV, détecté et imagé par un spectromètre. La phase du rayonnement XUV émis dépend du degré de vibration des molécules, avec une différence de phase $\Delta\phi$ entre les molécules excitées et celles non excitées. Ainsi, le réseau spatial modulé en amplitude l'est aussi en phase. Il en résulte la diffraction de ce rayonnement XUV pour résoudre spatialement ses différentes composantes de fréquence (les harmoniques notées H_n pour la n -ième harmonique d'énergie $n \times 1,55$ eV) et les ordres de diffraction $m = 0, \pm 1$.

(b) La figure montre, en fausses couleurs, le spectre de diffraction enregistré (échelle verticale) pour les différentes harmoniques (échelle horizontale). Dans le cas présenté, les harmoniques collectées sont H9 à H17 dans le premier ordre du spectromètre XUV, et H19 à H35 dans le deuxième ordre de ce spectromètre. Le signal pompe-sonde est principalement contenu dans les harmoniques diffractées ($m = \pm 1$), le signal non diffracté ($m = 0$) étant totalement saturé par l'ionisation [12].

Références

- 1• J. Eggers et E. Villermaux, *Rep. Prog. Phys.* **71** (2008) 036601.
- 2• J.H. Nielsen et al., *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 193001.
- 3• V. Blanchet et al., *J. Chem. Phys.* **128** (2008) 164318.
- 4• T. van Oudheusden et al., *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 264801.
- 5• P. Hockett et al., *Nat. Phys.* **7** (2011) 612.
- 6• N. Thire et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12** (2010) 15644, et **13** (2011) 18485.
- 7• T. Ruchon et al., *Reflète de la physique* **21** (2010) 30.
- 8• S. Awali et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16** (2014) 516.
- 9• D. Staedter et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16** (2014) 540.
- 10• K. Zhao et al., *Optics Letters* **37** (2012) 3891.
- 11• H.J. Worner et al., *Science* **334** (2011) 208.
- 12• A. Ferré et al., <http://arxiv.org/abs/1403.2476>.

>>>

Si l'impulsion sonde est proche d'un cycle optique unique, l'émission XUV est construite une seule fois, produisant ainsi une impulsion unique de plusieurs dizaines d'attosecondes [10]. Toutefois, dans la majorité des expériences, l'impulsion sonde est constituée d'une dizaine de cycles optiques, chacun produisant deux impulsions XUV. Les interférences optiques entre ces émissions XUV séparées temporellement d'une demi-période optique du champ laser intense produisent un peigne de fréquences dans le domaine XUV, constitué d'harmoniques d'ordre élevé de la fréquence laser.

La **spectroscopie d'harmoniques** ou spectroscopie par paquets d'électrons attosecondes consiste à enregistrer, en fonction du délai pompe-sonde, le spectre du rayonnement XUV émis, sa phase, ou encore son état de polarisation. Ces différentes propriétés sont extrêmement sensibles à l'état interne de la molécule sondée. Ainsi, une variation de 1 % de la longueur d'une liaison moléculaire peut produire 10 % de modulation dans l'intensité des harmoniques. C'est ce qu'illustre la figure 2, où une modulation spatiale de l'excitation vibrationnelle (et donc de la longueur des liaisons moléculaires) de molécules SF_6 est induite par une paire d'impulsions pompe.

Cette spectroscopie tout optique, qui en est encore à ses balbutiements, s'est déjà révélée particulièrement appropriée pour mesurer des photodissociations, des relaxations vibrationnelles ou des couplages vibroniques (couplages entre états électroniques dus à une vibration) [11]. De plus, la génération d'harmoniques étant intrinsèquement un processus à l'échelle attoseconde (qui correspond à la dynamique du mouvement des électrons de valence dans la molécule), cette spectroscopie ouvre la voie à la caractérisation des dynamiques électroniques induites par le champ laser intense entre l'ionisation et la recombinaison. Bien que ne permettant pas de remonter aux bilans d'énergie et de masse comme dans les imageurs de vecteurs vitesses, cette méthode émergente présente une grande sensibilité aux relations de phase et aux changements de symétrie. Elle devient ainsi très complémentaire des imageurs. ■

Remerciements à Véronique Pierron-Bohnes, Nadine Halberstadt et Olivier Dulieu pour la relecture de cet article, ainsi qu'à David Staedter et Yann Mairesse en tant que collaborateurs des travaux présentés ici.

Une sélection de livres sur le thème Femmes et science



Femmes de sciences, de l'Antiquité au XIX^e siècle *Réalités et représentations*

Textes réunis et introduits
par Adeline Gargam

Éditions universitaires de Dijon
(345 p., 22 €, 2014)

Ce livre se propose de suivre les femmes européennes et américaines dans leur conquête des sciences. Figures et trajectoires de femmes de sciences, méconnues ou laissées-pour-compte, se révèlent au miroir de leurs disciplines et de leurs pratiques. Leurs différents parcours témoignent de la variété des rôles joués par les femmes dans la production et la transmission de la culture scientifique. L'histoire de ce combat révèle également la diversité des stratégies qu'il leur a fallu déployer pour se faire une place dans ce territoire masculin de la connaissance. On découvrira aussi, dans cet ouvrage, les jugements portés sur ces femmes de sciences, par le biais de leurs ambivalences et de leurs contradictions. Tantôt décriées parce que femmes, tantôt admirées pour leurs compétences, elles ont dû âprement gagner leur place dans le sanctuaire du savoir scientifique.



Leçons de Marie Curie

Marie Curie et Isabelle Chavannes

EDP Sciences (128 p., 14 €, 2003)

En 1907, doutant des capacités de l'éducation nationale de bien instruire sa fille Irène, âgée de 10 ans, Marie Curie crée une coopérative d'enseignement avec des collègues de la Sorbonne, dont Jean Perrin et Paul Langevin. Elle imagine et assure ces cours élémentaires de physique-chimie qui reposent sur l'expérimentation et le questionnement. Les notes d'Isabelle Chavannes, une de ses élèves, sont les seules traces qu'il nous reste de ces leçons.

Cet ouvrage a reçu le prix Lignes de science 2006, décerné par un jury de lycéens à un ouvrage de vulgarisation scientifique, et a été traduit dans de nombreuses langues.



Trop belles pour le Nobel *Les femmes et la science*

Nicolas Witkowski

Éditions du Seuil, collection Points Sciences
(288 p., 8 €, 2007)

Nul n'ignore que la science a longtemps été le domaine exclusif d'*Homo mathematicus*, que les femmes savantes sont ridicules et que les ingénieures ne sont pas légion. Mais si les sciences dures marchent à la testostérone, c'est aussi que leur histoire a été écrite par des hommes, attentifs à prouver par $X + Y$ que les femmes sont génétiquement incapables de rigueur logique et d'abstraction. Pour en finir avec cette histoire truquée où les femmes sont soit des curiosités de la nature, soit des muses, soit des potiches, l'auteur a préféré le mode de l'anecdote à celui de la grande synthèse théorique. De la femme de Cro-Magnon à Diane Fossey en passant par Émilie du Châtelet et Ada Lovelace, les héroïnes célèbres côtoient des inconnues non moins illustres, toutes témoignant de l'omniprésence des femmes au cœur de la science.

Mais aussi :

- Eileen Pollack, *Why Are There Still So Few Women in Science?* 2013, article dans le New York Times, en ligne : www.nytimes.com/2013/10/06/magazine/why-are-there-still-so-few-women-in-science.html?pagewanted=all&r=0
- Virginia Valian, *Why So Slow? The Advancement of Women*, The MIT Press, 1998.
- Béatrice Didier, Antoinette Fouque, Mireille Calle-Gruber (dir.), *Dictionnaire universel des créatrices*, Éditions des Femmes, 2013, partiellement en ligne.
- Éric Sartori, *Histoire des femmes scientifiques de l'Antiquité au XX^e siècle : les filles d'Hypatie*, Plon, 2006.
- Gérard Chazal, *Les femmes et la science*, Ellipses, 2006.
- Jean-Pierre Poirier, *Histoire des femmes de science en France. Du Moyen-Âge à la Révolution*, Pygmalion, 2002.
- Jean C. Baudet, *Curieuses histoires des Dames de la Science. Les pionnières de la recherche*, Jourdan, Bruxelles, 2010.
- Mission pour la place des femmes au CNRS, *Les femmes dans l'histoire du CNRS*, 2004.
- Commission Femmes dans la Recherche SNCS, *La recherche des femmes (Enquête, réflexions sur les femmes chercheurs au CNRS)*, 1981, en ligne : <http://snscs.fr/La-recherche-des-femmes>
- Nina Byers et Gary Williams, *Out of the Shadows: Contributions of Twentieth-Century Women to Physics*, Cambridge University Press, 2006, partiellement en ligne.
- Élisabeth Badinter, *Émilie, Émilie : l'ambition féminine au XVIII^e siècle*, Le Livre de Poche, 1997.
- Hélène Langevin-Joliot et Monique Bordry, *Marie Curie et ses filles. Lettres*, Pygmalion, 2011.

Étudier la structure des membranes biologiques : l'intérêt des systèmes modèles et des neutrons

Giovanna Fragneto (fragneto@ill.eu)

Institut Laue-Langevin, 71 avenue des Martyrs, 38042 Grenoble Cedex 9

Les cellules, unités de base des êtres vivants, sont bien délimitées et séparées de l'extérieur par des membranes. Capables à la fois d'enfermer les constituants cellulaires et d'autoriser des échanges avec l'extérieur, ces membranes sont ultrafines. L'ensemble des membranes d'un corps humain couvre une superficie de quelques hectares, mais ne constitue qu'une petite partie de notre masse.

Pour étudier la dynamique et la fonction de ces objets étonnants, les physiciens cherchent en premier lieu à comprendre leur structure. Cela passe par des expériences sur des systèmes modèles, plus simples et mieux contrôlés, grâce à une sonde de la matière qui accède à différentes échelles de taille et de temps : les neutrons thermiques.

La cellule est une unité structurale et fonctionnelle de la plupart des organismes vivants ; un être humain en contient environ cent mille milliards. Chaque cellule est entourée d'une membrane. Une estimation sommaire indique que l'ensemble des membranes cellulaires de notre corps couvre une superficie d'environ trois hectares [1]. La membrane entourant la cellule est un élément essentiel dans tout être vivant. Elle doit à la fois être assez étanche pour séparer la cellule de l'extérieur et permettre les échanges de matière depuis et vers la cellule : nutrition, respiration. Elle est semi perméable et contribue à réguler activement ces échanges. Elle joue également un rôle dans la communication entre deux cellules voisines (transmission de signaux) et dans l'adhésion cellulaire. On trouve aussi une importante quantité de membranes à l'intérieur même d'une cellule, où elles délimitent les compartiments intracellulaires.

De nombreuses maladies sont liées à un problème de régulation de la composition membranaire : c'est le cas de l'athérosclérose. De même, le cholestérol est indispensable à l'activité cellulaire, et des mécanismes de transport inappropriés peuvent conduire à l'apparition de maladies mortelles.

Pourquoi s'intéresser à la structure des membranes biologiques ?

Les membranes sont fines, tout en étant robustes. Ces propriétés remarquables sont réalisées grâce à une structure optimisée par des milliards d'années d'évolution.

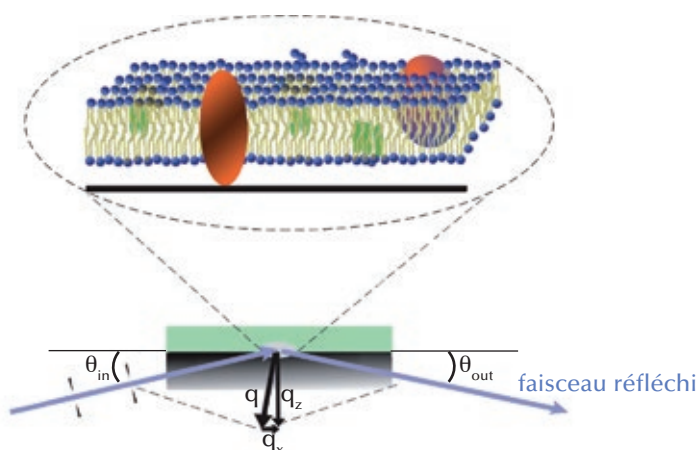
Les principaux composants structurels des membranes sont des lipides, en majorité des phospholipides, mais aussi du cholestérol. Les phospholipides sont des molécules qui ont une partie (tête) qui aime l'eau, hydrophile, et une partie carbonée, hydrophobe. En présence d'eau, ils sont capables de s'auto-assembler sous forme de bicouche continue (fig. 1) : ils présentent leurs têtes vers l'extérieur, donc vers les milieux aqueux à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule. Les parties carbonées sont prises en sandwich et forment une barrière.

Les membranes peuvent incorporer une grande quantité de protéines variées, dites « membranaires », pouvant constituer jusqu'à la moitié de leur masse, et parfois plus (fig. 1). Ces protéines s'intègrent entre les queues des lipides et participent aux échanges de matériel d'un côté à l'autre de la membrane.

Très robustes, d'une épaisseur d'environ 5 nm pour une surface de plusieurs dizaines de micromètres carrés, les bicouches peuvent servir de support expérimental aux études théoriques d'objets à deux dimensions. Ainsi, des modèles de la forme des bicouches ont été élaborés, basés sur leur tension et leur rigidité de courbure. Ces mêmes modèles permettent de comprendre comment des objets fins, comme les membranes, fluctuent sous l'effet de leurs interactions avec les molécules d'eau : la rigidité de courbure contrôle les toutes petites échelles ; les grandes échelles sont contrôlées par une éventuelle force extérieure (par exemple la présence d'une paroi solide ou d'une cellule voisine) ; entre les deux, les échelles intermédiaires sont régies par la tension de surface.



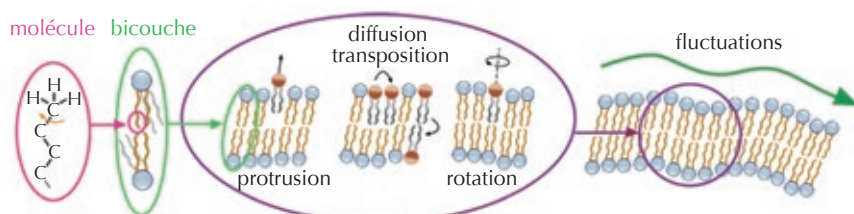
L'Institut Laue-Langevin à Grenoble est un centre de recherche international. Le réacteur, modéré à l'eau lourde, d'une puissance de 58 MW, source intense de neutrons thermiques, se trouve sous la coupole. Une quarantaine d'instruments scientifiques, placés tout autour du cœur du réacteur, permettent des applications allant de la physique fondamentale à la biologie, en passant par la cristallographie, la chimie ou la science des matériaux.



1. Bicouche de lipides sondée par réflectivité de neutrons.

En haut : schéma d'une bicouche de lipides, ici déposée sur une surface solide (en noir). Les phosphocholines sont des lipides constitués d'une extrémité qui se place dans l'eau (tête « hydrophile », schématisée par une boule bleue) et de deux longues chaînes carbonées insolubles dans l'eau (queues « hydrophobes », dans lesquelles les groupes carbone-hydrogène sont représentés en jaune). Elles se disposent en bicouches : deux feuillets, où les têtes se placent face à l'eau. Des protéines, dites « membranaires » (en vert et orange), peuvent s'insérer dans une bicouche.

En bas : en réflectivité de neutrons, un faisceau délimité par des fentes arrive sur la surface avec un angle d'incidence θ_{in} . L'analyse du faisceau réfléchi (réflectivité spéculaire, $\theta_{out} = \theta_{in}$, comme sur un miroir) permet d'extraire des informations sur la structure et la composition des lipides dans la direction perpendiculaire au plan de la bicouche (q_z). En plaçant le détecteur hors du faisceau réfléchi (réflectivité non spéculaire, $\theta_{out} \neq \theta_{in}$), on sonde la structure de la bicouche dans son plan (q_x).



$\sim 6 \times 10^2 \text{ nm}^{-1}$	Vecteur de diffusion	$\sim 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$
$\sim 0,01 \text{ nm}$	Échelle de longueur	$\sim 6 \times 10^2 \text{ nm}$
$\sim 10^3 \text{ meV}$	Transfert d'énergie	$\sim 10^{-6} \text{ meV}$
$\sim 6 \times 10^{-3} \text{ ps}$	Échelle de temps	$\sim 6 \times 10^6 \text{ ps}$

2. Échelles de taille, de temps et d'énergie caractéristiques de la structure et de la dynamique des bicouches, accessibles aux neutrons.

Les lipides des membranes soulèvent des questions de fond. Par exemple, pourquoi y a-t-il dans les membranes des différentes cellules une grande variété de lipides, au moins 1500 types différents ? Et pourquoi tous ces lipides sont-ils chimiquement différents de ceux des anciennes bactéries, les *Archaea* ? Pourquoi est-ce que l'on observe à l'état naturel une ségrégation des lipides et non pas un mélange complet ? Plus précisément, il a été observé des structures qui représentent entre 10% et 30% du volume de la membrane. Elles sont surnommées « radeaux » car ce sont des microdomaines rigides qui se déplacent latéralement en bloc, comme s'ils flottaient, dans le plan de la membrane. Quels sont leurs propriétés et leur intérêt pour la cellule ?

Les études de bicouches lipidiques sont importantes, tant du point de vue fondamental qu'en raison de la grande variété des applications possibles. Elles ont un intérêt pharmacologique, puisque le transport d'un médicament à travers une membrane dépend des propriétés physico-chimiques de celle-ci. Leurs applications en nanobiotechnologie incluent le développement de biocapteurs. Les revêtements biofonctionnels des organes artificiels et les dispositifs médicaux implantés sont d'autres domaines d'utilisation.

La robustesse des bicouches est compatible avec leur grande adaptabilité, liée à la richesse de leur dynamique. Ainsi, les molécules de lipides ont plusieurs types de mouvements individuels (fig. 2) [2] :

- D'une part des mouvements de *diffusion* au sein du plan de la membrane. Une





membrane peut se comporter comme un solide à deux dimensions, avec les propriétés d'un gel et des coefficients de diffusion latérale des molécules relativement lents, inférieurs à 10^{-3} micromètres carrés par seconde. Elle peut subir une transition de phase (fig. 5) : au-dessus d'une température de transition, elle se comporte comme un liquide à deux dimensions. Les molécules y diffusent latéralement, comme si elles étaient libres : elles peuvent explorer en quelques secondes l'ensemble d'une membrane de plusieurs dizaines de micromètres carrés. Quand la membrane est composée d'un mélange de nombreux lipides différents, elle a en général ce comportement liquide.

- En outre, les lipides peuvent aussi facilement *tourner* sur eux-mêmes dans la membrane, en des temps rapides, de l'ordre de 10 nanosecondes.
- Ensuite, au sein de la bicouche, une molécule de lipide peut passer d'une monocouche de la membrane à une autre. Ce phénomène de *transposition*, ou *flip-flop*, peut prendre des minutes ou des heures (ce qui est très lent pour des molécules), car la structure de la bicouche est robuste : c'est coûteux en énergie de faire passer une tête polaire à travers la zone hydrophobe de la bicouche. Le *flip-flop* est favorisé par certaines molécules, telles que des enzymes, ou la présence de pores à travers la membrane.
- Enfin, un lipide peut sortir de la membrane sur une hauteur de l'ordre de la fraction de nanomètre. Ce phénomène de *protrusion* se produit sur une échelle de temps de l'ordre de la nanoseconde.

Quels systèmes modèles ?

En raison de la complexité des membranes cellulaires, et de la variété des échelles de taille et de temps qu'elles mettent en jeu, leur caractérisation structurale est un défi. Une approche classique consiste à recourir à des systèmes simplifiés. Ceux-ci doivent être suffisamment proches des membranes réelles pour être qualifiés de biomimétiques, tout en étant assez simples pour être accessibles à des mesures physiques. Comme les membranes réelles, ils doivent être à la fois robustes et flexibles. Dans la plupart des cas, la composition est d'abord limitée à un seul type de lipide, avant de progressivement en mélanger plusieurs.

Historiquement, les *empilements multilaminaires* faits de centaines ou de milliers de bicouches ont été utilisés en premier. On peut définir et mesurer précisément leur hydratation. Déposés sur des surfaces solides, leur emplacement est bien contrôlé, ce qui permet de les positionner dans un faisceau de neutrons ou de rayons X, par exemple. La grande quantité de matière qu'ils contiennent les rend accessibles même aux techniques peu sensibles.

Quand on s'intéresse aux effets de paramètres extérieurs comme le pH et la force ionique, ou aux interactions avec des molécules externes à la membrane, il est préférable d'analyser une seule bicouche à la fois, dans l'eau. Une *bicouche supportée* est déposée sur une paroi solide, qui l'attire et la maintient en place (fig. 1) [3]. En plaçant à quelques nanomètres de distance une *bicouche flottante*, c'est-à-dire une deuxième bicouche qui est libre (fig. 4), on peut étudier les fluctuations d'une bicouche, ou les interactions entre deux bicouches voisines [4].

Les *vésicules* (ou *liposomes*) sont des bicouches plus ou moins sphériques, qui enferment un volume d'eau (fig. 3). On peut fabriquer des petites vésicules en les forçant à passer à travers un filtre, avec des pores typiquement de quelques dizaines ou centaines de nanomètres de diamètre.

Quelles études avec les neutrons ?

Aux échelles micrométriques, des techniques variées permettent de sonder la structure et les propriétés élastiques des bicouches lipidiques ; c'est le cas de la microscopie optique ou de la diffusion de la lumière. Aux échelles bien plus petites, au niveau moléculaire, on utilise entre autres la résonance magnétique nucléaire, ou des simulations numériques qui élucident en détail les relations entre la structure chimique et les propriétés physiques de divers lipides. Entre ces échelles de la molécule et du micromètre, les techniques de diffusion de neutrons thermiques (d'énergie comprise entre 10^{-3} et 10^{-1} eV) jouent un rôle privilégié. Ce sont des outils non destructifs pour caractériser la structure et la dynamique des systèmes biomimétiques, aux échelles allant des dixièmes jusqu'aux dizaines de nanomètres et de la picoseconde à la milliseconde (fig. 2).

Leur puissance tient surtout à leur *pouvoir de pénétration*. Du fait que leur charge électrique est nulle, les neutrons peuvent pénétrer la matière sans être arrêtés par

une barrière coulombienne. Ils sondent ainsi l'intérieur des échantillons. Dans la matière non magnétique (comme ici l'eau et les macromolécules biologiques), leur interaction se fait essentiellement avec les noyaux atomiques, *via* les forces nucléaires à courte portée.

La principale originalité des techniques de diffusion neutronique est la possibilité d'utiliser la *substitution isotopique* pour mettre en évidence les parties d'intérêt dans les systèmes étudiés. L'hydrogène et son isotope le deutérium ont des propriétés chimiques similaires, mais ils interagissent de manière très différente avec les neutrons. Autrement dit, si l'on remplace certains noyaux d'hydrogène d'un échantillon de matière molle ou de biologie (ou ceux de l'eau environnante) par des noyaux de deutérium, on ne change quasiment pas les caractéristiques physiques et chimiques de l'échantillon, mais on annule le contraste aux neutrons de telle ou telle partie de l'échantillon, ce qui rend les autres sélectivement visibles [5].

Les techniques neutroniques qui ont été principalement utilisées pour les études des membranes donnent accès à des informations à des échelles variées (fig. 2). Ainsi :

- la *diffraction* détermine la structure des systèmes lamellaires lipidiques empilés ;
- la *diffusion aux petits angles* fournit des informations (moyennes, plutôt que détaillées) sur la forme, la taille et les interactions de systèmes en solution, ou des vésicules lamellaires lipidiques ;
- la *réflectivité spéculaire* (fig. 1) sonde la structure d'une bicouche dans la direction perpendiculaire à son plan ;
- la *réflectivité non spéculaire* et la *diffusion aux petits angles en incidence rasante* peuvent, entre autres, sonder les structures latérales aux échelles du micromètre ou du nanomètre, respectivement ;
- enfin, la *diffusion inélastique* permet d'étudier la dynamique, sur des échelles de longueur de un à cent nanomètres et des échelles de temps allant de la fraction de picoseconde à la milliseconde.

Par exemple, des expériences de réflectivité de neutrons ont permis de confirmer la présence de protrusions pour des lipides décorés avec le polymère soluble polyéthylène-glycol, ou de mesurer le potentiel d'interaction d'une bicouche de phosphocolines avec une paroi solide.

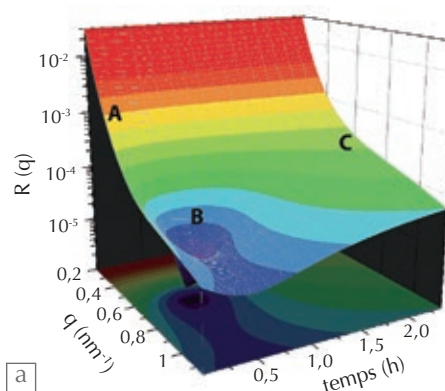
Vers des systèmes de plus en plus complexes

Les membranes biologiques réelles ont différents composants, lipides et protéines, qui sont distribués de façon très hétérogène, formant des domaines ; ceux-ci sont impliqués dans la transmission de signaux entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule. Les efforts actuels sont consacrés à l'exploration de systèmes, tels que des lipides naturels extraits de cellules, permettant de se rapprocher de plus en plus de cette réalité complexe.

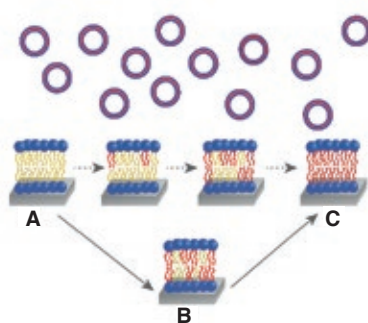
Par exemple, le cholestérol est un composant de base des membranes. Il forme des domaines, donc sa distribution latérale est hétérogène. Il est présent en quantités différentes entre les deux feuillets de la membrane, ce qui crée également une hétérogénéité transversale : la monocouche interne à la cellule et la monocouche externe sont différentes. Nous avons étudié de telles bicouches asymétriques, en l'occurrence des bicouches flottantes fluides, où du cholestérol a été mélangé à des phospholipides en proportion réaliste (18% molaire). Par réflectivité de neutrons, nous avons observé que le cholestérol ne migre pas d'une bicouche à l'autre [6].

En revanche, nous avons pu suivre la redistribution des phospholipides d'une bicouche à l'autre. Pour déterminer plus précisément à quelle vitesse se fait cette redistribution, nous avons eu recours à la deutération (fig. 3) : une grande quantité de vésicules faites de lipides contenant du deutérium (« vésicules deutérées ») est mise en présence d'une bicouche dont les lipides sont normaux (« bicouche hydrogénée »), ou *vice versa*. Grâce à la résolution spatiale et temporelle de la réflectivité des neutrons, il a été possible de suivre en fonction du temps l'échange des phospholipides grâce auquel, après trois heures, la bicouche finit par être complètement deutérée [7].

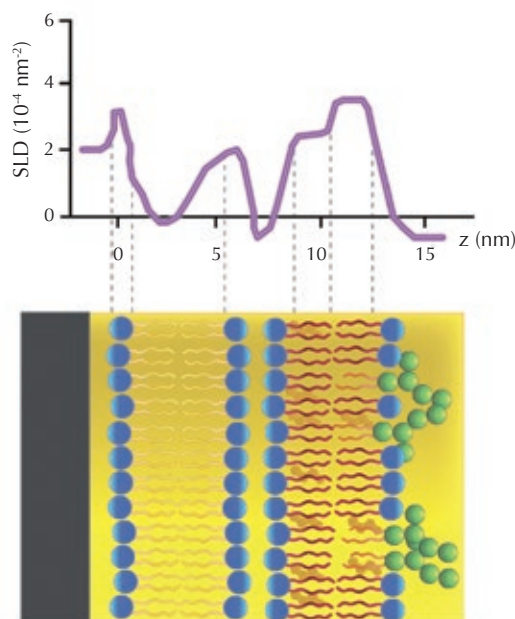
Nous avons aussi étudié le couplage du cholestérol à une molécule appelée le ganglioside GM1 [6]. Le GM1 s'associe au cholestérol pour former des domaines spécifiques, essentiels pour la cellule, non seulement pour la forme de la membrane (par exemple, ces domaines sont la base de la déformation en trois dimensions qui donne lieu à la formation de petites cavités, les « cavéoles »), mais aussi pour des fonctions biologiques telles que la régulation des



(a)



(b)



4. Cholestérol et ganglioside GM1 dans une bicouche flottante.

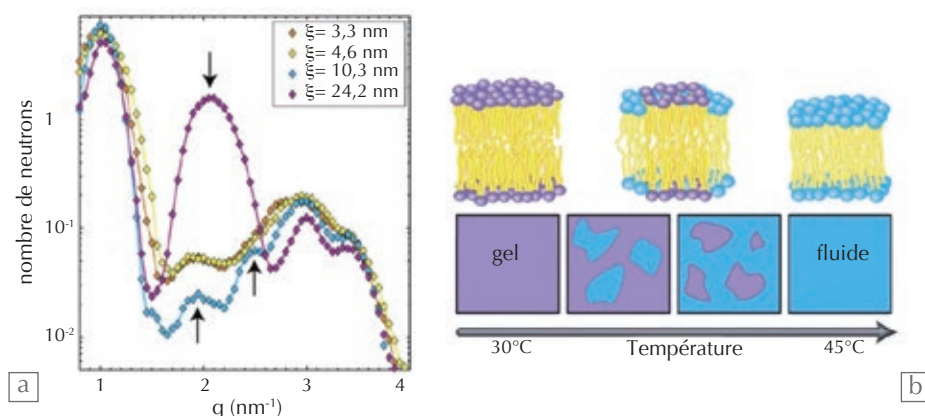
En haut : densité de longueur de diffusion (SLD) de neutrons en fonction de la distance z à la surface solide. La longueur de diffusion représente l'amplitude de l'onde diffusée par le noyau de l'isotope considéré. Dans ces unités, la matière hydrogénée apparaît proche de 0, la matière deutérée proche de 6, ce qui détermine le contraste. Entre $z = 8,5$ et 12 nm (bicouche flottante), le profil est asymétrique.

En bas : Interprétation des mesures de réflectivité de neutrons. L'eau est représentée en jaune. La bicouche proche du substrat a des queues hydrogénées, représentées elles aussi en jaune pour indiquer qu'elles sont masquées par leur absence de contraste avec l'eau. La bicouche flottante a des queues deutérées (rouge), ce qui rend visible le cholestérol hydrogéné (beige) inséré entre les queues. Le ganglioside GM1 (têtes en vert) est inséré uniquement dans le deuxième feuillet de la bicouche flottante, et il régule la répartition de cholestérol à des valeurs d'environ 70% et 30% dans le premier et le second feuillet respectivement. (D'après [6].)

3. Échange de lipides entre bicouches. Une bicouche formée de lipides normaux (non deutérés), déposée sur une paroi solide (silicium), est mise en présence d'une suspension de vésicules faites de lipides deutérés.

(a) Réflectivité de neutrons. Le nombre de neutrons réfléchis, $R(q)$, est tracé en fonction du vecteur d'onde transféré, q . La mesure est répétée pendant près de trois heures, pour suivre la cinétique de l'échange.

(b) Interprétation des mesures (les lettres A, B et C renvoient à la figure (a)). Dans la bicouche (exagérément grossie par rapport aux vésicules), les lipides hydrogénés (jaunes) sont remplacés par les lipides deutérés (rouges) venant des vésicules en solution d'eau (normale, non deutérée). Le mécanisme de remplacement dans les deux feuillets (B) domine ici le mécanisme par insertion dans le premier feuillet, suivie de transposition. Le silicium, la bicouche et la solution ont des contrastes visibles aux neutrons, et les vésicules sont trop éloignées de la surface pour être visibles. En quelques dizaines de minutes, des lipides hydrogénés et deutérés sont mélangés, ce qui fait chuter le contraste (B). Après trois heures, tous les lipides de la bicouche sont deutérés (C), ce qui fait remonter le contraste avec la solution, donc $R(q)$. (D'après [7].)



5. Transition gel-liquide à deux dimensions dans une bicouche faite d'un seul type de phospholipides, où les queues ont seize carbones.

(a) Diffraction de neutrons par des multicouches. Le nombre de neutrons diffractés, rapporté au nombre de neutrons incidents, est tracé en fonction du vecteur d'onde transféré q (grandeur qui dépend de l'angle θ et de la longueur d'onde λ du faisceau incident : $q = 4\pi \sin\theta / \lambda$). Les courbes sont mesurées à 40°C, dans le domaine biphasé, et on observe des pics de diffraction, dont l'intensité dépend de la longueur de cohérence ξ du faisceau (dont les valeurs sont indiquées dans l'insert). Pour une longueur de cohérence inférieure ou égale à 10,3 nm, l'un des pics se dédouble (flèches), ce qui indique la présence d'inhomogénéités d'épaisseur.

(b) Interprétation des mesures. À 30°C, la bicouche est en phase gel (schématisée par des têtes mauves et des queues jaune vif). À 42°C et plus, la bicouche est fluide (têtes bleu ciel et queues jaune pâle). De 38°C à 41°C, on observe des inhomogénéités d'épaisseur, qu'on interprète comme une coexistence entre domaines gels et fluides. (D'après [8].)

>>>

récepteurs transmembranaires. Grâce, ici encore, à la réflectivité de neutrons et à la substitution d'hydrogène par du deutérium, il a été possible d'étudier comment évolue la distribution du cholestérol quand du GM1 est incorporé dans un seul feuillet (fig. 4). Cette répartition asymétrique du GM1 favorise une répartition asymétrique du cholestérol, ce qui confirme le couplage entre ces deux molécules. Ce résultat, déjà prédit, n'avait pourtant jamais été observé.

Enfin, les microdomaines latéraux (« radeaux ») dans les membranes sont des structures dynamiques prédites mais très difficiles à observer, probablement parce qu'ils fluctuent latéralement à des échelles de temps entre la nano- et la microseconde. Des expériences de diffraction de neutrons ont permis d'apporter la première preuve expérimentale directe de la coexistence de domaines gel et fluide dans une membrane (faite d'un seul type de phospholipide), autour de sa température de transition (fig. 5) [8]. L'astuce a consisté à utiliser la diffraction de neutrons sur des empilements multilaminaires de bicouches, en faisant varier de 3 à 24 nanomètres la « longueur de cohérence » du faisceau (extension de l'onde plane au niveau de l'échantillon). Cette quantité définit la limite inférieure de la taille des structures qui peuvent être observées. Selon la valeur de cette longueur,

on peut observer des pics de diffraction, qui révèlent que les lipides sont ordonnés, tant dans le plan de la membrane que perpendiculairement à ce plan. Cela permet d'estimer l'échelle des domaines : ils sont de taille nanométrique. Au cours de la transition de phase principale, on observe la coexistence de domaines en phase gel et fluide. Cette technique devrait pouvoir être étendue aux lipides extraits de membranes naturelles.

Perspectives

Les techniques dans l'espace réel, comme le microscope à force atomique, ont certes beaucoup progressé au cours des dernières décennies. Cependant, la diffusion de neutrons donne des résultats complémentaires et reste très utilisée. Une de ses applications de plus en plus fréquente est l'étude de la structure à l'échelle nanométrique de membranes modèles et de leurs interactions avec des protéines ou peptides participant à des fonctions cellulaires importantes.

La deutération de protéines devient une technique courante, qui permet d'utiliser les neutrons pour affiner des détails des interactions protéines-lipides et de la structure des protéines aux interfaces. La diffusion des neutrons aux petits angles a une résolution de l'ordre du nanomètre et, contrairement aux techniques cristallogra-

phiques, peut être utilisée pour sonder une protéine dans son environnement natif, comme au sein d'une membrane ou d'un complexe avec d'autres protéines. De façon analogue, on peut aussi suivre la cinétique de changement de conformation, d'agrégation ou d'interaction de lipides.

Dans des travaux récents, nous montrons qu'il est possible de préparer des extraits de vraies membranes de levures naturelles, pour en faire des bicouches reproductibles et stables. Cela nous a permis d'étudier, par exemple, le mécanisme d'interaction d'une molécule antibiotique comme l'amphotéricine, avec des membranes naturelles contenant du stérol. En effet, des bactéries sont tuées par cette molécule, tandis que les cellules humaines lui résistent. Cela est probablement lié à la présence, dans les membranes humaines, de cholestérol qui a une structure différente de celle des stérols présents dans les bactéries. Nous avons constaté que l'amphotéricine interagit plus fortement avec les membranes de levures qui possèdent du stérol, qu'avec des membranes dépourvues de stérols ou contenant du cholestérol. Nous avons pu déterminer la structure exacte de la membrane et la localisation de la molécule antibiotique sur la membrane.

Dans la biologie de l'avenir, la physique devrait jouer un rôle majeur. Si l'on exploite pleinement leur potentiel, les neutrons pourront aider à démêler les secrets de la vie. ■

Remerciements

L'auteur souhaite remercier François Graner pour son travail d'édition et de correction de cet article, et pour avoir fortement contribué au début de ces travaux, il y a longtemps... sur les membranes modèles.

Références

1. O. Mouritsen, *Life as a Matter of Fact: The Emerging Science of Lipidomics*, Springer-Verlag (2005).
2. R. Lipowsky, "Generic interactions of flexible membranes", dans *Structure and Dynamics of Membranes*, Vol. A, pp. 521-602, eds R. Lipowsky et E. Sackmann, Elsevier, Amsterdam (1995).
3. H.P. Wacklin, *Current Opinion In Colloid & Interface Science*, **15** (2010) 445-454.
4. A. Hemmerle et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **109** (2012) 19938-19942.
5. B. Jacrot, *Rep. Prog. Phys.*, **39** (1976) 911-953.
6. V. Rondelli, G. Fragneto et al., *Biochimica et Biophysica Acta*, **1818** (2012) 2860-2867.
7. Y. Gerelli et al., *Langmuir*, **29** (2013) 12762-12769.
8. C. L. Armstrong et al., *Soft Matter*, **8** (2012) 4687-4694.

2015, ANNÉE DE LA LUMIÈRE en FRANCE

L'organisation internationale des Nations Unies (ONU) a proclamé « 2015, Année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière » (IYL 2015), lors de la 68^e session de sa Conférence générale, le 20 décembre 2013. Cette année internationale est à l'initiative d'un consortium rassemblant un large panel d'institutions scientifiques, et de l'UNESCO. L'ONU reconnaît ainsi la capacité des techniques utilisant la lumière à apporter des solutions aux grands défis contemporains que sont le développement durable, l'énergie, l'éducation, l'agriculture et la santé.

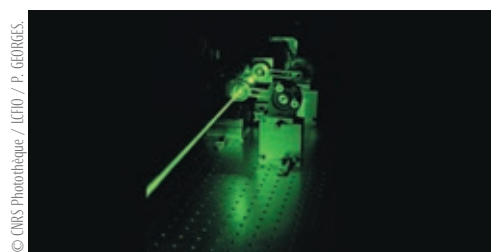
La lumière est un outil universel, et son étude est accessible à tout âge et dans toutes les cultures ; de plus, la lumière est un formidable moteur de motivation pour l'enseignement.

L'Année internationale de la lumière 2015 commémorera de nombreux anniversaires, depuis les premières études sur l'optique, il y a 1000 ans, de Ibn Al-Haytham. 1815 : théorie ondulatoire de la lumière (Fresnel). 1865 : théorie électromagnétique de la propagation de la lumière (Maxwell). 1915 : théorie de la relativité générale (Einstein). 1965 : découvertes du fond diffus cosmologique (Penzias et Wilson) et de l'utilisation des fibres optiques en télécommunications (Kao). Toutes ces découvertes ont profondément changé la physique, et ont un grand impact sur la science et la technologie actuelles.

En France, l'Année internationale de la lumière est coordonnée par un Comité national organisé sous la houlette du CNOP (Comité national d'optique et photonique), et auquel participe la Société Française de Physique. Parrainé par les prix Nobel Claude Cohen-Tannoudji et Serge Haroche, ce comité a pour mission de coordonner, valoriser et labelliser les manifestations organisées en France, qui couvriront plusieurs volets : science, industrie, vie quotidienne, nature, culture, histoire, développement durable, formation des jeunes.



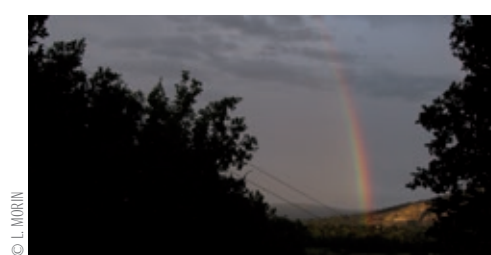
© NASA/JPL-Caltech



© CNRS Photothèque / LCIHO / P. GEORGES



© Kimbomiddet / Rabenkind



© L. MORIN



**INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015**

Site officiel de l'IYL 2015 :

www.light2015.org

Site de l'Année de la lumière en France :

www.lumiere2015.fr

Contact : e.lambouroud@opticsvalley.org

Cérémonie d'ouverture de l'IYL 2015 :

19-20 janvier 2015, UNESCO, Paris

Cérémonie d'ouverture de l'Année de la lumière en France :

8 janvier 2015, Université de la Sorbonne, Paris

Président du Comité de pilotage de l'IYL 2015 :

John Dudley (professeur à l'université de Franche-Comté, Président de la Société Européenne de Physique)

Président du Comité national de l'Année de la lumière en France :

Costel Subran (CNOP)

Une gamma-caméra miniaturisée pour la cancérologie

Stéphanie Pitre-Champagnat (stephanie.pitre@u-psud.fr)

Laboratoire IR4M, UMR 8081, Institut Gustave Roussy, 114 rue Édouard Vaillant, 94805 Villejuif Cedex

En cancérologie, de nouveaux systèmes d'imagerie médicale conçus pour améliorer le diagnostic et guider la thérapie ont bénéficié des avancées technologiques en instrumentation nucléaire.

C'est le cas pour le développement des détecteurs de radioactivité compacts utilisés en bloc opératoire pour guider le chirurgien en temps réel vers les tumeurs préalablement radiomarquées, diminuant ainsi le risque d'une ablation incomplète.

La gamma-caméra appelée POCI a été l'un des premiers dispositifs d'imagerie développé pour l'assistance au traitement chirurgical du cancer, et a été évaluée récemment sur une cohorte de 162 patientes présentant un cancer du sein.

Les termes marqués d'un astérisque sont définis dans le glossaire, p. 45.

Le succès du traitement chirurgical du cancer, qui est actuellement le protocole thérapeutique le plus largement utilisé, repose sur l'identification précise et la résection complète des tissus pathologiques. Cette intervention peut rapidement devenir délicate lorsque la tumeur est mal délimitée, peu accessible ou bien encore de petite taille.

Plusieurs stratégies sont donc employées aujourd'hui pour faciliter l'ablation tumorale comme, par exemple, la localisation de certaines structures à l'aide d'un colorant ou d'un radio-isotope associé à une molécule sensible à la physiologie ou au métabolisme de la tumeur. Dans ce dernier cas, on parle de traitement chirurgical radioguidé où le chirurgien, muni d'une *sonde de comptage de la radioactivité*, est guidé vers les lésions préalablement radio-marquées. Cette méthode de **détection per-opératoire*** permet à la fois de simplifier l'accès à un foyer tumoral, de fournir un facteur discriminant supplémentaire entre tissus sains et tissus tumoraux, et de découvrir parfois des sites pathologiques passés inaperçus lors du bilan diagnostique. Cette technique d'assistance chirurgicale par radioguidage est aujourd'hui une pratique standard en cancérologie, où la résection complète des tissus pathologiques est indispensable pour envisager la rémission du patient.

Cependant, l'expérience clinique a mis en évidence des échecs de détection répétés avec les sondes de comptage, correspondant à des situations anatomiques et physiologiques particulières, comme celles rencontrées lorsque la spécificité du traceur radioactif est faible ou encore lorsque plusieurs foyers de fixation figurent dans le champ de détection du compteur de radioactivité. Ces limitations, inhérentes à la technique

de comptage, peuvent être comblées dans la plupart des cas en ayant recours à un *système de détection réalisant l'image radioactive de la plaie opératoire*. C'est dans ce contexte que les gamma-caméras miniaturisées ont été développées.

L'imagerie gamma per-opératoire pour le traitement chirurgical du cancer

Les dispositifs d'imagerie gamma miniaturisés sont conçus sur le même principe que les gamma-caméras standards, mais leur développement a longtemps été freiné par les dimensions encombrantes des photodétecteurs disponibles. En plus de leur compacité et d'un poids réduit assurant la bonne maniabilité de l'appareil, ces systèmes de radio-imagerie doivent répondre à plusieurs critères de détection imposés par les conditions du radioguidage per-opératoire. D'une part, l'efficacité de détection doit être optimisée en vue d'obtenir des temps de prise d'image aussi brefs que possible pour ne pas retarder l'intervention chirurgicale. D'autre part, la résolution énergétique doit être la meilleure possible pour minimiser les effets de la diffusion des photons gamma dans les tissus environnants, et ainsi ne pas les visualiser sur les images des lésions tumorales radiomarquées. Enfin, une résolution spatiale millimétrique associée à une faible distorsion de l'image sont nécessaires pour permettre la distinction de plusieurs foyers radioactifs dans la plaie opératoire.

En tenant compte des conditions d'utilisation et des performances de détection recherchées, plusieurs groupes de recherche académique en Amérique du Nord, Japon, Italie, Espagne et France, ainsi que quelques

La sonde POCI (Per-Operative Compact Imager), caméra miniature haute résolution comportant un dispositif détectant les rayons gamma et utilisée en bloc opératoire pour cibler des lésions tumorales préalablement marquées de manière radioactive.

© CNRS Photographie / Hubert RAQUET.



industriels, ont développé des gamma-caméras miniaturisées, spécifiquement dédiées à la détection per-opératoire. On dénombre à ce jour dix dispositifs commercialisés et neuf autres développés au sein des laboratoires de recherche. Tous sont composés à l'image d'une gamma-caméra standard, c'est-à-dire d'un collimateur couplé à un système à localisation gamma.

Un collimateur multicanaux, généralement en plomb, permet de sélectionner la direction des rayonnements gamma incidents. Il conditionne ainsi la sensibilité du dispositif qui est comprise entre 0,005% (i.e., 5 photons détectés pour 100 000 émis) et 0,2% à une énergie gamma de 140 keV, ce qui permet des acquisitions d'image en quelques secondes. Pour augmenter cette efficacité de détection, certaines caméras sont pourvues de **collimateurs sténopés***, dits "pinholes", qui conduisent à d'excellentes performances de détection lorsque la caméra est située à moins de 3 cm de la lésion radiomarquée. En contrepartie, ces collimateurs *pinholes* entraînent des effets de grandissement selon la profondeur de l'objet d'intérêt par rapport à la surface du collimateur, et compliquent ainsi l'interprétation des images.

Le système de localisation repose soit sur la mise en œuvre d'un détecteur à semi-conducteur, soit sur un scintillateur couplé à un photodétecteur à faible encombrement. Les imageurs basés sur les semi-conducteurs pixelisés présentent une excellente résolution en énergie, inférieure à 10%, mais une résolution spatiale intrinsèque limitée par une taille des pixels de l'ordre de 2 mm. À l'inverse, les dispositifs à scintillation offrent une bonne résolution spatiale intrinsèque, associée à une résolution énergétique dégradée supérieure à 15%.

Si toutes les gamma-caméras miniaturisées présentent aujourd'hui des performances de détection proches, leurs géométries en revanche diffèrent. Ainsi, on distingue deux approches : les dispositifs avec des petits champs de vue inférieurs ou égaux à 5 cm de côté et ceux intermédiaires pour lesquels ce champ a une valeur de 10 à 20 cm de côté, à comparer aux champs de vue des gamma-caméras traditionnelles de $40 \times 50 \text{ cm}^2$. La première approche offre l'avantage d'accéder à une grande compacité de la caméra, la rendant ainsi portable et donc facilement utilisable dans différents lieux (services de médecine nucléaire, blocs opératoires, mais également dans les chambres des patients) ; la petite surface d'analyse implique en contrepartie de réaliser un balayage rigoureux de la zone d'intérêt pour détecter la totalité des lésions. À l'inverse, la seconde approche instrumentale permet d'obtenir l'image d'une plus large région en un seul cliché ; néanmoins, de grandes dimensions empêchent de plaquer la tête de détection au contact de la peau du patient et compliquent le maniement de l'appareil, avec la présence indispensable d'un bras mécanique articulé.

Parmi les dix-neuf caméras existantes, seules onze ont été introduites en bloc opératoire pour réaliser des évaluations cliniques de la procédure de biopsie du ganglion sentinelle du cancer du sein, l'imagerie des adénomes parathyroïdiens, des cancers des os, des tumeurs cérébrales et enfin plus récemment des cancers colorectaux [1]. Les études cliniques rapportées aujourd'hui dans la littérature sur les gamma-caméras miniaturisées restent encore peu nombreuses et ont impliqué un

nombre réduit de patients, inférieur à 60. Dans ce contexte, l'étude menée avec la caméra POCI a été l'une des premières à avoir été initiée dès 2006 et reste à ce jour la plus importante à l'échelle internationale, avec une inclusion de 162 patientes [2].

L'imageur per-opératoire POCI (Per-Operative Compact Imager)

Le programme POCI a démarré en 1996 au sein du groupe Interfaces Physique Biologie de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (devenu depuis le laboratoire d'Imagerie et Modélisation en Neurologie et Cancérologie, UMR8165, CNRS – Université Paris Sud – Université Paris Diderot), et visait à réaliser une gamma-caméra miniaturisée pour l'assistance au traitement chirurgical du cancer.

Après le développement de plusieurs prototypes [3, 4], un nouveau prototype de la caméra POCI a été mis au point en 2005 pour être spécifiquement dédié aux essais cliniques sur l'homme, avec une certification de mise aux normes électromédicales. L'imageur POCI a été élaboré autour d'une tête de détection gamma de 4 cm de diamètre, constituée d'un collimateur multicanaux en plomb, d'un scintillateur CsI(Tl) et d'un système photosensible original associant un tube intensificateur d'image et une photodiode silicium à localisation bidimensionnelle ayant une grande surface sensible de $4,2 \times 4,2 \text{ cm}^2$ (voir l'encadré et la figure E1). La mise en œuvre d'une photodiode silicium à jonction PN garantit à la fois une simplicité de lecture avec seulement quatre voies électroniques indépendantes et un encombrement réduit, tout en offrant une grande surface d'analyse.





Par ailleurs, la photodiode silicium présente de très bonnes performances spatiales, grâce à son couplage au tube intensificateur d'image qui amplifie plus de 500 fois le nombre de photons issus du scintillateur. Cette solution instrumentale représentait en 2005 le meilleur compromis entre performances de détection, faibles dimensions externes et facilité de la mise en œuvre de l'électronique d'acquisition.

Le prototype actuel de la caméra POCI offre un champ de vue de 4 cm de diamètre, pour des dimensions externes réduites ($9,5 \times 9,5 \times 9,0 \text{ cm}^3$) et une masse de 1,2 kg (fig. 1). Les performances de la caméra POCI ont été évaluées à partir d'une solution de nanocolloïdes de sulfure de rhénium marqués au $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (radio-isotope émetteur gamma à 140 keV, principalement utilisé en médecine nucléaire pour l'imagerie gamma). La résolution spatiale au contact du collimateur est de 2,2 mm, ce qui est très inférieur à celle des gamma-caméras

utilisées dans les services de médecine nucléaire (environ 6 mm). L'efficacité de détection correspondante est de 0,028%, ce qui permet une acquisition d'image en quelques secondes pour les applications cliniques courantes, avec des injections d'environ 50 MBq. Une telle sensibilité, associée à une surface d'analyse de 13 cm^2 , permet d'explorer une plaie opératoire dans un temps compatible avec la durée d'une intervention chirurgicale d'ablation tumorale.

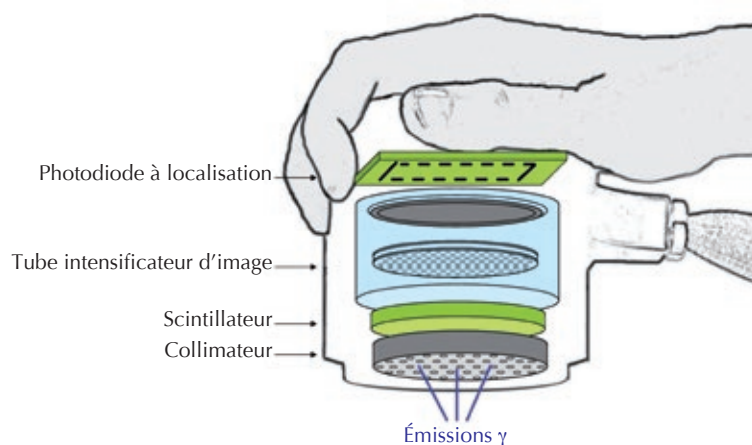
C'est à partir de ce nouveau dispositif que l'intérêt des systèmes d'imagerie gamma per-opératoire dédiés au traitement chirurgical du cancer a été évalué. Pour cela, un Programme Hospitalier pour la Recherche Clinique (PHRC) national a été initié, en collaboration avec le service de Gynécologie Obstétrique de l'Hôpital Tenon (Paris), pour évaluer la caméra POCI. La procédure de radioguidage

retenue pour cette étude clinique était la biopsie du ganglion sentinelle dans le cadre des cancers du sein, qui constitue actuellement la procédure la plus largement décrite dans la littérature. Ce protocole clinique consiste à pratiquer un curage ganglionnaire uniquement en cas d'envahissement métastatique du premier ganglion, appelé « ganglion sentinelle », chez des patientes atteintes d'une tumeur solide. Comme la localisation du ganglion sentinelle est imprévisible, un protocole de radiodétection a été établi selon deux étapes successives : i) l'identification et la localisation transcutanée du ganglion radiomarké par **scintigraphie***, puis ii) son repérage et son prélèvement chirurgical assisté par radioguidage. Dans la pratique, après l'injection d'une solution radioactive de nanocolloïdes de sulfure de rhénium marqués au $^{99\text{m}}\text{Tc}$ autour de la tumeur, une scintigraphie des **aires ganglionnaires*** est réalisée dans un service de médecine nucléaire à l'aide d'une gamma-caméra standard. Cette première étape permet de dénombrer les ganglions qui fixent la radioactivité (en moyenne deux par patiente) et de les localiser précisément. Ils sont ensuite biopsés en bloc opératoire avec l'aide de la sonde de comptage. La seconde étape de détection per-opératoire permet au chirurgien de vérifier la position du ganglion sentinelle avant l'incision, puis de l'identifier dans la plaie opératoire et enfin, après excision, de confirmer l'absence de toute radioactivité résiduelle.

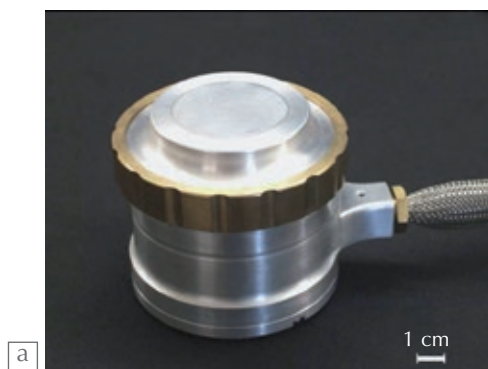
Dans ce contexte, le protocole d'étude de la caméra POCI visait à évaluer la capacité de l'appareil lors des deux étapes de la radiodétection : i) pour réaliser une scintigraphie des aires ganglionnaires et ii) pour guider le geste chirurgical en complément des sondes de comptage. Pour cela, une double étude clinique prospective a été menée à l'aveugle, en intégrant l'imageur POCI au protocole standard de la détection du ganglion sentinelle : POCI *versus* la gamma-caméra standard et POCI *versus* la sonde de comptage. Dans le premier cas, il s'agissait d'évaluer les performances de l'imageur POCI pour établir une cartographie précise des aires de drainage ganglionnaire et de comparer le nombre et la localisation des ganglions sentinelles (fig. 2B) ainsi détectés à ceux obtenus avec la gamma-caméra clinique standard (fig. 2A). La seconde partie de l'étude visait à déterminer l'apport de l'imageur POCI en complément de la sonde de comptage. Le chirurgien examinait

► Principe de fonctionnement de la gamma-caméra POCI

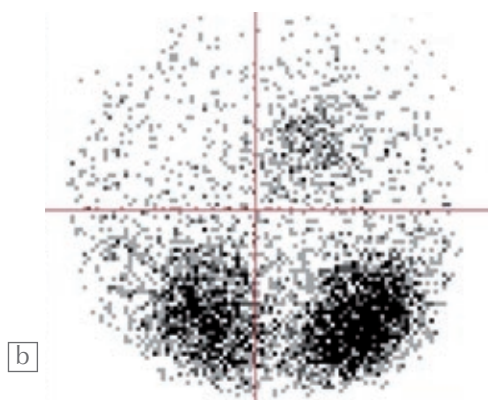
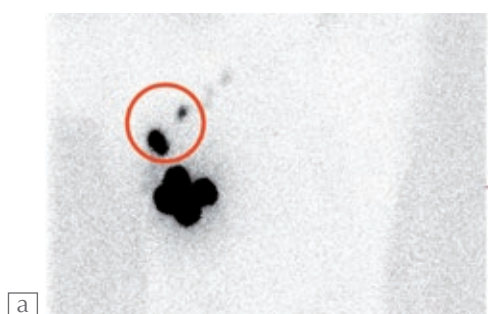
Parmi les photons gamma émis par la lésion tumorale radiomarkée, certains arrivent sur le **collimateur** avec une incidence et une position telles qu'ils vont le traverser, suivant une direction qui permet d'estimer la ligne sur laquelle ils ont été émis. Le collimateur est en plomb et est constitué d'un réseau hexagonal de canaux (fig. E1) de 1,4 mm de diamètre et de 15 mm de longueur, ce qui confère à la caméra POCI une résolution spatiale de 2,2 mm et une efficacité de détection de 0,028%. Le dépôt d'énergie de la particule gamma dans le **scintillateur** crée un spot lumineux local, qui est collecté par proximité sur la fenêtre d'entrée du **tube intensificateur d'image**. Celui-ci amplifie la brillance du spot, tout en préservant l'information spatiale et temporelle, et l'achemine jusqu'à la **photodiode à localisation** bidimensionnelle. Cette dernière fournit simultanément la position du barycentre et l'énergie totale du paquet de photons ayant interagi dans la zone de déplétion par division de charge. Ainsi, chaque événement gamma est caractérisé à la fois par sa position dans un plan et par son énergie cédée dans le scintillateur. Les signaux détectés sont traités puis amplifiés par un système de lecture, pour être finalement transférés vers un ordinateur afin d'être numérisés et visualisés en temps réel sur l'écran.



E1. Schéma de principe de la caméra POCI.



1. La caméra POCI (a) et son utilisation en bloc opératoire (b) lors de la localisation transcutanée des ganglions sentinelles.



2. Scintigraphies comparées. (a) Cliché scintigraphique obtenu en 5 minutes avec une gamma-caméra standard, et révélant à l'intérieur du cercle rouge la présence de deux ganglions fixant la radioactivité. (b) Image de la zone correspondante, obtenue en 22 secondes avec la caméra POCI et permettant d'identifier la présence de trois ganglions.

alors la capacité des deux détecteurs à fournir une localisation et un dénombrement exact des ganglions dans la plaie opératoire en l'absence de scintigraphie préliminaire.

Avec 162 patientes incluses, cette étude clinique est aujourd'hui la plus significative statistiquement sur le plan international. Ses résultats ont montré pour la première fois, qu'un dispositif d'imagerie gamma miniaturisé était « non inférieur » à une gamma caméra standard pour sa capacité à dénombrer les ganglions sentinelles et ce, avec des temps d'acquisition particulièrement courts : seulement huit minutes avec l'imageur POCI pour parcourir manuellement les aires ganglionnaires, contre quinze minutes avec la gamma-caméra standard pour réaliser en routine trois clichés d'incidences différentes (cinq minutes d'acquisition par incidence). En bloc opératoire, seule la région axillaire (au niveau de l'aisselle) était à explorer. Ainsi, le temps d'examen de la zone chirurgicale avec la caméra POCI était de trois minutes en moyenne, durée compatible avec une utilisation per-opératoire de l'appareil. Au cours de l'intervention chirurgicale, l'imageur POCI a permis la détection de 21 ganglions radiomarqués supplémentaires non repérés par la sonde de comptage chez 20 patientes, soit dans 15% des cas. Parmi ces 21 ganglions, cinq se sont révélés métastatiques et ont conduit à une modification de la stratégie thérapeutique envisagée pour les patientes.

Conclusion

L'imageur POCI a permis de valider l'intérêt des gamma-caméras miniaturisées, tant pour remplacer les caméras conventionnelles pour l'imagerie de régions anatomiques réduites que pour compléter les sondes de comptage lors du traitement chirurgical du cancer. Ce protocole suscite un grand intérêt de la part de la communauté médicale, puisqu'il concerne la détection des lésions inférieures à 1 cm³, de plus en plus fréquente en raison du dépistage systématique et précoce du cancer du sein.

Au-delà du ganglion sentinelle du cancer du sein, d'autres protocoles peuvent également tirer profit d'un système d'imagerie per-opératoire, comme l'assistance au traitement chirurgical des tumeurs mammaires non palpables. En plus de la détection transcutanée du ganglion, l'imageur pourrait intervenir au cours de ce protocole chirurgical pour guider le geste d'ablation en temps réel de la tumeur préalablement radiomarquée et vérifier la qualité du geste opératoire par une simple image scintigraphique.

En termes d'évolution instrumentale, le développement récent de Si-PM (Silicium PhotoMultiplier) comme photodétecteur peu encombrant, ouvre la voie à une nouvelle génération de gamma-caméras ultra-compactes [5]. ■

Glossaire

Détecteur per-opératoire : détecteur dédié à une utilisation au cours de l'intervention chirurgicale.

Collimateur sténopé ou "pinhole" : ce collimateur présente un seul trou de faible diamètre, permettant d'obtenir l'image de la scène radioactive avec un facteur de grossissement.

Aires ganglionnaires : dans le cas du cancer du sein, les aires ganglionnaires concernées regroupent trois chaînes ganglionnaires : axillaire au niveau de l'aisselle, sus-claviculaire, et enfin mammaire interne, dont les ganglions se situent de 2 à 4 cm de l'axe médian du sternum.

Scintigraphie : examen réalisé à l'aide d'une gamma-caméra.

Références

1. M. Tsuchimochi et K. Hayama, "Intraoperative Gamma Cameras for Radioguided Surgery: Technical Characteristics, Performance Parameters, and Clinical Applications", *Phys. Med.*, **29** (2013) 126-138.
2. K. Kerrou *et al.*, "The Usefulness of a Preoperative Compact Imager, a Hand-Held Gamma-Camera for Breast Cancer Sentinel Node Biopsy: Final Results of a Prospective Double-Blind, Clinical Study", *J. Nucl. Med.*, **52** (2011) 1346-1353.
3. L. Ménard *et al.*, "Performance Characterisation and First Clinical Evaluation of an Intra-Operative Compact Imager", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **46** (1999) 2068-2074.
4. S. Pitre *et al.*, "A High Resolution Hand-Held Gamma Camera for Cancer Surgery", *Journal of Nuclear Medicine*, **42** (suppl.) (2001) 202P.
5. S. Yamamoto *et al.*, "Development of a high-resolution Si-PM-based gamma camera system", *Phys. Med. Biol.*, **56** (2011) 7555-7567.

Faire des sciences avec les petits : une approche “bottom-up”

Estelle Blanquet^(1,2) (Estelle.Blanquet@unice.fr) et Éric Picholle⁽³⁾

(1) ESPE de l'Académie de Nice & GIS CAPEF, Université de Nice Sophia-Antipolis, 43 avenue Stephen Liégeard, 06100 Nice

(2) IUFE, Laboratoire de Didactique et d'Épistémologie des Sciences (LDES), Université de Genève, Suisse

(3) CNRS, Université de Nice Sophia-Antipolis, LPMC, UMR 7336

La plupart des analyses sur la nature de la science à l'école relèvent d'une approche “top-down”, partant d'une vision de la science professionnelle pour en arriver, par édulcorations successives, à des définitions d'une « science scolaire » accessible aux élèves. Bien adaptée au public des lycées, ayant déjà une idée assez claire de la nature des disciplines « scientifiques », cette approche perd toutefois de sa pertinence quand on s'adresse à de jeunes enfants. Nous avons donc développé une approche alternative, “bottom-up”, partant des pratiques effectivement observées dans les classes pour remonter vers l'appropriation d'une méthode scientifique de plus en plus exigeante à mesure que l'enfant progresse dans sa scolarité.

S'il est relativement simple pour les enseignants d'identifier des activités proprement scientifiques au collège ou au lycée, les choses se compliquent lorsqu'on travaille avec les petits. Pour « découvrir le monde », des élèves d'école maternelle fabriquent des crêpes ou de la glace : peut-on considérer qu'ils font des sciences ? Difficile de répondre à une telle question en l'absence d'une définition claire de la science scolaire.

De ce fait, beaucoup d'enseignants d'école maternelle ont du mal à évaluer le caractère scientifique ou non de ce qu'ils proposent à leurs élèves ; plus grave, ils s'estiment souvent incompetents à enseigner les sciences. Cela se traduit trop souvent par une absence d'initiation scientifique des jeunes enfants à l'école maternelle, à un âge où ils sont pourtant avides de comprendre et où il est possible d'introduire en douceur des éléments de méthode. Or, quand on sait les difficultés rencontrées par les élèves plus âgés pour comprendre ce qu'est la science [1], pourquoi attendre qu'ils grandissent alors qu'on peut préparer le chemin dès la maternelle et, en prime, susciter du plaisir chez les jeunes élèves ?

Une approche “top-down” de la science scolaire

La plupart des définitions classiques de la science scolaire s'adressent en effet avant tout aux enseignants de collège et de lycée. L'approche la plus répandue, que nous qualifierons de “top-down”, isole des caractéristiques consensuelles de la science professionnelle pour les transposer à l'école. Cette approche a fortement influencé les

standards éducatifs du National Research Council américain (NRC), qui décline par édulcorations successives autant de formulations qu'il existe de niveaux d'enseignement [2]. Ainsi, en bout de chaîne, le NRC attend d'élèves de niveau CP/CE1 qu'ils aient compris « *qu'une investigation scientifique commence avec une question ; que les scientifiques utilisent différentes façons pour étudier le monde ; qu'ils étudient le monde naturel et matériel ; que la connaissance scientifique change quand on découvre de nouvelles informations, etc.* » L'abaissement progressif des contraintes conduit alors à des formulations de plus en plus floues et sujettes à interprétation.

Or les jeunes enfants se posent des questions à tout propos, cherchent des réponses, rassemblent des indices, changent d'avis au fur et à mesure qu'ils apprennent : cela suffit-il à affirmer qu'ils font chaque fois de la science ? Toute la charge de faire la part des choses et de distinguer les apprentissages de nature scientifique est alors renvoyée sur l'enseignant ; or tous, loin s'en faut, n'en sont pas capables sans outils spécifiques.

Une approche alternative “bottom-up” basée sur des critères de scientificité

Il semble en effet que nombre d'enseignants, même spécialisés en sciences, n'aient qu'une compréhension insuffisante de la méthodologie scientifique et de la nature de la science [1]. C'est encore plus vrai des enseignants du primaire issus, pour la plupart, d'un cursus universitaire littéraire.

Pour leur permettre de se construire une vision opératoire de la science scolaire, nous avons développé une approche alternative,



© Christophe Rousseau – Service communication UNS

Observation d'un tourbillon.

“*bottom-up*”, qui consiste à la définir en s'appuyant à la fois sur des pratiques effectives de classe et sur des éléments épistémologiques maîtrisables par ces mêmes enseignants.

L'outil développé ici s'appuie sur la notion de « critère de scientificité » (CS), c'est-à-dire de condition nécessaire (mais non suffisante) pour qu'une pratique puisse être considérée comme scientifique. Sous réserve d'une formulation adéquate, un CS

fournit à l'enseignant et à ses élèves un test sans ambiguïté pour évaluer une pratique.

En nous basant sur un corpus étendu d'histoire et de philosophie des sciences, nous avons dégagé un ensemble de critères classiques compatibles avec les contraintes de la science scolaire et nous les avons reformulés en termes aussi proches que possible des pratiques de classe. Le pouvoir discriminant de cet ensemble de CS a été vérifié au regard, d'une part de démarches

reconnues par la communauté scientifique et d'autres réputées non scientifiques (e.g. l'astrologie), et d'autre part de pratiques scolaires scientifiques ou non. Leurs formulations ont ensuite été testées auprès d'enseignants, en fonction de leur faisabilité en classe. Nous avons ainsi abouti à un ensemble de vingt et un CS couvrant tous les aspects de la science scolaire (tableau ci-dessous). La plupart sont si bien intégrés par la communauté scientifique qu'ils

>>>

Critères de scientificité pour la science scolaire

Méthodologie scientifique	Observation/Expérience	Discours & Représentations	Argumentation & Théorisation
Primauté de l'expérience Les conclusions ne contredisent aucun fait d'expérience.	Opportunité L'expérience menée vise à acquérir ou à éprouver des connaissances spécifiques.	Cohérence lexicale	Cohérence logique
Recul Des marqueurs* d'une distinction entre le monde physique et ses représentations sont identifiables (e.g. « on a dit que l'on représentait la lumière par des rayons rectilignes »).	Reproductibilité	Cohérence symbolique	Non scolasticité Il n'est jamais fait appel à l'argument d'autorité.
Exploitation du spectre de généralité Des marqueurs* d'une navigation entre le général et le particulier sont identifiables.	Robustesse Une modification mineure des conditions de l'expérience ne modifie pas dramatiquement son résultat.	Non-contradiction interne	Univocité (d'une loi) Robustesse (d'une loi).
Intégrité Aucune mauvaise pratique n'est identifiable.	Exhaustivité de la documentation	Non-contradiction externe	Économie (d'une loi) Seuls des éléments significatifs ou potentiellement significatifs sont présents dans l'énoncé.
Transmission Les conclusions ont été formellement communiquées.	Économie de la documentation Seuls les éléments significatifs ou potentiellement significatifs d'une expérience ou d'une observation sont présents dans sa documentation.	Non-vacuité Le discours ou la représentation véhicule des connaissances spécifiques.	
		Relativité La portée du discours est explicitement limitée.	

(*) Un marqueur est typiquement un élément de discours explicite, permettant de s'assurer qu'une distinction ou une navigation est effectivement réalisée.

>>>

« vont sans dire » pour le physicien. Mais ils ne sont pas évidents pour les élèves. Ainsi, distinguer le monde physique de ses représentations (le recul), compétence indispensable pour donner son sens à toute modélisation scientifique, est un objectif d'apprentissage en soi à l'école primaire et même au-delà.

À partir de cet ensemble initial de critères, chaque enseignant peut ensuite déterminer son propre jeu de critères, adapté aux pratiques de sa classe et à ses objectifs pédagogiques. Il va de soi que ce choix dépend du niveau considéré : ainsi, il semblerait pour le moins présomptueux de travailler en maternelle des critères de scientificité comme l'exhaustivité d'une documentation ou l'univocité d'une loi.

Concrètement, les enseignants de maternelle considèrent des jeux de deux à six critères adaptés à l'âge de leurs élèves. Le choix d'un jeu de CS fournit à l'enseignant un guide explicite pour sa pratique personnelle.

Un enseignant de maternelle peut, par exemple, choisir de travailler les critères de primauté de l'expérience et de recul. Il peut ensuite choisir d'ajouter à ces deux CS initiaux le critère de reproductibilité. À chaque jeu de CS correspond une définition de la science. Ici, typiquement : « *La science est une méthode pour résoudre un problème en comparant explicitement l'expérience, dont le résultat ne dépend pas de l'observateur et peut être testé par n'importe quel observateur présent, à ses représentations et en donnant la primauté à l'expérience en cas de conflit.* »

Une conséquence immédiate de l'approche *bottom-up* est qu'un élève rencontrera différentes définitions de la science au cours

de sa scolarité, voire au fil d'une même année, le choix des CS travaillés déterminant ce qui est ou non recevable en tant que « science » à un stade donné de son apprentissage.

Idéalement, cette définition se précise donc et devient de plus en plus sophistiquée : à la différence de l'approche *top-down* qui fixe un nombre donné de caractéristiques de la science et module leur caractère contraignant en fonction du niveau, l'approche *bottom-up* fixe des CS durables mais dont le nombre augmente. La prise en compte d'un trop grand nombre d'éléments de scientificité constitue toutefois l'une de ses limites au collège et *a fortiori* au lycée.

Quels éléments de scientificité pour des élèves de maternelle ?

En pratique, les CS spontanément choisis par les enseignants de maternelle se limitent à la primauté de l'expérience, la reproductibilité, la robustesse, le recul et l'exploitation du spectre de généralité.

Nous avons pu confirmer l'intuition de ces praticiens par une étude de la capacité d'élèves de grande section de maternelle (5-6 ans) à s'approprier les éléments de méthodologie correspondants, y compris l'identification de paramètres pertinents et l'importance du test de paramètres supposés indifférents (en association avec la robustesse), la navigation entre le monde physique et ses représentations, et la formulation de généralités (en association avec l'exploitation du spectre de généralité).

Pour ce faire, des séquences spécifiques d'enseignement en démarche d'investigation ont été conçues [3]. Des enseignants les

ont réalisées en classe et leurs élèves ont ensuite participé à une manifestation scientifique festive, le « Jardin des sciences », pendant laquelle ils ont fait découvrir à d'autres élèves ce qu'ils avaient compris par le biais d'expérimentations (fig. 1 et fig. E1). Suite à cette manifestation, les élèves ont été interviewés par binômes (fig. 2), et les échanges retranscrits et analysés pour identifier les compétences acquises.

On se limite ici aux résultats obtenus avec 68 élèves de trois classes, qui ont participé à l'étude, ayant respectivement travaillé sur les transvasements (voir l'encadré), la dissolution et les sabliers (e.g. dans quel sablier le sable prend-il le plus de temps pour s'écouler ?).

Appropriation de la primauté de l'expérience

La primauté de l'expérience est l'élément méthodologique qui a été le plus travaillé par les enseignants (et le seul de façon explicite), une formule récurrente des séquences étant « *Comment fait-on pour savoir ? On essaie !* ». Cet élément de méthodologie est très largement approprié : 84% des élèves remettent en question une affirmation contraire à une expérience et 80% considèrent qu'il est important d'essayer pour « *être sûr* » ou pour « *savoir quelque chose* ».

Appropriation de la robustesse et de la reproductibilité

Lorsqu'on les interroge sur la pertinence d'un paramètre indifférent (e.g. utiliser du lait plutôt que de l'eau pour les transvasements de liquides), ils sont 94% à identifier la non pertinence du paramètre ; 31% utilisent une généralité pour justifier et 63% proposent



1. Une élève de grande section (à gauche) anime un atelier sur les sabliers. Bien qu'elle ne sache pas encore lire, elle a devant elle une fiche illustrée rappelant les étapes de l'animation : c'est également une procédure classique de familiarisation avec l'écrit.



2. Interview de deux élèves de maternelle.

d'essayer pour « être sûr ». En revanche, seuls 14% considèrent qu'il est utile de tester des paramètres non pertinents.

En ce qui concerne la reproductibilité, 88% des élèves considèrent que le résultat d'une expérience connue ne change pas si on la reproduit dans une autre école. Parmi ceux-là, 57% affirment que le résultat est « le même partout ». 71% affirment que des enfants différents qui font la même chose ne peuvent pas trouver des résultats différents ; parmi ceux-là, 31% formulent un énoncé du type : « si tu fais la même chose, tu trouves la même chose ». En revanche, ils ne sont que 25% à considérer utile de refaire une expérience « pour savoir » ou « être plus sûr ».

Appropriation du recul et de l'exploitation du spectre de généralité

Une majorité des élèves se révèle capable de naviguer entre une représentation symbolique du phénomène et le phénomène lui-même (77% pour les transvasements et 95% pour les sabliers). Ils sont 68% à formuler une loi pour justifier la prévision d'un comportement, mais sont mis très facilement en difficulté dès qu'il s'agit de distinguer le niveau de généralité de deux phrases différentes (e.g. pour comparer des quantités d'eau, il faut utiliser trois verres/récipients identiques).

Il apparaît donc que des élèves de grande section de maternelle sont capables de mobiliser les éléments méthodologiques relatifs à la primauté de l'expérience, à la robustesse, à la reproductibilité, au recul ou à l'exploitation du spectre de généralité. Une étude à plus long terme a également permis de montrer que ces compétences peuvent même être durablement assimilées (sur plus d'une année). Un enseignant peut donc choisir des critères de scientificité associés à ces éléments méthodologiques en toute sérénité. Même si les enfants n'ont pas conscience de faire des sciences, il lui est alors possible, à lui, d'identifier dans sa pratique les activités qui en relèvent et de concevoir des activités en vue d'initier ses élèves à la méthodologie scientifique.

Un exemple : de la scientificité des crêpes

Pour prendre un exemple, un enseignant peut alors déterminer sans ambiguïté la scientificité de l'activité consistant à faire des crêpes. Ainsi, un enseignant qui travaille



► Témoignage d'une enseignante de maternelle (atelier sur les transvasements)



E1. Un élève de grande section (à gauche) anime un atelier sur les transvasements.

Pour évaluer lequel de deux récipients de formes différentes contient le plus de liquide, la première intuition de beaucoup d'élèves de maternelle est de simplement comparer les niveaux de liquide, indépendamment de la largeur des récipients (fig. E1). Un travail fructueux consiste alors à leur faire prendre conscience, d'une part, que le volume se conserve ; et d'autre part qu'il faut utiliser des récipients identiques pour évaluer un volume à partir du niveau de liquide.

Les petits ont souvent des difficultés à accepter des faits en contradiction avec leurs conceptions initiales ; une séquence expérimentale en démarche d'investigation [3] permet de les déstabiliser de façon très ludique, car les petits adorent jouer avec l'eau. La même séquence permet en outre de travailler en douceur sur la méthode scientifique. L'approche expérimentale offre la possibilité de mettre en action le critère de primauté de l'expérience. Vérifier la reproductibilité du phénomène et tester sa robustesse sont aussi des moyens de convaincre les élèves. Par ailleurs, l'enseignant peut les sensibiliser à la notion de va-et-vient entre expérience et modèle (notion de « recul »), en travaillant sur des représentations simplifiées des récipients et en navigant entre les schémas et les récipients réels.

C'est ce qu'a fait Pascale, enseignante en grande section de maternelle à Peymeinade (06530), qui témoigne ici de son expérience :

« La conservation des volumes n'a pas été une notion simple à acquérir. Au tout début, je devais avoir trois, quatre enfants qui l'avaient saisie. Puis, à force de refaire, le visuel a fini par les faire avancer et je crois maintenant que la plupart ont saisi cette notion : "Ce n'est pas parce que le niveau est plus haut qu'il y a plus d'eau, mais le niveau est fonction de la largeur du pot."

Je me suis appuyée sur trois critères de scientificité :

- Primauté de l'expérience : je pense que le niveau de l'eau sera plus bas ou plus haut, et quand je le fais ce n'est pas ce qui se passe ; je finis par modifier mon discours au bout de plusieurs réalisations.

- Reproductibilité : je refais l'expérience et je trouve la même chose, tous les groupes trouvent la même chose.

- Robustesse : on a modifié des paramètres, eau, eau rouge, verte..., semoule, sucre, différents pots plus ou moins larges ou étroits.

Ce sont les plus simples et facilement compréhensibles, amusants pour les élèves de maternelle (se demander avec quoi on pourrait essayer pour voir si c'est pareil).

C'est vraiment là que je fais des sciences avec eux. Je ne suis plus dans des séances d'apport de connaissances, mais ce sont les enfants qui acquièrent, qui intègrent ces connaissances, et cela en utilisant une démarche qui laisse la place aux questionnements, aux suppositions, aux questions, aux vérifications. »

Avez-vous eu le sentiment que cette approche a permis de préparer vos élèves à une formation scientifique plus avancée et de leur donner une idée de ce qu'est la science ?

« Oui, même si je n'ai jamais employé le mot de critère et même si eux ne savent pas encore définir ce qu'est la science, ils ont compris qu'il fallait réessayer, changer un petit quelque chose et voir si on obtenait les mêmes résultats. »



en cours la reproductibilité et la primauté de l'expérience amènera ses élèves, en insistant *explicitement* sur ces contraintes, à s'assurer que toutes leurs affirmations contraires à l'expérience sont amendées pour en rendre compte, que le résultat obtenu est indépendant de qui a fait la pâte, pesé la farine, etc., et qu'on obtient bien le même résultat en refaisant de la pâte de la même façon. À ce prix, l'activité peut effectivement être considérée comme scientifique.

Ce n'est en revanche pas le cas si, par exemple, le jeu de CS qu'il a choisi d'implémenter inclut de surcroît le recul et si les élèves ont omis de représenter ce qu'ils ont fait (à la maternelle, on se satisfera de dessins simplifiés rendant compte de différentes étapes) et de naviguer entre cette représentation et le monde physique.

Un outil bien accueilli par les enseignants de maternelle

Il a par ailleurs été demandé à 88 enseignants de maternelle, au terme de formations continues intégrant les CS évoqués plus haut, s'ils les jugeaient utiles pour leur pratique, et en quoi. La quasi-totalité des enseignants interrogés (87 sur 88) considère que les éléments de scientificité présentés leur seront utiles (fig. 3).

Parmi eux, 69 sur 88 expliquent en quoi ces éléments de scientificité seront utiles.

Ce taux de retour de 78 % apparaît exceptionnellement élevé, ce type de sollicitation suscitant couramment moins d'enthousiasme alors que la formation est formellement achevée et que les enseignants sont libres de partir.

Les applications concernées sont :

- *la préparation, la mise en œuvre* : les éléments de scientificité enrichissent la gamme des questions que se pose l'enseignant dans sa préparation et lui évitent d'aller trop vite au résultat voulu avec les élèves. Les éléments de scientificité apparaissent comme autant de « pense-bête » ;
- *la régulation* : les enseignants considèrent que cet outil les aide à gérer et structurer ce qui se fait en classe voire, pour certains, à aller plus loin dans leur mise en œuvre ;
- *le cadre de référence* : plus de la moitié des enseignants y voient un outil pour cadrer leur pratique, un ensemble de points de repère ou un fil conducteur ;
- *l'évaluation* : les éléments de scientificité sont utilisés pour évaluer une séquence réalisée et la modifier au besoin ;
- *l'analyse de pratique* : plusieurs enseignants voient dans les éléments de scientificité un outil pour réfléchir sur leur pratique et prendre du recul.

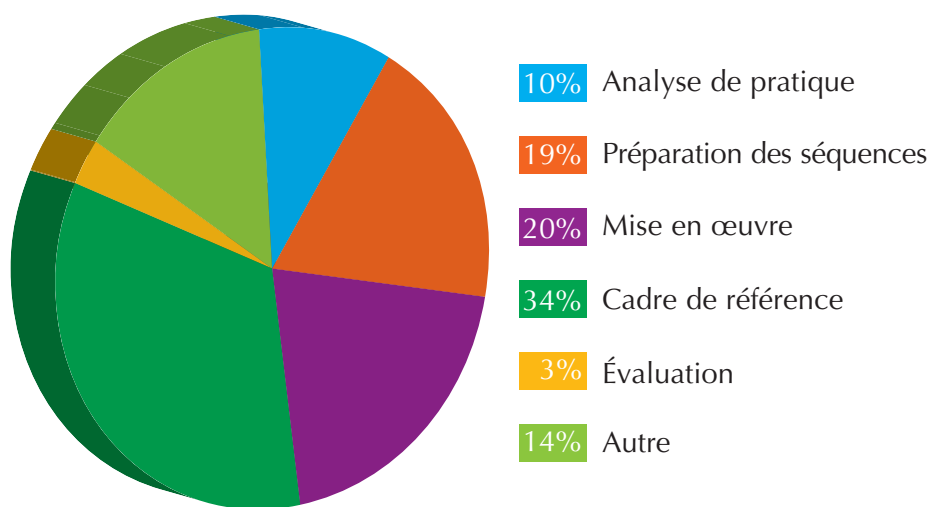
Les enseignants de maternelle envisagent donc des utilisations variées et, pour la plupart, pertinentes de l'outil proposé, globalement très bien reçu (cf. encadré sur les transvasements).

En guise de conclusion

L'approche *bottom-up* permet l'élaboration de définitions opératoires de la science scolaire dès l'école maternelle. Elle fournit par ailleurs un outil qui permet aux enseignants de se convaincre qu'ils peuvent faire des sciences avec leurs élèves, et un cadre rassurant pour identifier et concevoir des activités afin d'initier leurs jeunes élèves à la science. Dès l'école maternelle, ces activités peuvent être très élémentaires ou plus ambitieuses, préparant les élèves par exemple à la modélisation.

Complémentaire de l'approche classique *top-down*, mieux adaptée aux grandes classes, l'approche *bottom-up* de la science scolaire semble donc prometteuse. En France, les enseignants de maternelle sondés considèrent en particulier les critères de scientificité comme un outil utile. Des études complémentaires restent néanmoins nécessaires pour évaluer son appropriation et son utilisation effective par les enseignants à plus vaste échelle.

Plus généralement, cette étude confirme qu'il est possible de mener avec de très jeunes élèves des activités d'ordre scientifique, au sens large de ce terme, et l'expérience unanime des enseignants est qu'ils y prennent grand plaisir. ■



3. Poids relatif des différentes utilisations des critères de scientificité envisagées par les enseignants de maternelle (100% = 104 éléments de réponse ; une réponse peut impliquer plusieurs éléments).

Références

- 1• N. G. Lederman, "Nature of Science: Past, Present and Future", dans S.K. Abell et N.G. Lederman (eds.), *Handbook of Research on Science Education*, Lawrence Erlbaum Associates (2007), pp. 831-880.
- 2• National Research Council, *National Science Education Standards*, Washington, DC, The National Academies Press (1996).
Les nouveaux standards (2013) sont disponibles sur le site : www.nextgenscience.org/next-generation-science-standards.
- 3• E. Blanquet, *Sciences à l'école côté jardin, le guide pratique de l'enseignant*, Éditions du Somnium, Nice (2010).



RENCONTRES DES JEUNES PHYSICIEⁿN^eS

MARDI 4 NOVEMBRE 2014
CNAM - AMPHI ABBÉ GRÉGOIRE



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

Inscriptions,
contributions
et infos:

<http://rjp.sfp-paris.fr>

Date limite
de soumission
des contributions:
13 octobre 2014

Contact:
rjp@sfp-paris.fr

Conservatoire National
des Arts et Métiers
292 rue saint Martin, Paris 3^e
M 3 4 Réaumur Sébastopol
M 11 Arts et Métiers

**PARTICIPEZ ET VENEZ ÉCHANGER AVEC
DES DOCTORANTS DE TOUS LES HORIZONS !**



À l'interface entre la recherche académique et l'industrie – Emmanuelle Gouillart :

« Je bénéficie du meilleur des deux mondes ! »

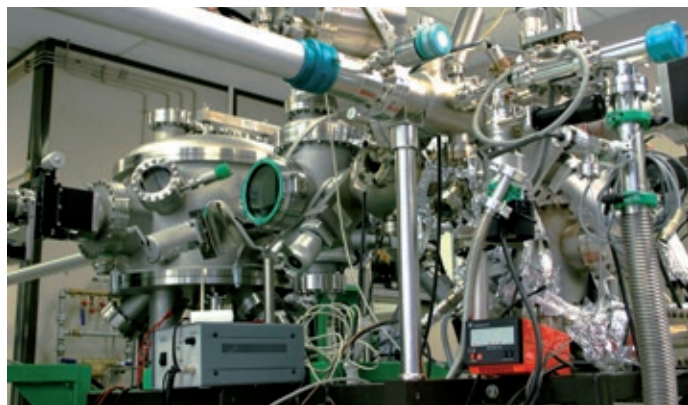
Six ans après avoir obtenu le prix Jeune chercheur Daniel Guinier de la SFP pour ses travaux de thèse sur les mélangeurs chaotiques de fluides visqueux, Emmanuelle Gouillart dirige depuis début 2014 l'Unité Mixte de Recherche 125 CNRS/Saint-Gobain, « Surface du verre et interfaces » (UMR SVI). À Aubervilliers, au cœur du plus gros centre de recherche de Saint-Gobain, l'UMR, spécialisée dans l'étude de la surface du verre et de son élaboration, joue le rôle original de passerelle entre recherche académique et appliquée.

Emmanuelle Gouillart n'échangerait sa place pour rien au monde. Pour cette jeune chercheuse de Saint-Gobain, pouvoir prendre le temps d'aller au fond des choses en côtoyant de près les problématiques quotidiennes de l'industrie est une situation extrêmement enrichissante.

Avec une équipe de vingt personnes dont six chercheurs Saint-Gobain et deux CNRS, l'UMR SVI est physiquement intégrée au centre et constitue un des nombreux départements de Saint-Gobain Recherche (SGR). Le petit laboratoire de recherche fondamentale dispose d'outils dédiés aux expérimentations. Un bâti de pulvérisation sous vide (fig. 1) permet, par exemple, de déposer des couches d'épaisseur nanométrique. D'autres outils sont à la disposition des chercheurs et doctorants : tests mécaniques pour mesurer l'adhésion des couches, microscope à force atomique, platine chauffante, fours à haute température, tomographe, etc.

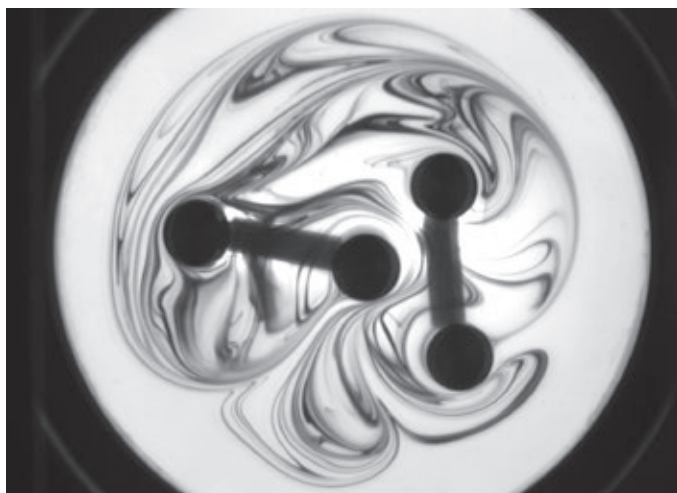
Par ailleurs, neuf thèses CIFRE, financées par Saint-Gobain et réalisées pour la plupart en association avec d'autres laboratoires, sont encadrées par les chercheurs de l'UMR SVI. Actuellement, un doctorant s'attache aux problématiques des couches minces en partenariat avec le Laboratoire de Photonique et de Nanostructures de Marcoussis. Une autre thèse est réalisée avec le laboratoire Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH) de l'ESPCI : le PMMH apporte l'aspect polymères et mécanique des fluides, quand l'UMR SVI s'intéresse à la texturation. Grâce à ces collaborations, le doctorant bénéficie d'un environnement riche et l'UMR élargit son champ d'interactions avec la recherche fondamentale.

Le premier axe de recherche du laboratoire concerne l'étude de la surface du verre et sa fonctionnalisation par des couches minces qui, déposées sur le verre, permettent d'en modifier les propriétés. Cette activité correspond à beaucoup de produits de Saint-Gobain, comme le vitrage pour la protection solaire ou le contrôle thermique. Grâce au bâti de pulvérisation (fig. 1), les chercheurs étudient les mécanismes physiques de dépôt des couches et les propriétés de celles-ci.



1. Le bâti de déposition Misstic. À l'image des *coaters* industriels utilisés pour déposer des empilements de couches minces à la surface du verre, le bâti de déposition Misstic utilise le procédé magnétron (pulvérisation cathodique). Plusieurs matériaux, dont l'épaisseur est gérée par un automate, peuvent être déposés ensemble ou les uns après les autres dans le bâti. Misstic permet également de réaliser *in situ* des mesures de structure des couches (morphologie, contraintes) pendant le dépôt.

Le deuxième axe de recherche se focalise sur la physique et la physico-chimie des procédés. La partie mélange dans les fluides (fig. 2) constitue la suite logique de la thèse d'E. Gouillart. Elle est actuellement menée par une postdoctorante en collaboration avec Pierre Jop, un des deux chercheurs CNRS de l'UMR. Une autre activité de cet axe se concentre sur l'élaboration du verre. Physicienne à l'origine, E. Gouillart a donc ajouté une corde à son arc en découvrant la chimie du verre : « Je travaillais sur des expériences de mélanges, des systèmes dynamiques appliqués à la mécanique des fluides ; maintenant, je me passionne pour la chimie du verre et la tomographie (fig. 3), une technique d'imagerie qui permet de reconstruire en 3D la structure interne d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées par tranches depuis l'extérieur de cet objet : la variété me plaît ! » Aujourd'hui, cette branche d'activité donne lieu à de nombreuses recherches dans le but d'améliorer les procédés d'élaboration du verre sur le long terme. Ainsi, le laboratoire étudie le rôle de la granulométrie des matières premières (fig. 3), les mécanismes de diffusion dans le verre fondu, ou encore les interactions complexes entre des bulles de gaz et le verre liquide, en vue de mieux maîtriser les schémas réactionnels.



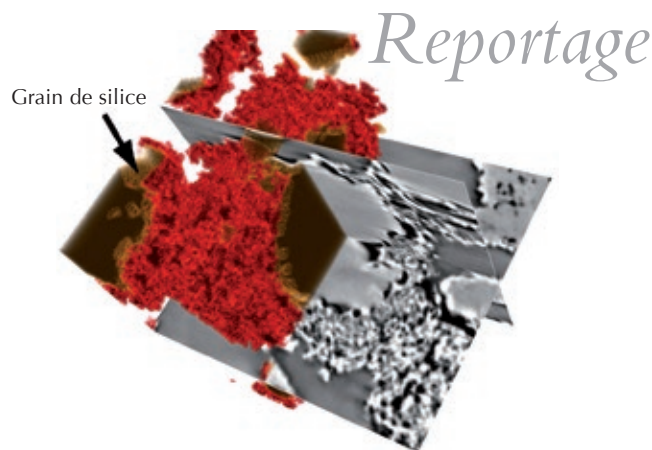
2. Mélange de fluides de rhéologie complexe. Les travaux actuels sur le mélange visent à comprendre son évolution en fonction des paramètres du mélangeur et du fluide, afin de permettre le choix du mélangeur optimal. On utilise ici le Carbopol, un fluide à seuil modèle – fluide qui ne s'écoule que quand on impose une certaine contrainte – teinté pour moitié de noir et pour l'autre de blanc, ce qui permet de bien observer le mélange. Des agitateurs tournent autour d'un axe perpendiculaire à la surface du mélange. L'évolution du mélange est ainsi visible à chaque fois que les tiges reviennent à la même position.

La politique scientifique de l'UMR SVI a ceci d'original qu'elle formule des problématiques, inspirées par un ensemble de questions industrielles nécessitant des réponses à court terme, mais qui vont être étudiées de façon académique : « On ne va pas traiter la question industrielle brûlante, mais préparer le long terme en donnant un éclairage nouveau sur les problématiques. » Ainsi, la connaissance fondamentale peut inspirer les ingénieurs de Saint-Gobain Recherche. E. Gouillart décrit cette situation particulière comme un des points forts du laboratoire : « Les nouveaux sujets de recherche à lancer doivent nous permettre à la fois de travailler à l'état de l'art de la recherche académique et d'être pertinents pour la recherche appliquée : cette réflexion, pleine de défis, est passionnante. » E. Gouillart explique avec limpidité que la recherche fondamentale effectuée sur des systèmes simplifiés est une composante essentielle de la compréhension précise des phénomènes industriels.

En parallèle, les connaissances fondamentales apportées par l'UMR SVI s'insèrent naturellement dans le paysage de la recherche française. Le laboratoire multiplie les interactions avec d'autres organismes de recherche et participe par exemple à plusieurs GDRs. Ainsi, pour E. Gouillart, les deux facettes, industrielle et fondamentale, représentent toute l'originalité et la force du laboratoire : « Certaines des techniques d'instrumentation et d'élaboration des matériaux sont inhabituelles, car elles ont une spécificité induite par les procédés industriels. »

À SGR, les problématiques industrielles changent rapidement au cours du temps : ce foisonnement de questions, de problèmes qui se renouvellent sans cesse engendre la nécessité d'une communication accrue entre les deux mondes. La localisation de l'UMR SVI au cœur de SGR favorise une culture commune de recherche avec les autres départements et permet l'émergence de questions originales. E. Gouillart estime que « les contacts informels, par exemple autour d'un café, sont un des moyens les plus efficaces pour suivre le travail quotidien, les questions scientifiques ou les points bloquants de nos collègues de SGR. »

Des interactions plus organisées se nouent autour des thèses. Ces projets sont structurés à l'échelle de trois ans et bénéficient



3. La tomographie aux rayons X permet de visualiser l'intérieur du matériau : sur l'image, un grain de silice (en marron) réagit avec un grain de carbonate de sodium (en rouge) qui s'est fortement déformé à la suite des réactions. La taille du grain de silice est d'environ 180 microns. Lors des expériences au synchrotron de l'ESRF, sur la ligne ID19, le matériau est imagé à mesure que les réactions avancent. L'image présentée ici a été prise à 800°C, au cours de la réaction.

Par ailleurs, un tomographe de laboratoire permet des expériences de fusion arrêtées : les échantillons sont alors imagés dans un état intermédiaire de transformation.

de mises au point semestrielles : « Le comité de suivi d'une thèse CIFRE comporte des membres de SVI, mais aussi d'autres départements de SGR. Le travail de recherche a souvent des résonances avec d'autres études menées à plus court terme par les ingénieurs de SGR. » À l'issue de leurs thèses, il est fréquent que les doctorants intègrent un des départements de Saint-Gobain Recherche. Pour E. Gouillart, cette continuité constitue un point très positif pour le fonctionnement du laboratoire : « Les doctorants embauchés par SGR participent au lien efficace entre l'UMR et les autres départements. »

Par ailleurs, l'accès à des matériaux variés (couches minces, gypse, verre sous toutes ses formes, vitrocéramiques, abrasifs, fibres de verre), la diversité des approches et des compétences (mécanique des fluides, chimie, thermodynamique, thermique) et le partage de l'équipement avec SGR permettent la mise en place de manipulations originales. Outre l'accès à la microscopie électronique ou à la tomographie (fig. 3), des dispositifs adaptés ont été développés très spécifiquement pour Saint-Gobain Recherche. Les fours munis de fenêtres permettant de suivre l'évolution des transformations du verre en sont un exemple.

Pour E. Gouillart, c'est là toute la richesse de la présence de l'UMR SVI au cœur de Saint-Gobain Recherche : « Je peux satisfaire ma curiosité intellectuelle et construire des connaissances fondamentales, tout en bénéficiant de l'inspiration originale et du dynamisme bouillonnant du centre de recherche : pour moi, située entre la recherche académique et la recherche appliquée, je bénéficie du meilleur des deux mondes ! » ■

Alexandra Pihen, journaliste scientifique

► Contact

Emmanuelle.Gouillart@saint-gobain.com

UMR SVI, Saint-Gobain Recherche

39, quai Lucien Lefranc, B.P. 135, 93303 Aubervilliers Cedex

Tél. : (33)1 48 39 58 00 – Fax : (33)1 48 34 74 36

www.svi.cnrs-bellevue.fr/spip/



© Francesca Ferlaine

Une jeune physicienne européenne qui réussit : Francesca Ferlaine

Bonjour Francesca, nous sommes aujourd'hui ensemble à Washington à la très prestigieuse conférence internationale de physique atomique ICAP 2014, à laquelle assistent 900 personnes. Sur les 49 orateurs invités, on compte seulement 5 femmes et tu es l'une d'entre elles. Peux-tu retracer brièvement les grandes lignes de ta brillante carrière qui te valent ce beau succès à l'âge de 36 ans ?

Après des études à Naples où je suis née, puis à Trieste, j'ai fait une thèse à Florence, prolongée par deux ans de postdoc sur place dans le domaine des atomes froids au Laboratoire européen de spectroscopie non linéaire (LENS). Puis je suis allée à Innsbruck pour un second postdoc dans un excellent laboratoire du domaine, où je suis finalement restée jusqu'à aujourd'hui. Mes recherches sur les mélanges fermions/bosons dans les réseaux optiques, puis sur la condensation de l'atome d'erbium (mon sujet personnel) ont très bien marché. J'ai bénéficié de bourses européennes et reçu un certain nombre de prix qui m'ont permis de développer mes projets. Je suis lauréate d'un contrat ERC junior et d'un grand prix autrichien, et maintenant d'un prix de la fondation Humboldt de 5 M€ pour aller à Ulm comme professeur (ce que je viens de refuser, car on m'offre presque autant après négociation pour rester à Innsbruck). Je suis donc maintenant professeur titulaire de mon poste à l'université et je dirige ma propre équipe de recherche en toute indépendance, autour d'expériences très complexes qui affrontent une compétition internationale très forte.

Comment s'est déterminée ta vocation pour la recherche, pourquoi as-tu choisi la physique, qu'est-ce qui a motivé ta mobilité géographique, as-tu été aidée ou encouragée ?

À Naples, pendant ma scolarité, j'ai subi un mauvais enseignement de physique et j'ai fait des études classiques. Toutefois, j'ai gardé un souvenir marquant d'un excellent professeur de math en classe de 4^e ; j'ai aussi été marquée par la visite passionnante d'une centrale nucléaire en France ; de plus, un ami plutôt original de ma famille m'a encouragée à prendre la physique à l'université. En fait, mes parents auraient souhaité une autre carrière pour moi, médecine par exemple : ils trouvaient à juste titre la physique comme trop risquée... C'est pourquoi j'ai préféré quitter Naples très jeune pour aller à Florence, c'était le choix de la liberté. Je dois ajouter que j'ai été très influencée par des modèles féminins. C'est d'ailleurs en France que j'ai rencontrée quelques femmes juste un peu plus âgées que moi, comme Hélène Perrin au Laboratoire de physique des lasers à Villetaneuse, dont la réussite en recherche et dans la vie personnelle était évidente : cela m'a énormément encouragée.

Tu as choisi de t'établir à Innsbruck, dans un pays où, comme en Allemagne, on ne favorise guère le travail des femmes. Tu es de plus une jeune femme pleine de féminité, jolie et aussi très élégante. Comment s'est passée ton arrivée dans un milieu presque totalement masculin ? Ressens-tu encore la pression des stéréotypes et comment y réagis-tu ?

J'ai eu un choc en arrivant en Autriche, après mon passage à Florence où ma codirectrice de thèse était une femme et où il y avait la mixité complète dans le laboratoire. Je n'ai pas souffert directement de misogynie flagrante, mais plutôt j'ai parfois remarqué une attitude généralisée des hommes enclins à ignorer les femmes. J'ai eu mille occasions de noter des comportements qui ne sont pas toujours « politiquement corrects ». Par exemple, dans un groupe l'homme qui répond à une question que j'ai posée évite de me regarder en face. Cela donne l'impression d'être transparente et je ne sais pas trop comment interpréter ce comportement. En tout cas, j'ai décidé de ne pas m'en sentir affectée et plutôt d'en rire : j'ai pris le parti d'ignorer d'être ignorée !

Je voudrais aussi ajouter que les stéréotypes cessent très rapidement quand les gens me connaissent. À ce point, c'est le rapport direct qui dicte les règles comportementales.

Pour ce qui est de la féminité, je fais attention à ne pas provoquer, je m'habille simplement au travail, je prends garde de maintenir fermement un cercle d'isolation autour de moi et je n'ai pas de problèmes.

Tu as maintenant deux très jeunes enfants (4 ans et 1 an). Considères-tu que tu réussis à maintenir un équilibre satisfaisant entre ta famille et ton travail de directrice d'une grande équipe ? Comment fais-tu ?

J'ai la chance d'avoir une « nounou » qui vient de Naples et s'occupe de mes enfants. Évidemment cela coûte cher, mais c'est l'idéal dans ce pays (l'Autriche) où il y a très peu de crèches qui, de plus, n'acceptent pas les enfants de moins de 15 mois ! On commence cependant à trouver des jeunes filles au pair, mais ceux de mes collègues qui ont des moyens limités ont beaucoup de problèmes. Il n'y a pas d'aide de la société pour les femmes qui travaillent avec des enfants en bas âge ; par contre, on peut garder 80% de son salaire à rester chez soi pendant un an. C'est la mentalité en Autriche, vous avez de la chance en France.

Je considère aussi comme très importante la qualité de mes relations avec mon compagnon, le père de mes enfants, qui est éducateur social. Il a plus de temps que moi à passer à la maison et il est pour moi une aide énorme. Le choix du compagnon est fondamental.



Tu es à la tête d'une équipe masculine de six personnes. Comment t'y prends-tu pour créer une bonne ambiance de travail ? Penses-tu que les femmes ont des atouts particuliers pour y parvenir ?

Je crois qu'il y a une bonne harmonie dans mon équipe. Mes contacts sont très forts avec mes doctorants et postdoctorants. Je m'applique à détecter les problèmes qu'ils peuvent avoir entre eux, ou avec moi, bien avant qu'ils apparaissent. Il faut à tout prix éviter les conflits et la guerre dans un labo ! On peut toujours trouver une solution ; j'observe beaucoup ce qui se passe et je mets mon intuition dite féminine à contribution. À cet égard, je pense que les femmes ont plus de qualités que les hommes et qu'il faut qu'elles les mettent à profit.

De toute évidence, tu es une femme scientifique dont la réussite professionnelle est exceptionnelle et qui de plus est heureuse dans la vie. Tu es devenue à ton tour une femme modèle pour beaucoup d'autres jeunes femmes ; quels conseils leur donnerais-tu ? Comment vois-tu la solidarité entre femmes scientifiques et te considères-tu comme une militante féministe ?

En effet, beaucoup de femmes viennent me voir, souvent pour des conseils pratiques, ou juste pour être encouragées. Nous avons dans mon institut de sympathiques déjeuners réguliers de femmes en physique. Je leur dis qu'il ne faut pas avoir peur et surtout ne pas se sous-estimer. Pourtant, je ne me vois pas comme une militante féministe qui revendiquerait avec agressivité des droits particuliers pour les femmes dans ma profession. Je suis contre la lutte des classes entre les hommes et les femmes ! En réalité, ce que je crois important c'est d'obtenir des petites avancées concrètes qui facilitent la vie des femmes qui travaillent, de toutes les femmes d'ailleurs et pas seulement les scientifiques. Il faut des aides financières pour la maternité et le retour au travail au bout de quelques mois. Moi, je me bats pour les crèches. C'est toute la mentalité de la société que je voudrais voir changer !

Qu'aimerais-tu ajouter pour les lectrices de *Reflets de la physique* ?

Je suis préoccupée par la vision qu'ont les femmes des autres femmes. Souvent, dès qu'elles acquièrent un peu de pouvoir, elles se comportent comme les hommes vis-à-vis de leurs collègues femmes. En fait, elles intègrent les stéréotypes qui imprègnent leur milieu et font preuve sans s'en rendre compte des mêmes préjugés. Ce qui me tourmente, c'est que je me surprends moi-même parfois dans cet état d'esprit. Il faut être extrêmement vigilant vis-à-vis de soi-même. Appartenir à un groupe de femmes qui

réfléchissent ensemble (comme Femmes & Sciences en France) serait très utile à cet égard, mais cela n'existe pas encore à Innsbruck.

Pour terminer, pourrais-tu expliquer en termes simples en quoi consistent tes recherches ?

Ma thèse à Florence a suivi de quelques années la découverte de la condensation de Bose-Einstein du sodium et du rubidium. J'ai pu étendre pour la première fois ces méthodes au potassium et produire un gaz ultra-froid de fermions dans un réseau optique, ouvrant la voie à des simulations quantiques de problèmes complexes en physique de la matière condensée. J'ai étudié les interactions entre espèces différentes, que j'ai pu faire varier entre zéro et quasiment l'infini à l'aide de champs magnétiques *via* des résonances dites de Feshbach. Plus récemment, j'ai abordé la physique des interactions à plusieurs corps en produisant transitoirement des particules liées composées de trois atomes de césium, nommées états d'Efimov. Mon sujet actuel concerne l'erbium, un atome de terre rare dont j'ai réussi pour la première fois la condensation de Bose-Einstein en 2012. J'exploite la physique de cet atome qui est très « riche », car il a beaucoup d'isotopes fermioniques et qu'il possède un grand moment dipolaire qui lui permet des interactions anisotropes à longue portée. ■

Interview réalisée le 8 août 2014 par Michèle Leduc

► Parcours

Francesca Ferlaino a 36 ans - (Francesca.Ferlaino@uibk.ac.at)

- 2000 : Diplôme de physique à l'Université Federico II (Naples, Italie).
- 2004 : Diplôme de thèse (PhD) à l'Université de Florence sur le sujet : "Atomic Fermi gases in optical lattices (experiment)"
- 2004-2006 : Assistante de recherches au LENS (Florence, Italie)
- 2007-2011 : Postdoc puis professeur associé à l'Université d'Innsbruck (Autriche)
- Depuis 2012 : Professeur titulaire à l'Université d'Innsbruck
- Depuis 2013 : Directrice du Centre de Recherches « Physics-Innsbruck »



XXI^{es} OLYMPIADES DE PHYSIQUE FRANCE

Photographie : Ville de Nancy

30^{ET} 31
JANVIER
2015
CONCOURS NATIONAL
NANCY

Quand les lycéens tentent
l'aventure de la recherche



inscriptions sur
www.odpf.org

organisées par **udppc** et **SP** avec **UNIVERSITÉ DE LORRAINE** et **IFL**

à la Faculté des Sciences et Technologies (Vandœuvre lès Nancy)

