

Conseil scientifique de l'institut de physique (INP)

Recommandation

La diffusion des neutrons en France

Le Conseil Scientifique de l'Institut de Physique du CNRS exprime sa très vive inquiétude après la décision prise par le CNRS et le CEA d'arrêter de façon anticipée, fin 2019, le réacteur ORPHEE auquel est associé le laboratoire Léon Brillouin. Cet arrêt réduira de manière drastique l'accès de la communauté scientifique française aux techniques neutroniques et sera lourd de conséquences pour la formation des jeunes à ces techniques.

Les neutrons sont une sonde essentielle pour l'investigation de la matière dans de nombreux domaines scientifiques. Pour le futur, les techniques neutroniques restent incontournables en recherche fondamentale comme pour le renouveau industriel et pour répondre aux grands enjeux sociétaux tels que l'énergie, la santé, le stockage des données ou la nanoélectronique.

La communauté française des utilisateurs est l'une des plus importantes et des plus dynamiques au monde avec de l'ordre de 1750 utilisateurs fréquents. Son leadership s'est construit sur plusieurs décennies autour de sources nationales, qui sont les lieux privilégiés pour la formation des jeunes et l'émergence de thématiques nouvelles.

Notre unique source nationale de neutrons, socle de la communauté française, est le réacteur ORPHEE. Il lui fournit aujourd'hui 60% de son temps de faisceau. La seconde source sur le territoire français est l'ILL¹ un institut international qui fournit 25% du temps de faisceau à la communauté française. Ces deux sources se complètent. Si ORPHEE est arrêté, ni L'ILL (arrêt prévu à l'horizon 2030), ni le futur ESS² en construction (accès français prévu à hauteur de 8%) ou d'autres sources à l'étranger ne pourront répondre aux besoins de la communauté française et couvrir les domaines essentiels de la recherche fondamentale et industrielle avec les neutrons.

Alors que les autres nations européennes leaders en neutronique (Royaume-Uni, Allemagne) se sont dotées d'un plan à l'horizon 2040 garantissant des moyens expérimentaux importants, la fermeture en France de l'unique source nationale, sans alternatives ni perspectives claires pour le futur, porte un grave préjudice au développement de domaines scientifiques majeurs en recherche fondamentale et appliquée. Cette décision entraînera le

¹ Institut Laue-Langevin

² European Spallation Source, en Suède

déclin rapide de toute une communauté ainsi que la perte du savoir-faire indispensable à la construction et à l'utilisation de la future source européenne à spallation, ESS. Les exemples américains et suédois ont déjà montré que la fermeture d'une source nationale conduit à une perte rapide de l'expertise. L'investissement de la France, tant scientifique que financier dans le projet européen de source à spallation, ESS, ne bénéficierait plus qu'à un nombre réduit d'experts.

Par cette motion qui est le fruit d'une réflexion approfondie en groupe de travail et en séance plénière³, le Conseil Scientifique de l'Institut de Physique demande que soit réétudiée dès à présent la décision de fermeture du réacteur ORPHEE. Nous demandons qu'ORPHEE soit maintenu en activité jusque 2025-2030 et que la perspective d'une nouvelle source nationale soit étudiée, ainsi que l'a proposé le CSI⁴ du Laboratoire Léon Brillouin.

LAUNOIS Pascale
Présidente du CSI INP

Recommandation adoptée le 10 novembre 2015
20 votants : 20 oui, 0 abstention, 0 non

Destinataires :

- Alain FUCHS, président du CNRS
- Gabriel CHARDIN, président du comité des Très Grandes Infrastructures de Recherche du CNRS
- Alain SCHUHL, directeur de l'INP
- Amina TALEB, directrice adjointe scientifique aux Très Grandes Infrastructures de Recherche à l'INP

³ Document ci-après

⁴ Council for Science and Instrumentation

La diffusion des neutrons en France :
avis motivé du Conseil Scientifique de l'Institut de Physique du CNRS,
le 10 novembre 2015

1. Argumentaire scientifique

La diffusion des neutrons permet de répondre aux questions « où sont les atomes et que font-ils ? »⁵. En effet, les neutrons ont la propriété remarquable d'avoir des longueurs d'onde comparables aux distances interatomiques et des énergies du même ordre de grandeur que celles des excitations et relaxations en jeu dans la matière. Les neutrons interagissent avec les noyaux par interaction forte (nucléaire) et avec les électrons non appariés (interaction magnétique). Ils peuvent donc à la fois sonder les propriétés atomiques et magnétiques. La diffusion des neutrons via l'interaction nucléaire est un outil de contraste remarquable : contraste isotopique pour une même espèce et contraste entre éléments de numéros atomiques voisins. Enfin, leur pouvoir de pénétration important (de l'ordre du centimètre) fait des neutrons une parfaite sonde en volume.

La diffusion des neutrons permet de sonder, **en volume, les propriétés structurales, dynamiques et magnétiques de la matière inorganique ou organique à l'état solide ou liquide, de manière quantitative**. Elle est indispensable dans de nombreux domaines de la physique, biophysique, chimie, biochimie, médecine, sciences des matériaux, métallurgie, etc.

Contrairement aux rayons X, les neutrons peuvent **détecter les atomes légers** en présence d'atomes lourds. Le Laboratoire Léon Brillouin (LLB) associé au réacteur ORPHEE a écrit des pages importantes dans le domaine de la dynamique des polymères⁶. Le fort pouvoir de diffusion incohérente de l'hydrogène H permet de le doser (> 100 ppm) dans les composés (zéolithes, aciers) et de suivre sa désorption thermique, par exemple. La diffusion des neutrons est le meilleur outil pour caractériser, à l'échelle nanométrique, les molécules constitutives de la **matière molle** en utilisant la substitution H/D⁷ pour marquer spécifiquement différentes parties au deutérium D. Cette technique est amplement exploitée pour connaître la structure de systèmes auto-assemblés très variés comme les nanoparticules copolymériques, les vésicules géantes biocompatibles véhiculant des principes actifs pour une thérapie ciblée (nanothérapie), des vésicules stimulées par un champ magnétique externe (théranostique). L'utilisation du contraste isotopique H/D permet d'analyser puis d'optimiser les étapes de relargage du principe actif et de comprendre comment les protéines, membranes et autres entités biologiques interagissent dans leur milieu. Cette activité en **matière molle et biophysique** correspond à l'utilisation de trois à quatre spectromètres (essentiellement diffusion aux petits angles et réflectivité) à ORPHEE/LLB.

⁵ Mots attribués à Clifford G. Shull et Bertram N. Brockhouse, lauréats du prix Nobel de physique en 1994 pour la diffusion des neutrons.

⁶ Notons que les avancées théoriques proposées par Pierre-Gilles de Gennes, lauréat du prix Nobel de Physique en 1991, ont été étayées par des expériences de diffusion des neutrons.

⁷ Laboratoire Léon Brillouin, Annual Report 2014

Dans le **domaine de l'énergie**, des informations uniques, tant structurales que dynamiques, sont obtenues sur les matériaux utilisés dans les batteries, sur le fonctionnement de piles à combustible ou encore sur les matériaux de stockage et de séparation de gaz (du stockage de l'hydrogène au captage du CO₂).

Dès les années 50, la diffraction magnétique des neutrons confirme les théories sur l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme de Louis Néel⁸, qui œuvrera avec Heinz Maier-Leibnitz à la construction du réacteur européen à haut flux, l'Institut Laue-Langevin, à Grenoble. Des découvertes majeures en supraconductivité à haute température, sur les liquides de spin, les multiferroïques, le magnétisme moléculaire... ont été et sont obtenues grâce à **l'étude des structures et des excitations magnétiques avec les neutrons**. La recherche en physique des systèmes magnétiques par diffusion de neutrons, outil inégalé pour ce type d'étude, est extrêmement active, notamment en France et au LLB⁷. Elle a par exemple permis très récemment de mettre en évidence en volume l'existence de nouveaux états magnétiques non triviaux tels que les skyrmions, ces défauts topologiques de type « vortex » qui pourraient devenir les briques de la nanoélectronique de demain.

Dans le domaine de la **métallurgie**, le contraste entre éléments de numéros atomiques voisins est un atout des neutrons par rapport aux rayons X. De surcroît, le grand pouvoir de pénétration (plusieurs cm dans les aciers) des neutrons en fait une sonde non destructive exclusive pour les pièces volumineuses. Ceci permet de déterminer le tenseur de contraintes à l'intérieur de pièces métallurgiques, p. ex. les pales de turbines ou des joints de propulseurs pour l'aéronautique, ou encore la cartographie des contraintes, à l'origine de la fragilisation d'équipements, comme les roues de trains à grande vitesse. Enfin, la diffusion de neutrons aux petits angles est utilisée pour caractériser des matériaux composites ou les aciers ferritiques-martensitiques ODS (Oxide Dispersion Strengthened materials) développés pour les nouvelles générations de centrales nucléaires. Son intérêt dans le **domaine des nanosciences** est lui aussi démontré⁷, de l'étude de la structure de nanoparticules et de leur organisation à celle de films minces, jusqu'à l'étude de l'ordre magnétique au sein de nanostructures.

Un point fort actuellement de la diffusion neutronique réside dans ses techniques d'**imagerie**, qui ont été développées récemment en France à ORPHEE/LLB. La radiographie et la tomographie neutronique permettent de visualiser des éléments légers à l'intérieur de pièces massives. ORPHEE fournit des neutrons à deux stations d'imagerie :

- une station « industrielle », principalement dédiée au contrôle de pièces explosives (~4000 pièces par an, Ariane-Espace et Dassault)
- une deuxième station dédiée aux études plus fondamentales. Elle est entre autres utilisée par l'IFP Energies Nouvelles dans le domaine de l'extraction du pétrole, par le CEA/DRT pour l'étude des piles à combustible et dans le domaine de l'agroalimentaire.

En conclusion, grâce à ses performances, la technique de diffusion de neutrons est incontournable dans de nombreux domaines comme la science des matériaux, la physique, la physico-chimie, la biophysique et l'ingénierie. Elle ne peut être remplacée par d'autres méthodes complémentaires, comme la diffusion des rayons X par exemple. Elle donne aussi

⁸ Lauréat du prix Nobel de physique en 1970 pour ses travaux fondamentaux et ses découvertes sur l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme.

bien accès à la compréhension fine de mécanismes fondamentaux à l'échelle atomique ou moléculaire, qu'à des études macroscopiques sur des objets volumineux d'intérêt industriel.

2. La communauté des neutroniciens français

- La communauté française des utilisateurs de neutrons (1750 scientifiques⁹) est la **communauté la plus importante au niveau mondial et l'une des plus dynamiques**. Elle représente près de 30 % des utilisateurs européens, devant l'Allemagne, l'Angleterre ou la Suisse.
- **La source nationale de neutrons ORPHEE/LLB contribue notablement au rayonnement scientifique de la recherche française** puisqu'elle couvre 60 % de la demande française en diffusion de neutrons ; en sont issues les 2/3 des publications françaises utilisant cet outil.
- Les neutrons, contrairement aux autres rayonnements (rayons X par exemple) qui peuvent être utilisés au sein des laboratoires avant d'accéder aux grands instruments associés (synchrotrons, X-FEL), ne peuvent être produits qu'au sein de grandes infrastructures de recherche. L'accès « simple et aisé » aux neutrons n'est donné à la communauté qu'à travers une source nationale.
- **L'existence d'une source nationale est la condition *sine qua non* de l'existence d'une communauté nationale compétitive au niveau européen et international¹⁰**. Sans l'accès aux neutrons que représente LLB/ORPHEE, la communauté française, qui a construit son leadership sur plusieurs décennies, déclinera en quelques années, en particulier parce qu'il ne sera plus possible de former suffisamment de doctorants et post-doctorants à la diffusion des neutrons.
- Sans source nationale, les chances raisonnables de succès des expériences sur les TGIR européens (ILL et le futur ESS) seront notablement réduites. **L'investissement majeur, tant scientifique que financier de la France dans ces TGIR européens, ne bénéficierait plus à toute une communauté, mais à un nombre réduit d'experts.**

3. Recommandations

À l'heure où les États-Unis redécouvrent la nécessité d'utiliser et de développer la diffusion des neutrons, après une période d'étiage et tentent de regagner leur retard sur l'Europe, quand l'Allemagne pourrait devenir le leader européen dans ce domaine, nous insistons sur les points suivants, en notre qualité de CSI de l'INP :

- Un investissement important a été réalisé par la France pour créer et faire vivre l'unité ORPHEE/LLB où de belles pages de la physique ont été écrites et peuvent encore l'être. Cet

⁹ Scientifiques ayant publié, entre 2001 et 2011, au moins 5 articles faisant appel à la diffusion neutronique

¹⁰ Rapport international sur le laboratoire Léon Brillouin en 2003 : <http://www-llb.cea.fr/rapport/nozieres.pdf> ; Neutron research in Germany: 2015-2040, strategy paper by S. Schmidt (FZJ), A. Schreyer (HZG) and H. Dosch (DESY)

investissement doit être rentabilisé au-delà de 2019.

- Un pays comme la France, avec une communauté de 1750 scientifiques utilisant les neutrons et qui héberge un centre de neutrons européen (ILL), situation unique en Europe, se doit d'avoir une source nationale pour faciliter l'accès à cet outil unique qu'est la diffusion des neutrons à ses chercheurs et ses industriels. C'est aussi l'existence d'une source nationale qui permettra à la communauté française de participer à la construction de la future source européenne ESS et d'en utiliser pleinement les potentialités.

Les scénarios possibles sont :

1. Le **maintien d'ORPHEE en opération jusqu'au moins 2025**¹¹ pour préserver la qualité des travaux de la communauté française et la préparer à utiliser une technologie nouvelle disponible à ESS, qui vraisemblablement n'atteindra son fonctionnement en rythme de croisière qu'en 2030.
2. L'arrêt d'ORPHEE fin 2019 et le déplacement de certains instruments à l'ILL et sur d'autres réacteurs

Nous recommandons le premier scénario. Le second scénario nous semble être une solution *a minima* qui implique une forte diminution de l'accès à la diffusion des neutrons pour les chercheurs et industriels français.

¹¹ La réalisation d'une nouvelle source de neutrons à haute brillance n'est pas encore mure au niveau technologique. Néanmoins une politique de réflexion pour développer et financer une autre source nationale nous semble indispensable.