

## **Bilan du workshop « neutrons et métallurgie » au vu de l'intérêt de la diffusion neutronique dans le domaine de la métallurgie et des ressources requises pour son utilisation.**

*Fabrice COUSIN (LLB Saclay), Frédéric OTT (LLB Saclay), Marie PLAZANET (LiPhy Grenoble), Sébastien ROUQUETTE (LMGC, Montpellier)*

La 2FDN a organisé à Paris 13<sup>ème</sup> un atelier le 11 décembre 2025 visant à faire le point sur l'utilisation de la diffusion neutronique dans le domaine de la métallurgie. L'atelier a réuni une quarantaine de participants provenant d'horizons très différents. En faisant le constat qu'une partie des utilisateurs français qui venaient au LLB sur le réacteur Orphée jusqu'en 2019 s'est détournée de la technique, les objectifs de l'atelier étaient d'identifier les domaines de recherche liés à la métallurgie pour lesquels la diffusion neutronique est pertinente et de présenter à la communauté des utilisateurs français un panorama des ressources disponibles actuelles et à venir (ILL, ESS, ICONE).

### **1. Thématiques principales d'études et techniques utilisées**

#### *1.1 Thématiques d'étude*

Le programme, présenté en annexe, a été élaboré par le comité d'organisation sur invitations, en se basant principalement sur des publications récentes (moins de 5 ans) impliquant des expériences de diffusion neutronique. Il a fait émerger 3 grandes thématiques d'études :

- Les matériaux pour le nucléaire, en particulier pour le suivi de modifications structurales potentielles sous irradiation.
- Les hydrures métalliques pour le stockage de l'hydrogène.
- L'étude des contraintes résiduelles dans les matériaux, en particulier dans le domaine de la fabrication additive.

**Il sera important d'évaluer s'il existe d'autres domaines de la métallurgie qui pourraient bénéficier de la diffusion neutronique et qui n'ont pas été représentés à l'atelier, soit parce que la communauté s'est détournée des techniques neutroniques, soit par méconnaissance du potentiel de ces techniques.**

#### *1.2 Techniques utilisées et accès aux faisceaux*

Les principaux avantages de la diffusion neutronique pour l'étude des matériaux en métallurgie sont : (i) la **forte pénétration des neutrons** qui permet l'étude en volume de grosses pièces; (ii) la **sensibilité aux éléments légers**, qui permet par exemple la localisation précise des atomes d'hydrogène dans des hydrures par diffraction; (iii) la **forte différence de longueur de diffusion neutronique d'éléments proches dans le tableau périodique**, qui

permet de caractériser par exemples des nano-précipités dans des alliages ; (iv) **la sensibilité au magnétisme** permettant de découpler structure nucléaire et structure magnétique.

**La technique utilisée principalement est la diffraction des neutrons qui permet notamment la détermination des textures et des contraintes résiduelles.** Pour réaliser ce genre de mesures, la communauté française dispose du temps français de l'instrument dédié SALSA à l'Institut Laue Langevin (ILL) (<https://www.ill.eu/for-all-users/instruments/instruments-list/salsa/description/instrument-layout>) et pourra accéder à terme au diffractomètre à temps de vol pour l'ingénierie des matériaux BEER que la future source à spallation ESS proposera à la communauté (<https://ess.eu/instruments/beer>). La fermeture du réacteur Orphée à Saclay a cependant constitué une perte sèche importante pour la communauté française puisqu'il y avait 2 diffractomètres spécifiquement dédiés à l'étude des matériaux, 6T1 pour la détermination des textures et Diane pour la détermination des contraintes internes.

La seconde technique également utilisée de façon importante **est la diffusion de neutrons aux petits angles (DNPA)** qui permet de caractériser des nano-précipités, des inclusions ou des défauts de taille nanométrique (typiquement de 1 nm à 100 nm). Il existe une offre importante à l'ILL avec 4 instruments de DNPA disponibles, mais l'accès est compliqué par la forte pression sur les appareils, la technique étant très populaire. En outre, il n'y a pas à l'heure actuelle de scientifique sur les lignes de DNPA de l'ILL spécialisé en métallurgie, ce qui ne permet pas de tisser de liens avec la communauté. La communauté disposera à terme de l'instrument SKADI à l'ESS (<https://ess.eu/instruments/skadi>). La fermeture du réacteur Orphée a été également très dommageable puisqu'il y avait 4 instruments disponibles, et *last but not least*, des scientifiques spécialistes de DNPA dont le cœur de métier était la métallurgie. **La réflectivité de neutrons**, permettant de déterminer la structure de couches minces sur les mêmes tailles caractéristiques que la DNPA, est utilisée de façon marginale.

La dernière technique utilisée est **l'imagerie neutronique**, mais dans des proportions moindres que la diffraction ou la DNPA. C'est une technique en plein essor, avec le développement récent de stations d'imagerie dans tous les grands centres de diffusion neutronique. Du fait de ses caractéristiques uniques (diffusion importante par l'hydrogène et forte transparence à la plupart des éléments lourds), son utilisation pourrait être plus importante. Outre son intérêt pour la recherche, il est à noter qu'elle permet également de faire des mesures de type contrôle qualité sur de grosses pièces métalliques. Il y avait ainsi une station d'imagerie opérée par la direction de l'énergie nucléaire du CEA (DEN) sur le réacteur Orphée qui répondait à des demandes d'industriels tels qu'Aérospatiale, Dassault-Aviation et Pyro-Alliance.

Les techniques de spectroscopie neutronique (spectroscopie 3-axes/Temps de Vol, /rétrodiffusion/spectroscopie à écho de spins) ne sont pas utilisées de façon significative.

Enfin, il est à noter que **les performances des instruments se sont fortement améliorées** depuis une vingtaine d'année, et ce, quelles que soient les techniques neutroniques utilisées : soit grâce à l'avènement de sources avec des brillances élevées (les sources à spallation SNS aux Etats-Unis ou JPARC au Japon, et bientôt ESS en Europe), soit du fait de l'amélioration de l'instrumentation (optique, détecteurs, etc.). Cela a permis d'améliorer les taux de comptage

de plusieurs ordres de grandeur sur les instruments installés sur les sources existantes telles que l'ILL.

## 2. Bilan de la table ronde

A la fin de l'atelier, une réflexion a été menée sur les actions potentielles à mener pour promouvoir plus activement la neutronique auprès de la communauté des métallurgistes au cours d'une table ronde. Les participants à l'atelier sont restés nombreux pour cette table ronde avec des échanges très vivants. Les organisateurs remercient les participants. Les trois sections suivantes résument ces discussions.

### 2.1 Support aux utilisateurs (instruments, post-processing, sample environment)

Même avec le développement de nombreux programmes d'analyse en accès libre, **le support au post-processing des données est prioritaire car les utilisateurs néophytes ou occasionnels sont vite démunis sans aide**. D'une part, parce que tous n'ont pas l'expertise nécessaire à l'analyse des données qui nécessite un investissement important. D'autre part, parce que l'amélioration des performances des instruments s'est accompagnée de processus de réduction des données parfois très complexes, avec des quantités de données parfois très lourdes. Il apparaît qu'en pratique une grande partie des données acquises ne sont pas exploitées. Une **proposition discutée serait l'organisation de sessions de travail entre les utilisateurs et un pôle de responsables d'appareils et de spécialistes, une fois les données acquises**. De telles actions existent par exemple dans la communauté de la matière molle pour le traitement et l'interprétation de données DNPA (voir par exemple les initiatives du GDR SLAMM <https://slamm.cnrs.fr/?p=2250>) et compléteraient les écoles thématiques déjà existantes.

Concernant les instruments, un point crucial est remonté lors des discussions sur **la possibilité de faire des expériences en environnement « chaud » (sur des échantillons activés)** pour l'étude des matériaux nucléaires, qu'ils soient actifs ou activables sous faisceau. La localisation géographique des sources, avec des instruments proches des laboratoires d'étude est un point clé, le transport d'échantillons radioactifs étant problématique, tant du point de vue de la sécurité que de la réglementation. En ce sens, **des instruments spécifiquement dédiés à des mesures d'échantillons actifs**, tels que la ligne Mars de diffusion des rayons X sur le synchrotron Soleil (<https://www.synchrotron-soleil.fr/en/beamlines/mars>), **serait une opportunité importante**.

### 2.2 Modes d'accès

Le premier point est de rendre les neutrons plus visibles dans le domaine de la métallurgie car la taille de la communauté des métallurgistes neutroniciens est faible. Ceci ne permet pas une visibilité des techniques neutroniques aussi importante qu'elle peut l'être dans des domaines tels que la matière molle ou la supraconductivité pour lesquelles elle est spontanément représentée dans toutes les conférences importantes de la spécialité. Il faut donc être très

pro-actif pour informer, puis mettre le pied à l'étrier aux utilisateurs néophytes potentiels en facilitant l'accès, et faire passer le message que la technique est accessible.

Des canaux existent à utiliser plus largement. L'expérience montre que des événements proposés par les neutroniciens peuvent être de gros succès, comme par exemple la conférence Neutrons for Fusion and Nuclear Applications organisée par le MLZ en 2025 (<https://indico.frm2.tum.de/event/540/overview>).

Parmi les actions « neutrons » potentielles à mener à destination de cette communauté, les propositions suivantes ont été discutées :

- La tenue d'un stand sur la neutronique mutualisé entre tous les acteurs français de la neutronique (LLB, SFN, 2FDN, ILL) à la conférence Matériaux 2026 (<https://matériaux2026.org/>) qui est le grand forum quadri-annuel français dans le domaine des matériaux. Cette action a déjà été entreprise lors des éditions précédentes en 2018 et 2022 et sera réitérée en 2026.
- S'insérer dans le cycle de conférences « la métallurgie, quel avenir ! » (<https://sf2m.fr/events/la-metallurgie-quel-avenir/>) qui a une grande audience.
- Se rapprocher de la Société Française de Métallurgie et Matériaux (<https://sf2m.fr/>) qui a notamment réactivé son « Bureau Grands Instruments » pour mener des actions communes avec la SFN/2FDN. Elle organise par exemple un atelier dédié aux mesures in situ et in operando sur les grands instruments à Paris en 2026 (<https://sf2m.fr/events/js2026/>).

Les modalités d'accès au faisceau ont été discutées. Il existe un consensus pour offrir des modes d'accès simples et rapides (« easy access »). Ces modes d'accès doivent permettre de soit faire des mesures tests pour attirer des nouveaux utilisateurs, soit de préparer des demandes d'expériences ou compléter une étude, en plus des modes classiques d'accès par soumission de propositions. Ces modes classiques imposent un délai important entre le dépôt de demande et la réalisation de l'expérience (environ 6 à 9 mois). Ces modes d'« easy access » sont différents des modes « fast access » qui sont dévolus à l'obtention de temps rapide au fil de l'eau pour la réalisation d'expériences sur des sujets très concurrentiels. Une **proposition serait de mutualiser du temps faisceau pour la communauté via la mise en place de « la nuit des neutrons » permettant un accès régulier, souple et équitable au fil de l'eau, sans évaluation.** La fréquence de cet événement serait d'un jour par mois par exemple, sur certains instruments ayant des temps de comptages rapides (diffractromètres de poudre ou aux petits angles) de sorte à ce que cet accès simple ne soit pas restreint aux seuls utilisateurs connaissant les responsables d'instrument. Cette proposition a été fortement débattue et fera l'objet, dans sa mise en œuvre, d'un périmètre parfaitement cadré afin qu'il n'y ait pas de dérives vers des « expériences cachées ».

Il a été souligné que ces moyens d'accès rapides existent déjà à l'ILL, et en général dans tous les grands centres neutroniques, mais qu'ils sont peu utilisés. Ils sont en effet très peu mis en avant lors de la diffusion des appels à proposition, et peu visibles sur les sites des centres. **La communication sur ces facilités d'accès doit donc être améliorée** pour informer les utilisateurs, néophytes ou non.

### *2.3 Pertinence des techniques de diffusion neutronique (forces / faiblesses). Sur quoi mettre l'accent ?*

Les forces des neutrons, rappelées dans la partie 1.2, ont été très bien illustrées lors des exposés, qui sont parfaitement complémentaires par rapport aux rayons X et des techniques de microscopie. Ils restent une sonde unique, qui donne des résultats qui ne peuvent être obtenus par des techniques de laboratoire.

Les techniques de neutronique pâtissent d'une part de ne pas être enseignées en second cycle, si ce n'est très ponctuellement dans certains Master 2 recherche, la communauté n'est donc pas formée et d'autre part d'être accessibles que via des TGIR. La situation est très différente pour les rayons X, pour lesquels il existe des appareils de laboratoire très performants et très complémentaires aux synchrotrons, qui permettent la formation de la communauté et un large accès aux utilisateurs.

### **Conclusion**

L'atelier a montré le intérêt et l'apport unique des techniques de diffusion neutronique en métallurgie. Le domaine subissant une perte d'activité depuis 10 ans, les participants de l'atelier se sont montrés fortement intéressés par des actions de promotion de la neutronique.

**Après avoir identifié les thématiques non identifiées dans ce premier programme, une suite à cet atelier pourra être très bénéfique pour la communauté des neutroniciens en métallurgie.**

Parmi les actions qui peuvent être mises en œuvre rapidement, ont été identifiées :

- S'insérer dans le cycle de conférence « La métallurgie, quel avenir ! »
- Organiser des « Nuits des neutrons » (au moins sur les CRG)
- Organiser des « Ateliers » de traitement des données

## **Annexe : programme de l'atelier**

### **Session 1**

9h00 – 9h05 : Accueil et présentation de la 2FDN par les organisateurs

9h05 – 9h20 : **M.-H. Mathon** (CEA) : *Les ressources neutroniques disponibles pour la communauté*

9h20 – 10h05 : **Yann de Carlan** (CEA, SRMA) & **Jean Luc Bechade** (CEA, INSTN) : *Apport des neutrons pour l'analyse de matériaux métalliques pour le nucléaire : apport de la diffraction et de la diffusion aux petits angles.*

10h05 – 10h45 : **Roberto Coppola** (ENEA, Rome) : *Effets de l'irradiation neutronique sur les aciers pour les futurs réacteurs à fusion thermonucléaire.*

### **Session 2**

11h15 – 11h40 : **Thierry Grosdidier** (LEMA, Université Lorraine) : *In situ observation of the fundamental mechanisms underlying hydrogen sorption in forged Mg–Mg<sub>2</sub>Ni composites.*

11h40 – 12h10: **Judith Monnier** (ICMPE Thiais) : *Neutron analysis to support structural analysis and hydrogenation properties investigation of Y<sub>0.88</sub>Ni<sub>3-x</sub>Mnx compounds for solid-gas hydrogen storage.*

12h10 12h30 **Thilo Pirling** (ILL, Grenoble) : *Spoilt for choice: neutrons or X-rays?*

### **Session 3**

14h00 – 14h30 **Inés Puente Orench** (ILL, inst. SALSA) : *Into the Invisible: SALSA Methods and Results — A Neutron Diffractometer for Residual Stress Analysis.*

14h30 – 15h00 **Bruno Courant** (Université de Nantes) : *Apport de la diffraction des neutrons à l'analyse des contraintes générées par des procédés de fabrication additive.*

15h00 – 15h30 **Chedly Braham** (ENSAM Paris) : *Analyse des contraintes par les techniques de diffraction (neutrons et RX) dans les aciers multiphasés.*

15h50 – 16h50 : **table ronde**

a/ Support aux utilisateurs (instruments, post-processing, sample environment)

b/ Modes d'accès

c/ Pertinence des neutrons (forces faiblesses). Sur quoi mettre l'accent ?