

Sonate

NEUTRONS FOR
MATERIALS SCIENCE

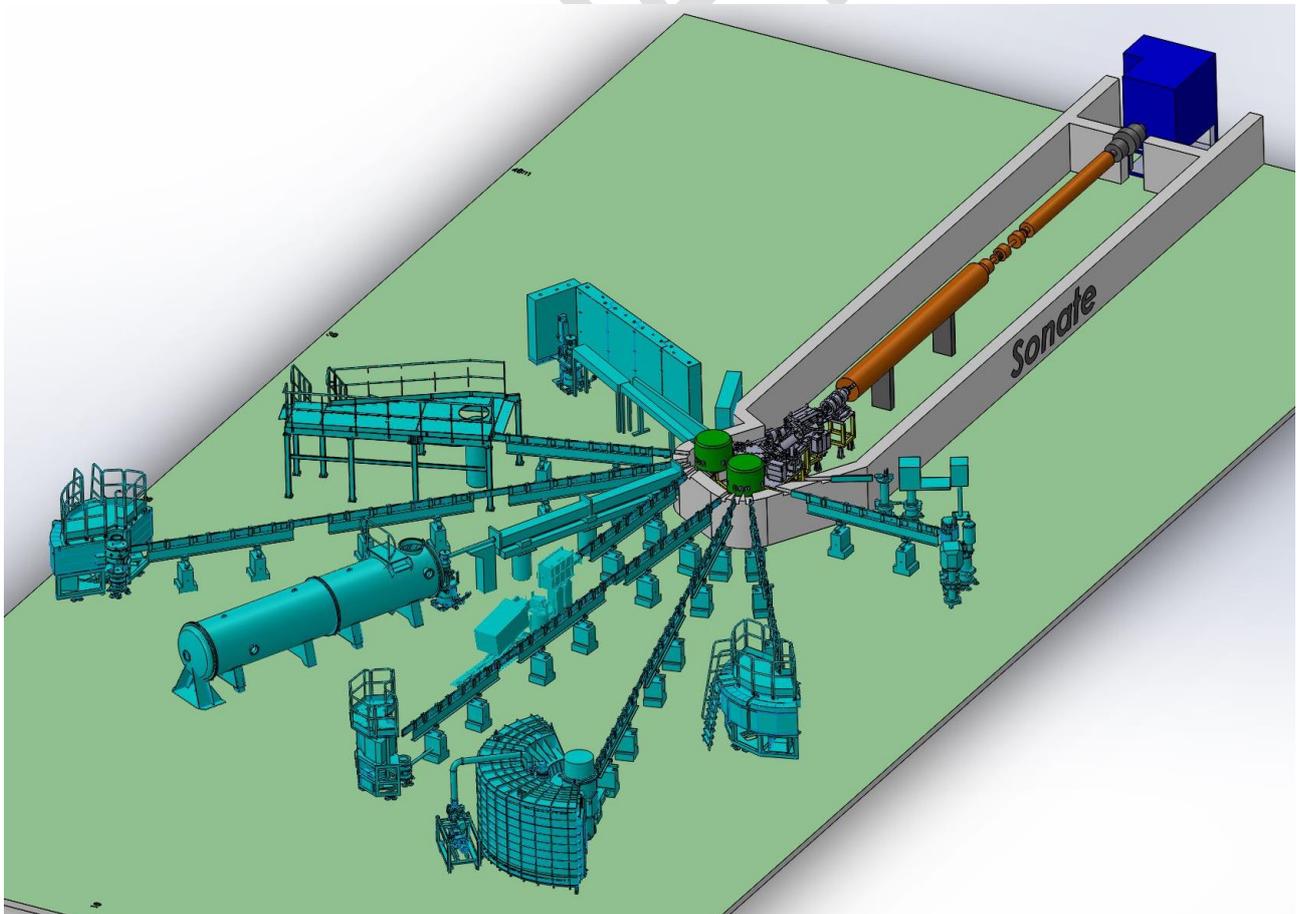


Table des matières

1	La diffusion neutronique	5
1.1	Les propriétés uniques des neutrons.....	6
1.2	Neutrons et science des matériaux.....	6
1.2.1	Les utilisations des techniques de diffusion neutronique en science des matériaux	8
1.2.2	Exemples d'utilisation des techniques de diffusion neutroniques	9
1.3	Quantification de la recherche en lien avec l'industrie	12
2	Panorama de la diffusion neutronique en Europe	14
2.1	Les sources de neutrons dédiées à la diffusion neutronique en Europe	14
2.2	Cas particulier de la France	14
2.3	La production scientifique de la diffusion neutronique.....	15
3	SONATE : une nouvelle plateforme de diffusion neutronique en France	18
3.1	Distinction entre « Capacité » et « Performances » « Capacity » versus « Capability »	18
3.2	Les atouts de la France en diffusion neutronique.....	20
3.3	SONATE : une plateforme de diffusion neutronique pour la science des matériaux. ...	21
3.4	Offre instrumentale proposée par SONATE	23
3.4.1	Instruments envisagés.....	23
3.4.2	Volume d'utilisation des instruments proposés.....	24
3.5	Contribution de SONATE dans le paysage de la neutronique française	25
4	Quels utilisateurs pour quelle science sur SONATE ?.....	26
4.1	La recherche au Laboratoire Léon Brillouin	26
4.1.1	Groupe « matière molle et biophysique » (MMB)	26
4.1.2	Groupe « Nouvelles Frontières dans les Matériaux Quantiques »	26
4.1.3	La métallurgie au LLB.....	27
4.2	La recherche des laboratoires français sur les différents instruments de SONATE.....	27
4.3	Industrie	30
4.4	« Fast Access ».....	31
4.5	Développements instrumentaux.....	31
4.5.1	Développements méthodologiques en neutronique	31
4.5.2	Mise à disposition d'une sortie faisceau pour un groupe de recherche extérieur	31
4.6	Formation / Education	32
5	Positionnement de SONATE par rapport aux autres projets d'instruments de diffusion neutronique en Europe	32
5.1	Positionnement du LLB dans le paysage de la diffusion neutronique pour la prochaine décennie.	32
5.2	Cas de la diffusion aux petits angles	34

5.3	Cas de la diffraction de poudre	35
5.4	Cas de la diffusion inélastique 3 axes.....	35
5.5	Cas de la spectroscopie Spin-Echo	35
5.6	Complémentarité entre SONATE et ESS.....	35
6	Conclusion	36
7	Références.....	37
8	Annexe 1 / Etat de l'art sur les sources compactes	38
8.1	Intérêt international sur le potentiel des sources compactes de neutrons.....	38
8.2	Les CANS dans le monde	38
8.3	Exemple d'utilisation de ces sources compactes pour la diffusion neutronique.....	40
8.4	Etat de l'art des CANS « Haute Brilliance »	41
8.4.1	Les besoins techniques pour la construction d'une source haute brillance	41
8.4.2	Les développements en cours en France	41
9	Annexe 2 / Performances de la source SONATE pour la diffusion neutronique. Proposition de suite instrumentale	44
9.1	Performances des instruments de diffusion neutronique sur la plateforme SONATE ..	44
9.2	Définition de l'offre proposée.....	45
9.3	Détails d'une possible suite instrumentale sur SONATE / PHASE 1	49
9.3.1	Diffusion de neutrons aux petits angles (SANS 1) (SPACE).....	49
9.3.2	Réflectivité de neutrons (HERMES).....	49
9.3.3	Imagerie neutronique (IMAGINE).....	50
9.3.4	Diffraction de poudres (PRESTO).....	50
9.3.5	Diffraction de poudres / structures à grande échelle	50
9.3.6	Spin-Echo (MUSES)	50
9.4	Détails d'une possible suite instrumentale sur SONATE / PHASE 2&3	51
9.4.1	Diffusion de neutrons aux petits angles et magnétisme (SANS 2).....	51
9.4.2	Diffraction de poudres 3 / appareil haute résolution	51
9.4.3	Spectroscopie en Temps de vol.....	52
9.4.4	Temps de vol inverse	52
9.4.5	Instrumentation innovante utilisant les techniques de spin-écho.....	52

SONATE

Projet Scientifique autour d'une source de neutrons compacte

Abstract : Nous présentons les possibilités offertes par la construction d'une nouvelle source de diffusion neutronique. Cette source serait essentiellement destinée à la science des matériaux sous toutes ses formes, depuis les mesures de diffusion aux petits angles (liquides, polymères, matériaux d'intérêt biologique), jusqu'aux mesures de diffraction sur des matériaux innovants issus des recherches sur la thermo-électricité, les matériaux multifonctionnels comme les multi-ferroïques et plus généralement tous les systèmes corrélés. Cette source serait destinée aux recherches fondamentales comme plus appliquées. Elle serait basée sur le principe du stripping, et donc associée à un accélérateur et non pas à un réacteur nucléaire. Son implantation dans le cadre de l'Université Paris Saclay paraît naturelle, pour tirer parti du cadre exceptionnel offert par cet environnement ainsi que du savoir-faire et du travail de pionnier fourni par les équipes du LLB.

1 La diffusion neutronique

L'utilisation des neutrons pour sonder et comprendre la matière condensée a été développée au cours de la seconde moitié du 20^e siècle. Ils contribuent à tous les domaines de recherche fondamentale de la physique de la matière condensée et de la chimie : magnétisme, chimie du solide, physique des polymères, physique des liquides, structures des protéines, métallurgie, bio-physique... Ils contribuent aux caractérisations quasi routinière de tout nouveau matériau issu des recherches modernes mais ils ont aussi participé au développement des théories modernes de la physique de la matière condensée, par exemple en mettant en évidence le concept de symétrie brisée comme moteur des transitions de phases ou en révélant de nouveaux états de la matière.

Les neutrons contribuent aussi à relever les défis sociétaux dans des thématiques appliquées. Des exemples peuvent être cités dans divers domaines.¹

- **L'énergie**, où le développement des piles à combustible bénéficie de l'imagerie neutronique et des expériences SANS² pour améliorer la conception des membranes échangeuses d'ions. Afin d'obtenir de meilleures performances, les batteries et le stockage d'hydrogène nécessitent une analyse approfondie et des caractérisations de nouveaux matériaux par diffraction de poudre. Les neutrons sont utilisés pour caractériser les matériaux de structure et les éléments combustibles utilisés dans les centrales nucléaires.

- **Le transport**, où le développement de nouveaux matériaux en métaux alliés plus légers et plus résistants est crucial. Pour pouvoir fournir ces matériaux, l'industrie a besoin de neutrons pour caractériser la structure et la texture à chaque étape du processus de fabrication. De nouveaux pneus renforcés de particules de silice et de polymères sont développés par de grandes entreprises qui nécessitent des mesures SANS pour comprendre comment améliorer leurs formules.

- **La santé**, où l'industrie pharmaceutique utilise le SANS pour développer des vésicules comme vecteurs de nouvelles molécules dans les thérapies médicales. Les neutrons contribuent à comprendre l'interaction de l'eau avec les protéines. Le comportement des protéines à la surface des membranes biologiques peut être étudié.

- **Le climat**, où la compréhension des clathrates est importante pour les empêcher de libérer des milliers de mètres cubes de CH₄ dans l'atmosphère.

- **Le patrimoine culturel**, où les neutrons sont capables de pénétrer profondément dans la matière, et permettent des expériences d'imagerie ou de diffraction pour fournir des informations uniques sur l'intérieur des artefacts ou sur l'efficacité des couches de protection.

¹ • [Neutrons for organic solar energy technologies \(ISIS Neutron and Muon Source, UK\)](#)
• [Neutron experiments reveal proteins which can inhibit amyloid plaque formation \(ILL, France\)](#)
• [Toxic and aggressive, but widely used \(Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Germany\)](#)
• [Neutrons for building a car \(Budapest Neutron Centre, Hungary\)](#)
• [Future Science: What will we see at ESS? \(European Spallation Source, Sweden\)](#)
• [Coincidence helps expand cornerstone of physics \(Forschungszentrum Jülich, Germany\)](#)
• [Successful demonstration of neutron scattering as a characterization method for battery materials – silicon nanoparticles \(Institute for Energy Technology, Norway\)](#)
• [Membrane interaction of off-pathway prion oligomers and lipid-induced onpathway intermediates during prion conversion: A clue for neurotoxicity \(Laboratoire Léon Brillouin\)](#)
• [A hand like no other \(Paul Scherrer Institut, Switzerland\)](#)

² SANS Small Angle Neutron Scattering / DNPA Diffusion de Neutrons aux Petits Angles

- **Les communications**, où les neutrons permettent d'étudier des matériaux magnétiques complexes qui constituent la base de nouveaux composants électroniques dans les téléphones portables et les matériaux de communication.

1.1 Les propriétés uniques des neutrons

Les neutrons sont un outil essentiel dans les sciences de la matière condensée et l'industrie pour sonder la structure et la dynamique de l'échelle mésoscopique à l'échelle nanométrique sur des échelles de temps de la pico-seconde à la micro-seconde ou des échelles d'énergie allant du neV à l'eV.

Les neutrons sont uniques

Ils ont des propriétés extraordinaires qui les rendent indispensables pour la recherche

Les neutrons ont des longueurs d'onde et des énergies qui permettent d'obtenir des informations sur l'organisation de la matière à des échelles de longueur de 10^{-10} à 10^{-2} m dans les études de structures et à des échelles de temps allant de 10^{-12} à $10 \mu\text{s}$ dans les expériences de spectroscopie.

Les neutrons sont une sonde pénétrante, qui accède à des informations sur le volume d'un échantillon ainsi qu'à sa surface sans les effets d'endommagement rencontrés avec les électrons et les rayons X.

Les neutrons sont la seule sonde de diffusion sensible au contraste isotopique, fournissant un outil unique pour décrypter l'organisation de systèmes biomédicaux et de matière molle.

Les neutrons possèdent un moment magnétique qui en fait une sonde irremplaçable pour l'étude du magnétisme.

La diffusion des neutrons peut être calculée exactement, faisant du neutron une sonde de la matière précise et quantitative. Cette propriété souligne la valeur des expériences neutroniques couplées à des méthodes de simulation et de modélisation numérique.

Adapté du « Science Case ESS »

1.2 Neutrons et science des matériaux

Les propriétés uniques des neutrons comme sonde de la matière coïncident avec des problèmes scientifiques et sociétaux tels que ceux liés à l'énergie, aux transports, aux technologies de l'information ainsi qu'à l'environnement et à la santé. La Figure 1 illustre les demandes en temps de faisceau en fonction de différents défis sociétaux.

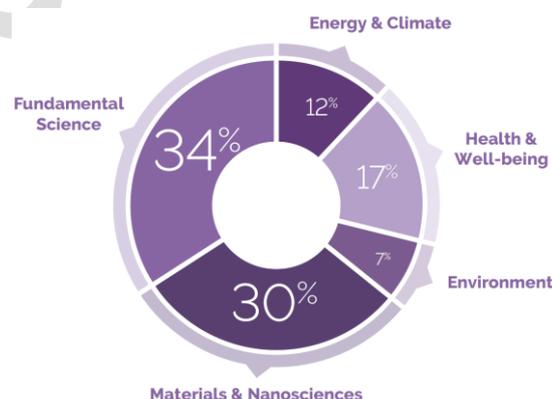


Figure 1: Utilisation du temps de faisceau en fonction des grands défis sociétaux. Moyenne sur l'ILL, le LLB et ISIS (adapté de [3]).

³ ILL Associates, Strategy for Neutrons, 2013

http://www.ill.eu/fileadmin/users_files/documents/news_and_events/

NEUTRONS ARE UNIQUE

They have extraordinary properties that help addressing society's grand challenges

ENERGY

Energy storage, transport, conversion all benefit from neutron research. The investigation of properties of new energy storage materials relies heavily on neutron scattering. Suitable storage materials are analysed *In operando* using neutrons, for instance for transportation. Neutron scattering can help improve lithium batteries. The development of superconductors for energy transport relies on information from neutron scattering. In photovoltaic and solar energy research, neutrons are used to study the performance of solar cells

INDUSTRIES & MATERIALS

Countless materials are produced every day to make our life easier. Cars, planes, trains, turbines, cosmetics, laundry detergents, drugs, all are improved both in efficiency, quality and price thanks to information provided by neutrons experiments. Furthermore, developing advanced materials that support new technologies depends in scientists' ability to manipulate their properties at the atomic level, and neutron science is a key to these efforts. **Industrial innovation and competitiveness** rely on fundamental knowledge provided by neutrons on the behaviour of molecules, or the determination of inner stresses to develop components with higher performance

ENVIRONMENT

Thanks to their tremendous capabilities for analysis, neutrons contribute to the development of **clean technologies**. Neutron scattering helps scientists to fight pollution and develop eco-friendly processes that release fewer contaminants into the environment. Neutrons can provide information about rare elements and serve as a way to detect contaminants. Neutron techniques can help define the intrinsic nature of pollutants and its relationship with the substance they are polluting. Neutrons give insights into the role of clouds in global warming and play a role in the battle to curb carbon emissions

HEALTH & LIFE

Research is fundamental to fight diseases. Neutron scattering provides vital information that cannot be acquired using any other technique. Neutrons provide structural information of relevance to degenerative diseases such as Alzheimer's. Biological function and enzymatic action benefit from critical detail provided by neutrons on hydrogen bonding and hydration. Drug delivery benefits from neutron scattering studies which may result in new therapeutic approaches in the future. Fast neutrons can be used for the treatment of malignant tumours. Neutrons are also used for the production of radionuclides that are used in **medical diagnosis and radiotherapy**

ARTS & CULTURAL HERITAGE

Neutrons are an invaluable tool to analyse precious archaeological objects: they are **non-destructive** and can penetrate deep into cultural artefacts or beneath the surface of paintings, to reveal structures at the microscopic scale, chemical composition or provide 3D images of the inner parts of the artefacts. For heritage science purposes, whole artefacts can be placed in the neutron beam and analysed at room conditions, without sample preparations. Analysis can also be done under vacuum or other conditions, such as high or low temperature. The measurements are made in real time, which can be useful for testing conservation materials and methods

Adapté de la plaquette ENSA at ECNS, Zaragoza 2015.

[news/2013/20130704-Report-ILL-Associates-including-scientific-case.pdf](https://www.ill.eu/news/2013/20130704-Report-ILL-Associates-including-scientific-case.pdf)

1.2.1 Les utilisations des techniques de diffusion neutronique en science des matériaux

Les principales techniques de diffusion neutronique peuvent être classées en trois grandes catégories : les études de structures à grande échelle (3 nm à 3mm), la diffraction et la spectroscopie (5 neV à 100meV).

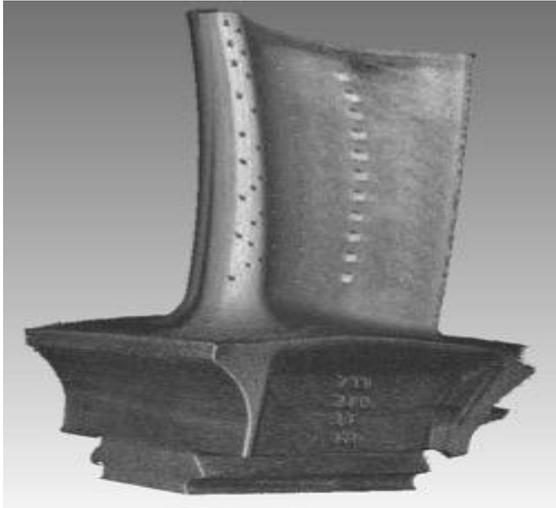
Structures à grande échelle	
SANS	<p>Applications : nano-objets en volume (tailles 2-600nm)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Caractérisation du nombre, de la taille, de la forme de nano-objets (sphères – coquilles – bâtonnets – lamelles) - Corrélation de position entre objets - Conformations de polymères et de protéines - Mesures de surfaces spécifiques <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Colloïdes – micelles - Solutions et fondus de polymères - Suspensions de nano-particules (fonctionnalisées) - Particules magnétiques - Composites polymères - Alliages / composites métalliques - Milieux poreux <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contraste isotopique (H/D) - Mesures dans des systèmes opaques - Contraste magnétique
Réflectivité	<p>Applications: films minces (2-100nm)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compositions, épaisseurs, rugosités <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Films minces de polymères - Systèmes de membranes biologiques, en interaction avec des protéines où des peptides - Films minces magnétiques <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contraste isotopique (H/D) - Contraste magnétique - Interfaces enfouies, en particulier l'interface solide-liquide
Radiographie	<p>Application : radio-tomographie d'échantillons volumiques</p> <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériaux poreux (roches – produits agroalimentaires – sols) - Piles à combustible - Composants pyrotechniques - Impression 3D <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité à l'hydrogène - Pénétration en profondeur - Transparence du plomb - Bon contraste entre métal et matériaux organiques
Diffraction	

Diffraction sur poudres	Applications : structure cristallographique des matériaux Domaines d'excellence <ul style="list-style-type: none"> - Batteries - Stockage de l'hydrogène - Hydrates de gaz - Matériaux magnéto-caloriques - Protéines hydratées Forces <ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité à l'hydrogène - Sensibilité magnétique - Mesures in-situ / operando
Textures / contraintes	Application : détermination de textures et contraintes <ul style="list-style-type: none"> - Textures métallurgiques - Cartographies de champs de contraintes Domaines d'excellence <ul style="list-style-type: none"> - Textures – énergies stockées - Alliages métalliques - Composites (métal – oxydes ou métal – nitrures) Forces <ul style="list-style-type: none"> - Mesures en volume (pièces industrielles) - Tenseur de contraintes en 3D
Spectroscopie	
Temps de vol	Applications : dynamiques de diffusion <ul style="list-style-type: none"> - Dynamique de diffusion de l'hydrogène ou des hydrocarbures dans des milieux poreux ou des liquides Domaines d'excellence <ul style="list-style-type: none"> - Batteries - Hydrates de gaz - Composés thermo-électriques Forces <ul style="list-style-type: none"> - Excellente résolution en énergie (meV - μeV)
Diffusion Inélastique	

1.2.2 Exemples d'utilisation des techniques de diffusion neutroniques

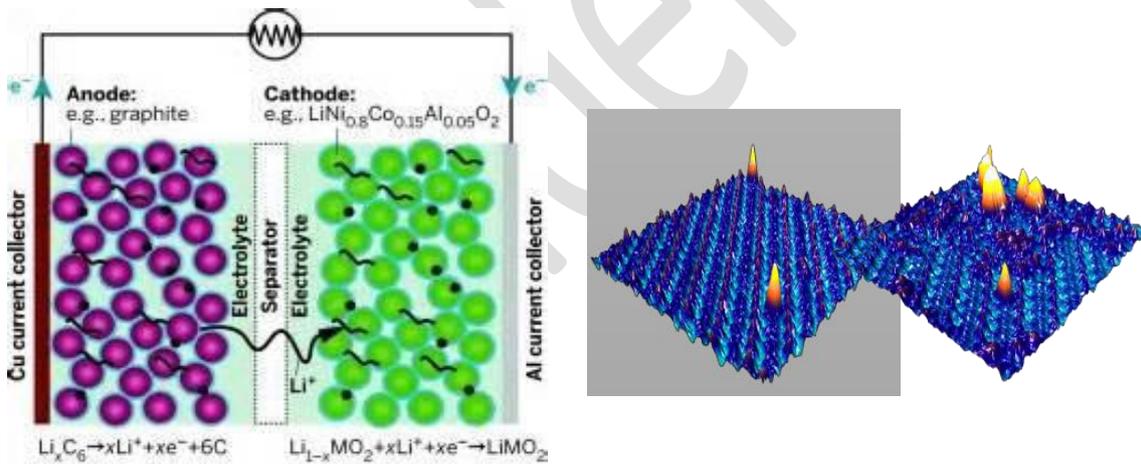
Grâce aux techniques de diffraction et de diffusion aux petits angles, les neutrons sont utilisés pour caractériser de nouveaux alliages métallurgiques (alliages type ODS avec des inclusions d'oxydes ou de nitrures, nouveaux alliages de titane, alliages à mémoire de forme). Il est aussi possible d'étudier de nouvelles méthodes de fabrication : stir welding, shot peening, laminage, compactage à chaud, impression 3D...

Les neutrons sont aussi utilisés pour vérifier l'intégrité de matériaux constitutifs de structures telles que les cuves nucléaires, les gaines de combustibles nucléaires en zircalloy, les pièces de structures clés (trains d'atterrissage, longerons d'avion, roues de train...). Les techniques utilisées sont la diffraction, la mesure du champ de contraintes et la diffusion aux petits angles.

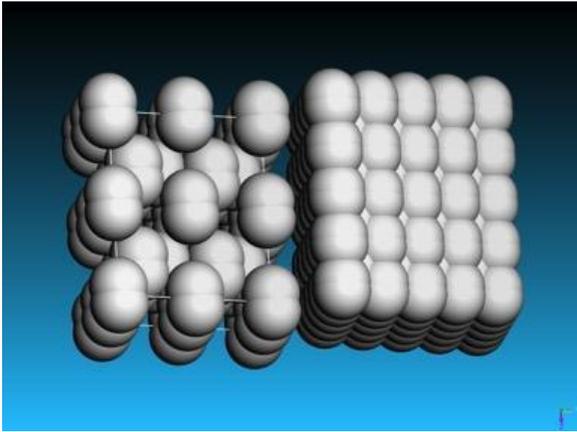


Les neutrons sont utilisés pour l'étude des batteries (caractérisation de nouveaux matériaux d'électrodes et de nouveaux électrolytes par diffraction) et des piles à combustible (nouvelles membranes échangeuses d'ions caractérisées par SANS ou formation d'eau suivi in-situ par radiographie neutronique).

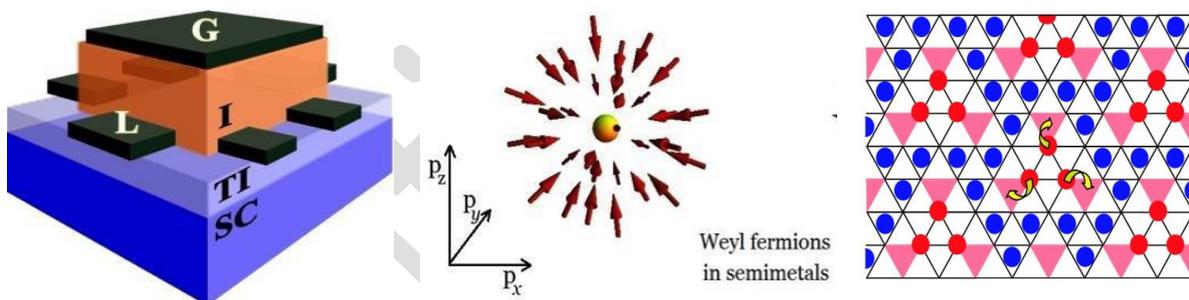
La diffraction neutronique permet aussi de suivre des réactions chimiques et de catalyse.



Les neutrons permettent aussi d'étudier des matériaux sous des conditions extrêmes de pression ou de température ainsi que les défauts ou le désordre dans les verres ou les liquides.



Les neutrons permettent de caractériser les “matériaux quantiques” qui ont des utilisations potentielles pour le traitement de l’information. Il est possible de sonder le magnétisme aux interfaces par réflectivité de neutrons, de nouvelles structures magnétiques (ex. skyrmions) par diffraction ou SANS ou d’étudier les effets d’ordre ou de dynamique magnétique dans différents types de cristaux (isolants topologiques, verres de spin...) par diffraction ou spectroscopie neutronique, d’étudier les matériaux thermo-électriques via la caractérisation du spectre phononique ou les matériaux magnéto-caloriques par la caractérisation des propriétés magnétiques.



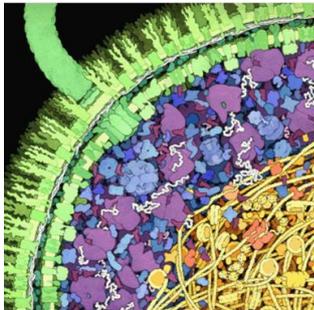
Il est possible d’optimiser des problèmes de l’industrie pétrolière tels que l’origine du bouchage des pipelines par les asphaltènes (problèmes de stabilité des émulsions), l’optimisation de la récupération des hydrocarbures dans les roches de schiste (problèmes de diffusion dans les milieux poreux).



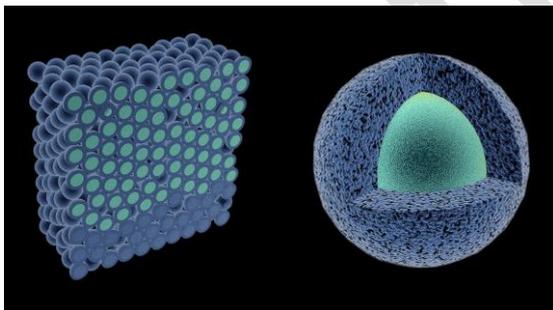
La physique des polymères est particulièrement riche et de nombreuses questions trouvent des réponses grâce aux techniques de diffusion neutronique : l'adhésion, la friction, le renforcement mécanique).



Les techniques de diffusion neutronique peuvent aider à l'étude de problème de biologie : adsorption des molécules d'eau autour des protéines, conformation des protéines, adsorption des protéines membranaires...



La diffusion neutronique peut apporter des réponses à des problèmes de l'industrie agroalimentaire : étude des processus de lyophilisation, de cuisson de la viande, de cuisson du pain, de conservation des poudres déshydratées (ex poudres de lait).



1.3 Quantification de la recherche en lien avec l'industrie

La recherche industrielle amont est essentiellement réalisée en collaboration avec des laboratoires académiques à travers des contrats de recherche (ex. ANR en France). Il est très difficile d'estimer et de quantifier l'utilisation de la diffusion neutronique par les industriels via les canaux académiques.

L'Institut Laue Langevin estime que les expériences directement liées à une entreprise privée (via un financement, du personnel, la fourniture d'échantillons) sur la période 2012-2017 représente environ 4% des propositions. Cependant, l'information étant souvent cachée, ce chiffre est sous-évalué. En

réalité, environ 10% des propositions ont un lien direct ou proche avec l'industrie (TRL> = 4 par exemple)⁴.

Au LLB, une analyse de la période 2012-2014⁵ évalue à 11% le temps de faisceau demandé en lien avec des applications industrielles.

ESFRI suggère: *“The perceived wisdom is that [...] access via research contracts is at a ~25% level. This figure far exceeds the 1-2% of beam time that is sold to industry and which is the only quantifiable indicator that sources have access to. The 25% figure is not quantifiable although it is much more important to know.”*

Cette valeur de 25% d'« utilisation industrielle indirecte » est par exemple rapportée par MLZ@Münich et ISIS. Ce chiffre élevé est peut-être lié à un niveau d'investissement des PME plus élevé en Allemagne et au Royaume Uni qu'en France. Cependant, on peut souligner que le CIR (bourses CIFRE) permet aussi de financer un certain nombre de thèses avec des industriels.

Si on s'en tient à une valeur minimale de 10% du temps de faisceau contribuant à la recherche amont des industriels, cela représente un investissement (temps de faisceau uniquement) de l'ordre de 30 M€ par an en Europe, dont 5M€/an en France.

Le temps de faisceau vendu directement aux industriels ne représente que 1.2% du temps de faisceau disponible en Europe pour un coût moyen de 9.7 k€/jour. Cela représente un revenu annuel de 4 M€ en Europe. Dans le cas du LLB, ces revenus sont de l'ordre de 1 M€/an (90% de ces revenus venant du contrôle qualité d'éléments pyrotechniques).

Ces chiffres (30 M€/an d'investissement indirect de R&D) ne représentent qu'environ 0.01% de l'effort de R&D en Europe. Il reste de la marge pour l'améliorer...

Dans le cas du Laboratoire Léon Brillouin, les industriels avec lesquels des liens existent sont par exemple: Solvay, L'Oréal, Essilor, Thalès, Nestlé, IFP, TOTAL, EDF, CEA, Michelin, Dassault, PyroAlliance, SDH, Swiss Neutronics, NOB.

On peut diviser les utilisations par les industriels en 2 grandes catégories :

Matière molle - chimie	Matériaux pour les nouvelles technologies de l'énergie (NTE)
Peinture, pneumatiques, polymères, détergents, savons, couches minces, mousses, composites, protéines, agroalimentaire, bruts pétroliers	Batteries au Li, nouveaux matériaux pour les batteries, clathrates, cellules photovoltaïques, stockage de l'hydrogène, PAC)
Michelin, Solvay, L'Oréal, Essilor, Nestlé, Bel, IFP, Procter & Gamble	TOTAL, Bolloré, Umicore...

⁴ ILL, Private communication

⁵ J.-P. Visticot, Directeur Adjoint du LLB, unpublished

2 Panorama de la diffusion neutronique en Europe

2.1 Les sources de neutrons dédiées à la diffusion neutronique en Europe

En Europe, en 2019, il existait 12 sources de neutrons en exploitation, dont 10 réacteurs de recherche. Selon une étude récente du projet BrightnESS, environ 200 instruments étaient exploités dans ces installations pour servir jusqu'à 4800 expériences par an et environ 5 800 utilisateurs distincts. Grâce à ce vaste réseau de sources de neutrons, l'Europe est le leader mondial dans le domaine de la diffusion neutronique depuis 40 ans. Cependant, à l'exception de FRMII à Garching, tous les réacteurs de recherche ont commencé à fonctionner au siècle précédent et la question de leur remplacement doit être posée. On soulignera qu'en 2019, trois réacteurs utilisés pour la diffusion neutronique ont cessé leurs opérations : Orphée en France, BER II à Berlin et JEEP II en Norvège.

Dans un avenir proche, l'Europe sera confrontée à une perte de capacité en raison de la fermeture des réacteurs de recherche vieillissants. Les sources compactes de neutrons utilisant un accélérateur (CANS) offrent des opportunités pour maintenir un réseau fonctionnel et résilient comme cela a été démontré au Japon avec le réseau JCANS de J-PARC. L'éducation et la formation peuvent être dispensées par le biais de petites sources dédiées, comme décrit dans le rapport NOVA ERA⁶. Associé à des sources compactes plus puissantes, un réseau de sources compactes pourrait préparer un environnement efficace pour former une large base d'utilisateurs expérimentés capables d'utiliser au mieux les principales sources de neutrons, en particulier la source européenne de spallation ESS, laquelle devrait jouer un rôle de premier plan dans ce scénario.

2.2 Cas particulier de la France

Dans le cas particulier de la France, dans la période la plus faste, le réacteur Orphée et l'ILL fournissaient aux utilisateurs français environ 3 600 et 2 000 instruments x jours par an, respectivement. Ces dernières années (période 2016-2019), avec un fonctionnement réduit d'Orphée (120 jours par an) et de l'ILL (100 jours par an en moyenne), l'offre s'est réduite à 2 000 jours pour Orphée et à 1 000 jours à l'ILL. L'impact sur la production scientifique se fera sentir dans les prochaines années. Dans l'hypothèse actuelle de l'opération de 15 instruments à l'horizon 2028 à l'ESS, supposant la participation française égale à 15%, seulement 450 jours supplémentaires seraient disponibles pour la communauté française, qui sont à mettre en perspective avec les plus de 5 000 jours disponibles dans les années 2000.

⁶ Conceptual Design Report NOVA-ERA (Neutrons Obtained Via Accelerator for Education and Research Activities). E. Mauerhofer et al, Allgemeines/ General Band/ Volume 7 ISBN 978-3-95806-280-1

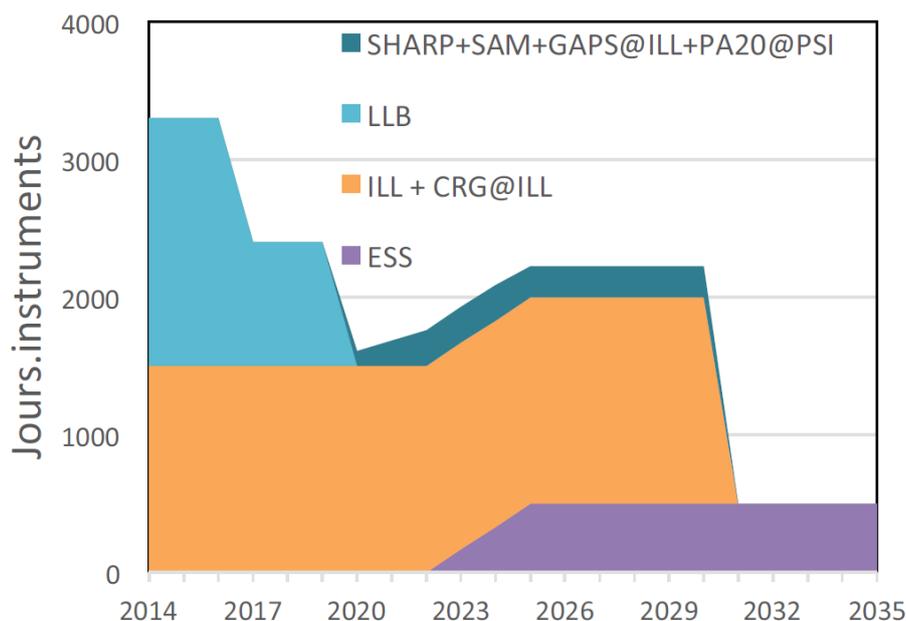


Figure 2: Scénario de la perte drastique de jours de faisceau disponibles pour la communauté française si ESS restait la seule source de neutrons après l'arrêt de l'ILL (le nombre de jours x instruments en orange correspond au temps français de l'ILL et au temps français sur les CRG actuels). Le nombre de jours x instruments a été pondéré par un facteur prenant en compte "l'efficacité" des sources, c'est à dire le nombre moyen de jours par publication, à savoir 10 jours pour le LLB, 5 jours pour l'ILL, 15 jours pour PSI, 3 jours annoncés pour ESS (d'après en particulier le document des associés de l'ILL 2019). (issue de 7)

2.3 La production scientifique de la diffusion neutronique

L'Europe (hors Russie) a fourni en 2019 plus de 32 000 Instruments x jours à comparer à 13 000 aux USA et 13 000 en Asie.⁸ La situation en Asie devrait rapidement évoluer avec l'ouverture de nouvelles sources en Chine dans les années 2020 (la source à spallation CSNS et le réacteur CARR). La diffusion neutronique est à l'origine d'environ 4 500 articles scientifiques par an (chiffre stable sur la période 2005 - 2015). L'Europe est le continent le plus productif dans le domaine (la moitié de la production scientifique mondiale ~ 2300 publications /an) en raison du grand nombre de sources de diffusion neutronique qui sont mises à la disposition des utilisateurs.

Pour mémoire, la communauté synchrotron (21 installations) affiche 40000 publications sur la période 2013-2017 (i.e. 8000 publications /an). Pour l'Europe, les chiffres sont de 24000 utilisateurs, 23400 publications en 5 ans (i.e. 4680 publications /an)⁹. La production scientifique n'est que le double de la production liée à la diffusion neutronique pour un nombre d'installations significativement plus important.

⁷ Feuille de route de la neutronique Française proposée par la Fédération Française de Diffusion Neutronique 2FDN. (http://2fdn.neel.cnrs.fr/IMG/pdf/FeuilledeRoute_2FDN.pdf).

⁸ ESFRI Neutron scattering facilities in Europe - Present status and future perspectives

⁹ www.lightsources.org <https://lightsources.org/about-2/>

Publications by world regions

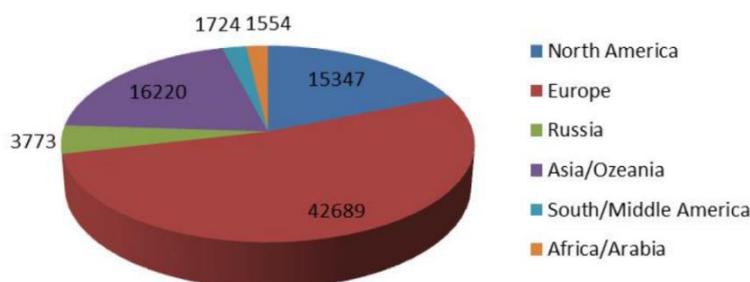


Figure 3: Nombre total de publications dans les différentes régions du monde sur la période 2005 – 2015 (issu de [10]). L’Europe contribue à plus de 50% de la production mondiale dans les domaines utilisant les techniques de diffusion neutronique. NOTA : la production d’articles uniques est d’environ 45000 articles sur une période de 10 ans. Dans le graphe ci-dessus les contributions « trans-continents » sont comptées plusieurs fois, d’où une somme totale plus élevée que 45000 articles uniques.

En Europe, la France et l’Allemagne sont les deux pays qui produisent le plus de publications. Dans le domaine de la diffusion neutronique, la France est le deuxième publiant mondial derrière les Etats-Unis.

Publications Europe

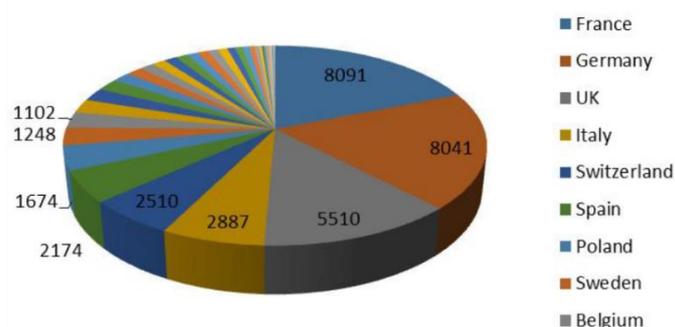


Figure 4: Distribution des publications en diffusion neutronique en Europe par pays sur la période 2005-2015. (issu de [7]). La France est le deuxième publiant mondial dans le domaine de la diffusion neutronique derrière les Etats-Unis.

La qualité des publications est bonne avec près d’un quart des publications parues dans des revues ayant un facteur d’impact supérieur à 5. On notera qu’il n’y a pas de corrélation directe entre la “puissance” de la source et la qualité des publications. Des sources aux flux “modestes” comme PSI@Villigen ou RID@Delft produisent des publications de même qualité que les sources les plus intenses telles que l’ILL.

¹⁰ T. Gutberlet et al, Neutron News 29(2) (2018) 18-24. *Do neutrons publish? A neutron publication survey, 2005–2015*

Publications by impact factor

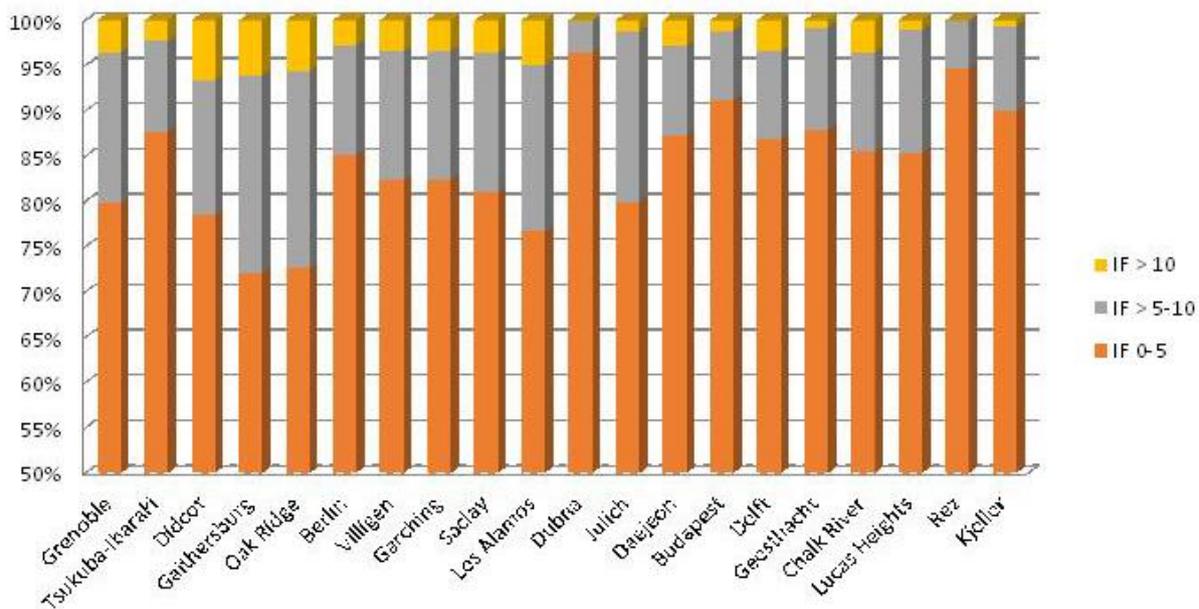


Figure 5: Fraction des publications par facteurs d'impact des journaux, par installation, dans la période 2005-2015. (issu de [7])

Confidential

3 SONATE : une nouvelle plateforme de diffusion neutronique en France

L'écosystème des sources de neutrons en Europe a été et est vital pour la recherche et l'innovation dans les domaines que nous venons de décrire afin de relever les défis sociétaux de notre vie quotidienne.

Afin de préserver mais aussi de développer cet écosystème unique au monde, les sources de neutrons compactes à accélérateur (CANS) offrent de nouvelles opportunités.

Le projet SONATE, basé sur cette technologie des accélérateurs et non des réacteurs nucléaires de recherche, est conçu dans cette perspective. Nous développons dans cette partie un argumentaire tout en décrivant une vision de la diffusion neutronique du futur, vitale pour la recherche française en Sciences de Matériaux.

3.1 Distinction entre « Capacité » et « Performances » « Capacity » versus « Capability »

La nouvelle source Européenne ESS à Lund aura des performances inégalées. L'objectif de cette source est de réaliser des expériences jusque-là inaccessibles à la diffusion neutronique en raison des limitations actuelles des flux neutroniques : ESS proposera de nouvelles possibilités (« capabilities »).

En parallèle de ces nouvelles activités, une grande partie des expériences de diffusion neutronique ne nécessitent pas de flux extrêmes, en particulier en science des matériaux. Les expériences sont contraintes par la synthèse de nouveaux matériaux, les environnements échantillons, l'interprétation des données, l'accès à du temps de faisceau. Pour ce type d'expériences, le paramètre essentiel est l'accès à du temps de faisceau c'est-à-dire à la capacité à fournir du temps de faisceau aux expérimentateurs (« capacity »). On peut prendre l'exemple de l'étude *operando* d'un nouveau matériau pour batterie. L'élément clé est la synthèse du nouveau matériau pour l'électrode qui en général sera synthétisé en relativement grande quantité. Le groupe de recherche voudra accéder à du temps de faisceau pour valider le montage de mesure *operando*. Comme le composé est nouveau il souhaitera un accès rapide. Le suivi de la charge et de la décharge de la batterie nécessitera des temps longs (de l'ordre de la demi-heure auquel cas des mesures de diffraction de poudre en 1s (sur ESS) n'auront pas plus de valeur que des mesures réalisées en 5 minutes sur un diffractomètre de poudre sur une source « standard »). Il serait possible de lister toute une série d'exemples similaires (fonctionnement d'une pile à combustible, suivi de processus de digestion en agro-alimentaire, dénaturation de protéines sous pression...).

L'argument selon lequel les performances des instruments d'ESS étant tellement supérieures aux instruments actuels sur les réacteurs (10-20 fois meilleures que les instruments de l'ILL, 50-100 fois meilleures que les instruments d'Orphée), les 450 jours-instruments sur ESS peuvent remplacer 3000-6000 instruments.jours sur l'ILL+Orphée n'est donc pas pertinent.

Cet argument est aussi contredit par la production scientifique des sources de neutrons actuelles normalisée par les chiffres bruts de flux neutronique. La production scientifique du LLB représente environ 33% de la production scientifique de l'ILL (voir Figure 4) alors que l'ILL fournit 9 fois plus d'instruments-jours-flux. Dans le cas de SINQ@PSI, la production scientifique représente 25% de celle de l'ILL alors que l'ILL fournit 20 fois plus d'instruments-jours-flux. Cela montre que la production

scientifique n'est pas proportionnelle au flux brut de neutrons mais plutôt au nombre [instruments-jours-chercheurs]. Les instruments avec peu de support scientifique n'arrivent pas à exploiter les données produites sur les instruments.

Un contre-argument pourrait être qu'un nombre important des publications de la Figure 4 ont bénéficié de mesures sur plusieurs sources (source nationale + ILL). De fait, les statistiques sur plusieurs sources montrent qu'en moyenne une publication nécessite 2 runs expérimentaux¹¹. Cette observation supporte plutôt le fait que les installations les plus performantes (l'ILL en Europe) ont besoin du support des installations plus petites pour augmenter leur productivité. Cet état de fait perdurera avec ESS dans le futur. Afin de pouvoir exploiter ESS de manière efficace, la France aura besoin d'un support et d'une expertise nationale pour ses utilisateurs. De la même manière que les synchrotrons bénéficient de la vaste communauté des chercheurs réalisant des expériences de diffraction en laboratoire et que les lasers à électron libres bénéficient de la vaste communauté des chercheurs réalisant des expériences synchrotron, ESS aura besoin de l'apport d'une vaste communauté de neutroniciens pour révéler son plein potentiel.

Une description détaillée de cet effet de levier peut être trouvée dans [12] : *"[ESS] will not replace all existing facilities in Europe and in fact the efficient use of ESS will require the other facilities capacity and complementary capability, unique instruments and sample environment in order to sustain the necessary user community."* Comparé à la situation actuelle (productivité de 1), on estime que la productivité de ESS serait de l'ordre de 0.7 en cas de fonctionnement seul, tandis qu'elle monterait à 3, s'il y a un réseau complémentaire de sources nationales.

Des conclusions similaires ont été faites aux USA¹³. Le rapport de l'OSTP conclut *"while the SNS is a significant new opportunity to provide world-leading capability in the US it alone cannot provide the necessary neutron scattering capability."*

¹¹ Unpublished

¹² Report from the ILL Associates' Working group on *Neutrons in Europe for 2025*.

¹³ The Status and Needs of Major Neutron Scattering Facilities and Instruments in the United States , Office of Science and Technology Policy Interagency Working Group on Neutron Science, June 2002. (<http://www.ostp.gov/html/NeutronIWGReport.pdf>)

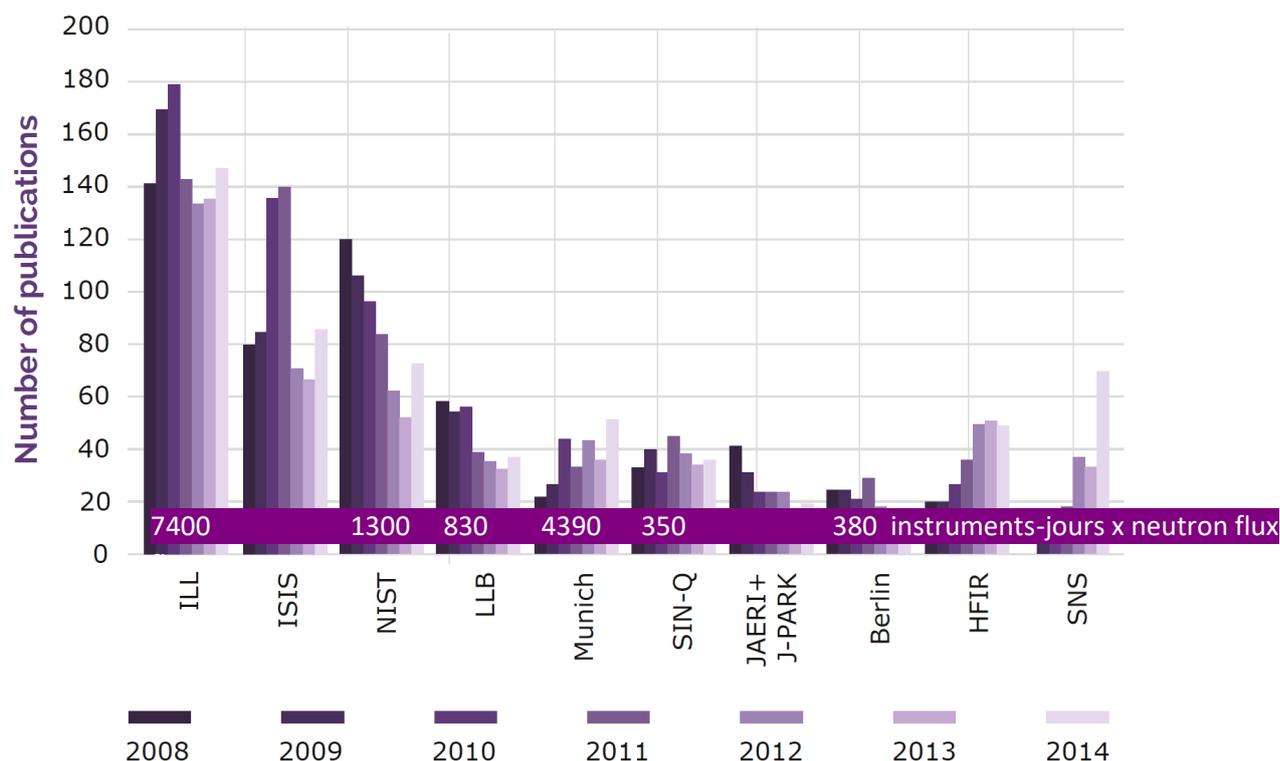


Figure 6: Nombre d'articles publiés dans des journaux à fort impact pour différentes sources à travers le monde. [adapté de l'ILL: Christian Vettier, Helmut Schober & Bill Stirling]¹⁴. Les valeurs en [instruments-jours x flux neutronique] sont données pour les différentes sources continues¹⁵.

3.2 Les atouts de la France en diffusion neutronique

Avec la fermeture du réacteur Orphée en 2019, les perspectives à court terme autour de la diffusion neutronique en France sont sombres. Cependant l'écosystème autour de la diffusion neutronique restera très riche en France.

Les atouts de la France sont :

- Une large communauté d'utilisateurs (1500 utilisateurs français) (6000 en Europe).
- Une forte expertise scientifique et technique au LLB et à l'ILL.
- Un savoir-faire dans la construction d'instrument en temps de vol avec le développement par le LLB de 5 instruments à ESS.
- Un parc d'instruments de diffusion neutronique (~ 20 instruments français).
- Une expertise de pointe dans la technologie des accélérateurs.

De plus, la France peut bénéficier d'une grande partie des efforts investis dans ESS :

- Un certain nombre de nouveaux concepts d'instrumentation ont été proposés pour ESS.
- Un important effort est en cours autour du traitement des données de diffusion neutronique.
- Un travail important de R&D est en cours autour des détecteurs de neutrons. Lorsque ces technologies seront mûres, des détecteurs à des prix réduits devraient devenir disponibles.
- Un intense effort autour de la conception des accélérateurs à forts courant a été fait pour ESS.

¹⁴ ESFRI Report, *Neutron scattering facilities in Europe, Present status and future perspectives*.

¹⁵ The reference neutron flux is normalized at 1 for the ILL, 0.61 for FRM2, 0.27 for NIST, 0.23 for LLB, 0.11 for SINQ, 0.09 for Berlin. In the case of pulsed sources such a comparison does not make sense.

Après la phase de construction de ESS, un énorme capital humain d'experts sera disponible en Europe. Ce serait regrettable de le dilapider.

ESS met en place l'infrastructure pour construire de grandes quantités de détecteurs. Cette infrastructure pourra être amortie en fournissant des détecteurs à d'autres installations dans le futur.

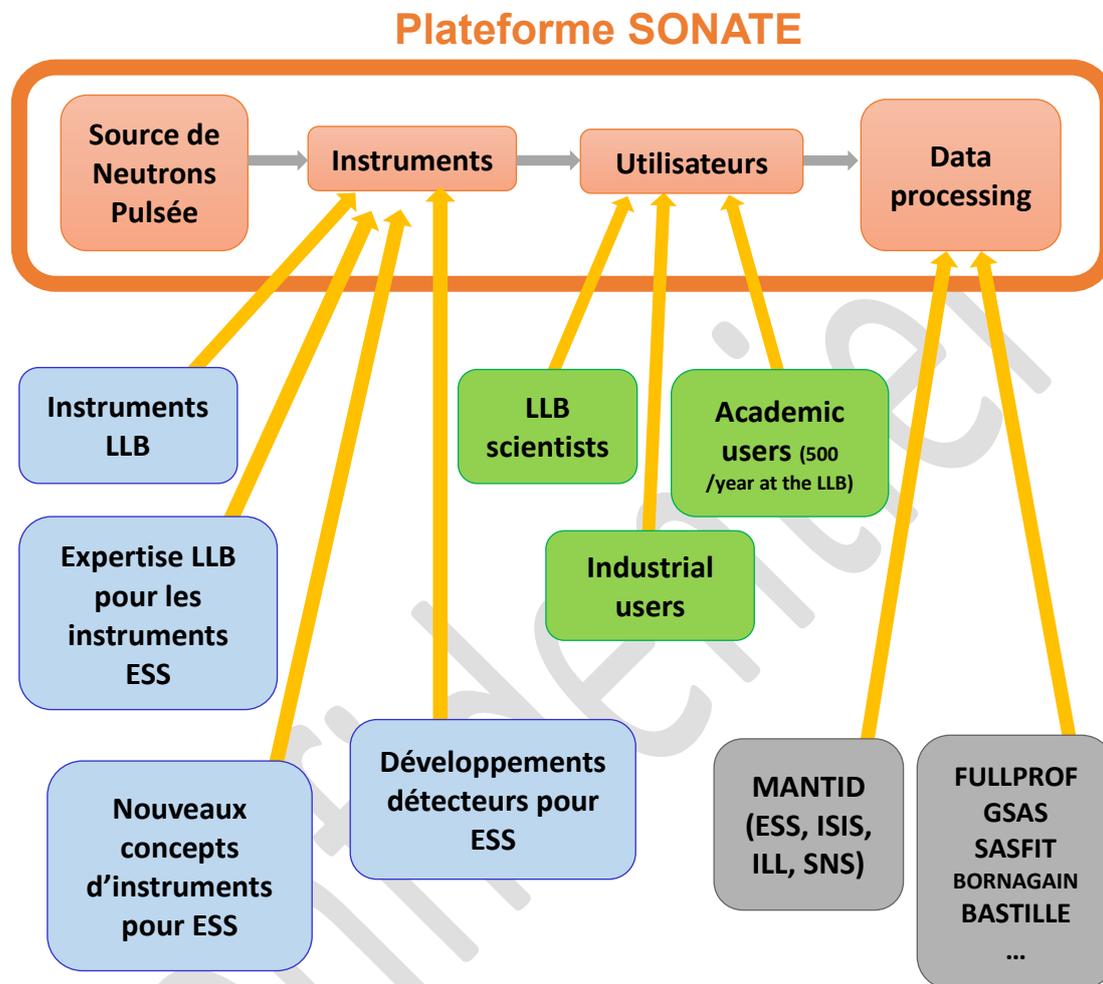


Figure 7: Le projet SONATE pourra bénéficier d'un excellent écosystème déjà existant.

3.3 SONATE : une plateforme de diffusion neutronique pour la science des matériaux.

Comme cela a été dit auparavant, ESS fournira des faisceaux de neutrons ayant des brillances inégalées. Toutefois, en l'état actuel, le risque est grand de ne pas être capables de les exploiter de la manière la plus efficace possible. De plus, on ne saurait satisfaire l'énorme corpus d'expériences qui ne nécessite pas ces flux extrêmes (et qui sont néanmoins vitales pour notre système de recherche).

Le projet SONATE est pensé dans ce double objectif.

Nous proposons que la plateforme SONATE offre un nouveau type de services autour de la diffusion neutronique différent de ce qui est actuellement proposé par les très grandes installations existantes.

En particulier nous pensons qu'il est nécessaire de proposer une offre plus « flexible » de services. C'est une demande récurrente des utilisateurs. Les techniques de diffusion neutronique sont actuellement handicapées par rapport aux autres techniques en raison de la complexité de l'accès à la technique en comparaison des autres plateformes de caractérisation des matériaux.

Nous proposons que SONATE ait les caractéristiques suivantes qui la distinguent des installations existantes :

- Proposer des instruments de base (avec des performances équivalentes aux instruments actuels) :
 - o Des instruments dont l'exploitation est simple en termes de fonctionnement et en termes d'exploitation des données seront mis en avant : SANS, diffraction de poudre, réflectivité, radio-tomographie.
 - o Ces techniques sont très génériques et, bien que les sujets scientifiques évolueront au fil des prochaines décennies, ces techniques ne deviendront pas obsolètes.
- Une **fraction significative** du temps de mesure sera proposée « au fil de l'eau » de telle sorte que les caractérisations neutroniques en science des matériaux puissent être réalisées en parallèle d'autres caractérisations.
 - o Ce mode de fonctionnement suppose d'accepter un « droit à l'erreur »
 - o En caractérisation des matériaux des mesures de type « screening » doivent être réalisées et beaucoup de résultats sont négatifs
- Développer des projets sur le long terme avec un temps de faisceau garanti
- La possibilité de développer une instrumentation spécifique par un laboratoire extérieur
 - o La possibilité de fournir un faisceau à un laboratoire tiers (par exemple pour les thématiques scientifiques dont la durée de vie est de l'ordre de la décennie
 - o Batteries – hydrogène – chlathrates – métallurgie – catalyseurs
- Permettre des développements instrumentaux originaux
 - o Dans le futur il sera impossible de réaliser des développements instrumentaux originaux autour de ESS en raison des coûts et des contraintes liées à cette source
 - o Exemple : Neutrons Très Froids - Spin-Echo
- Faire un effort spécifique sur les possibilités de formation
 - o Rendre facile l'accès à la source (ce qui n'est pas le cas des réacteurs)
 - o Offrir la possibilité de mettre en place des instruments de test qui n'empiètent pas sur les instruments dédiés à la science
- Offrir la possibilité de préparer des expériences pour ESS, ce qui permettra aux utilisateurs français d'être en meilleure position pour obtenir du temps de faisceau sur ESS

La nécessité de proposer ces possibilités est reconnue par l'ensemble des centres de diffusion neutronique qui essaient de les implémenter. Malheureusement, des obstacles essentiellement financiers limitent ces possibilités. Les coûts d'exploitation d'une installation de diffusion neutronique sont actuellement trop élevés pour offrir une vraie flexibilité d'utilisation.

Cependant les progrès récents en particulier dans le domaine des accélérateurs et des modérateurs neutroniques permettent d'envisager la construction de sources à un coût réduit par rapport aux installations actuelles.

La Figure 8 présente une possible ventilation du temps d'accès entre les différents utilisateurs.

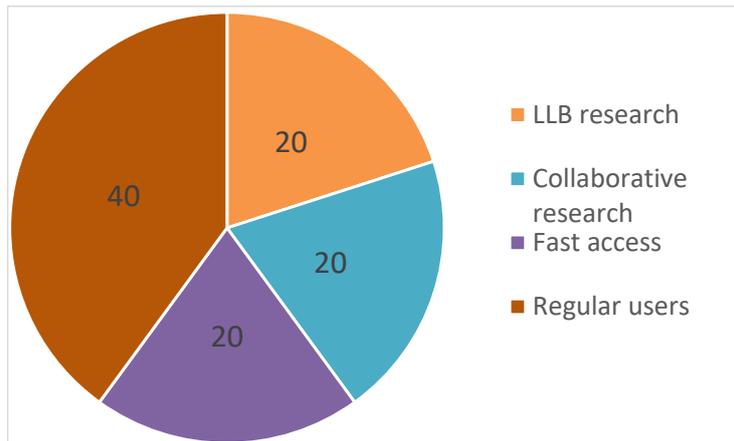


Figure 8: Proposition d'utilisation du temps de faisceau entre la recherche propre du LLB, la recherche collaborative, l'accès rapide et les utilisateurs réguliers.

3.4 Offre instrumentale proposée par SONATE

L'objectif est de construire une source proposant des instruments ayant des performances équivalentes aux instruments sur le réacteur Orphée ou sur la source à spallation ISIS. Différentes simulations par différents instituts montrent qu'autour d'une source de type CANS, il est potentiellement possible de construire des instruments ayant des performances équivalentes à celles des instruments sur un réacteur de puissance moyenne (Orphée ou BER II) ou sur une source à spallation de puissance moyennes (ISIS ou LANSCE).

Une discussion plus détaillée peut-être trouvée dans les Annexes 2 et 3.

3.4.1 Instruments envisagés

Le projet pourrait se décomposer en 2 phases. Dans une première phase l'effort serait focalisé sur les techniques de caractérisation de structures avec une focalisation sur les instruments « basse résolution » pouvant facilement exploiter une structure temporelle en pulses longs comme à ESS.

Dans une première phase, les instruments prioritairement installés seraient :

- 1 instrument SANS (SPACE) → sciences des polymères – nanomatériaux
- 1 diffractomètre de poudres (Basse Résolution) (PRESTO)
→ métallurgie - transitions de phase – magnétisme (~G41)
- 1 diffractomètre « Large Scale Structures » (équivalent G61 – D16)
- 1 station d'imagerie (IMAGINE)
- 1 réflectomètre (HERMES) → couches minces de polymères, de protéines, interfaces solide – liquide
- 1 appareil de spin-écho → développement Spin-Echo résonant / (MultiMUSES)

Après un retour d'expérience, dans une deuxième phase, les instruments suivants pourraient être envisagés :

- 2^{ème} SANS (avec neutrons polarisés?)
- 3^{ème} diffractomètre de poudres (haute résolution monocristaux) → structures (~3T2)
- Un appareil en temps de vol pour la spectroscopie neutronique (équivalent SHARP) focalisé sur les thématiques de matière molle, liquides, biologie.

Après une évaluation de la demande des utilisateurs, d'autres appareils pourraient être envisagés dans le futur tels que :

- Un appareil en temps de vol pour la spectroscopie neutronique en matière dure (magnétisme / monocristaux) (équivalent IN5). La compétitivité d'un tel appareil devra être évaluée en fonction des thématiques scientifiques du moment
- Un appareil en temps de vol en géométrie inverse (équivalent CAMEA@PSI, BIFROST@ESS). Le rapport performances/coût d'un tel appareil devra être considéré en détail.
- Un instrument de diffraction de neutrons chauds (une expertise spécifique en TdV sera requise pour l'analyse des données)

Une telle installation proposerait une suite de 9-11 instruments auxquels pourraient s'ajouter 1 ou 2 lignes de tests.

3.4.2 Volume d'utilisation des instruments proposés

Si on considère un scénario où la source fonctionne 180 jours par an (pendant les jours ouverts uniquement) cela correspond à 36 semaines de fonctionnement. Suivant les techniques, les durées des expériences varient significativement. D'après les projections des performances attendues il est possible d'estimer le nombre typique d'expériences qui pourront être réalisées sur SONATE (voir la Table ci-dessous). Environ 300 runs expérimentaux pourraient être réalisés chaque année. Cela correspond à un potentiel de 100 à 150 publications /an.

<i>Instrument</i>	<i>Durée typique d'un Run</i>	<i>Nr. Run / an</i>
PHASE 1		
SANS1 (soft matter)	2.5 days	64
Powder 1	5 days	32
Reflectometer	5 days	32
Radiography	5 days	32
Powder 2	2.5 days	64
Spin-Echo	15 days	10
TOTAL		234
PHASE 2		
SANS2 (hard matter)	5 days	32
Powder 3	5 days	32
Direct TOF	5 days	32
TOTAL		96
PHASE 3/ Autres possibilités		
Temps de Vol inverse	15 days	10
Diffraction neutrons chauds	10 days	16
TOTAL		26

Table 1 : Nombre d'expériences pouvant être réalisées sur SONATE en faisant l'hypothèse d'un fonctionnement de 180 jours et d'une disponibilité de 90% des instruments pour des expériences scientifiques (160 jours). Suivant la technique expérimentale, la longueur des runs peut varier beaucoup. Environ 300 runs expérimentaux pourraient être réalisés chaque année.

3.5 Contribution de SONATE dans le paysage de la neutronique française

Le projet SONATE conduit à une roadmap de la capacité neutronique en France détaillée ci-dessous :

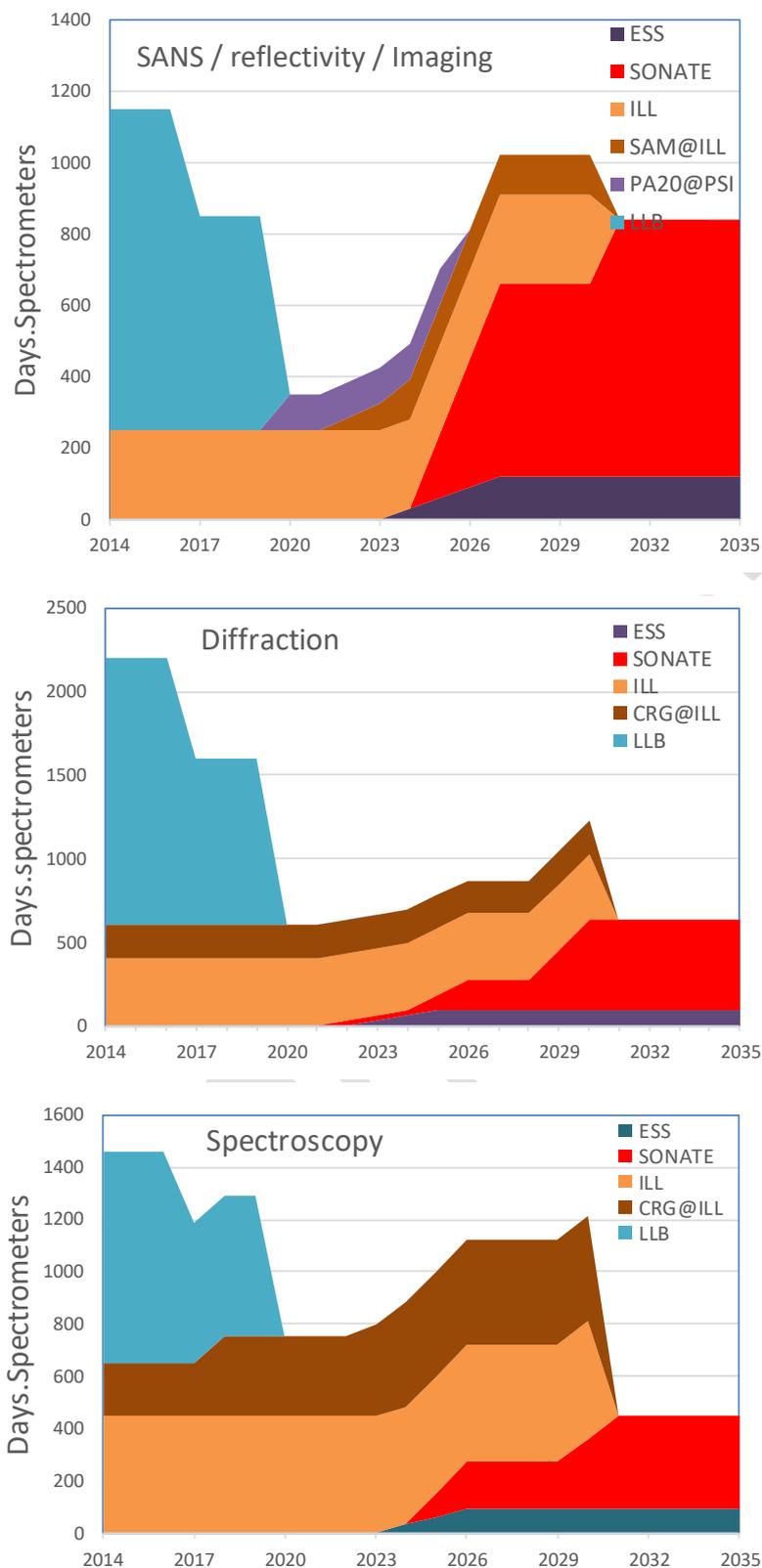


Figure 9: Evolution de l'offre de diffusion neutronique française à long terme pour les 3 principales techniques de mesures dans le cas de la construction de la source SONATE opérant 10 instruments.

4 Quels utilisateurs pour quelle science sur SONATE ?

Pour des raisons géographiques (proximité et concentration des laboratoires de recherche), une grande partie de la communauté des utilisateurs de la diffusion neutronique (~40%) est localisée en Ile de France et dans les régions limitrophes. Le deuxième grand centre de diffusion neutronique en France est l'ILL à Grenoble, dont un quart du temps est mis à la disposition des utilisateurs français. Différents laboratoires ont des liens très forts avec l'ILL soit via une utilisation très régulière soit via la construction d'instruments (« CRG ») (IRIG@CEA Grenoble, Institut Néel).

Historiquement, certaines thématiques ont été plus spécifiquement développées autour d'Orphée, soit en raison des motivations spécifiques des chercheurs du LLB, soit en raison d'une grande communauté d'utilisateurs. On peut citer par exemple la matière molle, la spectroscopie neutronique, la chimie du solide, la biophysique avec des techniques qui ont été fortement supportées (5 instruments SANS en 2010, 3 réflectomètres, dont 2 dès le début du fonctionnement d'Orphée, 5 instruments de diffusion inélastique 3-axes, 10 diffractomètres).

4.1 La recherche au Laboratoire Léon Brillouin

Actuellement, le Laboratoire Léon Brillouin est organisé autour de 2 groupes scientifiques : « Matière Molle et Biophysique » et « Nouvelles Frontières dans les Matériaux Quantiques » permettant d'obtenir une taille critique pour chacune des équipes.

4.1.1 Groupe « matière molle et biophysique » (MMB)

Les thématiques de recherche actuelles du groupe MMB sont :

- **Confinement multi-échelle**
Confinement géométrique, liquides simples, polymères et systèmes biomimétiques, propriétés de transports ioniques.
- **Matière molle**
Polymères, colloïdes, nano-composites, nanoparticules, relations structures-propriétés, systèmes mixtes et associatifs, auto-assemblage.
- **Biophysique**
Encombrement cellulaire et Macromoléculaire, interaction membranaire et nanopores, stabilité et repliement des protéines, agrégation et diffusion. Propriétés thermodynamiques et de transport, assemblages amyloïdes, complexes nucléoprotéïques.

4.1.2 Groupe « Nouvelles Frontières dans les Matériaux Quantiques »

Les thématiques de recherche actuelles du groupe NFMQ sont :

- **Magnétisme multi-échelle**
Structure et caractérisation des nouveaux matériaux magnétiques, matériaux hybrides, films minces, nanoparticules, auto-organisation, aimants moléculaires, photo-magnétisme.
- **Magnétisme quantique**
Systèmes magnétiques de dimension réduite et non-conventionnels, frustrations géométrique et magnétique, défauts topologiques (vortex, Skyrmions, monopoles magnétiques), fluides magnétiques (liquides/glaces/verres de spin).

- **Systemes d'électrons fortement corrélés**
Supraconductivité non conventionnelle, états excitoniques exotiques, isolants Kondo, ordres multipolaires, états magnéto-électriques, états de type cristal-liquide électronique.
- **Matériaux fonctionnels**
Matériaux pour l'énergie (Photovoltaïque, thermoélectriques, batteries) , Matériaux pour le stockage de l'information

4.1.3 La métallurgie au LLB

Pendant plusieurs décennies le Laboratoire Léon Brillouin a assuré une activité autour des matériaux métallurgiques. Cette activité a disparu en raison du départ de différents personnels. Dans l'éventualité de la construction d'une source compacte, ces thématiques devraient à nouveau revenir parmi les activités du laboratoire : développement de nouveaux alliages (ODS, alliages renforcés par des nitrures), vieillissement des alliages métallurgiques sous irradiation, cartographie de champs de contraintes, nouvelles méthodes d'élaboration...

4.2 La recherche des laboratoires français sur les différents instruments de SONATE

La viabilité d'une source de neutrons ne se justifie que par les opportunités de mesures proposées à des utilisateurs extérieurs à l'installation car ce sont eux qui fournissent la majorité de la production scientifique. La distinction entre « recherche propre » du laboratoire et « recherche collaborative » n'est pas évidente à définir. Dans beaucoup de thématiques de recherche propre du LLB, des laboratoires extérieurs contribuent (pour la fourniture d'échantillons, pour d'autres mesures de caractérisation...). En parallèle, pour la plupart des expériences des utilisateurs extérieurs, il y a une contribution des personnels du laboratoire (pour la réalisation de l'expérience, pour l'analyse des données...) sauf dans le cas très particulier d'utilisateurs très expérimentés qui sont autonomes. Ces derniers sont presque toujours des utilisateurs très réguliers de l'installation et peuvent être considérés comme des « collaborateurs extérieurs » plutôt que comme de simples utilisateurs.

L'importance de la recherche collaborative entre le laboratoire Léon Brillouin et les laboratoires extérieurs est illustrée par le fait que la majorité des thèses sont des thèses en collaboration entre 2 laboratoires. Il y a très peu de thèses dont le focus est à 100% sur la diffusion neutronique, mais sa contribution y est toujours essentielle.

Un certain nombre de laboratoires sont des utilisateurs réguliers de la diffusion neutronique avec en leur sein des « utilisateurs experts ».

Concernant la biologie, les utilisateurs autonomes viennent pour la plupart de laboratoires de physico-chimie, avec une expertise en neutrons en interne qu'ils appliquent à l'interface avec la biologie. Pour des projets davantage ancrés en biologie, la collaboration est suscitée par les chercheurs permanents du LLB, qui réalise les expériences et fournit les données, les utilisateurs intervenant en amont dans la pertinence du projet et la préparation des échantillons biologiques.

Thématiques	Laboratoires	Instruments
Matière Molle		
<ul style="list-style-type: none"> ○ nanocomposites, ○ mésoporeux, ○ suspensions de nanoparticules colloïdale, ○ argiles, ○ systèmes auto-organisés de tensio-actifs, ○ fondus de polymères, systèmes stimulables, complexes en solution, coacervats, hydrogels, émulsions, mousses, matériaux nanostructurés à base de nanocristaux de cellulose, ○ vésicules de copolymères, ○ biopolymères, les poly-liquides ioniques, ○ polymères conducteurs pour les batteries, ○ systèmes membranaires de pores nanométriques, ○ inclusions dans les verres recristallisés... ○ Polymères, colloïdes, nano-composites, nanoparticules, relations structures-propriétés, systèmes mixtes et associatifs, auto-assemblage. 	PHENIX (Paris 6) LPS Orsay (Paris-Saclay) LCPO Bordeaux SIMM (ESPCI- Paris) CERMAV Grenoble ICS (Strasbourg) SYMMES (Grenoble) LCC Montpellier LIONS/NIMBE (Saclay) CRPP (Bordeaux) ICR (Marseille) ICR (Marseille) MSC (Paris 7) IPCM (Paris 6) ICMPE (Thiais) ICSM Marcoule Institut Gallien (Chatenay-Malabry) IPREM Pau IPR (Rennes) ICR (Rennes) AgroSUP/PAM, Dijon INRA SIMM ESPCI Paris, BIA Nantes (INRA) IFP Rueil-Malmaison Synchrotron Soleil, INSP Paris (Paris 6), Columbia University (USA) Institute Light and Matter (ILM), Lyon	SANS I (SPACE) Réflectométrie (HERMES)
Confinement multi-échelle		
<ul style="list-style-type: none"> ○ Confinement géométrique, ○ liquides simples, ○ polymères et systèmes biomimétiques, ○ propriétés de transports ioniques ○ Diffusion dans les milieux poreux (roches, mésoporeux) 	Université Grenoble-Alpes, CEA/DRT/LITEN, Grenoble, Institut de Chimie Radicalaire, Marseille IRIG/SyMMES/STEP, UGA LPS (U. Paris-Saclay), LiPhy Grenoble ICR Marseille CRISMAT, Caen	SANS I (SPACE) Radio-Tomo (IMAGINE)
Interfaces		
<ul style="list-style-type: none"> ○ couches minces polymériques stimulables, ○ adhésion à l'échelle moléculaire ○ monocouches de Langmuir 	SIMM (ESPCI Paris), BIA (INRA Nantes), ICS (Strasbourg), INSP (Paris 6), CERMAV (Grenoble), LPS (Paris-Saclay)	Réflectométrie (HERMES)
Bio-Physique		

<ul style="list-style-type: none"> ○ Encombrement cellulaire et macromoléculaire, ○ interaction membranaire et nanopores, ○ stabilité et repliement des protéines, ○ agrégation et diffusion. ○ Propriétés thermodynamiques et de transport, ○ assemblages amyloïdes, complexes nucléoprotéïques. 	<p>NCNR (NIST, USA) IGDR (Univ. Rennes) IBPC (Paris) LBM (Sorbonne Univ.), ICS (Strasbourg), LBSR (CEA, Saclay), Agrosup (Dijon), CBS (Montpellier), IATE (Univ. Montpellier)</p>	<p>SANS I (SPACE) Spectroscopie Spin-Echo (Multi-MUSES) Réflectométrie (HERMES)</p>
Métallurgie		
<ul style="list-style-type: none"> ○ alliages nucléaires (ordres locaux et des mécanismes de ségrégation) ○ processus d'hydruration ○ propriétés mécaniques 	<p>CEA/DEN ICA, Mines d'Albi</p>	<p>SANS I (SPACE) Spectroscopie Spin-Echo (Multi-MUSES) Réflectométrie (HERMES)</p>
Magnétisme multi-échelle		
<ul style="list-style-type: none"> ○ structure des nouveaux matériaux magnétiques ○ matériaux hybrides ○ films minces ○ nanoparticules ○ auto-organisation ○ aimants moléculaires ○ photo-magnétisme. 	<p>ITODYS (Univ. Paris-7) LCC, LPCNO et INSA (Toulouse), IPCMS (Strasbourg) CEA/IRAMIS/SPEC ICMMO (Univ. Paris-Saclay) ICPM (Paris)</p>	<p>SANS I (SPACE) Diffraction (PRESTO)</p>
Matériaux fonctionnels		
<ul style="list-style-type: none"> ○ Matériaux pour l'énergie (Photovoltaïque, thermoélectriques, batteries, stockage hydrogène) ○ Matériaux pour le stockage de l'information 	<p>Lab. de Réactivité et Chimie des Solides, Amiens SyMMES, UGA PHENIX (Paris) Institut des Sciences Moléculaires (Bordeaux) CEA/DRT/LITEN (Grenoble)</p>	<p>SANS II Diffraction (PRESTO) Radio-Tomo (IMAGINE)</p>
Magnétisme quantique		
<ul style="list-style-type: none"> ○ Systèmes magnétiques de dimension réduite et non-conventionnels ○ frustrations géométrique et magnétique ○ défauts topologiques (vortex, Skyrmions) ○ monopoles magnétiques) ○ fluides magnétiques (liquides/glaces/verres de spin). 	<p>ICMMO (Univ. Paris-Sud), LPS (Univ. Paris-Sud), Université de Lorraine, INPG, CEA-Grenoble, Institut Néel, Soleil, Univ. Delft (The Netherlands), Inst. Troitsk (Russie) Max Planck Institut for Chemical Physics of Solids TU Dresden TU München PNPI, Russie Institute for High Pressure Physics Troitsk-Moscow Louisiana State University</p>	<p>SANS I (SPACE) Diffraction (PRESTO) Radio-Tomo (IMAGINE) Spectroscopie TdV (FA#)</p>

	Beijing University (Chine)	
Systemes d'électrons fortement corrélés		
<ul style="list-style-type: none"> ○ Supraconductivité non conventionnelle ○ états excitoniques exotiques ○ isolants Kondo ○ ordres multipolaires ○ états magnéto-électriques ○ états de type cristal-liquide électronique 	LPS, Univ. Paris-Sud (LPS), CEA/SPEC, U. Paris-Saclay IUT de Blois (Univ. Tours)	Diffraction (PRESTO) SANS II

Figure 10: Thématique scientifique pouvant être étudiées sur la source SONATE sur la base des études actuellement en cours en collaboration avec le LLB. Les laboratoires listés sont des laboratoires comportant des utilisateurs réguliers (5-10 manips sur les 10 dernières années).

4.3 Industrie

Les sources de neutrons à flux faible à moyen peuvent avoir un potentiel élevé pour les applications technologiques, la recherche appliquée dédiée, les tests non destructifs et le développement de systèmes. Un accès rapide et facile aux neutrons peut aider l'industrie à exploiter les neutrons et à utiliser les neutrons pour résoudre des problèmes spécifiques. Des instruments dédiés et un environnement d'échantillonnage spécialisé pour les applications industrielles pourraient être mis à disposition. L'industrie pourrait participer au fonctionnement d'instruments spécifiques ou utiliser ses propres sources de neutrons pour leurs besoins particuliers. Pour l'industrie, la non-divulgaration et l'accès immédiat aux instruments sont des questions clés, souvent beaucoup plus importantes qu'un flux plus élevé. Ces exigences peuvent être réalisées beaucoup plus facilement dans une source de neutrons compacte que sur un TGIR. À mesure que les orientations scientifiques évoluent, l'instrumentation, qui ouvre de nouvelles possibilités de mesure, doit être développée. Les faisceaux d'essai ou le temps sur les instruments peuvent ne pas être disponibles en raison de la pression de la mise en œuvre du programme expérimental en cours. Ici, les sources de puissance petites à moyennes jouent également un rôle important dans le développement et le test de nouveaux concepts et de composants d'instruments.

Les sources de neutrons à flux faible à moyen peuvent également offrir aux industriels la possibilité de faire des mesures de type contrôle-qualité puisqu'elles permettront un accès régulier, simple, peu coûteux et confidentiel. Ce type de mesures existait sur Orphée pour des applications en radiographie neutronique et pourrait être étendu à des techniques comme le SANS dont l'interprétation est parfois très simple. Une fraction du temps de faisceau disponible dévolu à de telles mesures pourrait être attractif et permettrait de financer une partie du fonctionnement.

Dans le cas du Laboratoire Léon Brillouin, les industriels avec lesquels des liens existent sont par exemple: Solvay, L'Oréal, Essilor, Thalès, Nestlé, IFP, TOTAL, EDF, CEA, Michelin, Dassault, PyroAlliance, SDH, Swiss Neutronics, NOB.

4.4 « Fast Access »

Dans un certain nombre d'études de matériaux, un screening rapide de différents nouveaux matériaux peut être très intéressant pour valider certaines propriétés de manière assez rapide.

Le protocole habituel de demande de temps de faisceau, acceptation et réalisation d'une expérience s'étale en général sur une période de 9 à 12 mois. Cela peut être rédhibitoire pour certaines études où les synthèses de nouveaux matériaux évoluent rapidement et où les temps de caractérisation par les techniques de laboratoire (rayons X, microscopie, spectroscopie optique) sont très rapides (<1 mois). Une caractérisation neutronique peut apparaître trop « lointaine » avec un calendrier habituel. On peut citer l'exemple des nouveaux matériaux pour les batteries où des retours d'informations sous 1 mois sont souhaitables.

Ce type d'accès sera particulièrement intéressant pour attirer des industriels, par exemple dans le domaine de la cosmétique (l'Oréal, Procter&Gamble...). Il apparaît en effet que lors de la formulation de nouveaux produits, ces industriels ont besoin d'obtenir une information structurale rapidement, par exemple la présence de micelles ou de phases lamellaires dans la solution formulée, que seuls les neutrons peuvent fournir sans difficulté d'analyse particulière. L'expérience montre que les délais d'attente dans les sources de neutrons classiques sont rédhibitoires pour des projets de R&D appliqués sur des thématiques très concurrentielles.

4.5 Développements instrumentaux

Les sources de petites et moyennes performances ont souvent été des lieux privilégiés pour les développements instrumentaux originaux. Les raisons sont multiples : un accès plus facile à du temps de faisceau, moins de pression pour construire des instruments immédiatement productifs, la possibilité de travailler sur des temps longs... A l'inverse, sur une source comme ESS il est difficile d'imaginer des développements instrumentaux originaux qui n'aient pas été démontrés sur d'autres sources. En effet sur une source comme ESS, en raison à la fois du coût du temps de faisceau et des contraintes réglementaires, il n'est pas envisageable de consacrer de temps à des développements instrumentaux risqués.

A l'inverse une source compacte sera sujette à des contraintes réglementaires réduites en raison de son non classement en INB (Installation Nucléaire de Base).

4.5.1 Développements méthodologiques en neutronique

Une source comme SONATE serait idéale pour réaliser des développements méthodologiques en neutronique :

- Sur les modérateurs pour la production de neutrons froids ($E < 10 \text{ meV}$) et très froids ($E < 2 \text{ meV}$)
- Développements autour des choppers statistiques
- Sur le l'instrumentation innovante utilisant les techniques de spin-écho (SEMSANS, SERGIS, SESAME). C'est une des voies dans lesquelles l'instrumentation neutronique peut encore ouvrir de nouveaux champs d'étude.

4.5.2 Mise à disposition d'une sortie faisceau pour un groupe de recherche extérieur

Le « coût » d'une sortie faisceau sur une source compacte est a priori marginal en raison des faibles besoins de protection radiologique. Il serait tout à fait envisageable de « louer » à un partenaire

« tiers » une sortie de faisceau pour réaliser des développements spécifiques à une thématique particulière.

On peut citer l'exemple de la station de mesure SAPHIR sous haute pression du MLZ qui utilise le faisceau transmis à travers l'échantillon de l'instrument POWTEX. Cette station permet de réaliser des mesures de géophysique sous haute pression et peut aussi réaliser des mesures de diffraction neutronique en parallèle.

4.6 Formation / Education

Avant que les jeunes scientifiques appliquent des méthodes avancées d'analyse ou de simulation dans des installations à grande échelle telles que les synchrotrons, les microscopes électroniques à correction d'aberration ou les superordinateurs, ils doivent être formés à l'échelle du laboratoire, aux diffractomètres à rayons X, aux microscopes électroniques optiques ou standard ou aux postes de travail. Cependant, cette option n'existe pas encore pour la diffusion des neutrons, où il n'existe pas actuellement de laboratoires correspondants dans les universités. Les sources compactes de neutrons peuvent résoudre cette lacune à l'avenir. Il n'est pas souhaitable que les installations de pointes telles que ESS organisent des travaux pratiques, ce serait un gaspillage de ressources. Une source de neutrons compacte offrira des possibilités de formation qui ne peuvent pas être utilisées sur des sources de forte puissance, garantissant un niveau élevé et durable de compétence en science des neutrons. En particulier, dans les petites sources, il existe beaucoup plus de possibilités de formation à la science de la production de neutrons et du développement de l'instrumentation, en plus de la formation à la collecte et à l'interprétation des données collectées sur les instruments conventionnels disponibles auprès des principales sources.

Le temps de faisceau pour mener à bien les programmes de formation peut être alloué spécifiquement, en plus de faire participer les étudiants aux expériences en cours. De plus, des stations expérimentales peuvent être envisagées, sous une forme modulaire, qui permettent la formation pratique. En général, cela ne serait pas possible avec des sources de forte puissance. Les sources de neutrons locales ou régionales à petite échelle ont souvent des liens étroits avec les universités locales, de sorte que les programmes de formation aux sources peuvent être directement liés aux programmes de cours universitaires dans divers domaines. Associé à une instrumentation spécialisée, cela faciliterait la mobilité des étudiants et des chercheurs pendant la formation et encouragerait la collaboration internationale.

5 Positionnement de SONATE par rapport aux autres projets d'instruments de diffusion neutronique en Europe

5.1 Positionnement du LLB dans le paysage de la diffusion neutronique pour la prochaine décennie.

Après l'arrêt d'Orphée en 2019, le Laboratoire Léon Brillouin ne peut proposer de temps d'expérience sur des instruments de diffusion neutronique que sur l'instrument IN6 à l'ILL. A court terme, le LLB dispose de plateformes de caractérisations (SAXS, DRX, magnétométrie) qui permettent d'entretenir des collaborations avec différents groupes ou laboratoire extérieurs.

Différents appareils sont en cours d'installation sur des sources extérieures :

1. PA20 à PSI qui est un appareil de petits angles qui pourra fournir environ 90 jours de faisceau aux utilisateurs Français entre 2021 et 2031.
2. SHARP@ILL qui est un appareil de spectroscopie en temps de vol qui pourra fournir 50% du temps d'opération aux utilisateurs Français à partir de 2023 (90 jours + 22 jours)
3. SAM@ILL qui est un appareil de petits angles qui pourra fournir 50% du temps d'opération aux utilisateurs français à partir de 2023 (90 jours)
4. GAPS@ILL qui sera un appareil de spectroscopie 3-axes qui pourra fournir 50% du temps d'opération aux utilisateurs français à partir de 2024. (90 jours)

Les utilisateurs Français continueront à avoir accès aux CRG Français localisés à l'ILL (IN12, IN22, D1B, D23, IN13) ainsi qu'à la fraction Française du temps ILL (1400 jours, dans l'hypothèse d'un fonctionnement nominal de 200 jours par an).

Les utilisateurs Français peuvent aussi envisager de réaliser des expériences sur d'autres sources telles que MLZ@München, PSI en Suisse ou ISIS en UK. Cependant il faut souligner que, par exemple, le temps alloué à des utilisateurs non allemands à MLZ est d'ores et déjà supérieur à 50%. Suite à la fermeture du réacteur BER2@HZBerlin, il est difficile d'imaginer que du temps supplémentaire se libèrera pour les utilisateurs Français.

L'ouverture de ESS aux utilisateurs démarrera en 2025 avec à la fin de la décennie environ 300 à 400 jours ouverts aux utilisateurs français. Certains utilisateurs experts accéderont directement à ESS mais il est souhaitable, pour un grand nombre d'utilisateurs non experts, de passer par le LLB pour la « mise au point » d'une expérience, sa réalisation et l'analyse des données. En effet, ESS prévoit un support scientifique très limité par instrument (2 chercheurs) de telle sorte que l'exploitation des données sera entièrement de la responsabilité des utilisateurs. Un support « extérieur » est souhaitable pour tirer au mieux parti des mesures effectuées à ESS.

A long terme, il est souhaitable que la France maintienne une expertise en diffusion neutronique et une capacité opérationnelle en diffusion neutronique pour soutenir la communauté des utilisateurs. La construction d'une nouvelle source de neutrons en France est la réponse la plus efficace.

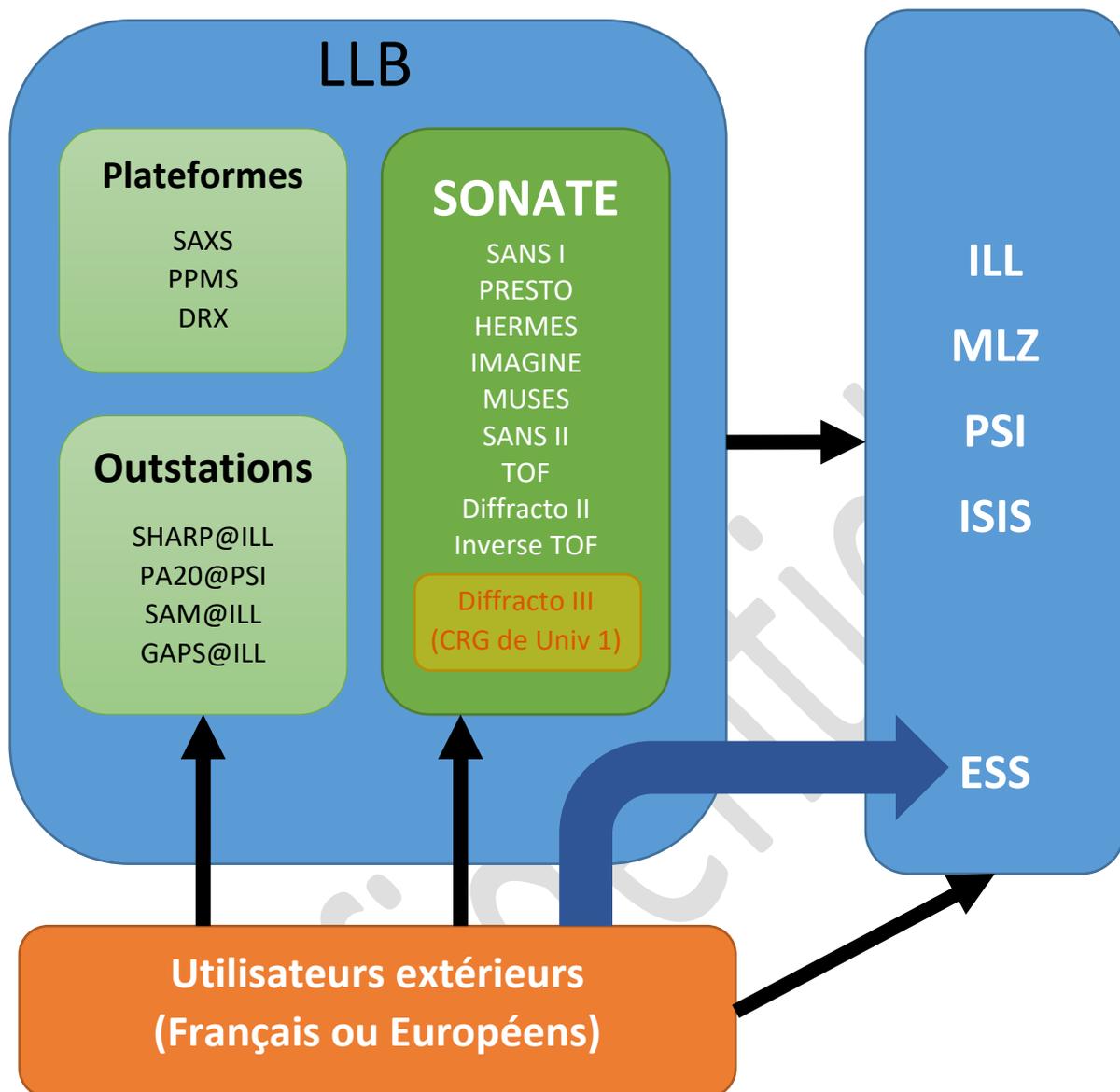


Figure 11: Positionnement possible du LLB à long terme.

5.2 Cas de la diffusion aux petits angles

Le LLB est engagé dans la construction de l'appareil de diffusion aux petits angles SAM à l'ILL. Après la fermeture de l'ILL à l'horizon 2030, cet appareil pourrait naturellement trouver sa place comme deuxième appareil de diffusion aux petits angles sur SONATE. Cela permettrait de rentabiliser l'investissement fait dans cet instrument au-delà de ses 10 premières années d'opération. Le projet SAM est d'ailleurs conçu pour le déménagement futur de l'instrument depuis l'ILL vers SONATE. Le LLB restera en effet propriétaire de l'équipement, et pourra facilement réimplanter SAM sur SONATE. Son adaptation à la nouvelle structure temporelle du faisceau bénéficiera par ailleurs grandement des acquis techniques liés au projet SKADI (instrument SANS construit par le LLB en collaboration avec le FZ Jülich à l'ESS).

La pratique de la diffusion aux petits angles sur source pulsée donnera un avantage considérable aux équipes françaises, idéalement formées et disposant de résultats préliminaires voire avancés, pour l'exploitation optimale du SANS à l'ESS.

5.3 Cas de la diffraction de poudre

L'offre en techniques de diffraction va significativement se réduire pour la communauté française après la fermeture d'Orphée. A court terme, aucun projet « compensatoire » n'est prévu. C'est la raison pour laquelle un instrument de diffraction de poudre est un projet prioritaire sur la source SONATE. Le LLB est impliqué dans la construction de 2 instruments de diffraction à ESS (MAGIC et DREAM). L'expertise technique pour la construction d'un instrument de diffraction en temps de vol est donc disponible au LLB. On soulignera qu'un tel instrument permettra aux utilisateurs français de se former aux techniques de temps de vol et d'être mieux préparés pour les expériences à ESS.

5.4 Cas de la diffusion inélastique 3 axes

Le LLB a proposé la construction d'un instrument de diffusion inélastique GAPS à l'ILL. Un tel instrument n'est pas adapté à une source en temps de vol telle que SONATE et c'est la raison pour laquelle ce type d'instrument n'est pas proposé dans la première vague d'instruments de SONATE.

Cependant, le LLB est impliqué dans la construction de l'instrument BIFROST à ESS dont le concept est très innovant. A l'horizon 2028, un retour d'expérience sur ce type d'instrument sera disponible. Il sera alors possible d'envisager la construction d'un instrument similaire sur SONATE à l'horizon 2030. Cet appareil pourrait alors accueillir une partie des activités de GAPS, de IN12 et de IN22 qui sont des CRGs Français à l'ILL.

5.5 Cas de la spectroscopie Spin-Echo

La possibilité de continuer les développements sur la spectroscopie en spin-écho résonant sur SONATE est à souligner. Elle est d'autant plus importante que les techniques de spin-écho pourraient potentiellement bénéficier de développements dans la production de neutrons très froids, qui est possible sur les sources compactes. De telles possibilités sont spécifiques aux sources compactes.

5.6 Complémentarité entre SONATE et ESS

L'objectif de la construction de la source à spallation ESS n'est pas uniquement le remplacement des sources existantes. Il s'agit aussi de réaliser de nouvelles expériences pour le moment impossibles. De la même manière que les sources synchrotron ne remplacent pas les appareils de diffusion de rayon X des laboratoires, ESS ne remplacera pas les sources moins brillantes telles que FRMII en Allemagne, ISIS au Royaume-Unis ou PSI en Suisse.

Les expériences qui pourront être réalisées sur SONATE ne nécessiteront pas les flux extrêmes de ESS mais fourniront tout de même des informations uniques en raison des propriétés spécifiques des neutrons. La « valeur » scientifique d'une mesure n'est pas toujours liée au flux neutronique utilisée pour l'obtenir.

Les expériences sur ESS seront en général des expériences complexes (mesures résolues en temps, mesures sur des échantillons très petits ou très dilués) qui auront une durée de l'ordre de la journée au minimum. Il n'y aura aucun intérêt à réaliser des expériences « simples » à ESS. Autrement, l'essentiel du temps de neutrons sera gaspillé en temps de préparation des échantillons et de mise en place avec une utilisation très faible du temps de neutrons. La situation est identique au SAXS où les expériences « simples » sont réalisées de manière tout aussi efficace sur un appareil de laboratoire à

flux réduit dont le faisceau est utilisé 80% du temps plutôt que sur une ligne synchrotron où seule une fraction très inférieure au 1% du temps de faisceau disponible est effectivement utilisée pour des mesures.

Les lignes actuelles (par ex. SANS@Orphée) permettaient déjà de réaliser des expériences sur des dizaines d'échantillons lors d'un run expérimental (disponibilité d'un passeur 50 échantillons sur PA20). Scientifiquement il ne peut pas y avoir de motivation à mesurer 500 ou 1000 échantillons (sur ESS) pour résoudre un problème scientifique.

Il faut également souligner le rôle vital joué par les centres nationaux dans le développement de nouvelles techniques de diffusion neutronique. En effet, les sources les plus puissantes telles que l'ILL ou la future ESS sont pleinement orientées vers leur programme utilisateur. Cela leur suppose de s'appuyer sur des méthodes éprouvées et "productrices", et ne laisse donc que peu de place aux risques liés à l'innovation (hormis des variations autour de techniques "classiques"). Ce n'est pas le cas des sources nationales, qui ont historiquement joué un rôle important dans le développement de nouvelles techniques. Nous pouvons par exemple mentionner la rétrodiffusion¹⁶ (créée au Forschungs-Reaktor München, Allemagne), la spectroscopie à écho de spin¹⁷ (inventée au réacteur du Budapest Central Research Institute, Hongrie) ou les méthodes basées sur la précession de Larmor (développées à la TU Delft, Pays-Bas), qui font aujourd'hui partie intégrante du paysage de la diffusion neutronique. Ces exemples illustrent le rôle essentiel que pourra jouer une source comme SONATE dans les années futures. En participant au maintien des compétences instrumentales, elle ouvrira ainsi la voie à des développements originaux, qui pourront être implémentés à terme sur ESS et bénéficieront à l'ensemble de ses utilisateurs (et à la communauté française en particulier).

6 Conclusion

Les performances d'une source compacte à haute brillance sont potentiellement équivalentes à celles d'un réacteur de recherche de moyenne puissance pour un coût d'un cinquième par rapport aux installations existantes. Une CANS n'est pas une installation nucléaire ce qui simplifie et réduit les coûts d'exploitation.

Technologiquement, l'ensemble des briques sont disponibles: (i) accélérateurs forts courants, (ii) modérateurs, (iii) instruments. La cible demande encore des développements techniques mais près d'une demi-douzaine d'instituts se sont attelés à la tâche à travers le monde.

L'écosystème autour de la diffusion neutronique est très riche en France et offre de nombreuses possibilités. Les sources compactes sont une approche nouvelle prometteuse pour la diffusion neutronique.

Nous proposons qu'une plateforme de diffusion neutronique SONATE soit construite en France et offre des services autour de la caractérisation des matériaux. L'investissement nécessaire est de l'ordre de 50 M€. Une telle installation pourra fournir 1 800 instruments.jours à une large communauté pour un coût annuel de l'ordre de 4 M€.

¹⁶ A. Heidemann, "The backscattering story: A personal view", [Journal of Neutron Research 19, 93-101 \(2017\)](#)

¹⁷ F. Mezei, Preface of "Neutron Spin Echo", [Lecture Notes in Physics 128 \(1980\)](#)



Figure 12: Dans le cas des rayons X, il existe des sources dont la brillance s'étend sur plus de 10 ordres de grandeurs. Ces sources sont néanmoins toutes utilisées pour résoudre des problèmes scientifiques. Elles forment un écosystème très riche. Dans le cas de la diffusion neutronique, l'accès à la technique a historiquement été limité à l'accès à un réacteur nucléaire. Les évolutions technologiques font que cette situation peut changer et les techniques neutroniques peuvent s'ouvrir à un public plus large (adapté de T. Brückel, JCNS).

7 Références

Des liens Web directs peuvent être trouvés sur le site SONATE ([lien](#))

8 Annexe 1 / Etat de l'art sur les sources compactes

8.1 Intérêt international sur le potentiel des sources compactes de neutrons

Depuis une dizaine d'années, le potentiel des sources compactes pour la production de neutrons et pour leur utilisation dans différents types d'applications suscite un intérêt grandissant.

Parmi les actions en cours on peut citer:

- Les conférences UCANS (Union for Compact Accelerator-based Neutron Sources). UCANS8 a été organisé à Paris en 2019 et a rassemblé 140 participants. UCANS9 sera organisé à Tokyo en 2020
- Le Forschung Zentrum de Jülich organise un workshop annuel : "High Brilliance Source" meetings (Unkel, 2015...2020)
- L'AIEA a organisé un Technical Meeting sur les "Non-spallation Accelerator-based Production of Neutrons" en Novembre 2019. Un TechDoc sur le sujet sera publié en 2020.
- Nos collègues japonais organisent annuellement une réunion du JCANS Japanese CANS
- Dans le cadre de LENS (League of European Neutron Sources), un groupe de travail sur les CANS a été créé. Un « Livre blanc » sera produit sur le sujet en 2020.
- Différents workshops thématiques plus spécifiques sont régulièrement organisés

8.2 Les CANS dans le monde

Les premières « sources de neutrons compactes à base d'accélérateurs » ont été construites dans les années 1970 et utilisaient des accélérateurs d'électrons et des réactions de photofission pour produire des neutrons. Parmi les sources « historiques » on peut citer HUNS (Hokkaido University Neutron Source) et CNS (Compact Neutron Source de Bariloche, Argentine).

Après une longue période sans évolutions majeures, l'Université Bloomington aux USA, Indiana a proposé la construction d'une CANS pour la diffusion neutronique (sur la base d'un accélérateur existant). Cette source appelée LENS a commencé à fonctionner en 2010. Dans la décennie 2010, les projets se sont multipliés. Les Figure 13 et Figure 14 présentent les développements autour des sources compactes pour la production de neutrons au Japon et en Chine. Des sources compactes sont en construction dans plusieurs autres pays (USA, Corée, réseau KCANS ; SARAF en Israël ; au Canada, en Inde, en Hongrie, en Italie...). En France on pourra citer la plateforme NFS (1kW) au GANIL et l'accélérateur SAPHIR pour la production de neutrons rapides et la radiographie de fûts de déchets nucléaires.

Il faut cependant modérer cet aspect de foisonnement par le fait que ces installations, construites ou en mise en service (commissioning), ont toujours un programme expérimental réduit. Il est limité à 1-3 stations expérimentales, les puissances des sources sont limitées, l'objectif scientifique est très spécifique (physique nucléaire, BNCT, industrie). Ces sources ne peuvent pas être considérées comme des « plateformes ». L'investissement dans ces équipements démontre toutefois la motivation de nombreux pays pour la production et l'utilisation des techniques neutroniques.

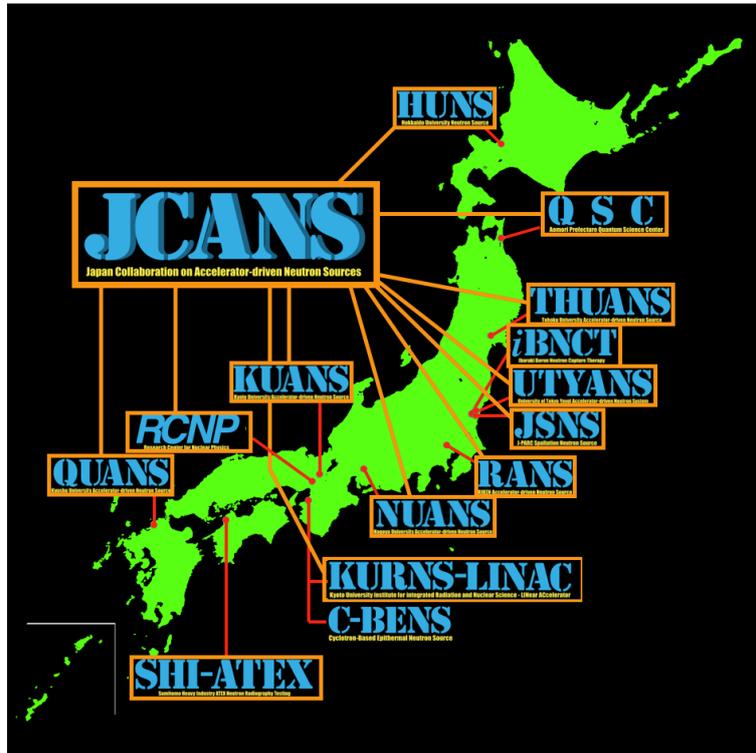


Figure 13: Réseau J-CANS (Japanese CANS). Un certain nombre de sources sont encore en commissioning ou en projets.

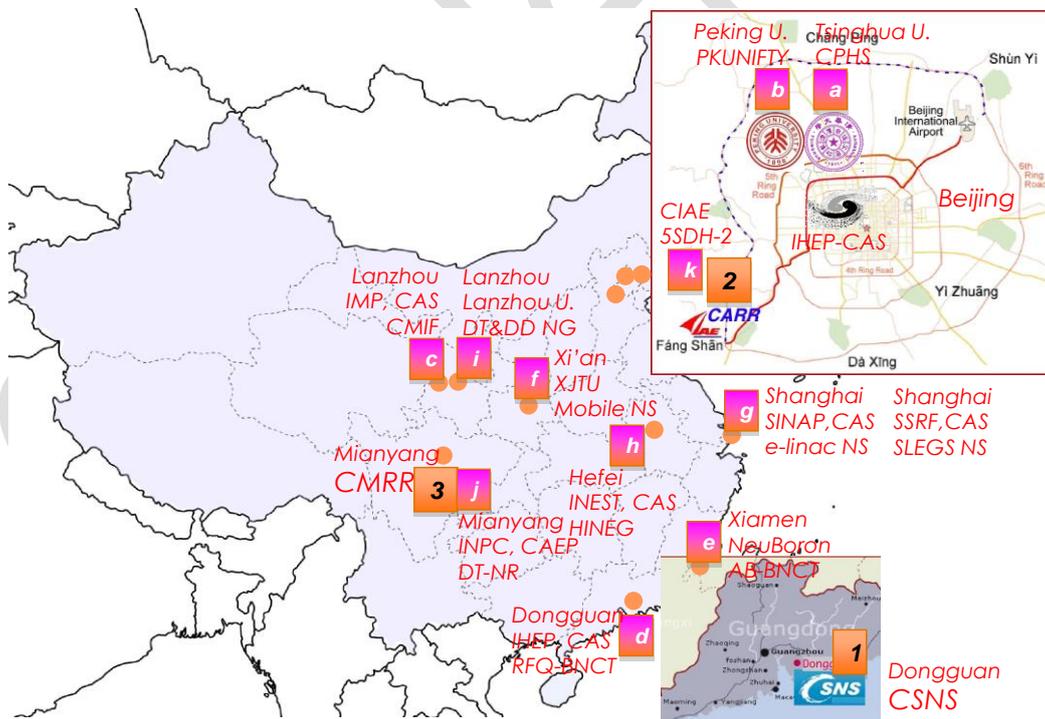


Figure 14: Réseau de sources compactes en Chine. Au-delà des 3 sources majeures (CNS, CARR, CMRR), la Chine se dote d'un réseau dense de sources compactes de plus faibles performances pour des applications variées.

8.3 Exemple d'utilisation de ces sources compactes pour la diffusion neutronique

La figure ci-dessous présente des mesures de texture sur un acier laminé réalisées sur différentes sources :

- RANS@RIKEN fonctionnant à une puissance de 700 W (puissance protons sur la cible)
- Sur le spectromètre TAKUMI @ J-PARC, la source à spallation Japonaise
- Sur le spectromètre HIPPO @ LANSCE, sur une source à spallation aux USA

Le flux neutronique « brut » au niveau de l'échantillon sur RANS était de 0.4% celui de TAKUMI et 0.2% celui de HIPPO. Cependant grâce à une optimisation de l'instrumentation et du protocole de mesure, il est possible d'obtenir des données équivalentes à celles des instruments sur les sources à spallation avec des temps d'acquisition « raisonnables » (5 heures par échantillon). En 3 jours d'expérience, il est donc potentiellement possible de caractériser une douzaine de nuances différentes d'acier.

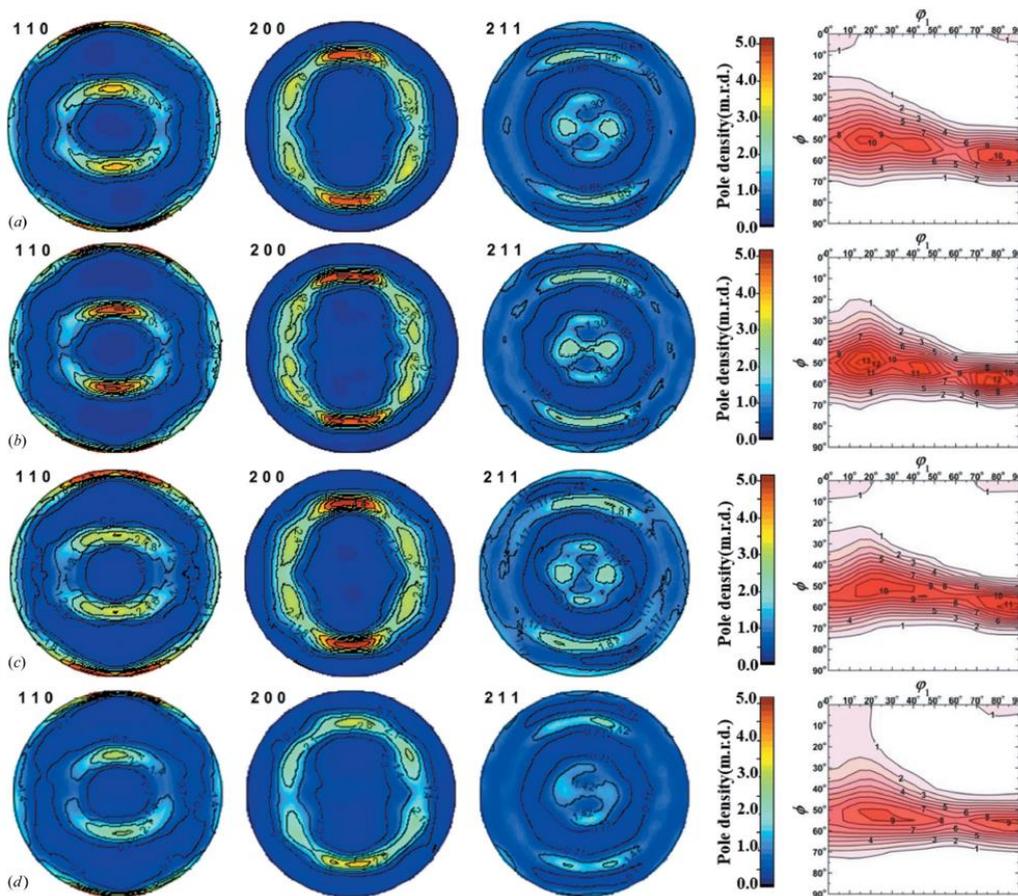


Figure 15: Exemple de mesures de figures de pôle [18]. (a)-(b) Sur RANS, avec 2 hypothèses différentes sur les paramètres de modélisation (« unequal d-range » et « equal d-range »); (c) Mesure sur TAKUMI@JPARC; (d) Mesure sur HIPPO@LANSCE.

D'autres exemples ont été donnés lors du séminaire sur les sources de neutrons compactes - 13 avril 2018 organisé par la 2FDN [19].

¹⁸ Pingguang Xu, Yoshimasa Ikeda, Tomoyuki Hakoyama, Masato Takamura, Yoshie Otake and Hiroshi Suzuki, J. Appl. Cryst. (2020), 53, 444-454. <https://doi.org/10.1107/S1600576720002551>. In-house texture measurement using a compact neutron source.

¹⁹ Séminaire sur les sources de neutrons compactes (Paris, Avril 2018).

http://2fdn.neel.cnrs.fr/IMG/pdf/Worshop_Cans/Menelle_CANS_existantes.pdf

8.4 Etat de l'art des CANS « Haute Brillance »

8.4.1 Les besoins techniques pour la construction d'une source haute brillance

Les sources présentées ci-dessus permettent de répondre à des besoins spécifiques. Les performances peuvent satisfaire des industriels dans différents domaines mais ne sont pas compétitives avec les performances proposées aux utilisateurs de diffusion neutronique sur les sources les plus modernes. Les CANS actuelles sont en général limitées à des puissances de l'ordre du kW.

Les éléments clés d'une source compacte à haute brillance sont:

- ▶ *Un accélérateur haute intensité avec un courant crête élevé ($I_{peak} \sim 100mA$).*
De tels accélérateurs ne sont pas courants mais commencent à être disponibles (voir IFMIF/EVEDA, IPHI@Saclay, ESS)
- ▶ *Une cible métallique pouvant opérer à une densité de puissance élevée.*
A la différence des sources à spallation, à faible énergie des protons, la puissance est déposée plus proche de la surface et donc les puissances volumiques deviennent plus importantes.
Il semble techniquement possible d'opérer une cible à des puissances de l'ordre de 50 à 100kW (à comparer à 1-2kW sur les sources citées ci-dessus).
L'opération d'une cible Béryllium sur une durée supérieure à 1000 heures à une puissance de 20kW a récemment été démontrée au Japon²⁰.
- ▶ *Un modérateur de neutrons.*
La fabrication d'un modérateur de neutrons thermiques et froid ne pose pas de problème technique en raison du faible échauffement par rayonnement sur une CANS. Différents prototypes de modérateurs froids ont été testés sur des CANS (modérateurs méthane @LENS, RIKEN, CPHS, prototype modérateur H₂ @ JCNS)
- ▶ *Instruments.*
Les technologies de construction d'instruments temps de vol performants sont connues, en particulier après l'investissement méthodologique réalisé pour les instruments pour ESS.

8.4.2 Les développements en cours en France

Le projet SESAME « IPHI - Neutrons » financé par la région Ile de France sur la période 2018-2020 a pour objectif de démontrer l'opération d'un accélérateur à fort courant de manière fiable, l'opération d'une cible à une puissance de 50kW et la réalisation de mesures de diffusion neutroniques en temps de vol.

²⁰ T. Kuhihara et al, EPJ Web of Conferences Volume 231 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023103001>

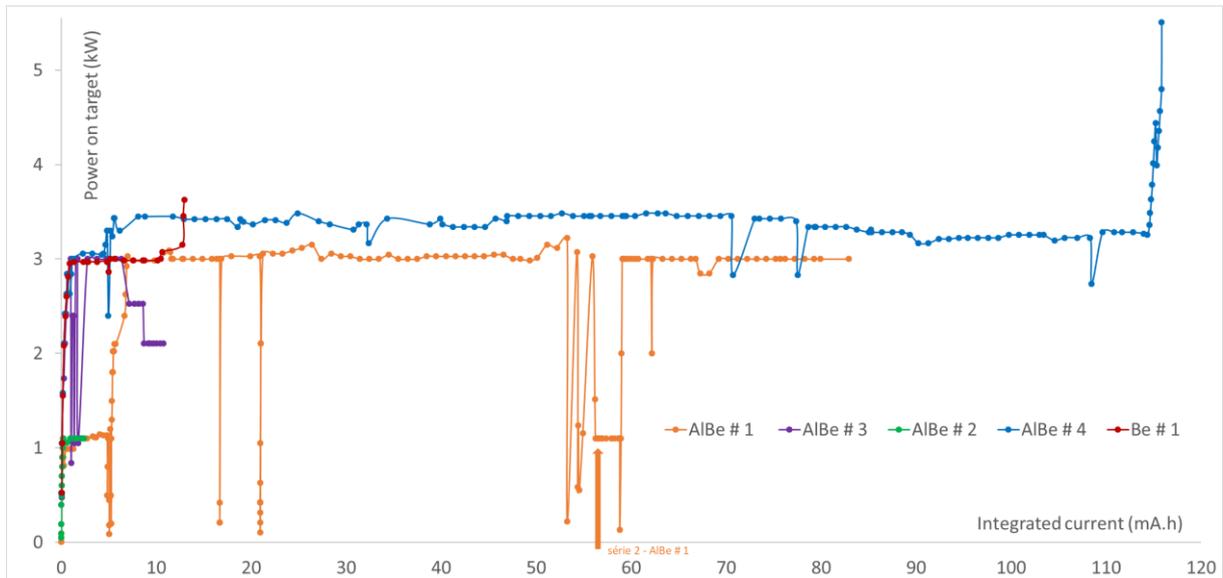


Figure 16: Opération de différentes cibles à des puissances surfaciques de $500\text{W}/\text{cm}^2$ sur des durées allant jusqu'à 100 heures.

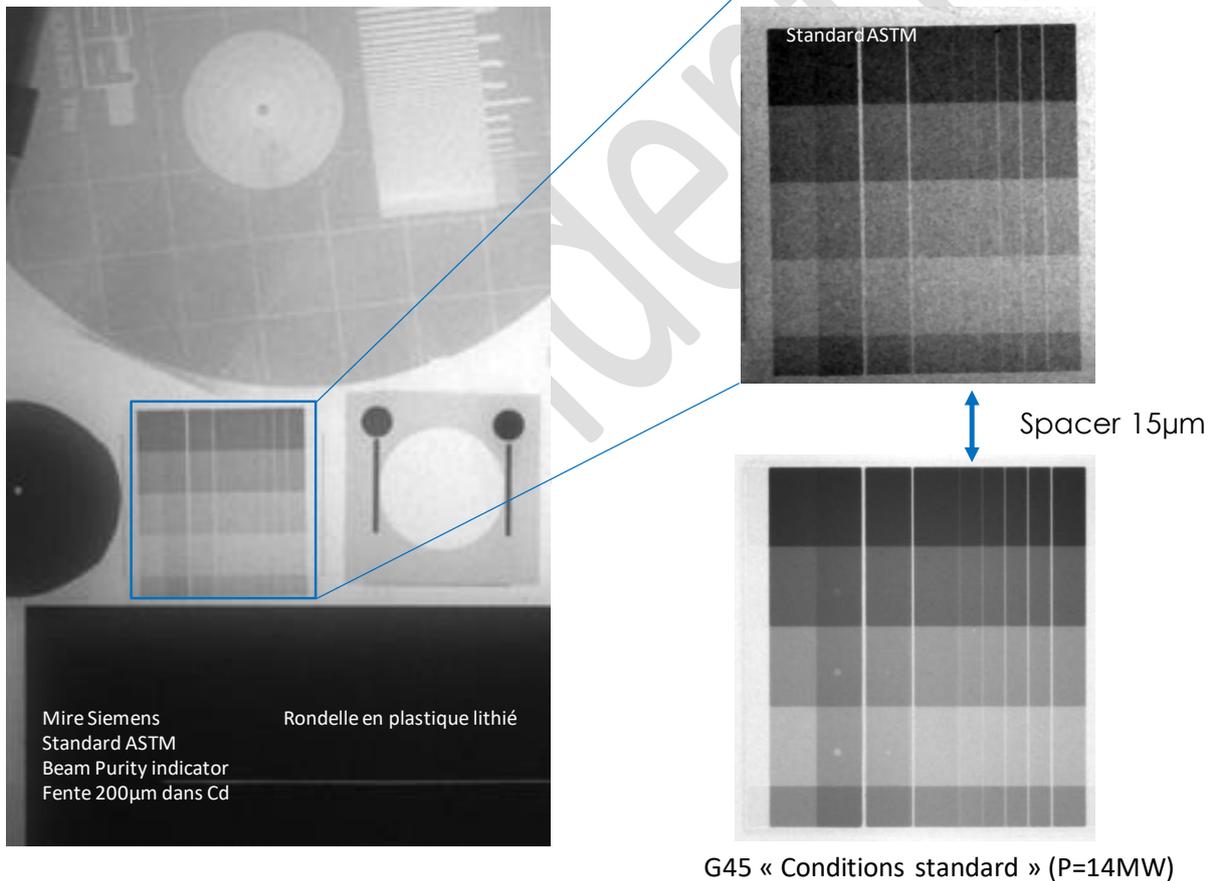


Figure 17: Exemple de mesure de radiographie neutronique utilisant une image plate. Les temps d'exposition sont longs mais permettent tout de même d'observer des détails à une échelle inférieure à $100\mu\text{m}$.

Prompt pulse

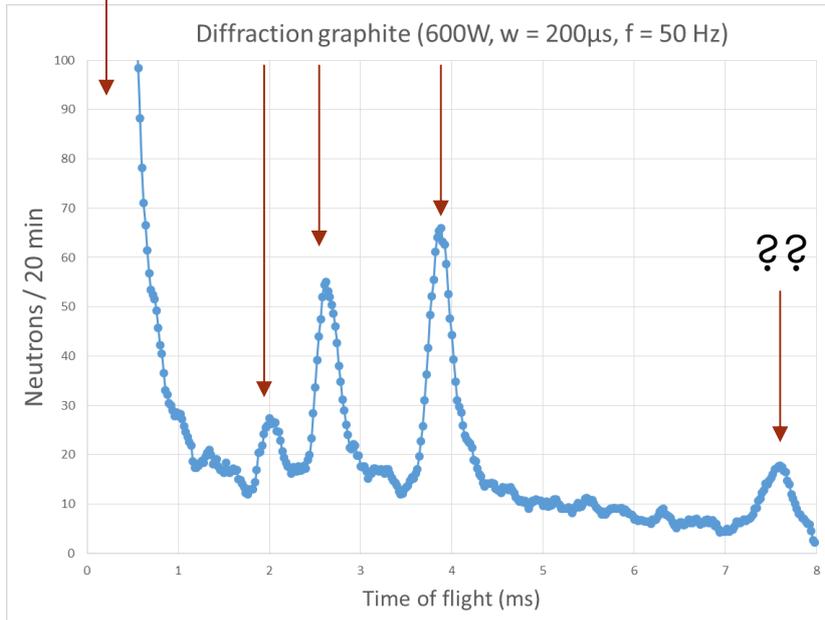


Figure 18: Exemple de mesure de diffraction sur un crystal de graphite à une puissance de 600W (50Hz, 200 μ s, 20 min)

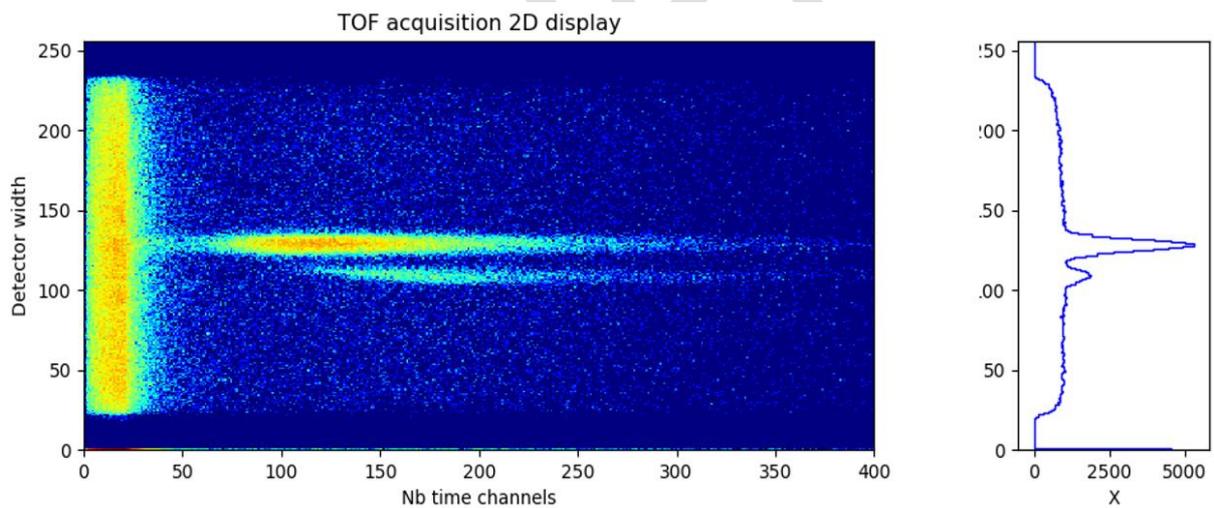


Figure 19: Exemple de mesure de réflectivité sur un miroir de neutrons (50Hz, 400 μ s, 1.2kW, 10 min)

9 Annexe 2 / Performances de la source SONATE pour la diffusion neutronique.

Proposition de suite instrumentale

9.1 Performances des instruments de diffusion neutronique sur la plateforme SONATE

L'objectif est de construire une source proposant des instruments ayant des performances équivalentes aux instruments sur le réacteur Orphée ou sur la source à spallation ISIS. Différentes simulations par différents instituts montrent qu'autour d'une source de type CANS, il est potentiellement possible de construire des instruments ayant des performances équivalentes à celles des instruments sur un réacteur de puissance moyenne (Orphée ou BER II) ou sur une source à spallation de puissance moyennes (ISIS ou LANSCE).

Technique	Flux on sample	Reference spectrometers	Potential gains
Reflectivity	0.8×10^7 n/s/cm ²	HERMES@LLB 1×10^7 n/s/cm ² POLREF@ISIS $\sim 1 \times 10^7$ n/s/cm ²	ESTIA@ESS x10 (small samples) Advanced Deconvolution x3
SANS	0.7×10^6 n/s/cm ² (low Q) 2.2×10^6 n/s/cm ² (med Q) 6.7×10^6 n/s/cm ² (high Q)	PAXY@LLB (low Q) 0.7×10^6 n/s/cm ² SANS2D@ISIS 1×10^6 n/s/cm ²	Focusing optics for VSANS (small Q) x10
Powder diffraction	2×10^6 n/s/cm ²	G41@LLB 2×10^6 n/s/cm ²	Large solid angle detector (7C2 type) x20
Imaging (white beam)	1.5×10^6 n/s/cm ² (for L/D = 240) 1.3×10^7 n/s/cm ² (for L/D = 80)	ICON@PSI 1×10^7 n/s/cm ² CONRAD@HZB 1×10^7 n/s/cm ² (for L/D = 240)	MCP detectors (détection x5) (Fournisseurs commerciaux arrivent sur le marché)
Imaging (time resolved)	1×10^5 n/s/cm ² (for L/D = 500) $\delta\lambda/\lambda = 1\%$	ANTARES@FRM2 5×10^5 n/s/cm ²	
Direct TOF	1×10^5 n/s/cm ² (thermal) * 1.3×10^5 n/s/cm ² (cold) *	MERLIN@ISIS 6×10^4 n/cm ² /s LET@ISIS 5×10^4 n/cm ² /s IN5@ILL 6.8×10^5 n/cm ² /s	
Backscattering	2.5×10^7 n/cm ² /s *	OSIRIS@ISIS 2.7×10^7 n/cm ² /s	
3-Axes	Quelques %	2T@LLB 4F@LLB	MUSHROOM (LETx20 on single crystals)
Spin-Echo	1×10^7 n/s/cm ²	MUSES@LLB 2×10^7 n/s/cm ² (at 5Å [°])	Multi-MUSES (x70) Neutrons très froids

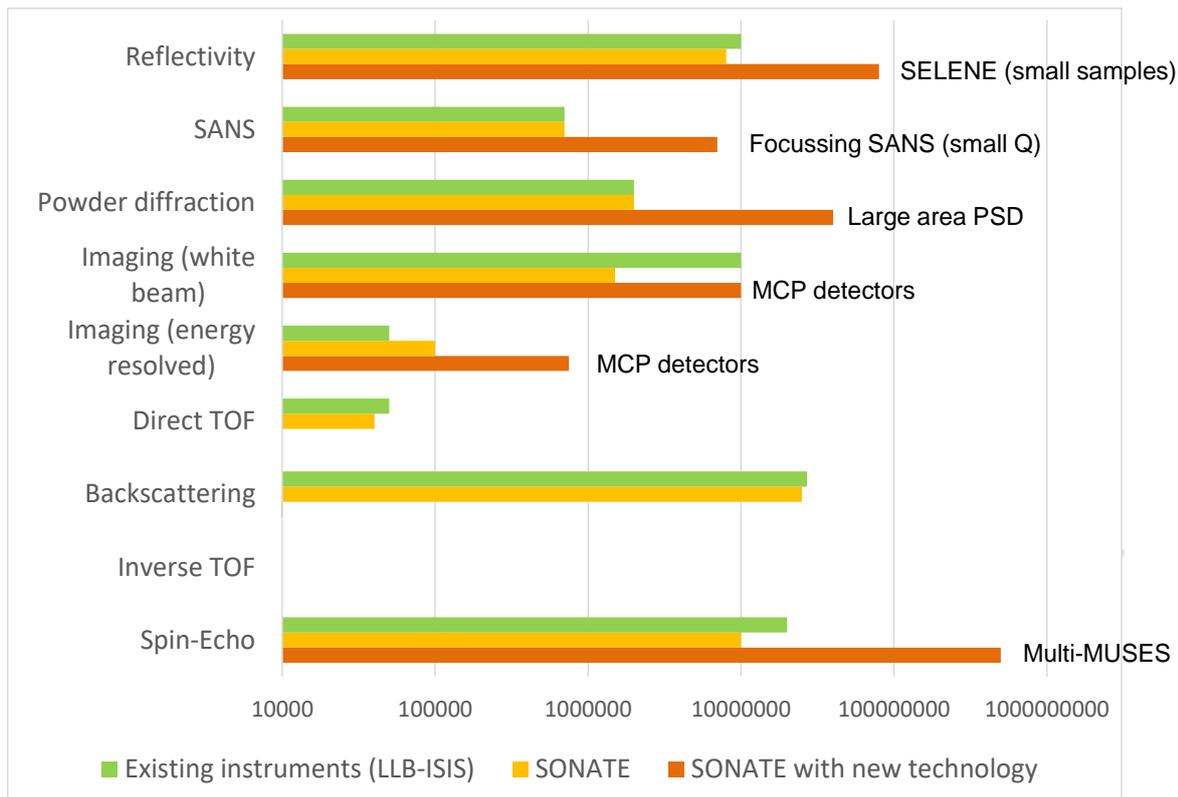


Figure 20: Comparaison des performances de différentes techniques de diffusion neutronique en termes de flux au niveau de l'échantillon ($n/cm^2/s$). (vert) instruments de référence sur différentes installations (LLB – ISIS – ILL) ; (jaune) déplacement des instruments existants de Orphée vers SONATE ; (orange) performances après différents upgrades. Les chiffres pour les instruments en temps de vol (TOF) ont été fournis par Jörg Voigt du JCNS.

Les discussions techniques sur l'obtention de ces performances et le design de ces instruments peuvent être trouvées dans les références ci-dessous ²¹.

9.2 Définition de l'offre proposée

Plusieurs paramètres entrent en jeu dans la définition de l'offre :

- La mise en avant d'appareils « productifs » qui permettent de produire de la science de haut niveau sans nécessiter des flux importants
 - o Les appareils simples à mettre en œuvre et à utiliser : SANS, diffraction poudre, imagerie, réflectométrie.
 - o Ces priorités sont reflétées par les techniques principalement utilisées par les thésards du LLB au cours des 10 dernières années (voir Figure 21).
- La capacité en instruments-jours qui sera offerte
 - o La mise en place d'une telle plateforme et l'amortissement de l'investissement ne peut se justifier que si la plateforme fournit un volume minimum d'instruments.jours
 - o Sur la base d'un parc instrumental de 10 appareils fonctionnant 180 jours par an, une telle installation pourrait fournir 1800 instruments.jours.

²¹ F Ott, H N Tran, X Fabrèges, A Menelle, N Chauvin, J Schwindling, A Letourneau, A Marchix, C Alba-Simionesco, J. Phys.: Conf. Ser. **1021** (2018) 012007.

J. Voigt, S. Böhm, J.P. Dabrock, U. Rücker, T. Gutberlet, T. Brückel, NIM A **884** (2018) 59-63

Une telle offre permettrait de compenser partiellement la réduction de la capacité en diffusion neutronique française au-delà de 2030 (voir Figure 9)

- Chaque instrument devrait avoir le support de 2 scientifiques pour être normalement productif.

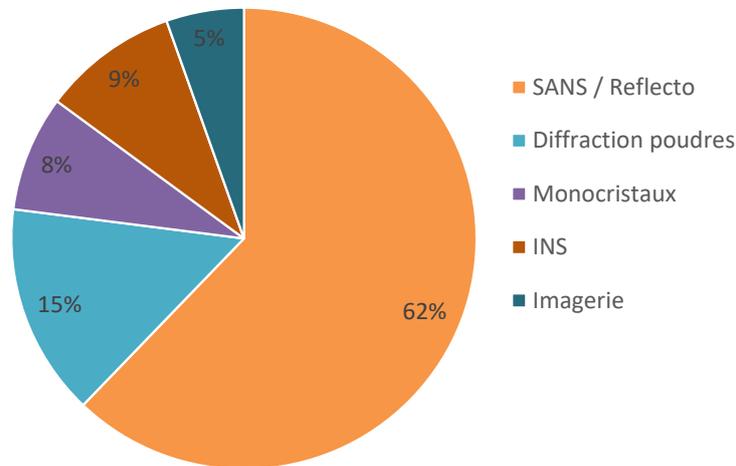


Figure 21: Proportion des techniques principalement utilisées par les thésards du LLB ou en cotutelle entre un laboratoire extérieur et le LLB (moyenne sur 10 ans). Les techniques principalement utilisées sont le SANS et la réflectivité ainsi que les techniques de diffraction de poudre. On soulignera que ces ratios sont biaisés par le fait que le SANS et la diffraction de poudre nécessitent des temps de mesure significativement plus courts de telle sorte que la production est plus élevée que pour les techniques plus pointues telles que la diffraction monocristaux et la diffusion inélastique.

Le projet pourrait se décomposer en 2 phases. Dans une première phase l'effort serait focalisé sur les techniques de caractérisation de structures avec une focalisation sur les instruments « basse résolution » pouvant facilement exploiter une structure temporelle en pulses longs comme à ESS.

Dans une première phase, les instruments prioritairement installés seraient :

- 1 instrument SANS → sciences des polymères – nanomatériaux
- 1 diffractomètre de poudres (Basse Résolution) → métallurgie - transitions de phase – magnétisme (~G41)
- 1 diffractomètre « Large Scale Structures » (équivalent G61 – D16)
- 1 station d'imagerie
- 1 réflectomètre → couches minces de polymères, de protéines, interfaces solide – liquide
- 1 appareil de spin-écho → développement Spin-Echo résonant / MultiMUSES

Après un retour d'expérience, dans une deuxième phase, les instruments suivants pourraient être envisagés :

- 2^{ème} SANS (avec neutrons polarisés?)
- 3^{ème} diffractomètre de poudres (haute résolution monocristaux) → structures (~3T2)
- Un appareil en temps de vol pour la spectroscopie neutronique (équivalent SHARP) focalisé sur les thématiques de matière molle, liquides, biologie.

Après une évaluation de la demande des utilisateurs, d'autres appareils pourraient être envisagés dans le futur tels que :

- Un appareil en temps de vol pour la spectroscopie neutronique en matière dure (magnétisme / monocristaux) (équivalent IN5). La compétitivité d'un tel appareil devra être évaluée en fonction des thématiques scientifiques du moment
- Un appareil en temps de vol en géométrie inverse (équivalent CAMEA@PSI, BIFROST@ESS). Le rapport performances/coût d'un tel appareil devra être considéré en détail.
- Un instrument de diffraction de neutrons chauds (une expertise spécifique en TdV sera requise pour l'analyse des données)

Une telle installation proposerait une suite de 9-11 instruments auxquels pourraient s'ajouter 1 ou 2 lignes de tests.

Si on considère un scénario où la source fonctionne 180 jours par an (pendant les jours ouvrés uniquement) cela correspond à 36 semaines de fonctionnement. Chaque instrument devrait avoir le support de 2 scientifiques et un technicien. Environ une dizaine de personnes seraient nécessaires pour le support général (informatique, électronique, secrétariat). Nous estimons que 8-10 personnes seraient nécessaires pour assurer l'opération de la source proprement dite. Le personnel travaillant autour de la source serait de l'ordre de 50 personnes.

Suivant les techniques, les durées des expériences varient significativement. D'après les projections des performances attendues il est possible d'estimer le nombre typique d'expériences qui pourront être réalisées sur SONATE (voir la Table ci-dessous). Environ 300 runs expérimentaux pourraient être réalisés chaque année. Cela correspond à un potentiel de 100 à 150 publications /an.

<i>Instrument</i>	<i>Durée typique d'un Run</i>	<i>Nr. Run / an</i>
PHASE 1		
SANS1 (soft matter)	2.5 days	64
Powder 1	5 days	32
Reflectometer	5 days	32
Radiography	5 days	32
Powder 2	2.5 days	64
Spin-Echo	15 days	10
TOTAL		234
PHASE 2		
SANS2 (hard matter)	5 days	32
Powder 3	5 days	32
Direct TOF	5 days	32
TOTAL		96
PHASE 3/ Autres possibilités		
Temps de Vol inverse	15 days	10
Diffraction neutrons chauds	10 days	16
TOTAL		26

Table 1 : Nombre d'expériences pouvant être réalisées sur SONATE en faisant l'hypothèse d'un fonctionnement de 180 jours et d'une disponibilité de 90% des instruments pour des expériences scientifiques (160 jours). Suivant la technique expérimentale, la longueur des runs peut varier beaucoup. Environ 300 runs expérimentaux pourraient être réalisés chaque année.

Comme nous souhaitons proposer un nouveau type de fonctionnement plus flexible, au moins 20% du temps devrait être alloué « au fil de l'eau ». Environ 20% du temps serait utilisé pour la recherche propre du laboratoire. Une autre fraction de l'ordre de 20% pourrait être allouée à des collaborations proches pour les utilisateurs « semi-professionnels » qui, soit demandent un accès très régulier (>2 fois /an), soit développent des expériences complexes, voire installent leur propre spectromètre. La fraction restante du temps (40%) serait allouée aux utilisateurs « standards ».

L'accès au fil de l'eau sera essentiellement demandé pour les expériences de type SANS ou diffraction de poudre pour lesquels les temps d'expérience sont courts (<2.5 jours). Dans ces conditions l'organisation du planning est plus aisée.

On soulignera qu'étant donné que la capacité en instruments.jours sera réduite à terme, ce seront mécaniquement les utilisateurs les plus expérimentés qui auront accès à du temps de faisceau. Le volet positif est que la gestion des expériences et leur exploitation sera simplifiée. L'inconvénient est que la communauté va mécaniquement se réduire.

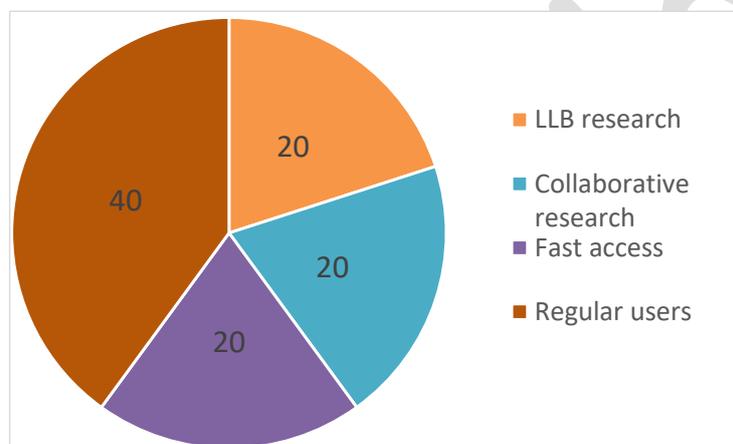


Figure 22: Rappel, proposition d'utilisation du temps de faisceau entre la recherche propre du LLB, la recherche collaborative, l'accès rapide et les utilisateurs réguliers.

L'évolution dans les autres pays européens est encore mal définie mais dans le cas où plusieurs autres pays développeraient des plateformes équivalentes, SONATE pourrait in fine faire partie d'un réseau Européen de CANS. Dans ce cas, l'aspect « plateforme » pourrait prendre une plus grande dimension :

- (i) Il serait possible d'imaginer que chaque CANS développe un ou des domaines d'expertise (en général lié à l'historique du laboratoire). Un possible paysage pourrait être que le LLB mette en avant la diffusion aux petits angles, qu'une source espagnole se concentre sur la diffraction, que le JCNS investisse dans la diffusion inélastique, que LENOS soit plus orienté autour de la physique nucléaire et des neutrons épithermiques (voir VESUVIO@ISIS). De cette manière chaque laboratoire pourrait agréger une masse critique d'utilisateurs et de scientifiques autour d'un domaine particulier.
- (ii) Dans le cas d'un fonctionnement de type « plateforme de caractérisation des matériaux », une mutualisation du temps « au fil de l'eau » permettrait de simplifier la gestion. Cela permettrait de limiter les périodes creuses (de l'ordre de 20 semaines par an sur chaque installation).

9.3 Détails d'une possible suite instrumentale sur SONATE / PHASE 1

9.3.1 Diffusion de neutrons aux petits angles (SANS 1) (SPACE)

L'appareil de diffusion aux petits angles répondra aux besoins des programmes internes du laboratoire sur l'ensemble des thématiques matière molle et biophysique.

Des laboratoires tels que PHENIX (Paris 6), LPS Orsay (Paris-Saclay), LCPO Bordeaux, le SIMM (ESPCI-Paris), le CERMAV Grenoble, l'ICS (Strasbourg), le SYMMES (Grenoble), le LCC Montpellier, le LIONS/NIMBE (Saclay), le CRPP (Bordeaux), l'ICR (Marseille), l'IMMM (Le Mans), le MSC (Paris 7), IPCM (Paris 6), ICMPE (Thiais), ICSM Marcoule, Institut Gallien (Chatenay-Malabry), l'IPREM Pau, IPR (Rennes), l'ICR (Rennes) seront des utilisateurs très réguliers sur des thématiques comme les nanocomposites, les mésoporeux, les suspensions de nanoparticules colloïdale, les argiles, les systèmes auto-organisés de tensio-actifs, les fondus de polymères, les systèmes stimulables, les complexes en solution, les coacervats, les hydrogels, les émulsions, les mousses, les matériaux nanostructurés à base de nanocristaux de cellulose, les vésicules de copolymères, les biopolymères, les poly-liquides ioniques, les polymères conducteurs pour les batteries, les systèmes membranaires de pores nanométriques, les inclusions dans les verres recristallisés...

L'appareil pourra répondre à certains besoins de caractérisations métallurgiques pour la CEA/DEN sur les alliages nucléaires (étude des ordres locaux et des mécanismes de ségrégation) ou élucider des propriétés micro-structurales dans certains composés à propriétés mécaniques et/ou électroniques remarquables.

Ce premier appareil ne proposerait pas d'option neutrons polarisés. Ces activités seraient réalisées dans un premier temps sur le spectromètre SAM à l'ILL (entre 2023 et 2033), puis plus tard sur un deuxième instrument de SANS@SONATE. L'appareil SANS1 serait un appareil proche de PAXY en termes de dimensions réutilisant une partie des équipements de PACE@LLB.

9.3.2 Réflectivité de neutrons (HERMES)

Cet appareil serait pratiquement identique à l'appareil HERMES sur le réacteur Orphée. Il répondrait aux besoins de caractérisation de couches minces de polymères, d'interface solides liquides, ou d'interfaces liquides libres.

Les utilisateurs principaux seraient le groupe Matière Molle et Biophysique.

Parmi les laboratoires extérieurs utilisateurs potentiels on peut lister le SIMM (ESPCI Paris), BIA (INRA Nantes), l'ICS (Strasbourg), l'INSP (Paris 6), le CERMAV (Grenoble), le LPS (Paris-Saclay) sur des thématiques concernant la caractérisation de couches minces polymériques stimulables, de systèmes modèles permettant de comprendre les phénomènes d'adhésion à l'échelle moléculaire, de couches nanostructurées élaborées par la technique *Layer by Layer*, de monocouches de Langmuir, de la description des mécanismes d'insertion de protéines ou de peptides dans des membranes de phospholipides...

9.3.3 Imagerie neutronique (IMAGINE)

Dans un premier temps, cet appareil proposerait des mesures de radiographie « classiques » non résolues en énergie. Bien que la source opère en temps de vol, il n'est pas pour le moment envisagé de réaliser des mesures résolues énergie. Cela nécessiterait (i) un investissement financier sur l'instrument très élevé et (ii) un développement méthodologique important.

Les thématiques seraient donc les mêmes que celles développées actuellement avec l'essentiel des activités tournant autour de la diffusion de fluides hydrogénés dans les milieux poreux : (i) géologie, (ii) sciences alimentaires, (iii) vieillissement des matériaux... Avec d'autres activités sur des mesures sur l'hydrogénation de matériaux nucléaires (CEA/DEN) ou sur des objets du patrimoine.

9.3.4 Diffraction de poudres (PRESTO)

Les performances et les spécifications de cet appareil seraient identiques (voire meilleures) que l'appareil G41 sur Orphée qui était spécialisé dans l'étude des transitions de phases.

Au sein du laboratoire il répondrait aux besoins des thématiques « magnétisme quantique », « systèmes d'électrons fortement corrélés » et « matériaux fonctionnels ».

L'activité « métallurgie » a disparu du spectre des compétences du LLB en raison du départ de plusieurs personnes spécialisées dans le domaine. Il serait souhaitable de redémarrer un programme de recherche dans le domaine via l'embauche dans le futur de nouveau personnel. L'appareil PRESTO serait parfaitement adapté aux études de métallurgie.

Cet appareil utiliserait le détecteur du spectromètre 7C2 qui offre une très grande couverture de l'espace réciproque.

9.3.5 Diffraction de poudres / structures à grande échelle

Il existe de nombreuses structures partiellement ordonnées en biologie, matière condensée molle et science des matériaux tels que les systèmes de biomembranes, les liquides moléculaires, les matériaux et argiles mésoporeux, les matériaux magnétiques dans lesquels les longueurs de corrélation ou les motifs de répétition sont de l'ordre de quelques nm à quelques dizaines de nm. Pour cela, il est utile de disposer d'un appareil spécifique permettant d'accéder à une gamme de vecteurs de diffusion intermédiaire entre les appareils de diffraction de poudre utilisés pour la détermination de structure et les appareils de SANS dédiés aux systèmes à grande échelle. La gamme de vecteur d'onde visée est typiquement $0.01 < Q < 2.5 \text{ \AA}^{-1}$. Les appareils équivalents sont G61@Orphée ou D16@ILL (ou AND/R@NIST).

L'appareil utiliserait une partie de l'équipement du spectromètre G61@LLB (détecteur entre autre).

9.3.6 Spin-Echo (MUSES)

Les appareils de spin-écho sont naturellement plus performants sur des sources continues car comme ils peuvent exploiter une large partie du spectre des neutrons, le facteur de mérite est donné par le flux intégré (qui est de manière général plus faible sur une source pulsée que sur une source continue).

Cependant, dans le cas particulier de l'appareil MUSES un développement instrumental important est en cours (projet Multi-MUSES) qui devrait multiplier les performances de l'appareil par un facteur 70. Ainsi, même sur une source moins « adaptée » que le réacteur Orphée, l'appareil devrait fournir des

performances meilleures que l'appareil actuel. Le programme scientifique développé sur MUSES@Orphée pourrait donc être prolongé sur SONATE.

On pourra souligner que l'opération en mode « temps de vol » du spectromètre MUSES a déjà été démontrée sur Orphée et que l'appareil est « prêt » à être déménagé.

Par ailleurs, comme cela sera décrit plus tard, nous proposons de mettre en œuvre un programme de recherche sur les neutrons très froids autour de l'ensemble cible de SONATE. Les techniques de spin-écho seraient les premières techniques bénéficiaires de ces neutrons froids.

Le maintien de la compétence dans des techniques de spin-écho est aussi très important. A la fois parce que le nouveau spectromètre SAM implémentera une option spin-écho « résonant » et donc il est souhaitable d'avoir une masse critique de compétence. On rappellera que pour le moment seuls 3 centres disposent d'expertise dans le domaine (le LLB, FRM2, et TU Delft). L'ILL bénéficie du support d'un des ingénieurs du LLB pour les développements autour des techniques du spin-écho résonant.

9.4 Détails d'une possible suite instrumentale sur SONATE / PHASE 2&3

9.4.1 Diffusion de neutrons aux petits angles et magnétisme (SANS 2)

Ce deuxième appareil pourrait proposer une option neutrons polarisés ainsi qu'une option spin-écho résonant. Il répondrait aux besoins de la thématique « magnétisme multi-échelle ». En effet, depuis une dizaine d'années, un accent particulier est mis sur l'étude des propriétés magnétiques à l'échelle dite "mésoscopique"²² (de quelques Å à plusieurs centaines de nm). Cette activité importante conduit à un grand nombre de publications de haut niveau et justifie pleinement la mise à disposition d'un appareil dédié à ce type de mesures. Du point de vue instrumental, SANS-2 correspondrait à la réimplantation de l'instrument CRG-ILL SAM, pérennisant ainsi les investissements consentis pour sa construction. SANS-2 permettra des mesures de la structure et des propriétés dynamiques des matériaux magnétiques en conditions extrêmes (champs intenses, hautes pressions, etc.).

Notons également que les environnements échantillons nécessaires à la recherche en matière molle/biophysique (température ambiante, passeur d'échantillons) sont très différents de ceux utilisés pour le magnétisme (cryo-aimant, cellules haute-pression). Le fait de séparer les thématiques abordées par les instruments SANS-1 et SANS-2 est donc très avantageux, car cela permet un gain de temps considérable par rapport à une situation où il faut changer d'environnement échantillon entre chaque expérience.

9.4.2 Diffraction de poudres 3 / appareil haute résolution

Le premier appareil de diffraction de poudre (PRESTO) aura une résolution moyenne et sera adapté aux études de transitions de phases. Il serait souhaitable de construire un appareil proposant une meilleure résolution (équivalent 3T2@Orphée) pour les études de structures.

²² S. Mühlbauer *et al.*, "Magnetic small-angle neutron scattering", [Review of Modern Physics 91, 015004 \(2019\)](#)

9.4.3 Spectroscopie en Temps de vol

Les études réalisées sur spectromètres de neutrons à temps de vol concernent la dynamique et les propriétés de relaxation nucléaire et magnétique en matière condensée, comme par exemple :

- la densité d'états vibrationnelles (dans les cristaux et amorphes),
- la dynamique en matière molle (dans les polymères, protéines, membranes biologiques, gels),
- la diffusion locale et à longue portée (dans les liquides, solutions et systèmes confinés),
- les propriétés des liquides quantiques, les transitions de phase et phénomènes critiques quantiques (dans les monocristaux et les poudres),
- la dynamique de spin dans les supraconducteurs à haute température critique,
- les niveaux de champ cristallin.
- Le Laboratoire Léon Brillouin s'est engagé dans la construction d'un spectromètre de diffusion inélastique de neutrons « *temps de vol* » de type CRG à l'ILL. Les partenaires du projet SHARP sont la DRF du CEA, l'INP du CNRS, et l'ILL. Ce spectromètre sera opérationnel en 2023.

Un appareil de spectroscopie en temps de vol sur SONATE pourrait avoir des performances comparables à celles de LET@ISIS. Le taux de comptage de IN5@ILL est environ 4 fois supérieur à celui de LET. On peut donc estimer qu'un appareil en temps de vol aurait des performances d'un ordre de grandeur inférieures à celles de IN5 et peut-être 2 ordres de grandeur par rapport à CSPEC@ESS. Un tel appareil serait donc peu compétitif pour l'étude de monocristaux en raison de temps de comptages très longs.

Cependant, il est actuellement difficile d'obtenir du temps d'expérience sur ces appareils de spectroscopie dans les domaines de la matière molle, des liquides ou de la biologie. Un appareil qui ne se positionne pas en concurrent des appareils à très hautes performances pourrait avoir une communauté qui apprécie un accès plus facile à un instrument de spectroscopie.

9.4.4 Temps de vol inverse

Une possibilité serait de construire un appareil de temps de vol en géométrie inverse pour réaliser des études de spectroscopie dans le domaine du meV. Il s'agit des thématiques actuellement couvertes par les appareils 3-axes sur les réacteurs.

Cet appareil pourrait prendre comme modèle CAMEA@PSI ou BiFROST@ESS. Cependant il s'agit d'un appareil complexe à construire et difficile à exploiter. Le rapport performances/coût d'un tel appareil sur SONATE devrait être considéré en détails, après le retour d'expérience des performances de CAMEA et BIFROST pour évaluer si cet appareil répondrait à un volume suffisant de demandes.

9.4.5 Instrumentation innovante utilisant les techniques de spin-écho

Si les développements autour des modérateurs très froids s'avéraient fructueux, il serait souhaitable de capitaliser sur l'expertise du laboratoire en développant un ou des appareils innovants utilisant les techniques de spin-écho (SEMSANS, SERGIS, SESAME). C'est une des voies dans lesquelles l'instrumentation neutronique peut encore ouvrir de nouveaux champs d'étude.