

Une source de diffusion
neutronique alternative
en France pour la
prochaine décennie ?

Table des matières

1	Introduction.....	3
2	Les forces de la diffusion neutronique.....	5
2.1	Les propriétés uniques des neutrons	5
2.2	L'importance de la science des matériaux	5
2.3	Les points forts des techniques de diffusion neutronique en science des matériaux	7
2.4	La recherche en lien avec l'industrie	9
3	Définition d'une nouvelle plateforme de diffusion neutronique en France	11
3.1	Distinction entre « capacité » et « performances » « capacity » versus « capability »	11
3.2	Les atouts de la France en diffusion neutronique.....	13
3.3	Quelle offre pour une nouvelle plateforme de diffusion neutronique en France ?	14
3.4	Les sources de neutrons compactes (CANS)	15
3.4.1	Qu'est-ce qu'une source compacte?.....	15
3.4.2	Les CANS à travers le monde et les projets en cours	16
3.4.3	Performances d'une CANS à haute brillance pour la diffusion neutronique	17
3.4.4	Coûts d'investissement et d'opération	19
4	Conclusion	21

1 Introduction

Le paysage de la neutronique Française et Européenne va considérablement évoluer lors des 15 prochaines années. Plusieurs réacteurs de recherche vont arrêter leur opération d'ici une dizaine d'année (Orphée en France, BER2 en Allemagne, REZ en Tchéquie, BRR en Hongrie, Demokritus en Grèce et à terme l'ILL à Grenoble). En parallèle de ces fermetures de réacteurs, une augmentation de la capacité des sources à spallation va avoir lieu avec l'augmentation des capacités de ISIS et la mise en service de ESS (voir figure ci-dessous).

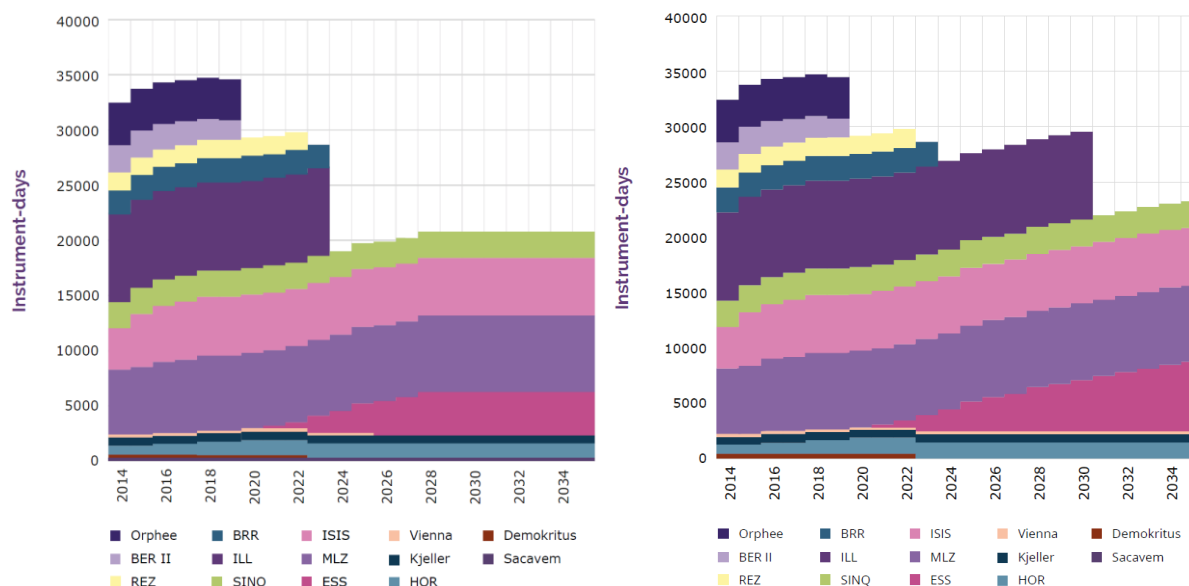


Figure 1: (gauche) Scénario de base ESFRI. Nombre de jours-instruments en Europe dans le scénario pessimiste où l'ILL fonctionne jusqu'en 2023 à pleine puissance et ESS opère 22 instruments au-delà de 2028 (droite) « enhanced » scénario où l'ILL fonctionne jusqu'en 2030 à pleine puissance et ESS opère 35 instruments au-delà de 2028 (adapté de [1]).

La situation au niveau Européen pourrait sembler acceptable car les nouvelles sources telles que ESS proposeront des performances inégalées. Cependant d'un point de vue Français, la situation est beaucoup plus contrastée. La projection du nombre d'instruments.jours pour les utilisateurs Français dans les décennies à venir va poser un problème pour la neutronique française qui représente le plus gros contingent d'utilisateurs (1500 utilisateurs sur les 6000 utilisateurs à l'échelle Européenne).

La figure ci-dessous illustre la projection du nombre de jours pour les utilisateurs Français jusqu'en 2035. Si aucune action n'est engagée, après la fermeture éventuelle de l'ILL, le nombre d'instruments.jours proposés à la communauté française aura chuté de 94% avec uniquement un accès à du temps de faisceau ESS (~300 instruments.jours).

¹ ESFRI Report, *Neutron scattering facilities in Europe, Present status and future perspectives*, 2017. Le scénario de base ESFRI est probablement trop pessimiste pour l'ILL et trop optimiste pour ESS (démarrage probable des opérations avec des utilisateurs en 2025 et nombre de spectromètres limité à 16).

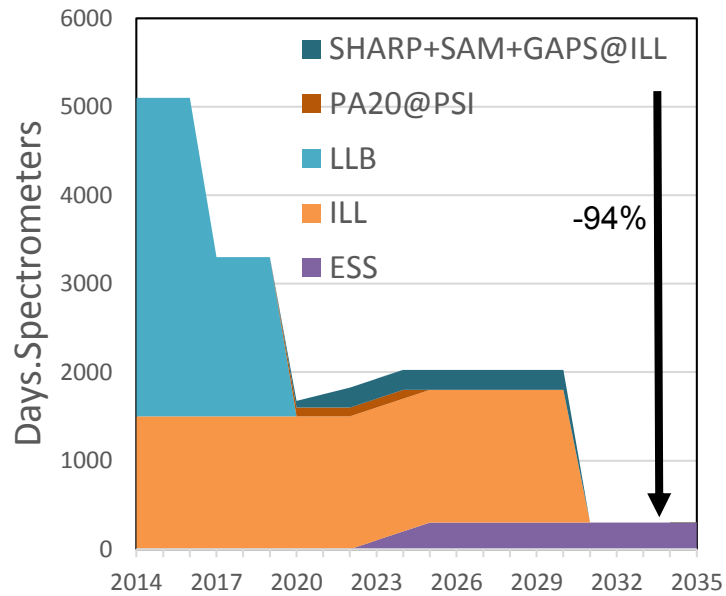


Figure 2: Temps de neutron disponible pour la communauté Française sur la période 2015-2035. Si aucune action n'est entreprise, la communauté de diffusion neutronique perdra 94% de son accès à du temps de faisceau.

Dans un contexte d'une forte évolution de la neutronique Européenne dans les 15 prochaines années, l'objectif de ce document est d'identifier les domaines dans lesquels la diffusion neutronique fournit des services uniques.

Nous souhaitons proposer des solutions qui permettent à la communauté de la diffusion neutronique Française de rester une des plus actives en nombre d'utilisateurs et de garder les capacités d'exploiter au mieux la source de neutrons de 3^{ième} génération ESS.

2 Les forces de la diffusion neutronique

2.1 Les propriétés uniques des neutrons

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 taille de 10^{-10} à 10^{-2} m et à des échelles de temps allant de 10^{-12} à 1s.

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 de dommage 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 »

2.2 L'importance de la science des matériaux

Les propriétés uniques des neutrons comme sonde de la matière coïncident particulièrement bien avec des problèmes scientifiques et sociétaux tels que l'énergie, le transport, les technologies de l'information ainsi que l'environnement et le bien-être. La figure ci-dessous illustre les demandes en temps de faisceau en fonction de différents défis sociétaux.

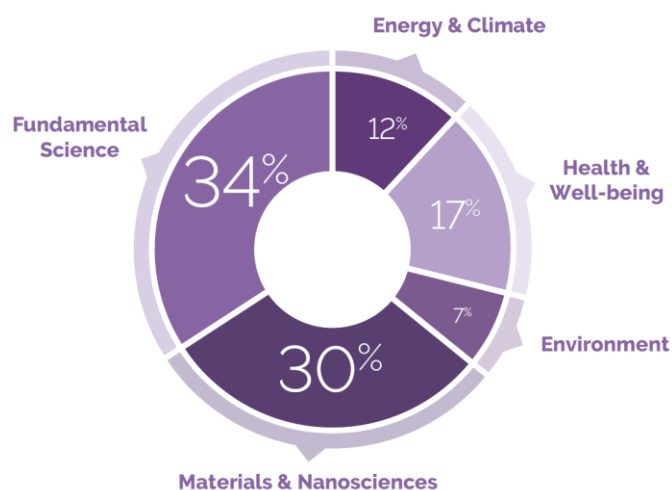


Figure 3: Utilisation du temps de faisceau en fonction des grands défis sociétaux. (moyenne sur l'ILL, le LLB et ISIS, adapté de [2]).

² ILL Associates, Strategy for Neutrons, 2013

http://www.ill.eu/fileadmin/users_files/documents/news_and_events/news/2013/20130704-Report-ILL-Associates-including-scientific-case.pdf

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.

2.3 Les points forts des techniques de diffusion neutronique en science des matériaux

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

Structures à grande échelle	
SANS	<p>Applications: nano-objets en volume (size 2-600nm)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Caractérisation du nombre, de la taille, de la forme de nano-objets (sphères – coquilles – bâtons - lamelles) - Corrélations / interactions entre nano-objets - Conformation de polymères et de protéines - Surface spécifique <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Colloïdes – micelles (Procter & Gamble) - Solutions et fondus de polymères - Suspensions de nano-particules (fonctionnalisées) - Particules magnétiques - Composites polymères - Composites métalliques - Matériaux poreux <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contraste isotopique (H/D) - Mesures de systèmes en volume - Mesures de systèmes opaques à la lumière - Contraste magnétique
Reflectivity	<p>Applications: thin films (2-100nm)</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition, épaisseur, rugosité <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - films de polymères - films minces de protéines - couches minces magnétiques <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contraste isotopique (H/D) - Contraste magnétique - Interfaces solide-liquide
Radiographie	<p>Application : radio-tomographie d'échantillons volumiques</p> <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - composants pyrotechniques - matériaux poreux (roches – produits agroalimentaires – sols) - piles à combustible - 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 de poudres et monocristaux	<p>Applications: structure cristallographique et magnétiques des matériaux</p> <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - batteries - stockage de l'hydrogène - hydrates de gaz - matériaux magneto-caloriques et thermo-électriques - protéines hydratées - matériaux magnétiques et supra-conducteur <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - sensibilité à l'hydrogène - sensibilité magnétique - in-situ / operando
Textures / contraintes	<p>Application : détermination de textures et contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> - textures métallurgiques - cartographies de champs de contraintes <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - texture – stored energy - alliages métalliques - composites (metal – oxides or metal – nitrures) <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - mesures en volume (pièces industrielles) - tenseur de contrainte en 3D
Spectroscopie	
Temps de vol	<p>Applications: dynamiques de diffusion</p> <ul style="list-style-type: none"> - diffusion dynamics of H or hydrocarbons in porous media or liquids <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - batteries - hydrates de gaz - thermos-électriques <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - sensibility à l'hydrogène - excellente résolution en énergie (meV - μeV)
Diffusion Inélastique (trois-axes ou temps de vol)	<p>Applications: excitations de la matière</p> <ul style="list-style-type: none"> - caractérisation des excitations d'énergie de 0.1-10meV <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériaux magnétiques, magnétocaloriques, multiferroïques - Matériaux thermoélectriques - Matériaux supraconducteurs <p>Force</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au magnétisme - Dispersion des excitations à basse énergie

2.4 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 est souvent cachée, c'est un chiffre minimum. Environ ~ 10% des propositions ont un lien direct avec l'industrie ou un lien proche (TRL >= 4 par exemple)³.

Au LLB, une étude conduite sur la période 2012-2014⁴ suggère qu'une fraction de 11% du temps de faisceau demandé est lié à 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@München 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.

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 M€30 par an en Europe et environ 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€/day. Cela représente un revenu annuel de M€4 en Europe. Dans le cas du LLB, ces revenus sont de l'ordre de 1M€/an (90% de ces revenus venant du contrôle qualité d'éléments pyrotechniques).

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

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 :

³ C. Boudou, Private communication

⁴ unpublished

Matière molle - chimie	Matériaux pour les nouvelles technologies de l'énergie (NTE)
peinture, pneumatique, polymères, détergents, savons, couches minces, mousses, composites, protéine, agroalimentaire	batteries au Li, nouveaux matériaux pour les batteries, clathrates, cellules photovoltaïques, stockage de l'hydrogène, PAC)
Michelin, Solvay, L'Oréal, Essilor, Nestlé, Bel	TOTAL, Bolloré, Umicore...
<p><u>Poids des acteurs</u> Chimie 282 G€ de R&D (2016) En France, en 2017 : 266 k employés en « Fabrication de produits en caoutchouc et en plastique ainsi que d'autres produits minéraux non métalliques »</p> <p>Michelin : 0.7G€ de R&D (6600 salariés en R&D) L'Oréal : 0.85G€ de R&D</p> <p>Chiffre d'affaires industriel du secteur global de la matière molle : peintures, pneumatiques, polymères</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pneumatique : CA 180 G€/an (Michelin 21G€/an) - Peinture : CA 110 G€/an - Cosmétique : CA 195 G€/an (France 12G€/an) <p>Le nombre de chercheurs se déduit avec le ratio de 1 chercheur/110 k€ de dépense R&D</p>	<p><u>Poids des acteurs</u> Pas de chiffres « officiel » Etude sur "advanced materials and devices used in renewable energy systems" : 30G€ (2016) (monde)</p> <p>Umicore: 1.7G€ (16000 ETP en R&D)</p> <p>Chiffre d'affaires industriel et le nombre d'ETP du secteur global des matériaux pour les NTE ?</p> <p>Chiffre d'affaires et le nombre d'ETP de la recherche industrielle dans ce secteur ?</p>

3 Définition d'une nouvelle plateforme de diffusion neutronique en France

3.1 Distinction entre « capacité » et « performances » « capacity » versus « capability »

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

En parallèle de ces nouvelles activités, la plus 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. 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 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, évolution de produits agro-alimentaires, 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 mieux que les instruments de l'ILL, 50-100 fois mieux que les instruments d'Orphée), 300 jours-instruments sur ESS peuvent remplacer 3000-6000 instruments.jours sur l'ILL n'est pas recevable.

Cet argument est 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%

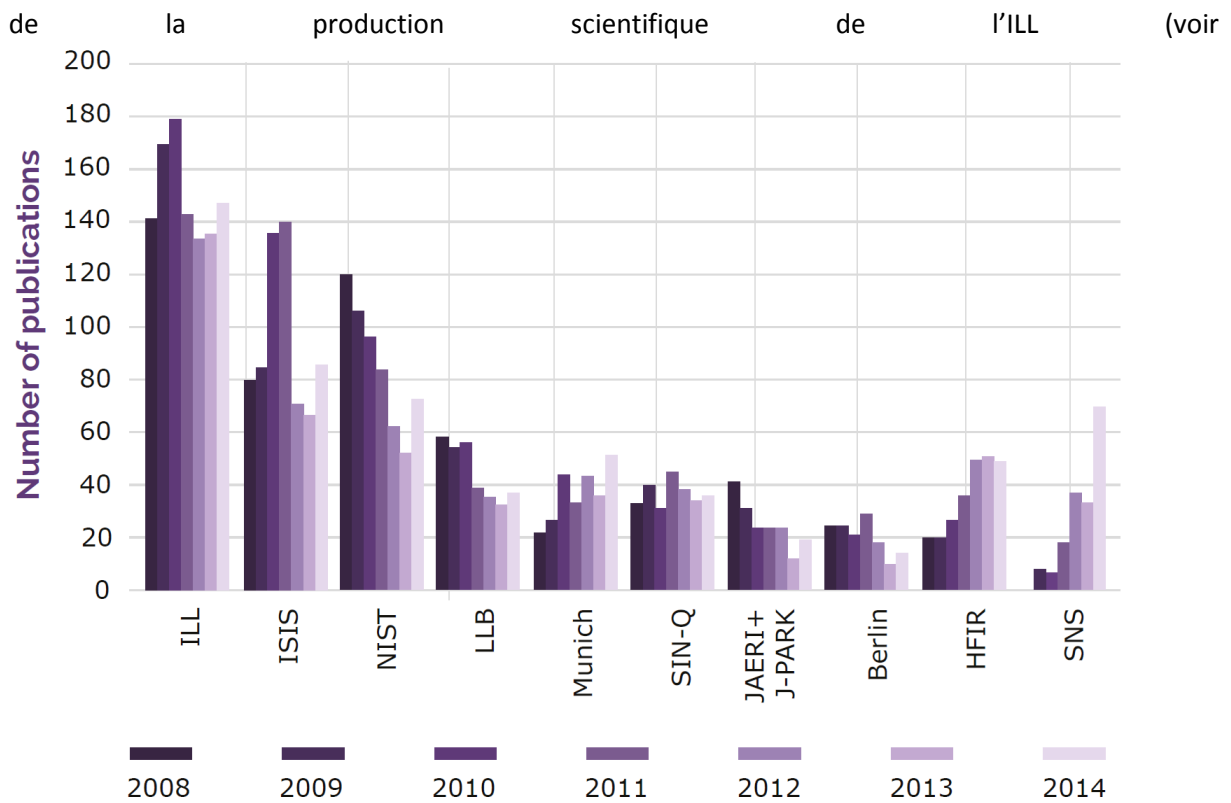


Figure 4) alors que l'ILL fournit 9 fois plus d'[instruments-jours]. Dans le cas de SINQ@PSI, la production scientifique représente 25% de celle de l'ILL alors que l'ILL fournit 20 fois plus d'[instruments-jours]. Cela montre que la production scientifique n'est pas proportionnelle au flux de neutron brut 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

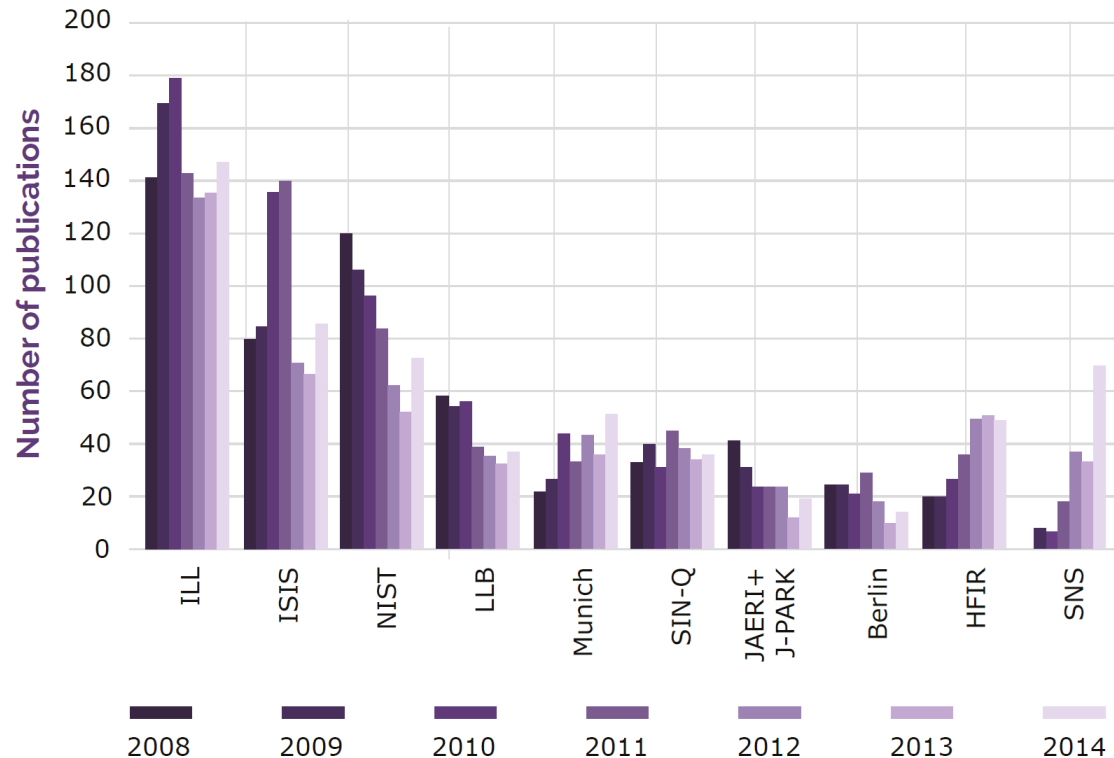
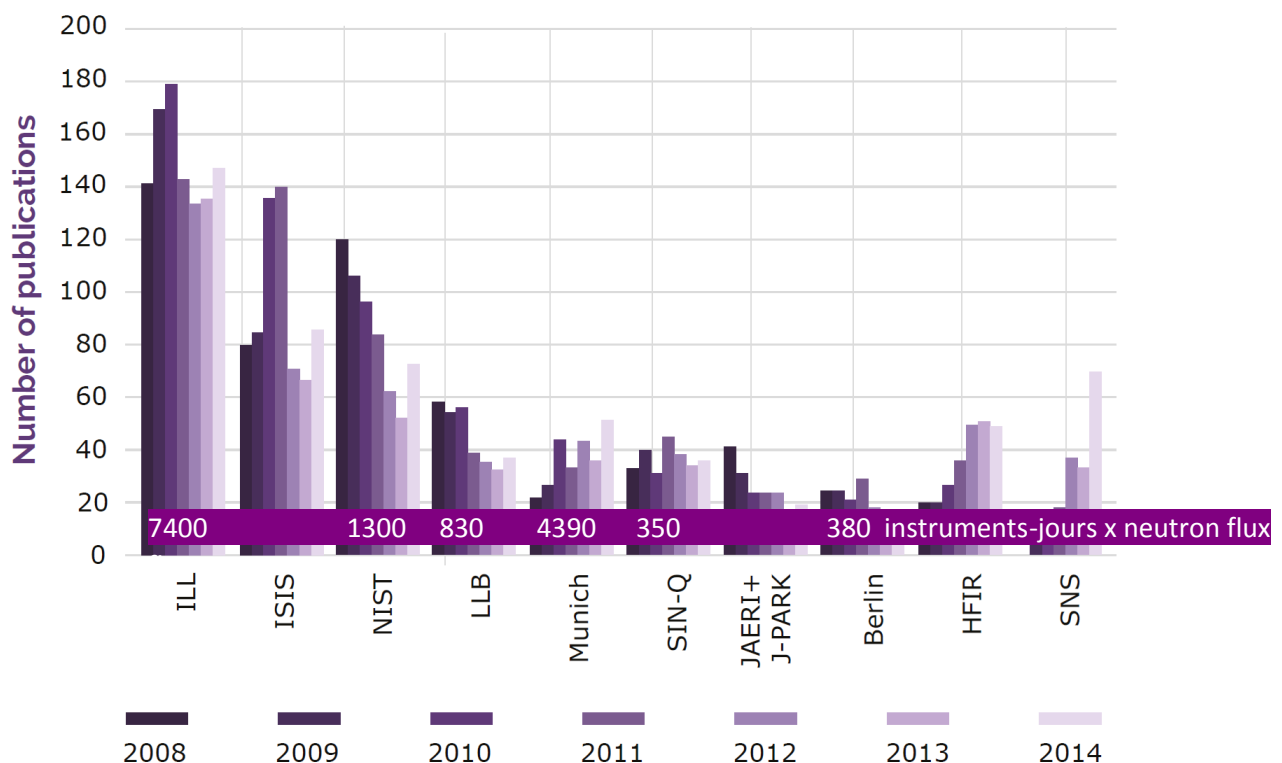


Figure 4 ont bénéficié de mesures sur plusieurs sources (source nationale + ILL). De fait, les statistiques sur plusieurs sources montrent qu'en moyenne une publication nécessite 2 runs expérimentaux⁵. Cette observation supporte plutôt le fait que les installations les plus performantes (l'ILL en Europe) 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 gens réalisant des expériences de diffraction en laboratoire et que les lasers à électron libres bénéficient de la vaste communauté des gens réalisant des expériences synchrotron, ESS aura besoin de l'apport d'une vaste communauté neutron pour révéler son plein potentiel.

Une description détaillée de cet effet de levier peut être trouvée dans ⁶ : “[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.” Il est estimé que ESS fonctionnant seule en Europe aurait une productivité de 0.7 comparé à la situation actuelle (productivité de 1). ESS supportée par un écosystème de sources nationales aurait une productivité de 3 comparé à la situation actuelle.

Des conclusions similaires ont été faites aux USA⁷. 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.”



⁵ unpublished

⁶ Report from the ILL Associates' Working group on *Neutrons in Europe for 2025*.

⁷ 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 4: Nombre de papiers publiés dans des journaux à fort impact pour différentes sources à travers le monde. [adapté de l'ILL: Christian Vettier, Helmut Schober & Bill Stirling]⁸. Les valeurs en [instruments-jours x flux neutronique] sont données pour les différentes sources continues⁹.

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'instruments 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 en 2018).
- 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.

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

⁸ ESFRI Report, *Neutron scattering facilities in Europe, Present status and future perspectives*.

⁹ 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.

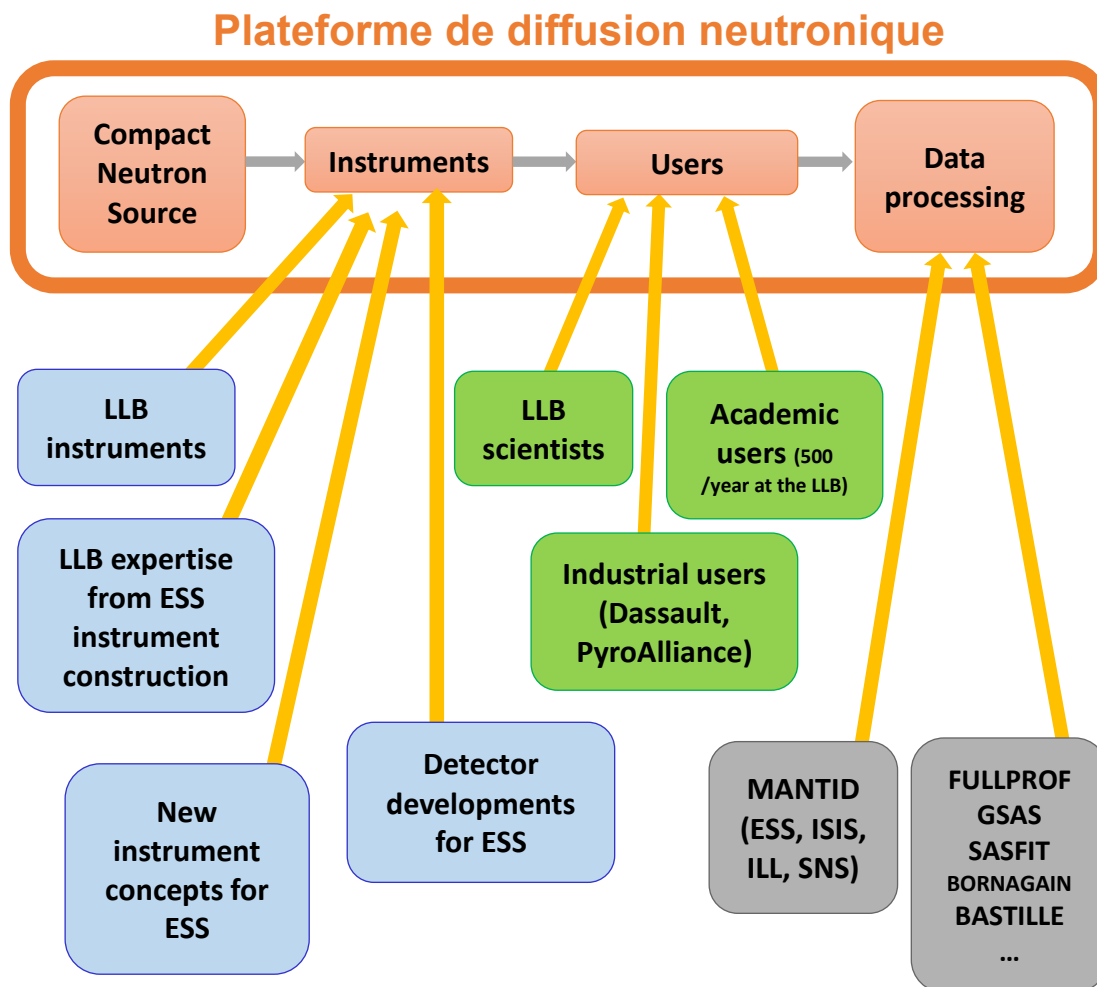


Figure 5: Une nouvelle plateforme de diffusion neutronique pourrait bénéficier d'un excellent écosystème déjà existant.

3.3 Quelle offre pour une nouvelle plateforme de diffusion neutronique en France ?

Comme cela a été dit auparavant, ESS fournira des faisceaux de neutrons ayant des brillances inégalées mais il existe un énorme corpus d'expériences qui ne nécessite pas ces flux extrêmes.

Une nouvelle plateforme de diffusion neutronique pourrait offrir de nouveaux types de services autour de la diffusion neutronique différents de ce qui est actuellement proposé par les très grandes installations existantes. Une demande récurrente des utilisateurs semble être une offre plus « flexible » de services. 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.

Une nouvelle plateforme de diffusion neutronique devrait avoir les caractéristiques suivantes :

- Proposer des instruments de base (avec des performances équivalentes aux instruments actuels disponibles autour du réacteur Orphée).

- 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.
- Ces techniques sont très génériques et ne deviendront pas obsolètes, quelles que soient les évolutions des sujets scientifiques au fil des prochaines décennies
- Une **fraction significative** du temps de mesure pourrait être proposée « au fil de l'eau » de telle sorte que les caractérisations neutroniques en science des matériaux puissent être réalisées en parallèle des autres caractérisations
 - Ce mode de fonctionnement suppose d'accepter un « droit à l'erreur »
 - 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
 - La possibilité de fournir un faisceau de sortie à un laboratoire tiers
 - Cette possibilité est particulièrement intéressante pour les thématiques scientifiques dont la durée de vie est de l'ordre de la décennie
- Permettre des développements instrumentaux originaux
 - Dans le futur il sera impossible de réaliser des développements instrumentaux originaux autour de ESS en raison des coûts et des contraintes liés à cette source
- Faire un effort spécifique sur les possibilités de formation
 - Rendre la source facile d'accès (ce qui n'est pas le cas des réacteurs)
 - Offrir la possibilité de mettre en place des instruments de tests 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.

3.4 Les sources de neutrons compactes (CANS)

3.4.1 Qu'est-ce qu'une source compacte?

Une source compacte basée sur un accélérateur est constituée des éléments suivants

- Une source de protons ou de deutons produisant un faisceau de particules à des énergies de l'ordre de 100keV avec une intensité crête de 100mA
- Un étage radiofréquence (RFQ) dont le rôle est de mettre en forme le faisceau et de l'accélérer à des énergies de l'ordre de quelques MeV

- Des étages d'accélération supplémentaires permettant d'augmenter l'énergie des ions jusqu'à quelques dizaines de MeV
- Une cible faite d'un matériau produisant des neutrons lorsqu'il est irradié par des protons
- A target made of a material generating neutrons when interacting with protons
- Un modérateur et un réflecteur dont le rôle est de ralentir les neutrons aux énergies thermiques (typ. 2 à 100 meV)
- Des lignes de faisceaux de neutrons pour alimenter les spectromètres

Le principe est similaire aux sources à spallation excepté le fait qu'au lieu de travailler à des énergies de l'ordre de 1GeV, une source compacte opère à des énergies de l'ordre de quelques dizaines de MeV. La production primaire de neutrons est évidemment plus faible mais la plus faible énergie permet de concevoir un ensemble cible – modérateur très compact (~ 1 litre) qui permet d'augmenter la brillance des faisceaux de neutrons. On rappellera que dans un réacteur, la production des neutrons est certes colossale (10^{18} n/s) mais le volume de modération est de l'ordre de 1000 litres.

Toute la philosophie d'une source de neutron compacte est de « produire ce dont on a besoin ».

3.4.2 Les CANS à travers le monde et les projets en cours

Les sources de neutrons à base d'accélérateur existent depuis des décennies mais elles utilisaient la photo-fission pour produire des neutrons à partir de faisceau d'électrons. Ceci est dû historiquement au fait que les accélérateurs d'électrons sont significativement plus faciles à construire que les accélérateurs de protons. Une installation à Harwell a utilisé un électron linac pour produire des neutrons en utilisant une cible d'uranium et des expériences de diffusion neutronique ont été réalisées¹⁰. Les installations HUNS au Japon et le LINAC de Bariloche en Argentine ont démarré leurs activités pendant les années 1970 et sont encore fonctionnelles. Ces installations se sont essentiellement focalisées sur des expériences de physique nucléaire.

Pendant les 20 dernières années, des progrès significatifs ont été réalisés dans le domaine des accélérateurs avec des courants de particules pouvant atteindre 100mA. Cela a conduit à un intérêt autour de la construction de nouvelles sources de neutrons utilisant ces accélérateurs à haute intensité. En 2009, la UCANS Union for Compact Accelerator Neutron Source a été créée (<http://www.ucans.org/>).

Plusieurs nouvelles sources compactes ont été construites ou sont en projet à travers le monde.

Au Japon, HUNS utilisant la photo-fission est en fonctionnement depuis 40 ans. RANS@Rikken et KUANS@Kyoto University opèrent à 350 and 700 W. Les installations iBCNT (Ibaraki prefecture) et NUANS (Nagoya University) sont en phase de finalisation et visent une opération à des puissances de l'ordre de 50kW. D'autres projets sont en cours (QUANS, THUANS, UTYANS, OUANS).

La source SARAF source est un projet ambitieux de CANS qui remplacera le réacteur SOREQ en Israël. Ses paramètres sont: $E_p = 40$ MeV, $I_{av} = 5$ mA CW, $P = 200$ kW.

En Chine, CPHS@Beijing produit des neutrons et va être upgradée à 13MeV / 16kW. PKUNIFTY (Peking University) ($E_p = 2$ MeV; 1kW) réalise des expériences de radiographie neutronique.

Aux USA, la source LENS est en opération depuis 2008 et SNS a construit une CANS pour ses développements autour des modérateurs pour leur seconde target station

¹⁰R.N. Sinclair et al, NIM **117** (1974) 445-454

En Europe, plusieurs instituts considèrent la possibilité d'utiliser les dernières avancées dans le domaine des accélérateurs pour construire des CANS à haute brillance. Parmi les projets, on peut citer :

- *Le design ESS-Bilbao (Espagne)*
ESS-Bilbao a fait une étude détaillée d'une installation basée sur un accélérateur de 50MeV et une énergie sur la cible de 115kW. Une cible tournante (type ESS) serait utilisée.
- *Le design HBS (Allemagne)*
Le Jülich Center for Neutron Scattering a considéré une source à haute brillance fonctionnant à $E_p = 50\text{MeV}$, $I_{\text{peak}} = 100\text{mA}$, $P = 100\text{kW}$, fixed Be target.
- *Le design NOVA-ERA (Allemagne)*
Le JCNS est actuellement dans une phase de développement d'une source de laboratoire NOVA-ERA, Neutrons Obtained Via Accelerator for Education and Research Activities. Les paramètres sont $E_p = 10\text{MeV}$, $I_{\text{peak}} = 1\text{mA}$, $P = 1\text{kW}$, Be target, duty cycle 4-10%. Une telle source peut-être construite avec des composants "du commerce". Cette source sera partagée entre diffusion des ions et diffusion neutronique (5 + 5 instruments).
- *Le design SONATE (France)*
Le CEA a considéré un design de référence avec les paramètres $E_p = 20\text{MeV}$, $I_{\text{peak}} = 100\text{mA}$, duty cycle = 4%, $P = 80\text{kW}$, fixed Be target. Ces paramètres ont été choisis parce qu'ils correspondent aux 20 premiers mètres de ESS. Les composants nécessaires (Source, RFQ and DTL) ne nécessitent plus de R&D.
- *La source LENOS@Legnaro (Italie)*
The LNL Laboratori Nazionali di Legnaro est en phase de commissioning de l'installation LENOS (LEgnaro NeutrOn Source facility). Ses paramètres sont $E_p = 70\text{ MeV}$, $I_{\text{av}} = 750\text{ }\mu\text{A}$, Lithium target. L'installation sera essentiellement orientée vers la physique nucléaire
- *Le design LvB (Hongrie)*
Le KFKI a commencé la construction d'une CANS à faible énergie (LvB Ludwig van Beethoven) ($E_p = 3\text{MeV}$).

3.4.3 Performances d'une CANS à haute brillance pour la diffusion neutronique

Nous avons considéré le design de référence SONATE (20MeV, $I_{\text{peak}} = 100\text{mA}$) qui est relativement conservateur technique. Les simulations Monte-Carlo de modérateurs modèles ont été réalisées par le Département de Physique Nucléaire du CEA/IRFU et en parallèle à l'Université d'Aachen. Les résultats des brillances neutroniques ont été ensuite utilisés pour réaliser des simulations McStas de différents appareils de diffusion neutronique. Une description détaillée des calculs est disponible à [11-12].

Le flux de neutrons au niveau de l'échantillon pour différentes techniques de diffusion neutronique est résumé dans la table ci-dessous et est comparé au flux sur des instruments de référence sur des sources telles qu'Orphée ou ISIS. Les valeurs pour les instruments de diffusion inélastique (Temps de vol direct et Temps de vol inverse) ont été fournies par Jörg Voigt du JCNS.

¹¹ X. Fabrèges et al, *Performances of Neutron Scattering Spectrometers on a Compact Neutron Source*, <https://arxiv.org/abs/1612.00232v2>

¹² J. Voigt et al, NIM A 884 (2018) 59–63. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.085>

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 concept x10 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	Slit setup x10 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 x5 Coded Source Imaging x10
Imaging (time resolved)	1×10^5 n/s/cm ² (for L/D = 500) d/l = 1%	ANTARES@FRM2 5×10^5 n/s/cm ²	
Direct TOF	3×10^4 n/s/cm ² (thermal) 1.8×10^5 n/s/cm ² (cold)	IN5@ILL 6.8×10^5 n/cm ² /s	MUSHROOM (LETx70 on single crystals)
Inverse TOF	1×10^7 n/cm ² /s	OSIRIS@ISIS 2.7×10^7 n/cm ² /s	
Spin-Echo	2×10^6 n/s/cm ²	MUSES@LLB 2×10^7 n/s/cm ² (at 5A°)	Multi-MUSES (x70)

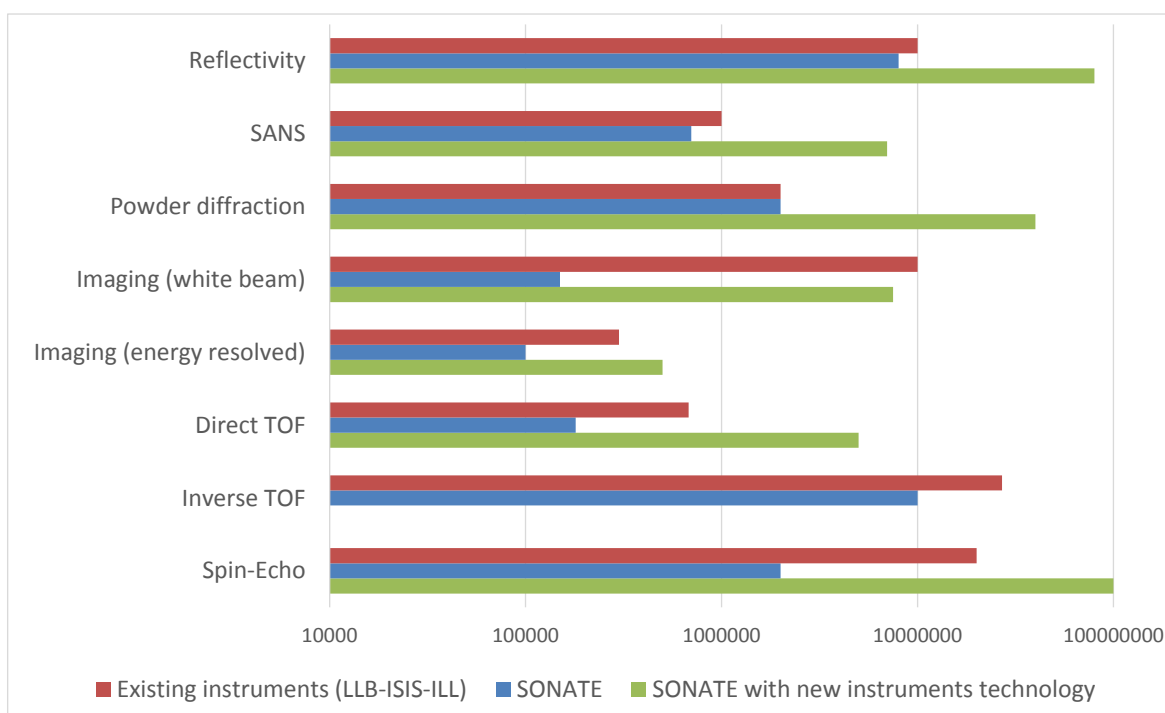


Figure 6: Comparaison des performances de différentes techniques de diffusion neutronique en terme de flux au niveau de l'échantillon (n/cm²/s). (rouge) instruments de référence sur différentes installations (LLB – ISIS – ILL) ; (bleu) déplacement des instruments existants de Orphée vers SONATE ; (vert) performances après différents upgrades. Les chiffres pour les instruments en temps de vol (TOF) ont été fournis par Jörg Voigt du JCNS.

Ces simulations reposent sur les calculs Monte-Carlo d'un modérateur modèle simple. Des pertes de performances sont attendues lors de la phase d'ingénierie (20-30%) mais elles devraient pouvoir être compensée par une optimisation de la géométrie des modérateurs. L'optimisation de la géométrie du modérateur de ESS a par exemple conduit à des gains d'un facteur 3 en flux entre le TDR de 2012 et la version finale du modérateur.

La conclusion qui peut être tirée de ces simulations est qu’une source compacte à haute brillance devrait permettre d’obtenir des performances équivalentes à celles des réacteurs de recherche actuels (e.g. Orphée) ou des sources à spallation de faible puissance (e.g. ISIS, PSI).

3.4.4 Coûts d’investissement et d’opération

3.4.4.1 Coûts sur les installations de diffusion neutroniques existantes

Les chiffres cités dans cette section sont issus du rapport ESFRI “Neutron scattering facilities in Europe, Present status and future perspectives (2017)”.

Facility	ILL	ISIS	MLZ	SINQ	ESS	LLB
First Neutrons	1971	1994	2004	1998	2023	1981
Replacement value (M€)	2000	800	600	750	1847	400
Operating costs (M€)	95	62	55	30	140	30
Instrument-day (k€)	11.9	16.7	9.2	12.5	35.3	7.9
Operation cost / replacement value	4.75%	7.75%	9.2%	4%	7.6%	6.7%

(*) The cost per instrument-day is defined as the operational costs / instrument.days. The capital investment is not included.

3.4.4.2 Coût des installations CANS existantes

Il est difficile d’estimer les coûts des CANS étant donné que très peu d’installations ont été construites. De plus, plusieurs de ces installations ont utilisé des infrastructures existantes pour minimiser les coûts et aucune de ces installations ne fonctionne en mode « user facility ».

L’installation CPHS à in Beijing a été construite à partir de zéro et a des ambitions assez élevées ($E_p = 13\text{MeV}$; 16kW). Les coûts annoncés sont de l’ordre de 13M€ . On soulignera évidemment que la situation en Chine est difficilement comparable avec la situation en Europe en particulier en termes de coûts de main-d’œuvre.

La source LENS aux USA a bénéficié d’infrastructures existantes (bâtiment + accélérateur) de telle sorte que le coût total ne peut pas être estimé de manière fiable. Les coûts d’opération affichés (subvention au fonctionnement) sont cependant très bas ($200\text{k\$}$, sans la main d’œuvre).

Le coût d’une installation de “classe LENS” (13MeV , 30kW) a été évalué à $\text{M\$}20$ (D. Baxter, IAEA Report¹³) (hors instrumentation neutronique).

3.4.4.3 Coût d’une source à haute brillance

Le coût d’investissement pour une source à haute brillance avec une puissance de 100 kW et une énergie des protons dans la gamme $20\text{-}30\text{ MeV}$ a été estimé à $50\text{M\$}$ (IAEA Report¹).

¹³ IAEA-TECDOC-1439, *Development opportunities for small and medium scale accelerator driven neutron sources (Vienna, 2004)*

Des accélérateurs commerciaux sont en principe disponibles mais aucun de ces accélérateurs à haute puissance n'est en fonctionnement de routine.

L'estimation de 50M\$ doit être considérée comme un ordre de grandeur avec la réserve qu'aucune installation de ce type n'a encore été construite dans le monde.

Autour de la source il est nécessaire de construire une suite instrumentale. L'investissement peut être estimé à 3M€ par instrument (sur la base des derniers nouveaux instruments construits au LLB). Une suite de 10 instruments modernes peut-être estimée à 30M€.

Si on fait l'hypothèse de coûts d'opération similaires aux sources actuelles (7% de l'investissement, voir table ci-dessus), les coûts d'opérations annuels peuvent être estimés à 5M€ pour une installation employant 50 personnes et opérant 10 spectromètres.

Sur la base d'un fonctionnement de 180 jours/an (base Orphée) c'est-à-dire la fourniture de 1800 [instruments.jours], le coût d'un jour de neutron serait de k€2.5 ce qui est significativement plus faible que sur les autres sources actuelles.

Facility	ILL	ISIS	MLZ	SINQ	ESS	LLB	CANS
First Neutrons	1971	1994	2004	1998	2023	1981	2025-2030
Replacement value (M€)	2000	800	600	750	1847	400	80
Operating costs (M€)	95	62	55	30	140	30	5
Instrument-day (k€)	11.9	16.7	9.2	12.5	35.3	7.9	2.5
Operation cost / replacement value	4.75%	7.75%	9.2%	4%	7.6%	6.7%	7%

Coûts des services sur les autres plateformes de caractérisation des matériaux

La diffusion neutronique a traditionnellement été vue comme une technique exotique en particulier par rapport aux rayons X en raison de sa faible diffusion et de son accès difficile. Dans le cas d'une CANS il est intéressant de comparer les coûts avec d'autres plateformes de caractérisation. Le « vrai » coût des autres plateformes de caractérisation peut-être estimé via le coût facturé aux industriels sur ces plateformes.

Centre de Micro-caractérisation Raimond Castaing (<http://ccarcastaing.cnrs.fr/spip.php?article139>)

MEB-FEG	€500	½ journée
Cold-FEG	€1946	½ journée

IRCELYON Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon

Tarifs des prestations des services scientifiques

<i>RMN solide</i>	€1400/jour
<i>Microscopie électronique</i>	€1600/jour
<i>Spectrométrie RAMAN</i>	€1200/jour
<i>Diffraction RX</i>	€1200/jour
<i>Analyse XPS-LEISS</i>	€2000/jour

A €2500, le coût d'opération d'une plateforme de diffusion neutronique devient comparable aux coûts d'opération des autres plateformes.

4 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 quart 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 opportunités. Les sources compactes sont une approche nouvelle prometteuse pour la diffusion neutronique.