



Neutrons for
Materials Sciences

UNE NOUVELLE SOURCE DE DIFFUSION NEUTRONIQUE FRANÇAISE

Ce document a été rédigé à la demande du CEA et du CNRS dans le cadre d'une mission de rédaction d'un avant-projet sommaire pour une source de neutrons alternative en France.

Éditeurs :

Frédéric Ott et Marie Plazanet

Contributeurs :

Burkhard Annighöfer, Arnaud Desmedt, Olivier Diat, Patrick Judenstein, Pascale Launois, Stéphane Longeville, Sandrine Lyonnard, Alain Menelle, Denis Morineau, Julian Oberdisse, Stéphane Pailhès, Sylvain Petit, Jérôme Schwindling, Loïc Thulliez.

Nous remercions Marie-Hélène Mathon (CEA/DRF) et Sylvain Ravy (CNRS/INP) pour leur implication et leur relecture attentive du document.

Les travaux préliminaire de R&D présentés dans ce document ont été soutenus par les organismes suivants :



Glossaire	8
Résumé	9
Diffusion neutronique : enjeux et objectifs scientifiques	9
Paysage et modèle actuel	11
Les HiCANS : une opportunité pour réinventer la production des neutrons	13
1 Motivations scientifiques	17
1.1 La place unique des neutrons dans la caractérisation de la matière	18
1.2 Contribution des neutrons aux défis sociétaux actuels	19
1.2.1 Énergie	20
1.2.2 Technologies de l'information	27
1.2.3 Climat et environnement	28
1.2.4 Transports	30
1.2.5 Santé & Bien-être	32
1.3 Neutrons pour la recherche fondamentale	36
1.3.1 Magnétisme et supraconductivité	36
1.3.2 Chimie et matériaux	39
1.3.3 Polymères – liquides complexes	40
1.3.4 Biophysique et systèmes biologiques	41
1.3.5 Physique des particules	43
1.3.6 Physique nucléaire	44
1.4 Applications industrielles des techniques neutroniques	45
1.5 Diffusion neutronique et autres techniques d'analyses	46
1.5.1 Avantage (et inconvénients) des techniques de diffusion neutronique	46
1.5.2 Rayons X et neutrons	50
1.5.3 Neutrons et microscopie électronique	51
1.5.4 Optique et neutrons	52
1.5.5 RMN et neutrons	53
1.5.6 Modélisation et neutrons	54
1.5.7 Conclusion	55
2 Panorama de la diffusion neutronique en France et en Europe	59
2.1 Les sources dédiées à la diffusion neutronique en Europe	59
2.2 Le cas de la France	62
2.3 Coopérations et positionnement international	62
2.3.1 LENS, League of Advanced European Neutron Sources	62
2.3.2 ELENA, European Low Energy accelerator-based Neutron facilities Association	62
2.3.3 Les HiCANS dans le paysage européen	64
3.1 La production scientifique en Europe et en France	67
3 Qui sont les utilisateurs des techniques neutroniques ?	67
3.2 Les différentes communautés, GDR et fédérations	69
3.3 Les laboratoires académiques	72

3.4 Les utilisateurs industriels	74
3.4.1 Examens systématiques d'assurance qualité	74
3.4.2 Problèmes ponctuels ad-hoc	74
3.4.3 Recherche et développement conjoints	75
3.4.4 Quantification de la recherche en lien avec l'industrie	75
4 ICONE : proposition de construction d'une nouvelle source de diffusion neutronique en France	79
4.1 Quelles seraient les missions d'une nouvelle source de neutrons française ?	80
4.1.1 Réinventer l'accès aux techniques de diffusion neutronique	80
4.1.2 Offrir une capacité expérimentale suffisante aux besoins français	82
4.2 Complémentarité entre ICONE et ESS	84
5.1 La production des neutrons	85
5 Proposition de concept technique pour ICONE, une nouvelle source de neutrons française	85
5.2 Introduction du concept de HiCANS	86
5.3 Définition des paramètres d'une machine pour une source de diffusion neutronique performante	88
5.4 Avantages et limitations des CANS et des HiCANS	91
5.5 Performances potentielles des HiCANS pour les techniques de diffusion neutronique.	92
5.6 Proposition de spécifications pour ICONE / Design de référence	95
6 Les éléments technologiques nécessaires à la construction d'une HiCANS	99
6.1 Système d'accélération de protons	100
6.2 Cible pour la production des neutrons	105
6.2.1 Choix du matériau cible	106
6.2.2 État de l'art	107
6.3 Ensemble modérateur-réflecteur	109
6.4 Réflecteur	113
6.5 Blindage	113
7 Instrumentation de diffusion neutronique et autres méthodes analytiques	115
7.1 Principes guidant le choix des instruments sur une HiCANS	117
7.2 Diffraction	118
7.2.1 Les avantages du temps de vol pour les techniques de diffraction	121
7.2.2 Diffractomètre de poudre et monocristaux thermique à haut flux	121
7.2.3 Diffractomètre de poudre à haute résolution	123
7.3 Diffusion aux petits angles et réflectométrie	124
7.3.1 Réflectométrie	124
7.3.2 Diffusion aux petits angles (SANS)	125
7.4 Spectroscopie	127
7.5 Imagerie - tomographie	132
7.5.1 Radio-tomographie à neutrons froids	133
7.5.2 Radio-tomographie à neutrons thermiques	133
7.6 Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA)	134
7.7 Nouvelles possibilités liées à l'utilisation de neutrons très froids	134
7.8 Projections des performances des différents instruments sur ICONE	135
7.9 Proposition de suite instrumentale pour ICONE	137

8 Infrastructure, opération et sécurité	139
8.1 Opération de l'installation	139
8.2 Sécurité radiologique	140
8.3 Gestion des déchets	140
8.4 Classement de l'installation dans le cadre de la réglementation française	141
9 Investissements, coûts, calendrier, mise en service et démantèlement	143
9.1 Coûts d'investissement	143
9.1.1 L'accélérateur de protons	143
9.1.2 L'ensemble cible-modérateur-rélecteur (CMR)	143
9.1.3 Suite instrumentale	144
9.1.4 Bâtiment	145
9.2 Coûts d'opération	147
9.3 Coûts de démantèlement	148
9.4 Estimation des coûts de construction de ICONÉ	148
9.5 Calendrier de construction	150
Conclusions et recommandations	151
Références	153
Reviews	153
Projets	153
Références techniques	154
Autres liens	154
Annexes	155
1- État de l'art sur les CANS dans le monde	159
2- Comparaison des performances de différents instruments de diffusion neutronique sur une source impulsionnelle et sur une source continue	169
3- Choix des paramètres de fonctionnement d'une HiCANS	173
4- Développements techniques en cours pour lever les verrous technologiques des HiCANS	179
5- Propositions de designs d'instrument de diffusion neutronique pour la source ICONÉ	185
6- Infrastructure	191
7- Évaluation des risques liés à la production de neutrons et de radioéléments lors de l'opération de la source ICONÉ	195
8- Laboratoire Français utilisateurs de techniques neutronique sur les dernières années	203

Glossaire

ANR	Agence Nationale de la Recherche
BNC	Budapest Neutron Center
CANS	Compact Advanced Neutron Source
CIFRE	Conventions industrielles de formation par la recherche
CSNS	Chinese Spallation Neutron Source
CMR	Cible – Modérateur – Réflecteur
DNPA	Diffusion de Neutrons aux Petits Angles
DTL	Drift Tube Linac
ELENA	European Low Energy accelerator-based Neutron facilities Association
ESS	European Spallation Source
eV	electron-volt
FRM2	Forschungsreaktor München 2
FZJ	Forschung Zentrum Jülich
HBS	High Brilliance Source
HiCANS	Hight Current Accelerator-driven Neutron Source
HFR	High Flux Reactor
IFMIF	International Fusion Material Irradiation Facility
ILL	Institut Laue Langevin/INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
ISIS	Neutron and Muons UK facility
JCNS	Jülich Center for Neutron Science
JPARC	Japan Proton Accelerator Research Complex
LANSCE	Los Alamos Neutron Science Center
LENS	League of advanced European Neutron Sources
LENS	(Indiana University) Low Energy Neutron Source
LLB	Laboratoire Léon Brillouin
MeV	Mega electron-volt
MIEZE	modulation of intensity with zero effort
MLZ	Heinz Maier-Leibnitz Zentrum
NCBJ	National Centre for Nuclear Research (Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Poland)
neV	nano electron-volt
NPI	Nuclear Physics Institute (Czech Republic)
PAC	Pile à combustible
PSI	Paul Scherrer Institute
QENS	Quasi Elastic Neutron Scattering
RFQ	Radio-Frequency Quadrupole
RHF	Réacteur à Haut Flux
RID	Research Institute Delft
RIKEN	Reaserch Institute, Japan
SANS	Small Angle Neutron Scattering
SEMSANS	Spin Echo Modulated SANS
SERGIS	Spin Echo Resolved Grazing Incidence Scattering
SESAME	Spin Echo Scattering Angle MEasurement
SESANS	spin echo SANS
SINQ	Swiss Neutron Source
SNS	Spallation Neutron Source
TdV	Temps de Vol
TRL	Technology Readiness Level (niveau de maturation technologique)
UE	Union Européenne
VCN	Very Cold Neutrons

- Les techniques de diffusion des neutrons sont essentielles à la compréhension du comportement des matériaux, première étape fondamentale au développement de solutions technologiques aux défis sociétaux actuels.
- Une nouvelle source de diffusion neutronique française est indispensable pour faire perdurer l'excellence de la communauté scientifique française construite au fil des décennies et exploiter au mieux le potentiel d'ESS.
- Les HiCANS constituent une solution technique innovante pour construire des sources de neutrons performantes.
- La France dispose de l'expertise scientifique et technique pour développer le premier démonstrateur mondial de ce nouveau type de source.
- La construction d'une telle source étant longue (~ 8 ans), une action rapide est nécessaire pour ne pas faire face à un « neutron gap » en France après l'arrêt du réacteur à haut flux de Grenoble.

Diffusion neutronique : enjeux et objectifs scientifiques

Presque partout dans le monde – en Europe, Amérique du Nord, Russie, Japon, Australie, Chine, Corée, Inde – les techniques de diffusion neutronique se sont imposées comme des outils d'analyse incontournables dans de nombreux domaines comme la physique, la chimie, les sciences des matériaux, les sciences de la terre ou encore en biologie. Offrant une vision multi-échelle à la fois spatiale et dynamique des propriétés de la matière condensée, ces techniques sont devenues indispensables à la compréhension des grandes questions scientifiques actuelles. Ces études fondamentales permettent de répondre aux grands défis sociétaux auxquels nous sommes confrontés, qu'il s'agisse de l'énergie et du climat, de la santé, de l'électronique et des matériaux innovants, du patrimoine ou encore des transports. Elles jouent également un rôle central dans les progrès de l'industrie française dans les technologies émergentes et le développement de ses capacités souveraines.

Les forces de la sonde neutronique sont multiples :

- les neutrons ont une sensibilité unique à certains atomes, en particulier les atomes légers tels que l'hydrogène, ce qui ouvre des possibilités extrêmement vastes dans l'étude des **polymères et de la matière biologique** ;
- les neutrons ont la capacité d'analyse la plus approfondie des **propriétés magnétiques** de la matière ;
- aucune autre sonde ne permet des études des **propriétés dynamiques** de la matière dans un domaine aussi vaste en énergie et en position ;
- les neutrons interagissent faiblement avec la matière, ce qui en fait une sonde non destructive et non invasive.

Le tableau suivant rassemble des exemples de questions scientifiques en lien avec des enjeux sociétaux dans lesquelles les neutrons apportent des contributions cruciales.

Objectifs technologiques	Problématiques	Apport de la diffusion neutronique
Développer de nouveaux matériaux pour les batteries	Comment les électrodes se comportent-elles ?	Suivi des processus chimiques <i>operando</i> dans les batteries
Produire du froid ou de l'électricité avec des matériaux magnéto-caloriques	Comment maximiser les performances de nouveaux matériaux fonctionnels ?	Compréhension des mécanismes magnéto-électronique en jeu
Développer de nouveaux matériaux pour les cellules photovoltaïques.	Quelles sont les processus qui expliquent l'efficacité des nouveaux matériaux ?	Le rayonnement offrant la plus grande sensibilité à l'hydrogène
Stocker l'hydrogène	Où les atomes d'hydrogène se positionnent-ils dans le matériau de stockage ?	Sensibilité et discrimination inégalable entre les atomes d'hydrogène et les métaux
Optimiser le fonctionnement des piles à combustible	Pourquoi les piles tombent-elles en panne ?	Suivi <i>operando</i> des processus de fonctionnement des piles par radiographie
Fabriquer des matériaux nucléaires de qualité	Comment les gaines de combustibles se fragilisent-elles ? Comment les aciers nucléaires vieillissent-ils ?	Études métallurgiques sur des aciers de cuves. Étude des modifications structurales des gaines de combustible en cas d'accident nucléaire.
Transporter l'énergie. Simplifier les diagnostics médicaux (IRM).	Quelle est l'origine de la supraconductivité dans les nouvelles familles de matériaux à hautes températures critiques ?	Sonde unique du magnétisme à l'échelle atomique
Délivrer les médicaments de façon ciblée dans l'organisme	Comment encapsuler efficacement les principes actifs ? Comment les protéines interagissent-elles avec les surfaces membranaires ?	La possibilité de variation de contraste hydrogène/deutérium
Filter efficacement l'eau de mer	Comment les liquides, comme l'eau, fluctuent-ils à l'échelle nanoscopique ?	Propriétés de transport individuel et collectif ; sensibilité à l'hydrogène de l'eau
Développer une chimie verte	Existe-t-il des alternatives aux solvants issus des ressources fossiles ? Comment dépolluer de façon efficace notre environnement ?	Les neutrons sont l'outil de prédilection pour l'étude de tout processus mettant en jeu des atomes d'hydrogène
Construire un ordinateur quantique	Quels sont les nouveaux états quantiques de la matière ? (excitations fractionnaires, modes de Higgs, réseaux de skyrmions)	Caractérisation des excitations quantiques dans ces nouveaux états de la matière
Développer de nouveaux alliages métallurgiques légers et performants pour les transports	Comment fonctionnent les processus de renforcement par des nano-inclusions ? Comment les matériaux se comportent-ils à haute température ?	Mesures de textures et de contraintes dans des pièces à l'échelle industrielle et dans des conditions extrêmes. Structure à l'échelle nanométrique de nanocomposites.

Paysage et modèle actuel

Près de 6000 chercheurs utilisent le rayonnement neutronique en Europe, représentant la moitié de la communauté mondiale. Ces chercheurs s'appuient sur un réseau de sources nationales, qui mènent des programmes de recherche propre et qui sont ouverts aux chercheurs extérieurs via des appels à projets soumis à des comités de sélection, accueillant aussi 30 à 40 % de chercheurs d'autres pays européens. Ces programmes de recherche nationaux créent une communauté scientifique active et compétente à même d'utiliser efficacement une installation européenne « phare » de classe mondiale, actuellement l'Institut Laue Langevin (ILL) à Grenoble. Les instruments de l'ILL sont en effet mis à disposition de chercheurs extérieurs [1], qui apportent une expertise scientifique de haut niveau et bénéficient en retour des très hautes performances de l'installation. Ce modèle a permis à l'Europe d'avoir le leadership dans le domaine des techniques neutroniques depuis plusieurs décennies.

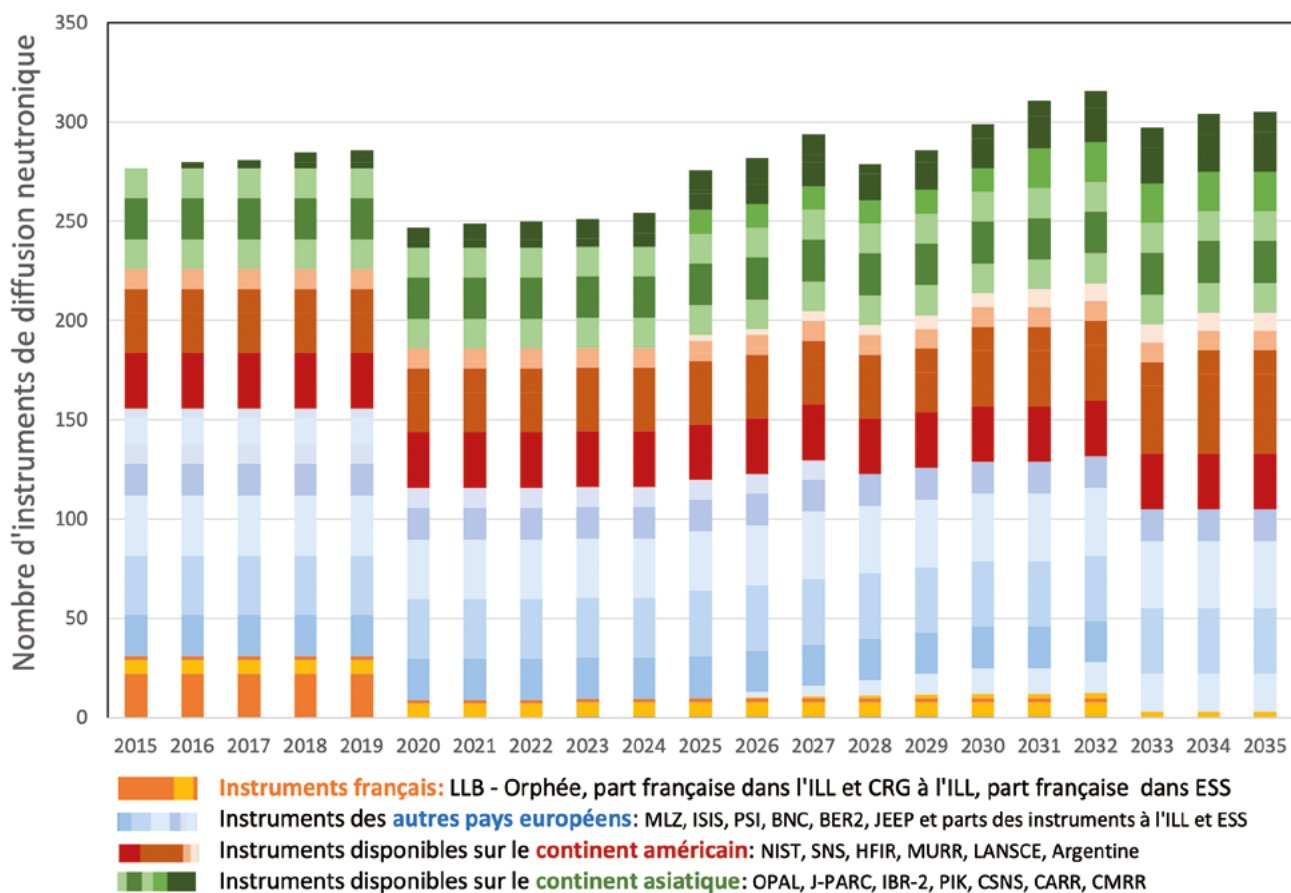
L'Europe entend bien garder sa position de leader dans le domaine des techniques de diffusion neutronique et, pour anticiper l'arrêt du réacteur de l'ILL, qui fonctionne depuis 1970, a engagé la construction de la source à spallation de 3^e génération la plus performante au monde, l'European Spallation Source (ESS), qui entrera en fonctionnement dans quelques années.

Dans le reste du monde, l'offre instrumentale s'étoffe avec par exemple la mise en service récente de nouvelles sources de neutrons pour la recherche telles que OPAL en Australie, SNS aux États-Unis, JPARC au Japon, CMMR, CSNS et CARR en Chine, ou encore la jouvence du réacteur d'Oakridge. De nombreux projets sont aussi en cours, tels que la jouvence du réacteur du NIST à Washington, l'ouverture prochaine d'un réacteur de recherche en Argentine et en Russie, la construction d'une deuxième station cible autour de SNS aux États-Unis, le projet ISIS-II au Royaume-Uni et enfin la construction d'un nouveau hall instrumental au PSI.

Le parc d'instruments de diffusion neutronique mis à disposition des utilisateurs académiques et industriels dans des installations est de l'ordre de 300 instruments dans le monde. Jusqu'à une période récente, l'Europe concentrait plus de la moitié du parc mondial. La situation va évoluer de manière significative au cours des prochaines années puisque le parc instrumental en Amérique du Nord et en Asie est sur une trajectoire de croissance (respectivement +46 % et +90 %) tandis que le parc d'instruments européen va poursuivre sa diminution déjà amorcée (-17 %) par la fermeture récente de plusieurs installations . Il ne reste actuellement en Europe qu'un nombre très limité de sources nationales : le MLZ-FRMII en Allemagne, ISIS au Royaume-Uni et SINQ au PSI en Suisse [2] .

¹ Des neutrons pour la Science, B. Jacrot. *"The idea Maier Leibnitz had for the Institut, and with which I was in total agreement, was quite novel for that era. The aim was to create a pile and the beam instruments to be used primarily by visiting scientists coming from different laboratories in France and Germany"*.

² On notera que ces deux dernières sources ne sont pas dans l'Union Européenne, ce qui peut poser des problèmes pour leur intégration dans des projets de recherche de l'UE. Stricto sensu, on pourrait considérer que l'Union Européenne ne dispose plus que de 2 sources de neutrons de hautes performances, de plus basées sur des réacteurs utilisant du combustible fortement enrichi (90% ²³⁵U), sur lequel l'Europe n'a pas la souveraineté.



Nombre d'instruments de diffusion neutronique mis à disposition de la communauté scientifique dans les sources de neutrons opérant en tant qu'installation pour utilisateurs (« User Facility »). En orange, le nombre d'instruments français (incluant la participation française à l'ILL et à l'ESS); en bleu clair, les instruments mis à disposition par les autres pays européens. En rouge et en vert respectivement, les contributions des différentes sources en Amérique et en Asie. Dans les années 2000, la France disposait d'un parc instrumental représentant 13 % du parc mondial. À l'horizon 2035, son parc instrumental ne représentera plus que 1 % du parc mondial. La contribution des autres pays européens sera en léger recul (-17%), alors qu'à l'inverse le parc instrumental en Amérique et en Asie est en augmentation significative (+46% et +90%).

En France, la richesse de l'écosystème a conduit à la formation d'une communauté d'excellence, pluridisciplinaire, forte de près de 1500 utilisateurs et porteuse d'une grande expertise. Durant les 4 dernières années, plus de 300 laboratoires français ont réalisé des expériences sur des équipements neutroniques français [3]. Malheureusement, sa production scientifique relative aux neutrons a chuté suite à la réduction des capacités de diffusion neutronique disponibles pour les utilisateurs français avec l'arrêt en 2019 du réacteur Orphée du LLB. Sur le long terme, le parc instrumental français passera de 13% du parc mondial dans les années 2000-2010 à moins de 1% à l'horizon 2035 et les scientifiques français subiront, dans l'hypothèse actuelle de l'opération de 15 instruments à ESS, une diminution de 90 % de leur temps de faisceau disponible par rapport aux années 2000.

Un panel d'instruments de diffusion neutronique plus accessibles et moins coûteux que ceux d'ESS apparaît indispensable pour assurer d'une part la couverture de l'ensemble des besoins de la recherche fondamentale et de l'innovation française et d'autre part pour disposer des compétences pour exploiter le potentiel d'ESS à son meilleur niveau et valoriser l'investissement français dans ESS. Dans ce contexte, nous envisageons le développement et la construction en France d'une nouvelle source de neutrons, basée sur le concept innovant de HiCANS « High Current Accelerator-driven Neutron Source ».

³ La liste des laboratoires français ayant utilisé du temps d'expérience via la 2FDN ou l'ILL est disponible en Annexe 8. Pour une analyse détaillée, se référer au chapitre 3.

Les HiCANS : une opportunité pour réinventer la production des neutrons

Le concept de HiCANS « High Current Accelerator-driven Neutron Source » représente une solution technique innovante pour développer un nouveau type de source de neutrons adaptée à la diffusion neutronique. Dans la source de neutrons proposée ici, une cible faite d'un métal léger est bombardée par des protons, induisant des réactions nucléaires qui produisent des neutrons. Le concept novateur repose sur l'utilisation d'un **accélérateur de protons de basse énergie** (10-70 MeV) combiné à un courant de protons plus important pour compenser la plus faible efficacité de production des neutrons à basse énergie. Ce type de source présente de nombreux avantages, énoncés ci-dessous.

- Le design de l'installation est **modulable** :
 - les structures temporelles des impulsions de neutrons que la source fournit peuvent être modifiées et il est possible, avec plusieurs stations cibles, de proposer plusieurs structures temporelles en parallèle pour différents types d'instruments,
 - les différents paramètres de l'accélérateur (énergie, courant, nombre de stations cibles illuminées par l'accélérateur) sont modifiables, ouvrant la perspective d'amélioration des performances,
 - le système de modération de l'énergie des neutrons est simple et peu onéreux et il est possible de le faire évoluer au fil des progrès technologiques ou des besoins. Cette situation est à l'opposé d'un réacteur de recherche pour lequel l'investissement initial est nécessairement élevé et dont la configuration du cœur est figée pour plusieurs décennies, empêchant l'implémentation de nouvelles technologies.
- La source de neutrons est optimisée pour **fournir la brillance la plus élevée** (nombre de neutrons/cm²/s) qui est le paramètre clé définissant les performances des instruments de diffusion neutronique.
- La quantité de radioéléments produits dans l'installation est réduite par rapport aux autres types de sources de neutrons, ce qui facilite sa gestion et réduit les coûts d'opération.
- La maintenance des équipements, en particulier des ensembles cible-modérateurs, est simplifiée. Les possibilités de jouvences régulières sont facilitées [4].

La source de type HiCANS proposée ici comprendra les éléments suivants :

- un accélérateur de protons de basse énergie (entre 10 et 70 MeV en fonction des performances visées) avec un courant crête le plus élevé possible (de l'ordre de 100 mA), conçu de manière à pouvoir illuminer plusieurs cibles différentes ;
- des ensembles cible-modérateur-réfecteur produisant des neutrons de longueur d'onde *ad hoc* (thermiques et froids),
- des instruments de diffusion neutronique installés sur les différentes sorties de faisceaux de neutrons autour de chaque ensemble cible-modérateur-réfecteur.

Plusieurs instituts européens ont lancé des programmes de recherche pour évaluer les performances de telles sources pour les techniques de diffusion neutronique. Les différentes modélisations, corroborées par des mesures sur des installations de basse puissance ou basse énergie, suggèrent que les performances des HiCANS sont potentiellement équivalentes à celles de réacteurs de recherche ou de sources de spallation de puissance moyenne, autrement dit compétitives dans le contexte actuel. Ces réflexions sont basées sur les progrès récents dans différents domaines :

- la construction d'accélérateurs de protons à haute intensité de courant (~ 100 mA) ;
- une meilleure compréhension des processus de production de neutrons adaptés aux techniques de diffusion neutronique, en particulier dans le domaine des modérateurs neutroniques ;
- une instrumentation neutronique plus performante permettant de tirer le meilleur parti des neutrons produits ;
- des progrès dans les méthodes d'exploitation de volumes de données de plus en plus importants.

⁴ En particulier à la différence des réacteurs de recherche dans lesquels la géométrie du réacteur est figée pour sa durée de vie.

ICONE, un projet de HICANS en France

Les principales motivations pour construire une source de type HiCANS en France sont détaillées ci-dessous.

1) Contribuer, en France, à relever les défis scientifiques et sociétaux émergents.

La flexibilité et la modularité des sources HiCANS en font de potentielles infrastructures de recherche pouvant répondre rapidement à l'évolution des enjeux et défis en recherche. ICONE permettrait de réaliser environ 300 études expérimentales par an et d'avoir une production scientifique de l'ordre de 100 à 150 publications annuelles à fort impact. Compte tenu des performances attendues, cette installation mènerait un programme de recherche propre.

L'utilisation de la source serait typiquement la suivante :

- étude de problématiques en lien direct avec des enjeux sociétaux :
 - o énergie, climat, environnement,
 - o santé,
 - o information et communication,
 - o héritage culturel,
- recherche et travaux R&D pour des développements clés dans les domaines des :
 - o matériaux et procédés pour l'industrie,
 - o réactions chimiques et nouveaux matériaux,
 - o matériaux magnétiques,
 - o polymères, nanoparticules et protéines,
- recherche fondamentale et méthodes.

2) Soutenir l'industrie française.

Une réorganisation des protocoles d'accès à l'installation permettrait de fluidifier l'accès à du temps de faisceau pour les utilisateurs, un aspect particulièrement critique pour les industriels qui travaillent sur des projets avec des échelles de temps très courtes. La nouvelle installation pourrait mener à bien des études dans les domaines de :

- o qualification et screening,
- o durcissement électronique,
- o problèmes de production.

3) Proposer une stratégie qui s'inscrit dans le contexte européen.

La future installation viendra naturellement compléter l'ensemble des sources qui constituent la base et les fondations de ESS, constituant le point d'ancrage et d'expertise en France pour la réalisation d'expériences à ESS. Elle permettra ainsi de maintenir une large communauté française de diffusion neutronique dynamique et pluridisciplinaire au meilleur niveau mondial et aura une masse critique suffisante pour avoir des programmes de recherche propre. Cette communauté continuera à participer pleinement à la dynamique européenne d'échange des ressources, élément essentiel d'une utilisation optimale de la future source européenne ESS.

4) Développer et maintenir en France une expertise de haut niveau dans les techniques neutroniques en formant de nouveaux chercheurs et ingénieurs.

Dans la future installation, en plus de faire participer les étudiants aux expériences sélectionnées, du temps de faisceau dédié à des programmes de formation pourra être alloué spécifiquement. Par ailleurs, les sources de neutrons nationales ont souvent des liens étroits avec les universités locales, de sorte que des formations à l'utilisation des différents types de rayonnement peuvent être directement incluses dans les programmes universitaires dans divers domaines.

5) Offrir une solution technique pérenne et à faibles coût et empreinte écologique pour la production de neutrons.

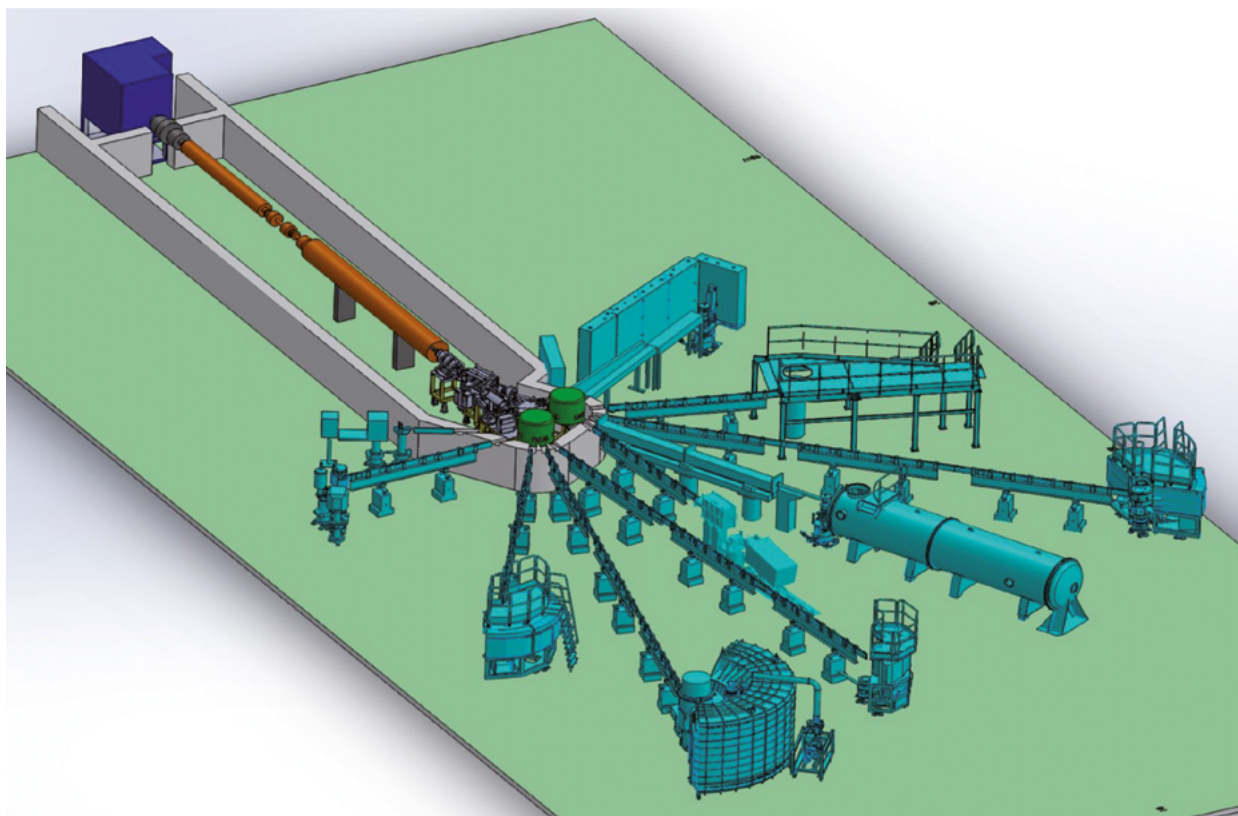
Une HiCANS utilise un accélérateur 10 à 50 fois moins long que l'accélérateur d'une source de spallation. Par ailleurs, l'utilisation de protons de basse énergie permet de réduire d'un facteur 100 le volume de matériaux activés produit dans l'installation par rapport à un réacteur et seuls des éléments radioactifs à vie courte sont produits. Ces deux aspects réduisent fortement non seulement les coûts de construction et d'opération de l'installation mais aussi son empreinte écologique.

6) Développer des compétences techniques dans le domaine de la construction de HiCANS.

Le développement du premier démonstrateur européen et mondial de HiCANS, pour mener ensuite à un institut de recherche à part entière, placera la France et l'Europe en position de leader dans le domaine de la construction de telles sources et dans le développement de l'instrumentation associée.

Les atouts de la France dans un tel projet sont nombreux :

- **une expertise scientifique et technique à Saclay et Grenoble** dans le domaine de la diffusion neutronique :
 - o 25 instruments construits autour d'Orphée, la construction de SHARP et SAM à l'ILL,
 - o une expertise acquise au LLB pour la construction d'instruments à ESS,
- **une large base d'utilisateurs français (~1500) ;**
- **une expertise dans la construction d'accélérateurs à fort courant** (IRFU au CEA et IN2P3 au CNRS) :
 - o projets SARAF, MYRRHA, LINAC4, SPIRAL2,
- **la possibilité de réutiliser les efforts injectés dans ESS :**
 - o construction d'accélérateur,
 - o conceptions d'instruments,
 - o développement de détecteurs,
 - o traitement des données.



Disposition des différents éléments d'une HiCANS de type ICONe. Un accélérateur de proton (orange) illumine 2 cibles (vert) pour produire des impulsions de neutrons qui sont distribuées sur des instruments de diffusion neutronique (bleu)

En plus des avantages des sources de neutrons de type HiCANS décrits ci-dessus, nous voudrions conclure en soulignant que, du fait que les HiCANS n'utilisent pas de combustible nucléaire et n'entretiennent pas de réactions en chaîne, leur **acceptabilité par la société** est bien plus élevée que celle des réacteurs nucléaires. Cela rend ainsi possible leur installation proche de centres universitaires, un élément important pour maximiser leur intégration dans un écosystème de recherche. Enfin, ces installations n'utilisent pas de combustible nucléaire enrichi dont l'approvisionnement est complexe. **Une installation de type HiCANS est simplement soumise au Code de la santé publique, n'étant pas a priori une installation nucléaire de base.**

La première partie de ce document (Chapitre 1) présente les domaines de pointe d'utilisation des techniques de diffusion neutronique en France par différentes communautés scientifiques travaillant à relever les grands défis sociétaux actuels. Certaines de ces communautés cherchent par exemple des solutions pour décarboner notre production d'énergie en améliorant la production et le stockage de l'énergie (membranes de piles à combustible, batteries, stockage de l'hydrogène, combustibles nucléaires, aimants pour moteurs électriques) ou à rendre les transports plus durables (nouveaux matériaux composites plus légers et résistants). Les technologies de l'information et les nouvelles technologies quantiques sont basées sur le magnétisme pour l'étude duquel la diffusion neutronique est indispensable. Dans les problématiques liées à l'environnement et au climat, les études de diffusion neutronique permettent de contribuer à la compréhension des évolutions climatiques, d'optimiser la formulation de solvants innovants, d'identifier les sources de pollution à très faibles doses ou encore de sonder les colis de déchets nucléaires pour rendre plus sûr leur entreposage ou leur stockage. Dans le domaine de la biologie et de la santé, des informations uniques sur les interactions entre les composantes des systèmes biologiques sont obtenues pour la compréhension des mécanismes de fonctionnement des virus, l'élaboration de nouveaux médicaments ou le développement de thérapies curatives.

La place de la diffusion neutronique est ensuite discutée dans le contexte des autres techniques adressant les mêmes défis, montrant ses spécificités et ses apports uniques.

Dans une deuxième partie (Chapitres 2 et 3), les différentes communautés d'utilisateurs et l'impact d'une nouvelle source sont présentés.

Dans une troisième partie (Chapitres 4 à 9), le document décrit les éléments principaux d'ICONE, source basée sur un accélérateur d'énergie moyenne (25 MeV) alimentant deux cibles et permettant d'installer une suite instrumentale couvrant la majorité des techniques neutroniques.

1 Motivations scientifiques

Dans cette section, nous illustrons à l'aide d'exemples concrets combien les techniques de diffusion neutronique sont irremplaçables dans la recherche scientifique moderne dont on attend d'une part qu'elle réponde aux défis sociétaux, notamment en développant des réponses technologiques adaptées et efficaces, et d'autre part qu'elle continue à repousser les limites de la connaissance pour établir un socle permettant de fournir des réponses aux défis à venir et un terreau pour des découvertes inattendues.

La diffusion neutronique a en effet des avantages uniques liés aux propriétés du neutron :

- son spin, qui en fait la seule sonde directe du magnétisme à l'échelle atomique ;
- sa sensibilité aux éléments légers, de plus différente selon les isotopes, ce qui donne lieu à la sensibilité à l'hydrogène et au contraste H/D — un outil exceptionnel pour les études de la matière molle et des systèmes biologiques ;
- ses énergies offrant les meilleures résolutions dans la diffusion inélastique ;
- son grand pouvoir de pénétration, permettant de caractériser dans leur volume des pièces de métallurgie de très larges dimensions.

Son apport est ainsi indispensable aux recherches dans les domaines

- de l'énergie (batteries, piles à combustible, matériaux thermoélectriques) ;
- des technologies de l'information (matériaux magnétiques pour le stockage) ;
- du climat et de l'environnement (solvants innovants, séquestration du CO₂, matériaux pour améliorer les sols agricoles) ;
- des transports (alliages et matériaux nanocomposites) ;
- de la santé (exploration des interactions entre virus/protéines et macromolécules biologiques, encapsulation des médicaments).

De manière plus large, nous montrons comment les avantages des techniques neutroniques sont exploités dans la recherche fondamentale dans les domaines du magnétisme, de la chimie du solide et de la matière molle, de la biophysique et de la physique nucléaire. Afin de considérer une science intégrative, l'unicité et la complémentarité des techniques neutroniques et d'autres techniques analytiques telles que la diffusion de rayons X, la résonance magnétique nucléaire (RMN), les techniques optiques et la microscopie électronique sont discutées.

Le neutron est une particule subatomique qui permet de sonder et de comprendre la matière au niveau atomique et moléculaire, de manière non destructive. Au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, l'utilisation des neutrons pour sonder et explorer la matière s'est continuellement développée et les neutrons sont devenus un des outils analytiques incontournables des scientifiques.

Les propriétés des neutrons permettent d'obtenir des informations uniques sur les propriétés magnétiques, le comportement des éléments légers et les excitations de la matière. Ils contribuent à la recherche fondamentale dans les domaines aussi divers que la physique et la chimie de la matière condensée, la science des matériaux et de la matière molle, les sciences de la vie ou encore la géoscience.

Contribuant à la caractérisation de presque tous les nouveaux matériaux issus des recherches modernes, les propriétés des neutrons pour sonder et interagir avec la matière coïncident avec les grandes problématiques scientifiques et sociétales actuelles : énergie, transports, technologies de l'information, santé, environnement et climat.

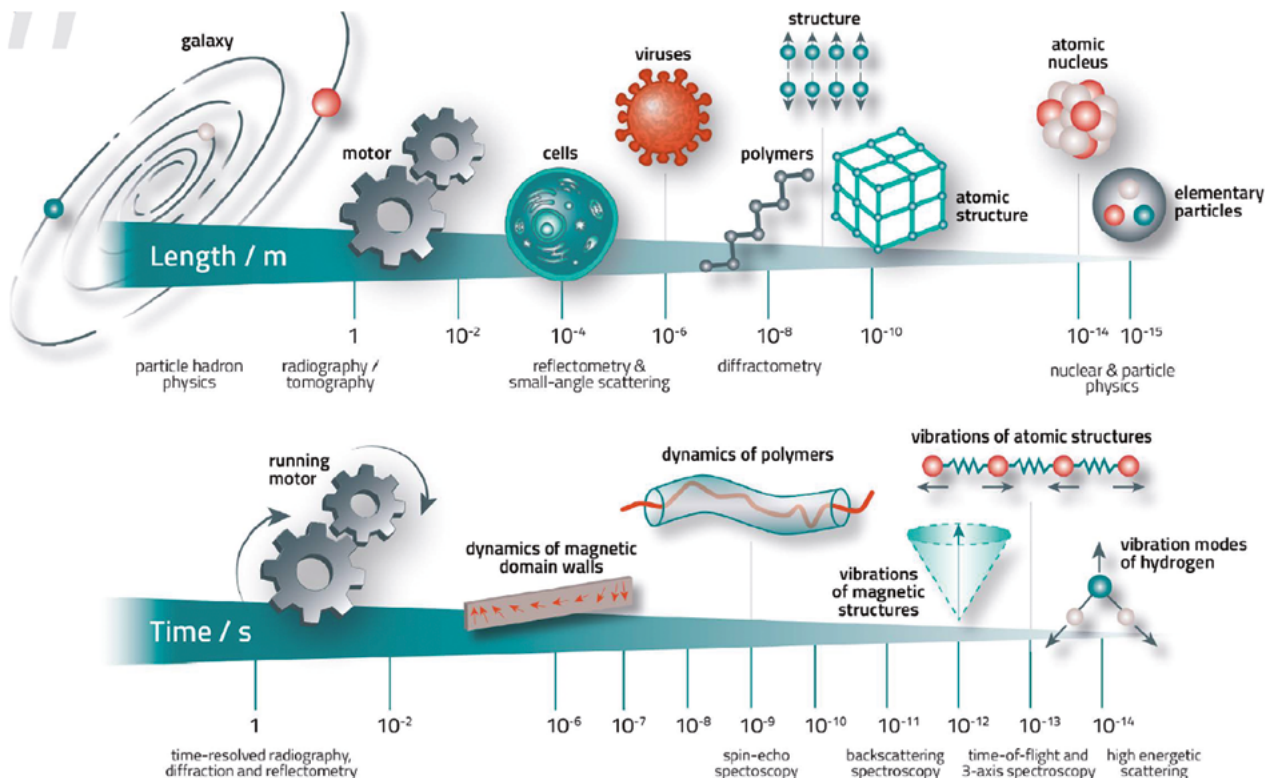


Figure 1 : Les neutrons sont utilisés pour étudier l'ordre et les interactions dans la matière condensée sur des très grandes échelles de taille et de temps/énergie. © LENS – Stephanie Chapman [5].

1.1 La place unique des neutrons dans la caractérisation de la matière

Les neutrons répondent à la dualité onde-corpuscule et sont ainsi décrits à la fois par une longueur d'onde et par une masse, une neutralité électrique, un spin et un moment magnétique. Les techniques expérimentales utilisant les neutrons en sciences des matériaux peuvent être classées en trois grands groupes en fonction de ce qu'elles cherchent à caractériser :

- la structure microscopique, c'est-à-dire en premier lieu l'arrangement des atomes ou des groupes d'atomes le constituant ;
- la dynamique, c'est-à-dire le mouvement de ses atomes ou molécules (vibrations, phonons, diffusion...);
- les propriétés magnétiques, c'est-à-dire à la fois la structure magnétique (arrangement des spins) et la dynamique (mouvement des spins ou spinons).

Les neutrons sont uniques

- Les neutrons ont des longueurs d'onde et des énergies qui permettent d'obtenir simultanément 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 1 femtoseconde (10^{-15} s) à $1 \mu\text{s}$ dans l'étude des mouvements.
- Le neutron possède un moment magnétique qui en fait une sonde irremplaçable pour l'étude du magnétisme.
- Les neutrons sont la seule sonde de diffusion sensible au contraste isotopique, fournissant un outil pour décrypter l'organisation de systèmes biomédicaux et de matière molle.
- Les neutrons sont une sonde pénétrante, qui donne accès 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.
- 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.

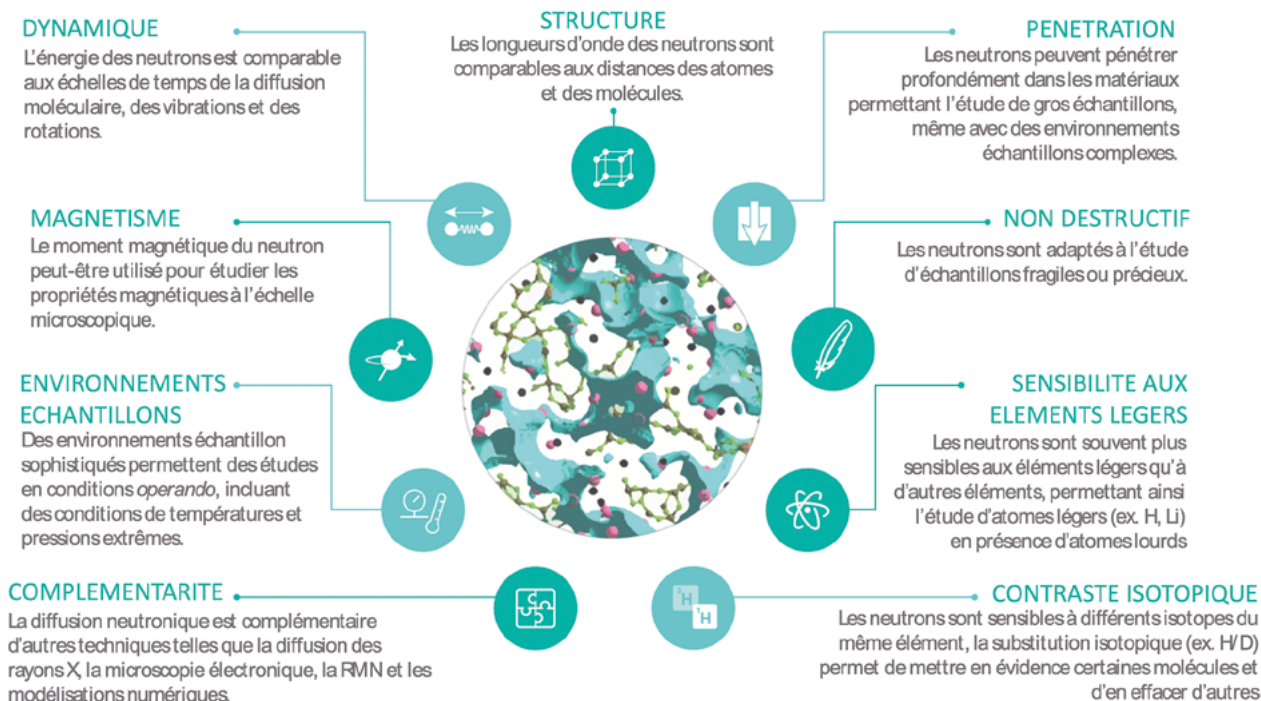


Figure 2 : Les propriétés clés des neutrons. Adapté de [5].

L'utilisation des techniques de diffusion neutronique est complexe puisqu'elle nécessite l'accès à des sources de neutrons de haute intensité qui sont en nombre limité et n'ont pas d'équivalent, même à moindre intensité, en laboratoire. L'utilisateur doit surmonter des obstacles tels que la demande de temps de faisceau, la préparation minutieuse de l'expérience, sa réalisation dans un autre institut, souvent en plusieurs épisodes. Les scientifiques surmontent cependant ces obstacles, montrant que les techniques de diffusion neutronique sont irremplaçables pour répondre à certaines problématiques scientifiques [6], comme nous l'illustrons ci-après.

1.2 Contribution des neutrons aux défis sociétaux actuels

Les grands défis auxquels nos sociétés sont confrontées orientent naturellement une grande partie de la recherche scientifique en sciences de la matière.

Ainsi, les sciences de la matière peuvent apporter des solutions pour notamment décarboner notre production d'énergie, s'adapter au changement climatique et en particulier au manque d'eau pour l'agriculture, décontaminer notre environnement (sols, eaux usées, air), produire sans polluer, concevoir et développer des médicaments pour lutter contre des virus émergents, etc. Il faut aussi développer des nouveaux matériaux plus légers, plus solides, moins chers ou ayant une moindre empreinte environnementale tout au long de leur cycle de vie.

La connaissance de la matière à l'échelle atomique, que ce soit du point de vue de son organisation ou de sa dynamique, constitue la base du développement de nouveaux matériaux et de nouveaux processus d'(auto-)assemblage, dans les domaines des nanoparticules, des matériaux composites ou magnétiques, des alliages métallurgiques, des procédés chimiques, des médicaments, etc.

⁵ *Strengthening world-class research and innovation. Delivering economic and societal impact.* LENS Report (2022)

⁶ De la même manière, les utilisateurs de rayonnement X n'utilisent les sources synchrotrons que s'ils ne peuvent pas réaliser les expériences dans leur laboratoire. Il faut aussi souligner ici que s'il existe des sources de rayons X de laboratoire, il n'y a pas de source de neutrons de laboratoire.

In fine, ces nouveaux matériaux peuvent être incorporés dans des systèmes complexes et étudiés *operando* grâce à la diffusion des neutrons pour évaluer quantitativement leurs performances, ce qui permet de développer de nouveaux procédés ou de nouveaux dispositifs innovants.

Il n'y a pas de frontière nette entre la recherche fondamentale sur les nouveaux matériaux et leurs applications dans des systèmes opérationnels. Néanmoins, on estime qu'un peu plus de la moitié de la recherche conduite sur les installations de diffusion neutronique est à visée fondamentale et que la deuxième fraction est dédiée à des recherches orientées pour la résolution de problèmes précis (voir la Figure 3 sur la répartition de l'utilisation de l'ILL).

Les sections suivantes montrent l'apport de la diffusion neutronique aux défis actuels dans les domaines de l'énergie, des technologies de l'information, du climat et de l'environnement, des transports et de la santé.

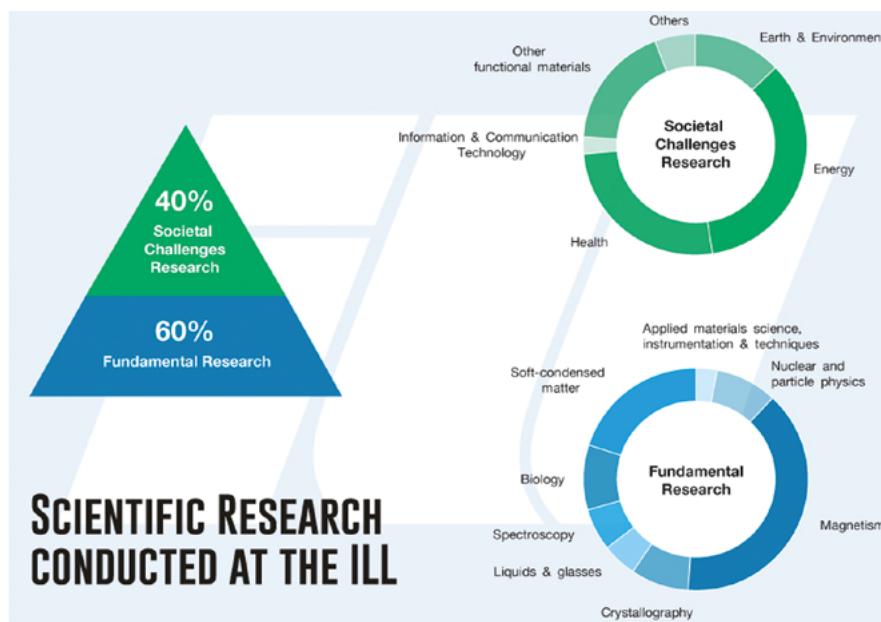


Figure 3 : Répartition de la recherche conduite à l'Institut Lave Langevin à Grenoble entre les études de recherche fondamentale (60%) et les recherches appliquées (40%) [7].

1.2.1 Énergie

Le domaine de l'énergie, qui représente un défi sociétal majeur, est le plus grand domaine d'application de la diffusion neutronique. L'utilisation de la diffusion neutronique s'y décline sous de multiples facettes dont les plus pertinentes sont présentées ici. Nous l'illustrerons avec des études sur l'amélioration des performances des batteries ou des piles à combustible, le développement de matériaux de stockage de l'hydrogène, la compréhension de la thermoélectricité pour développer des matériaux thermoélectriques performants, la structure de cellules photovoltaïques, l'efficacité de procédés industriels (catalyse) et enfin les matériaux liés à la production d'énergie nucléaire.

⁷ <https://www.ill.eu/about-the-ill>

1.2.1.1 Les batteries

Dans le domaine du **stockage électrochimique de l'énergie**, c'est-à-dire des **batteries**, plusieurs questions cruciales se posent sur

- la structure des matériaux actifs et des nanomatériaux ainsi que leur évolution avec le cyclage ;
- les mécanismes de transport ionique (à l'échelle du matériau, du composant et du système) ;
- les mécanismes réactionnels et de vieillissement (à l'échelle du matériau, du composant et du système) ;
- le rôle des interfaces (de tous types et aux échelles micro- et macroscopiques).

D'un point de vue expérimental, les progrès dans le domaine passent par la possibilité **d'une caractérisation *operando* de matériaux multi-échelles complexes**.

Les neutrons apportent la **possibilité de sonder la structure d'une batterie de l'échelle atomique à l'échelle mésoscopique** en combinant différentes techniques (diffraction, diffusion aux petits angles (SANS), réflectométrie, imagerie) ainsi que la dynamique (diffusion quasi-élastique, QENS) sur les échelles de temps pertinentes pour les mécanismes de transport ionique (de la picoseconde à la nanoseconde) qui nous intéressent ici.

Les propriétés de transport à l'échelle microscopique d'éléments légers (H, Li...) ne peuvent être caractérisées que par diffusion quasi-élastique des neutrons (QENS). En particulier, la diffusion neutronique est la seule sonde permettant de visualiser le comportement du lithium grâce à l'utilisation du contraste isotopique entre le ^6Li et le ^7Li .

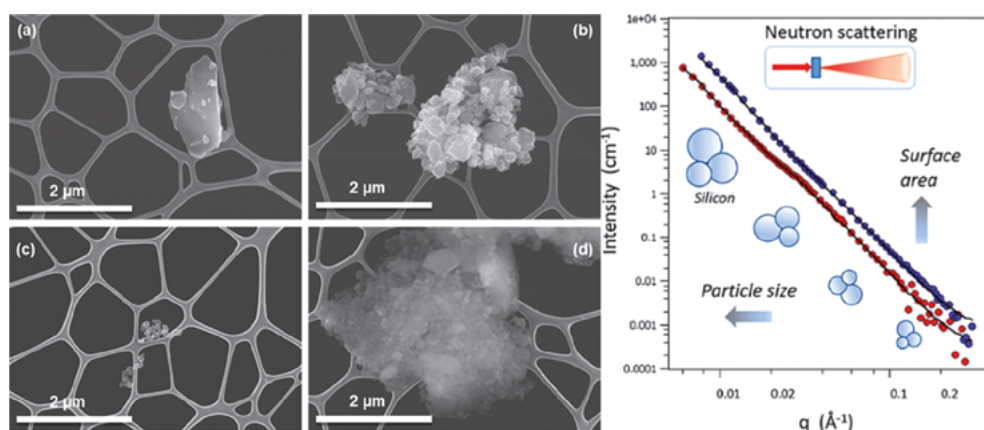


Figure 4 : Étude de la structure d'anodes de batteries dans lesquelles sont incorporées des nanoparticules de silice pour améliorer les performances. Images de microscopie électronique pour (a) du e-Si dans l'état vierge et (b) après « ball milling », (c) a-Si juste après la synthèse et (d) a-Si après « ball milling ». La diffusion de neutrons aux petits angles permet de mesurer la surface spécifique des nanoparticules de Si qui est une information très difficile à obtenir à partir des mesures de microscopie [8].

1.2.1.2 Les piles à combustible

Les piles à combustible (PAC) sont l'élément central des écosystèmes énergétiques basés sur l'hydrogène. L'optimisation des PACs concerne essentiellement les points suivants :

- l'augmentation de la conduction protonique en améliorant les électrodes et les électrolytes des PACs ;
- la gestion de l'eau produite lors des réactions de conversion ;
- le ralentissement du vieillissement des matériaux.

Dans les piles à basse température basées sur des membranes polymériques (PEMFC) ou dans celles à haute température employant des oxydes (SOFC), les éléments clés sont l'hydrogène et l'eau, formée d'hydrogène et d'oxygène.

⁸ Y. Samson et al, ACS Applied Energy Materials **2** (2019) 3220-3227

Les neutrons étant particulièrement sensibles à l'hydrogène (l'hydrogène a une grande section efficace aux neutrons), la radiographie neutronique apparaît de loin comme la meilleure technique pour élucider les mécanismes à la plus petite échelle et comprendre le fonctionnement global grâce aux mesures operando.

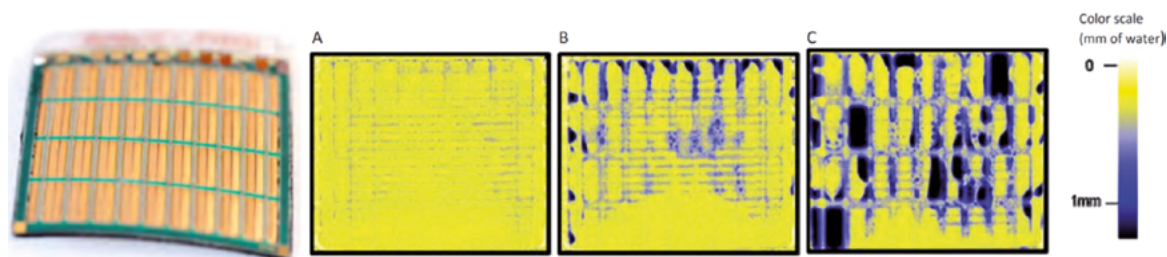


Figure 5 : La radiographie neutronique permet de suivre in situ le fonctionnement de piles à combustible ou de batteries. (a) micro-PAC. (b) Suivi du noyage d'une cellule en cas d'écart de fonctionnement lié à des gradients de températures. La radiographie neutronique permet de mesurer la quantité d'eau accumulée dans la pile. [9]

1.2.1.3 Le stockage de l'hydrogène

La difficulté de stocker de l'hydrogène en grandes quantités, à des températures ou pressions raisonnables, est une limitation importante au déploiement massif de technologies utilisant l'hydrogène à des fins énergétiques pour limiter les émissions de CO₂. Une piste activement explorée est celle de la physisorption ou chimisorption sur ou dans des matériaux solides. Pour progresser dans ce domaine, il faut pouvoir déterminer non seulement la position des atomes d'hydrogène dans les matériaux mais aussi avoir une connaissance précise des modes d'excitations de l'hydrogène pour pouvoir améliorer les réactions d'absorption et de désorption de l'hydrogène dans les matériaux de stockage. En pratique, pour les mesures de diffusion neutronique, l'hydrogène (H) est souvent remplacé par le deutérium (D), un isotope de l'hydrogène. Cela permet de différencier les sites où les atomes d'hydrogène sont les plus mobiles de ceux où leur mobilité est moindre. L'hydrogène étant un très petit atome, il est quasiment invisible pour les rayons X au milieu d'atomes lourds tels que le nickel ou le lanthane, comme dans l'exemple présenté sur la Figure 6.

La possibilité d'utiliser le contraste entre les isotopes H et D ainsi que la forte diffusion des neutrons par l'isotope H sont des atouts majeurs pour l'étude de la localisation et la diffusion de l'hydrogène dans des matériaux nanoporeux, ou encore pour l'exploration du diagramme de phase en nano-confinement (Figure 6) et la découverte de nouvelles phases ultra-denses (Figure 7). Seules la diffraction et la diffusion de neutrons permettent une détermination non ambiguë des propriétés des atomes d'hydrogène inclus dans un matériau.

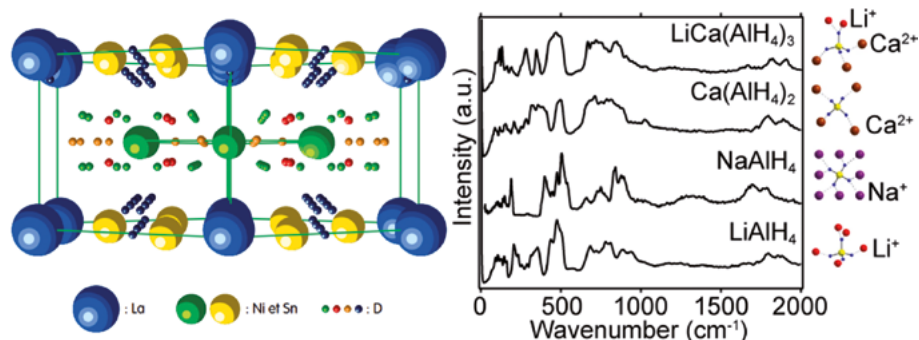


Figure 6 : (gauche) La diffraction neutronique permet de localiser les atomes d'hydrogène dans des matériaux de stockage. (droite) Spectres d'excitations mesurés par diffusion inélastique de neutrons et arrangement atomique local dans différents composés. La connaissance précise des modes d'excitations de l'hydrogène est primordiale pour pouvoir améliorer les réactions d'absorption et de désorption de l'hydrogène dans les matériaux de stockage. [10]

⁹ Boillat, E.H. Lehmann, P. Trtik, M. Cochet, Current Opinion in Electrochemistry (2017) 5 (1), 3-10

¹⁰ Sato, T. & Shin-ichi, O., 64 (2021) 614–621.

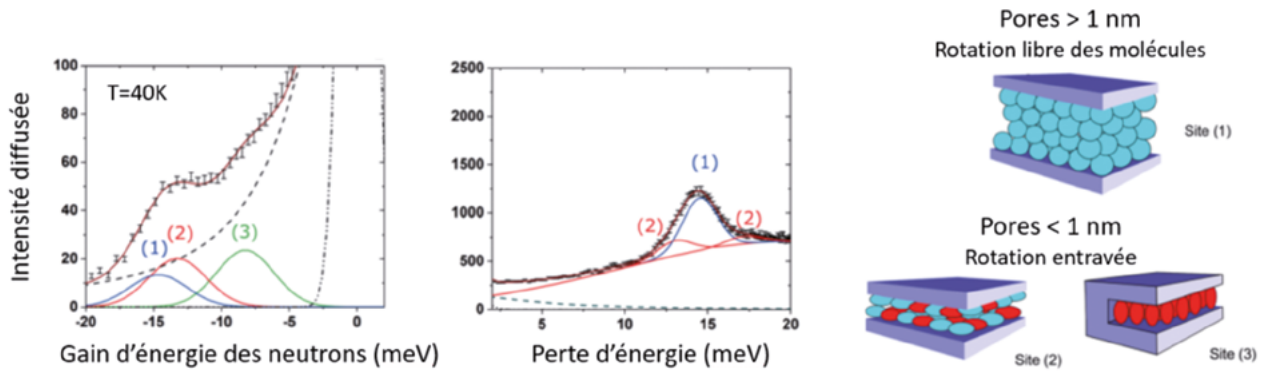


Figure 7 : Manipulation du diagramme de phases de l'hydrogène en nano-confinement : structure de l'hydrogène dans un carbone actif poreux révélée par la diffusion inélastique des neutrons [11].

1.2.1.4 La thermoélectricité

Une source potentielle de génération d'énergie est la récupération de la chaleur fatale [12]. Cela suscite une forte activité autour des matériaux thermoélectriques qui permettent de convertir la chaleur en électricité (dans les processus industriels, dans l'automobile ou dans l'aérospatial) ou inversement l'électricité en un flux de chaleur chaud ou froid (refroidissement en micro-électronique, gestion thermique des systèmes). Dans ce domaine prometteur, les principaux axes de recherche sont :

- le développement de nouveaux concepts pour exalter l'efficacité des matériaux thermoélectriques ;
- la compréhension des effets thermoélectriques et des mécanismes du transport thermique ;
- l'amélioration de la tenue mécanique des dispositifs.

La spectroscopie neutronique (diffusion inélastique) est ici très précieuse car elle seule offre la résolution nécessaire ($dE/E=10^{-3}$ dans la gamme des meV) pour caractériser les excitations du réseau atomique de type phonons responsables du transport thermique (Figure 8). Elle est aussi la seule technique permettant l'étude des effets magnéto-thermoélectriques.

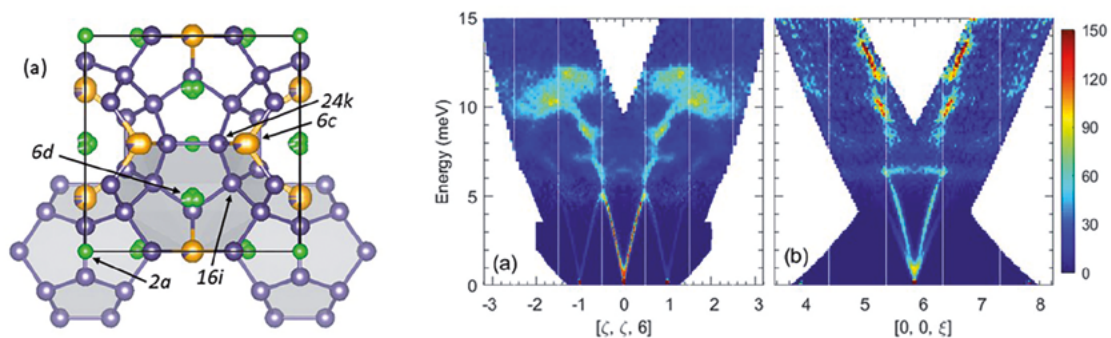


Figure 8 : Mesures de phonon acoustiques par diffusion inélastique de neutrons dans des clathrates intermétalliques de $Ba_{7.81} Ge_{40.67} Au_{5.33}$ (BGA) : à gauche, la représentation de la phase cristalline. À droite : cartographie de l'espace (Q , ω (en lettre grecque)) mesurée sur IN5 (ILL, Grenoble) dans les directions $[110]$ et $[001]$. Adapté de [13].

¹¹ L. R. Terry et al., *Nanoscale* **14** (2022) 7250.

¹² La chaleur fatale est l'énergie thermique indirectement produite par un processus industriel qui n'est ni récupérée, ni valorisée.

¹³ S.R. Turner et al., *Phys. Rev. Res.* (2021), **3**, 013021

Les matériaux thermo-électriques sont des matériaux complexes dans lesquels coexistent un désordre statique et un désordre dynamique. Le désordre statique ne joue pas de rôle clef dans les propriétés des matériaux. À l'inverse, les fluctuations dynamiques jouent un rôle déterminant. La diffusion neutronique est la seule technique qui permette de séparer le désordre dynamique et le désordre statique. Dans GeTe, on peut par exemple montrer que la structure temporelle moyenne est cristalline à toutes les températures et que le désordre apparent observé à haute température par d'autres techniques est en fait un désordre dynamique corrélé avec les fluctuations ferroélectriques [14].

1.2.1.5 Le photovoltaïque

Les matériaux polymères utilisés dans les cellules photovoltaïques organiques sont actuellement étudiés à l'aide des techniques de réflectivité neutronique pour comprendre leur structure fine à l'échelle nanométrique. Au-delà des études de morphologie, des informations sur le comportement dynamique du système sont accessibles grâce à des techniques telles que la diffusion quasi-élastique des neutrons (QENS) qui donne des informations sur les fluctuations dynamiques des polymères à travers celles de leurs groupements hydrogénés, responsables des processus de miscibilité des différentes composantes et de l'efficacité des cellules photovoltaïques.

Seule la réflectométrie de neutrons offre le contraste permettant de résoudre la séparation de phase à l'échelle nanométrique. La diffusion quasi-élastique des neutrons (QENS) permet de déterminer la miscibilité des composantes, information nécessaire pour améliorer le rendement des cellules.

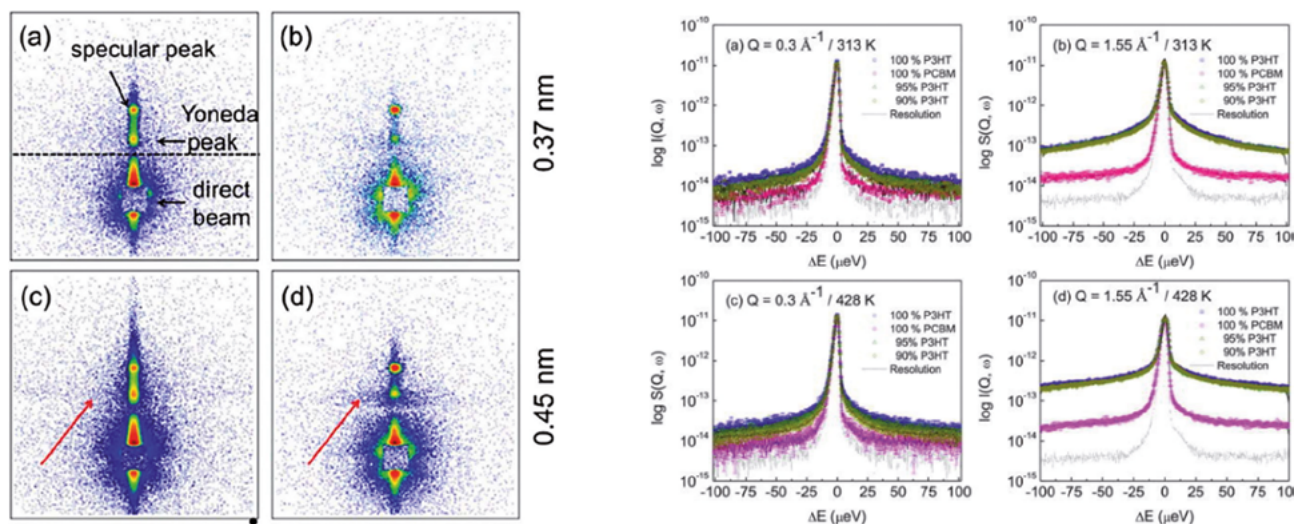


Figure 9 : La diffusion de neutrons aux petits angles en incidence rasante (GISANS) permet d'étudier la séparation de phase et le mélange moléculaire dans des films minces de différents couples de polymères P3HT : PCBM [15]. (b) Mesures de diffusion quasi-élastique des neutrons (QENS) sur différents mélanges de polymères de cellules photovoltaïques (P3HT, PCBM et P3HT : PCBM) à différentes températures et à différentes échelles spatiales (définies par le transfert de moment Q) [16].

¹⁴ S.A.J. Kinber et al, Nature Materials **22** (2023) 311–315.

¹⁵ Wang et al., Adv. Funct. Mater. **28** (2018) 1800209.

¹⁶ T. Etampawala et al., Polymer, **61** (2015) 155-162

1.2.1.6 Efficacité des procédés

L'étude des **processus catalytiques** est essentielle dans le développement de nouveaux procédés permettant de réduire la consommation d'énergie de certaines industries et ainsi lutter contre le réchauffement climatique. Les techniques de diffusion apportent des réponses spécifiques [17]. En particulier, la diffusion inélastique des neutrons (INS) est très performante pour identifier la nature chimique des espèces contenant de l'hydrogène ; leurs structures et leurs comportements dynamiques peuvent être révélés par diffraction de neutrons et diffusion quasi-élastique des neutrons (QENS). On peut citer par exemple le **comportement des hydrocarbures sur des catalyseurs** de type oxyde métallique ou zéolite ou la **formation d'espèces hydrocarbonées** sur des catalyseurs de reformage du méthane et pendant le **procédé de catalyse Fischer-Tropsch**.

La diffusion de neutrons est l'unique sonde quantitative permettant de révéler les processus de catalyse dans ces matériaux clés.

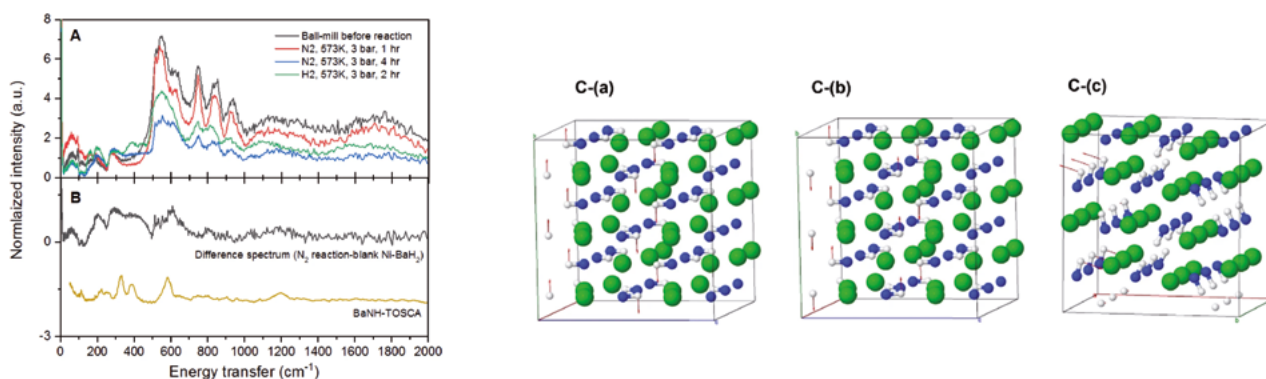


Figure 10 : La demande pour décarboner la production d'ammoniac en utilisant des énergies renouvelables a suscité un regain d'intérêt pour la recherche de nouveaux catalyseurs permettant de réduire N_2 à des températures peu élevées ($T < 300^\circ C$). Les matériaux de type hydrures sont des catalyseurs prometteurs. L'évolution du catalyseur BaH_2 a été suivie par diffusion inélastique de neutrons (gauche). Les modes vibrationnels de $BaNH$ pour les bandes à 200, 350, et 600 cm^{-1} sont illustrées à droite (Ba en vert, N en bleu, H en blanc) [18].

1.2.1.7 Les matériaux pour l'industrie nucléaire

Dans le **domaine de l'énergie nucléaire**, les neutrons sont utilisés pour de multiples caractérisations telles que **l'étude du vieillissement** et l'évolution microstructurale des matériaux de structure irradiés, l'étude de **nouveaux alliages à hautes propriétés mécaniques** tels que les ODS (Oxide Dispersion Strengthened). Les techniques de radiographie sont utilisées de manière routinière pour caractériser **l'homogénéité des barreaux de combustibles** et l'homogénéité de la dispersion en bore dans certains assemblages nucléaires, ainsi que pour vérifier systématiquement l'intégrité et le bon colisage des **déchets nucléaires** dans les fûts historiques.

¹⁷ Neutron scattering for catalysis, Topics in Catalysis, special issue **64** (2021) issues 9-12.

¹⁸ J. Moon et al, Topics in catalysis **64** (2021) 685-692.

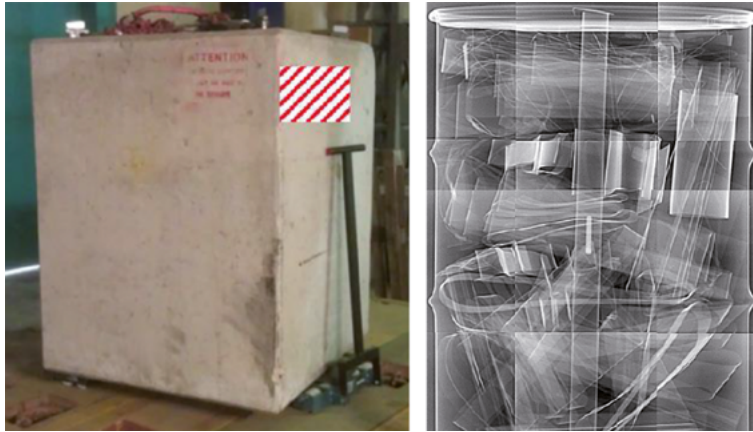


Figure 11 : Radiographie avec des neutrons rapides de fûts de déchets nucléaires historiques scellés dans le béton (4,4 tonnes). Mesure réalisée sur l'installation SAPHIR au CEA Saclay (1 kW electron linac).

Les gaines de combustible et les fûts de déchets nucléaires sont en effet susceptibles à l'hydruration (pénétration d'hydrogène dans le matériau), une forme de corrosion interne des métaux qui peut conduire à des fissures dramatiques.

Des études plus spécifiques ont aussi été conduites pour comprendre la fragilisation des **gaines de combustible** dans le cas d'un scénario de perte de refroidissement (LOCA, Loss of Coolant Accident), comme cela a eu lieu à Fukushima (voir Figure 12). Les gaines du combustible, qui sont la première barrière, sont alors exposées à de la vapeur d'eau à très haute température (1000 – 1200°C), conduisant à un phénomène d'hydruration, qui fragilise les gaines. La compréhension de ce phénomène est très importante car elle permet de développer de nouveaux types de gaines et de revêtements. Certains nouveaux matériaux sont par exemple en cours de qualification par Framatome.

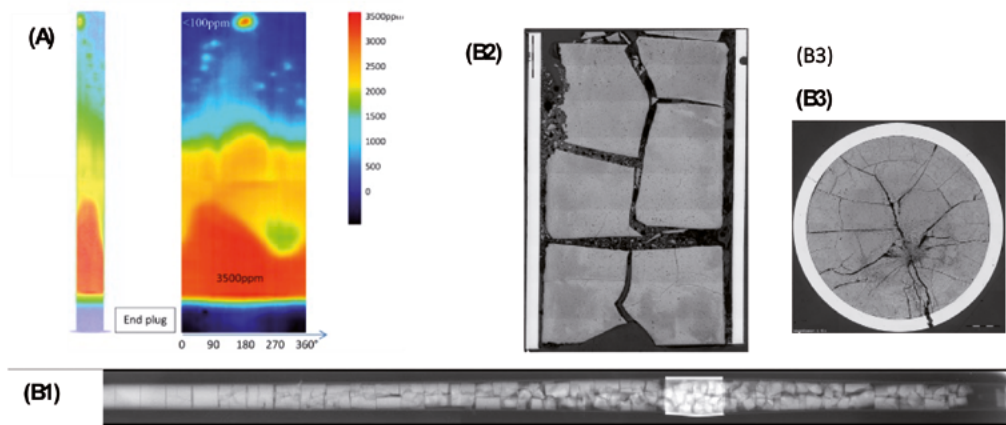


Figure 12 : (A) Prise d'hydrogène (hydruration) dans une gaine de zircalloy lors d'un accident de type Fukushima (LOCA Loss of Cooling Accident). À gauche, une mesure de tomographie neutronique de la répartition de l'hydrogène dans la gaine contenant les pastilles de combustible ; à droite, une gaine « dépliée » numériquement pour donner les valeurs absolues en ppm de la quantité d'hydrogène. Adapté de [19]. (B1) endommagement des pastilles de combustible lors d'un accident de type LOCA ; (B2) Zoom sur la région où l'endommagement est maximum. (B3) Coupe transverse de la gaine. Adapté de [20].

Grâce à son pouvoir de pénétration et sa sensibilité aux atomes d'hydrogène, la tomographie neutronique est la seule technique permettant de vérifier l'intégrité des gaines de combustible ou des fûts de déchets nucléaires.

¹⁹ J.C. Brachet et al, Journal of Nuclear Materials **488** (2017) 267-286.

²⁰ H.K. Jenssen et al, Progress in Nuclear Energy **72** (2014) 55-62

1.2.2 Technologies de l'information

Le **magnétisme constitue un domaine d'intérêt prédominant dans nos sociétés. Combiné à l'électronique, il a modifié en profondeur notre vie quotidienne** : sous forme de capteurs, d'actionneurs, de dispositifs nomades (téléphones, tablettes, ordinateurs portables), de matériaux aux capacités de stockage accrues dans de nouvelles générations de disques durs, etc.

Toutefois, la découverte des matériaux dits « **multiferroïques** », dans lesquels le magnétisme et la ferroélectricité sont intimement couplés, permet d'envisager de nouveaux dispositifs électroniques, tels que des **mémoires rapides et économes en énergie**, dont les états peuvent être lus ou écrits grâce à une tension électrique. Dans ce contexte, des efforts de recherche importants sont menés pour comprendre les mécanismes microscopiques en jeu [21]. Un fort couplage entre spins et réseau, le plus souvent mêlé à un certain degré de frustration magnétique, semble constituer des conditions favorables à la manifestation de propriétés multiferroïques, donnant lieu en particulier à des structures magnétiques délicates et complexes ainsi qu'à des excitations non conventionnelles, appelées électro-magnons.

La diffusion inélastique des neutrons est une technique expérimentale incontournable dans ce domaine car elle seule permet de résoudre ces structures de façon directe et non ambiguë, avec la résolution nécessaire, y compris dans des conditions extrêmes : sous champ magnétique ou électrique, voire sous pression, ce qui permet de déterminer la balance subtile entre les interactions qui stabilisent ces états fondamentaux.

D'autres recherches s'intéressent à la façon dont la matière magnétique s'organise depuis l'échelle atomique et moléculaire jusqu'à l'échelle micrométrique. Les questions relatives aux effets de taille, de morphologie, de surface et de composition chimique sont alors importantes. Parmi ces **systèmes magnétiques « multi-échelles »**, on peut citer les couches minces magnétiques et plus particulièrement les matériaux antiferromagnétiques pour l'électronique de spin. Les nanostructures magnétiques comme les nanofils magnétiques, les nanoparticules magnétiques (oxydes cœur-coquille, composés moléculaires à propriétés photomagnétiques) sont également au centre des problématiques modernes des technologies de l'information, de l'environnement et de la santé.

Certaines de ces textures de spin, des défauts topologiques baptisés **skyrmions**, sont actuellement prometteuses pour des applications en électronique de spin [22]. À la frontière entre les phases ordonnées et paramagnétiques, il s'agit de spirales ou de « tourbillons » magnétiques de grande longueur d'onde (jusqu'à 1000 Å), probablement stabilisées par la compétition entre un échange ferromagnétique fort et l'interaction spin-orbite. Ces structures sont notamment observées dans les aimants itinérants chiraux comme MnSi, FeGe et MnGe. Ces arrangements de spin complexes sont créés sous forme de treillis réguliers ou de particules autonomes. Les skyrmions pourraient constituer les éléments de base d'une électronique nouvelle car ils peuvent être manipulés par des courants électriques ou de spin ou, à l'inverse, utilisés pour diriger le mouvement des spins et des charges. Les skyrmions présentent également de nouvelles caractéristiques électriques, comme l'effet Hall topologique (THE). Les recherches se concentrent sur les phases magnétiques de ces aimants chiraux et en particulier leur pilotage par la température, la pression et le champ magnétique.

La figure ci-dessous illustre l'un des intérêts des neutrons dans le contexte de l'étude des skyrmions, à savoir l'unique possibilité de reconstruire une image des tubes de défauts (en bleu) dans la profondeur de l'échantillon à partir de données obtenues par diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) non polarisés.

On constate que ces tubes ne s'arrangent pas toujours en un réseau parfait mais ont aussi tendance à (a) fusionner, (b) se terminer par des défauts de type « points de Bloch » ou (c) une combinaison des deux, voire (d) à n'exister que sous la surface (voir Figure 13). **Cette information est inaccessible aux rayons X et autres méthodes qui se limitent généralement à la surface.**

²¹ Nicola A. Spaldin, Proc. R. Soc. A. **476** (2020) 20190542-20190542.

²² Mühlbauer et al, Science **323** (2009) 915.

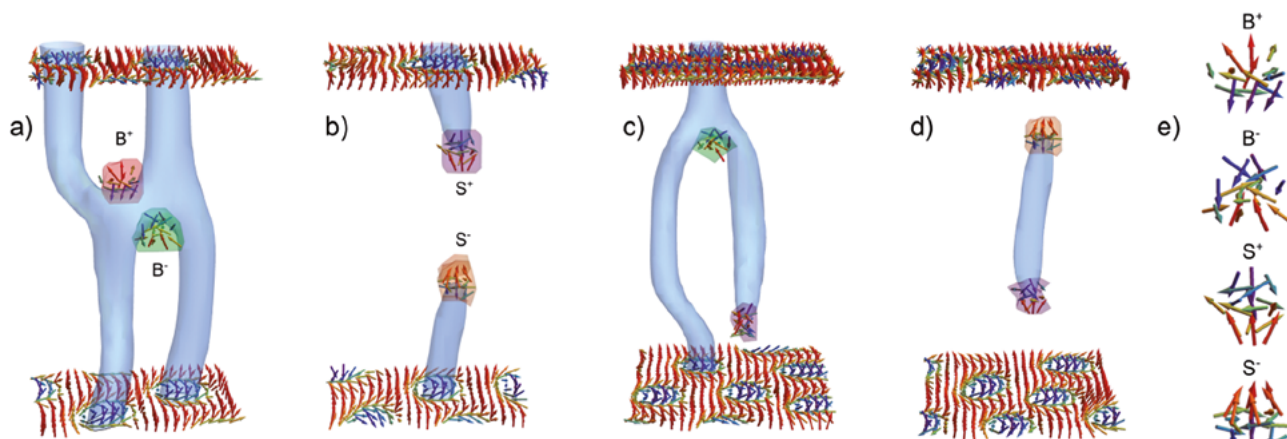


Figure 13 : Tubes de défauts (en bleu) dans la profondeur de l'échantillon à partir de données obtenues par diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) non polarisés. Adapté de [23].

1.2.3 Climat et environnement

1.2.3.1 Clathrates et séquestration du carbone

Les hydrates de gaz, ou clathrates sont des phases cristallines composées d'eau et de méthane, que l'on trouve à l'état naturel et en abondance dans le fond des océans ou dans les sols gelés (permafrosts). Une réserve abondante de méthane (CH_4) se trouve ainsi dans ces dépôts d'hydrates naturels, dans un équilibre de phase particulièrement vulnérable au changement climatique. Ce méthane peut être échangé avec du CO_2 , ce qui fournit à la fois un moyen de séquestration du CO_2 et une source de carburant (le méthane). Il est cependant crucial de comprendre les impacts de ce processus sur la stabilité des clathrates. La diffraction de neutrons dans ces matériaux aux structures complexes et composés de nombreux atomes d'hydrogènes est la technique de choix, à l'instar de la résolution de la structure du méthane à basse température [24].

Dans ces matériaux contenant une grande fraction d'hydrogène, la diffusion des neutrons est l'outil de choix pour déterminer les structures et les interactions moléculaires liées à la stabilité des édifices : la diffraction et les diffusions quasi-élastique et inélastique apportent ainsi des réponses capitales.

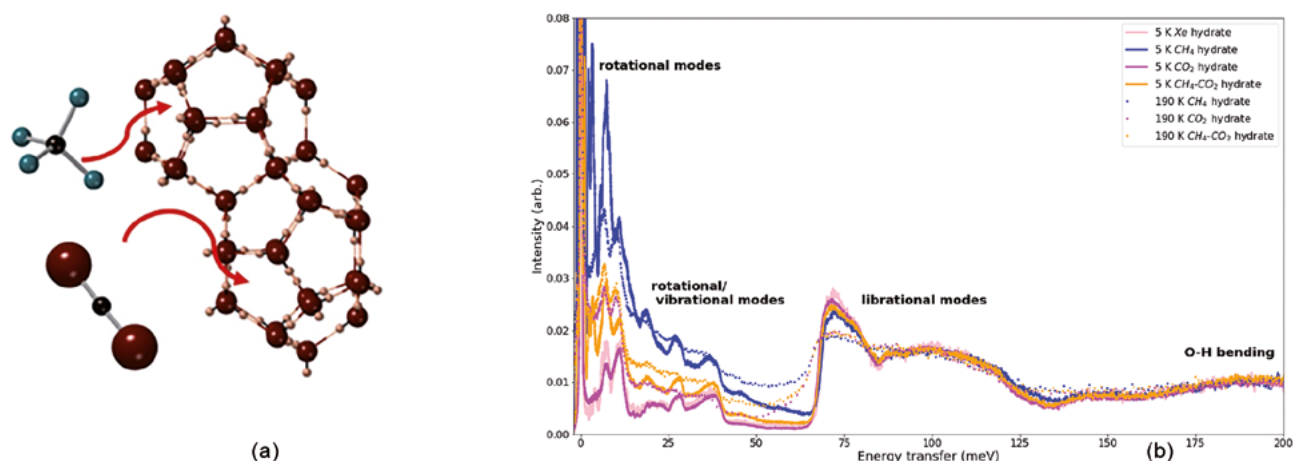


Figure 14 : (a) Une petite et une grande cage d'hydrate pouvant être occupée par une molécule de CO_2 ou de CH_4 . (b) Spectre d'excitation de différents hydrates mesuré par diffusion neutronique. Adapté de [25].

²³ M.E. Henderson et al., arXiv :2208.00023 (2022)

²⁴ M. A. Neumann et al., J. Chem. Phys. **15** (2003) 1586–1589.

²⁵ Bernadette R. Cladek et al., Fuel, **327** (2022) 125197.

1.2.3.2 Plantes et sols

En raison du changement climatique, les périodes de sécheresse s'intensifient. Cela conduit à des pertes de rendement sur les surfaces agricoles. Grâce aux récents progrès de l'imagerie neutronique, il est désormais possible de suivre en temps réel l'absorption d'eau par le système racinaire des plantes en fonction de la nature et de l'hydratation des sols (voir Figure 15). Cela permet de comprendre les facteurs maximisant la résistance des plantes à des périodes de stress hydrique.

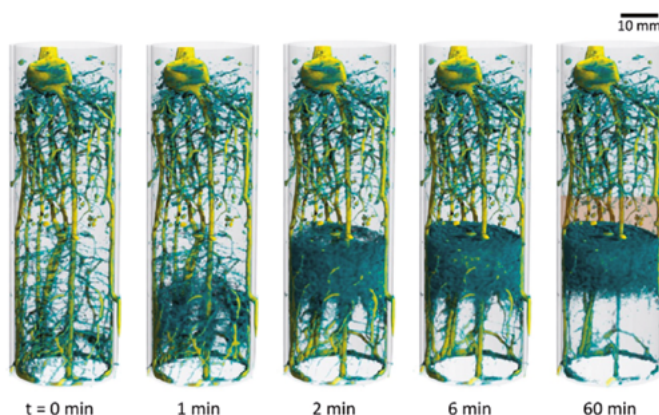


Figure 15 : Les neutrons peuvent être utilisés pour imager l'absorption d'eau par les racines des plantes pour aider à développer des cultures plus résistantes à la sécheresse. Adapté de [26].

Dans un contexte d'économie circulaire, la valorisation de la biomasse locale au travers de la production de **matériaux poreux carbonés de type biochar (ou biocharbon)** est très encourageante en termes d'applications tout en présentant des avantages imbattables tels que faible coût, grande efficacité, qualité constante et potentielle recyclabilité. En particulier, le biochar peut être utilisé pour l'**amélioration des sols agricoles** car sa structure poreuse permet une **meilleure rétention de l'eau et des éléments nutritifs**. L'imagerie neutronique permet d'observer la distribution spatiale et temporelle de l'eau dans et autour des particules de biochar dans différents types de sol au cours du temps et dans différentes conditions de température et humidité [27].

L'imagerie neutronique est la seule technique permettant d'imager des systèmes de telle taille, avec le contraste requis et les résolutions spatiale et temporelle nécessaires. De plus, les techniques analytiques neutroniques telles que la PGAA (Prompt Gamma Activation Analysis) permettent de détecter des éléments lourds nocifs comme le cadmium ou le mercure dans les sédiments [28].

1.2.3.3 Nouveaux procédés chimiques non polluants et décontamination

La chimie actuelle requiert le développement de **nouveaux solvants**, que ce soit pour la synthèse, la catalyse, la dissolution, la séparation ou l'électrochimie, **afin de remplacer ceux issus des ressources fossiles** et autour desquels un grand nombre de procédés ont été optimisés. Ces solvants sont définis selon 12 grands principes de la chimie verte en termes de toxicité, de dangerosité, d'accessibilité, de recyclabilité, de coût et autres. On y retrouve entre autres un certain nombre de **liquides ioniques, solvants eutectiques profonds naturels, des solvants à base d'hydrotropes, des solvants « commutables »** pour de la solubilisation/séparation intégrée. Ces solvants de polarités très variables sont **structurés à l'échelle moléculaire** et en présence de solutés par des réarrangements supramoléculaires qui minimisent l'énergie libre du système.

²⁶ Tötze, C., Kardjilov, N., Hilger, A., Rudolph-Mohr, N., Manke, I. and Oswald, S.E. Scientific Reports, **11**(1) (2021) p.10578

²⁷ Wang, D., Li, C., Parikh, S.J. and Scow, K.M., Geoderma **340** (2019) 185-191

²⁸ H. Da-Qian, J. Wen-Bao, J. Zhou, C. Can, L. Jia-Tong, and W. Hong-Tao, Applied Radiation and Isotopes, **112** (2016) 50 – 54.

La diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) apporte un contraste unique pour l'étude des réarrangements moléculaires et de l'auto-organisation dans ces systèmes organiques. De plus, les dynamiques de relaxation, essentielles à la compréhension des interactions faibles qui régissent les dispersions, ne peuvent être caractérisées à l'échelle des assemblages que par diffusion quasi-élastique des neutrons (QENS).

Dans le domaine du traitement des effluents, la flottation ionique basée sur la formation d'une **mousse à l'aide d'un tensioactif bio-sourcé** est une alternative plus qu'intéressante [29]. Cette technique de séparation et d'extraction repose sur l'adsorption des polluants à l'**interface liquide-gaz** (c'est-à-dire à la surface des bulles de la mousse). De manière plus générale, l'étude des processus survenant aux **interfaces solide-liquide** à la surface de matériaux denses ou au sein de milieux confinés est d'intérêt pour prédire par exemple les procédés d'extraction (voir Figure 16 illustrant une extraction entre deux phases, avec caractérisation de l'organisation des molécules extractantes), de séparation membranaire, ou encore l'évolution des déchets nucléaires en condition de stockage géologique.

Enfin, dans le domaine de la **décontamination des sols**, le matériau poreux biochar, produit à partir de biomasse et que nous avons déjà mentionné plus haut, agit comme un sorbant spécifique de contaminants organiques.

Les techniques de diffusion neutronique sont fondamentales dans ces domaines : la diffusion aux petits angles (SANS) et la réflectométrie de neutrons sont les seules techniques offrant le contraste qui permet de déterminer sans ambiguïté l'organisation de solvants organiques dans des matériaux poreux ou aux interfaces.

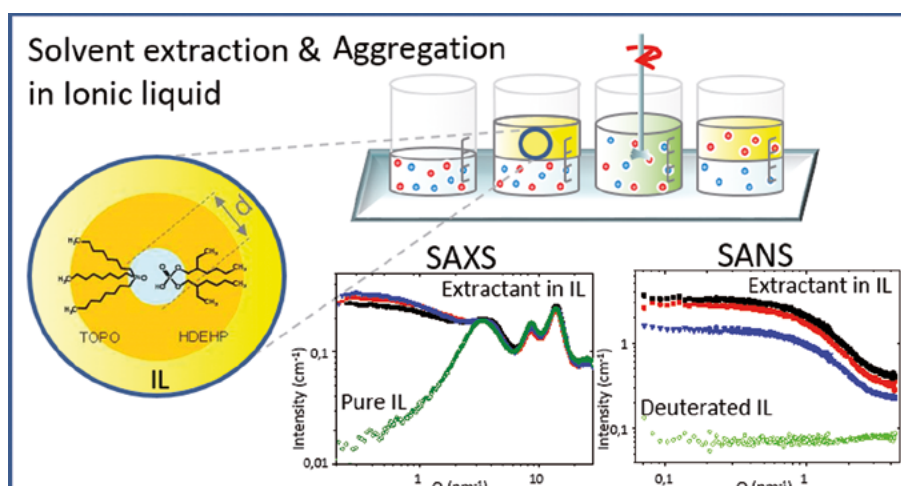


Figure 16 : Organisation supramoléculaire de l'extractant HDEHP/TOPO dans le liquide ionique [Omim][NTf₂], fortement différente de celle observée avec un diluant habituel et essentielle aux propriétés d'extraction [30].

1.2.4 Transports

Comme cela a été discuté auparavant, les techniques neutroniques permettent de progresser dans la conception des batteries et des technologies de l'hydrogène, deux composantes centrales d'une économie décarbonée et en particulier des transports électrifiés.

Un autre aspect important des transports concerne la résistance et l'allègement des structures des véhicules.

²⁹ T. Sukhbaatar, S. Dourdain, Turgis R., Rey J., Arrachart G., Pellet-Rostaing S., Chem. Comm. **51** (2015) 15960-15963.

³⁰ J. Lamolinarie J., Dollet B., Bridot J. L., Bauduin P., Diat O., Chiappisi L., Soft Matter **18** (2022) 8733-8747.

Grâce aux techniques de diffraction et de diffusion de neutrons aux petits angles (SANS), de nouveaux alliages métallurgiques peuvent être caractérisés.

Des alliages de type ODS (Oxide Dispersion Strengthened) avec des inclusions nanométriques d'oxydes ou de nitrures, de nouveaux alliages de titane, ou encore des alliages à mémoire de forme sont caractérisés par diffusion de neutrons. Il est aussi possible d'étudier de nouvelles méthodes de fabrication : stir welding, shot peening, laminage, compactage à chaud, impression 3D, etc. (voir Figure 17).

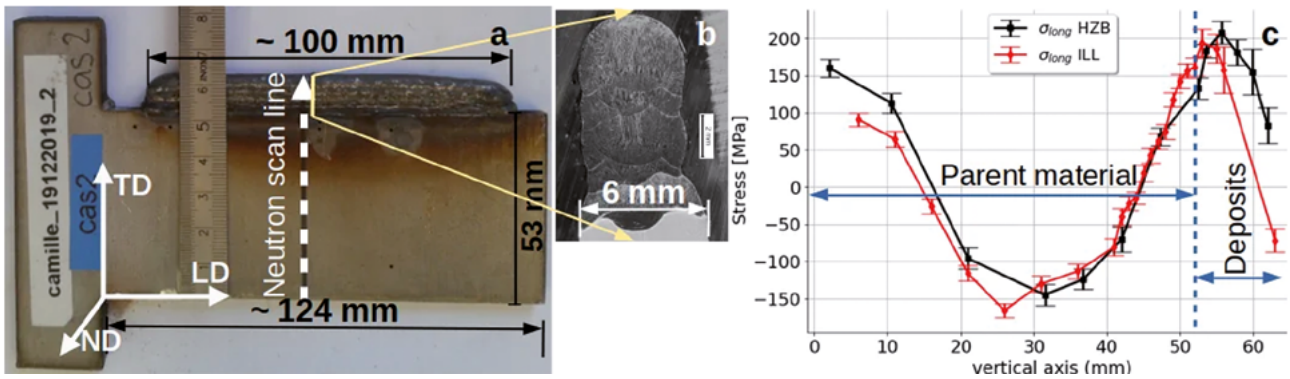


Figure 17 : La technique WAAM (Wire + Arc Additive Manufacturing) est une technique de dépôt additive. (a) Échantillon de 5 couches déposées sur le matériau parent, (b) distributions de contraintes longitudinales le long de la ligne pointillée blanche mesurées par diffraction de neutrons [31].

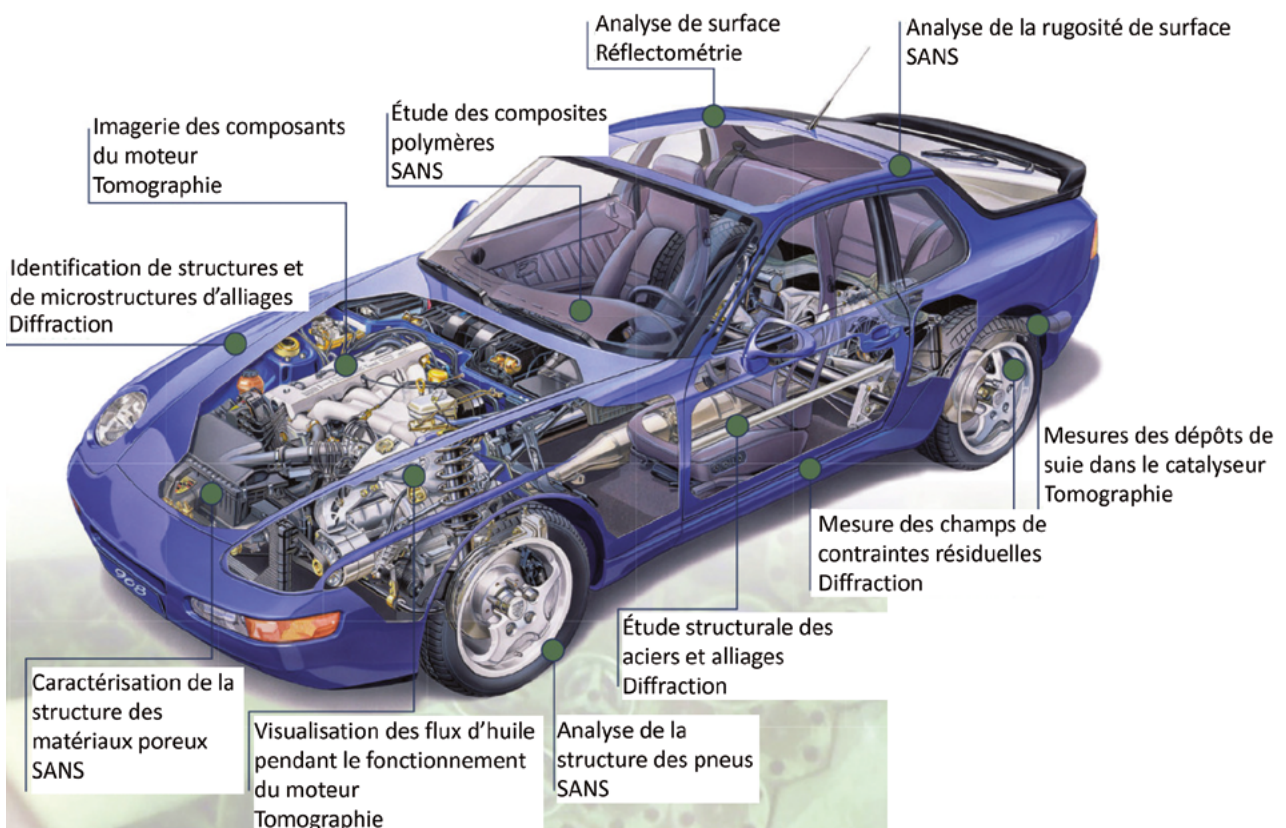


Figure 18 : Les techniques neutroniques sont utilisées pour étudier une multitude de thématiques liées à l'industrie automobile. Adapté de [32].

³¹ C. Cambon et al, Materials Today Communications **33** (2022) 104235.

³² Neutrons for building a car, Budapest Neutron Center :

<https://www.ceric-eric.eu/wp-content/uploads/2017/10/NeutronsForBuildingAcar.pdf>

Les techniques neutroniques telles que la diffraction, la mesure du champ de contraintes et la diffusion aux petits angles (SANS) sont aussi utilisées pour **vérifier l'intégrité de matériaux constitutifs** de structures telles que les pièces de **structures clés** (trains d'atterrissage, longerons d'avion, roues de train...).

L'intégrité des aubes de turbine est au cœur de chaque moteur aérospatial ou turbine à gaz terrestre en fonctionnement. Dans les environnements les plus exigeants, elles sont coulées sous forme de monocristaux. Alors que **l'imagerie neutronique** traditionnelle est un excellent outil pour le contrôle non destructif à la recherche de fissures ou de matériau résiduel du cœur, elle est insensible aux variations des propriétés cristallographiques. Par **radiographie neutronique couplée à une méthode de type Laue**, l'imagerie neutronique sonde les variations d'orientation des cristaux. En quelques secondes, une croissance dendritique différente dans deux aubes de turbines industrielles peut être observée (voir Figure 19).

Le rayonnement neutronique est le seul à pouvoir traverser des épaisseurs suffisantes pour de telles caractérisations.

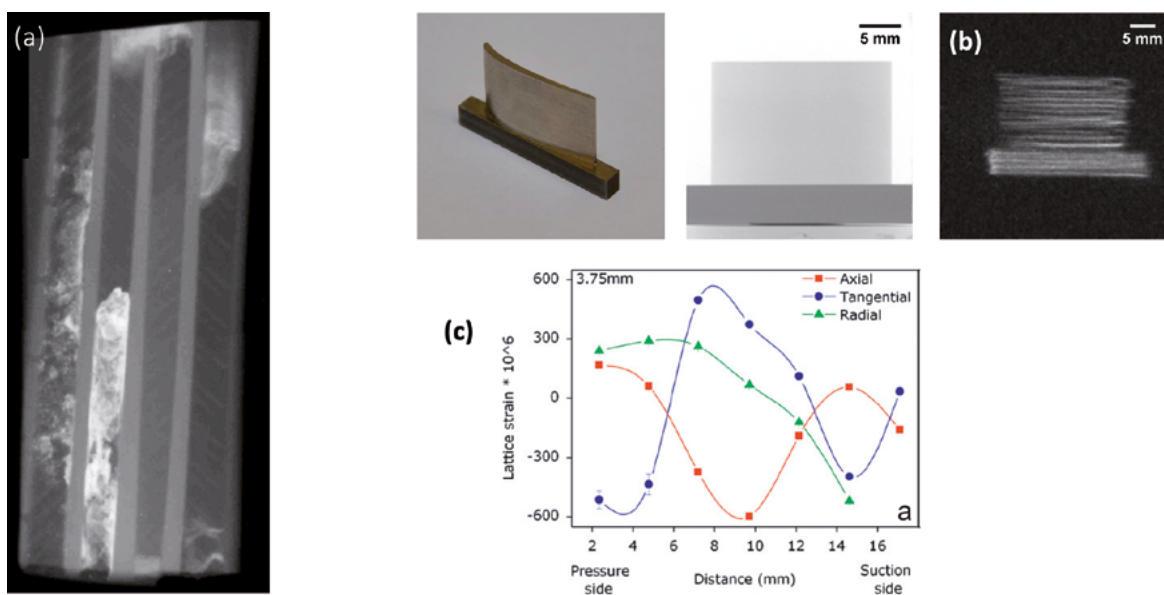


Figure 19 : Différentes techniques neutroniques sont utilisées pour étudier les aubes de turbines. La radiographie permet de contrôler que les canaux de refroidissement ne sont pas bouchés. L'imagerie par diffraction permet de voir la texture cristallographique. Les mesures de contrainte permettent de quantifier l'état de stress à différentes positions dans l'aube.

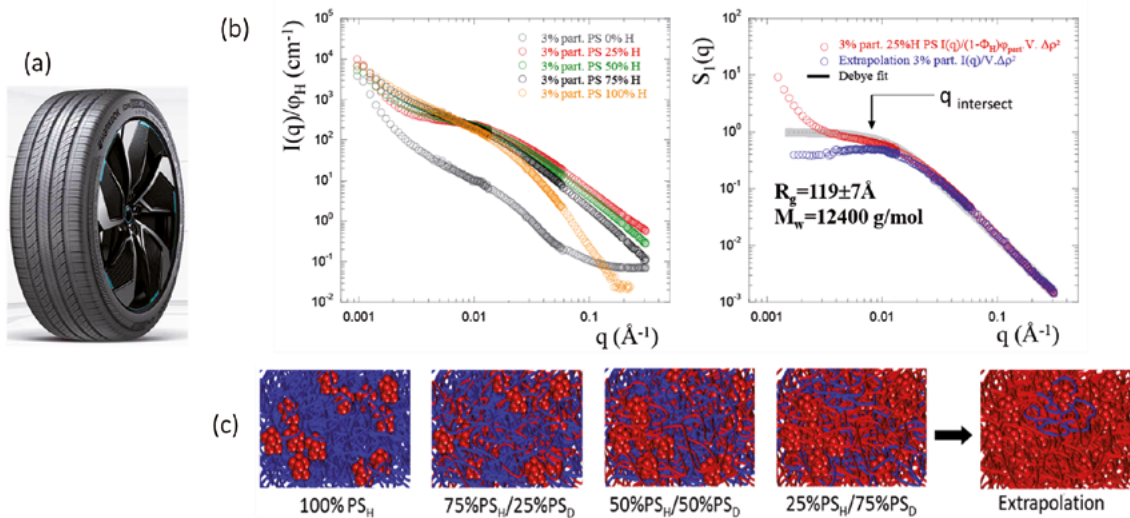


Figure 20 : (a) Pneu développé spécialement pour les voitures électriques (iON Evo AS). Le mélange de gomme réduit la résistance au roulement. L'ajout de nanoparticules de silice permet d'augmenter la rigidité latérale de 25%, permettant un meilleur maintien des véhicules électriques généralement plus lourds. (b) Mesures de diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) permettant d'obtenir des informations sur différents mélanges polymères-nanoparticules. (c) Conformation des chaînes de polymères autour de nanoparticules déterminées à partir de mesures utilisant les techniques de variations de contraste [33].

Les matériaux composites se trouvent aussi bien dans les **matériaux mixtes polymères – nanoparticules** que dans les **alliages métalliques de nanoparticules**. Dans les recherches en cours, on peut par exemple citer l'amélioration des performances des pneus par l'ajout d'inclusions nanométriques de silice qui modifient leur comportement mécanique (voir Figure 20).

L'étude de l'organisation à l'échelle nanoscopique de ces matériaux bénéficie des variations de contrastes par substitution isotopique, possible uniquement avec la diffusion des neutrons. Seule la combinaison de la diffusion de neutrons et de rayons X aux petits angles permet de distinguer l'organisation des particules de celle des chaînes de polymères pour comprendre les mécanismes de renforcement mécanique des caoutchoucs par les inclusions de nanoparticules.

1.2.5 Santé & Bien-être

Les techniques de diffusion neutronique permettent d'adresser différentes problématiques majeures des technologies de la santé. En particulier, le développement récent de laboratoires de deutération permettant l'expression de macromolécules deutérées a entraîné des avancées exceptionnelles dans l'étude des systèmes biologiques grâce à la variation de contraste entre différentes composantes de ces systèmes.

Il est ainsi possible d'étudier les conformations des molécules marquées dans des environnements complexes, similaires à ceux observés dans les cellules, par diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) et réflectométrie, ainsi que leurs dynamiques internes et de diffusion par diffusion quasi-élastique de neutrons (QENS).

Ce type d'études permet de comprendre les **interactions entre macromolécules biologiques telles que les protéines ou les virus et les cellules**, étape préalable nécessaire à la compréhension de maladies et donc à la conception de nouveaux médicaments.

La réflectométrie de neutrons a par exemple permis d'élucider **l'interaction entre la protéine Spike du COVID-19 et la membrane extracellulaire** (Figure 21) ainsi que les **interactions de protéines avec les membranes cellulaires dans des maladies telles que la myopathie ou la maladie d'Alzheimer** (Figure 22).

³³ A.-S. Robbes, F. Cousin, F. Meneau, and J. Jestin, *Macromolecules* **51** (2018) 6, 2216–2226.

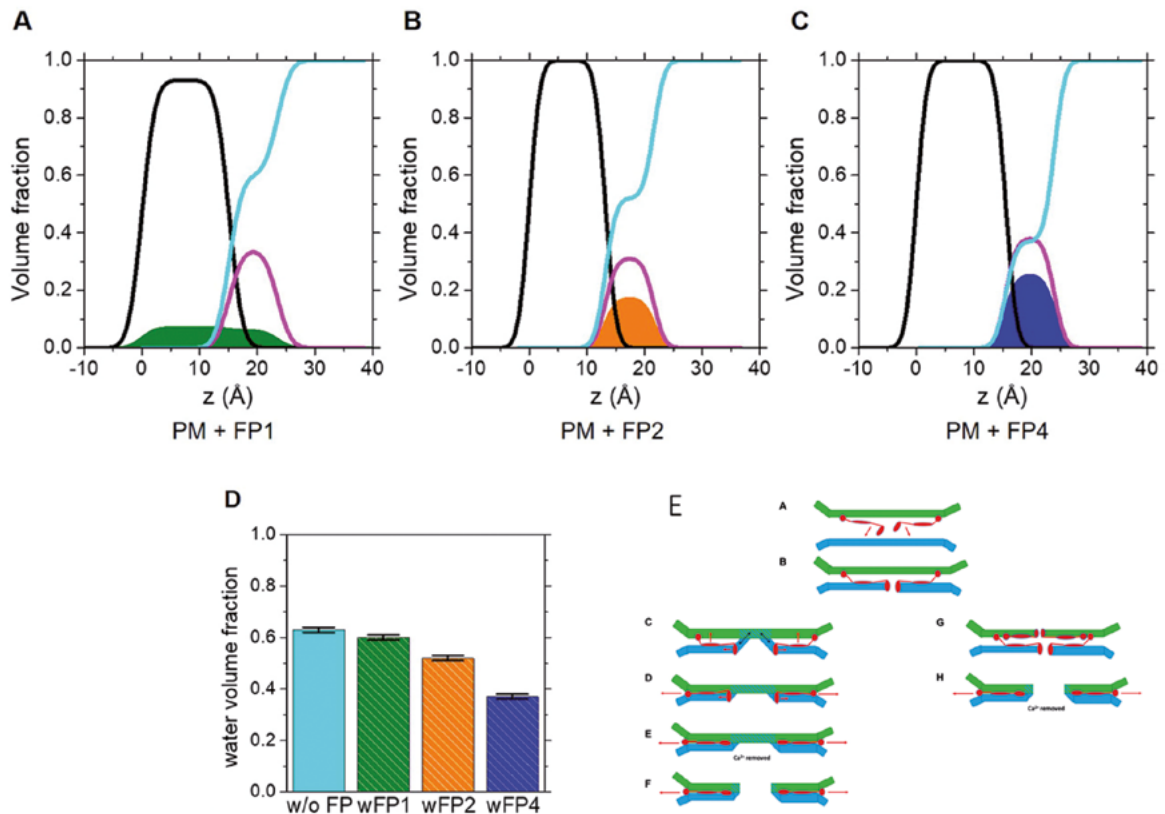


Figure 21 : (A-C) Fraction volumique de monocouches et de bicouches de membranes plasmiques en interaction avec 3 différents peptides de fusion du SARS-CoV-2. (D) Fraction volumique d'eau dans les membranes sans et avec les 3 peptides étudiés. (E) Proposition de mécanisme de fusion entre SARS-CoV-2 (vert) et la membrane de la cellule hôte (bleu). Adapté de [34].

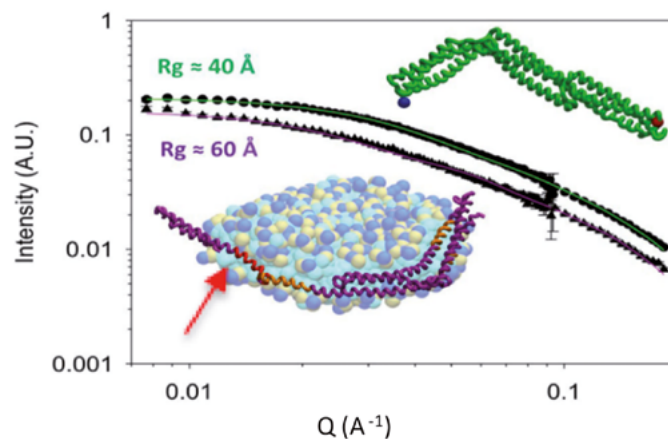


Figure 22 : La DNPA/SANS et la réflectivité de neutrons permettent d'étudier l'interaction de protéines avec les membranes cellulaires liées à certaines maladies comme la myopathie ou la maladie d'Alzheimer.

La **délivrance de médicaments** est un domaine dans lequel la diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) peut particulièrement contribuer. Les principes actifs peuvent être encapsulés afin d'être délivrés et relargués dans les meilleures conditions (au bon endroit au bon moment dans le corps). **L'encapsulation** (ou le confinement dans une matrice adaptée) est importante dans le domaine des matériaux biocompatibles. **L'utilisation du marquage isotopique H/D** peut apporter de précieuses informations. La figure 23 présente un exemple de développement de nouveaux systèmes pour l'administration transtympanique d'un anti-oxydant en vue d'une implantation cochléaire [35].

³⁴ A. Santamaría et al, J. Am. Chem. Soc. **144** (2022) 2968–2979.

³⁵ Céline Jaudouin, Thèse de l'Université Paris-Saclay en Pharmacologie et Biopharmacie. Prix de Thèse 2022 de la Société Française de Neutronique.

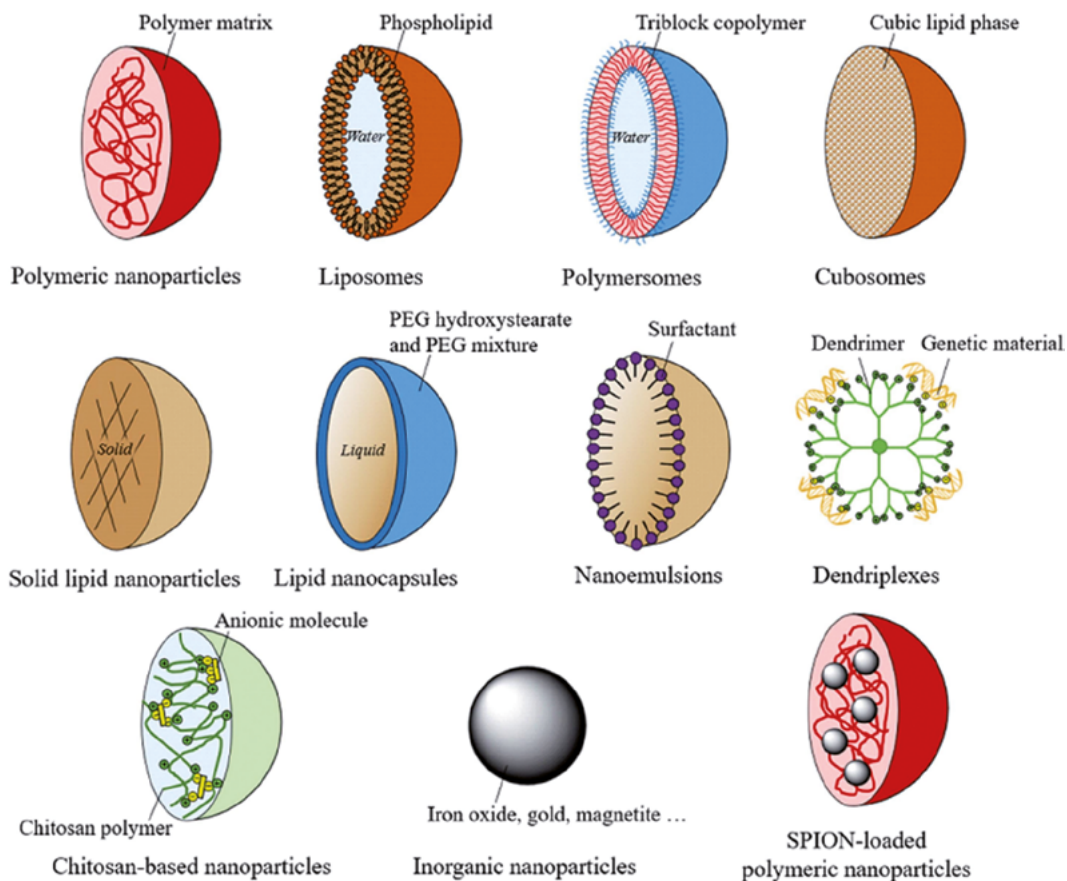


Figure 23 : Différents types de « nanocarriers » permettant la délivrance de médicaments (adapté de [36]). Les techniques de SANS/DNPA sont particulièrement puissantes pour étudier la structure interne de ces objets grâce aux techniques de marquage isotopique (substitution d'une composante hydrogénée par une composante deutérée). La densité radiale et/ou les molécules ou les surfactants adsorbés sur ces objets peuvent être quantifiés.

Enfin, un autre exemple de matériau lié au domaine de la santé est celui de la **fluorine** ($\alpha\text{-F}_2$), qui est utilisée dans de nombreux produits tels que le **dentifrice, des médicaments mais aussi le téflon et les LEDs**. Il s'agit cependant d'un élément extrêmement agressif et hautement toxique. La détermination de sa structure cristalline par diffraction de rayons X avait jusqu'à maintenant conduit à des explosions.

Seule la diffraction de neutrons peut être utilisée pour résoudre la structure de cet échantillon explosif !

Les neutrons étant une sonde peu invasive, des mesures de diffraction de neutrons ont récemment conduit à une **détermination précise de sa structure** avec une précision 70% meilleure que le modèle actuellement utilisé. Ces paramètres sont importants pour réaliser des modélisations dans de nombreuses applications.

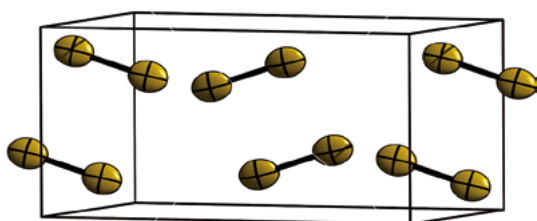


Figure 24 : La structure cristalline de $\alpha\text{-F}_2$ stable en-dessous de 45.6 K, est un système monoclinique appartenant au groupe d'espace $C2/c$, avec des longueurs de liaisons F-F- de 140,4 pm (adapté de [37]).

³⁶ C. Jaudouin et al, International Journal of Pharmaceutics **592** (2021) 120038.

³⁷ I. Sergeï et al, Chem. A Eur. J. **25** (2019) 3310-3317.

Les techniques de diffusion neutronique sont aussi beaucoup utilisées pour répondre à des problématiques dans des domaines relevant du « bien-être », tels que **la formulation de produits cosmétiques** ou le bon fonctionnement des seringues médicales, et de **l'industrie agroalimentaire**, comme l'étude de la lyophilisation, de la cuisson de la viande ou du pain, ou encore de la conservation des poudres déshydratées (par ex. les poudres de lait). Ces problématiques émanent donc d'un secteur industriel très vaste.

1.3 Neutrons pour la recherche fondamentale

La diffusion neutronique est aussi primordiale pour répondre à de nombreuses questions de recherche fondamentale. Cette dernière a pour objectif principal la compréhension des phénomènes et se justifie en elle-même du fait qu'elle élargit le champ de nos connaissances. Il convient cependant de se rappeler que la recherche la plus abstraite peut parfois déboucher sur des applications majeures : ainsi, le laser, mis au point en 1960, omniprésent dans l'industrie et utilisé en chirurgie, est un pur produit de la mécanique quantique ! Nous présentons dans ce paragraphe, de manière non-exhaustive, l'apport actuel des neutrons en recherche fondamentale, en mentionnant le cas échéant un lien avec certaines applications envisagées. Les domaines d'études vont des systèmes d'électrons fortement corrélés tels que les systèmes magnétiques ou supraconducteurs à la chimie du solide et à la biophysique.

1.3.1 Magnétisme et supraconductivité

Le **magnétisme** en matière condensée va bien au-delà du développement de matériaux magnétiques pour des applications données puisqu'il est aussi un terrain de prédilection pour revisiter, voire **aller au-delà de certains paradigmes comme la théorie des transitions de phase ou la théorie des liquides de Fermi**.

C'est le cas notamment des **nouveaux supraconducteurs ou des systèmes dits Kondo**. Les observations mettent en exergue le rôle des interactions coulombiennes entre électrons, rassemblées sous le terme de « corrélations ». Dans cet esprit, les efforts de recherche tentent d'élucider les mécanismes microscopiques à l'origine des propriétés fascinantes des supraconducteurs dits non-conventionnels. Ces matériaux, supraconducteurs à haute température critique, tels que les oxydes de cuivre supraconducteurs ou les nouveaux supraconducteurs à base de fer (pnictures et séléniures), sont caractérisés par des diagrammes de phases complexes où la **supraconductivité coexiste ou entre en compétition avec d'autres états de la matière** (ondes de densité de spin ou de charge, ordres orbitaux, états électroniques nématiques, ordres de boucles de courants) [25]. Le couplage des électrons avec différents types de modes magnétiques bosoniques peut être à l'origine de mécanismes d'appariement supraconducteur inédits et/ou d'états métalliques en rupture totale avec la théorie des liquides de Fermi qui prévaut pour les métaux usuels.

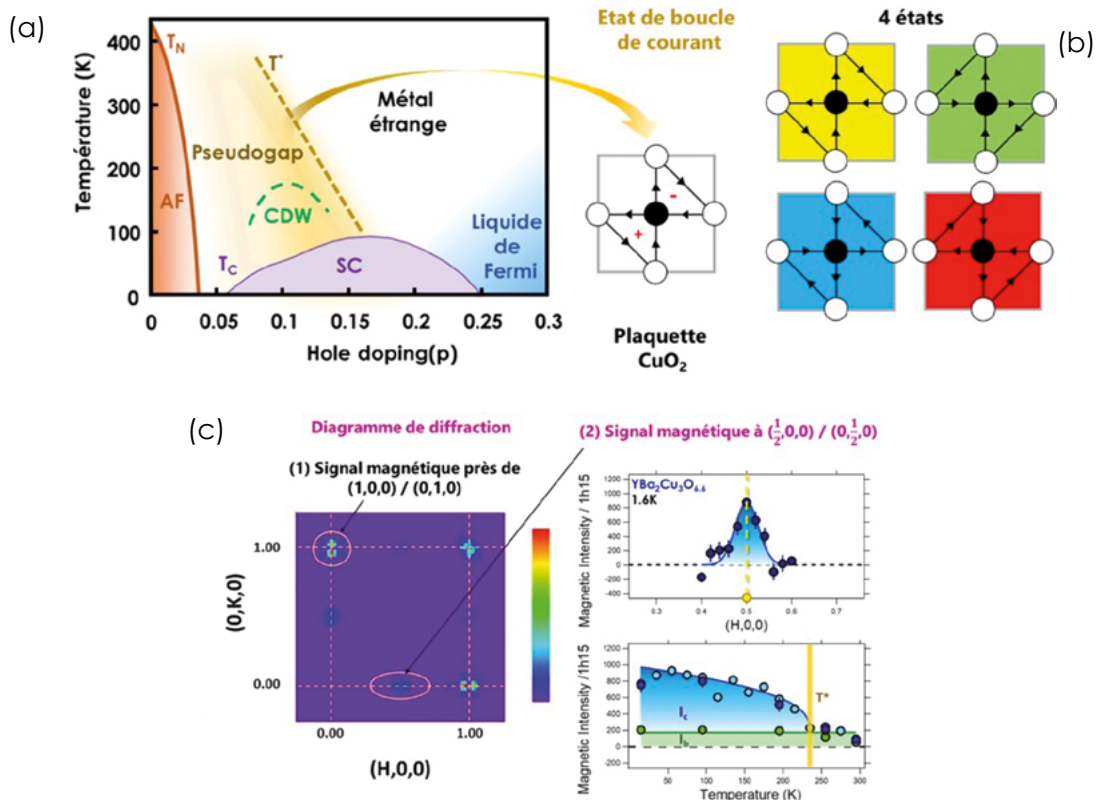


Figure 25 : (a) Diagramme de phase générique des cuprates supraconducteurs, b) Courants circulant entre les ions Cu (●) et O (○) donnant lieu à deux boucles de courant, tournant respectivement en sens horaire et antihoraire. Les 4 états dégénérés de boucles de courant, ici identifiés par 4 couleurs distinctes. (c) Image de diffraction magnétique et mesures de diffraction au vecteur d'onde $(0,5; 0; 0)$ à 1,6 K mettant en évidence un signal magnétique qui émerge lorsque le système entre dans la phase PG à T^* . Adapté de [38].

Plus généralement, la recherche dans ce domaine porte une partie de ses efforts sur l'étude des « matériaux quantiques ». L'enjeu est de découvrir et de décrire de nouvelles phases de la matière, aux propriétés remarquables ou non conventionnelles, et parvenir, à terme, à exploiter ces phénomènes purement quantiques et sans équivalent classique, comme par exemple l'intrication. Deux exemples de nouveaux états magnétiques de la matière sont présentés dans la suite : les liquides de spin et les boucles de courants nanoscopiques.

Les liquides de spin [39,40]. Il s'agit de matériaux dont l'état magnétique reste désordonné, mais néanmoins corrélé sur de courtes distances, à la manière des corrélations de position dans un fluide. Ainsi, certains oxydes magnétiques découverts ces dernières années, refroidis à des températures proches du zéro absolu, restent dynamiques sans aucune rupture avec la phase paramagnétique haute température. L'état fondamental est la superposition quantique de configurations dégénérées et forme un état massivement intriqué. Cette propriété confère aux états excités une nature très particulière, décrite en termes de particules portant des nombres quantiques fractionnaires.

La diffusion des neutrons est la technique de choix pour étudier ce phénomène.

En effet, le neutron porte un spin $\frac{1}{2}$ et peut donc créer une excitation de spin 1 (de $-\frac{1}{2}$ à $+\frac{1}{2}$), ce qui revient à retourner un spin, quelque part, pour l'une des configurations de la superposition. Comme toutes les configurations ont la même énergie, ce « défaut » initial peut être propagé

³⁸ ND. Bounoua et al, Comm. Phys. **5** (2022) 268.

³⁹ C. Lacroix, P. Mendels, and F. Mila, eds., *Introduction to Frustrated Magnetism* (Springer-Verlag, Berlin, 2011).

⁴⁰ M. J. P. Gingras and P. A. McClarty, Rep. Prog. Phys. **77** (2014) 056501.

sous la forme de deux sous-défauts mais attachés à d'autres configurations, éloignant éventuellement les sous-défauts jusqu'à l'infini. Le défaut initial de spin 1 se divise ainsi en deux portant chacun un spin $\frac{1}{2}$ – et que l'on appelle **spinons**. C'est le phénomène de déconfinement ou de « fractionalisation ». La conséquence expérimentale la plus forte de cette propriété est que **le spectre des excitations magnétiques d'un liquide de spin forme un continuum, que l'on peut mesurer uniquement par diffusion inélastique de neutrons** (voir Figure 26). Entre l'état fondamental et ce continuum d'excitations, il peut, ou non, exister un gap d'énergie. Ces deux situations caractérisent des liquides aux propriétés topologiques distinctes et peuvent être distinguées là encore par diffusion inélastique des neutrons en mesurant directement la valeur de ce gap.

Enfin, dans certains matériaux unidimensionnels ou quasi-unidimensionnels, ces excitations fractionnaires contribuent au transport de la chaleur donnant lieu à des valeurs de conceptions thermiques spectaculaires pouvant avoir des applications dans le domaine de l'électronique de puissance pour l'évacuation de la chaleur vers des puits thermiques [41].

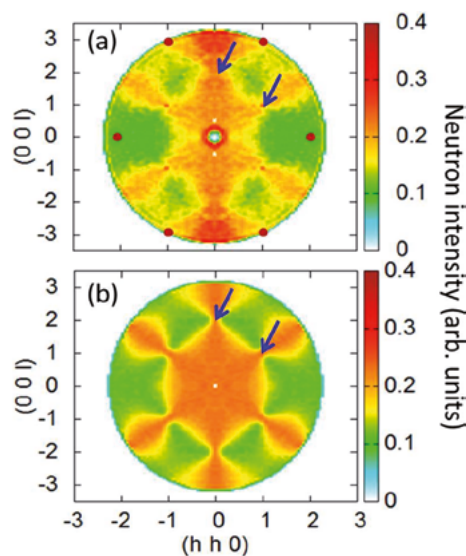


Figure 26 : Signal magnétique dans $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, un cas particulier de glace de spin, mesuré par diffusion inélastique des neutrons (a) et obtenu par simulation numérique (b). Dans certains liquides de spins, ici les « glaces de spin », l'état fondamental est constitué d'une superposition quantique de configurations dégénérées où certaines entités géométriques, en l'occurrence des tétraèdres, portent deux spins qui pointent vers l'intérieur et deux spins qui pointent vers l'extérieur. Ces systèmes ne présentent pas d'ordre à grande distance, donc sans rupture avec la phase paramagnétique haute température, mais des corrélations magnétiques à courte portée. Cette organisation locale donne lieu, dans l'espace réciproque, à un signal particulier caractérisé par des « points de pincement », indiqués ici par des flèches bleues. Adapté de [42].

Les boucles de courants nanoscopiques. Leurs signatures sont observées par exemple dans les cuprates [43] ou les iridates [44]. Ces boucles constituent des états **magnéto-électriques** qu'il serait possible de contrôler par un champ magnétique ou électrique. Du point de vue fondamental, ces états pourraient jouer un rôle clé dans l'établissement de la phase dite de « pseudo-gap » qui domine le diagramme de phase électronique des cuprates supraconducteurs à hautes températures critiques et que l'on pense jouer un rôle clé dans l'émergence de la supraconductivité [38]. Au-delà des cuprates, l'existence de ces objets semble générique à d'autres

⁴¹ C. Hess, Physics Reports, **811** (2019) 1-38.

⁴² S. Petit et al, Nature Phys. **12** (2016) 746.

⁴³ P. Bourges, et al., C.R. Phys **22**,1 (2022)

⁴⁴ J. Jeong, J et al., Nature communications, **8**(1) (2017) 1-6.

matériaux quantiques (liquides de spins [45], nouveaux supraconducteurs à structure Kagomé [46], multiferroïques [47], etc.). Du point de vue des applications, ces états particuliers pourraient fournir un nouveau jeu de systèmes à deux niveaux pour **encoder l'information quantique** voire comprendre les effets de décohérence en étudiant leurs interactions. Dans ce contexte, des travaux récents dans des systèmes à magnétorésistance colossale [48] et supraconducteurs [46] démontrent la possibilité de contrôler les états **magnéto-électriques** de ces objets via l'application d'un champ externe respectivement électrique ou magnétique.

Pour élucider tous les détails de ce magnétisme complexe, les techniques de diffusion des neutrons constituent une sonde irremplaçable, apportant les meilleures sensibilités et résolutions à l'échelle atomique : les mesures de diffraction sur poudre et monocristaux caractérisent simultanément les structures nucléaire (groupe d'espace, taux d'occupation des sites) et magnétique (périodicité, orientation des moments).

En faisant varier différents paramètres (concentration, température T , champ magnétique H , pression), on établit les diagrammes de phase, qui font apparaître les transitions sans ambiguïté. **Pour étudier les fluctuations ou les excitations de spin et leur couplage éventuel avec le réseau, les mesures de diffusion inélastique (spectromètre neutrons trois axes ou temps de vol) sont indispensables, là encore par leur résolution en énergie inégalée.** On peut alors en déduire le délicat équilibre des interactions d'échange qui se cache derrière la complexité des structures magnétiques. **Les mesures d'écho de spin permettent en complément l'étude des fluctuations lentes au voisinage d'une transition (phénomènes critiques). Enfin, les mesures de diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) permettent de visualiser la structure de gros objets magnétiques (vortex, skyrmions, polarons magnétiques) et leur organisation à très longue période, ainsi que les structures modulées (hélices, coniques, cycloïdes),** qui ont souvent une stabilité voisine dans les diagrammes de phases (T , H). Pour toutes ces techniques, l'utilisation des neutrons polarisés en spin est particulièrement utile voire fondamentale. Elle permet de séparer les modes magnétiques ou hybrides des modes de phonons et de déterminer la chiralité sans ambiguïté.

1.3.2 Chimie et matériaux

Les **alliages à haute entropie** – HEA, High Entropy Alloys – est une nouvelle classe de matériaux cristallins qui se caractérise par des variations aléatoires dans la composition chimique de chaque maille qui n'altèrent cependant pas l'ordre cristallin. Il s'agit donc de systèmes géométriquement cristallins, constitués de mailles élémentaires simples empilées de façon régulière dans tout l'espace, mais dont la « décoration intérieure » ne se répète pas d'une cellule à l'autre : l'occupation de chaque site de chaque maille par des atomes est laissée au hasard, seules les proportions globales de chacune des espèces chimiques présentes étant contrôlées lors de la synthèse du matériau.

À l'instar des hydrures métalliques, ces matériaux sont considérés comme potentiels candidats pour le stockage d'hydrogène sous certaines conditions de pression et température [49].

D'autre part, ces matériaux au désordre partiel présentent des propriétés thermiques qui relèvent à la fois des cristaux et des verres, pourtant très différents en la matière. Comprendre le **transport de la chaleur dans les solides** est un des défis majeurs de la recherche d'aujourd'hui, car la maîtrise de ces transferts est au cœur de la conception de nouveaux matériaux efficaces pour la récupération d'énergie. Le comportement thermique des systèmes cristallins d'une part et des systèmes complètement désordonnés que sont les verres d'autre part est aujourd'hui bien établi. Ces nouveaux matériaux, découverts depuis une vingtaine d'années, se placent exactement à mi-chemin entre l'ordre quasi-parfait des cristaux et les structures complètement

⁴⁵ D. Bounoua, D et al., Comm. Phys. **3**(1). (2020) 1-10.

⁴⁶ C. Guo et al., Nature **611** (2022) 461–466.

⁴⁷ A. Urru et al., arXiv:2212.06779 (2022).

⁴⁸ Y. Zhang et al., Nature **611** (2022) 467–472.

⁴⁹ L. Laversenne, V. Nassif, G. Zepon, et al., J. Alloys Comp. **835** (2020) pp.155376.

amorphes des verres. Le comportement des vibrations quantiques du réseau géométrique cristallin (phonons) de ce nouveau type de matériaux reflète le désordre chimique de l'alliage. En effet, ces phonons se propagent comme dans un cristal ordonné mais le désordre dans la répartition des interactions augmente très fortement l'atténuation de ces ondes, et ainsi empêche leur propagation sur un grand nombre de mailles cristallines, freinant ce faisant la propagation de la chaleur. Enfin, le désordre chimique perturbe également le **transport des électrons libres**, ce qui abaisse non seulement la **conductivité électrique** mais contribue également à réduire encore davantage la **conductivité thermique**. Ce dernier point, combiné avec la possibilité de varier de façon ad hoc la composition atomique globale de ces alliages, rend ces matériaux potentiellement intéressants pour des applications en thermoélectricité [50].

La diffraction neutronique est la meilleure technique pour localiser l'hydrogène dans ces matériaux, alors que seule la diffusion inélastique de neutrons permet la caractérisation des excitations avec la résolution suffisante pour la compréhension des transferts de chaleur.

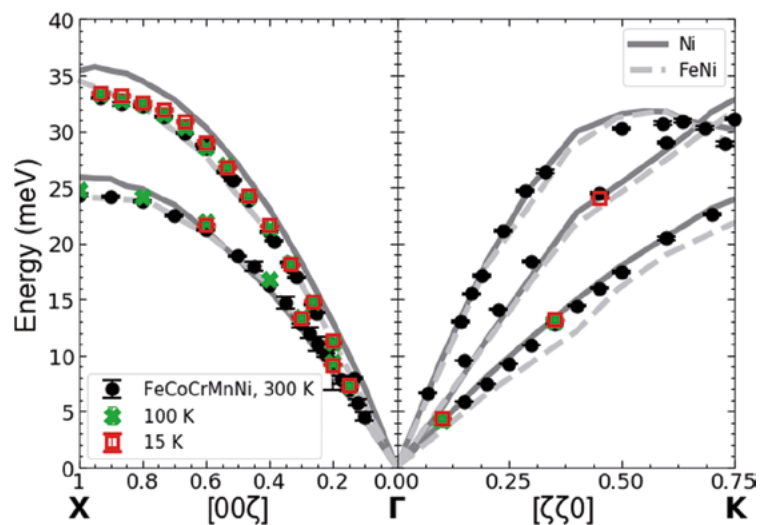
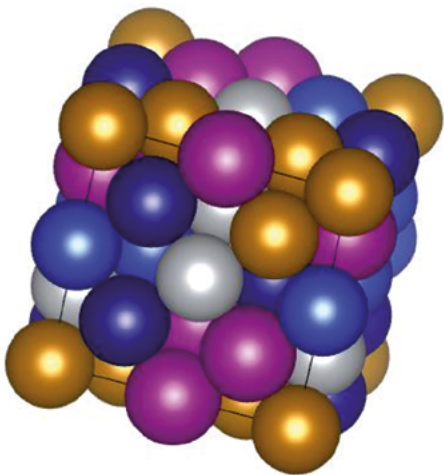


Figure 27 : Représentation schématique d'un alliage à haute entropie et courbe de dispersion de phonons par diffusion inélastique de neutrons, permettant de comprendre les mécanismes de transport de chaleur dans ces systèmes intermédiaires entre amorphes et cristallins. Adapté de [50].

1.3.3 Polymères – liquides complexes

La physique des polymères est particulièrement riche et de nombreuses questions autour par exemple de **l'adhésion, la friction, et le renforcement mécanique** trouvent des réponses grâce aux techniques de diffusion neutronique, qui permettent des investigations structurales et la détermination des processus de diffusion à l'échelle microscopique.

Un aspect essentiel des assemblages polymères-nanoparticules en nanocomposites est le **contrôle des nanostructures via les interactions**, comme illustré en Figure 28, modulables elles-mêmes par des (petites, ou macro-) molécules (recouvrement, pontage, etc.). De telles structures, qu'elles soient en suspension ou en volume (sans solvant, comme dans les pièces de caoutchouc), trouvent de nombreuses applications. D'autre part, des questions plus fondamentales sur la présence d'hétérogénéités dynamiques, de leur rôle dans les propriétés macroscopiques (électriques, optiques, mécaniques...), et enfin de leur contrôle sont abordées, en particulier celles des transitions vitreuses aux abords des (nano)interfaces.

⁵⁰ Turner, S.R., Pailhès, S., Bourdarot, F. et al. Nat Commun **13** (2022) 7509.

L'exploitation des phases nanostructurées dans des mélanges de solvants simples (microémulsions, effet Ouzo...) consiste en la fabrication de nanomatériaux ou encore la formulation de solvants aux propriétés particulières, mais elle passe avant tout par une **compréhension fondamentale des interactions qui régissent la structure et les dynamiques moléculaires**.

La diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) est une technique incontournable dans le domaine des matériaux nanocomposites du fait du contraste isotopique H/D offert par les neutrons.

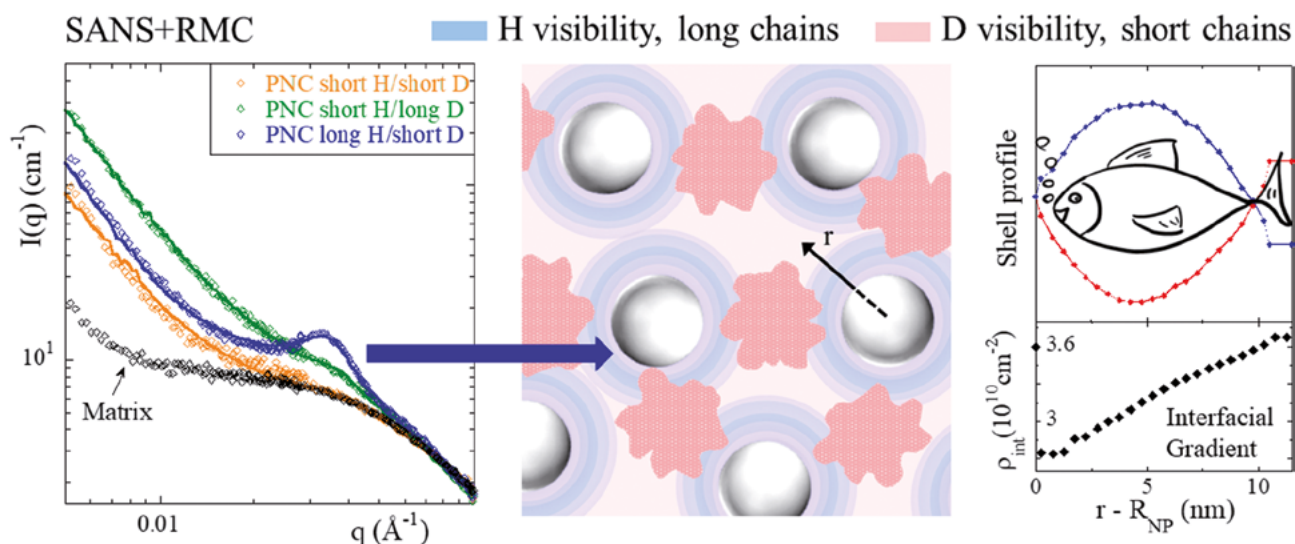


Figure 28 : Mise en évidence, par diffusion de neutrons aux petits angles (SANS), d'une ségrégation des chaînes de polymères dans le volume et à l'interface nanoparticules de silice-matrice polymère. L'organisation à l'échelle nanométrique des polymères et des billes de silice dans ce nanocomposite est à l'origine de nombreuses propriétés macroscopiques, notamment dynamiques. Adapté de [51].

1.3.4 Biophysique et systèmes biologiques

Les systèmes biologiques sont composés d'un nombre important d'éléments différents, organisés de manière hiérarchisée et dynamique. De ce fait, ils sont des structures spatio-temporelles très complexes. Comprendre l'organisation de leurs composants et les interactions entre ces derniers est fondamental pour en acquérir également une compréhension prédictive. Il faut pour cela caractériser la structure et l'organisation spatiale des différentes molécules, comment elles interagissent les unes avec les autres, ainsi que modéliser leur évolution dans l'espace et dans le temps.

Là encore, les propriétés spécifiques des neutrons, comme la possibilité de marquage offerte par le contraste isotopique H/D, vont permettre de déterminer la conformation d'une macromolécule au sein d'un complexe (voir Figure 29), mais également en solution dans un environnement macromoléculaire dense tel qu'on l'observe dans les conditions physiologiques [52]. Le développement récent des laboratoires de deutération et notamment la possibilité d'expression de molécules biologiques dans des bactéries ou des levures cultivées dans l'eau lourde ont permis d'atteindre les quantités de molécules deutérées nécessaires à la réalisation d'expériences par diffusion de neutrons.

⁵¹ ACS Appl. Mater. Interfaces **13** (2021), 30, 36262–36274

⁵² H. X. Zhou et al Ann. Rev. of Biophys. 37 (2008) 375-397 ; Le Coeur et al Phys. Rev. E **79** (2009) 031910.

La motivation principale pour réaliser des mesures de cristallographie par diffusion de neutrons et non de rayons X est la possibilité de localiser précisément des atomes d'hydrogène. Cette technique est donc utilisée quand la connaissance du positionnement des protons est cruciale à la compréhension d'un mécanisme biologique, comme par exemple dans l'étude des réactions enzymatiques [53].

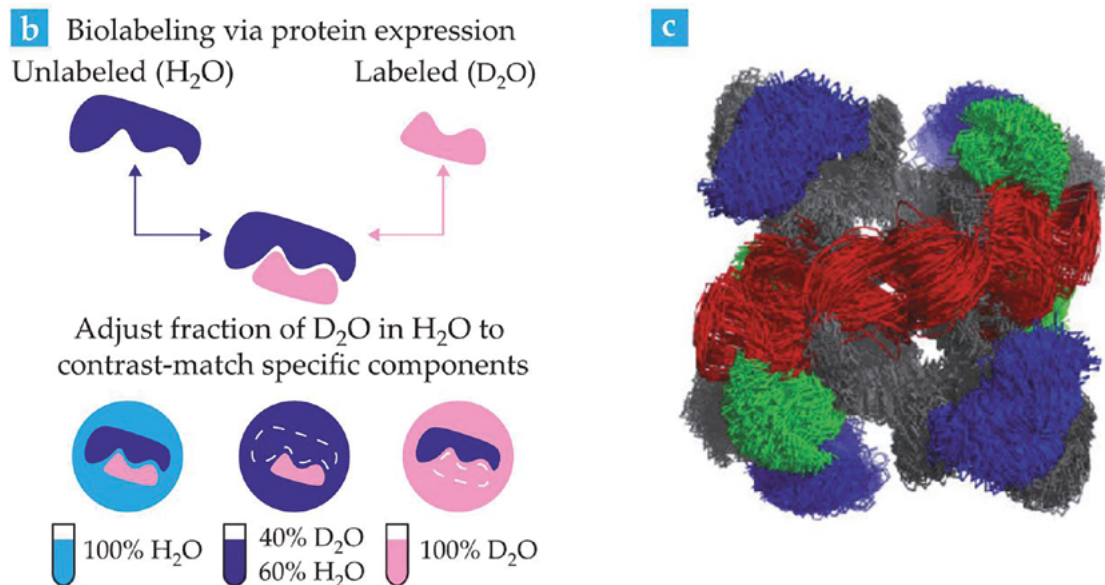


Figure 29 : Schéma de principe montrant comment, par la deutération sélective et la variation de contraste, on peut déterminer les conformations des différentes macromolécules biologiques dans un complexe. Adapté de [54].

Le contraste H/D est également utilisé pour l'étude des surfaces et interfaces par réflectivité de neutrons, permettant de caractériser les interactions entre protéines à la surface de membranes ainsi que l'insertion de protéines dans la membrane, une question centrale en biologie [55].

La diffusion inélastique des neutrons va quant à elle nous fournir des informations d'abord sur la dynamique interne des macromolécules, c'est-à-dire comment les différents domaines d'une protéine bougent les uns par rapport aux autres. À partir de ces données, on cherche à déterminer la fonction de la molécule. Ensuite, la diffusion inélastique nous permet de comprendre comment les molécules diffusent les unes par rapport aux autres en fonction de leurs interactions [56]. Cela permet de mieux comprendre les mécanismes biologiques au niveau cellulaire [57].

La diffusion de neutrons, en complémentarité avec d'autres techniques expérimentales, permet d'obtenir des informations sur la structure et la dynamique des systèmes biologiques sur de larges échelles spatiales et temporelles. Elle permet d'étudier :

- **la structure des macromolécules biologiques par diffusion des neutrons aux petits angles (SANS), elle seule permettant la localisation exacte des atomes d'hydrogènes ;**
- **les conformations des molécules en solution ainsi que la structure des complexes ;**
- **les interactions de surface par réflectivité ;**
- **la dynamique des molécules à des échelles intra et intermoléculaires, grâce au contraste isotopique H/D propre à la diffusion neutronique.**

⁵³ C. E. McVey et al J. Mol. Biol. **313** (2001) 139-150.

⁵⁴ D. P. Hoogerheide, Physics Today, **73** (6) (2020) 36-42.

⁵⁵ E. M. Jones et al, Biochemistry **51** (2012) 2539-2550.

⁵⁶ F. Roosen-Runge, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **108** (2011) 11815-11820.

⁵⁷ S. Longeville et al, Sci. Rep. **7** (2017) 10448.

1.3.5 Physique des particules

Certains domaines de la physique nucléaire bénéficient de la production de grandes quantités de neutrons froids ou très froids, c'est-à-dire avec des énergies très faibles (très inférieures au meV) et des longueurs d'ondes associées très grandes (jusqu'à des centaines d'Å). Ces neutrons permettent de réaliser des mesures de précision qui pourraient invalider le « Modèle Standard ».

Parmi ces études, on peut citer par exemple :

- La mesure d'un éventuel **moment dipolaire électrique du neutron** (EDM), qui est non nul dans les théories super-symétriques et qui pourrait expliquer le déséquilibre entre matière et anti-matière,
- La mesure **exacte** de la **durée de vie du neutron**, les mesures actuelles réalisées avec deux méthodes différentes donnant des valeurs divergentes.
- Le test de la loi de Newton sur des échelles de longueur très faibles (quelques μm) en observant les **états quantiques des neutrons dans le champ gravitationnel terrestre**.

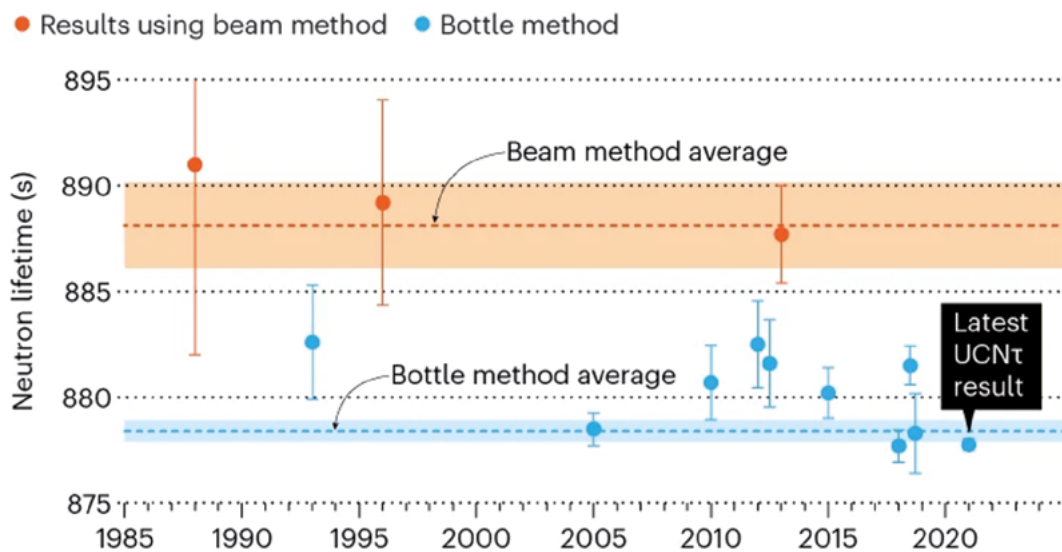


Figure 30 : Mesure de la durée de vie du neutron suivant deux méthodes différentes. Les deux résultats sont incompatibles. Adapté de [58].

⁵⁸ D. Castelvecchi, Nature **598** (2021) 549.

1.3.6 Physique nucléaire

La production de neutrons est indispensable à tous les processus impliquant une capture neutronique.

Il est capital d'avoir des données de section efficace de qualité des différents éléments et de leurs isotopes pour calculer les réactions avec les neutrons qui ont lieu par exemple dans les réacteurs, détecteurs, étoiles ou encore lors d'explosions nucléaires. Pour étudier les nouveaux réacteurs de fission (génération IV) et de fusion, mais aussi pour développer la **production de radio-isotopes**, il est nécessaire de continuer à améliorer les mesures de section efficace. De nombreux pays et l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) envisagent une production pilotée par des accélérateurs [59,60].

La connaissance des sections efficaces d'interaction des neutrons est aussi importante pour certaines études fondamentales, comme dans le cas du développement des **détecteurs de matière noire** : les neutrons sont toujours présents (même dans les laboratoires souterrains) et, comme ils ne sont pas chargés, les signaux qu'ils peuvent laisser dans les détecteurs sont similaires à ceux des particules de matière noire. Un autre exemple est celui des systèmes de sécurité utilisés dans les centrales nucléaires pour **détecter les matières fissiles** qui doivent être capables de distinguer les neutrons de fission rapides des neutrons atmosphériques.

Les neutrons jouent aussi un rôle de premier plan dans les études **d'astrophysique nucléaire**. Leur neutralité électrique leur permet de surmonter toute barrière de Coulomb et donc d'atteindre le noyau des atomes, formant ainsi des noyaux plus lourds. L'étude de ces noyaux nous permet de mieux comprendre comment les éléments plus lourds que Fe sont synthétisés dans les étoiles.

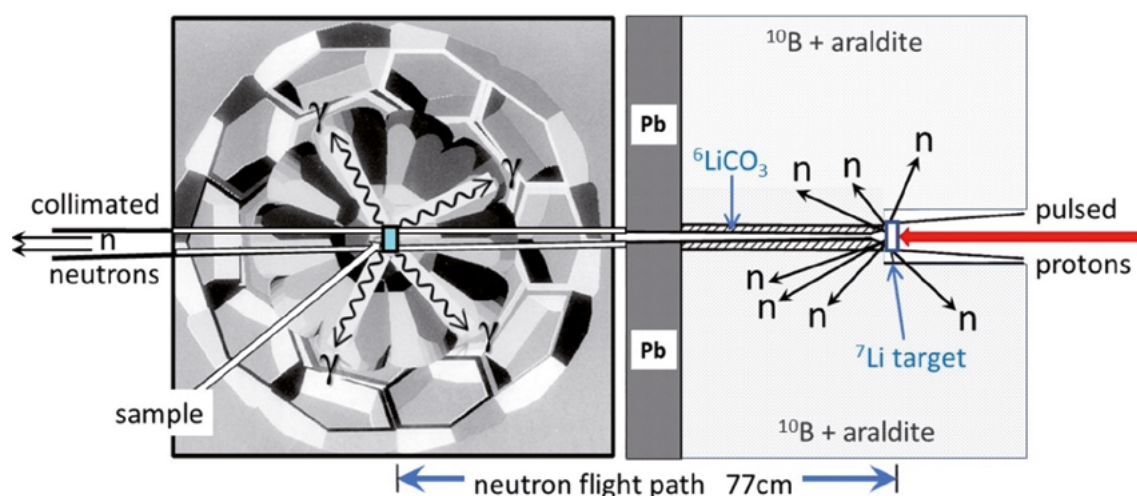


Figure 31 : Le montage expérimental autour de l'accélérateur Van de Graaff de Karlsruhe utilisant une cible de ${}^7\text{Li}$ et un spectromètre 4π pour des mesures de sections efficaces (n,γ).

⁵⁹ J. Esposito et al, LARAMED: A Laboratory for Radioisotopes of Medical Interest, *Molecules* **24**(1) (2019) 20.

⁶⁰ A. Vidal et al, ARRONAX Cyclotron: Setting up of In-House Hospital Radiopharmacy, *BioMed Research International* (2020) 1572841

1.4 Applications industrielles des techniques neutroniques

Les exemples précédents nous ont permis d'illustrer le rôle des neutrons aussi bien dans la recherche purement fondamentale que dans des recherches à visée applicative mais en amont de l'application. Cependant, les techniques neutroniques sont aussi utilisées pour résoudre des problèmes très concrets du quotidien des industriels. On peut citer par exemple :

- Le contrôle de l'intégrité de l'électronique encapsulée dans des appareils chirurgicaux (CareTag Surgical [61]) ;
- Le contrôle des qualités métallurgiques des ailes d'avions (Airbus [62]) ;
- Le développement de carburants renouvelables de type biodiesel (Infineum [63]) ;
- La détection des bouchages des pipelines (Technip [64]) ;
- La qualification des alliages pour les turbines à gaz (VDM Metals [65]) ;
- Les détergents à base d'enzymes (Novozymes [66]) ;
- Le développement des alternatives à la viande (TUD [67]) ;
- Le contrôle qualité des alliages d'inox (Bumax [68]) ;
- Le test de cartes électroniques pour l'aviation (Cobham) ;
- L'optimisation des outils en carbure de bore (Sandvik [69]) ;
- L'encapsulation et la délivrance de médicaments (Lucideon) ;
- Les lubrifiants pour moteurs (Finden [70]) ;
- L'optimisation des plaquettes de freins (Audi [71]) ;
- Le contrôle qualité d'éléments pyrotechniques (Dassault).

⁶¹ <https://lens-initiative.org/2022/06/08/checking-the-integrity-of-encapsulated-electronics-in-a-surgical-tool/>

⁶² <https://lens-initiative.org/2021/12/17/neutron-diffraction-enables-wing-quality-to-soar-for-airbus/>

⁶³ <https://lens-initiative.org/2021/12/17/accelerating-the-development-of-renewable-fuels/>

⁶⁴ <https://lens-initiative.org/2022/02/21/neutrons-detect-clogs-in-pipelines/>

⁶⁵ <https://lens-initiative.org/2022/02/21/pressure-and-heat-testing-alloys-for-gas-turbines-2/>

⁶⁶ <https://lens-initiative.org/2022/06/08/enzyme-based-detergents-and-the-nanostructure-of-cellulose-fibres/>

⁶⁷ <https://lens-initiative.org/2022/06/08/using-neutrons-to-improve-meat-alternatives/>

⁶⁸ <https://lens-initiative.org/2022/06/07/composition-of-stainless-steel-bolts-assessed-using-neutrons/>

⁶⁹ <https://lens-initiative.org/2021/12/17/using-neutrons-to-study-cemented-carbides-for-cutting-inserts/>

⁷⁰ <https://lens-initiative.org/2021/05/26/exploring-engine-components-to-develop-more-durable-fuel-efficient-lubricants/>

⁷¹ <https://lens-initiative.org/2022/02/21/pressure-and-heat-testing-alloys-for-gas-turbines-2/>

1.5 Diffusion neutronique et autres techniques d'analyses

La compréhension détaillée des phénomènes qui ont lieu dans les matériaux à différentes échelles spatiales et temporelles requiert des investigations de plus en plus pointues. À telle fin, différentes techniques, basées sur différentes observables ou processus physiques, fournissent des informations complémentaires. Les outils de modélisation et de simulation sont aussi devenus nécessaires pour aider à assembler les pièces du puzzle. Cet ensemble de moyens analytiques est indispensable à l'obtention d'une description complète et cohérente des phénomènes étudiés.

Les principales techniques de caractérisation de la matière aux échelles atomiques et moléculaires sont les techniques optiques, la résonance magnétique nucléaire (RMN), la diffusion des neutrons et des rayons X et, plus récemment, la microscopie électronique. Chaque technique a ses spécificités, avec ses forces et faiblesses qui lui sont propres, et, dans de nombreux cas, la compréhension complète d'un phénomène requiert le couplage de deux ou plus de ces techniques.

Les sources disponibles pour ces différentes techniques ont connu des progrès différents au cours des 50 dernières années. Par exemple, les développements en diffusion ou absorption des rayons X ont connu des progrès fulgurants avec un gain de brillance de la source de 15 ordres de grandeur depuis 1960. Les lasers de dernière génération permettent maintenant d'étudier la matière à l'échelle de temps des réactions chimiques, quelques femtosecondes ou même les attosecondes pour les lasers à électrons libres. Dernièrement, la résolution de la microscopie électronique a atteint la limite de l'atome dans des conditions expérimentales toujours plus proches de conditions réelles. De même, la diffusion neutronique a connu des progrès considérables. Cependant, sauf engouement ponctuel lié à une avancée technique, au cours des dernières décennies, aucune de ces techniques n'a pris le dessus sur les autres ; le nombre d'utilisateurs de diffusion neutronique, comme celui d'utilisateurs de rayonnement X, reste globalement constant : **la complémentarité des mesures et la diversité des techniques est indispensable à une recherche de pointe.**

Nous reprenons dans les sections suivantes le type d'informations qui est obtenu par les techniques de diffusion neutronique dans le but de discuter comment elles peuvent compléter ou être complétées par les autres techniques principales : rayons X, optique, RMN, et microscopie électronique. Dans certains cas, **la complémentarité exige même une simultanéité de la mesure, des expériences couplées sont alors mises en place.**

1.5.1 Avantage des techniques de diffusion neutronique

Dans une expérience de diffusion idéale en matière condensée, on souhaite mesurer le changement de moment Q et le changement d'énergie ω de la particule incidente. Cette mesure de la fonction de diffusion est réalisée dans un domaine de l'espace à quatre dimensions (Q, ω) dont l'extension dépend de la technique expérimentale mise en œuvre. Cette information peut ensuite être transformée dans l'espace réel et le temps, (r, t). Elle correspond aux positions et aux mouvements temporels des atomes dans la matière.

Les techniques de diffusion neutronique présentent cependant des avantages spécifiques, résumé par les six points d'égale importance listés ci-dessous :

- (i) La partie de l'espace (Q, ω) qui peut être sondée est particulièrement étendue (voir Figure 32 et Figure 33)
- (ii) Les neutrons sont une sonde dont les interactions avec la matière sont « faibles », constituant une sonde non destructive et non invasive, un grand avantage en particulier pour la biologie.
- (iii) Une longueur de diffusion neutronique est une constante nucléaire (i.e. indépendante de Q et ω), ce qui permet d'obtenir la fonction de diffusion $S(Q, \omega)$ simplement à partir des intensités mesurées $I(Q, \omega)$. Les données expérimentales peuvent ainsi être reliées de manière quantitative aux simulations numériques.

- (iv) La masse du neutron lui confère une faible vitesse et donc de faibles énergies pour de grands vecteurs d'ondes : cette propriété en fait la sonde idéale des dynamiques de la matière (phonons, spinons...)
- (v) Le neutron porte un moment magnétique de telle sorte que les arguments ci-dessus valent aussi pour la détermination des structures et de la dynamique magnétique. Le contraste isotopique permet d'être sensible de façon unique à certains éléments (^1H , ^3Li ...)

Évidemment la diffusion neutronique a des inconvénients, le principal étant qu'il n'est possible de réaliser des expériences de diffusion que sur des installations qui n'existent qu'en très petit nombre, sans équivalent de laboratoire. En termes de flux ou de brillance, les sources de photons (laser) ou les synchrotrons sont beaucoup plus puissantes. Le faible flux en diffusion neutronique doit être compensé par la taille du faisceau (donc de l'échantillon) et la durée de l'acquisition. Cependant, la durée moyenne des expériences sur les installations de diffusion neutronique est de 4 à 6 jours, ce qui est comparable aux durées des projets scientifiques sur les synchrotrons [72] (typ. 7-8 jours). Cela illustre que la brillance d'une radiation est loin d'être le paramètre déterminant quant à son utilisation.

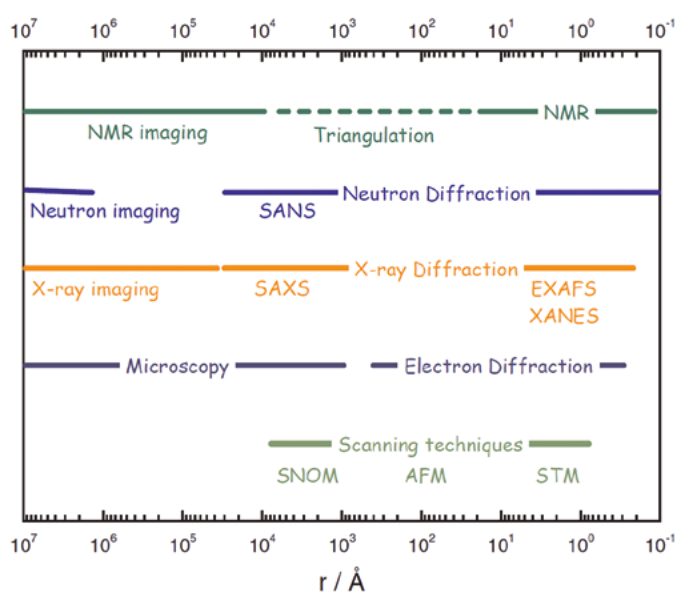


Figure 32 : Les échelles de tailles qu'il est possible de sonder avec les techniques de diffusion neutronique et d'autres techniques expérimentales. Bien qu'il y ait un chevauchement considérable en termes des échelles de distance qui peuvent être sondées, les informations obtenues sont souvent complémentaires en raison de la sensibilité différente suivant les éléments chimiques. Par ailleurs, la détermination de structures magnétiques est un domaine d'excellence de la diffusion de neutrons. Les techniques de la partie inférieure du diagramme ne sont généralement appliquées qu'à de très petits échantillons, ce qui peut être un avantage ou un inconvénient.

⁷² La durée moyenne d'un projet à l'ESRF est d'environ 7 jours (1250 projets sur 48 lignes) et de 8 jours au synchrotron SOLEIL (687 projets sur 29 lignes). « LEAPS Landscape Analysis (2019) ».

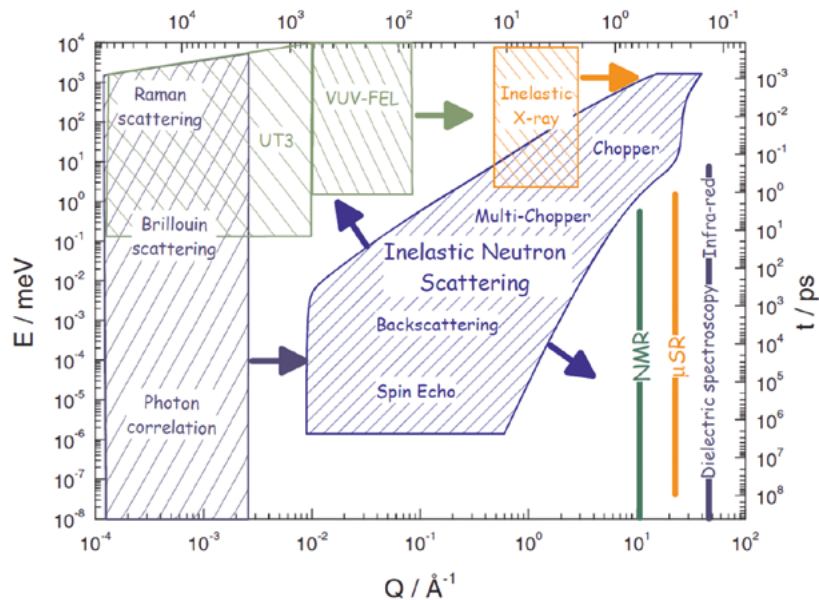


Figure 33: Les gammes d'échelles de temps, d'espace et d'énergie couvertes par les techniques de diffusion inélastique des neutrons et d'autres techniques expérimentales. La complémentarité est évidente. Avec ESS et les XFEL, les gammes de la diffusion neutronique et des rayons-X s'étendront respectivement dans les directions indiquées, remplissant dans les «zones manquantes». Notez que le diagramme couvre les échelles de longueur et de temps typiques des distances interatomiques et de leurs fréquences de vibration. Les techniques qui ne fournissent pas directement d'informations sur les distances sont indiqués uniquement sous forme de barres le long de l'axe temporel. L'échelle de temps fait uniquement référence à des phénomènes à l'équilibre. Les effets hors d'équilibre, tels que ceux étudiés dans les expériences « pompe-sonde », peuvent être sondés avec la diffusion neutronique jusqu'à des échelles de l'ordre de quelques dizaines de μ s, couvrant les échelles de longueur et de temps importantes dans la matière molle et les systèmes biologiques. Adapté de [73].

⁷³ F. Boue, R. Cywinski, A. Furrer, H. Glattli, S. Kilcoyne, R. L. McGreevy, D. McMorrow, D. Myles, H. Ott, M. Rübhausen, G. Weill. Neutron scattering and complementary experimental techniques. The ESS Project, Volume II, Chapter 5. (2002) ISBN 3-89336-302-5

De manière plus qualitative, une comparaison de différentes techniques expérimentales est donnée dans la table ci-dessous.

Techniques	Forces	Faiblesses
Synchrotron	Très grande brillance ; Jusqu'à ≈100% cohérence ; Accordable, options de polarisation; Profondeur de pénétration variable ; Résolution temporelle sur un grand intervalle, approchant quelques fs ; Sensible à l'environnement chimique ; Installations polyvalentes, multi-utilisateurs et très fiables.	Dommages causés par le rayonnement ; Très faible sensibilité aux éléments légers ; Résolution temporelle limitée à la fs.
Lasers	Grand spectre de fréquences (du THz-IR aux rayons-X, voire aux MeV par génération avec une source Compton) ; Très grande cohérence des impulsions jusqu'à l'attoseconde. Installations offrant des prestations variées.	Faible brillance ; Accordement limité à faibles longueurs d'onde ; Polarisation limitée.
Neutrons	Grande profondeur de pénétration ; Contraste isotopique ; Sensibilités aux éléments légers comme l'hydrogène ; Mesures possibles à ultra-basse température, champ magnétique intense, etc. ; Adapté aux larges échantillons ; Résolution en énergie de l'ordre du μeV en diffusion inélastique) ; Installations polyvalentes, multi-utilisateurs, versatiles et très fiables.	Faible brillance des sources ; Résolutions spatiale et temporelle limitées ; Activation des échantillons pour certains isotopes.
Microscopie électronique	Très haute résolution spatiale dans les cristaux ; Excellentes mesures de phase ; CryoEM pour observer des macromolécules non cristallisées ; Demande peu d'infrastructure.	Profondeur de pénétration limitée à quelques microns ; Imagerie 3D est destructive pour les échantillons ; Utilisation essentiellement à des températures cryogéniques ; longs temps d'acquisition.
RMN	Détermine la structure de molécules biologiques non cristallisées ; Non-destructif et sans danger ; Largement utilisé en médecine clinique.	Limité aux atomes avec un spin différent de 0 ; Requiert de larges échantillons ; N'est pas adapté aux très grandes molécules biologiques.

Tableau 1 : Comparaison de techniques fournies par des accélérateurs de photons et d'autres techniques complémentaires (adapté de [74]).

⁷⁴ « LEAPS Landscape Analysis (2019) ». LEAPS League of European Accelerator-based Photon Sources.

1.5.2 Rayons X et neutrons

Les neutrons et les rayons X sont complémentaires du fait des différences de sections efficaces des éléments pour chacun des rayonnements, par exemple pour les éléments légers mais aussi des métaux tels que le plomb, rendant aussi la profondeur de pénétration très différente entre les deux techniques. Dans certains cas, comme par exemple celui de cinétiques d'évolution difficilement reproductibles (hydratation d'un réseau micro et nano-poreux complexe, vieillissement d'une mousse...), la **mesure simultanée** par les deux rayonnements permet d'optimiser encore cette complémentarité.

À cet effet, le spectromètre de tomographie NEXT à l'ILL est complété par un système de tomographie X.

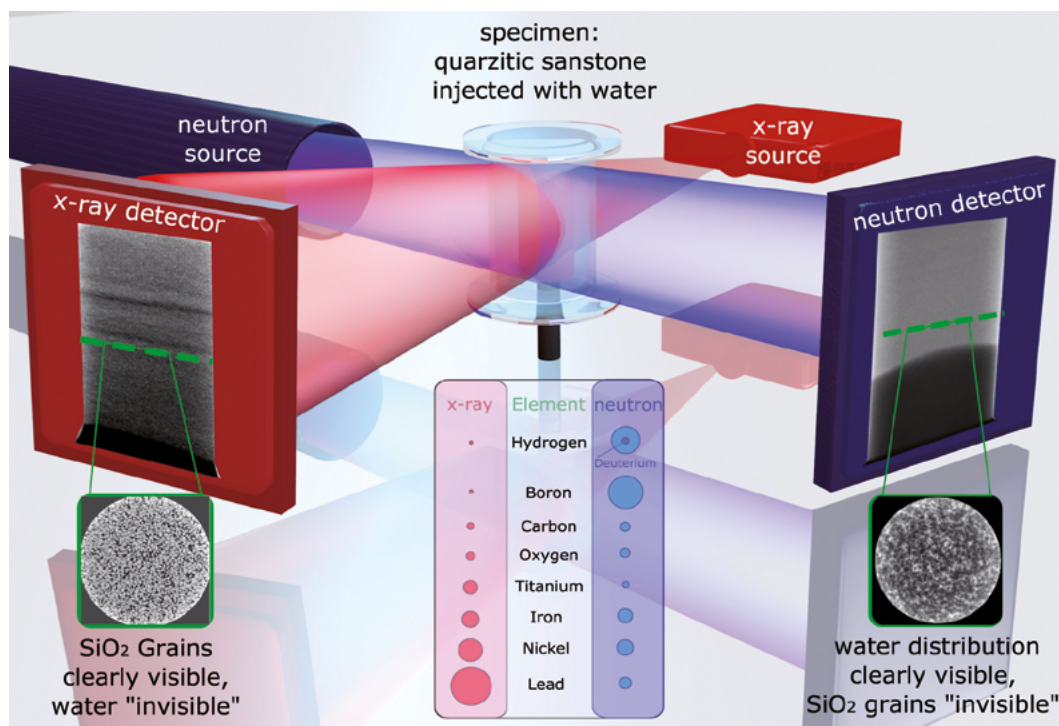


Figure 34 : Les rayons X sont idéaux pour déterminer la structure poreuse de l'argile alors que les neutrons permettent d'étudier la dynamique des mouvements de l'eau dans cette structure (adapté de [75]).

⁷⁵ A. Tengattini et al, Nuc. Inst. Meth. Phys. Res. A **968** (2020) 163939.

De même, aux petits angles, les mesures de SAXS et SANS sont particulièrement complémentaires. Cela a par exemple conduit à la construction d'un instrument de SAXS portable qui peut être installé sur le spectromètre D22 à l'ILL [76].

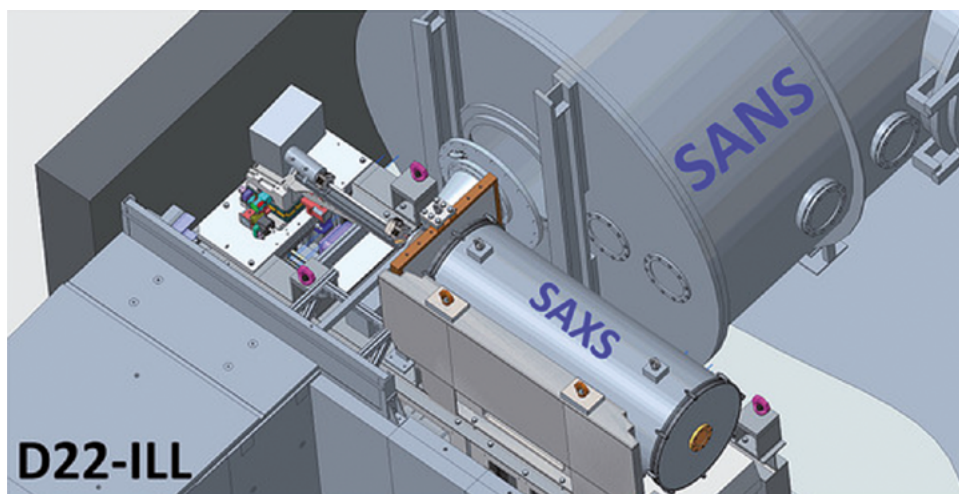


Figure 35 : Schéma de l'instrument de SAXS installé sur le spectromètre D22 de l'ILL.

1.5.3 Neutrons et microscopie électronique

Dans le cadre de domaines de recherche impliquant le développement de nanomatériaux innovants, la détermination du lien entre structure nanométrique et propriétés recherchées nécessite le plus souvent un panel de techniques expérimentales. **La microscopie électronique (MET ou MEB) est une première approche permettant une analyse semi-quantitative du système. Elle permet de se faire une première idée de la taille et de l'arrangement de nano-objets avec une statistique infiniment plus faible que le SANS [77].**

Cette première analyse permet par la suite de justifier le choix de modèles d'ajustements à plusieurs paramètres de données SANS pour une description non ambiguë [78]. Par ailleurs, l'utilisation simple du MEB/TEM n'est plus suffisante lorsque l'objectif est de caractériser un système répondant à un stimulus (température, pH, sollicitation mécanique, champ électrique...) ou présentant des hétérogénéités chimiques (on a alors besoin du contraste isotopique fourni par les techniques neutroniques) [79]. Il en va de même pour des systèmes présentant une évolution temporelle de leur structure.

Cette complémentarité est particulièrement bien illustrée par la Figure 36, qui décrit la corrosion des verres au contact de l'eau. La microstructure du matériau y est sondée par microscopie électronique et par diffusion de rayons X et la pénétration de l'eau par diffusion de neutrons. Toutes ces données sont ensuite confrontées avec les modèles numériques nécessaires à la description à grande échelle du phénomène. Bien que les verres semblent être des matériaux idéaux pour stocker des déchets radioactifs à longue durée de vie à l'échelle de plusieurs milliers d'années, il est probable que ces verres soient soumis à des conditions conduisant à leur altération, en particulier le lessivage par l'eau, et que cela conduise au relargage des éléments radioactifs stockés à l'intérieur du verre.

⁷⁶ E. Metwalli, Appl. Sci. 2021, 11(13), 5925.

⁷⁷ Fan, Y., & Wang, Y., Curr. Op. Coll. & Int. Sci. **42** (2019) 1-16.

⁷⁸ Christoulaki, A., Chennevière, A., Grillo, I., Porcar, L., Dubois, E., & Jouault, N., J. of app. Cryst. **52**(4) (2019) 745-754.

⁷⁹ Mirzamani, M., Dawn, A., Garvey, C. J., He, L., Koerner, H., & Kumari, H. Phys. Chem. Chem. Phys. **25** (2023) 131-141.

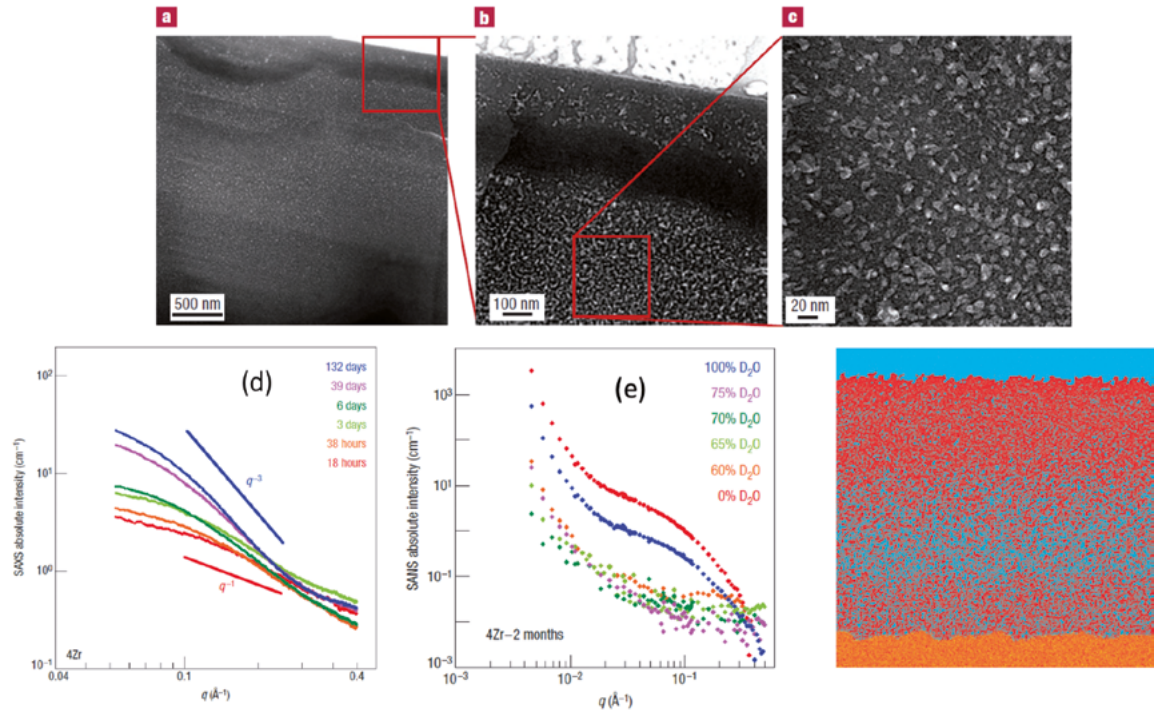


Figure 36 : (a-c) La microscopie électronique permet d'observer les effets du lessivage sur la structure du verre à différentes échelles de taille. (d) L'évolution de la microstructure et de sa structure fractale peut être complétée par une étude par diffusion de rayons X (SAXS). (e) La diffusion de neutrons aux petits angles (SANS) permet de quantifier les quantités d'eau qui ont pénétré dans le verre. (f) In fine, cela permet de valider les modélisations Monte-Carlo permettant d'extrapoler le comportement à des temps géologiques (des siècles plutôt que des mois). Adapté de [80].

1.5.4 Optique et neutrons

Les techniques optiques fascinent par leur simplicité de mise en œuvre pour certaines, par leurs technologies élaborées pour d'autres. Utilisant différents types de rayonnements, elles offrent les plus grandes résolutions temporelles et la meilleure cohérence de radiation, permettant de couvrir toutes les échelles de temps pertinentes pour l'étude de la matière. Mais du fait des longueurs d'ondes considérées (>100 nm), elles ne peuvent sonder la matière à l'échelle atomique et fournissent nécessairement une mesure moyennée sur une distance comparable à leur longueur d'onde. Elles couvrent donc le **domaine spatial des grandes distances qui jouxte celui des neutrons**. Elles sont ainsi complémentaires en termes de caractérisations structurale et dynamique. Un bel exemple de complémentarité est l'usage de la diffusion de la lumière (SLS-DLS) avec la diffusion des neutrons aux petits angles (SANS), ce qui peut aussi être effectué de façon simultanée [81].

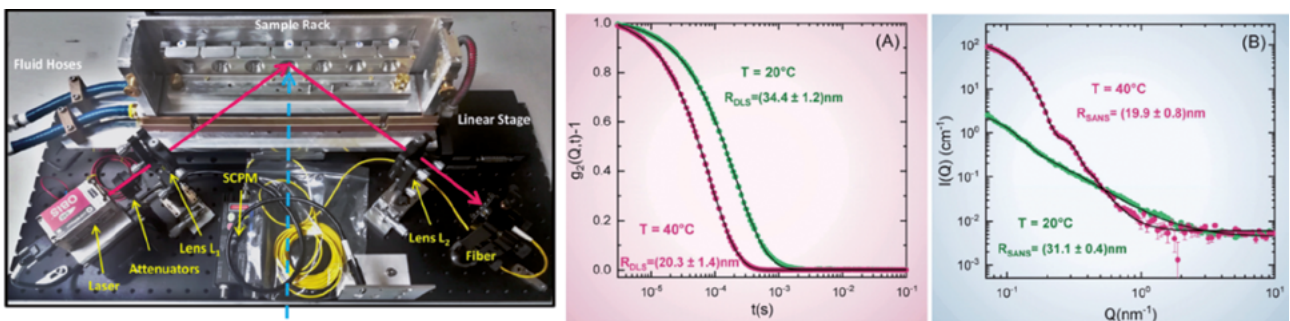


Figure 37 : photographie du dispositif développé pour les mesures DLS et SANS simultanées et exemple d'une étude de la transition structurale avec la température des particules thermomorphes de microgels de PNIPAM (poly(N-isopropylacrylamide)). Adapté de [81].

⁸⁰ Cailleateau C., Angeli F, Gin S., Jollivet P., Devreux F., Jestin J., Spalla O., Nature Materials 7 (2008) 978.

⁸¹ V. Nigro, R. Angelini, S. King, S. Franco, E. Buratti, F. Bomboi, N. Mahmoudi, F. Corvasce, R. Scaccia, A. Church, T. Charleston, and B. Ruzicka, Rev. Sci. Inst. **92** (2021) 023907.

1.5.5 RMN et neutrons

La combinaison de la RMN avec des techniques de diffusion neutronique permet de sonder la dynamique de certains systèmes sur de très grandes échelles de temps : typiquement quelques fractions de pico-secondes pour la diffusion quasi-élastique des neutrons (QENS) en temps de vol, 1-100 nano-secondes pour la spectroscopie neutronique par écho de spin et de la milliseconde à la seconde par RMN à gradient de champ. **Cette analyse multi-échelle** joue un rôle central dans la compréhension de la dynamique dans la matière molle. La Figure 38 présente une étude sur des liquides ioniques qui se comportent comme des électrolytes forts à l'échelle macroscopique, alors qu'à l'échelle moléculaire, ce sont des solutions ioniques faibles. L'exploration d'un tel comportement nécessite donc des études multi-échelles avec des techniques couplées.

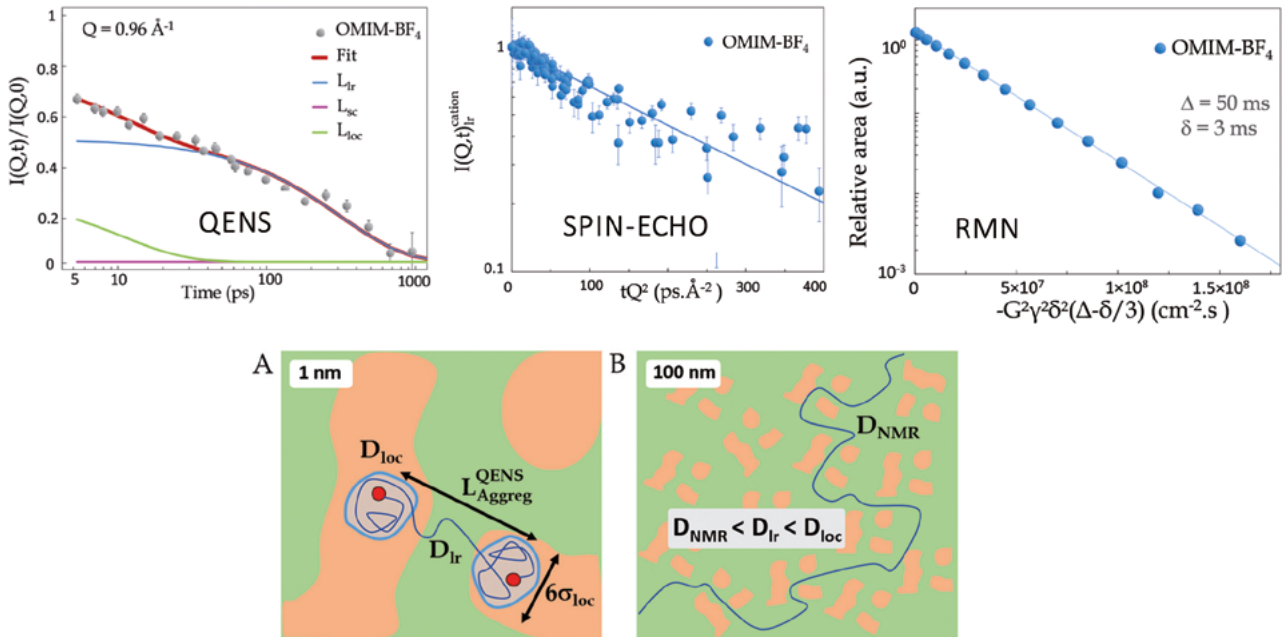


Figure 38 : Nanostructuration transitoire d'un liquide ionique induite par la coexistence des queues apolaires du cation avec les fractions chargées des têtes imidazolium et de l'anion. (Première ligne) Différentes techniques expérimentales (QENS, SPIN-ECHO, RMN) donnent des informations à différentes échelles de taille. (Deuxième ligne) Interprétation du comportement à l'échelle nanométrique. Les fluctuations de densité à l'échelle locale/moléculaire (A) dues à la coexistence des domaines denses (orange) avec les régions non agrégées moins denses du liquide (vert) induisent des fluctuations de viscosité à l'échelle microscopique (B). A l'échelle locale, un cation du liquide ionique subit deux processus diffusifs isotropes distincts : (i) une diffusion au sein d'un agrégat nanométrique et (ii) un processus plus lent consistant en une diffusion entre agrégats. À plus grande échelle, sondée par RMN, les molécules de liquide ioniques suivent un chemin tortueux entre les agrégats denses. Adapté de [82].

L'exemple précédent illustre une étude de dynamique. Il est aussi possible de combiner des informations données par les neutrons, les rayons X et la RMN pour des études structurales. Dans la modélisation des verres, par exemple, la RMN permet d'obtenir une information locale sur la sphère de coordination de l'aluminium et du silicium en termes de valence, distance et angles. Les techniques de diffraction fournissent quant à elles les distributions radiales à grande distance, au-delà des premiers voisins (voir Figure 39). La connaissance aussi précise de la structure est nécessaire à la modélisation, permettant une recherche prédictive sur les propriétés macroscopiques, par exemple mécaniques ou thermiques, des matériaux vitreux.

⁸² F. Ferdeghini et al, *Nanoscale* **9** (2017) 1901.

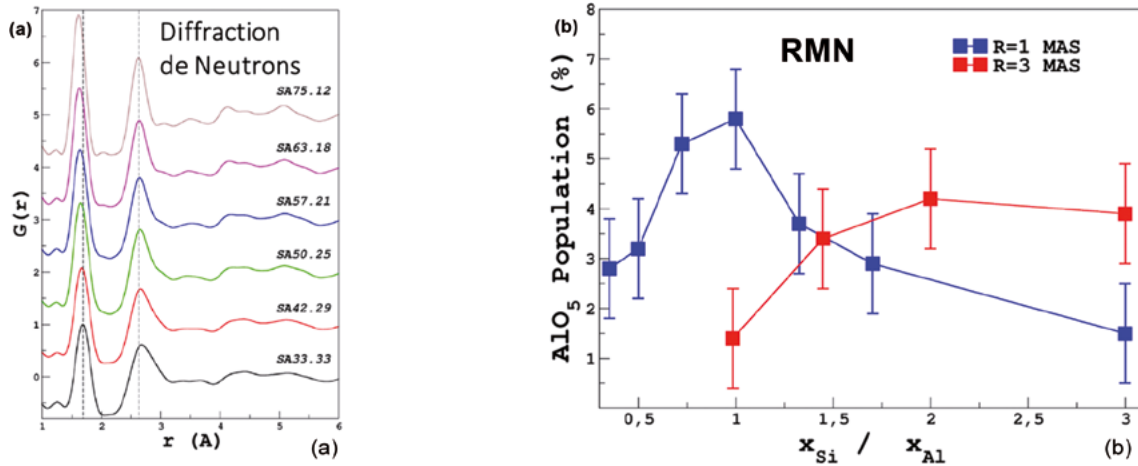


Figure 39 : (a) Fonctions de distribution de paires (PDF) mesurées par diffraction de neutrons dans différents verres. (b) Variation de la population de AlO_5 en fonction de la composition du verre. Adapté de [83].

1.5.6 Modélisation et neutrons

La dynamique moléculaire, quantique ou classique, est un complément incontestable de la diffusion neutronique, couvrant des échelles d'espace et de temps fortement similaires. Dans tous les domaines, des matériaux cristallins à petite maille unitaire aux systèmes biologiques, les observables mesurées en diffusion élastique ou inélastique de neutrons sont facilement modélisables grâce à la simplicité de l'interaction des neutrons avec la matière. La diffusion neutronique permet ainsi de valider la modélisation d'un système et la modélisation permet, elle, de comprendre en profondeur les phénomènes observés. La synergie expérience-simulations est optimale avec la sonde neutronique.

Dans le domaine des matériaux cristallins, les petites mailles permettent la simulation des dynamiques avec des techniques de chimie quantique (ab-initio/DFT) et offrent une interprétation détaillée et approfondie des mesures des excitations de la matière grâce à la simulation des courbes de dispersions (voir Figure 40).

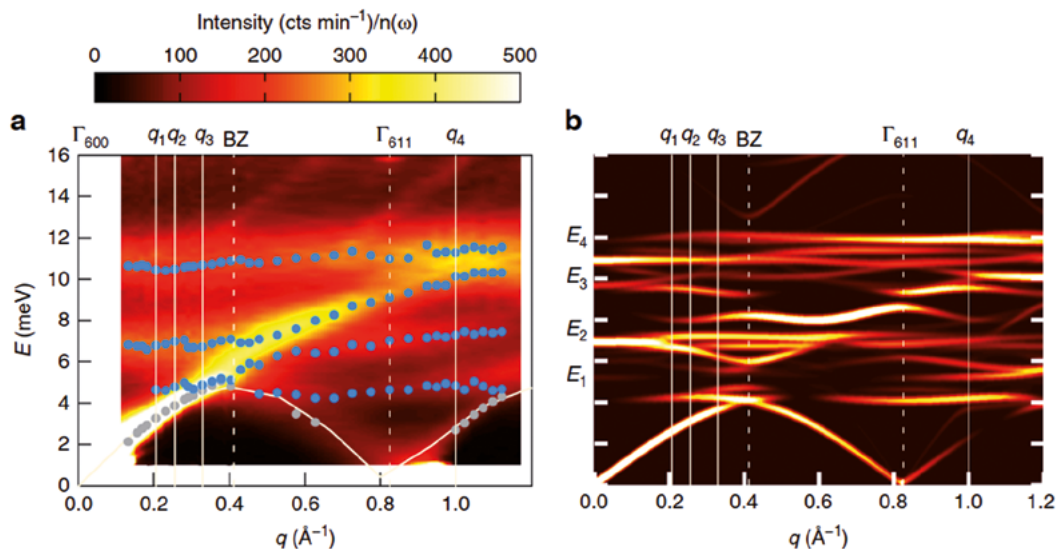


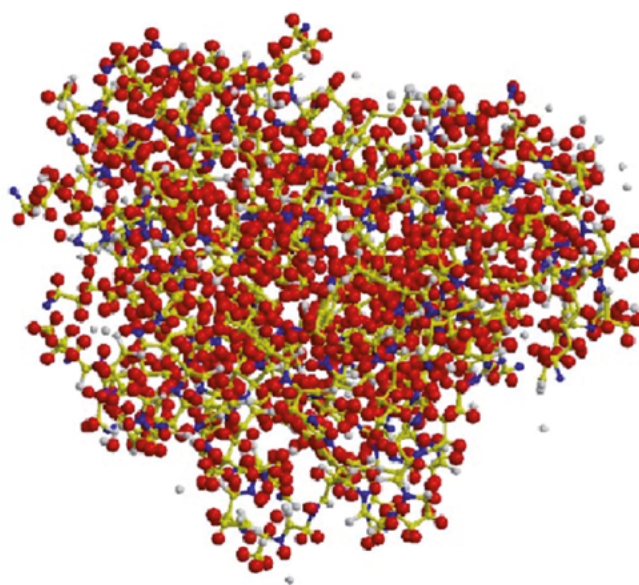
Figure 40 : Phonons acoustiques transverses dans le composé de clathrate $Ba_{7.81}Ge_{40.67}Au_{5.33}$ pour l'étude de sa conductivité thermique : représentation bidimensionnelle permettant la comparaison entre mesures expérimentales (spectromètre 2T-LLB, a) et simulations (DFT, b) à 300 K, montrant la dispersion du mode TA_{100} et son hybridation avec les modes optiques de basse fréquence de vibration des atomes de Ba et Au. Les points bleus et gris correspondent aux points de mesure dans les scans à q constant. Adapté de [84].

⁸³ T. Charpentier et al, J. Phys. Chem. B **122** (2018) 9567–9583.

⁸⁴ Lory, PF., Pailhès, S., Giordano, V.M. et al. Nat Commun **8** (2017) 491.

Un autre exemple peut être emprunté à la cristallographie des macromolécules biologique. Les techniques de diffraction de rayons X permettent de définir la structure des protéines, puis la diffraction des neutrons permet d'apporter des informations complémentaires sur ces structures en déterminant en particulier la position d'atomes d'hydrogène dans un site actif ou celle de molécules d'eau adsorbées à la surface des protéines.

À partir de là, le programme d'intelligence artificielle (IA) AlphaFold a mis à disposition une base de données des structures de plus de 200 millions de protéines avec une précision supérieure à 90% du GDT (Global Distance Test). Les mesures expérimentales sont primordiales car ce sont elles qui permettent aux programmes d'IA ou de Machine Learning de faire des prédictions. Les résultats de ces programmes de simulations n'ont de valeur que s'ils sont validés et/ou calibrés par des mesures expérimentales. Les deux approches se nourrissent mutuellement. L'IA apprend à partir de résultats expérimentaux, elle permet parfois d'expliquer des mesures qui étaient ambiguës et de proposer des nouvelles solutions, mais elle permet surtout d'ouvrir de nouveaux horizons. C'est vrai dans le domaine de la biologie mais aussi dans celui des matériaux avec par exemple la recherche de nouveaux matériaux avec des propriétés d'intérêt.



Tertiary structure of myoglobin determined by neutron diffraction

● nitrogen, ● carbon, ○ oxygen, ● hydrogen

Figure 41 : Positions des atomes d'hydrogène dans une macromolécule de myoglobine déterminées par diffraction de neutrons. Les déterminations expérimentales de structures de protéines et de macromolécules sont incontournables pour valider et calibrer les outils prédictifs tels que AlphaFold.

1.5.7 Conclusion

En conclusion, le tableau suivant liste les principales techniques neutroniques et indique leurs domaines d'applications, les systèmes qu'il est possible d'étudier et ce qui les rend uniques.

Structures à grande échelle	
SANS	<p>Applications : nano-objets en volume (tailles 2 nm – 1 µm)</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 (2-100 nm)</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 ou 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>Applications : 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	<p>Applications : structure cristallographique des matériaux</p> <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> • Batteries ; • Stockage de l'hydrogène ; • Hydrates de gaz ; • Matériaux magnéto-caloriques ; • Protéines hydratées. <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité à l'hydrogène ; • Sensibilité magnétique ; • Mesures in situ/operando.
Diffraction monocristaux	<p>Applications : détermination de structures cristallographiques des matériaux magnétiques</p> <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ordres magnétiques complexes ; • Densité de spin. <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité au magnétisme.
Textures, contraintes	<p>Applications : détermination de textures et contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Textures cristallographiques ; • Cartographies de champs de contraintes. <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> • Textures – énergies stockées ; • Alliages métalliques ; • Composites (métal – oxydes ou métal – nitrures). <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mesures en volume (pièces industrielles) ; • Tenseur de contraintes en 3D.

Spectroscopie	
Temps de vol	<p>Applications</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diffusion locale et à longue distance dans les systèmes désordonnés tels que les liquides, les amorphes, les cristaux moléculaires ; • Dynamique de la matière molle (gels, protéines, membranes) ; • Dynamique des liquides quantiques, dynamique de spin dans les supraconducteurs ; • Phénomènes critiques. <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> • Batteries ; • Hydrates de gaz ; • Composés thermo-électriques. <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Excellente résolution en énergie (meV - μeV).
Spectrométrie 3-axes	<p>Applications</p> <ul style="list-style-type: none"> • Excitations magnétiques dans les supraconducteurs ; • Systèmes magnétiques frustrés et phénomènes quantiques ; • Matériaux multiferroïques, thermoélectriques ; • Systèmes de fermions lourds. <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> • Composés thermo-électriques ; • Supraconducteurs. <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bonne résolution en énergie (meV).
Backscattering	<p>Applications : dynamiques de diffusion</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dynamique de diffusion de l'hydrogène ou des hydrocarbures dans des milieux poreux ou des liquides. <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modes d'excitations moléculaires et tunneling dans les systèmes amorphes ; • Relaxation dans les verres, diffusion de l'hydrogène dans les métaux, conducteurs ioniques, catalyse ; • Dynamique dans les polymères et les membranes biologiques ; • Dynamique de spin. <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Excellente résolution en énergie (neV - μeV).
Spin-Echo	<p>Applications : dynamiques de diffusion</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dynamique de diffusion de l'hydrogène ou des hydrocarbures dans des milieux poreux ou des liquides. <p>Domaines d'excellence</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dynamique dans les colloïdes (liposomes, protéines, micelles, microémulsions) ; • Reptation et relaxation dans les polymères ; • Largeurs d'excitations de phonons. <p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Excellente résolution en énergie (neV - μeV).

Tableau 2 : Les différentes techniques de diffusion neutronique et leurs domaines d'application.

2

Panorama de la diffusion neutronique en France et en Europe

La production de neutrons pour la recherche est complexe et nécessite l'utilisation de réactions nucléaires produites dans des réacteurs de recherche ou des sources à spallation. De ce fait, les faisceaux neutroniques ne sont disponibles avec une brillance importante que sur de grandes installations de recherches, mutualisées au niveau national ou européen. Nous dressons ici le panorama de la situation française dans le contexte européen et mondial.

Une projection à l'horizon 2035 montre que la production scientifique française utilisant les techniques neutroniques sera divisée par un facteur supérieur à 5 par rapport aux années 2000 si aucune mesure n'est prise pour augmenter la capacité d'accès des utilisateurs français aux techniques neutroniques.

Tandis qu'en Asie, Australie et Amérique du Nord, les capacités des infrastructures de diffusion neutronique sont en forte augmentation, celles européennes sont en baisse constante. Le LENS propose différentes pistes pour remédier à ce déclin, dont le déploiement de nouvelles sources de type HiCANS.

2.1 Les sources dédiées à la diffusion neutronique en Europe

En 2019, il existait en Europe 12 sources de neutrons en exploitation, dont 10 étaient des réacteurs de recherche. Selon une étude récente du projet BrightnESS [85], environ 200 instruments étaient exploités dans ces installations pour permettre jusqu'à 4800 expériences par an réalisées par environ 5800 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 dernier et, alors que trois réacteurs utilisés pour la diffusion neutronique ont cessé leurs opérations en 2019 (Orphée en France, BER II à Berlin et JEEP II en Norvège), la question du remplacement des réacteurs de recherche doit être posée.

L'Europe est donc confrontée à une perte de capacité significative. À l'horizon de la prochaine décennie, si l'arrêt du fonctionnement du réacteur à haut flux (HFR) de l'Institut Laue Langevin à Grenoble est effectif en 2030–2033, comme prévu à l'heure actuelle [86], les techniques de diffusion neutronique ne seront plus servies en Europe que par 4 sources principales de neutrons, l'European Spallation Source (ESS) en Suède, ISIS Neutron and Muon Source au Royaume-Uni, Forschungsreaktor München 2 (FRM2) en Allemagne et le Paul Scherrer Institut (PSI) en Suisse [87] (voir Figure 42).

⁸⁵ NEUTRON USERS IN EUROPE: Facility-Based Insights and Scientific Trends (2018)

⁸⁶ 6ième protocole, Communiqué du Ministère, « Cet avenant permet de poursuivre les opérations de l'ILL au moins jusqu'en 2030, au mieux jusqu'en 2033 (un jalon décisionnel étant posé en 2027), avec une perspective de mise à l'arrêt du réacteur en fin de protocole. »

⁸⁷ Les arrêts des réacteurs du BNC en Hongrie et du NPL en République tchèque sont programmés pour la décennie actuelle.

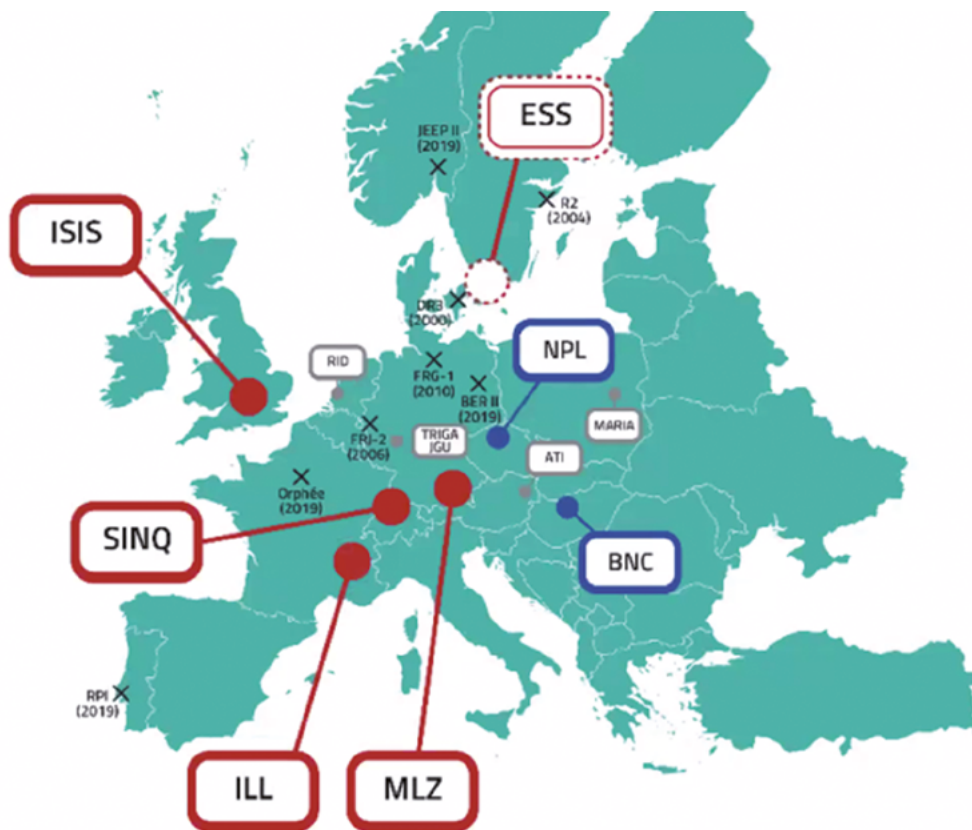


Figure 42 : Infrastructures de diffusion neutronique en Europe (en rouge et bleu, installations ayant des capacités d'accueil d'utilisateurs extérieurs plus ou moins importantes ; en gris, les installations à usage local uniquement). Les (X) indiquent les sources qui ont cessé de fonctionner. À l'horizon 2030, ESS, actuellement en construction en Suède, atteindra des performances supérieures à celles de l'ILL. (adapté de [89]).

Comme illustré par la figure 43, l'Europe (hors Russie) a fourni en 2019 plus de 32 000 [instruments-jours] contre 13 000 [instruments-jours] aux USA et 13 000 [instruments-jours] en Asie [88]. La situation en Asie et Australie évolue très positivement avec l'ouverture de nouvelles sources en Chine telles que la source à spallation CSNS et le réacteur CARR. Le nouveau réacteur OPAL en Australie draine quant à lui une large communauté d'utilisateurs d'Asie du Sud-Est. Sur le continent américain, les USA ont beaucoup investi dans la période récente : construction de la source à spallation SNS à Oakridge et jouvence des instruments du réacteur HFIR d'Oakridge. Par ailleurs, le programme de construction d'une deuxième cible sur SNS est engagé afin de pouvoir doubler le nombre d'instruments, ainsi qu'un programme d'upgrade du réacteur du NIST à Washington. En Amérique du Sud, un nouveau réacteur de recherche devrait entrer en fonctionnement en 2025 en Argentine tandis que le Brésil souhaite se lancer à son tour dans la construction d'un réacteur de recherche.

Le parc mondial d'instruments de diffusion neutronique mis à disposition des utilisateurs académiques et industriels dans des installations pour utilisateurs compte environ 300 instruments. Jusqu'à une période récente, l'Europe concentrait plus de la moitié d'entre eux. Toutefois, l'Europe est sur le point de perdre sa position de leader. Alors que le parc instrumental en Amériques et en Asie & Australie est sur une trajectoire d'augmentation significative (respectivement +46 % et +90 %), celui de l'Europe (hors France) va légèrement se réduire (-17 %) et celui de la France va chuter drastiquement : de 13 % du parc mondial dans les années 2000-2010, il représentera moins de 1 % à l'horizon 2035.

⁸⁸ ESFRI Neutron scattering facilities in Europe - Present status and future perspectives.

⁸⁹ Neutron Science in Europe, LENS Vision document (2022).

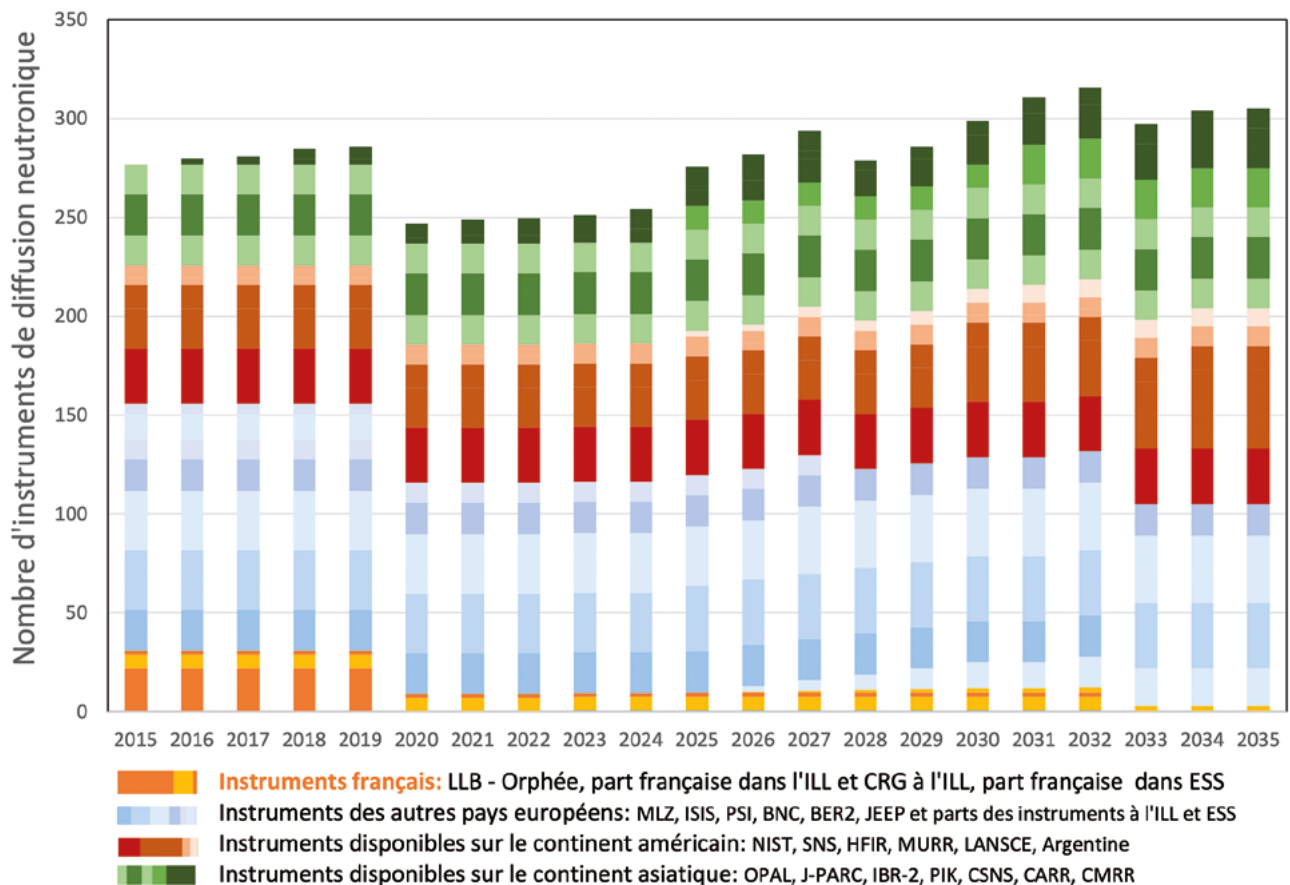


Figure 43 : Nombre d'instruments de diffusion neutronique mis à disposition de la communauté scientifique dans les sources de neutrons opérant en tant qu'installation pour utilisateurs. En orange foncé et jaune, le nombre d'instruments français (incluant la participation française à l'ILL et à ESS) ; en bleu, les instruments mis à disposition par les autres pays européens. En rouge et en vert respectivement, les contributions des différentes sources en Amérique et en Asie. Dans les années 2000, la France disposait d'un parc instrumental représentant 13 % du parc mondial. À l'horizon 2035, son parc instrumental ne représentera plus que 1 % du parc mondial. La contribution des autres pays européens sera en léger recul (- 17 %), alors qu'à l'inverse le parc instrumental en Amérique et en Asie est en augmentation significative (46 % et + 90 %).

Le temps d'utilisation des sources européennes (ILL et bientôt ESS) est réparti entre les différentes nations au prorata de leurs contributions financières. À l'inverse, bien que les sources nationales soient essentiellement construites pour les utilisateurs nationaux, elles fonctionnent depuis des décennies sous la forme d'un réseau d'utilisateurs utilisant des sources dans des pays étrangers. L'attribution de temps de faisceau est alors faite sur la base des mérites scientifiques des expériences proposées. La fraction d'expérimentateurs extérieurs au pays d'implantation de la source varie de 16 à 90 %. Sur l'installation LLB-Orphée, la fraction d'utilisateurs non français était de l'ordre de 33 %. À noter que des utilisateurs français utilisent évidemment aussi des sources étrangères [90].

⁹⁰ Fraction d'utilisateurs extérieurs au pays d'origine de la source : ISIS 16 %, MLZ 27 %, LLB 33 %, PSI 67 %, BERII 40 %, BNC 90 %, REZ 33 %, JEEP 50 %. NEUTRON USERS IN EUROPE: Facility-Based Insights and Scientific Trends, BrightenESS 2019.

2.2 Le cas de la France

Dans le cas particulier de la France, dans la période la plus faste des années 2000, les installations LLB-Orphée et l'ILL-HFR fournissaient respectivement aux utilisateurs français environ 3000 + 1500 = 4500 [instruments-jours] par an. Dans la période récente (2016-2019), l'offre s'était réduite, pour différentes raisons, à environ 2400 + 1000 = 3400 [instruments-jours]. Dans l'hypothèse actuelle de l'opération de 15 instruments à l'horizon 2030 à ESS, et sur la base d'une participation française de 14 %, seulement 400 jours seraient disponibles pour la communauté française à l'horizon 2033. En comparaison avec les près de 5000 jours disponibles dans les années 2000 (voir Figure 44), cela correspond à une diminution de 90 % du temps de faisceau disponible pour les utilisateurs français.

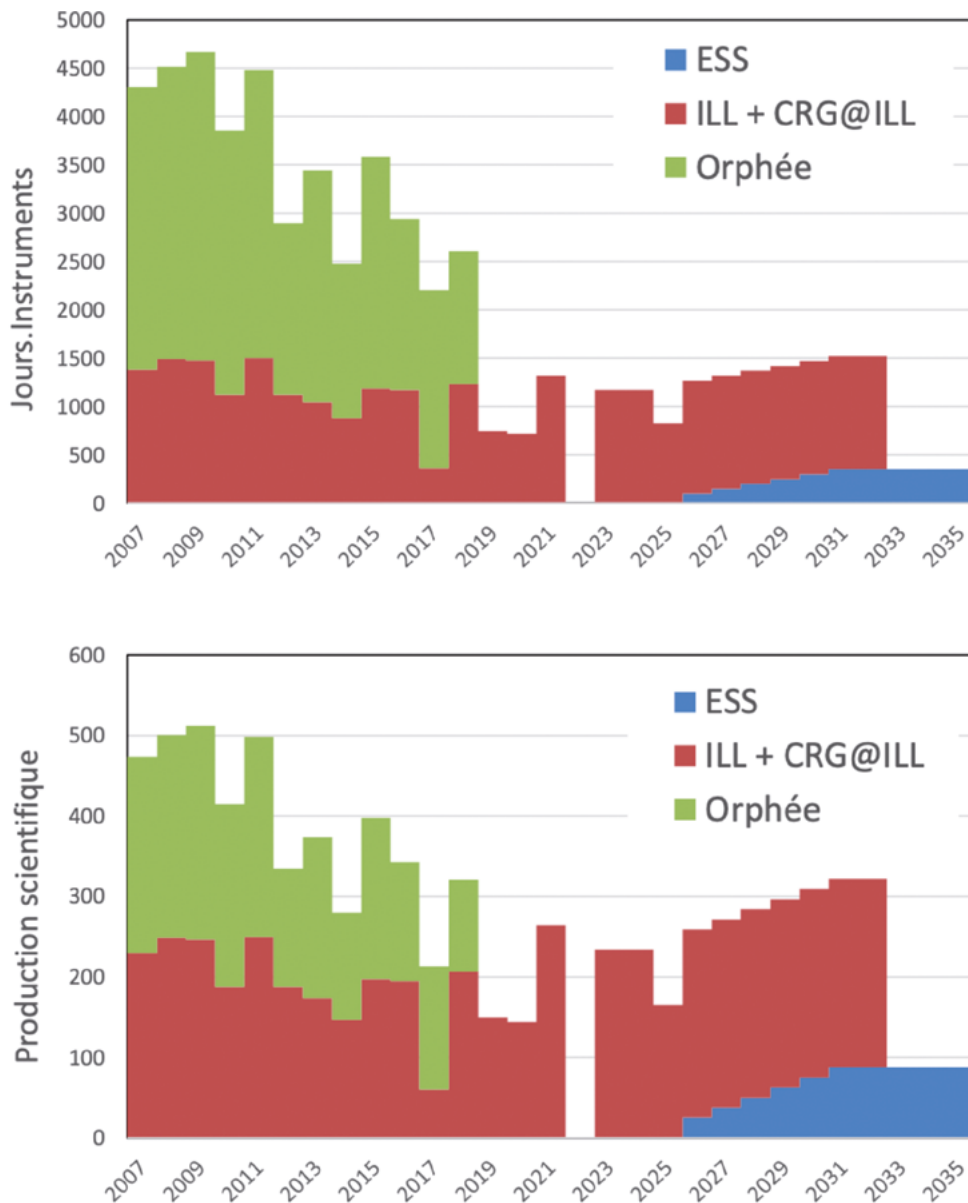


Figure 44 : (a) Scénario de la perte drastique de temps de faisceau disponible pour la communauté française si ESS restait la seule source de neutrons après l'arrêt de l'ILL en 2033. La baisse d'activité du LLB en 2017 est liée à une réduction de la durée de fonctionnement de 180 jours par an à 120 jours par an couplée à la réduction du nombre de spectromètres ouverts aux utilisateurs extérieurs (16 au lieu de 22). À partir de 2012, il y a eu une baisse de disponibilité à l'ILL en raison de la réduction du nombre de cycles de fonctionnement de 4 à 3. Les indisponibilités de l'ILL (ex. 2017, 2022) correspondent soit à des pannes, soit à des maintenances importantes du réacteur. (b) Production scientifique des différentes sources. Dans le cas de ESS, l'extrapolation est basée sur le fait qu'il fallait 12 jours de faisceau (resp. 6) pour une publication au LLB (resp. à l'ILL). Environ 4 jours devraient être nécessaires pour une publication à ESS.

Puisque les jours de faisceau ne sont pas équivalents pour les différentes sources, en raison des différences de performances, nous avons utilisé un deuxième indicateur pour illustrer la baisse dramatique d'accès aux infrastructures de diffusion neutronique pour les scientifiques français, à savoir la production scientifique (Figure 44b). Dans le cas d'ESS, nous faisons l'hypothèse que la productivité scientifique par jour de faisceau sera améliorée de 30 % [91] par rapport à l'ILL.

Cette projection conduit malheureusement au constat que la production scientifique française utilisant les techniques neutroniques devrait être divisée par un facteur supérieur à 5 à l'horizon 2035 par rapport aux années 2000.

Cette tendance est d'ores et déjà amorcée, à la suite de la fermeture en 2019 du réacteur Orphée, la faible disponibilité du réacteur à haut flux de l'ILL ces dernières années ainsi que les problèmes techniques sur les différentes autres sources de neutrons européennes.

2.3 Coopérations et positionnement international

2.3.1 LENS, League of Advanced European Neutron Sources

L'initiative LENS [92] a pour but de promouvoir la coopération et les projets entre les fournisseurs d'infrastructures neutroniques au niveau européen. Les membres sont actuellement l'European Spallation Source (ESS), le Forschung Zentrum Jülich (FZJ), l'Institute for Energy Technology (IFE), l'Institut Laue Langevin (ILL), ISIS Neutron and Muon source, le Laboratoire Léon Brillouin (LLB), le Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Nuclear Physics Institute CAS, le Paul Scherrer Institute (PSI), le Budapest Neutron Center. Les membres, à travers LENS, unissent leurs forces pour soutenir et renforcer l'écosystème des installations neutroniques en Europe.

Dans le contexte actuel d'une profonde mutation du paysage de la neutronique européenne, le LENS a récemment produit un document discutant et proposant de nouvelles idées pour créer un nouvel écosystème de la diffusion neutronique en Europe, qui fournira les outils dont l'Europe a besoin pour les 50 prochaines années : Neutron Science in Europe, Strengthening world-Class research and Innovation delivering economic and societal impact. Entre autres, la création d'un « European Laboratory for Neutron Science (ELNS) » y est proposée.

2.3.2 ELENA, European Low Energy accelerator-based Neutron facilities Association

L'association ELENA [93] a été créée en 2020 pour promouvoir la coopération entre laboratoires européens ou entreprises privées ou individus travaillant dans le domaine des sources de neutrons utilisant un accélérateur et une réaction à basse énergie pour produire des neutrons. Ces sources sont désignées sous le vocable CANS ou HiCANS. Les membres de l'association s'engagent à initier des collaborations, conférences, ateliers et réunions afin de créer un écosystème efficace pour la recherche et les applications dans tous les domaines de la science et de l'industrie autour de ces sources de neutrons. Les institutions représentées sont le JCNS, le Laboratoire Léon Brillouin, ESS Bilbao, Mirrotron Ltd, l'Institute for Energy Technology (IFE), l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), l'Université d'Uppsala et Soreq NRC (voir Figure 45).

⁹¹ La durée moyenne d'un run expérimental à ESS est projetée à 3 jours. En moyenne, à l'ILL et au LLB, deux runs sont nécessaires pour produire une publication scientifique. On peut donc penser qu'à ESS, la productivité scientifique sera améliorée de 30%.

⁹² <https://lens-initiative.org/>

⁹³ ELENA, European Low Energy accelerator-based Neutron facilities Association

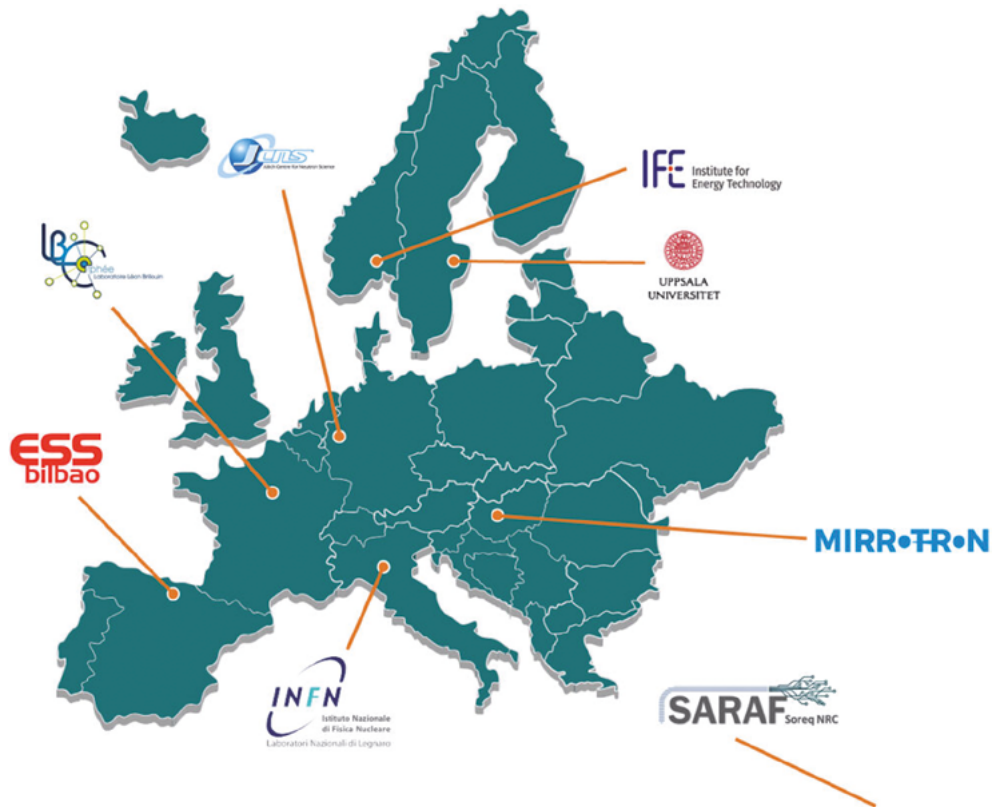


Figure 45 : Le réseau ELENA, European Low Energy accelerator-based Neutron facilities Association.

2.3.3 Les HiCANS dans le paysage européen

Plusieurs CANS de puissances modestes sont actuellement en fonctionnement à l'étranger mais leurs performances ne sont pas encore suffisamment élevées pour en faire des sources compétitives pour la recherche. Les projets actuels de HiCANS en Europe visent à multiplier les performances de ces sources par un facteur 100 et à atteindre ainsi des performances similaires aux réacteurs de recherche ou aux sources à spallation de puissance moyenne.

Le développement d'un réseau de sources de type HiCANS est une opportunité de diversifier les sources en Europe et de fournir un accès « local » à différents nouveaux pays. Le LENS [92] envisage ainsi que ce type de sources devienne une composante du paysage de la neutronique européenne à l'horizon de la prochaine décennie (voir [94] et Figure 46), permettant de maintenir un écosystème européen viable autour des techniques de diffusion neutronique.

⁹⁴ Neutron Science in Europe (2022), LENS position paper.

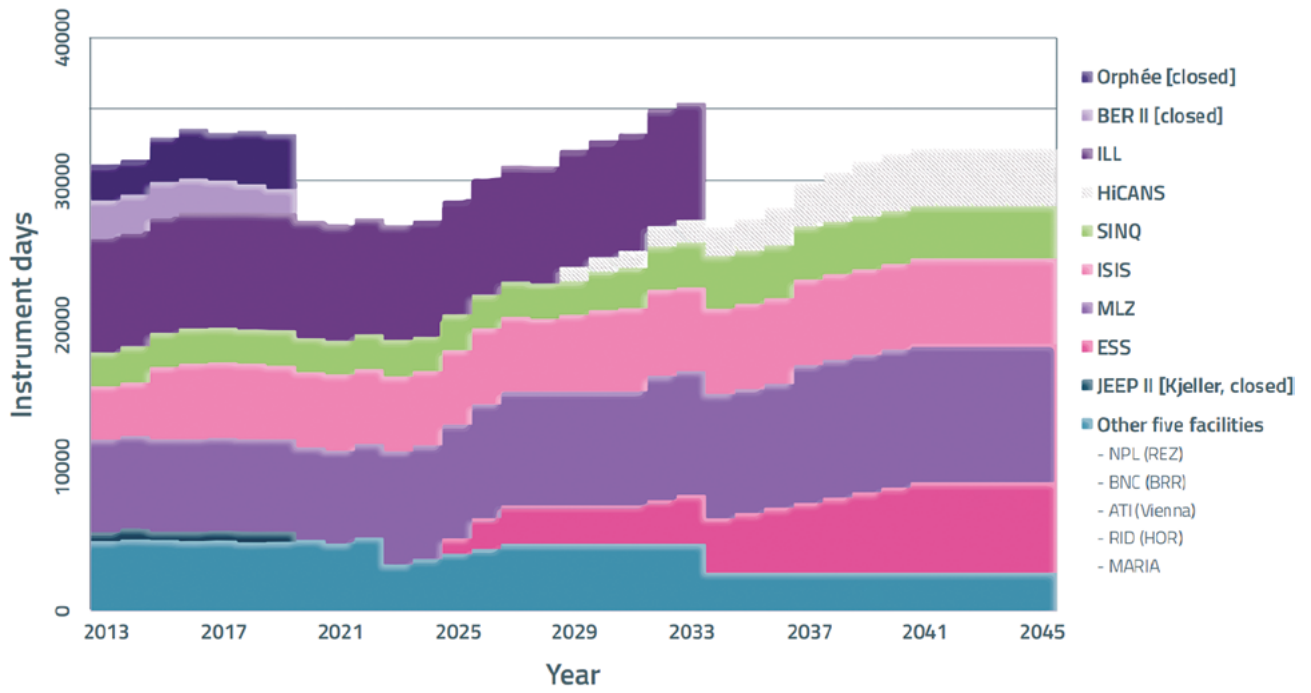


Figure 46 : Une projection de la capacité disponible en Europe basée sur la mise en œuvre complète de toutes les opportunités identifiées. Adapté de [94].

3 Qui sont les utilisateurs des techniques neutroniques ?

Les utilisateurs des techniques de diffusion neutronique ont des profils variés :

(i) des utilisateurs « experts » réalisant plusieurs expériences de diffusion neutronique par an. Ces utilisateurs peuvent être issus de laboratoires de neutronique mais aussi de laboratoires académiques ;

(ii) des utilisateurs « occasionnels » qui réalisent ponctuellement des expériences pour répondre à des questions spécifiques ;

(iii) des « clients » industriels qui souhaitent obtenir des réponses à des questions spécifiques mais qui ne s'engagent pas eux-mêmes dans l'utilisation des techniques ; ils sous-traitent les études à des tiers via des thèses, des projets ANR, voire des contrats de prestation.

Lors des 4 dernières années, ce sont plus de 300 laboratoires français différents qui ont bénéficié de temps d'expérience pour des expériences de diffusion neutronique.

3.1 La production scientifique en Europe et en France

Du fait que les techniques neutroniques offrent de multiples capacités d'analyse dans un large éventail de domaines, leurs communautés scientifiques d'utilisateurs sont extrêmement variées. Au-delà des communautés du magnétisme et des polymères, fortement représentées parmi les utilisateurs de la diffusion neutronique, on trouve parmi les utilisateurs des scientifiques issus de laboratoires de métallurgie, de science des matériaux, de chimie du solide, de biophysique, de géologie, de physique des particules, et même aussi des scientifiques travaillant dans des musées.

Le contingent d'utilisateurs réguliers des techniques neutroniques en France est estimé à 1500 scientifiques [85] dont plus de 300 « utilisateurs experts » [95]. Ces scientifiques accèdent aux installations de diffusion neutronique pour la réalisation d'expériences via des appels à projets, en général bisannuels, qui sont examinés par des comités d'experts. Lors de leur accès aux installations de diffusion neutronique, les scientifiques extérieurs bénéficient d'un support technique et scientifique au sein de l'installation hôte.

Les techniques de diffusion neutronique sont à l'origine d'environ 4500 articles scientifiques par an dans le monde (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 (voir Figure 47).

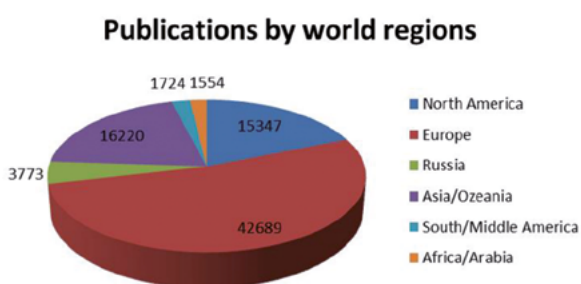


Figure 47 : Nombre total de publications dans les différentes régions du monde sur la période 2005–2015 (issu de [96]). L'Europe contribue à plus de 50 % de la production mondiale dans les domaines utilisant les techniques de diffusion neutronique.

NB : La production d'articles uniques est d'environ 45 000 articles sur une période de 10 ans. Dans le graphe ci-dessus, les contributions intercontinentales sont comptées plusieurs fois, d'où une somme totale plus élevée que 45 000 articles uniques.

⁹⁵ Feuille de route de la neutronique Française proposée par la Fédération Française de Diffusion Neutronique 2FDN.

⁹⁶ T. Gutberlet et al, Neutron News **29**(2) (2018) 18-24. *Do neutrons publish? A neutron publication survey, 2005–2015*

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 à égalité avec l'Allemagne et derrière les États-Unis (Figure 48).



Figure 48 : Distribution par pays des publications scientifiques utilisant la diffusion neutronique en Europe sur la période 2005-2015 (issu de [96]). La France est le deuxième publiant mondial dans le domaine de la diffusion neutronique derrière les États-Unis.

La qualité des publications, dont l'analyse est présentée Figure 49, est au meilleur niveau des standards internationaux avec près d'un quart des publications parues dans des revues ayant un facteur d'impact supérieur à 5. Une fraction des publications utilise des données mesurées sur différentes sources, illustrant le fait qu'il peut être nécessaire de réaliser des études préliminaires sur des sources nationales avant la réalisation d'expériences sur les sources internationales. Cette fraction est cependant limitée et les sources nationales conduisent des programmes de recherche propre en parallèle de l'utilisation de la source européenne (ILL actuellement, ESS dans le futur). On notera aussi 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 le PSI en Suisse ou le RID aux Pays-Bas produisent des publications de même qualité que les sources les plus intenses telles que l'ILL. Cependant, des mesures nécessitant de hauts flux ne peuvent être réalisées sur les sources à flux moyen.

Il s'agit d'un écosystème de sources dont on ne peut supprimer une composante.

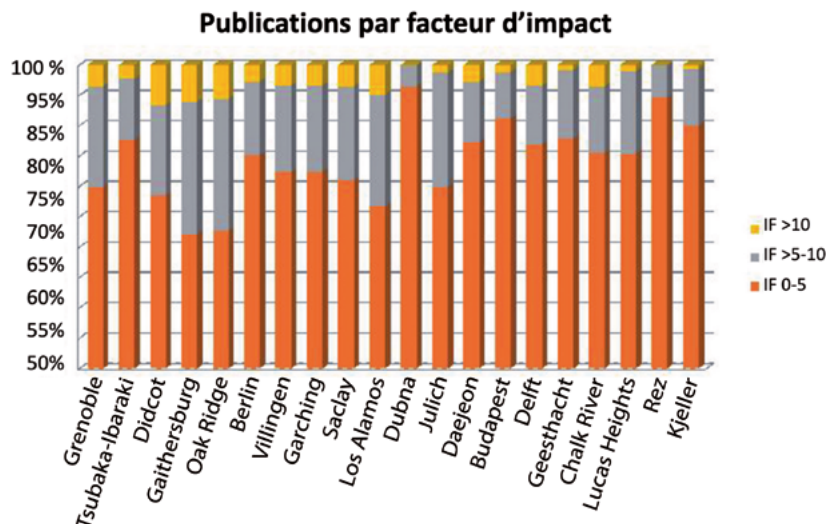


Figure 49 : Distribution des publications selon le facteur d'impact des journaux pour différentes installations neutroniques dans la période 2005-2015 (issu de [96])

3.2 Les différentes communautés, GDR et fédérations

L'identification des utilisateurs de diffusion neutronique passe par deux canaux : celui des chercheurs à titre individuels ou de laboratoires, et celui des groupes formés de chercheurs de différents horizons autour d'un même thème. Identifier les communautés dont certains membres sont utilisateurs de diffusion neutronique apporte l'avantage de promouvoir la technique au sein de la communauté et de bénéficier en échange de l'ouverture de celle-ci sur les autres techniques complémentaires. Le CNRS soutient des Groupements De Recherche (GDR [97]), renouvelés tous les 4 ans, dont les thématiques sont en constante évolution pour suivre les nouveaux défis scientifiques. Nous proposons de maintenir des liens privilégiés avec les GDR en activité et aussi de suivre l'évolution des thématiques prioritaires. Aujourd'hui, les groupes suivants ont été approchés et plusieurs d'entre eux ont apporté leur soutien écrit [98] au projet d'une nouvelle infrastructure nationale pour la diffusion neutronique.

- **GDR Hydrates de gaz (GDR2026)**

Le GDR Hydrates du CNRS regroupe des laboratoires de recherches du CNRS et des instituts partenaires. Son périmètre scientifique se décline autour de quatre pôles de recherche, soulignant sa pluridisciplinarité. Un socle transversal est dédié aux sciences moléculaires et vise à fournir des données fondamentales (thermodynamique, cinétique, physico-chimie, spectroscopie, structure, etc.) indispensables aux pôles de recherche « à finalité » dans les domaines du génie des procédés, les géosciences et l'astrophysique.

- **GDR SolvATE (Solvatation : Avancées Théoriques et Expérimentales, GDR2035)**

Les phénomènes liés à la solvatation occupent une place fondamentale dans le domaine de la chimie. L'importance des effets de solvant a continuellement poussé les limites des connaissances expérimentales et théoriques, dans la recherche de base comme dans des domaines applicatifs, avec le développement de nouvelles technologies.

- **GDR MEETICC Matériaux, Etats Electroniques, Interactions et Couplages non-Conventionnels (GDR)**

Le GDR MEETICC rassemble une communauté de chercheurs expérimentateurs et théoriciens, chimistes et physiciens, s'intéressant aux états et propriétés électroniques non conventionnels dans des systèmes variés mais faisant appel à des concepts communs : systèmes corrélés, phases topologiques et systèmes confinés. La complexité de ces systèmes, comme les supraconducteurs non-conventionnels, les multiferroïques, les isolants topologiques ou les gaz d'électrons 2D, nécessite de mobiliser les expertises multidisciplinaires et complémentaires de cette large communauté. Ces systèmes font l'objet d'intenses investigations dans le monde entier et leurs propriétés remarquables pourraient, une fois contrôlées, apporter des ruptures dans les domaines notamment de l'énergie et des technologies de l'information.

- **GDR SLAMM (Solliciter LA Matière Molle, GDR2019)**

Le GDR SLAMM réunit au sein d'un même réseau différentes communautés de recherche fondamentale et appliquée autour du comportement de fluides complexes à différentes échelles. SLAMM se propose de caractériser, rationaliser, modéliser et prédire les comportements complexes de la matière molle, à l'équilibre et sous l'effet de sollicitations, avec deux motivations principales : (i) dégager des comportements universels, communs à de nombreux systèmes expérimentaux et (ii) répondre à des questions plus spécifiques en lien avec des applications, les fluides complexes étant en effet omniprésents dans la vie de tous les jours (produits alimentaires, cosmétiques, boues, peintures, etc.), et au cœur de nombreux domaines industriels, allant de l'agro-alimentaire aux revêtements et à la récupération assistée du pétrole.

⁹⁷ GDR CNRS/INC Institut National de Chimie, GDR CNRS/INP Institut National de Physique.

⁹⁸ Voir lettres en Annexe

- **GDR EMIE (Edifices moléculaires isolés et environnés, GDR3533)**
 Le groupement de recherche « Edifices Moléculaires Isolés et Environnés » (EMIE) a pour mission de rassembler la communauté française des physicien(ne)s et chimistes travaillant sur des systèmes moléculaires de taille et de complexité variées, les objets d'étude pouvant être isolés en phase gazeuse mais aussi placés dans un environnement contrôlé. L'objectif principal des recherches menées au sein du réseau EMIE est d'améliorer la description et la compréhension de la matière aux échelles atomique et moléculaire. Autour des aspects fondamentaux de la physique moléculaire expérimentale et théorique, cette communauté est naturellement vouée à se développer et s'enrichir au contact de disciplines voisines (chimie, biologie) et à s'ouvrir à d'autres domaines aux impacts sociétaux importants (sciences de la vie, sciences de l'atmosphère et l'Univers, énergie).
- **GDR MCM2 (Magnétisme et commutation moléculaires 2 (MCM2)**
 3,5 mm
- **GDR ISM Interfacial Soft Matter (ISM)**
 L'ISM a pour mission de fédérer la communauté française étudiant la structure et la dynamique des multiples formes de la matière molle interfaciale. L'ISM se veut un lieu d'échanges entre la communauté française et internationale – de la physique, de la chimie et de l'ingénierie, utilisant un ensemble diversifié d'outils expérimentaux, théoriques et informatiques – pour créer une dynamique de rassemblement et d'échange d'idées.
- **GDR LIPS Liquides Ioniques et Polymères (GDR)**
 Les liquides ioniques associés aux polymères constituent une thématique émergente bénéficiant d'une dynamique de recherche à tous les niveaux d'élaboration d'un matériau fonctionnel, de sa synthèse à sa structuration, déterminante pour ses propriétés finales, en passant par sa mise en œuvre. Les travaux menés séparément dans les deux communautés – liquides ioniques et polyméristes – ont beaucoup progressé ces dernières années. Il s'agit maintenant de les faire converger vers une compréhension des relations entre la structure du liquide ionique et les propriétés du composite polymère-liquide ionique.
- **GDR HOWDI Hétérostructures de van der Waals de basse Dimensionnalité (GDR)**
 Un immense foisonnement scientifique a vu le jour autour de structures artificielles créées par assemblage à l'échelle atomique de matériaux 2D dans des structures appelées hétérostructures de van der Waals (HvdW). Cette approche permet de façonner de nouvelles propriétés physiques en contrôlant l'assemblage à l'échelle atomique. Elle irrigue tous les domaines de la physique : transport électronique (régimes nouveaux allant du balistique au régime de saturation, de la supra-conductivité aux isolants de Mott), optiques (capacité à créer des miroirs quasi parfaits d'épaisseur atomique), magnétiques, et thermiques (nouveaux modes de dissipation de la chaleur grâce à l'exploitation de modes infrarouge en champ proche dans la structure)

Par ailleurs, il existe différentes instances, sous la forme de fédérations ou d'associations, dont l'activité est centrée autour des techniques de diffusion des neutrons ou bien qui utilisent les techniques neutroniques.

- **Fédération Française de Neutronique 2FDN**

Cette fédération de recherche a été créée en 2017 pour faire face aux défis à venir liés au bouleversement du paysage français et européen en science neutronique. Elle réunit tous les professionnels travaillant dans le domaine de la diffusion neutronique pour gérer les ressources sous une même bannière. Ceci implique de maintenir une recherche et une formation excellentes et innovantes, adaptées à la mutation des instruments de neutronique français et européens, et de soutenir les besoins des utilisateurs. Les tutelles de cette Fédération sont le CNRS, le CEA, l'Université Paris-Saclay et l'Université Grenoble Alpes. Cette Fédération regroupe le Laboratoire Léon Brillouin UMR12, IRIG/MEM, l'Institut Néel, 3SR, le LIPHY et le SyMMES.

- **Société Française de neutronique SFN**

La SFN est une société savante créée en 1994 afin de promouvoir la neutronique au sein de la communauté scientifique et de fédérer la communauté française de la neutronique, avec un vaste spectre de domaines scientifiques (physique, chimie, biologie, etc.). Chaque année, elle organise les Journées de la Diffusion Neutronique, durant lesquelles elle décerne son prix de thèse pour récompenser un.e jeune scientifique. Sont aussi proposées régulièrement des Écoles Thématiques, dont les cours sont publiés et en libre accès [99].

- **Fédération Française des Matériaux FFM**

Cette Fédération regroupe 29 associations dont la Société Française de Neutronique. Elle a pour mission de favoriser la coopération entre les associations concernées et de renforcer la connaissance et l'image des matériaux.

- **European Neutron Scattering Association, ENSA**

L'Association Européenne de Diffusion des Neutrons (ENSA) rassemble des scientifiques qui utilisent des sources de neutrons pour leurs recherches. Elle rassemble dans un même bureau les représentants des sociétés nationales européennes, telles que la SFN en France, et les représentants des sources.

- **Association Française de Cristallographie, AFC**

Ses principales missions sont de promouvoir l'échange de savoirs et les interactions entre les cristallographes francophones issus de toutes les disciplines, notamment par l'animation de la communauté au travers de différents médias, l'organisation de colloques thématiques ou interdisciplinaires, des actions d'enseignement et de formation et le soutien financier, notamment auprès des étudiants, pour participer à des événements en lien avec la cristallographie. De façon générale, toute action en lien avec la cristallographie est susceptible d'être envisagée par l'AFC.

- **Association Française de Magnétisme Moléculaire, AM²**

Pour développer les matériaux de demain, les chimistes et les physiciens doivent développer et étudier de nouvelles molécules aujourd'hui. Avec la chimie de coordination au cœur de cette communauté, le développement de matériaux moléculaires magnétiques et commutables nécessite la synergie de chimistes, physico-chimistes, théoriciens, et physiciens issus des laboratoires et grands instruments français. Cette association a pour but de donner une structure pérenne à cette communauté, organisée depuis plus de 20 ans en différents GDR financés par le CNRS (dont le GDR MCM2, dernier en date). L'existence d'une association permettra d'assurer sur le long terme la mise en place d'actions scientifiques, de vulgarisation, de formation ; de tisser un réseau solide avec d'autres associations ou GDR du CNRS afin d'accroître le socle d'expertise des membres de l'association ; de soutenir les jeunes chercheurs dans leur mobilité ; de peser sur les institutions afin d'afficher les thématiques de l'association dans les priorités de financement, etc.

⁹⁹ Écoles thématiques de la SFN : <http://www.sfn-asso.fr/ecoles-thematiques/>

3.3 Les laboratoires académiques

L'existence d'une source de neutrons se justifie essentiellement par les opportunités de mesures qu'elle offre aux 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. Par exemple, lorsque le LLB exploitait la source Orphée, il bénéficiait de la contribution de laboratoires extérieurs (pour la fourniture d'échantillons, d'autres mesures de caractérisation, etc.) dans beaucoup de ses thématiques de recherche propre. Réciproquement, la plupart des expériences des utilisateurs extérieurs sont réalisées en collaboration avec du personnel de l'installation hôte (pour la réalisation de l'expérience, l'analyse des données, etc.) 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.

Le tableau ci-dessous illustre les principales thématiques de recherche des groupes qui utilisaient le réacteur Orphée. Certains des scientifiques de ces laboratoires étaient devenus des utilisateurs « experts » ou du moins des utilisateurs très réguliers des techniques de diffusion neutronique.

Thématiques	Laboratoires	Instruments
Matière Molle		
<ul style="list-style-type: none"> nanocomposites ; mésoporeux ; suspensions de nanoparticules colloïdales ; 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 IPREM Pau IPR (Rennes) ISCR (Rennes) AgroSUP/PAM, Dijon INRA SIMM ESPCI Paris, IFP Rueil-Malmaison Synchrotron Soleil, INSP Paris (Paris 6), Institute Light and Matter, Lyon	SANS Réflectométrie
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 IPR, Rennes	SANS Radio-Tomo

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)	Réfectométrie
Biophysique		
<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 nucléoprotéiques. 	IGDR (Univ. Rennes) IBPC (Paris) LBM (Sorbonne Univ.) ICS (Strasbourg) LBSR (CEA, Saclay) Agrosup (Dijon) CBS (Montpellier) IATE (Univ. Montpellier)	SANS Spectroscopie Spin-Echo Réfectométrie
Métallurgie		
<ul style="list-style-type: none"> alliages nucléaires (ordres locaux et des mécanismes de ségrégation) ; processus d'hydruration ; propriétés mécaniques. 	CEA/DES/SRMA CEA/DES/SRMP ICMMO ENSAM ICA, Mines d'Albi	SANS Spectroscopie Spin-Echo Réfectométrie
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. 	ITODYS (Univ. Paris-7) LCC LPCNO et INSA (Toulouse) IPCMS (Strasbourg) CEA/IRAMIS/SPEC ICMMO (Univ. Paris-Saclay) ICPM (Paris)	SANS Diffraction
Matériaux fonctionnels		
<ul style="list-style-type: none"> matériaux pour l'énergie (photovoltaïques, thermoélectriques, batteries, stockage hydrogène) ; matériaux pour le stockage de l'information. 	Lab. de Réactivité et Chimie des Solides, Amiens SyMMES, UGA PHENIX (Paris) Institut des Sciences Moléculaires (Bordeaux) CEA/DRT/LITEN (Grenoble)	SANS II Diffraction Radio-Tomo
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). 	ICMMO (Univ. Paris-Sud) LPS (Univ. Paris-Sud) Université de Lorraine INPG, CEA, Institut Néel (Grenoble) Soleil	SANS I Diffraction Radio-Tomo Spectroscopie TdV
Systèmes 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 CEA/SPEC, Univ Paris-Saclay IUT de Blois, Univ. Tours	Diffraction SANS

Tableau 3 : Thématiques scientifiques pouvant être étudiées sur la source ICONe sur la base des études menées sur le réacteur Orphée. Les laboratoires listés sont des laboratoires comportant des utilisateurs très réguliers (5-10 manips sur les 10 dernières années).

Après la fermeture d'Orphée, la Fédération Française de Neutronique (2FDN) a été créée pour gérer l'accès des utilisateurs français aux différentes ressources disponibles. Depuis la création de la 2FDN en 2018, sur la période 2016-2022, 129 laboratoires français ont effectué des demandes via la fédération.

En parallèle, des laboratoires français accèdent à du temps de diffusion neutronique via l'Institut Laue Langevin (ILL). Sur la même période, plus de 250 laboratoires français ont eu accès à du temps de neutrons à l'ILL.

Il y a évidemment du recouvrement entre les deux canaux d'accès. Au total, ce sont plus de 300 laboratoires français différents qui ont bénéficié de temps d'expériences ces 4 dernières années.

Les listes des laboratoires français utilisateurs des techniques de diffusion neutronique sont compilées en Annexe 8.

3.4 Les utilisateurs industriels

L'industrie utilise les techniques neutroniques à plusieurs niveaux :

1. Examens d'assurance qualité / screening systématique ;
2. Problèmes ponctuels ad-hoc, par ex. concernant la qualité de certaines pièces ;
3. Recherche et développements conjoints via des contrats de recherche (ANR, CIFRE).

Ces niveaux peuvent être abordés dans les installations neutroniques par différentes approches.

3.4.1 Examens systématiques d'assurance qualité

Dans ce cas, une ligne de faisceau de l'installation est dédiée au criblage de pièces industrielles. C'est typiquement le cas pour le criblage d'éléments pyrotechniques, de pièces métallurgiques, d'éléments nucléaires, etc. Une autre activité de qualification concerne les équipements électroniques soumis à des rayonnements neutroniques (en général atmosphériques). L'irradiation aux neutrons permet de quantifier les taux d'erreurs soft ou hard et de qualifier des matériels sensibles (aéronautique, communication).

Ces stations sont exploitées comme des installations « industrielles » et ne sont pas occupées à des fins scientifiques. Les mesures sont fournies en tant que service. Le coût de ces mesures neutroniques limite l'utilisation de ces techniques à des objets techniques de grande valeur. Les HiCANS pourraient offrir ici un accès flexible, rapide et rentable.

Un exemple d'une telle utilisation est fourni par l'activité de radiographie industrielle sur le réacteur Orphée. Cette activité était sous-traitée à une entreprise extérieure qui avait la charge de réaliser des contrôles qualité sur des éléments pyrotechniques de sécurité : cordeaux pyrotechniques, relais et cisailles pyrotechniques. Ces éléments sont utilisés dans différents systèmes de sécurité dans des systèmes aérospatiaux (avions, fusées). Les clients étaient principalement PyroAlliance, Dassault, ArianeSpace et Nexter.

3.4.2 Problèmes ponctuels ad-hoc

Au cours d'un procédé industriel, il peut arriver que le produit se détériore et que le nombre de pièces rejetées augmente au-delà du niveau habituel ou acceptable. Dans ce cas, il y a un besoin bien défini et urgent d'identifier la source du problème et les moyens d'y remédier. Le simple fait que l'industrie demande un diagnostic supplémentaire, à partir de techniques qu'elle n'emploie pas régulièrement, indique que la question est urgente, nécessitant des résultats dans un délai d'une ou deux semaines. De telles demandes arrivent par intermittence et de manière imprévue. Cela signifie qu'une grande flexibilité et une réponse rapide sont demandées du côté de l'installation neutronique.

3.4.3 Recherche et développement conjoints

Il existe des projets communs avec l'industrie pour le développement de nouveaux matériaux. De tels projets s'étendent sur des périodes plus longues, d'au moins deux ou trois ans et souvent sur une, voire deux thèses communes sur le sujet. Dans le domaine du nucléaire, les temps de développement peuvent être encore plus longs.

3.4.4 Quantification de la recherche en lien avec l'industrie

Il est difficile de quantifier l'utilisation de la diffusion neutronique pour la recherche industrielle amont via les canaux académiques car elle est essentiellement réalisée en collaboration avec des laboratoires académiques à travers des contrats de collaborations de type ANR ou des thèses CIFRE par exemple.

L'ILL estime toutefois 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 \geq 4 par exemple) [100].

Au LLB, une analyse de la période 2012-2014 [101] évalue à 11 % le temps de faisceau demandé en lien avec des applications industrielles (pour les techniques de diffusion neutronique). Des exemples d'industriels utilisant les techniques neutroniques sont donnés dans le tableau 51, notamment Solvay, L'Oréal, Essilor, Thalès, Nestlé, IFP, TOTAL, EDF, CEA, Michelin, SDH, Swiss Neutronics, NOB, Aubert et Duval, BIC... Les autres services industriels (hors diffusion neutronique) fournis par le réacteur Orphée tels que la radiographie, l'irradiation du silicium ou la production de radio-isotopes généraient un chiffre d'affaires d'environ 20 % du coût de fonctionnement du réacteur Orphée.

Une étude récente conduite par le programme BrightnESS de l'Union Européenne [85] a compilé les informations des expériences réalisées sur les sources de neutrons européennes. La valeur moyenne est du même ordre de grandeur que les observations de l'ILL et du LLB. Environ 10 % de la recherche académique bénéficie d'un soutien industriel (sous des formes variées). Une fraction de l'ordre de 5 % correspond à des expériences facturées à un industriel (de 1 à 2 % pour les expériences de diffusion neutronique ; de 3 à 4 % si on inclut les services de radiographie et d'irradiation). Cette analyse regroupe les installations en trois catégories (A, B, C) selon leurs types et leurs puissances. On notera que les installations de catégorie B (puissance moyenne, « user program » limité) et de catégorie C (puissance faible, pas de « user program ») ont une contribution industrielle (« proprietary research ») plus importante. Cela est dû au développement de techniques non liées à la diffusion neutronique per se telles que la production de radio-isotopes ou l'analyse par activation neutronique par exemple. L'accès à ces installations est aussi moins onéreux et plus simple pour les industriels. Les activités des installations de catégorie A (haut flux et usage dédié principalement à un « user program ») sont à contrario essentiellement centrées sur les techniques de diffusion neutronique pour des usages académiques et plus difficiles d'accès pour les industriels.

¹⁰⁰ ILL, communication privée

¹⁰¹ J.-P. Visticot, Directeur Adjoint du LLB, non publié

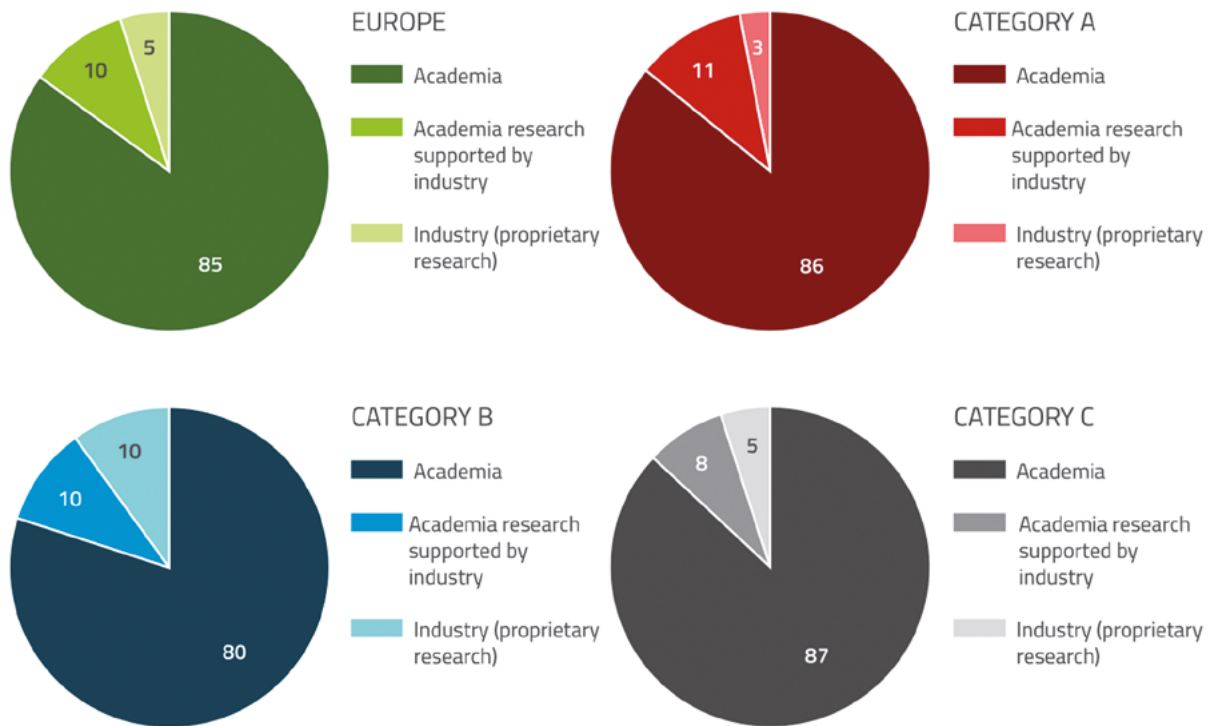


Figure 50 : Distribution des utilisateurs européens des différentes sources de neutrons en fonction de l'affiliation et exprimée en fraction du temps d'expérience. Les installations sont classées en 3 catégories : (A) ISI, ILL, MLZ, LLB, SINQ, (B) BER II, BNC, NPL, (C) TRIGA JGU, JEEP II, TRIGA JSI, RPI, ATI, MARIA, and RID (adapté de « Neutron Users in Europe », BrightnESS).

Si l'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 (calculé à partir du coût du temps de faisceau uniquement) de l'ordre de 30 M€ par an en Europe, dont 5 M€/an en France. Ce montant ne représente qu'environ 0,01 % de l'effort total de R&D en Europe. Il ne semble pas y avoir d'obstacle financier majeur pour augmenter cette fraction.

Les sources de neutrons à flux faible ou moyen ont un potentiel élevé pour les applications technologiques, la recherche appliquée dédiée, les tests non destructifs et le développement de systèmes ainsi que pour faire des mesures de type contrôle qualité en offrant un accès régulier, simple, peu coûteux et confidentiel. Des mesures de contrôle qualité étaient réalisées sur Orphée à l'aide de la radiographie neutronique et pourraient être étendues à des techniques comme SANS, dont l'interprétation des données est parfois très simple. Un environnement échantillon spécialisé pour les applications industrielles peut être facilement mis à disposition. Par ailleurs, l'instrumentation est plus adaptable à des besoins spécifiques et évolutifs sur une source compacte car celle-ci impose des contraintes moins fortes sur les instruments et peut aussi facilement accommoder un instrument dédié à des mesures spécifiques. Un industriel pourrait même éventuellement participer à la construction et au fonctionnement de certains instruments ciblés.

Pour l'industrie, la non-divulgaration des résultats et l'accès immédiat aux instruments sont des points clés, souvent beaucoup plus importants qu'un flux plus élevé. Sur une source à haut flux (ex. ILL ou ESS), les faisceaux d'essai et les instruments peuvent être indisponibles en raison du programme expérimental académique en cours, rendant ces sources moins attractives que des sources offrant un flux moindre mais plus de flexibilité et de disponibilité.

Matière molle – chimie Peinture, pneumatiques, polymères, détergents, savons, couches minces, mousses, composites, protéines, agroalimentaire, bruts pétroliers.	Michelin, Solvay, L'Oréal, Essilor, Nestlé, Bel, IFP, Procter & Gamble, Saint Gobain, Synthelis	SANS, Réflectivité
Matériaux pour les nouvelles tech- nologies de l'énergie (NTE) Batteries au Li, nouveaux matériaux pour les batteries, clathrates, cellules photo- voltaiques, stockage de l'hydrogène, PAC.	TOTAL, Bolloré, Umicore, Thalès, EDF, CEA, BIC, ORANO, C-TEC, SAFT, AREVA, ST Microelectro- nics	SANS, Radiographie, Dif- fraction, Réflectivité
Contrôle qualité Eléments pyrotechniques, miroirs.	Dassault, PyroAlliance, SDH, Swiss Neutronics, NOB, XENOCS	Radiographie, réflectivité
Autres utilisations Tenue sous irradiation.	Renault, EFS, ERGTP, EASII-IC, Hirex, TRAD, Nu- clétudes	

Tableau 4 : Les différents domaines scientifiques d'intérêt pour les industriels français venant réaliser des expériences de diffusion neutronique ainsi que les techniques utilisées.

4 ICONE : proposition de construction d'une nouvelle source de diffusion neutronique en France

Nous décrivons les caractéristiques d'ICONE, une source de neutrons pouvant répondre aux besoins de la communauté française. Une telle source devra offrir une suite instrumentale couvrant les principales techniques de diffusion, y compris les techniques de spectroscopie.

Cette source devra être d'accès facile et pouvoir s'adapter aux nouveaux modes de recherche en proposant des accès rapides.

Des lignes de faisceau pourront être dédiées sur une longue durée à des thématiques scientifiques ciblées, soit à l'initiative de l'installation qui développera un programme de recherche spécifique dans un domaine, soit par la mise à disposition d'une ligne de faisceau à un institut extérieur.

L'écosystème des sources de neutrons en Europe est vital pour la recherche et l'innovation dans une multitude de domaines scientifiques et techniques. Cet écosystème est cependant en train de s'étioler et menace la pérennité de l'expertise dans l'utilisation des techniques de diffusion neutronique portée par une communauté scientifique très active. Une baisse de capacité, et par voie de conséquence de la production scientifique, est enregistrée dans toute l'Europe mais la France est dans la situation la plus inquiétante. Alors que l'Europe, dont la France, investit dans la construction de la source de neutrons la plus puissante du monde, il est stratégique de maintenir l'expertise et le leadership français pour pouvoir tirer les meilleurs bénéfices des capacités d'ESS.

Depuis une dizaine d'années, différents instituts aux États-Unis, au Japon et en Europe étudient les perspectives offertes par de nouvelles sources de neutrons utilisant des accélérateurs à basse énergie : les CANS (Compact Accelerator-driven Neutron Sources) ou les HiCANS (High Current Accelerator-driven Neutron Sources). Ces sources de neutrons pourraient permettre d'offrir aux utilisateurs des services équivalents à un réacteur de recherche ou à une source à spallation de puissance moyenne à une fraction du coût d'une installation comme ESS. Les HiCANS sont un nouveau type de sources offrant de multiples opportunités. Nous proposons différentes stratégies pour réinventer la manière de réaliser des expériences de diffusion neutronique et profiter des opportunités offertes par ces nouveaux types de sources de neutrons.

Dans les parties précédentes, nous avons montré la nécessité des techniques neutroniques pour résoudre et étudier des problèmes clés liés aux enjeux sociétaux actuels et faire progresser les connaissances. Nous avons présenté comment doivent s'articuler les infrastructures en Europe pour être efficaces. Nous avons ainsi identifié le besoin impérieux d'une nouvelle source sur le sol français à l'horizon 2030.

Nous proposons donc la construction d'une nouvelle source de neutrons française, ICONE, dédiée à la diffusion neutronique et basée sur la technologie des HiCANS, et évaluons les services qu'elle pourrait rendre à la communauté scientifique.

4.1 Quelles seraient les missions d'une nouvelle source de neutrons française ?

4.1.1 Réinventer l'accès aux techniques de diffusion neutronique

De façon récurrente, les utilisateurs des neutrons signalent que la difficulté d'accéder à du temps de faisceau les freine dans leurs recherches, en particulier en comparaison avec les autres plateformes et techniques de caractérisation des matériaux, souvent disponibles en interne au sein des laboratoires (RMN, microscopie électronique). Nous proposons donc que la plateforme ICONNE offre de nouveaux types de services autour de la diffusion neutronique, différents de ce qui est actuellement proposé par les très grandes installations existantes, en particulier en termes de « flexibilité » d'accès.

4.1.1.1 Accès rapide

Dans un certain nombre d'études de matériaux, un « screening » rapide de potentiels nouveaux matériaux peut être très intéressant pour valider certaines de leurs propriétés.

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, bien qu'indispensable d'un point de vue scientifique, 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 un mois sont souhaitables.

Ce type d'accès sera aussi 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 sur 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 sur des thématiques très concurrentielles.

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

Le coût d'une sortie de faisceau sur une source compacte étant marginal en raison des faibles besoins de protection radiologique, il est 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.

Une autre option possible est un temps de faisceau garanti sur le long terme (3-5 ans) sur les projets entrant dans certaines thématiques, par exemple celles mises en avant par l'ANR ou les projets européens. Avec ce nouveau mode de fonctionnement, les chercheurs dans ces thématiques seraient assurés d'avoir accès aux techniques de diffusion neutronique et pourraient donc, avec sérénité, les inclure pleinement dans leurs propositions de projet.

4.1.1.3 Encourager les développements instrumentaux

Les sources de petites et moyennes performances ont souvent été des lieux privilégiés pour les développements instrumentaux originaux. Nous pouvons par exemple mentionner la rétrodiffusion [102] (créée au Forschungs-Reaktor München, Allemagne), la spectroscopie à écho de spin [103] (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. 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... À 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 raison à la fois du coût du temps de faisceau et des contraintes réglementaires complexes.

La source ICONA serait idéale pour réaliser des développements méthodologiques en neutronique, par exemple :

sur les modérateurs pour la production de neutrons froids ($E < 10$ meV) et très froids ($E < 2$ meV) (VCN, Very Cold Neutrons) ;

sur l'utilisation des techniques de modulation du faisceau neutronique ;

sur de l'instrumentation innovante utilisant les techniques de spin-écho (SEMSANS, SERGIS, SESAME, MIEZE). C'est une des voies dans lesquelles l'instrumentation neutronique peut potentiellement encore ouvrir de nouveaux champs d'étude dans des domaines tels que l'imagerie à l'échelle micrométrique voire nanométrique ou l'étude des excitations magnétiques à très basse énergie sur des objets mésoscopiques.

Un autre aspect qui devra être encouragé sera le développement d'environnements échantillons ainsi que l'implémentation de techniques de mesures complémentaires couplées à des mesures neutroniques (*operando*). Ces développements sont souvent une forte valeur ajoutée pour les utilisateurs. De plus, les coûts de ces développements sont souvent limités. Par ailleurs, ils peuvent être pris en charge par des laboratoires extérieurs qui expriment des besoins spécifiques : on peut citer l'exemple de la spectroscopie Raman [104], de la RMN [105], de la diffusion de lumière [106] ou des mesures diélectriques.

4.1.1.4 Assurer une mission de formation et d'éducation

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 sont 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 pour la diffusion des neutrons car organiser des travaux pratiques sur des installations de pointe telles que ESS serait un gaspillage de ressources. Les sources compactes de neutrons pourront à l'avenir combler cette lacune. Cela garantira un niveau élevé et durable de compétences 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, notamment sur des instruments dédiés, en plus de la formation à la collecte et à l'interprétation des données 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. Par ailleurs, les sources de neutrons nationales 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. Cela, associé à une instrumentation spécialisée, faciliterait la mobilité des étudiants et des chercheurs pendant la formation et encouragerait la collaboration internationale.

¹⁰² A. Heidemann, J. Neutron Res. **19** (2017) 93-101

¹⁰³ F. Mezei, Lecture Notes in Physics **128** (1980)

¹⁰⁴ Systems coupling neutrons with other techniques by Arnaud Hélarly, Chaîne Youtube SFN

¹⁰⁵ R. de Oliveira-Silva et al, J. Neutron Res. **21** (3-4) (2019) pp.155-166.

¹⁰⁶ V. Nigro et al, Rev. Sci. Inst. **92** (2021) 023907

4.1.1.5 Expériences de préparation

Au-delà de la formation sur le long terme d'une génération de chercheurs familiers avec les techniques neutroniques, une petite source permet de réaliser des expériences de préparation. En effet, même pour des expérimentateurs chevronnés, des mesures de mise au point techniques sont souvent nécessaires à la préparation d'une expérience complexe afin d'éviter de gaspiller du temps de faisceau à haut coût sur une installation de type ESS. ICONE permettra ainsi aux utilisateurs français d'être en meilleure position pour obtenir du temps de faisceau à ESS.

4.1.1.6 Proposition de ventilation du temps de faisceau

Les différents besoins listés ci-dessus sont reconnus par l'ensemble des centres de diffusion neutronique. Ceci est malheureusement limité par des obstacles essentiellement financiers : les coûts d'exploitation d'une installation de diffusion neutronique sont actuellement trop élevés pour offrir une vraie flexibilité d'utilisation [107].

À l'inverse, nous pensons que les sources de type HiCANS sont particulièrement adaptées pour implémenter ces possibilités.

La figure ci-dessous présente une proposition de ventilation du temps d'accès entre les différents types d'utilisateurs. Une partie du temps de faisceau serait fléchée vers des thématiques prioritaires.

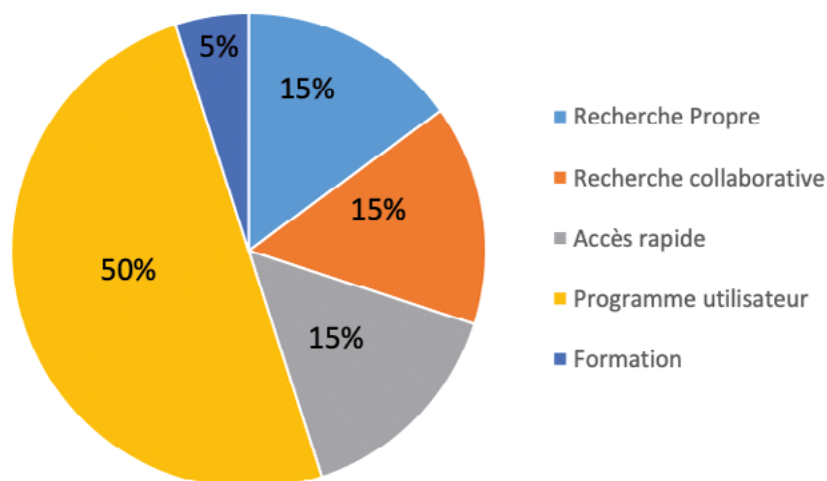


Figure 52 : Exemple de ventilation du temps de faisceau entre la recherche propre du Laboratoire ICONE, la recherche collaborative, l'accès rapide et les utilisateurs réguliers.

4.1.2 Offrir une capacité expérimentale suffisante aux besoins français

De nombreuses expériences ne nécessitent pas de flux extrêmes mais sont néanmoins vitales pour un grand éventail de recherches. Grâce à cette nouvelle plateforme qui offrira une capacité supplémentaire, ces expériences pourront être réalisées.

Sur la base d'une installation proposant 10 instruments de diffusion neutronique et en faisant l'hypothèse que les performances des instruments sont équivalentes aux performances des instruments sur une source de moyenne puissance telle que ISIS-TS2 au Royaume-Uni, il est possible de projeter la durée typique des expériences pour les différentes techniques de diffusion neutronique. La suite instrumentale considérée reflète la répartition des demandes actuelles des utilisateurs français.

NOTA : il s'agit d'une proposition initiale qui peut évoluer en fonction de la priorité des besoins.

¹⁰⁷ On peut par exemple considérer la possibilité de compléter des expériences sans repasser par un comité de sélection, une partie du temps sur l'installation étant dédiée à des expériences « hors programme ».

Instrument	Durée typique d'un Run	Nr. Run / an
SANS1 (soft matter)	2,5 jours	64
SANS2 (hard matter)	5 jours	32
Powder 1	5 jours	32
Powder 2	2,5 jours	64
Powder 3	5 jours	32
Reflectometer	5 jours	32
Radiography	5 jours	32
Direct TOF	5 jours	32
Temps de Vol inverse	15 jours	10
Backscattering	10 jours	16
Spin-Echo	15 jours	10
TOTAL		356

Tableau 5 : Nombre d'expériences pouvant être réalisées sur ICONe 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 expériences peut varier beaucoup. Plus de 300 expériences pourraient être réalisées chaque année.

Le projet ICONe conduit à une roadmap de la capacité neutronique française, présentée sur la Figure 53, qui conserverait le ratio passé source nationale/source européenne proche de 1. La capacité totale resterait significativement réduite par rapport à la décennie 2000-2015. Cependant, un mode d'exploitation plus efficace de la source pourrait augmenter la production scientifique.

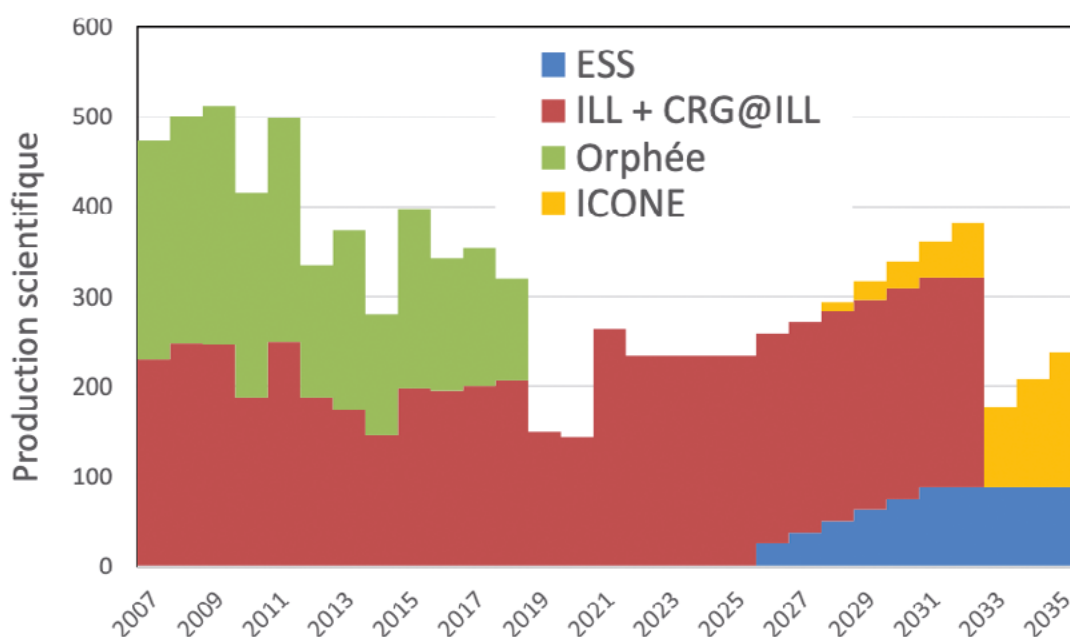


Figure 53 : Évolution de la production scientifique de la communauté de diffusion neutronique française dans le cas de la construction de la source ICONe opérant 10 instruments.

4.2 Complémentarité entre ICONÉ et ESS

L'objectif de la source européenne ESS est de réaliser des expériences jusque-là inaccessibles en diffusion neutronique en raison des limitations actuelles des flux neutroniques : **ESS proposera de nouvelles possibilités.**

Une grande partie des expériences de diffusion neutronique ne nécessite toutefois pas de flux extrêmes, par exemple celles dont le temps de mesure est déjà tellement court sur une source standard (par ex. quelques minutes pour une mesure de diffraction de poudre) que raccourcir ce temps n'apporte rien, ou les études dans lesquelles les temps de mesures sont définis par le processus étudié (fonctionnement d'une pile à combustible, suivi de processus de digestion en agro-alimentaire, dénaturation de protéines sous pression...).

On voit donc que, pour un grand nombre d'expériences, le flux n'est pas la clé de la réussite, comme en témoigne la Figure 54 montrant que la production scientifique d'une source n'est pas proportionnelle au flux de la source. Les sources sont ainsi complémentaires plutôt que compétitrices, aussi bien en termes de types d'expériences que de production scientifique. En effet, une analyse des publications sur différentes sources a montré qu'en moyenne, une publication nécessite 2 expériences. Il peut s'agir de mesures sur deux sources différentes, moyen flux et haut flux. Cette observation conforte le fait que les installations les plus performantes (l'ILL en Europe à ce jour) ont besoin du support des installations plus petites pour augmenter leur productivité. Cet état de fait perdurera avec ESS, qui aura besoin de l'apport d'une vaste communauté de neutroniciens pour révéler son plein potentiel, comme détaillé dans [108]. 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 USA [109].

Afin de pouvoir exploiter ESS de manière efficace, la France aura donc besoin d'un support et d'une expertise nationale pour ses utilisateurs. La source ICONÉ disposera des capacités instrumentales pour mener un programme scientifique de haut niveau permettant une production scientifique conséquente (~100-150 publications par an). Cette source pourra être utilisée par une communauté française de l'ordre de 800 à 1000 chercheurs. Les expériences ne pouvant pas être réalisées sur ICONÉ pour des raisons techniques, typiquement pour des raisons de limitation de taille d'échantillons, pourront être réalisées à ESS.

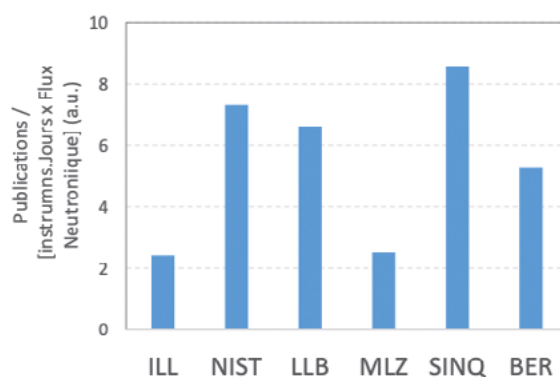


Figure 54 : Nombre de publications (Impact Factor >5) normalisé par le nombre d' [instruments-jours-flux] sur différentes sources continues [110]. La productivité scientifique d'une source n'est pas proportionnelle au flux de la source.

¹⁰⁸ "[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." Report from the ILL Associates' Working group on Neutrons in Europe for 2025.

¹⁰⁹ "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." 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>)

¹¹⁰ 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.

5

Proposition de concept technique pour ICONÉ, une nouvelle source de neutrons française

Nous décrivons les différents éléments techniques nécessaires à la construction d'une Hi-CANS (High Current Accelerator-driven Neutron Source) adaptée à une utilisation en tant que source de neutrons pour la réalisation d'expériences de diffusion neutronique.

Un design de référence « ICONÉ » est proposé.

5.1 La production des neutrons

Pour produire des neutrons, les processus les plus efficaces sont i) la fission nucléaire de l'uranium dans les réacteurs nucléaires, ii) la spallation à l'aide d'accélérateurs de protons à haute énergie, iii) les réactions nucléaires avec des accélérateurs de protons à basse énergie et iv) la photofission produisant des neutrons via une excitation gamma produite par un accélérateur d'électrons.

Le réacteur à haut flux (HFR) de l'ILL (Grenoble, France) ou le réacteur FRM2 (Garching, Allemagne) sont des réacteurs de recherche dédiés à la production de neutrons pour la diffusion neutronique utilisant de l'uranium hautement enrichi (>90 % ^{235}U). Ils offrent actuellement le flux de neutrons le plus élevé pour les études scientifiques et les applications technologiques. En plus de ces installations à très haut flux, plusieurs réacteurs de puissance moyenne utilisant de l'uranium faiblement enrichi fonctionnent en Europe : BNC (Budapest, Hongrie), TU (Delft, Pays-Bas), NPI (Rez, République tchèque), NCBJ (Swierk, Pologne).

Les sources de neutrons à spallation telles que ISIS (Didcot, Angleterre) ou SINCQ (Villigen, Suisse) utilisent des faisceaux de protons dans la gamme $E_{\text{proton}} > 500 \text{ MeV}$ pour frapper une cible de métal lourd (par exemple du plomb ou du tantale) dans laquelle environ 20 neutrons sont produits par proton incident. Le rendement élevé en neutrons, combiné au dégagement de chaleur relativement faible par neutron produit fait de la spallation un choix idéal pour les sources de haute intensité.

Le bombardement de matériaux tels que le lithium, le béryllium ou le tantale avec des protons ou des deutérons de faible ou moyenne énergie dans la gamme de 2 à 70 MeV produit aussi des neutrons via des réactions nucléaires à plus basse énergie que la spallation. Ces réactions à basse énergie sont moins efficaces que les réactions de spallation. Un certain nombre d'installations utilisant ces réactions de production de neutrons existent à travers le monde (par exemple the Low Energy Neutron Source, Indiana Univ. aux USA ou RANS, Riken, Wako au Japon) mais elles ne fonctionnent qu'à des puissances modestes (jusqu'à 1 kW). Ces installations sont actuellement dédiées à des études spécifiques et n'ont pas de programme d'accueil d'utilisateurs extérieurs.

Sources continues et sources impulsionnelles

L'objectif scientifique du projet étant l'utilisation des techniques de diffusion neutronique, il est nécessaire de déterminer de manière relativement précise l'énergie des neutrons interagissant avec les échantillons [111]. Techniquement, on peut le réaliser de deux manières :

¹¹¹ On rappellera que les modérateurs de neutrons produisent un spectre d'émission maxwellien dans lequel l'énergie des neutrons est distribuée sur une gamme d'énergie s'étalant sur plus d'un ordre de grandeur.

- en sélectionnant une étroite bande d'énergie des neutrons émis par le modérateur à l'aide d'un cristal monochromateur ou d'un dispositif mécanique [112] ;
- en créant une impulsion de neutrons étroite et en mesurant le temps de propagation des neutrons entre l'instant de création de l'impulsion et l'instant de détection. Cette technique est désignée par le terme « mesures en temps de vol (TdV) ». [113]

Les réacteurs de recherche fonctionnant de manière continue, il est nécessaire d'appliquer la première technique, dans laquelle 95 à 99 % des neutrons produits par la source sont perdus dans le processus de sélection de l'énergie des neutrons. Une source continue produit donc une très grande quantité de neutrons « inutiles ».

À l'inverse, il a été compris dès les années 1970 qu'une source utilisant un accélérateur pouvait structurellement produire des impulsions de neutrons. Si la structure temporelle de l'accélérateur est adaptée aux mesures en temps de vol, la majorité des neutrons produits par l'accélérateur peuvent alors être utilisés pour les expériences de diffusion neutronique. C'est la raison pour laquelle les sources à spallation fonctionnent en mode impulsif. Ainsi, une source à spallation de puissance modeste, comme ISIS avec une puissance déposée sur la cible de l'ordre de 100 kW, peut avoir des performances comparables à un réacteur de recherche d'une puissance thermique de plusieurs dizaines de MW. De même, ESS, fonctionnant à une puissance de 2 MW, aura des performances d'un ordre de grandeur supérieures à celle du réacteur de l'ILL qui fonctionne à une puissance de 50 MW.

Les nouvelles sources de neutrons utilisant un accélérateur doivent fonctionner en mode impulsif pour être efficaces. Le facteur de mérite principal d'une source impulsif est son « flux crête ».

NOTA : Une discussion détaillée du mérite des sources de neutrons impulsives par rapport aux sources continues est disponible dans l'Annexe 2.

5.2 Introduction du concept de HiCANS

La technologie des sources à spallation est bien établie avec un nombre significatif de sources en opération dans le monde : ISIS au Royaume-Uni, LANSCE et SNS aux Etats-Unis, J-PARC au Japon, CSNS en Chine et prochainement ESS en Europe. Ces sources sont cependant des équipements nécessitant des investissements importants (> 1 G€), qui limitent leur diffusion à grande échelle à travers le monde.

Nous proposons de développer le concept de HiCANS (High Current Accelerator-driven Neutron Sources). Le concept de telles sources est basé sur les préceptes suivants :

- utiliser un accélérateur à basse énergie ($E < 100$ MeV) pour limiter les coûts d'investissement et de fonctionnement ;
- bénéficier des progrès récents dans la construction d'accélérateurs à forts courants. Il est actuellement possible de construire des accélérateurs de protons à forts courants dans lesquels les courants crêtes peuvent dépasser 100 mA [114] ;
- utiliser les nouveaux concepts de modérateurs à basse dimensionnalité développés lors de la phase de R&D de ESS. Ces modérateurs ont une émission directionnelle et permettent d'augmenter la brillance [115] de la source. Ce nouveau type de modérateur sera implanté pour la première fois sur la source ESS. Il permettra de réduire la puissance de la source de 5 MW à 2 MW sans compromettre ses performances ;

¹¹² L'utilisation de dispositifs mécaniques est rendue possible par la faible vitesse de propagation des neutrons (~ 1000 m/s)

¹¹³ L'origine historique est que ces appareils en temps de vol autour des réacteurs étaient effectivement dédiés aux techniques spectroscopiques alors que les diffractomètres utilisaient des cristaux monochromateurs.

¹¹⁴ Référence à IFMIF EVEDA, $I = 125$ mA

¹¹⁵ Le facteur de mérite d'une source n'est pas défini par le flux total produit par la source mais par sa brillance ou sa luminosité exprimées en $[n/cm^2/s/sr/unit\ bandwidth]$ ou en $[n/cm^2/s/sr]$.

- produire des structures temporelles et des spectres en énergies spécifiquement optimisés pour les différentes techniques de diffusion neutronique. Par ailleurs, le développement d'une instrumentation neutronique adaptée à l'exploitation d'une source impulsienne à impulsions longues telle que ESS a permis de développer de nouveaux concepts instrumentaux qui permettent d'exploiter de manière très efficace la majorité des neutrons produits.

La combinaison de ces différents progrès permet d'envisager la construction de sources de neutrons utilisant un accélérateur à basse énergie ($E_p < 70$ MeV) offrant des performances pour la diffusion neutronique équivalentes à celles d'un réacteur nucléaire de recherche ou d'une source à spallation de puissance moyenne. Le niveau de performances qu'il est possible d'atteindre est basé à la fois sur un corpus de simulations Monte-Carlo produites par différents instituts à travers le monde [116,117,118] mais aussi par des mesures expérimentales réalisées sur différentes installations de puissance modeste (e.g. RANS@RIKEN, Wako, Japon).

Nous proposons que la source ICONÉ utilise ces technologies pour construire une source à haute brillance avec des coûts de construction et d'opération réduits par rapport aux sources actuelles.

Dans la suite du texte, nous utiliserons :

- CANS (Compact Accelerator-driven Neutrons Sources) pour les sources dont la production de neutrons primaires est de l'ordre de 10^{13} n_{rapides}/s ;
- HiCANS (High Current Accelerator-driven Neutrons Sources) pour les sources dont la puissance est plutôt de l'ordre de quelques dizaines de kW, avec une production primaire de neutrons supérieure à 10^{14} n/s.

La frontière technique n'est toutefois évidemment pas stricte entre les CANS et les HiCANS.

En fonction des besoins scientifiques ou techniques, il est possible d'imaginer toute une hiérarchie de sources ayant des performances plus ou moins élevées (voir Figure 55).

Scalable Neutron Sources

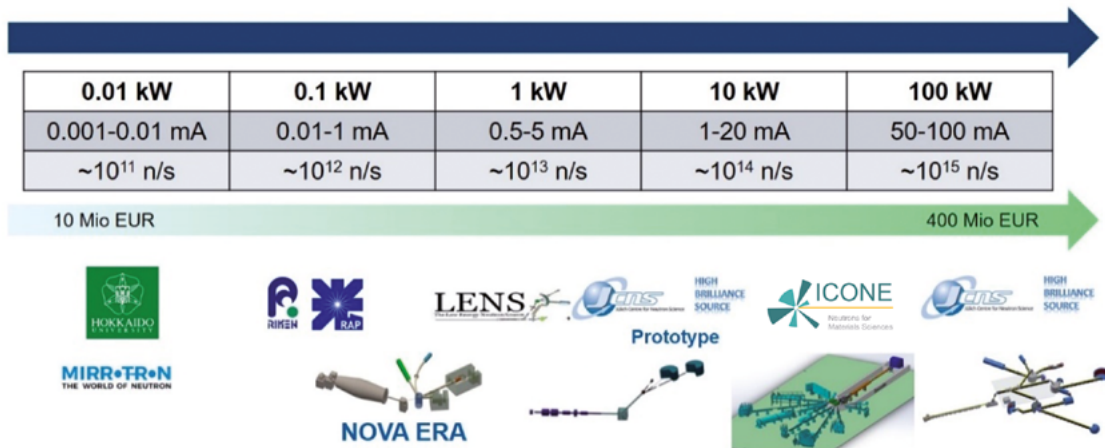


Figure 55 : Comparaison entre la puissance du faisceau de protons (ligne 1), le courant de protons (ligne 2), le pic de production de neutrons (ligne 3) pour des sources existantes (de LvB-Mirrortron à LENS-Indiana) et pour des sources en projet (ARGITU et HBS). Adapté de [119].

¹¹⁶ NOVA ERA (Neutrons Obtained Via Accelerator for Education and Research Activities)

A Jülich High Brilliance Neutron Source project. Allgemeines/ General Band/ Volume 7 ISBN 978-3-95806-280-1

¹¹⁷ The Jülich high-brilliance neutron source project

¹¹⁸ ARGITU compact accelerator neutron source: A unique infrastructure fostering R&D ecosystem in Euskadi Neutron News 31, Issue 2-4, 19-25 (2020). Taylor & Francis (UK).

¹¹⁹ LENS Report on Low Energy Accelerator-driven Neutron Sources

5.3 Définition des paramètres d'une machine pour une source de diffusion neutronique performante

5.3.1 Choix du processus de production des neutrons

- La Figure 56 présente différents processus de production de neutrons en fonction de l'énergie des particules incidentes sur la cible. Trois principaux processus nucléaires permettent d'atteindre un seuil de production de neutrons significatif ($>10^{14}$ n/s) avec des intensités de courants de particules de l'ordre du mA :
- l'interaction de protons ayant des énergies de l'ordre de 10 à 40 MeV avec une cible de métal léger en béryllium ;
- les réactions de photofission permettent aussi de produire des quantités significatives de neutrons [120] mais avec une efficacité moindre et une très importante production de rayonnement γ préjudiciable aux mesures de diffusion neutronique ;
- au-delà d'une énergie de 40 MeV, il devient plus avantageux de considérer les réactions de spallation (e.g. $\text{proton} \rightarrow \text{Pb}$).

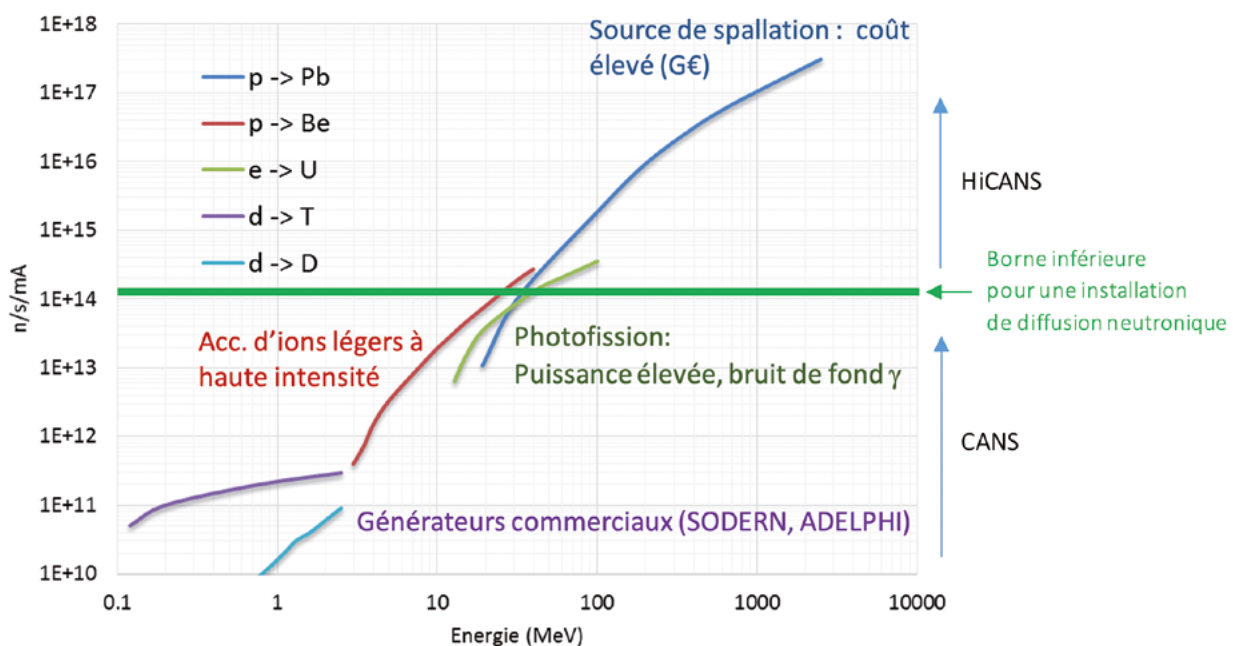


Figure 56 : Quantité de neutrons rapides produits (par mA) en utilisant différentes particules (protons, deutérons ou électrons) ayant des énergies de 0,1 à 1000 MeV et différentes cibles. Pour construire une source de diffusion neutronique, il est nécessaire de produire plus de 10^{14} $n_{rapides}/s$.

Les CANS existantes utilisent des accélérateurs ayant des énergies allant de 7 à 13 MeV et ont une production de neutrons primaires de l'ordre de 10^{12} à 10^{13} $n_{rapides}/s$. Il est possible de réaliser des expériences de diffusion neutroniques sur ces installations (voir Annexe 1) mais avec des performances limitées.

Une source dont l'objectif est d'opérer en tant qu'installation pour des utilisateurs des techniques de diffusion neutronique doit produire un flux de neutrons primaires a minima de l'ordre de 10^{14} $n_{rapides}/s$.

La stratégie d'utilisation d'un accélérateur de plus basse énergie possible plaide en faveur de l'utilisation des processus de type (protons \rightarrow métal léger), à des énergies des particules incidentes de l'ordre de quelques dizaines de MeV.

¹²⁰ La source Harwell en Angleterre a utilisé la production de neutrons par photofission (Electron linac, 50 MeV, 192 Hz, 17 ms, 5 kW on Au+²³⁸U). Le successeur de cette source a cependant été la source ISIS utilisant les réactions de spallation avec des protons.

5.3.2 Choix des paramètres de fonctionnement de l'accélérateur

Les sources de neutrons dédiées à la diffusion neutronique doivent produire des neutrons thermiques et froids et peuvent donc utiliser un **faisceau de neutrons impulsif** combiné aux techniques de temps de vol pour définir l'énergie des neutrons avec les paramètres suivants :

- La **durée typique des impulsions** de neutrons devra être dans la gamme **200 μ s - 2 ms** avec des taux de répétition de 10 à 100 Hz, correspondant à un **cycle utile de 1 à 4 %**, en fonction des techniques que l'on souhaite utiliser.
- Si on souhaite implémenter une suite instrumentale complète, l'accélérateur devra pouvoir fournir en parallèle **des impulsions de longueur et de fréquence variable sur différentes cibles (à priori 2 ou 3 maximum)**. Les deux structures temporelles peuvent être entrelacées lors du fonctionnement de l'accélérateur pour pouvoir utiliser tous les instruments en parallèle.
- Dans le cas d'un cycle utile de 1 à 5 %, un **courant crête de l'ordre de 100 mA** correspondra à un courant moyen de 1 à 5 mA.
- La source sera d'autant plus efficace que la production de neutrons se fera dans un volume réduit. Cela suppose que la cible et son modérateur soient d'un **volume le plus réduit possible (typ. < 1 litre)**. Il est donc souhaitable que la cible ait une **surface maximale de l'ordre de 100 cm²**.
- Les contraintes thermo-hydrauliques dans les systèmes de refroidissement limitent les **densités de puissance surfacique** à des valeurs de l'ordre **de 0,5 à 1 kW/cm²**.
- La **puissance totale maximale** déposée sur la cible sera donc de l'ordre **de 50 à 100 kW** (correspondant à l'énergie du faisceau de protons déposée dans la cible de production de neutrons).

Ces contraintes permettent de considérablement réduire l'espace de définition des paramètres de l'accélérateur, à savoir les possibles couples de valeurs (énergie des protons ; courant de protons). Considérons la Figure 57 qui présente un graphe (Énergie–Courant moyen) dans le cas de protons incidents sur une cible de béryllium. Les courbes verte, rouge et bleue représentent les iso-flux moyens de production de neutrons rapides. Rappelons qu'une source de diffusion neutronique performante nécessite la production de plus de 10^{14} $n_{rapides}/s$ (isoflux rouge) et qu'on veut limiter la puissance sur la cible à 50-100 kW (ligne iso-puissance pointillée noire) [121]. Une dernière contrainte peut être rajoutée du fait que les éléments de structure de l'installation peuvent être activés si l'énergie des protons est supérieure à 30 MeV [122].

Aucunes de ces limites ne sont strictes mais elles permettent de définir un espace relativement restreint de paramètres. Les bornes supérieures de l'espace des paramètres sont (a) $n_{fast} = 1,3 \times 10^{14}$ n/s pour $E_p = 12$ MeV avec $I_{av} = 4$ mA, ce qui implique de pouvoir utiliser un cycle utile de 4 % sur les instruments de diffusion et (b) $n_{fast} = 3 \times 10^{14}$ n/s pour $E_p = 30$ MeV avec $I_{av} = 1$ mA. Dans ce cas, le cycle utile est de l'ordre de 1 %. On peut rappeler que la source ESS utilisera un cycle utile de 4 % et qu'une instrumentation neutronique adaptée est donc déjà conçue. Au-delà d'un cycle utile de 4 %, il devient de plus en plus difficile d'exploiter efficacement les neutrons produits pour les expériences de diffusion neutronique en temps de vol.

Des considérations plus détaillées sur les paramètres de fonctionnement de l'accélérateur pour une utilisation optimale pour les techniques de diffusion neutronique peuvent être trouvées en Annexe 3. En particulier, les corrélations entre la puissance maximale utilisable, l'énergie des particules incidentes, le courant moyen et le choix du cycle utile de la source sont discutées.

¹²¹ La construction d'une cible Be opérant à une puissance de 50kW a été démontré (voir Annexe 4)

¹²² Un retour d'expérience sur ces problématiques est fourni par les installations de production de radio-isotopes utilisant des cyclotrons.

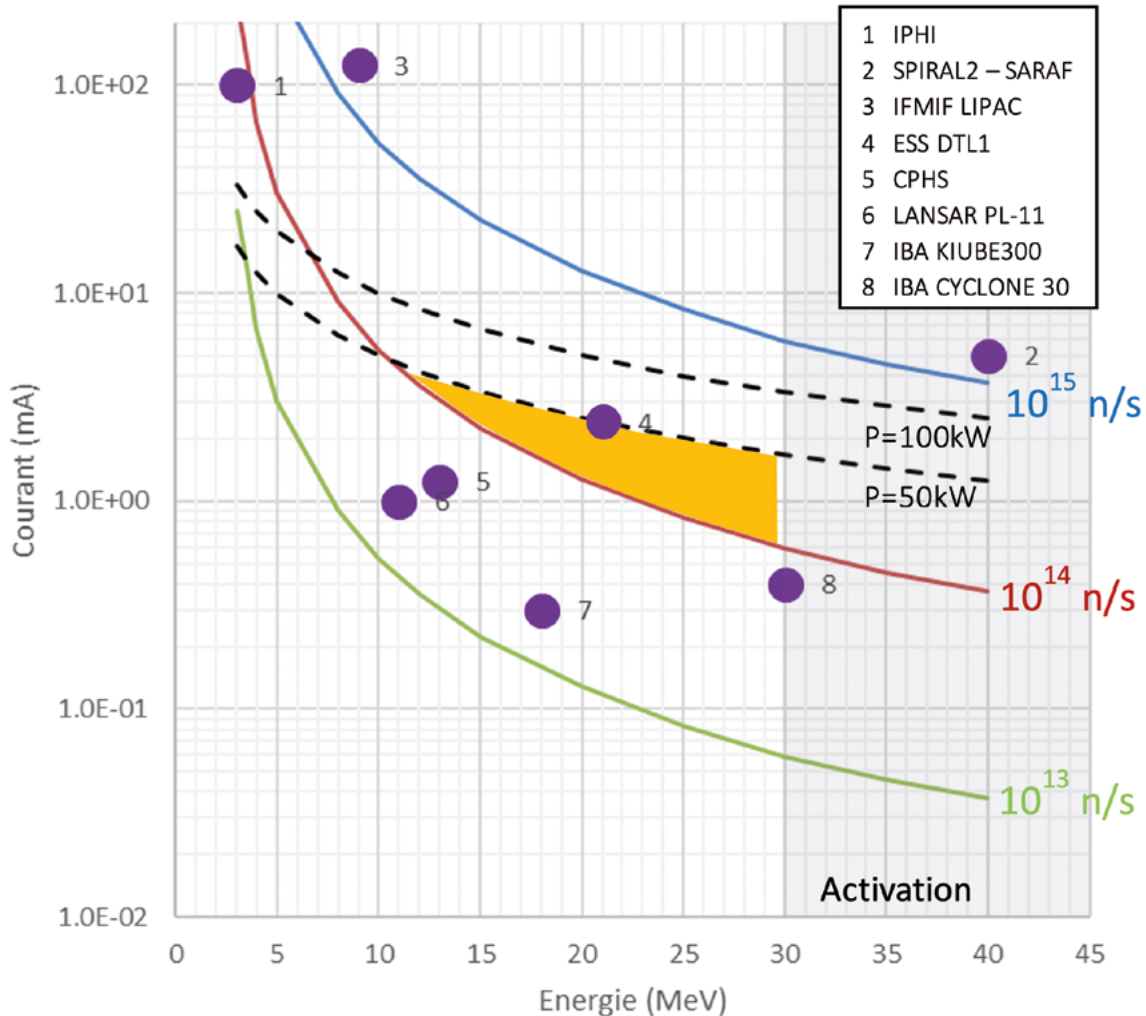


Figure 57 : Délimitation de l'espace des paramètres de fonctionnement d'un accélérateur pour la production de neutrons. La production de neutrons varie en fonction de l'énergie des protons et du courant. Des isoflux de production de neutrons primaires sont tracées en couleur (10^{13} , 10^{14} et 10^{15} $n_{rapides}/s$). Nous souhaitons produire plus de 10^{14} $n_{rapides}/s$ (isoflux rouge). Les contraintes d'ingénierie limitent la puissance maximale qu'il est possible de déposer sur une cible de petite surface (100 cm^2). Les courbes d'iso-puissance à 50 kW et 100 kW sont tracées en pointillé. Il est nécessaire de rester sous ces limites. Au-delà d'une énergie de 30 MeV, de nombreux canaux d'activation s'ouvrent et conduisent à la formation de radio-isotopes dans l'accélérateur. Cela complexifie significativement la maintenance de la machine. In fine, l'espace des paramètres pour construire une source efficace est relativement réduit (zone orange). Une machine à plus faible énergie (13 MeV) et à fort cycle utile (4 %) sera bien adaptée à des mesures basse résolution. Une machine à plus haute énergie (30 MeV) devra fonctionner à un cycle utile réduit (typ. 1 %) mais sera plus performante pour les expériences à plus haute résolution.

La figure indique aussi en violet différents accélérateurs en opération : 1) IPHI est un accélérateur de protons à basse énergie et haute intensité du CEA Saclay ; 2) SPIRAL2 et SARAF sont des installations de physique nucléaire utilisant des accélérateurs à fort courant ; 3) IFMIF-LIPAC est un démonstrateur d'accélérateur pour IFMIF/DONES ; 4) ESS-DTL1 correspond à la partie basse énergie de l'accélérateur de ESS ; 5) CPHS est un accélérateur de protons développé en Chine ; 6) LANSAR-PL1 est un accélérateur « industriel » disponible sur commande ; 7) IBA KIUBE 300 et 8) CYCLONE 30 sont des cyclotrons industriels. L'opération de ces machines montre qu'il n'y a pas d'obstacle technique majeur d'un point de vue de l'accélération des particules. La machine la plus adaptée aux besoins d'ICONE semble être le front-end de l'accélérateur de ESS (section 0 → 30 MeV).

5.4 Avantages et limitations des CANS et des HiCANS

Par rapport aux réacteurs de recherche ou aux sources à spallation, les CANS et les HiCANS offrent les avantages détaillés ci-après.

- Elles s'appuient sur un accélérateur de basse énergie ($E_p \sim 10\text{--}70$ MeV), de sorte que les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation sont réduits par rapport à une source de spallation ($E_p \sim 1\text{--}2$ GeV).
 - Les niveaux d'investissement vont de 10 M€ (LvB [123]) à 400 M€ (HBS [124]) (voir Figure 55).
 - Un seul accélérateur peut servir plusieurs stations cibles avec une structure temporelle optimisée (en fréquence et en durée des impulsions).
- Le volume de la cible est très réduit par rapport à une cible sur une source à spallation. Cela permet un meilleur couplage du modérateur avec la cible et donc une brillance plus élevée.
- La production de particules secondaires est limitée. Les énergies du rayonnement γ et des neutrons rapides sont limitées à celle des protons ($\sim 10\text{--}70$ MeV) alors que sur les sources à spallation des particules d'énergies de l'ordre de 1 GeV sont produites.
 - Le volume de blindage est ainsi réduit (à 20-50 tonnes contre environ 6000 tonnes à ESS). Le coût de construction et la quantité de matériaux activés sont aussi réduits. Les problèmes d'accès et de maintenance de l'ensemble cible-modérateurs sont significativement simplifiés.
 - L'échauffement radiatif (principalement γ) sur le modérateur est très réduit. Il est de l'ordre de quelques dizaines de watts au plus, contre $\sim 3\text{--}7$ kW sur un réacteur ou une source à spallation. Cela permet de construire des modérateurs froids très compacts et peu onéreux.
 - Les systèmes d'optique neutronique peuvent être approchés au plus près de la source pour augmenter l'efficacité du transport des neutrons.
 - Le bruit de fond sur les instruments est faible. Le blindage des instruments peut être réduit, ce qui permet une conception plus simple.
- Du fait de la faible énergie ($E_p < 300$ MeV), l'installation n'est pas une installation nucléaire de base (INB) au sens de la législation française et est simplement régie par le Code de la santé publique (CSP).
 - La quantité de matériaux activés produite est significativement réduite. Aucun élément activé à durée de vie longue n'est produit. Aucun élément transurannique n'est produit.
 - Les coûts administratifs, opérationnels et de sécurité sont moindres.
 - Les règles d'accès sont simplifiées.
- Une CANS ou une HiCANS peut être mise à niveau pendant sa durée de vie.
 - L'énergie du faisceau de protons peut être augmentée à des énergies plus élevées pour augmenter le rendement de production de neutrons sur la cible si des dispositions en termes d'espace et de puissance ont été prises dans la conception initiale (comme ce sera le cas à ESS où l'énergie des protons devrait *in fine* doubler pour atteindre $E_p = 2$ GeV).
 - De nouvelles stations cibles peuvent être construites sans changer une grande partie du système accélérateur comme cela a été fait par exemple à ISIS (sans pénalité de performance si le cycle utile de l'accélérateur peut être augmenté).
- En raison des coûts moindres, les installations peuvent être spécialisées à des fins particulières pour répondre à des besoins ou à des demandes spécifiques (par ex. industrielles).
 - Il est par exemple possible de construire une CANS à petite échelle pour des utilisations industrielles spécifiques ou une installation à part entière avec une vingtaine d'instruments de diffusion de neutrons à haute performance.
 - La société Phoenix aux USA a par exemple ouvert en 2019 une installation d'imagerie neutronique offrant 10 ports de faisceau d'imagerie avec des neutrons thermiques et rapides pour des clients industriels [125]. La société Mirrotron en Hongrie construit une CANS pour la caractérisation de ses miroirs neutroniques et pour offrir des services spécifiques à des industriels extérieurs (radiographie, imagerie).

¹²³ LvB « Ludwig van Beethoven », la source de type CANS en construction par la société Mirrotron en Hongrie.

¹²⁴ HBS « High Brilliance Source », le projet de source du JCMS au Forschung Zentrum Jülich

¹²⁵ Phoenix LCC, Wisconsin, USA.

Le choix de travailler avec un accélérateur à basse énergie implique cependant des contraintes :

- L'opération d'un accélérateur de protons à courant élevé ($I_{\text{peak}} \sim 100$ mA) et de cycle utile élevé reste complexe et aucun accélérateur de ce type n'est disponible commercialement dans le monde, même si plusieurs projets d'accélérateurs d'ions légers avec des intensités allant de 5 mA à plus de 100 mA sont en cours de construction ou de mise en service avec une implication française significative (IFMIF/Lipac au Japon, Spiral2 à Caen, SARAF 2 en Israël, ESS en Suède – voir Figure 57).
- Une figure de mérite des sources de neutrons impulsives est le courant crête lors de l'impulsion. La perspective de significativement augmenter les courants crêtes des accélérateurs de protons très au-delà de 100 mA est encore éloignée.
- Il n'existe actuellement dans le monde aucune HiCANS adaptée aux techniques de diffusion neutronique. Cependant, il faut noter que :
 - les nouveaux concepts de modération des neutrons sont en cours d'évaluation expérimentale dans différents instituts (Forschung Zentrum Jülich, Budapest Neutron Center, ESS, CEA Saclay) ;
 - différents concepts et prototypes de cibles adaptées ont été développés ces dernières années ;
 - des instruments de diffusion neutronique adaptés aux sources à impulsions longues sont en construction autour d'ESS. Leurs performances devraient être démontrées d'ici quelques années.
- Le nombre de faisceaux de neutrons pouvant être logés sur un seul ensemble cible-modérateur est limité (probablement de 5 à 8). Cela requiert donc la construction de plusieurs cibles pour déployer une suite instrumentale complète. La contrepartie positive est que chaque cible peut être optimisée pour une classe d'instruments spécifique dont on peut maximiser les performances.

5.5 Performances potentielles des HiCANS pour les techniques de diffusion neutronique.

Pour comprendre la façon dont des processus nucléaires à basse énergie et à faible rendement en neutrons peuvent permettre d'atteindre des performances comparables à celles des sources de neutrons utilisant le processus de spallation, qui est lui très efficace, il faut prendre en compte un certain nombre de paramètres spécifiques tels que le courant du faisceau de protons, la luminosité maximale, la structure temporelle et la conception de l'ensemble cible-modérateur-rélecteur (CMR). La production brute de neutrons rapides de la source HiCANS HBS (High Brilliance Source) proposée par le Jülich Center for Neutron Scattering du Forschung Zentrum Jülich est estimée à $1,2 \times 10^{15}$ n_{rapides}/s tandis que celle de la station cible ISIS 2 (TS2) est de 5×10^{15} n_{rapides}/s . Comment expliquer des valeurs si proches alors que les processus de spallation produisent environ 15 neutrons par proton incident et que les processus nucléaires à basse énergie ne produisent que 0,01 à 0,1 neutron par proton incident ? La raison est simplement liée à l'utilisation d'un courant moyen de protons très élevé de 2 mA sur HBS alors que la source à spallation ISIS TS2 n'utilise qu'un courant moyen de 50 μA . Le rapport des courants de protons (facteur 40) compense une grande partie du rendement neutronique inférieur des réactions nucléaires à faible énergie. Afin de hisser les performances des HiCANS au niveau de la source à spallation ISIS, il est possible d'obtenir des gains en performances grâce à la conception du modérateur. L'utilisation de modérateurs fortement couplés avec une géométrie de basse dimensionnalité devrait permettre d'égalier voire dépasser les performances de ISIS.

Une comparaison de la luminosité maximale de différentes sources à spallation et de projets de HiCANS est présentée sur la Figure 58. Les luminosités des modérateurs froids de l'ILL et de FRM2 sont tracées comme points de référence. SNS est la « Spallation Neutron Source » aux USA, la source la plus performante au monde actuellement. La luminosité maximale de la source à ESS, qui sera la plus performante du monde, devrait être de l'ordre de 5×10^{13} n/cm²/s/sr/Å pour un fonctionnement à 2 MW (non représenté sur la Figure 58). Si on écarte la source à spallation de classe mondiale SNS aux USA, on constate que les brillances maximales des différentes sources sont proches (de l'ordre de quelques 10^{12} n/cm²/s/sr/Å).

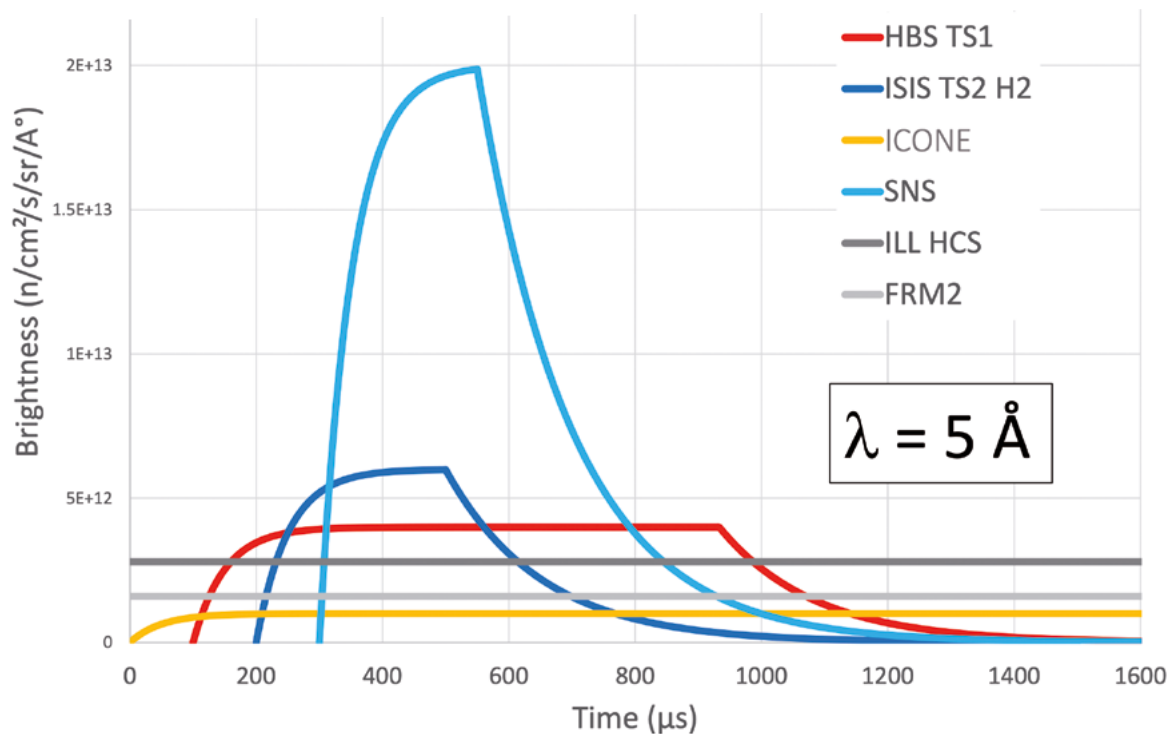


Figure 58 : Brillance d'un pic de neutrons froids ($\lambda = 5 \text{ \AA}$) en fonction du temps sur HBS TS1, ISIS Target Station 2, ICONE, SNS et brillance des sources froides de l'ILL et de FRM2 (en gris). Le projet ICONE propose d'utiliser une impulsion de longueur 2 ms très proche des longueurs d'impulsions utilisées à ESS. La grande longueur de l'impulsion compense en partie la plus faible brillance crête. Le point de départ des impulsions a été décalé pour améliorer la lisibilité des figures. Le taux de répétition des sources varie aussi significativement de 10 Hz à 100 Hz.

Au-delà de la luminosité maximale, il a été mentionné précédemment que la structure temporelle pouvait être optimisée pour différentes techniques. Le projet HBS propose ainsi de construire jusqu'à 3 stations cibles pour optimiser l'utilisation des neutrons. Le projet ICONE propose de construire une station cible à impulsions longues bien adaptée aux techniques basse résolution (rapport cyclique $\sim 4\%$) et une station cible à impulsions courtes plus adaptées aux techniques nécessitant plus de résolution. La Figure 59 illustre les diverses structures temporelles dans différentes installations. La grande longueur des impulsions de la source ICONE compense en partie la plus faible brillance crête mais ne sera adaptée qu'aux expériences ne demandant pas de haute résolution (SANS, réflectométrie, radiographie, spin-écho).

Enfin, la Figure 60 positionne les différentes sources en fonction de leur couple de valeurs (brillance crête ; brillance moyenne). On peut distinguer deux familles de sources : les sources à impulsions courtes (ligne supérieure : ISIS, CSNS, J-PARC, SNS) et les sources à impulsions longues (ligne inférieure : ICONE, HBS, ESS). Dans le cas des sources de classe mondiale, les brillances crêtes de JPARC et SNS-TS2 sont supérieures à celles de ESS d'un facteur 2 à 10, mais l'utilisation d'impulsions longues à ESS permet d'obtenir une brillance moyenne supérieure ou égale avec une machine de conception plus simple. Une stratégie identique est proposée avec ICONE. La brillance crête de ICONE sera inférieure d'un facteur 3 à 10 par rapport à ISIS TS1 et TS2, mais cela sera compensé par l'utilisation d'impulsions longues qui permettront d'obtenir une brillance moyenne supérieure d'un facteur 2 à 3 par rapport à ISIS.

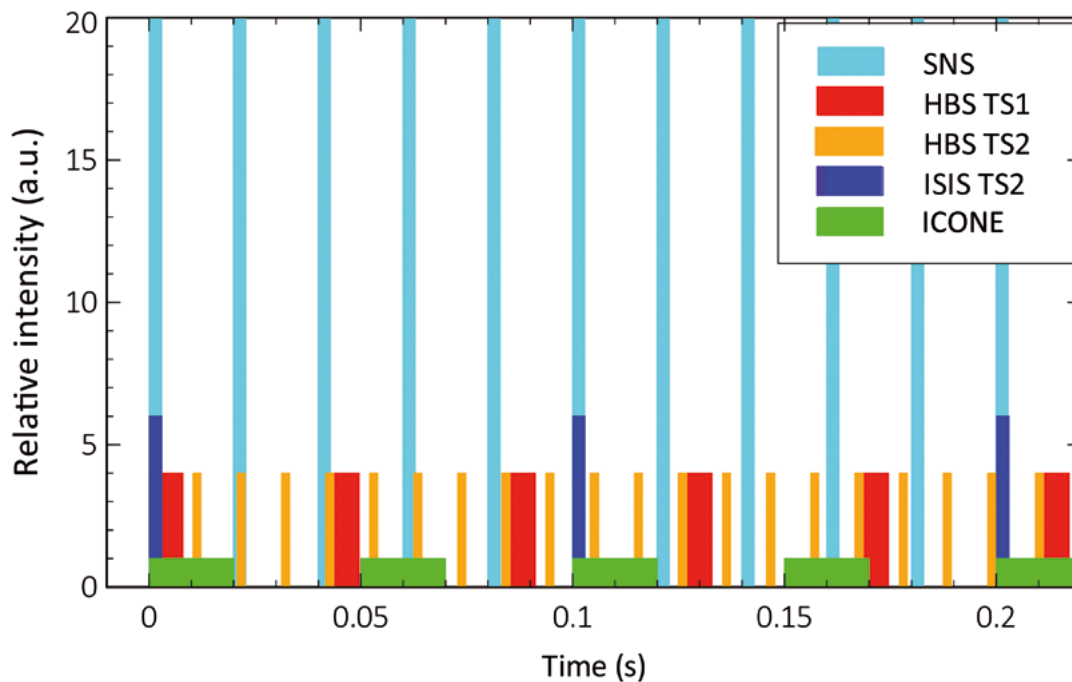


Figure 59 : Brillance d'un pic de neutrons froids ($\lambda = 5 \text{ \AA}$) en fonction du temps sur HBS TS1, ISIS Target Station 2, ICONE, SNS et brillance des sources froides de l'ILL et de FRM2 (en gris). Le projet ICONE propose d'utiliser une impulsion de longueur 2 ms très proche des longueurs d'impulsions utilisées à ESS. La grande longueur de l'impulsion compense en partie la plus faible brillance crête. Le point de départ des impulsions a été décalé pour améliorer la lisibilité des figures. Le taux de répétition des sources varie aussi significativement de 10 Hz à 100 Hz.

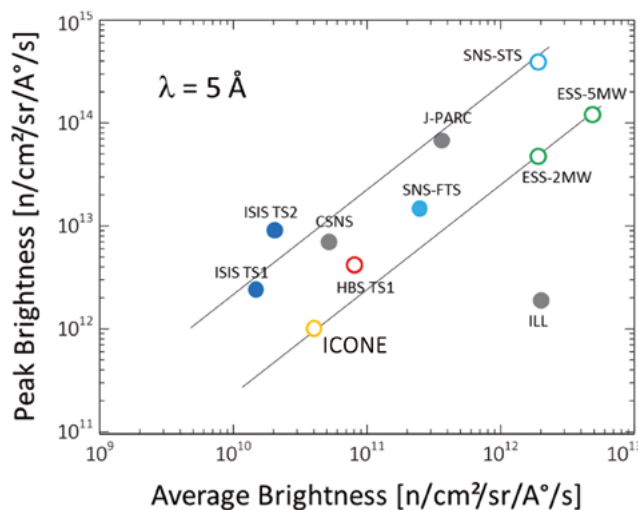


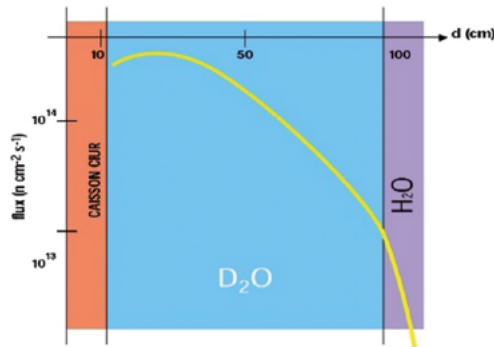
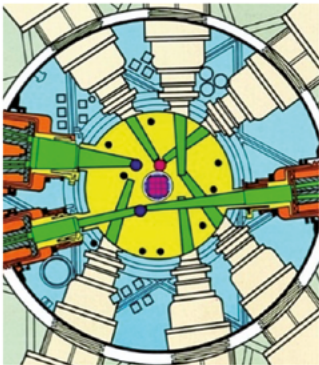
Figure 60 : Brillance crête et brillance moyenne à 5 \AA de sources existantes et de différents projets de sources. Adapté de [126]. Les lignes continues correspondent aux 2 principaux designs actuels : sources à impulsions courtes (ligne supérieure) et sources à impulsions longues (ligne inférieure).

En résumé, les ingrédients principaux des HiCANS permettant d'atteindre des brillances suffisantes pour réaliser des expériences de diffusion neutronique de pointe et être compétitives avec les sources à spallation telles que ISIS ou LANSCE sont les suivants :

- Le courant moyen de protons sur une HiCANS est très élevé par rapport aux sources à spallation classique (ISIS, LANSCE, CSNS).

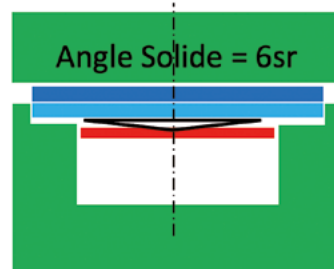
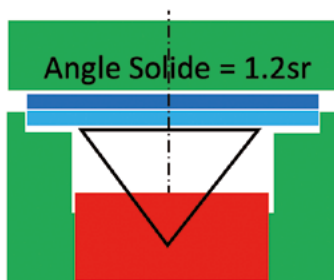
¹²⁶ Paul Kagan (Oak Ridge National Laboratory), Proton Power Upgrade and Second Target Station for the Spallation Neutron Source (Rockville, 2019)

- La possibilité de construire une cible très compacte à laquelle le modérateur est très fortement couplé (via une faible distance cible – modérateur) permet d'utiliser une fraction significativement plus importante des neutrons rapides produits (voir Figure 61).
- L'implémentation de modérateurs directionnels permet d'augmenter la brillance de la source (gain d'un facteur 15 par rapport à un modérateur « en volume » [127]). Cela limite cependant le nombre de sorties de faisceaux sur chaque cible et donc le nombre d'instruments par cible.
- La contrainte précédente est levée par le fait que, sur un accélérateur à faible énergie, il est relativement facile d'implémenter une structure temporelle entrelacée permettant d'illuminer plusieurs cibles. Cela permet de disposer d'une structure temporelle optimisée pour les différentes techniques de diffusion neutronique et donc une meilleure utilisation des neutrons produits.



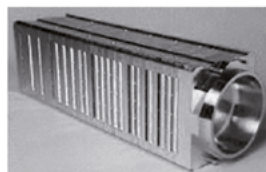
Réacteur

- Cœur = 0.1 m^3
- Modérateur $\text{D}_2\text{O} \sim 1 \text{ m}^3$



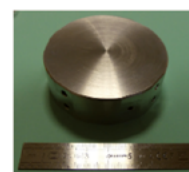
Réflecteur Be

Para-H₂ (épaisseur 15mm, diamètre $D_M = 15 \text{ cm}$)
 Prémодérateur H₂O (épaisseur $e_{PM} = 2 \text{ cm} - D_{PM} = 15 \text{ cm}$)



Source à spallation

- Cible = 4 litres
- Modérateur ~ 1 litre (peu couplé)



HiCANS

- Cible = 0.05 litres
- Modérateur ~ 1 litre (couplage 90%)

Figure 61 : Comparaison du couplage entre la source et le modérateur pour un réacteur, une source à spallation et une CANS. Le faible volume de la cible ainsi qu'un couplage fort entre la cible et le modérateur permettent de maximiser la brillance de la source.

¹²⁷ L. Zanini et al, EPJ Web Conf. 231, 2020, Low-dimensional moderators at ESS and compact neutron sources.

5.6 Proposition de spécifications pour ICONÉ / Design de référence

Ci-dessous sont présentées les caractéristiques d'un projet offrant :

- la démonstration des performances d'une machine fonctionnant à fort courant, de la classe des HiCANS ;
- une source utilisable pour la science dans la recherche et l'industrie ;
- une machine qui peut être améliorée au fur et à mesure des progrès technologiques.

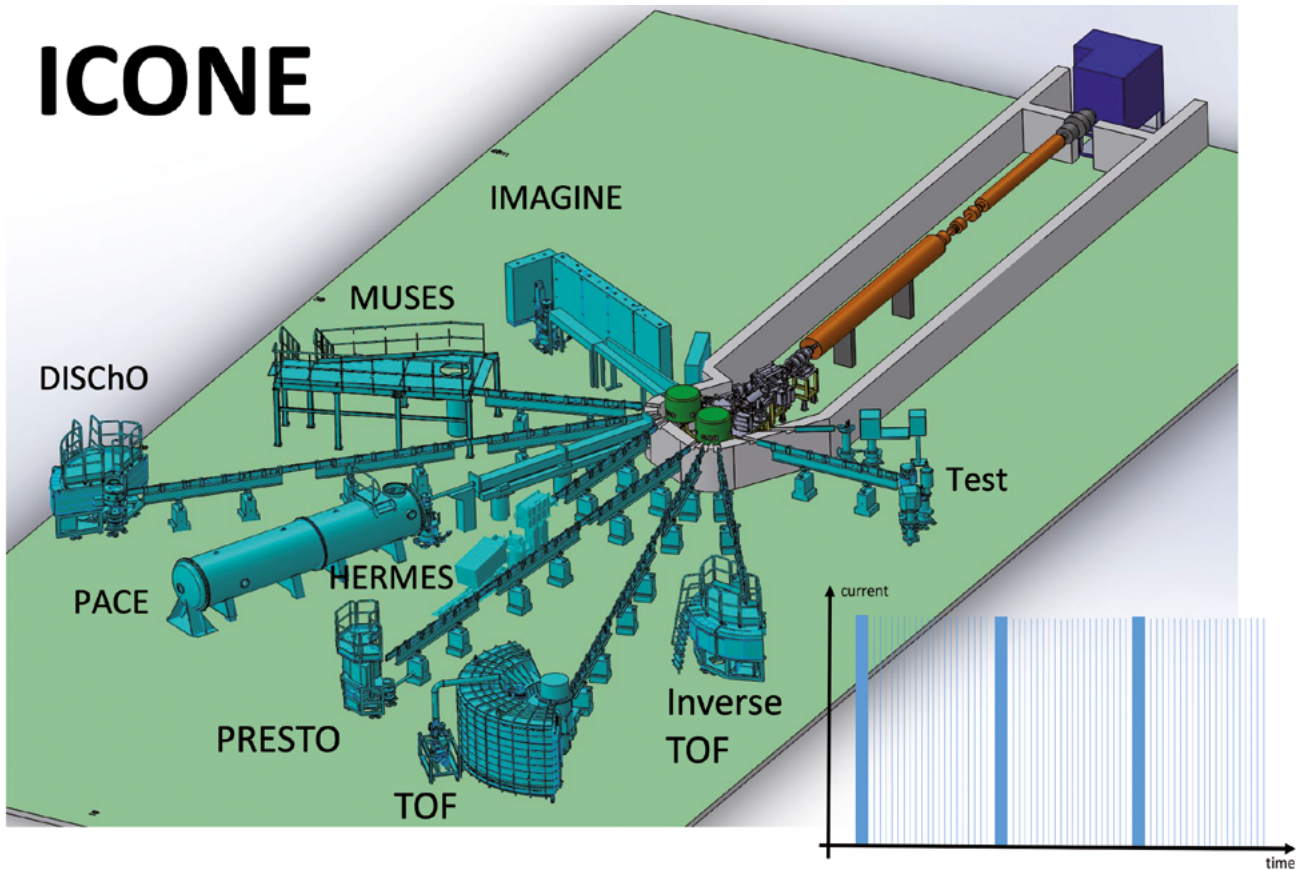


Figure 62 : Schéma d'une possible implémentation de la source ICONÉ. Un accélérateur de protons illumine alternativement deux cibles pour fournir des structures temporelles sur deux groupes d'instruments différents, des instruments « haute résolution » et des instruments « basse résolution – haut flux ». L'insert à droite présente l'entrelacement des structures temporelles sur les deux cibles.

Particules accélérées	Protons	L'utilisation de deutérons conduit à un gain de production de neutrons marginal (+ 30 %) avec en contrepartie de nombreux problèmes d'activation des structures de l'accélérateur
Énergie des protons	25 MeV	Une énergie réduite permet de limiter les problèmes d'activation des matériaux.
Courant crête	100 mA	La conception de la partie à basse énergie de ESS en 2012 visait un courant crête de 62 mA. Des progrès techniques ont été réalisés depuis avec la démonstration d'un fonctionnement à 125 mA en continu sur IFMIF-EVEDA.
Cycle utile	6 % (4 % + 2 %)	Une réserve de quelques pour cent supplémentaires est souhaitable pour compenser les pertes.
Accélérateur	Source d'ions Section RFQ 4 vanes (3,6 MeV) Section DTL chaud (25 MeV)	Il est en théorie possible de reprendre l'essentiel du design du front-end de l'accélérateur de ESS.
Structure temporelle	2ms – 20 Hz 200 µs – 100 Hz	Deux structures temporelles différentes seront entrelacées pour servir 2 cibles différentes.
Cibles	Béryllium	Refroidissement à eau. Une cible de Ga liquide est envisageable (la production de neutrons est réduite mais cela évite de gérer le risque chimique du Béryllium).
Modérateurs	Thermique (H ₂ O) Froid (Méthane) Froid (para-hydrogène)	Si des besoins scientifiques sont avérés, il serait possible de fournir des neutrons rapides ou épithermiques. À priori, la solution retenue est d'installer un modérateur par instrument ou par couple d'instruments.
Instrumentation	5 + 5	Il devrait être possible d'installer 5 instruments par cible de production de neutrons. L'installation est optimisée pour les techniques de diffusion neutronique.

Tableau 6 : Les différents éléments de la source ICONÉ

6

Les éléments technologiques nécessaires à la construction d'une HiCANS

Nous présentons les principaux éléments nécessaires à la production de neutrons sur une HiCANS : l'accélérateur, la cible, les modérateurs et le blindage associé. Les solutions techniques existantes ou proposées par différents instituts sont présentées.

Accélérateur : le risque technologique lié à la construction de l'accélérateur est faible en raison de la mise en service d'accélérateurs ayant des spécifications proches de celles nécessaires à l'installation ICONE (accélérateur de ESS en particulier).

Cible : la technologie de la cible est un élément important de l'installation car elle doit répondre à de nombreux critères. Son ingénierie est en forte évolution et pourra être ajustée au cours de la construction.

Modérateur : le concept de modérateur à dimensionnalité réduite, développé pendant la phase de R&D de ESS, permet d'augmenter significativement la brillance de la source. En raison du faible échauffement radiatif sur une HiCANS, la construction de modérateurs froids est techniquement simple.

Radioprotection : en raison de la faible énergie des protons sur une HiCANS (quelques dizaines de MeV à comparer à 1000 MeV sur une source à spallation), les besoins en blindage sont considérablement réduits : quelques dizaines de tonnes à comparer à quelques milliers de tonnes sur une source à spallation.

Une source de type HiCANS, représentée schématiquement sur les Figures 63 et 64, est composée de 3 éléments principaux :

- un système accélérateur de protons fonctionnant en mode impulsionnel à courant élevé ;
- un ou des ensembles cible-modérateur-réfecteur (CMR) qui produiront des neutrons thermiques et froids adaptés à la diffusion neutronique ;
- un ensemble d'instruments de diffusion de neutrons.

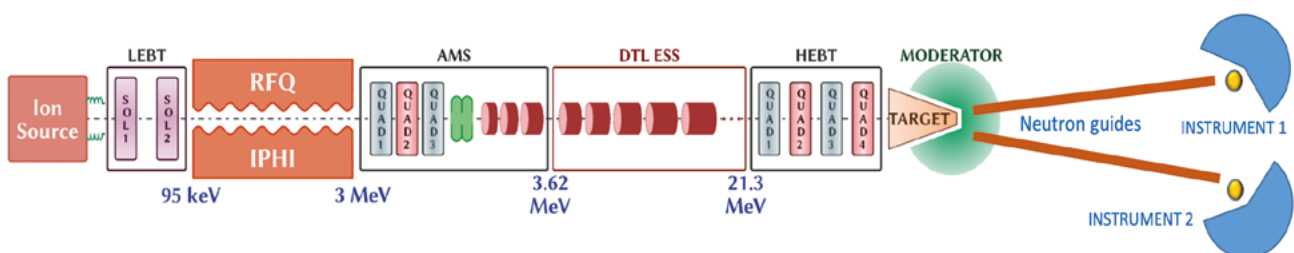


Figure 63 : Illustration d'un accélérateur linéaire de protons à haute intensité, suivi de l'ensemble cible-modérateur-réfecteur (CMR) et des instruments.

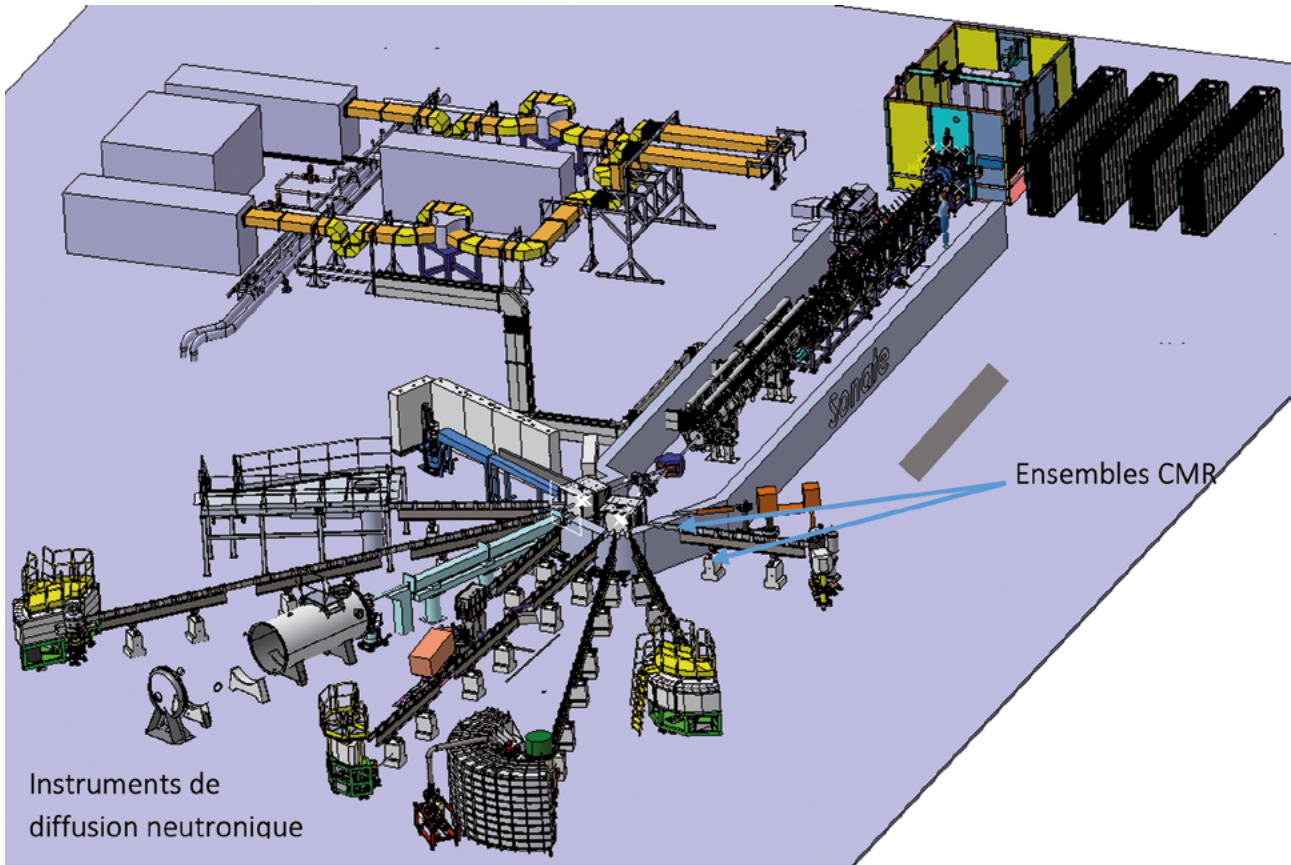


Figure 64 : Exemple d'une installation de type HiCANS. Un accélérateur à fort courant illumine deux cibles. Autour de chaque cible, 4 ou 5 instruments de diffusion neutronique sont installés. La longueur de l'accélérateur est de 25 à 30 mètres. Il est alimenté par une plateforme radiofréquence.

6.1 Système d'accélération de protons

Il existe plusieurs technologies d'accélérateur permettant d'accélérer les protons dans la région 2–70 MeV.

Dans les accélérateurs continus, on trouve des accélérateurs électrostatiques et des cyclotrons. Ces accélérateurs sont disponibles dans le commerce auprès d'industriels : High Voltage Engineering et D-PACE pour les accélérateurs électrostatiques ; IBA, GE Healthcare, Advanced Cyclotron Systems, Sumitomo Heavy Industries, etc. pour les cyclotrons. Ces accélérateurs fonctionnent en mode continu avec des courants crête limités (~ 1 mA) et ne sont donc pas très adaptés aux applications de diffusion neutronique. On notera que D-PACE propose des accélérateurs électrostatiques à fort courant (30 mA) mais uniquement avec une faible énergie (2,6 MeV).

Si des faisceaux de protons impulsionnels doivent être produits, les accélérateurs linéaires (LINAC) sont le seul choix possible. Un système LINAC comprend les éléments suivants (voir Figure 65) :

- une source d'ions qui produit un faisceau de protons de haute intensité avec des énergies comprises entre 50 et 100 keV ;
- une ligne de transport à basse énergie (LEBT) qui guide le faisceau et crée la structure temporelle demandée (les impulsions) ;
- un quadripôle à radiofréquence (RFQ) qui accélère le faisceau de protons de basse énergie et groupe le faisceau en paquets pour son accélération ultérieure ;
- une ligne de transport à moyenne énergie (MEBT) permettant en particulier le diagnostic du faisceau ;
- un ou plusieurs étage(s) accélérateur(s) (par exemple Drift Tube Linac, DTL) pour accélérer les protons jusqu'à leur énergie finale ;
- une ligne de transport à haute énergie (LHE) permettant de distribuer le faisceau vers les cibles en optimisant la densité de puissance.

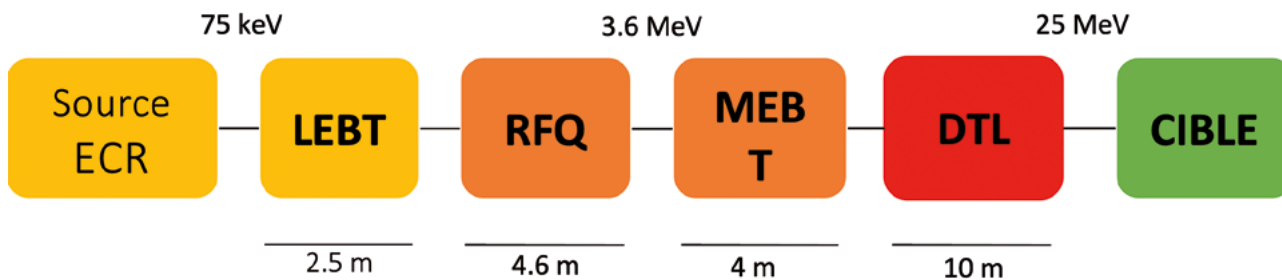


Figure 65 : Géométrie de la première partie de l'accélérateur ESS jusqu'à une énergie des protons de 25 MeV.

La Figure 66 montre des exemples d'accélérateurs dédiés à la production de neutrons utilisant diverses technologies : types de RFQ, étages accélérateurs à température ambiante ou supraconducteurs selon, en particulier, le mode de fonctionnement (impulsionnel ou continu), le courant crête et l'énergie des ions.

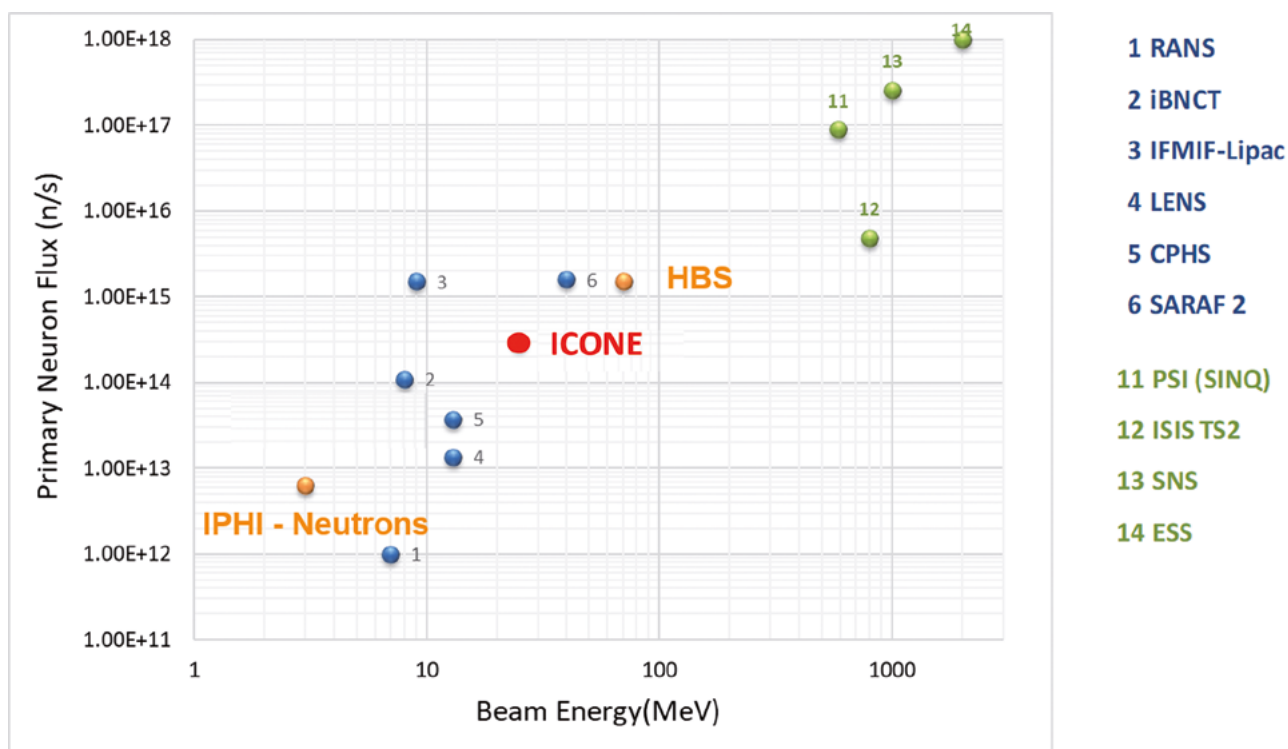


Figure 66 : Exemples d'accélérateurs dédiés à la production de neutrons. IPHI-Neutrons est une source de R&D installée au CEA à Saclay et cofinancée par le CEA et la région Ile-de-France. LENS et RANS (4 et 1) sont de petits accélérateurs en opération depuis plusieurs années et dédiés aux techniques de diffusion neutronique. CPHS (5) est une source en cours de développement en Chine. iBNCT, SARAF 2 et IFMIF-Lipac (2, 6 et 3) sont des sources en cours de réalisation ou de mise en service mais fonctionnant en mode continu pour des applications médicales, la physique nucléaire ou l'étude des matériaux. HBS (High Brilliance Source) est le projet de HiCANS proposé par le Forschung Zentrum Jülich. Les points verts correspondent aux sources à spallation.

Les technologies utilisées pour le projet ICONÉ devront répondre aux exigences résumées dans le tableau ci-dessous et seront choisies selon leur niveau de maturité technologique (TRL) et leurs coûts de réalisation et d'opération.

Exigence	Description
1.1	L'accélérateur doit fournir des protons à une énergie comprise entre 20 et 30 MeV.
1.2	L'accélérateur doit distribuer les protons à deux cibles fonctionnant en parallèle.
1.3	La puissance du faisceau sur chaque cible doit être comprise entre 50 et 100 kW.
1.4	Le courant crête du faisceau de protons doit être compris entre 80 et 100 mA.
1.5	Deux structures temporelles seront entrelacées : une première à une fréquence de 20Hz avec des impulsions de durée 2 ms (correspondant à un cycle utile de 4 %) et une seconde à une fréquence de 100 Hz, avec des impulsions de 200 μ s, correspondant à un cycle utile de 2 %.
1.6	L'accélérateur doit transporter le faisceau jusqu'aux cibles en : <ul style="list-style-type: none"> • permettant l'ajustement de la position du faisceau à ± 2 mm ; • permettant un réglage de la taille horizontale et de la taille verticale du faisceau (σ) comprise entre 10 et 100 mm ; • assurant une densité de puissance maximale de 500 W/cm² (dans le plan perpendiculaire au faisceau) ; et disposer d'un système de balayage du faisceau sur la cible.
1.7	L'accélérateur doit être disponible 4000 heures/an pour les utilisateurs, à raison de 24 heures/jour, 5 jours par semaine.
1.8	Le taux de disponibilité de l'accélérateur devra être supérieur à 95 % sur sa durée nominale de fonctionnement (de l'ordre de 4000 heures/an). Lors du fonctionnement, des coupures de quelques secondes à quelques minutes sont acceptables pour les utilisateurs. Des coupures de plusieurs heures sont handicapantes pour les expériences.
1.9	La maintenance de l'accélérateur devra être la plus simple possible. En particulier, l'utilisation de particules de type « deutérons » est à éviter pour limiter les processus d'activation des éléments de l'accélérateur.

Tableau 7 : Cahier des charges de l'accélérateur.

Des éléments technologiques répondant à ces spécifications sont actuellement en installation ou en commissionnement à ESS. Des équipements similaires sont aussi actuellement en installation sur d'autres accélérateurs en construction. Les équipements développés pour ESS ont pris comme paramètres de design une valeur de courant crête de 70 mA, proche des courants crêtes visés pour ICONÉ. Ces paramètres ont été définis il y a plus d'une dizaine d'années. Les accélérateurs en cours de construction visent quant à eux des courants de protons de l'ordre de 100 mA voire plus (comme IFMIF-EVEDA par exemple).

Il est raisonnable de considérer que les éléments de l'accélérateur sont à un niveau de TRL de l'ordre de 7 où des machines sont en cours de déploiement et vont être mises en opération de routine à courte échéance. La construction de l'accélérateur de ICONÉ ne nécessiterait pas d'efforts de recherche et développement pour développer de nouvelles technologies et pourrait bénéficier du retour d'expérience des premiers accélérateurs à forts courants en cours de construction.

Le risque technologique lié à la construction de l'accélérateur est faible.

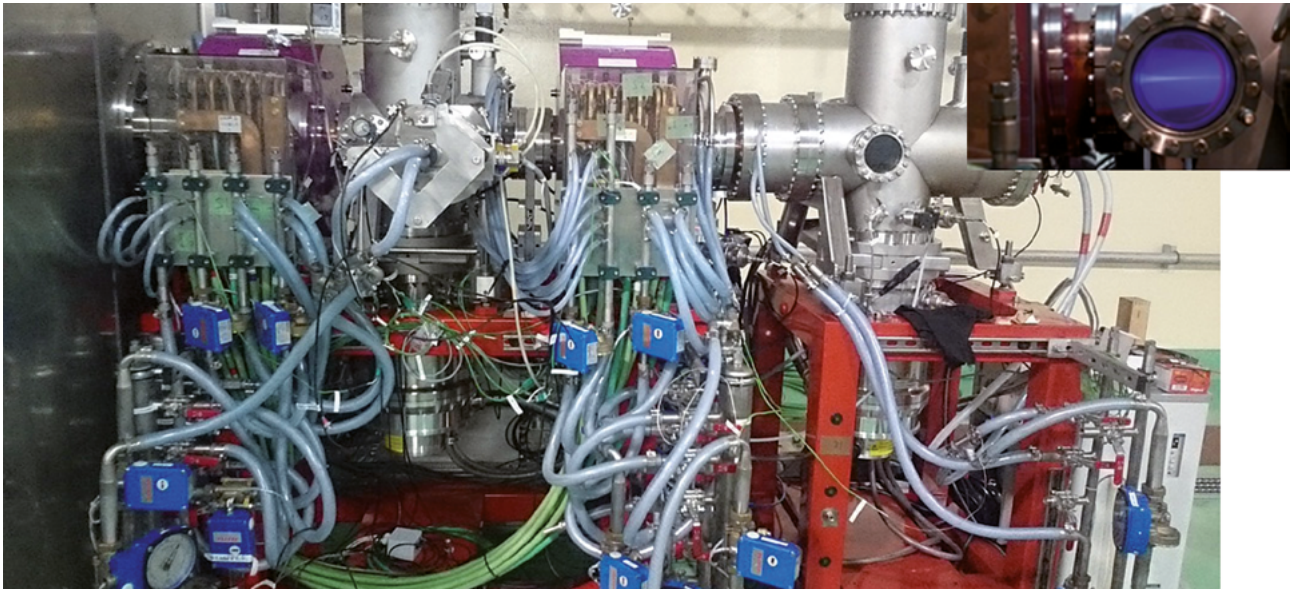


Figure 67 : Source d'ions et ligne de transport à basse énergie (LEBT) de la machine IFMIF-EVEDA capable de fournir des courants allant jusqu'à 150 mA en mode continu (réalisations CEA/IRFU). Actuellement en opération à Rokkasho, Japon.



Figure 68 : Source d'ions et LEBT de l'accélérateur ESS (réalisation INFN, Italie).

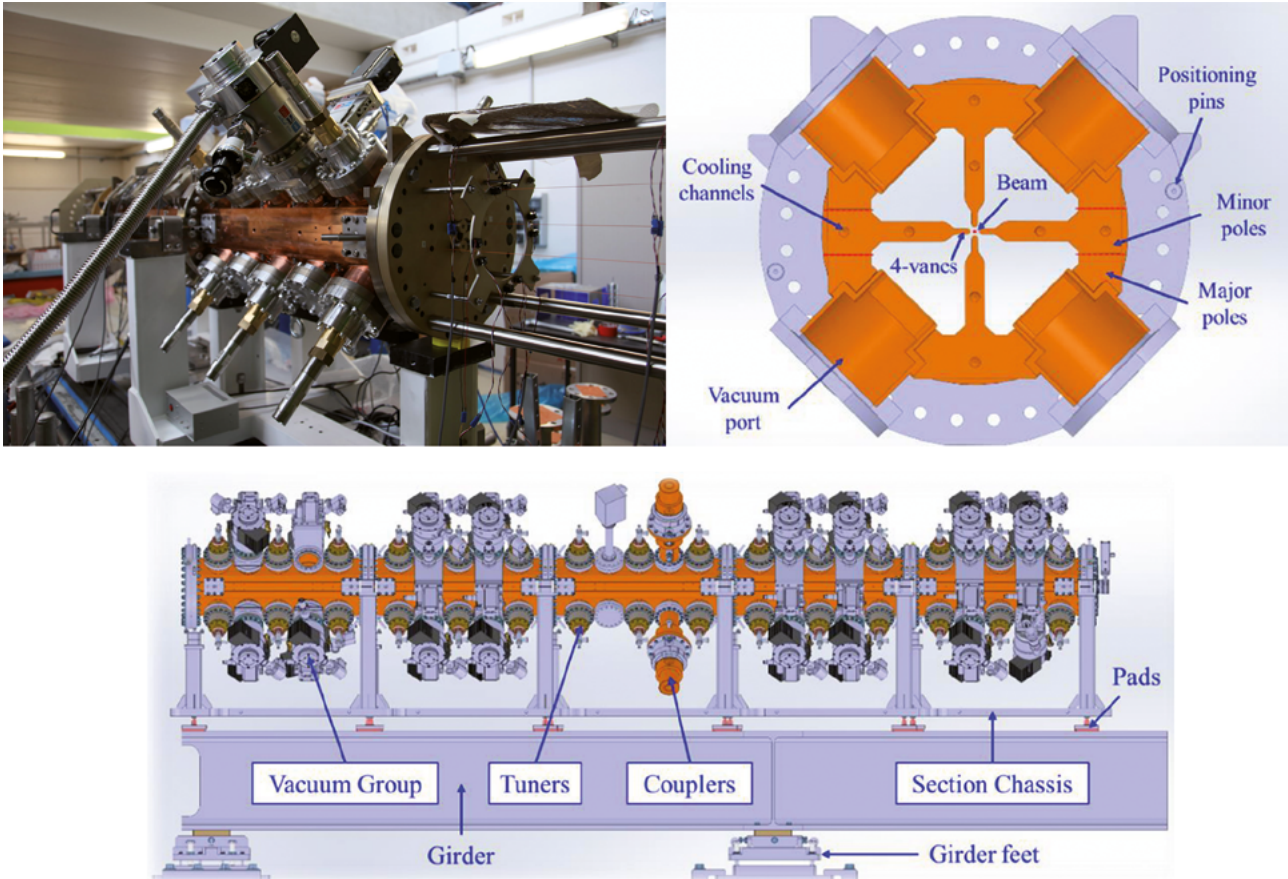


Figure 69 : Élément du quadropôle à radiofréquence (RFQ) pour ESS (maîtrise d'œuvre CEA/IRFU). Cette section permet d'accélérer les protons jusqu'à une énergie de 3,6 MeV.

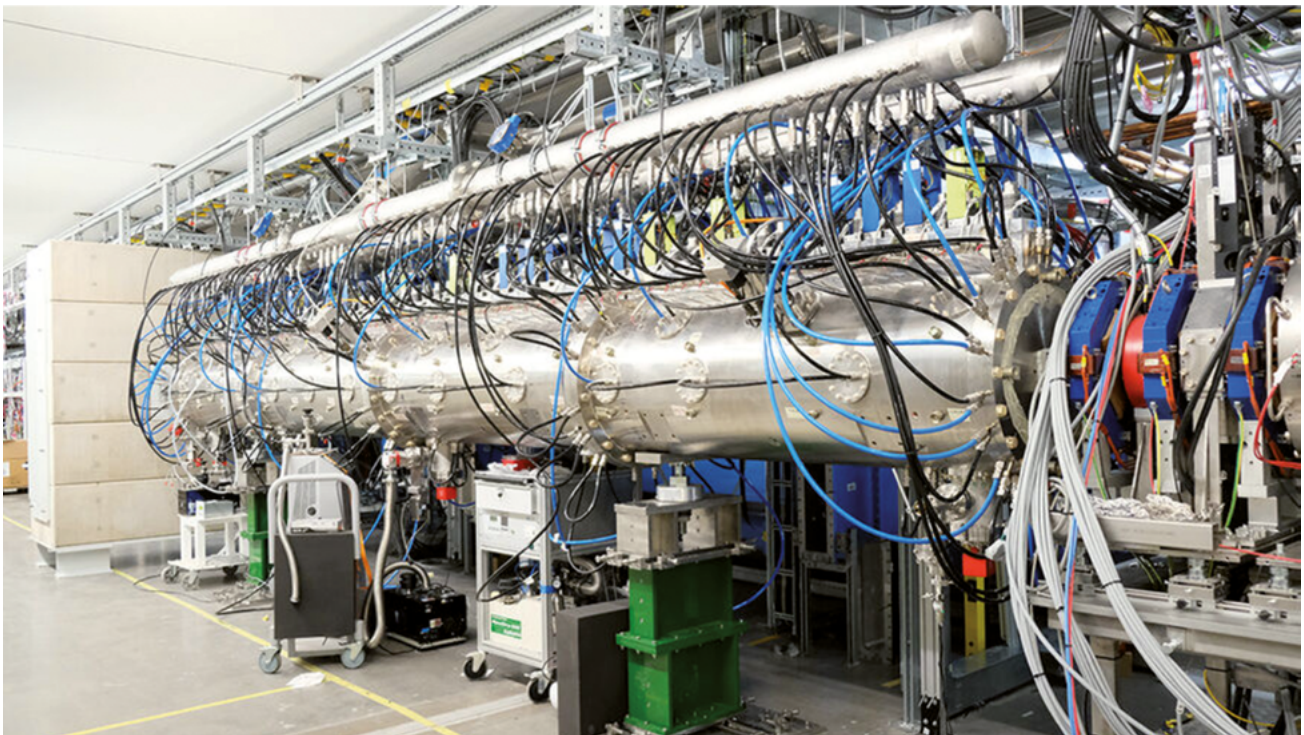


Figure 70 : Une section de DTL de longueur 8 m pour l'accélérateur ESS (maîtrise d'œuvre Italian Institute for Nuclear Physics, INFN, Italie). Cette section permet d'accélérer le faisceau d'une énergie de 3,6 à 21 MeV. Dans le cas d'une machine de type ICONe, un DTL similaire pourrait être utilisé (d'une longueur de l'ordre de 10 m, pour atteindre une énergie de l'ordre de 25 MeV). Le dispositif présenté fonctionne à température ambiante. En mode impulsif, c'est la solution énergétiquement la plus efficace.

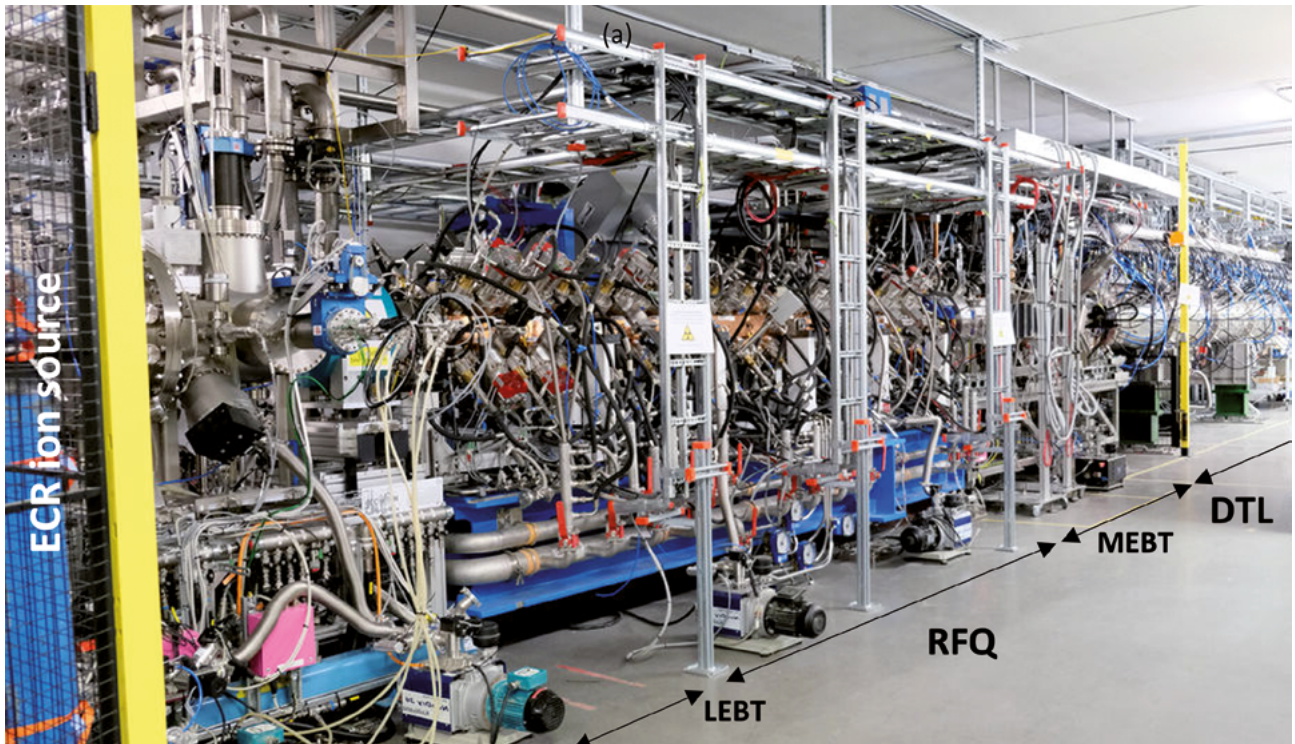


Figure 71 : Exemple d'intégration des différents éléments clés d'un accélérateur nécessaire à une source de type ICONe (image du front-end ESS) : (i) source ECR à haute intensité, (ii) une section LEBT, (iii) un RFQ, (iv) une section MEBT, (v) une section DTL, (vi) une section d'optique pour conduire le faisceau sur la cible. L'accélérateur de ICONe devrait être très similaire à l'équipement ESS.

6.2 Cible pour la production des neutrons

Dans une source de neutrons compacte pilotée par un accélérateur, un matériau constitué d'éléments lourds, appelé matériau cible, est bombardé d'ions légers, tels des protons, induisant des réactions nucléaires qui produisent des neutrons. L'énergie des ions est peu élevée, dans la gamme 2 – 70 MeV. Le rendement de production de neutrons dépend du type de particule, de l'énergie des particules et du matériau cible.

6.2.1 Choix du matériau cible

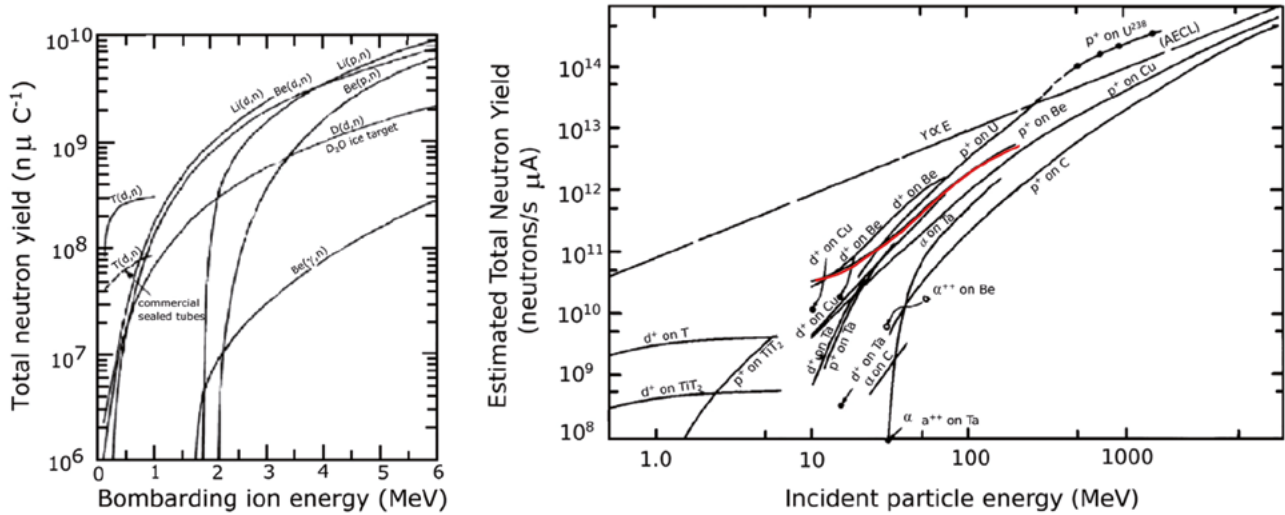


Figure 72 : Production de neutrons rapides par des faisceaux d'ions à basse énergie. Aux plus basses énergies ($E_p < 6$ MeV), les réactions $Li(d,n)$ et $Li(p,n)$ sont les plus efficaces. À plus haute énergie ($E_p < 6$ MeV), les réactions $Be(d,n)$ et $Be(p,n)$ deviennent plus efficaces. Lorsque l'énergie des protons se rapproche de 100 MeV, les processus de spallation apparaissent et la production de neutrons pas spallation d'atomes lourds (W, Ta, Pb) devient le processus nucléaire le plus efficace. La ligne rouge, ($p+$ on Be), correspond au choix fait pour ICONE.

La Figure 72 présente la production de neutrons pour les principaux couples particules-cibles répertoriés, en fonction de l'énergie de la particule.

Dans le domaine des basses énergies, en dessous de 5 MeV, le lithium présente une section efficace de production de neutrons élevée et est utilisé comme matériau cible dans les CANS à basse énergie. En raison de la faible énergie du faisceau et d'une limite de courant de faisceau d'environ 100 mA, ces sources sont principalement exploitées avec un faisceau de particules continu pour maximiser le rendement en neutrons. Ceci est viable pour les applications qui n'utilisent pas de techniques de temps de vol telles que la BCNT ou l'irradiation, mais cela n'est pas efficace pour une installation de diffusion de neutrons.

Dans la gamme d'énergie intermédiaire du proton, entre 5 et 50 MeV, le béryllium a une section efficace de production de neutrons élevée et est utilisé comme matériau cible dans des sources existantes comme LENS dans l'Indiana [128], RANS au RIKEN [129] ou iBNCT à l'université de Tsukuba [130].

Dans la gamme d'énergie supérieure à 50 MeV, les matériaux cibles d'éléments lourds comme le tungstène, le tantale ou le plomb deviennent utilisables car les processus de spallation deviennent non négligeables et commencent à produire des neutrons. Ces cibles utilisant des éléments lourds sont utilisées dans les sources de neutrons de spallation à des énergies de protons élevées. Elles sont aussi envisagées comme cibles pour des HiCANS si l'énergie des protons incidents est plus élevée (typ. 70 MeV) [131].

¹²⁸ T. Rinkel et al, Physics Procedia, **26** (2012) 168-177.

¹²⁹ Y. Ikeda et al., Nucl. Instr. Meth. A, **833** (2016), 61-67.

¹³⁰ H. Kumada et al., Appl. Radiation Isotopes, **106** (2015) 78-83.

¹³¹ P. Zakalek et al., Proc. HIAT 18, Lanzhou, China, (2018), pp.117-121.

6.2.2 État de l'art

La faible énergie des protons sur une HiCANS par rapport à une source à spallation permet de concentrer les réactions nucléaires dans un petit volume (quelques dizaines de cm³) et donc d'avoir une source de neutrons très brillante (définie par le nombre de neutrons émis par cm²).

Le développement et l'exploitation des cibles font face à trois défis principaux concernant l'intégrité et la stabilité de la cible sur de longues périodes (des milliers d'heures) :

- évacuer la chaleur de manière efficace (système de refroidissement) pour éviter de grands gradients de température et une contrainte induite par la température lors du dépôt de grande puissance (jusqu'à 100 kW) ;
- une puissance instantanée déposée sur la cible très élevée, pouvant être de l'ordre de 10 MW pendant l'impulsion de protons dans le cas d'un accélérateur impulsif ; cela engendre un cyclage thermique qui induit une fatigue mécanique du matériau.
- empêcher l'accumulation de protons à l'intérieur de la cible qui fragilisent le matériau cible lorsqu'ils se transforment en hydrogène.

Une analyse neutronique montre que le couplage entre la cible produisant les neutrons rapides et le modérateur qui sert à convertir les neutrons rapides en neutrons thermalisés n'est pas significativement affecté jusqu'à une surface de cible de l'ordre de 100 cm² [132]. Atteindre une puissance de 50 à 100 kW [133] sur une cible requiert donc d'évacuer une puissance moyenne de l'ordre de 500 W à 1 kW/cm². De telles densités de puissance sont tout à fait réalistes avec des systèmes de refroidissement à eau.

Le CEA/DRF a développé une cible en béryllium pouvant fonctionner à des puissances de l'ordre de 50 kW. La cible en béryllium est montée sur une plaque de refroidissement permettant de maintenir la cible Béryllium à sa température de fonctionnement. Le système est conçu de façon à dissocier la mécanique de la cible et le système de refroidissement afin qu'une défaillance d'un élément de la cible ne provoque pas d'entrée d'eau dans l'accélérateur. Une description détaillée du système est fournie en Annexe 4. Pour une puissance faisceau de 50 kW ($E_p = 25$ MeV, $I_p = 2$ mA), la production de neutrons rapides est de $2,4 \times 10^{14}$ neutrons/seconde.

Le fonctionnement de cette cible a été démontré récemment sur l'installation *IPHI-Neutrons* à une puissance de 30 kW sur une durée de fonctionnement de plus de 100 heures [134]. Une puissance plus élevée peut être atteinte en utilisant un système de balayage qui homogénéise la densité de puissance sur la surface de la cible.

Le projet HBS développe une cible en tantale fonctionnant à une énergie de proton de 70 MeV et un courant crête de 100 mA avec un dépôt de puissance moyenne de 100 kW. Pour éliminer la chaleur déposée (~ 1 kW/cm²), le système utilise un refroidissement à micro-canaux [135] avec des épaisseurs de canaux de 0,3 mm directement à l'intérieur de la cible en tantale. Les protons sont arrêtés à l'intérieur de la cible dans le circuit d'eau de refroidissement, ce qui permet de ne pas accumuler d'hydrogène dans la cible métallique. Avec un dépôt de puissance d'environ 100 kW, la production de neutrons estimée est de l'ordre de 10^{15} neutrons/seconde.

Une autre possibilité pour dissiper la chaleur est d'utiliser une roue cible rotative [132] réduisant considérablement la densité de puissance déposée mais empêchant une conception compacte. Dans le domaine des basses énergies, en dessous de 5 MeV, comme le point de fusion du lithium est bas (180,5°C), il est possible de construire une cible liquide. Le prototype LiLi a

¹³² S. Terron et al., Nucl. Instr. Meth. A, **724** (2013) 34-40.

¹³³ A. Marchix et al., J.Phys: Conf. Ser., **1046**, (2018) 01009.

¹³⁴ J. Schwindling et al, J. Neutron Res. **24**, 3-4 (2022) pp. 289-298.

¹³⁵ P. Mastinu et al., Physics Procedia, **26** (2012) 261-273.

fonctionné à une puissance de faisceau de 2,3 kW et des études indiquent qu'une cible de métal liquide peut supporter une puissance de 200 kW [136,137]. Dans le cas d'une énergie de protons plus élevée (par exemple 40 MeV à SARAF), il est envisagé d'utiliser le gallium pour la construction d'une cible liquide, « GALIT ». Le gallium présente l'avantage d'être liquide à température ambiante et le risque chimique est nul.

Une des contraintes liées à l'utilisation de courant de protons très élevé est le problème de l'implantation des protons dans la cible ou dans les structures métalliques du système de refroidissement. Le taux d'implantation de protons dans la cible pour une opération pendant 180 jours (1 an de fonctionnement) à une puissance de 100 kW sera de l'ordre de 10^{21} protons/cm² (10^{27} protons/m²). Ces valeurs correspondent à des fluences extrêmement élevées.

Les protons arrêtés dans le matériau de la cible conduisent à la formation d'hydrogène. Si l'accumulation d'hydrogène est trop importante, cela conduit à une rupture mécanique de la cible. Plusieurs solutions sont donc proposées, illustrées Figure 73 et discutées ci-dessous.

Pour empêcher le dépôt des protons à l'intérieur de la cible béryllium, l'épaisseur de la cible peut être réduite de sorte que le pic de Bragg (zone d'arrêt des protons) se situe soit dans le milieu de refroidissement (voir Figure 73b), soit à l'intérieur d'un matériau tolérant à l'accumulation d'hydrogène (RANS, iBNCT) (voir Figure 73a). Une autre stratégie consiste à travailler à une température cible élevée (> 500°C) pour augmenter le coefficient de diffusion de l'hydrogène.

Dans le cas de l'utilisation d'une cible en métal liquide, il est à l'inverse souhaitable que les protons soient déposés dans la cible pour ne pas endommager les matériaux de structure du circuit. La formation d'hydrogène dans le liquide n'est pas mécaniquement problématique.

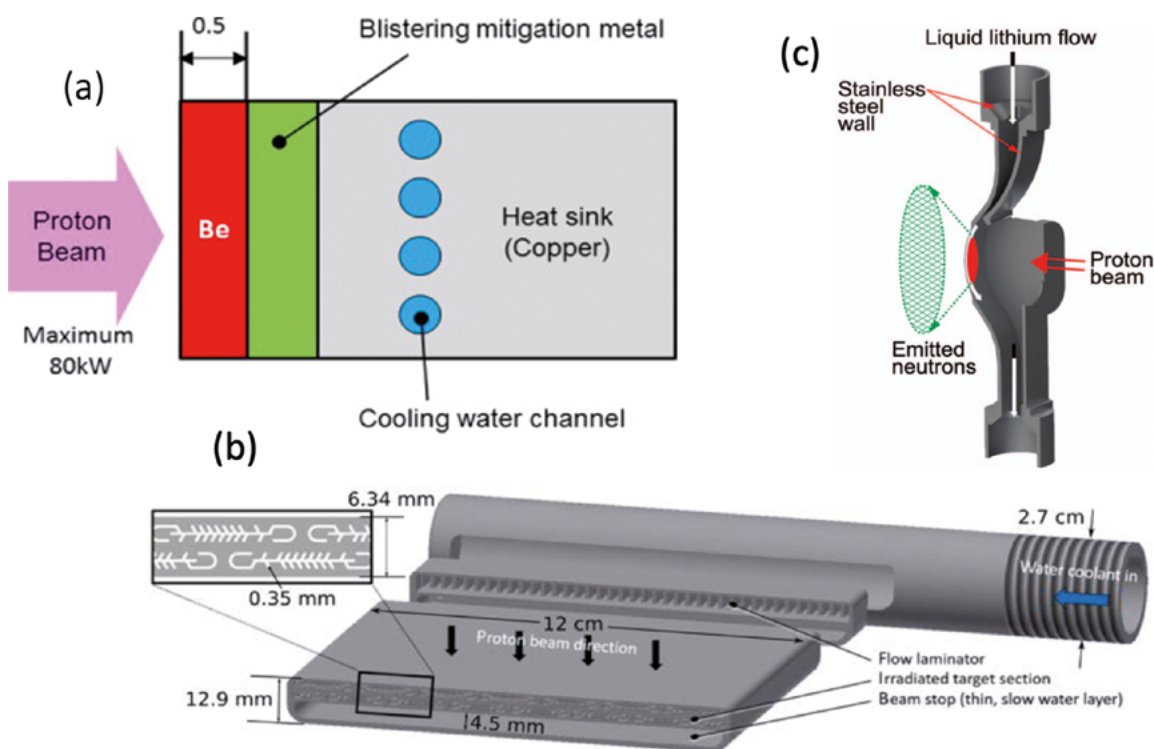


Figure 73 : Différentes stratégies pour réduire les effets d'implantation des protons dans les matériaux de structure. (a) Cible multicouche utilisant un matériau tampon absorbant de protons (typiquement du palladium) [138]. (b) Utilisation d'un matériau tolérant à la formation d'hydrogène (Ta) et dépôt des protons dans l'eau de refroidissement [139]. (c) Utilisation d'une cible en métal liquide (lithium ou gallium) [140].

¹³⁶Tooru Kobayashi et al, Phys. Med. Biol. **52** (2007) 645

¹³⁷Mardor, I., Aviv, O., Avrigeanu, M. et al., Eur. Phys. J. A **54** (2018) 91.

¹³⁸H. Kumada et al, Applied Radiation and Isotopes **106** (2015) 78-83.

¹³⁹T. Brückel, T. Gutberlet (Eds.) Conceptual Design Report Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS), Schriften des Forschungszentrum Jülich, General, Vol.8 (2020).

¹⁴⁰S. Halfon et al, Rev Sci Instrum **84**(12) (2013) 123507.

Aucune solution technique n'a été encore pu être validée sur le long terme avec des durées de fonctionnement de plusieurs milliers d'heures, faute de HiCANS en fonctionnement. Cependant, le fait que de nombreux instituts travaillent sur des options techniques différentes suggère qu'une solution technique sera validée à plus ou moins courte échéance.

Une dernière problématique est liée à l'activation de la cible par le faisceau de proton via la transmutation de certains éléments de la cible. Les matériaux pouvant être le lithium, le béryllium, le gallium ou le tantale, les niveaux d'activations sont différents et dépendent de l'énergie des protons. L'utilisation d'une énergie élevée des protons incident de 70 MeV sur une cible en tantale conduit par exemple à une activation très élevée de la cible, de l'ordre de 10^{16} à 10^{17} Bq, ce qui requiert une gestion spécifique.

Les caractéristiques de la cible pour le projet ICONÉ devront répondre aux exigences résumées dans le tableau ci-dessous. Comme il n'existe pas de solution idéale, le choix de la technologie devra pondérer les différentes exigences.

Exigence	Description
2.1	Le métal utilisé pour la cible doit produire un maximum de neutrons à une énergie donnée.
2.2	La production de neutrons rapides de la plus faible énergie possible est souhaitable.
2.3	La surface de la cible doit être la plus petite possible.
2.4	La cible doit pouvoir supporter des puissances moyennes thermiques de 50 à 100 kW.
2.5	La cible doit pouvoir fonctionner en mode impulsionnel et supporter de forts gradients thermiques (pendant l'impulsion, la puissance instantanée est de l'ordre de plusieurs MW).
2.6	La cible doit avoir une durée de vie de plusieurs milliers d'heures (au moins 1000 heures) pour limiter les opérations de maintenance à 2 à 4 par an.
2.7	L'activation de la cible après irradiation aux protons et aux neutrons doit être la plus faible possible pour faciliter les opérations de maintenance.

Tableau 8 : Cahier des charges pour la cible de production de neutrons.

6.3 Ensemble modérateur-rélecteur

Pour les applications de diffusion neutronique, il est nécessaire de ralentir les neutrons rapides à des énergies thermiques ($E_n = 26$ meV) ou plus froides ($E_n \sim 4$ meV). Les matériaux hydrogénés sont des modérateurs efficaces car l'hydrogène a la section efficace de diffusion et les performances de modération les plus élevées (voir Tableau 4). Ces caractéristiques conduisent à une intensité émise élevée et à des temps d'émission courts. La densité en atomes d'hydrogène, la température d'utilisation, le point de fusion et le point d'ébullition sont donnés dans le tableau ci-dessous pour les matériaux modérateurs thermiques et froids les plus standards. Le polyéthylène a une densité atomique en atomes d'hydrogène plus élevée que l'eau et la modération des neutrons dans un modérateur en polyéthylène est un peu plus efficace que dans l'eau. Cependant, le polyéthylène est sensible aux dommages causés par les radiations et son refroidissement est plus complexe. Dans une installation à basse puissance (quelques kW), le polyéthylène est un bon choix puisque sa forme solide permet de réaliser des configurations complexes à peu de frais. Sur des installations à haute puissance, l'échauffement radiatif dans le volume du modérateur devient important (de l'ordre du kW) et le refroidissement du polyéthylène devient problématique. L'utilisation d'eau légère est alors préférable.

Les modérateurs deutérés (eau lourde ou D₂) présentent une très faible absorption et permettent de réaliser des modérateurs de grande taille, ce qui permet d'augmenter le flux neutronique, mais la structure temporelle est gommée. Ces modérateurs deutérés ne sont pas adaptés aux sources impulsionnelles et ne sont utilisés que sur certains réacteurs. Des modérateurs

partiellement deutérés peuvent être envisagés, mais sur une source impulsienne, ils ne seront bénéfiques que si les impulsions sont suffisamment longues. Par ailleurs, l'utilisation de deutérium conduit à la production de tritium, ce qui complexifie significativement la gestion radiologique. L'utilisation de deutérium sur une HiCANS est donc à éviter.

	H/cm ³	Température d'opération	Point de fusion	Point d'ébullition
H ₂ O	6,7 10 ²²	Temp. ambiante	273 K	373 K
(CH ₂) _n	8,2 10 ²²	Temp. ambiante		
CH ₄	7,8 10 ²²	20K, 105 K	20,4 K	14,7 K
H ₂	4,5 10 ²²	~15 K	20,4 K	14,7 K
C ₉ H ₁₂	5,2 10 ²²	Ambiante ~20 K	229 K	437 K

Tableau 9 : Caractéristiques de matériaux utilisés dans les modérateurs thermiques et froids.

Afin de maximiser la brillance du modérateur (nombre de neutrons émis par unité de surface), un modérateur petit et compact est nécessaire. La maximisation du flux est également obtenue en couplant presque entièrement le modérateur à la cible, c'est-à-dire en faisant en sorte que la plus grande partie des neutrons rapides produits par la cible interagissent avec les modérateurs thermiques et froids. À ESS, la cible verra le modérateur sous un angle solide de 1 stéradian alors que sur une CANS un couplage proche de 6 stéradians devrait être possible. Un schéma de principe est présenté sur la Figure 74.

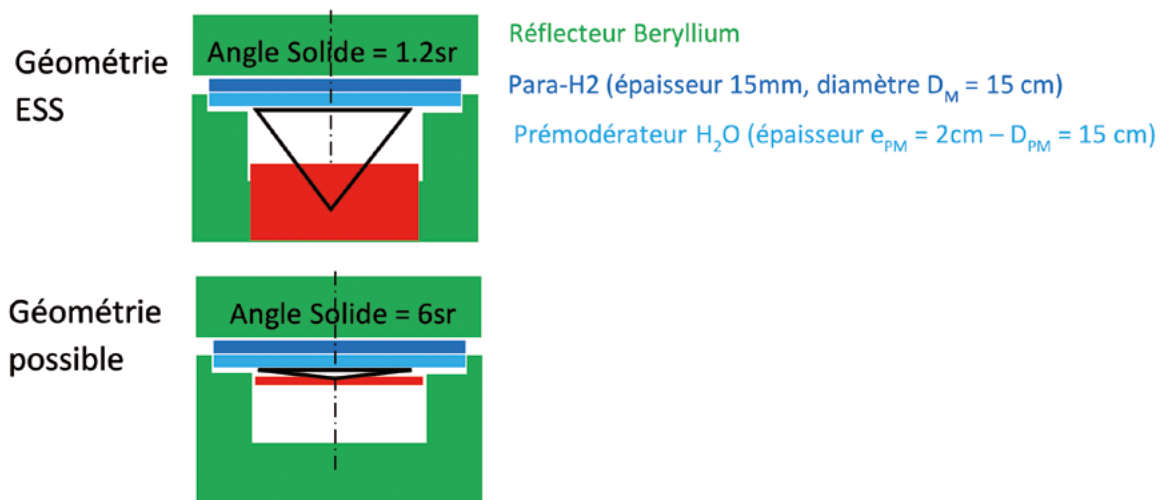


Figure 74 : Comparaison du couplage entre la source et le modérateur entre ESS et une HiCANS. La possibilité de réaliser un ensemble CMR plus compact sur une HiCANS permet d'augmenter le couplage entre le modérateur et la cible en maximisant l'angle solide sous lequel est vu la cible par le modérateur. Cela est rendu possible par la surface et le volume réduit de la cible ainsi que par la puissance limitée déposée par le faisceau de protons.

Un grand nombre de techniques neutroniques sont plus performantes avec des neutrons froids (SANS, réflectométrie, radiographie, spin-écho, spectroscopie haute résolution). Ainsi, un modérateur froid est un élément clé de toute installation de diffusion neutronique.

Les matériaux candidats pour les modérateurs à froid sont le méthane solide (CH₄), l'hydrogène liquide (H₂) et le mésitylène (C₉H₁₂) (voir Tableau 9). Un modérateur froid en méthane solide a

été développé à la source de neutrons de l'Université d'Hokkaido (HUNS) [141,142]. Le méthane a une densité élevée en hydrogène et des niveaux d'excitations à basse énergie (~ 1,3 meV). Ces niveaux sont très efficaces pour la modération des neutrons aux très basses énergies. Un modérateur en méthane fournit un spectre neutronique particulièrement bien modéré dans la gamme des neutrons les plus froids. Le méthane est cependant un matériau à faible résistance aux radiations et ceci même sur des sources de faible puissance. Les phénomènes de dommages d'irradiation conduisent au gonflement du modérateur et vont jusqu'à la l'initiation de phénomènes de polymérisation. Il est donc nécessaire de changer le méthane après un certain temps d'irradiation, par exemple, deux fois par an sur une source de photo-neutrons produisant 10^{12} n/sec telle que HUNS au Japon. Sur la source à spallation ISIS (Royaume-Uni), il est nécessaire de reconditionner le modérateur en méthane solide tous les jours. Sur la source ESS, l'utilisation de méthane a tout simplement été exclue en raison du trop important flux neutronique.

Sur les sources à spallation à flux intense, le para-hydrogène est couramment utilisé comme modérateur froid (à ISIS ou ESS par exemple). Il est légèrement moins efficace que le méthane (voir Figure 75). Il a cependant l'avantage d'être liquide à basse température, ce qui facilite son utilisation dans les systèmes cryogéniques alors que le méthane est solide à ces températures et que sa thermalisation est très difficile. De plus, l'hydrogène n'est pas sensible aux effets du rayonnement neutronique (pas de dommage radiatif ou de polymérisation), à la différence du méthane qui accumule très vite des défauts sous rayonnement neutronique.

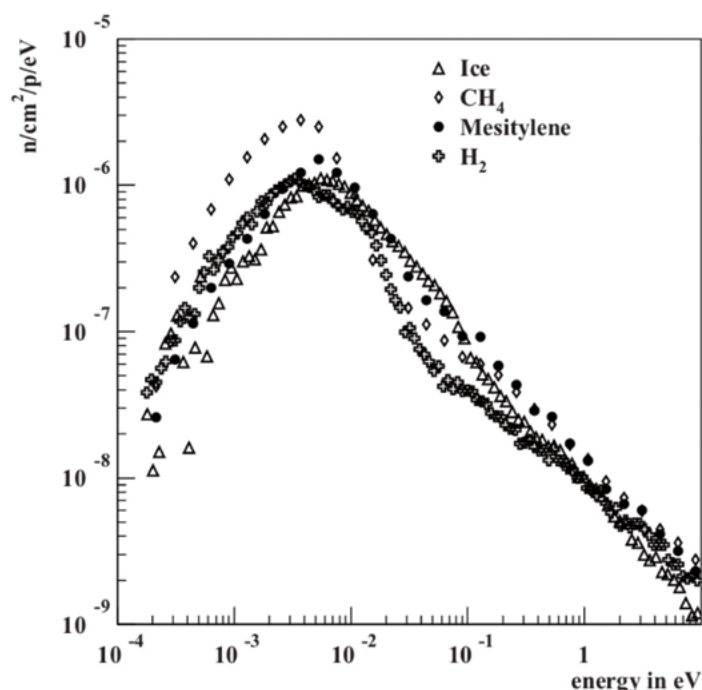


Figure 75 : Comparaison des spectres d'énergies des neutrons de modérateurs couplés en hydrogène liquide et méthane solide [143].

Par ailleurs, de nouveaux concepts de modération [144] utilisant des modérateurs de faible dimension (1D ou 2D) ont récemment été proposés pour augmenter la brillance des sources. Un modérateur plat de type « papillon » (2D) est en construction à ESS. Les simulations numériques indiquent que pour un modérateur d'épaisseur 1,5 cm, la brillance en neutrons thermiques sera multipliée par un facteur 2,5 et la brillance en neutrons froids par un facteur 4 (Figure 76a). Des calculs montrent que des brillances encore plus élevées sont attendues pour des modérateurs « unidimensionnels » ou tubulaires. Cela a conduit l'équipe concevant l'ensemble CMR pour la seconde station cible à SNS à proposer le design de la Figure 76b. Une structure équilatérale

¹⁴¹ K. Inoue, N. Otomo, H. Iwasa and Y. Kiyonagi, J. Nucl. Sci. Tech., **11** (1974) 228-229.

¹⁴² K. Inoue, Y. Kiyonagi and H. Iwasa, Nucl. Instr. Meth. in Physics Research, **192** (1982) 129-136.

¹⁴³ K. Nunighoff et al, The European Physical Journal A **38**, p. 115.

¹⁴⁴ L. Zanini et al, EPJ Web Conf. **231** (2020) ; L. Zanini, F. Mezei, K. Batkov, E. Klinkby, A. Takibayev, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **1021** (2019) 012009.

contenant 3 modérateurs tubulaires permet d'alimenter au moins 6 spectromètres. La brillance attendue est supérieure à celle qui sera produite à ESS. Cette géométrie a été reprise pour le design de HBS.

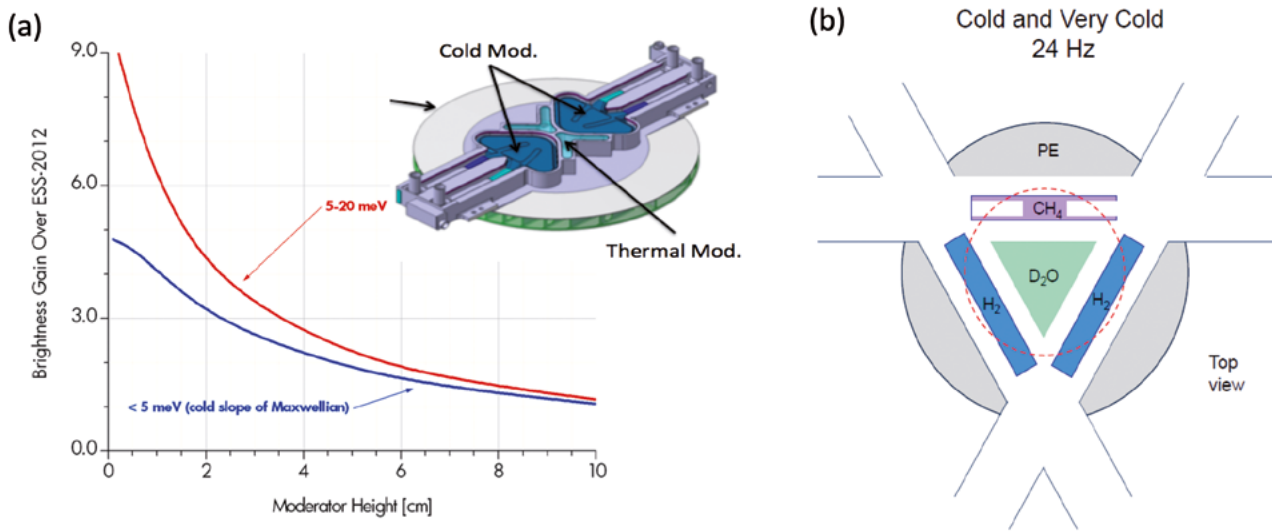


Figure 76 : (a) Gain en luminosité obtenu en passant à un modérateur bidimensionnel à ESS (« Butterfly moderator »). Le modérateur actuellement en construction aura une épaisseur de 3 cm. (b) Disposition de modérateurs tubulaires proposée pour la seconde station cible à SNS aux USA.

Les caractéristiques des modérateurs pour le projet ICONÉ devront répondre aux exigences résumées dans le tableau ci-dessous. **À priori, la modulation des neutrons thermiques sera assurée par de l'eau légère et la production de neutrons froids sera assurée par des modérateurs tubulaires utilisant du para-hydrogène.**

Exigence	Description
3.1	Les modérateurs thermiques devront modérer les neutrons rapides dans le volume le plus réduit possible.
3.2	Il devra être possible de refroidir les modérateurs thermiques pour évacuer la chaleur déposée par le rayonnement gamma de la source.
3.3	Les modérateurs ne devront pas significativement rallonger les longueurs des impulsions neutroniques.
3.4	L'opération des modérateurs ne devra pas conduire à la production de tritium.
3.5	Les modérateurs froids devront produire une brillance la plus élevée possible.
3.6	Les modérateurs froids devront être les plus couplés possibles avec la source.
3.7	Les modérateurs froids devront supporter l'échauffement radiatif lié à la production de rayonnement gamma.

Tableau 10 : Cahier des charges des modérateurs.

6.4 Réflecteur

Différents matériaux peuvent être considérés pour servir de réflecteur, le composant qui permet de confiner les neutrons dans le modérateur [145]. Le béryllium et le graphite sont par exemple des matériaux efficaces. Le béryllium fournit de meilleures performances que le graphite mais c'est un matériau très onéreux. Il est possible de considérer l'utilisation du plomb, qui donne des performances satisfaisantes sans modifier de manière significative la forme des impulsions neutroniques.

Récemment, différentes propositions ont été faites pour réfléchir les neutrons froids. MgH_2 semble un bon candidat et les nano-diamants pourraient augmenter la réflectivité dans la gamme d'énergie des neutrons très froids [146,147]. Ces deux dernières solutions n'ont toutefois pas encore été expérimentalement testées et leurs performances restent à démontrer.

6.5 Blindage

Le spectre de particules secondaires émises lors du bombardement de la cible par des protons est limité par l'énergie des protons E_p . De ce fait, puisque l'énergie des protons incidents dans ICONNE est relativement faible, **les besoins en radioprotection sont réduits par rapport à une source à spallation** où l'énergie des protons est de l'ordre de 1 GeV, conduisant à la production de particules secondaires (rayonnement gamma et neutron) ayant des énergies du même ordre de grandeur.

Sur une source utilisant une énergie de protons de 70 MeV, l'épaisseur du blindage radiologique est de 2 m tandis que pour une source à 25 MeV, une épaisseur de protection de 1 m est suffisante.

La structure optimale d'un blindage est composite et alterne des couches de plomb et de polyéthylène pour arrêter à la fois le rayonnement neutronique et le rayonnement gamma.

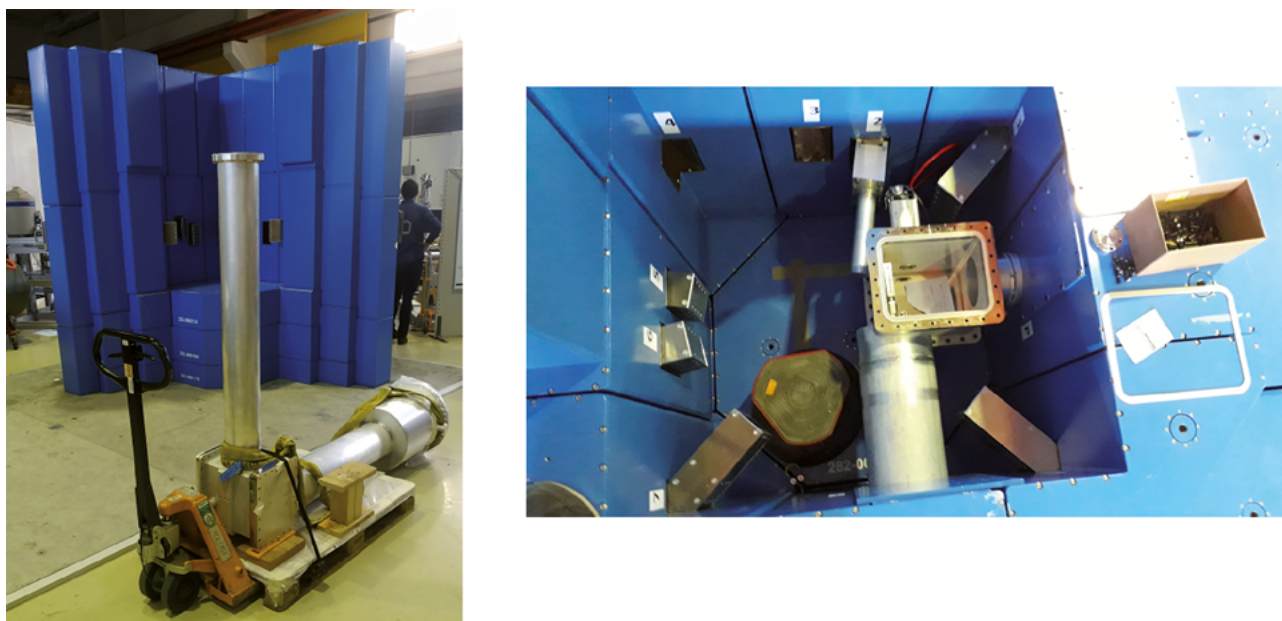


Figure 77 : (a) Bunker de blindage de l'ensemble cible de la source HBS (échelle 0,7). (b) Intérieur du blindage (volume $1 \times 1 \text{ m}^2$) avec 8 sorties de faisceau (installation de test sur le synchrotron JULIC au FZ Jülich).

¹⁴⁵ Y. Kiyonagi, J. Nucl. Sci. Tech., 24, 6, 490-497 (1987).

¹⁴⁶ V. Nesvizhevsky, U. Koester, M. Dubois, N. Batisse, L. Frezet, A. Bosak, L. Ginesdan, O. Williams., J. Neutron Research, 20 (2018) 81–82.

¹⁴⁷ M. Teshigawara, Y. Tsuchikawa, G. Ichikawa, et al., Nucl. Instr. Meth. in Physics Research, A929 (2019) 113-120.

7 Instrumentation de diffusion neutronique et autres méthodes analytiques

Nous présentons les principales techniques de diffusion neutronique ainsi que les autres techniques analytiques pouvant être déployées autour d'une source de neutrons.

Nous proposons que ICONÉ offre aux utilisateurs une suite instrumentale comprenant les techniques les plus demandées par les utilisateurs français : diffraction sur poudres, diffusion de neutrons aux petits angles et réflectométrie, spectroscopie, radiographie.

Sur la base de projections des performances des instruments, nous estimons qu'il serait possible de réaliser plus de 300 runs expérimentaux par an (sur 10 instruments). Cela conduirait à une production scientifique de l'ordre de 100 à 150 publications par an.

Les principales techniques de diffusion neutronique peuvent être classées en trois grandes catégories :

- les techniques de diffraction qui permettent l'étude de l'**ordre dans la matière à l'échelle atomique** (la structure) ;
- les études de structures à grande échelle (3 nm à 3 mm) ;
- la spectroscopie qui permet d'étudier **les mouvements des atomes ou des molécules** (la dynamique) sur des échelles d'énergies allant de 5 neV à 100 meV.

Pour couvrir ce large domaine de distances et d'énergies, des neutrons de longueurs d'onde variant de quelques fractions d'Angström à des dizaines d'Angström sont utilisés. Ils sont typiquement répartis en trois catégories : chaud, thermiques et froids, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

L'instrumentation neutronique recouvre une très grande variété d'instruments dont les coûts de construction peuvent varier de manière très significative. Cela est lié en particulier au coût des systèmes de choppers mécaniques et des systèmes de détection et, de manière, plus générale à la taille l'instrument. Par ailleurs, l'implémentation des techniques de diffusion neutronique peut être assez différente selon qu'elle se fait sur des sources impulsives ou continues.

	Énergie	Température	Longueur d'onde (nm)
Froids	0,1-10	1-120	0,4-3
Thermiques	5-100	60-1000	0,1-0,4
Chauds	100-500	1000-6000	0,04-0,1

Un autre aspect, non développé ici mais qui ne doit pas être négligé, est lié à la simplicité d'utilisation des instruments et au traitement et à l'exploitation des données expérimentales. Les données expérimentales peuvent nécessiter des post-traitements plus ou moins complexes en fonction des techniques.

La Figure 78 compare différentes techniques instrumentales en fonction de leur coût d'implémentation et de leur complexité instrumentale.

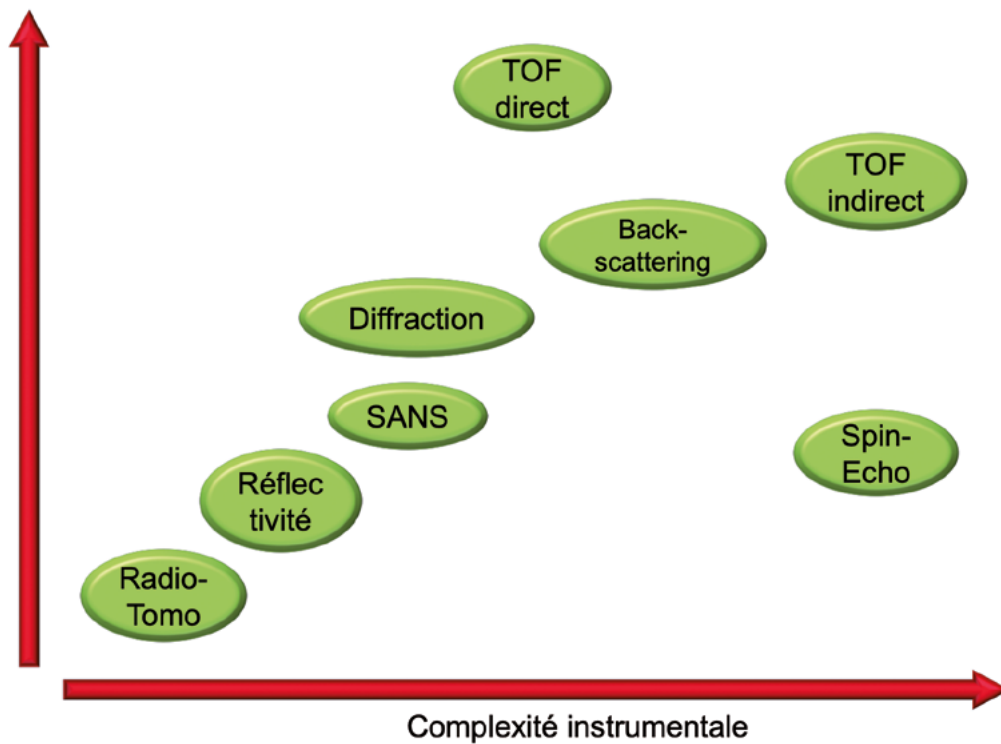


Figure 78 : Comparaison des différentes techniques instrumentales en fonction de leur coût d'implémentation et de leur complexité instrumentale.

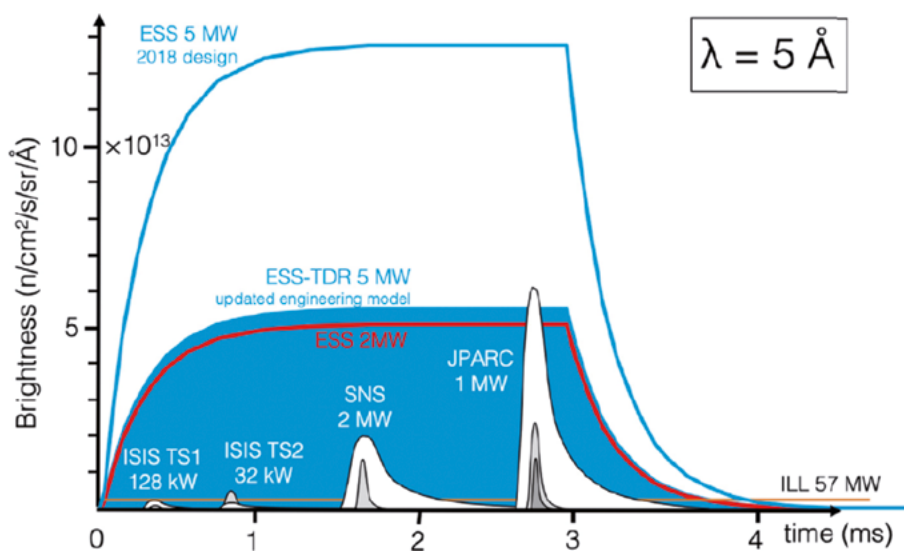


Figure 79 : Luminosité en fonction du temps du modérateur froid ESS à une longueur d'onde de 5 \AA . À titre de comparaison, la luminosité des sources de neutrons ISIS au Royaume-Uni, SNS aux États-Unis, J-PARC au Japon et ILL en France. Pour ISIS, SNS et JPARC, les formes d'impulsion de plusieurs modérateurs sont tracées. Cela illustre les compromis entre résolution et intensité. Pour ESS, trois hauteurs d'impulsions sont tracées : celle correspondant à la conception du modérateur dans le TDR initial (zone pleine bleu), la conception à 5 MW de puissance (ligne bleue) et à la nouvelle conception à 2 MW (ligne rouge).

7.1 Principes guidant le choix des instruments sur une HiCANS

Les sources à spallation actuelles disposent de plusieurs modérateurs autour des cibles afin de produire des impulsions de longueurs différentes (voir les différentes impulsions sur la Figure 79). Cela conduit à des pénalités en flux très importantes, en particulier sur les modérateurs empoisonnés.

Il existe deux stratégies pour contourner ces difficultés. La première, adoptée à ESS (qui ne dispose que d'une cible et d'un seul modérateur), est de mettre en forme les impulsions de neutrons grâce à des disques mécaniques (« choppers »), qui permettent d'ajuster la résolution expérimentale des instruments de diffusion de manière individuelle et continue et de passer d'une configuration {haut flux / basse résolution} vers une configuration {haute résolution / flux réduit} lors d'une même expérience. Le choix de la structure temporelle de ESS (fréquence et durée des impulsions) est cependant le résultat d'une moyenne pondérée par les performances de différents types d'instruments, ce qui a nécessairement conduit à des compromis sur les performances de certains d'entre eux.

Dans le cas des HiCANS, nous disposons d'un degré de liberté supplémentaire fourni par l'utilisation de deux cibles permettant de disposer de deux structures temporelles optimisées d'un côté pour les appareils basse résolution (SANS, réflectométrie, spin-écho, imagerie) et de l'autre côté pour les appareils haute résolution (diffraction, spectroscopie). Dans le cas des HiCANS, si la demande le justifiait, il serait possible d'envisager une troisième cible fonctionnant en mode continu ou semi-continu, qui serait par exemple adaptée à la radiographie ou aux expériences d'irradiation [148].

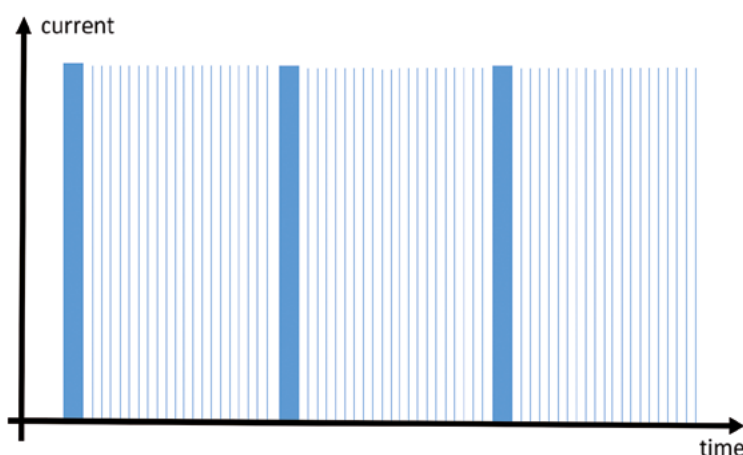


Figure 80 : Exemple de deux structures temporelles entrelacées (des impulsions courtes à haut taux de répétition et des impulsions longues à un taux de répétition plus faible).

Le tableau suivant décrit les gammes de longueurs des impulsions, les fréquences de répétition, les tailles du faisceau et les divergences angulaires adaptées à différentes techniques instrumentales utilisant les techniques de temps de vol.

¹⁴⁸ Une contrainte est évidemment que l'accélérateur soit dimensionné pour fournir la puissance additionnelle nécessaire

Instrument	Longueur d'impulsion	Fréquence	Taille du faisceau	Divergence	Source (λ range)	$\Delta\lambda/\lambda$
Imagerie & PGAA	Faisceau continu	-	10 × 10 cm ²	0,2°	Bispectral (0,6-4 Å)	1
Diffractomètre mono cristal	20-200 μ s	100-300 Hz	< 5 × 5 mm ²	0,5° × 1°	Bispectral (0,6-4 Å)	0,01-0,02
Diffractomètre de poudre	20-200 μ s	100-300 Hz	1 × 1 cm ²	0,5° × 1-2°	Bispectral (0,6-4 Å)	0,01-0,02
Spectromètre à TdV (direct)	50-500 μ s	100-300 Hz	< 3 × 3 cm ²	5°	Thermique ou froid	> 0,01
Spectromètre cristal mono - TdV	20-2000 μ s	20-300 Hz	< 3 × 3 cm ²	5°	Froid (2-6 Å)	> 0,01
Spectromètre TdV- rétrodiffusion	20-2000 μ s	20-300 Hz	< 3 × 3 cm ²	5°	Froid (~3-10 Å)	< 0,005
Echo de Spin	~1-2 ms	20-48 Hz	< 3 × 3 cm ²	5°	Froid (5-10 Å)	0,2
Diffusion aux Petits Angles	~1-2 ms	20-48 Hz	1 × 1 cm ²	0,4°	Froid (3-16 Å)	0,1
Réflectométrie	~1-2 ms	20-48 Hz	< 1 × 30 mm ²	0,2° × 2-4°	Froid (2-6 Å)	0,1

Tableau 11 : Paramètres instrumentaux considérés dans différents projets de HiCANS (ICONE, HBS, ARGITU).

Un avantage des sources impulsionnelles est qu'elles fournissent des impulsions neutroniques. La structure temporelle de leurs impulsions n'est cependant pas universellement adaptée à toutes les gammes de mesures en énergie. Même sur une source impulsionnelle, il est nécessaire d'utiliser des choppers supplémentaires pour mettre en forme les caractéristiques temporelles du faisceau. Cela conduit à des pertes de flux significatives. Sur une HiCANS, un premier degré de liberté est fourni par les 2 cibles qui permettent par exemple d'implémenter les appareils à basse résolution (SANS, réflectométrie, spin-écho, imagerie) sur une cible optimisée pour les basses résolutions et offrant des impulsions très longues. Les appareils à plus haute résolution seront implémentés sur la source proposant des impulsions plus courtes.

Un dernier avantage des sources de type HiCANS est que les choppers peuvent être implémentés très près de la source, ce qui permet de limiter les pertes et d'ajuster quasi parfaitement l'espace des phases utile de la source vers l'échantillon avec des pertes réduites.

Dans la suite, nous décrivons différents instruments qui pourraient être implémentés sur une source de type HiCANS.

7.2 Diffraction

La diffraction fut la première méthode de diffusion neutronique à être développée et elle constitue encore aujourd'hui un pan essentiel des méthodes de diffusion neutronique. Elle est utilisée pour résoudre des problèmes de structures cristallographiques dans des poudres ou des monocristaux à des échelles de tailles caractéristiques allant d'une fraction d'Angström à plusieurs nanomètres. Les thématiques scientifiques utilisant les techniques de diffraction sont extrêmement variées.

- Détermination de structures magnétiques :
 - o topologies frustrées ou de basse dimensionnalité,
 - o systèmes magnétiques non colinéaires : skyrmions, chiralité, etc.,
 - o oxydes magnétiques multifonctionnels : magnétorésistance,
 - o densité d'états de spin,
 - o magnétisme moléculaire et composés photomagnétiques (transition magnétique sous irradiation lumineuse),
- Systèmes à électrons fortement corrélés :
 - o multiferroïques, magnétocaloriques, etc.,
 - o couplages entre degrés de liberté de spin, réseau et/ou orbite,
 - o fermions lourds et supraconducteurs,
- Ordre local dans les liquides et les verres ;
- Positions des atomes d'hydrogènes ou des molécules dans des structures complexes :
 - o ex. clathrates, protéines,
- Métallurgie :
 - o détermination des textures cristallines,
 - o mesure de l'énergie stockée dans des matériaux déformés,
 - o détermination de champs de contraintes résiduelles,
 - o transformations de phases cristallographiques et dosage de phases cristallines,
 - o hydruration,
 - o analyse d'objets du patrimoine,
- Suivi de réactions chimiques :
 - o cellules électrochimiques,
- Matériaux fonctionnels :
 - o céramiques piézo-électriques,
 - o composés microporeux, clathrates, zéolithes, MOFS,
 - o conducteurs ioniques/protoniques,
 - o auto-organisation de nanostructures.

Les instruments pour la diffraction sur poudre diffèrent par la gamme de longueurs d'onde utilisables (flux neutronique chaud, thermique ou froid, de 0,3 à 10 Å), la gamme de mesure dans l'espace réciproque (de 0,02 à 40 Å⁻¹), la gamme et la résolution pour les paramètres structuraux. En général, un compromis entre flux et résolution doit être fait et on peut souvent diviser les appareils entre instruments à haut flux et ceux à haute résolution.

La diffraction sur monocristaux fournit les informations les plus précises et les plus détaillées mais nécessite des échantillons de qualité et de taille appropriées. Certains instruments de diffraction sont optimisés et même très souvent construits spécifiquement pour l'étude de monocristaux. L'utilisation d'échantillons sous forme de monocristaux permet d'étudier des structures magnétiques complexes, de mesurer la diffusion diffuse ou de déterminer la structure de protéines. Ces appareils implémentent souvent des neutrons polarisés dont l'utilisation est difficile sur les instruments de diffraction de poudre.

Une autre application spécifique de la diffraction est la détermination de l'état de déformation locale (à l'échelle du mm). La mesure du champ de déformation permet de réaliser une cartographie du tenseur de contraintes (toutes les composantes) dans des pièces de grande taille (des dizaines de cm). Ces mesures sont réalisées par exemple sur des pièces d'ingénierie produites par différents traitements thermomécaniques des interfaces d'assemblages (brazing, welding, stir welding...).

Les mesures de diffraction servent aussi à mesurer les textures dans des matériaux métallurgiques ou les énergies stockées dans les microstructures.

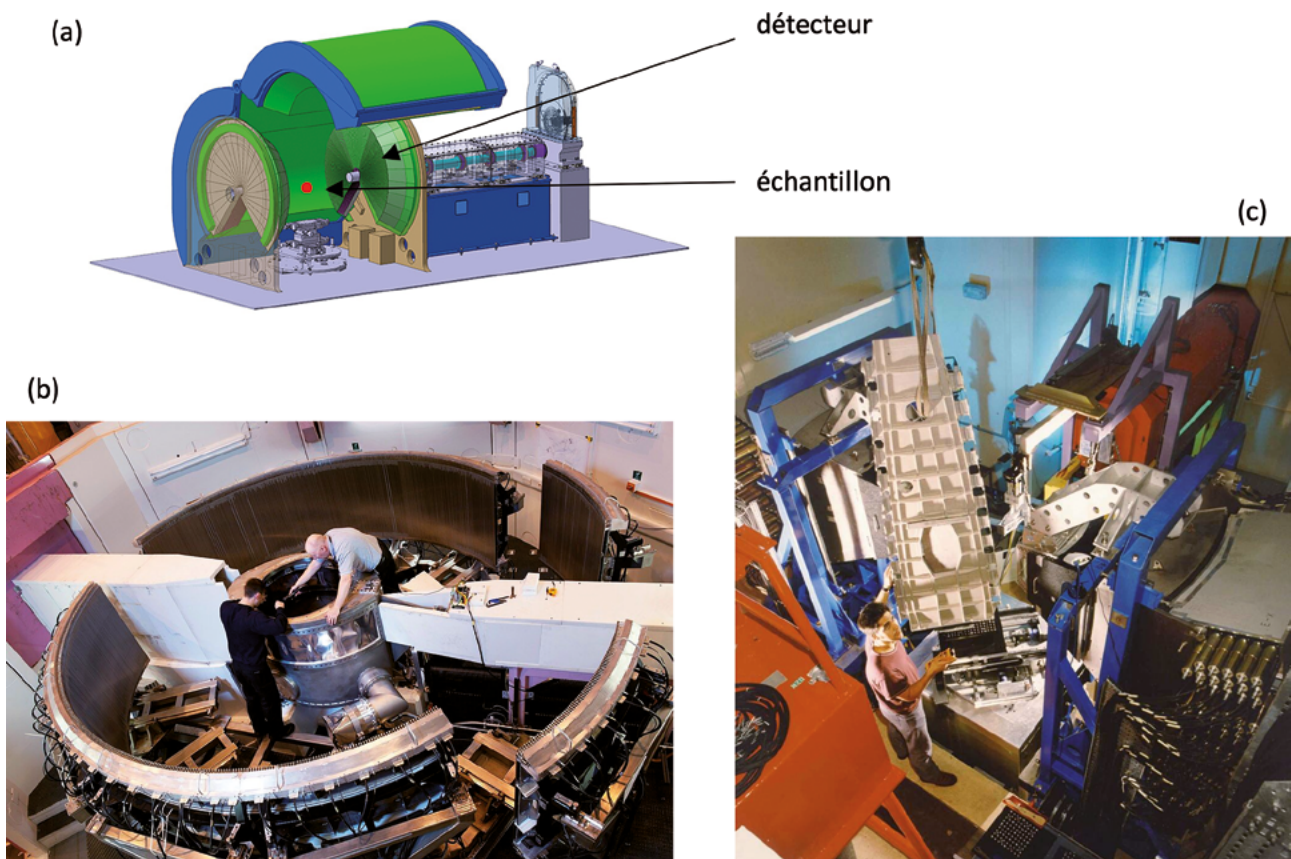


Figure 81 : (a) Dans les techniques en temps de vol, un faisceau collimaté est envoyé sur un échantillon. Les neutrons diffusés sont mesurés dans toutes les directions de l'espace à l'aide d'un détecteur de grande surface. Le schéma présente l'appareil POWTEX au MLZ qui disposera de la plus grande couverture de l'espace réciproque au monde. (b) Enceinte détecteur du spectromètre WISH à ISIS. L'échantillon est mis en place au centre de l'appareil. (c) Mise en place d'un élément de structure d'une aile d'avion pour une mesure de champ de contraintes sur l'instrument ENGINE-X à ISIS.

Sur une source continue, ces besoins instrumentaux sont typiquement couverts par un panel d'instruments spécialisés, divisés en 2 classes : les instruments pour la diffraction des poudres et les instruments pour la diffraction sur monocristaux. Cette division avait une origine historique parce que les instruments de diffraction sur poudre se prêtaient bien à l'utilisation de multi-compteurs alors que les instruments dédiés à l'étude de monocristaux utilisaient un détecteur ponctuel. Cette distinction s'est estompée au fil des ans et des détecteurs de grande surface ont été installés sur des instruments dédiés à l'étude de monocristaux.

Les instruments de diffraction du LLB étaient les suivants :

- Diffraction de poudres :
 - G4.1 : froid, haut flux, magnétisme, «cultural heritage»,
 - 3T2 : thermique, haute résolution, cristallographie, métallurgie,
 - G4.4 : diffraction haute résolution, monochromateur Ge,
 - G6.1 : neutrons très froids, interfaces, diffraction/petits angles, nanostructures,
 - 6T1 : thermique, texture et matériaux,
 - DIANE : détermination de contraintes dans des pièces industrielles et dans des matériaux d'études,
 - 7C2 : chaud, liquides/amorphes,
- Diffraction mono-cristaux :
 - 6T2 : thermique, polarisé, magnétisme et transition de phase,
 - 5C1 : chaud, polarisé, densité de spin, susceptibilité locale,
 - 5C2 : chaud, cristallographie.

7.2.1 Les avantages du temps de vol pour les techniques de diffraction

L'utilisation des techniques de temps de vol offre plusieurs avantages par rapport aux techniques utilisant un monochromateur. Sur un instrument utilisant un monochromateur, la résolution est liée à l'angle de take-off sur le monochromateur, à la divergence du faisceau incident et à la mosaïque du cristal monochromateur (voir Figure 82). Ces différentes contraintes conduisent à la nécessité de construire des instruments différents en fonction des questions scientifiques que l'on veut aborder pour optimiser la résolution et le flux par rapport aux besoins des utilisateurs. Un instrument unique ne peut pas répondre de manière efficace à tous les besoins.

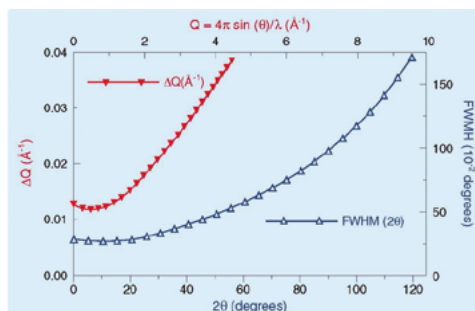


Figure 82 : Fonction de résolution de l'appareil G41 du LLB sur Orphée. La fonction de résolution est liée à l'angle de take-off sur le monochromateur, à la divergence angulaire et à la mosaïque du cristal monochromateur.

Sur un instrument de diffraction en temps de vol, les possibilités offertes sont plus grandes : la gamme angulaire utilisable s'étend de 0 à 180°, la diffraction peut être mesurée hors du plan équatorial et donc la surface de détection peut couvrir une surface allant jusqu'à 4π stéradians, la gamme de longueur d'onde est flexible, et le bruit de fond est réduit et dilué.

7.2.2 Diffractomètre de poudre et monocristaux thermiques à haut flux

Sur une installation de diffusion neutronique, un instrument de diffraction doit pouvoir réaliser des études structurales ou magnétiques en fonction de paramètres extérieurs (température, pression), et suivre in situ des réactions cinétiques ou des transitions de phase. De plus, les mesures de spectres de diffraction doivent être effectuées dans des temps de l'ordre de la minute. Il s'agit donc d'un instrument sur lequel le flux est privilégié par rapport à la résolution. Il reste cependant particulièrement adapté à la détermination de structures magnétiques.

Des temps d'acquisition plus longs permettent de détecter et de quantifier des phases minoritaires présentes dans un composé multiphasé (jusqu'à des niveaux de l'ordre de 0,1 % en masse).

Le tableau suivant rassemble les caractéristiques typiques d'un tel instrument.

Diffractomètre de poudre à haut flux	
Gamme de longueurs d'onde Résolution	$0,8 < \lambda < 3 \text{ \AA}$ (modérateur bispectral) $1 \% < \delta \lambda / \lambda < 10 \%$.
Taille des échantillons Types d'échantillons	1 mm^2 - 1 cm^2 Poudres et monocristaux
Divergence angulaire	$0,2^\circ \times 0,2^\circ$ - $1^\circ \times 1^\circ$.
Périodicité cristallographique Distances interréticulaires	Jusqu'à 30 \AA $0,45 \text{ \AA} < d < 50 \text{ \AA}$
Temps de mesure	Inférieur à 12 heures
Environnements échantillons	
Température	30 mK-450 K & 20°C - 1700°C
Pression	0-1 GPa
Champ magnétique	0-10 T
Autre	Atmosphère contrôlée, cellule électrochimique

Tableau 12 : Caractéristiques souhaitables pour un instrument de diffraction à haut flux.

Proposition de design d'un appareil de diffraction de poudre : PRESTO

Sur la base des besoins exprimés ci-dessus, nous proposons Figure 83 le design d'un instrument de diffraction installé sur un modérateur thermique de HiCANS à impulsions longues, baptisé PRESTO et dérivé de l'instrument MAGIC en construction à ESS.

L'instrument est long (42 mètres) afin de pouvoir accéder à des résolutions de l'ordre de 1 %.

Des simulations Monte-Carlo ont été réalisées pour comparer les performances de PRESTO d'après le design proposé avec celles de G41 du LLB à Orphée, instrument qui couvrait des thématiques scientifiques similaires à celles envisagées sur PRESTO.

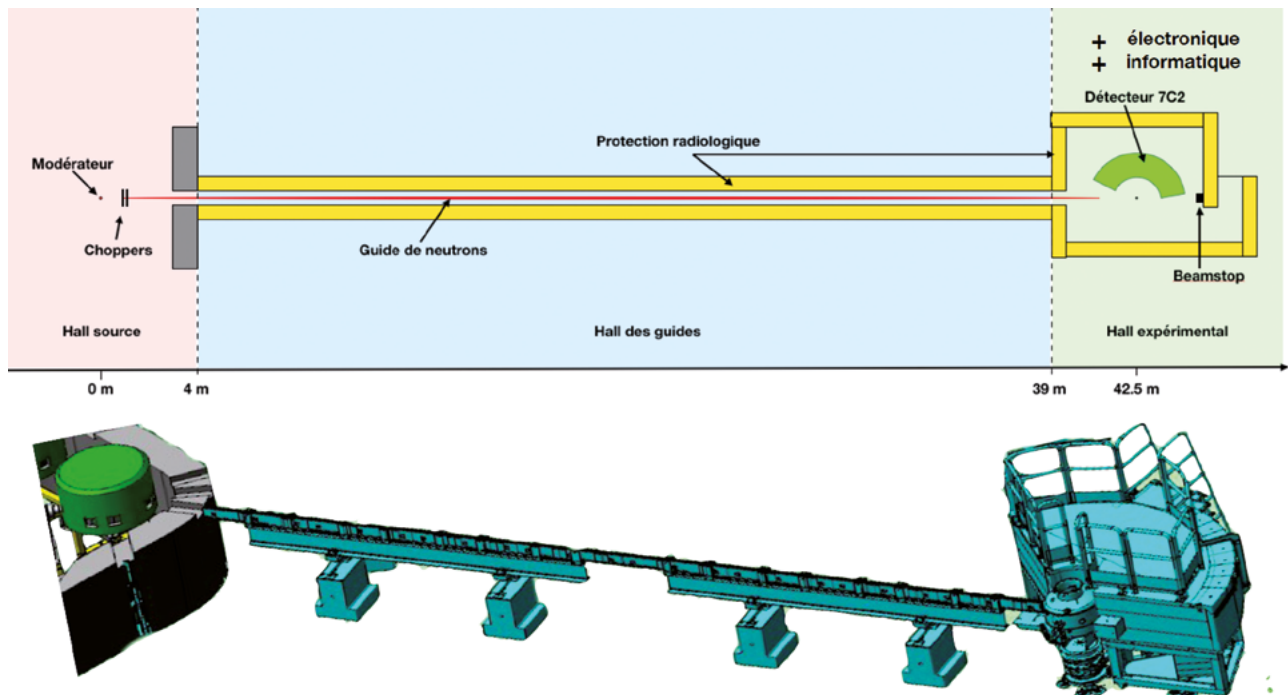


Figure 83 : Proposition de design d'un instrument de diffraction à haut flux.

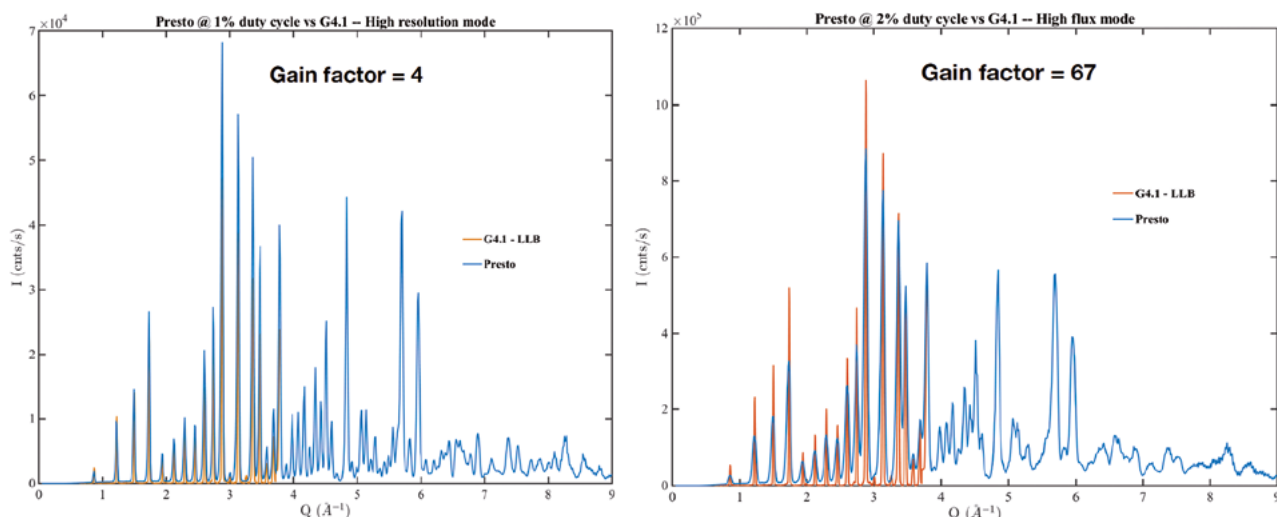


Figure 84 : Comparaison entre une mesure réalisée sur une poudre de $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$ sur G41@LLB et PRESTO en mode haute résolution et en mode haut flux. En mode haute résolution, les performances des 2 instruments sont proches avec un gain d'un facteur 4 en termes de flux pour PRESTO. En mode haut flux, PRESTO est beaucoup plus performant que G41, d'un facteur de l'ordre de 60. Dans les 2 cas, PRESTO couvre une gamme en Q deux fois plus large que G41.

Le gain en performance entre les instruments G41 et PRESTO vient de l'augmentation de la surface de détection ($\times 15$), de l'efficacité de détection ($\times 2,7$) et du flux incident ($\times 1,5$). Au-delà du simple gain en flux, PRESTO permet de couvrir une région deux fois plus étendue de l'espace réciproque. De plus, il dispose d'une résolution variable, ce qui permet de travailler soit en mode haute résolution, soit en mode haut flux. À priori, l'instrument pourra être utilisé pour des études sur poudre ou sur monocristaux, de même que l'instrument MAGIC@ESS.

7.2.3 Diffractomètre de poudre à haute résolution

Un instrument de diffraction de poudre à haute résolution permet d'étudier des structures ayant des volumes de cellules élémentaires de l'ordre de 1000 \AA^3 . La conception d'un tel instrument est très proche de celle de PRESTO, à la différence près que le gain en résolution sera obtenu par une réduction du flux.

Diffractomètre de poudre à haute résolution	
Gamme de longueurs d'onde Résolution	$0,8 < \lambda < 3 \text{ \AA}$ (modérateur bispectral) $1 \% < \delta \lambda / \lambda < 10 \%$.
Taille des échantillons Types d'échantillons	1 mm^2 - 1 cm^2 Poudres
Divergence angulaire	$0,2^\circ \times 0,2^\circ$ - $1^\circ \times 1^\circ$.
Périodicité cristallographique Distances interréticulaires	Jusqu'à 30 \AA $0,45 \text{ \AA} < d < 50 \text{ \AA}$
Temps de mesure	Inférieur à 12 heures
Environnements échantillons Température Pression Autre	30 mK-450 K & 20°C - 1700°C 0-1 GPa Atmosphère contrôlée, cellule électrochimique...

Tableau 13 : Caractéristiques souhaitables pour un instrument de diffraction à haute résolution.

Afin d'atteindre de très hautes résolutions sans sacrifier le flux, il est possible de considérer des solutions de modulation temporelles de type Fourier ou chopper statistique. De telles solutions techniques sont peu implémentées à travers le monde mais permettent d'atteindre de très hautes résolutions sur des sources à impulsions longues. On citera en particulier l'exemple de HRFD à Dubna, qui utilise une modulation de type Fourier pour atteindre de très hautes résolutions tout en ayant une base de vol courte (18 m).

7.3 Diffusion aux petits angles et réflectométrie

7.3.1 Réflectométrie

L'objectif des techniques de réflectométrie est de déterminer la structure d'interfaces ou d'empilements de couches très minces à des échelles de tailles allant de 2 à 20 nm. Les techniques de réflectométrie neutronique sont adaptées à l'étude de couches minces de polymères, de membranes biologiques ou bien de couches minces magnétiques. La dynamique de mesure du signal réfléchi s'étale sur 6 à 7 ordres de grandeur, nécessitant un niveau de bruit de fond très bas. Elle utilise un faisceau collimaté de neutrons froids. La finesse des systèmes que l'on souhaite habituellement étudier ne nécessite pas une résolution instrumentale élevée, et des résolutions $\delta Q/Q$ de l'ordre de 3 à 10 % sont en général utilisées pour la majorité des expériences. Pour cette raison, ces techniques sont particulièrement adaptées aux mesures en temps de vol car elles permettent une très bonne exploitation du spectre maxwellien des neutrons incidents et des impulsions longues. Les réflectomètres en temps de vol actuellement en opération sont par exemple D17 et FIGARO à l'ILL, CRISP, INTER et SURF à ISIS, REMUR et REFLEX à Dubna, LIQREF et MAGREF à SNS, PLATYPUS à l'ANSTO.

Dans le contexte d'une source sur laquelle on souhaite privilégier des expériences in situ ou couplant plusieurs techniques expérimentales tout en maximisant le flux, nous proposons de construire un instrument le plus court possible. Un instrument court permet de maximiser la gamme en longueurs d'onde et donc de réaliser des expériences couvrant une très grande gamme de vecteurs de diffusion sans changer de configuration expérimentale. Ce dernier point est particulièrement important si on souhaite par exemple étudier une cinétique de réaction, l'évolution d'un système *operando* ou utiliser une technique de caractérisation en parallèle. Une configuration instrumentale fixe nous semble le choix le plus avisé. Nous proposons donc une configuration avec un instrument de 12 m permettant d'exploiter des longueurs d'onde allant jusqu'à 16 Å, couplé à un système de double disque chopper permettant d'ajuster la résolution de manière continue.

Diffractomètre de poudre à haute résolution	
Gamme de longueurs d'onde	$1 < \lambda < 20 \text{ \AA}$ (modérateur bispectral)
Résolution	$1 \% < \delta \lambda / \lambda < 10 \%$.
Taille des échantillons	20 à 50 cm ² (vus par la tranche)
Types d'échantillons	Films minces sur substrats
Divergence angulaire	0,03° à 0,1° × 3°.
Périodicité cristallographique	Jusqu'à 20 nm (multicouches)
Temps de mesure	Max. 3 heures par mesure de réflectivité (pour $R_{\min} = 10^{-6}$)
Environnements échantillons	
Température	-50°C–100°C
Autre	Atmosphère contrôlée, cellule air-liquide et solide-liquide

Tableau 14 : Caractéristiques souhaitables pour un réflectomètre

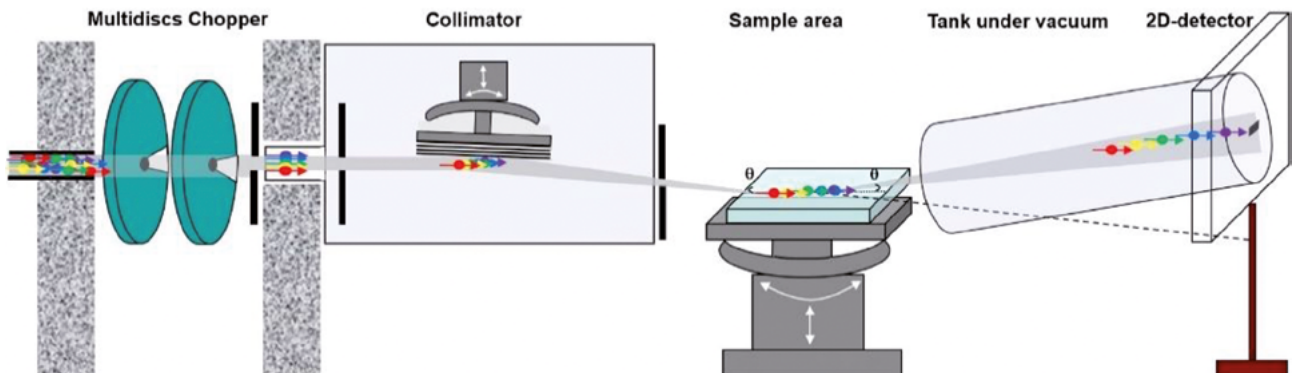


Figure 85 : Principe de fonctionnement d'un appareil de réflectivité. Un faisceau collimaté est envoyé sur une surface avec un angle rasant. Le signal réfléchi est mesuré.

7.3.2 Diffusion aux petits angles (SANS)

La diffusion de neutrons aux petits angles est une technique de base en diffusion neutronique car elle permet d'élucider une multitude de problèmes dans des domaines extrêmement variés en sondant la matière à l'échelle nanométrique (structures et fonctions de corrélations allant typiquement de 2 à 100 nm). Techniquement, l'implémentation instrumentale est simple. Le signal est mesuré sur une dynamique pouvant aller de 5 à 6 ordres de grandeur. Pour ces besoins, une résolution $\delta Q/Q$ de l'ordre de 10 % est généralement suffisante. Cette technique est usuellement implémentée sur des faisceaux de neutrons froids qui permettent d'installer l'appareil au bout d'un guide de neutrons, réduisant ainsi le bruit de fond. L'utilisation de neutrons froids permet par ailleurs d'augmenter la résolution. La longueur de l'instrument va de 10 à 30 mètres (pour les plus imposants). Ces besoins sont similaires à ceux de la réflectométrie. Une configuration proche de celle considérée pour la réflectométrie est donc a priori adaptée.

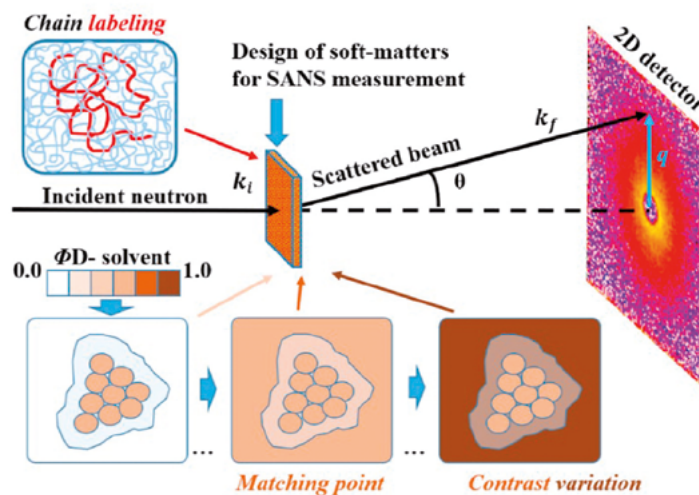


Figure 86 : Principe de fonctionnement d'un appareil de SANS. Les structures à grande échelle ou les inclusions de tailles nanométriques des échantillons génèrent un signal de diffusion dans une direction proche du faisceau incident. [149]

Parmi les instruments de type SANS fonctionnant en mode impulsionnel, on peut citer les instruments D33 à l'ILL, LOQ, SANS2D et ZOOM à ISIS, YuMO à Dubna, EQ-SANS à SNS.

¹⁴⁹ Dong Liu et al., Nuclear Analysis, 2022 (1), 100011.

Diffusion de neutrons aux petits angles	
Gamme de longueurs d'onde Résolution	$1 < \lambda < 16 \text{ \AA}$ (modérateur froid faible divergence, $f = 20 \text{ Hz}$, $w = 2 \text{ ms}$) $10 \% < \delta \lambda / \lambda < 20 \%$.
Taille des échantillons	1-4 cm ²
Divergence angulaire	
Transfert de moment Distance Source – Échantillon Distance Échantillon-Détecteur	$3 \times 10^{-3} \text{ \AA}^{-1} < Q < 1 \text{ \AA}^{-1}$ 8 m 1 à 8 m
Temps de mesure	10 min à 1 heure
Environnements échantillons Température Autre	2-500 K Passeur d'échantillons (×50), atmosphère contrôlée

Tableau 15 : Caractéristiques souhaitables pour un appareil de diffusion de neutrons aux petits angles.

Une telle configuration est proche des instruments PAXY ou PAXE qui étaient installés au LLB. Des simulations Monte-Carlo utilisant McStas et la configuration décrite ci-dessus donnent des flux au niveau de l'échantillon de l'ordre de $10^7 \text{ n/cm}^2/\text{s}$.

Configuration	L_g (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	L_{tot} (m)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	Flux ($\text{n/cm}^2/\text{s}$)
Petits Q	1	7	7	15	20	16	$0,7 \cdot 10^6$
MoyensQ	4	4	4	12	20	16	$2,2 \cdot 10^6$
Grands Q	6	2	1	9	20	16	$6,7 \cdot 10^6$
PAXE@LLB	6	2,5	2,5	11	12	8	$0,7 \cdot 10^6$ (petits Q)

Tableau 16 : Différentes configurations d'un instrument de diffusion aux petits angles sur la source ICONÉ. (L_g , L_1 , L_2 , L_{tot} , D_1 , D_2 correspondent respectivement à la longueur du guide entre la source et l'instrument, la longueur du collimateur, la distance échantillon-détecteur, la distance de vol totale, la collimation d'entrée et de sortie). Le flux est mesuré au niveau de la position de l'échantillon. Trois configurations typiques sont considérées : « Low Q », « Medium Q », « High Q ». La quatrième ligne donne la valeur du flux au niveau de l'échantillon sur l'instrument PAXE, qui était installé sur le réacteur Orphée. Un instrument sur ICONÉ aurait des performances équivalentes à celle de l'appareil PAXE.

7.4 Spectroscopie

Parmi les techniques de spectroscopie qui étudient la dynamique de la matière, les techniques neutroniques permettent d'obtenir des informations inaccessibles par d'autres techniques instrumentales (voir Figure 33). La très grande gamme en énergie (1 neV à 1 eV) n'est cependant accessible qu'en combinant les informations obtenues sur différents types d'instruments : spectromètre à chopper, spectromètre 3-axes, spectromètre de type backscattering et spectromètre à écho de spin.

Spectroscopie en temps de vol

Les spectromètres en temps de vol à chopper sont naturellement adaptés aux mesures de diffusion inélastique. Dans la diffusion des neutrons par temps de vol, on fixe l'énergie des neutrons incidents à l'aide d'un disque rotatif. Après diffusion, on mesure la direction et l'énergie des neutrons par mesure de temps de vol. Cela permet de calculer l'impulsion et l'énergie transférées à l'échantillon. Des spectromètres à géométrie inverse sont également possibles. Dans ce cas, la direction et la vitesse des neutrons après diffusion sont fixées et on détermine les transferts d'énergie par mesure du temps de vol des neutrons incidents. La meilleure résolution en énergie est de l'ordre de quelques dizaines de μeV .

Les spectromètres à temps de vol sur des sources impulsionnelles sont par exemple MAPS, MARI, HET, MERLIN et LET à ISIS, ARCS, CNCS et SEQUOIA à SNS, iBIX, SuperHRPD, PLANET, SENJU, TAKUMI, iMATERIA et NOVA au J-PARC et SKAT-EPSILON, DIN-2PI, NERA au réacteur impulsionnel IBR-2.

Spectroscopie 3-axes

Les spectromètres de type 3-axes (Triple-axis Spectroscopy, TAS) sont les spectromètres historiques de la diffusion neutronique. Ils permettent de mesurer la fonction de diffusion en tout point de l'espace d'énergie et d'impulsion physiquement accessible par le spectromètre. L'instrument utilise un cristal monochromateur pour définir l'énergie du neutron incident et un cristal analyseur pour mesurer l'énergie du neutron diffusé. À l'inverse des temps de vol, les appareils de type TAS n'ont actuellement pas d'équivalent sur les sources impulsionnelles, alors que ce sont des instruments très efficaces pour l'étude de certains problèmes. L'appareil BIFROST est actuellement en construction à ESS pour développer la technologie permettant de reproduire les performances des appareils « 3-axes » sur une source impulsionnelle en utilisant 54 cristaux analyseurs pour mesurer l'énergie des neutrons diffusés.

Rétrodiffusion

On peut utiliser la rétrodiffusion sur les cristaux du monochromateur et de l'analyseur pour obtenir une résolution en énergie de l'ordre du μeV . Les expériences de rétrodiffusion permettent d'étudier les mouvements atomiques ou moléculaires à l'échelle temporelle de la nanoseconde. Parmi les instruments de rétrodiffusion installés sur des sources impulsionnelles, on peut citer l'instrument BASIS à SNS, et les instruments IRIS et OSIRIS à ISIS.

Spectroscopie à écho de spin

La spectrométrie par écho de spin (Neutron Spin Echo, NSE) utilise la précession du spin neutronique d'une manière similaire à celle utilisée en résonance magnétique nucléaire. Cette technique possède une résolution en énergie extrêmement élevée (environ une partie sur 100 000) permettant de mesurer des excitations de l'ordre du neV. Elle mesure la corrélation densité-densité (ou fonction de diffusion intermédiaire) $F(Q,t)$ en fonction du transfert d'impulsion Q et du temps t . En raison de son excellente résolution en énergie, la NSE est une méthode idéale pour observer des processus de diffusion dans des matériaux tels que des mélanges de polymères, des chaînes d'alcane ou des microémulsions.

Les spectromètres à écho de spin installés sur des sources impulsives sont les instruments NSE à SNS, et VIN ROSE à J-PARC.

Deep inelastic neutron scattering (DINS)

Enfin, la technique de Deep Inelastic Neutron Scattering, DINS, utilise des neutrons épithermiques généralement dans la gamme d'énergie 1 eV–200 keV (vecteur d'onde $20 \text{ \AA}^{-1} < Q < 300 \text{ \AA}^{-1}$). Elle est donc particulièrement adaptée aux sources basées sur des accélérateurs [150] où un spectre épithermique existe naturellement.

¹⁵⁰ Andreani, C. et al., *Advances in Physics* **54** (2005), 377-469

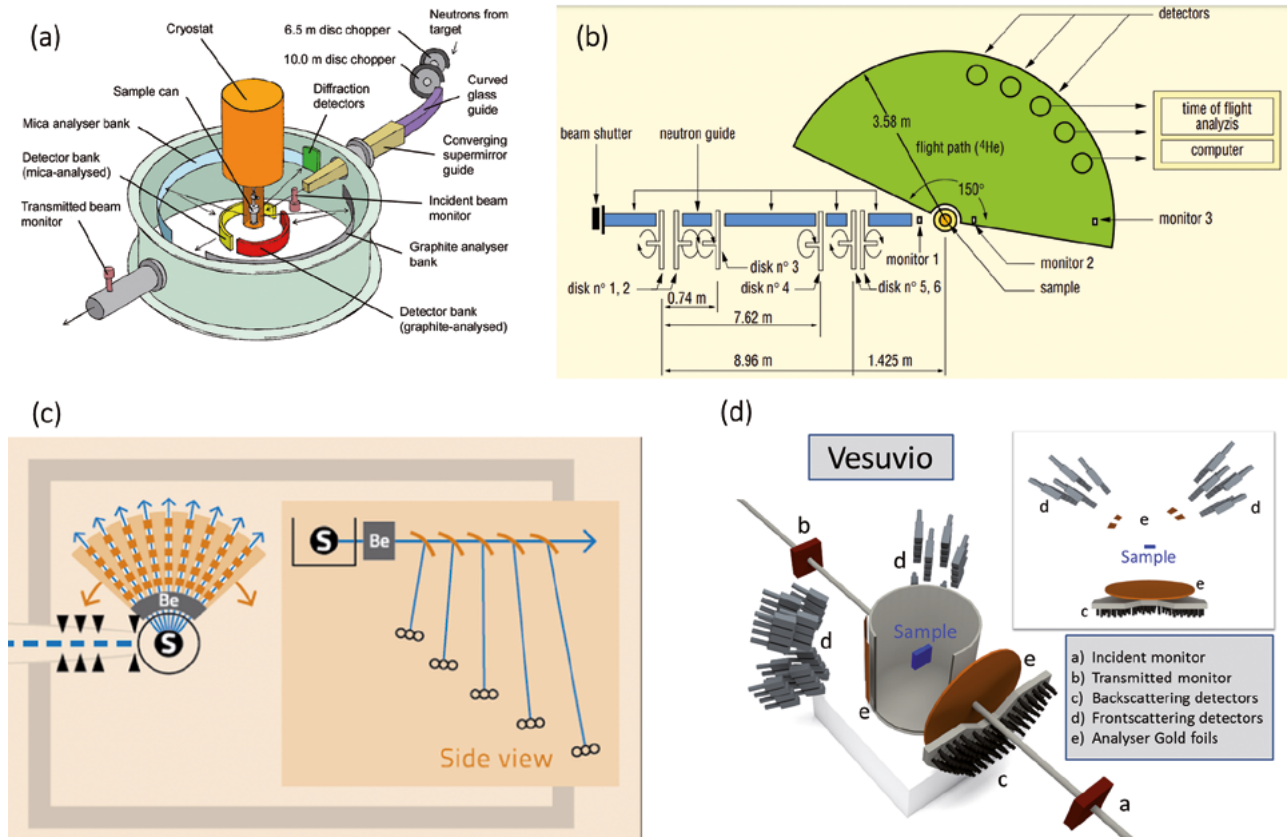


Figure 87 : Différentes techniques de spectroscopie neutronique. (a) Appareil en temps de vol à géométrie inverse (IRIS à ISIS). L'énergie des neutrons est analysée à l'aide de cristaux de graphite ou de mica. (b) MIBEMOL : l'énergie des neutrons est mesurée par une mesure directe du temps de vol des neutrons. (c) La géométrie de l'instrument BIFROST permet de reproduire le fonctionnement d'un appareil de type 3-axes sur une source impulsionnelle. (d) L'appareil VESUVIO à ISIS réalise des études dans des gammes élevées d'énergies (> 1 eV) et de moments $20 \text{ \AA}^{-1} < Q < 150 \text{ \AA}^{-1}$.

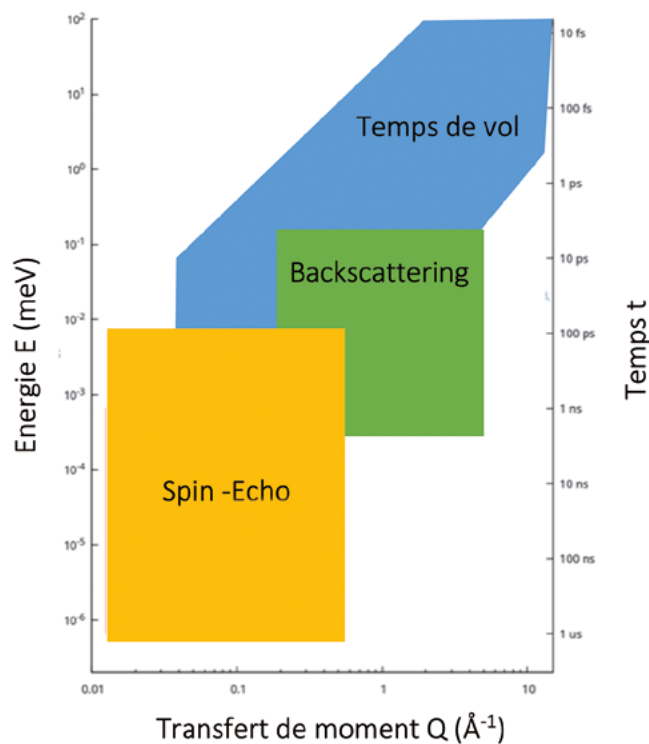


Figure 88 : Les différentes techniques de spectroscopie permettent de couvrir une gamme en énergie allant du nano électron-volt à l'électron-volt, c'est-à-dire une gamme d'énergies s'étalant sur 9 ordres de grandeur. [inspiré d'une figure de M. Appel [151]]

¹⁵¹ Neutron spectroscopy dynamic ranges at the ILL

Exemple d'un instrument utilisant l'écho de spin

Les techniques d'écho de spin peuvent utiliser des impulsions de neutrons longues et une grande largeur de bande. Elles peuvent aussi bénéficier de la très grande divergence accessible grâce à une optique neutronique à très courte distance de la source. Cela permet de maximiser le flux sur l'échantillon. De manière plus prospective, les instruments à écho de spin pourraient utiliser les développements de modérateurs dédiés ou de réflecteurs de neutrons lents basés sur des nano-diamants fluorés pour augmenter la production de neutrons de très grandes longueurs d'onde [152].

Une nouvelle option pour augmenter l'efficacité des techniques de spin-écho serait d'implémenter le concept de détecteur multicanal du projet Multi-MUSES. Il permet d'augmenter l'efficacité de l'instrument à écho de spin MUSES d'un facteur 70, surpassant les instruments à écho de spin existants.

Le fonctionnement d'un instrument à écho de spin résonnant sur une source impulsionnelle a récemment été démontré sur l'instrument MUSES du LLB-Orphée [153].

MUSES @ ICONE	MUSES @ Orphée	Multi-MUSES @ ICONE
2×10^6 n/cm ²	2×10^7 n/cm ² (à 5 Å)	14×10^7 n/cm ² (à 5 Å)

¹⁵²M. Jamalipour, L. Zanini, P.K. Willendrup, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1033 (2022) 166719.

¹⁵³S. Klimko, F. Legendre, S. Longeville, J. Neutron Research **23** (2021) 251-265.

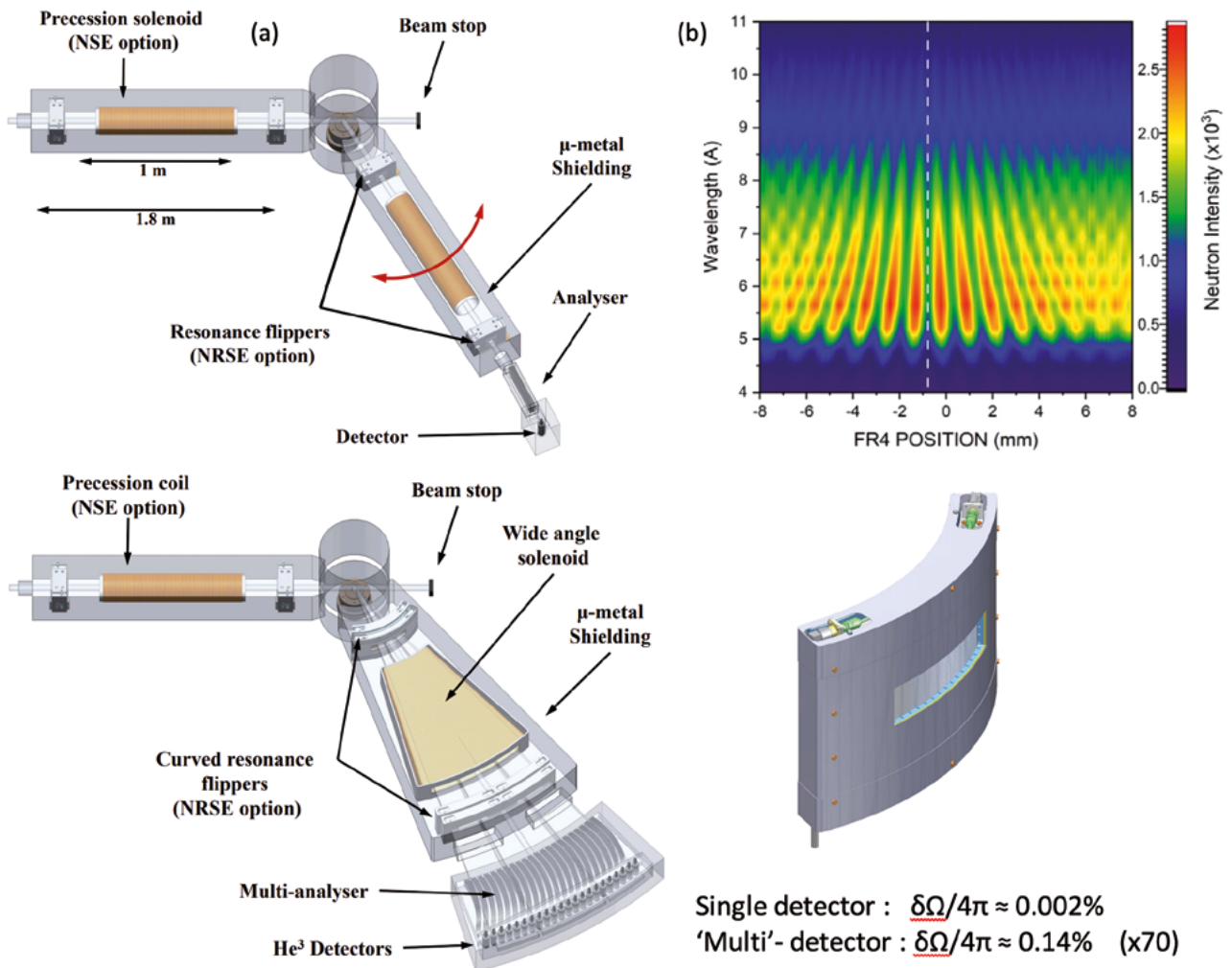


Figure 89 : (a) Le spectromètre à écho de spin MUSES sur le réacteur Orphée. (b) Mesure d'écho de spin en mode NRSE (Neutron Resonant Spin Echo).

Les performances de différents types de spectromètres de diffusion inélastique ont été estimées dans le cadre du projet de source HBS du JCNS [154].

	Rétrodiffusion	TdV froid	TdV thermique
$E_{i,f}$ (meV)	1,84	5	45
FWHM E_i/E_i (%)	1	2	5
FWHM $\Theta_h \times \Theta_v$ ($^\circ \times ^\circ$)	4 x 4	2 x 2	0,5 x 0,5
FWHM \dagger (μs)	120	50	18
Rep. rate (Hz)	200	100	400
Flux ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$2,5 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
Instrument de référence	OSIRIS	LET	MERLIN
Flux de référence ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$2,7 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$

Tableau 17 : Les paramètres et les performances potentielles de différents types de spectromètres de diffusion inélastique installés sur la source de type HiCANS HBS proposée par le JCNS du Forschung Zentrum Jülich. Une comparaison est faite avec des instruments équivalents sur la source à spallation ISIS.

¹⁵⁴ J. Voigt, S. Böhm, J.P. Dabrucek, U. Rücker, T. Gutberlet, T. Brückel, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **884** (2018) 59–63.

7.5 Imagerie - tomographie

La radiographie neutronique est une technique qui a historiquement été utilisée à des fins de contrôle qualité pour l'étude de matériaux combustibles nucléaires, de pièces et d'assemblages métallurgiques pour le nucléaire ou pour le contrôle d'éléments pyrotechniques. À partir des années 1990, la possibilité d'utiliser des moyens d'acquisition numériques à la place de films argentiques a ouvert de nouvelles possibilités pour des mesures académiques dans une multitude de domaines scientifiques. Actuellement, l'ensemble des sources de neutrons ouvertes à des utilisateurs extérieurs proposent une ou plusieurs stations de radiographie ou de tomographie neutronique.

La radiographie est par son principe de base une méthode intégrative dont les performances sont proportionnelles au flux neutronique. Pour les mesures standard, il n'est pas possible de bénéficier de la structure temporelle impulsionnelle du faisceau neutronique. Les performances des techniques de radiographie sont donc à priori implémentées de manière plus performante sur une source continue que sur une source impulsionnelle puisque le flux total intégré de la première sera nécessairement plus important que celui de la seconde. Les techniques de radiographie peuvent être déclinées dans une large gamme de variantes dont l'implémentation est plus ou moins complexe. Des neutrons froids, thermiques ou rapides peuvent être utilisés en fonction des problèmes à étudier.

On notera cependant que, dans la plupart des études, le flux neutronique n'est pas le paramètre limitant. Un cliché de radiographie nécessitant en général moins d'une minute, la limitation dans le débit expérimental est définie soit par le temps de mise en place des échantillons, soit par les cinétiques du phénomène physique étudié (souvent *operando*).

Un dernier point que l'on peut mentionner est que l'utilisation d'un faisceau de neutron impulsionnel pour des mesures de radiographie permet d'ajouter une information sur l'énergie des neutrons à la condition de disposer d'un détecteur permettant des mesures de haute résolution à la fois spatiales ($< 100 \mu\text{m}$) et temporelles ($< 200 \mu\text{s}$). Dans ces conditions, il est possible d'obtenir des informations résolues spatialement sur la structure cristallographique du matériau, sa texture ou son état de contrainte via des mesures de « Bragg edge imaging », dans lesquelles on réalise des clichés radiographiques en fonction de l'énergie des neutrons. La technique est évidemment exigeante en flux neutronique puisqu'il est nécessaire, pour obtenir un seul cliché, de réaliser des mesures pour plusieurs dizaines de longueurs d'ondes distinctes avec une bonne résolution au lieu d'utiliser le flux neutronique intégré. La technique a été démontrée dans plusieurs cas scientifiques mais reste peu utilisée en raison de la nécessité d'une instrumentation complexe et de temps de mesures très longs. Son implémentation à ESS sur l'instrument ODIN, qui bénéficiera d'un flux très élevé, devrait permettre un accès plus large de la technique aux utilisateurs.

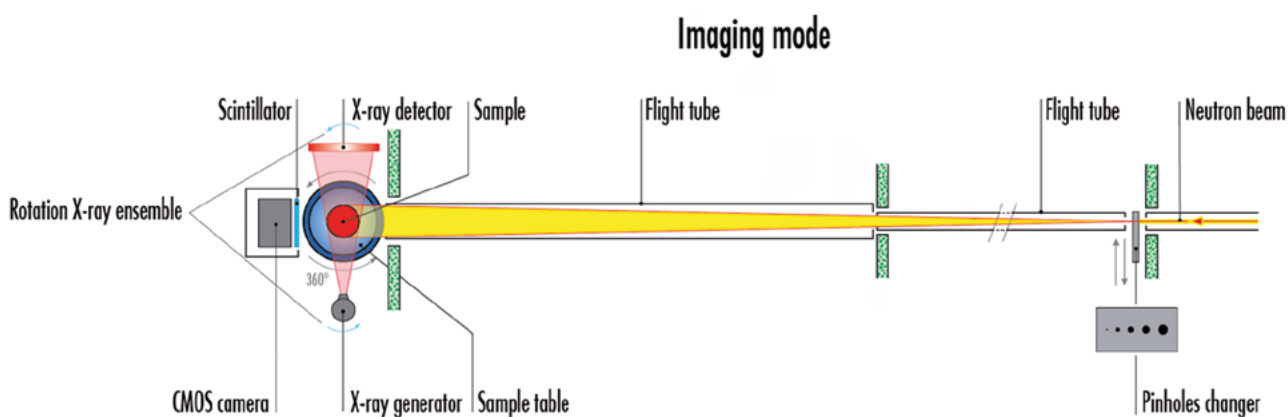


Figure 90 : Schéma de l'instrument NEXT à l'ILL. Un faisceau de faible divergence angulaire illumine un échantillon. La transmission de l'échantillon est mesurée en fonction de la position angulaire de l'échantillon. Cela permet de réaliser des reconstructions tomographiques (en 3D) de la structure interne de l'échantillon. Dans le cas particulier de l'instrument NEXT, une source de rayons X permet de réaliser en parallèle des tomographies neutroniques et de rayons X.

7.5.1 Radio-tomographie à neutrons froids

Pour les usages académiques, une station de radiographie sera idéalement implémentée sur une source froide, permettant d'augmenter le contraste et l'efficacité de détection. Afin de réduire le bruit de fond lors des acquisitions, l'instrument sera équipé d'un guide de neutrons pour l'éloigner de la source de neutrons. L'utilisation d'une source impulsionnelle devrait permettre de réduire à la fois le bruit de fond gamma sur le système s'il est possible de stopper l'acquisition durant l'impulsion de neutrons rapides et la production de rayonnement gamma par la cible. Les performances de cette option sont cependant difficiles à quantifier mais cela permettrait de construire un instrument relativement court tout en conservant de très bonnes performances.

Les techniques de Bragg edge imaging nécessitent des longueurs d'onde de l'ordre de 4 Å, correspondant au Bragg edge typique des métaux de transition 3d. Elles sont plus efficacement implémentées sur une source de neutrons froids. Cependant, afin de disposer d'une résolution en temps de vol suffisante, il est nécessaire de construire un instrument long, typiquement de 40 à 50 m, qui devient donc coûteux.

Technique	Flux sur l'échantillon	Spectromètres de référence
Imagerie (faisceau blanc)	1.5. 10 ⁶ n/cm ² /s (pour L/D = 240) 1.5. 10 ⁶ n/cm ² /s (pour L/D = 80)	ICON@PSI 1. 10 ⁷ n/cm ² /s CONRAD@PSI 1. 10 ⁷ n/cm ² /s (pour L/D = 240)
Imagerie (résolue en énergie)	10 ⁵ n/cm ² /s (pour L/D = 500) dI/I = 1 %	ANTARES#FRM2 5. 10 ⁵ n/cm ² /s (1 % résolution)

L'amélioration des performances des instruments de radiographie repose actuellement principalement sur l'implémentation de nouveaux systèmes de détection, grâce notamment aux progrès très rapides des caméras numériques : la surface des capteurs augmente, ce qui diminue considérablement le bruit de fond. Ces gains sont cependant linéaires et intrinsèquement limités par le flux incident par pixel d'échantillon. L'illumination d'une surface d'échantillon de 10 × 10 μm² est actuellement de l'ordre de 1000 neutrons/minute. Une autre voie, très prometteuse, est de construire l'équivalent d'un « vrai » microscope neutronique. Le passage d'une imagerie de type « pin-hole », moyenâgeuse dans son principe, à une optique utilisant des lentilles pourrait en effet permettre de gagner un facteur 100 dans l'utilisation des neutrons. La difficulté actuelle est le passage d'optiques « planes » à 1 dimension, très bien maîtrisées, à des optiques sphériques en 2 dimensions dont la fabrication n'est pas encore au point. Un projet de construction de telles optiques est cependant en cours au NIST.

7.5.2 Radio-tomographie à neutrons thermiques

Historiquement, la radiographie neutronique était réalisée sur des canaux thermiques sans guides de neutrons. L'implémentation instrumentale était alors extrêmement simple puisque l'instrument consistait simplement en un « pin-hole » illuminant un échantillon à une distance de quelques mètres (typ. 2 à 4 m) de la source. Les performances d'un tel instrument en termes de signal sur bruit sont cependant habituellement faibles en raison d'un fort bruit de fond gamma.

L'utilisation de neutrons thermiques ne se justifie que dans les cas où l'on souhaite mesurer des échantillons métallurgiques relativement massifs pour lesquels il est nécessaire d'avoir une transmission suffisamment importante des neutrons. Ce type d'études est marginal. Comme mentionné plus haut, les techniques de Bragg edge imaging nécessitent des longueurs d'ondes de l'ordre de 4 Å, c'est-à-dire dans la gamme des neutrons froids.

7.6 Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA)

La PGAA est une méthode d'analyse exhaustive de la composition des échantillons basée sur le fait que tous les éléments, sauf l'hélium, émettent des rayonnements gamma rapides après irradiation par neutrons (voir Figure 90). La PGAA est particulièrement utile pour la détection précise d'éléments légers pour lesquels peu de techniques analytiques non destructives sont disponibles. Avec une limite de détection au niveau de la partie par million (ppm), la PGAA est une technique très précieuse pour déterminer par exemple la teneur en hydrogène ou de polluants dans tout type d'échantillons. À noter aussi la forte sensibilité de la PGAA à certains éléments tels que B, Cd, Hg et les terres rares qui peuvent être détectées jusqu'au niveau de la partie par milliard (ppb).

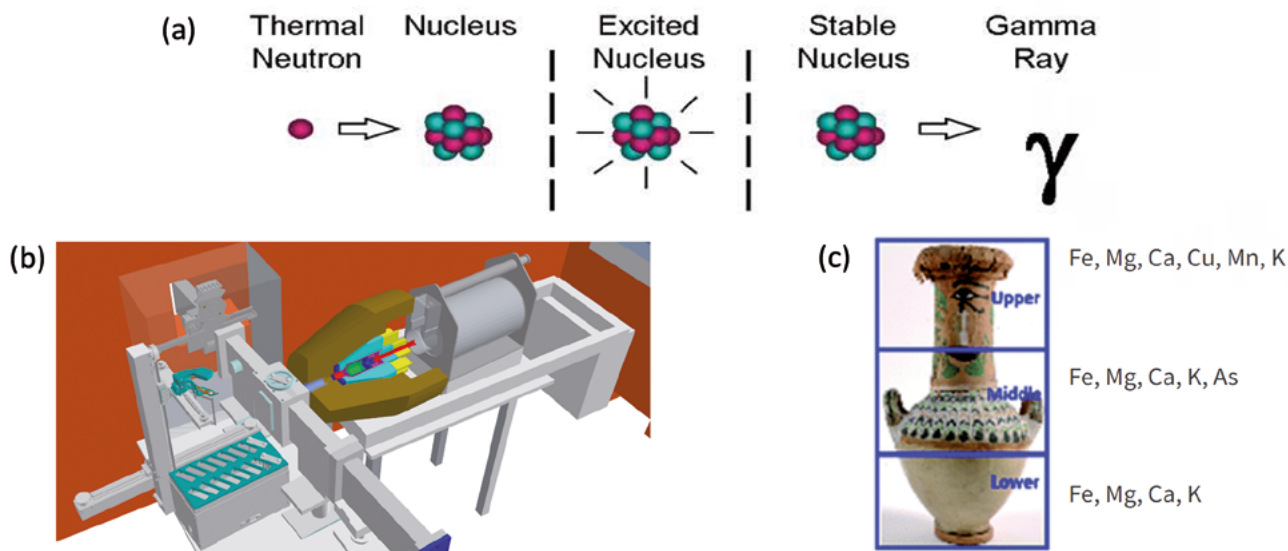


Figure 91 : (a) Principe de la PGAA. Un neutron crée un nouveau noyau dans un état excité. Lors de la désexcitation, un rayonnement gamma spécifique est émis. (b) Schéma du spectromètre de PGAA au Budapest Neutron Center. (c) Compositions élémentaires de 3 parties d'un vase égyptien mesurées par PGAA sur l'appareil IMAT à ISIS [155].

7.7 Nouvelles possibilités liées à l'utilisation de neutrons très froids

Différents instituts travaillent actuellement sur la production de neutrons très froids (Very Cold Neutrons, VCN) dont le pic d'émission est décalé d'une dizaine d'Angströms. Différentes solutions expérimentales sont à l'étude et en cours de construction.

Si l'utilisation de neutrons très froids n'est pas adaptée à toutes les techniques neutroniques, en particulier les expériences de diffraction, elle pourrait cependant accroître les performances de certaines autres techniques neutroniques. Le tableau ci-dessous résume les gains envisageables pour différentes techniques de diffusion neutronique.

	Résolution à géométrie fixée	Intensité à résolution fixée
Diffusion aux petits angles	λ^{-1}	λ^0
Réflexométrie	λ^{-1}	λ^2
TdV - Inélastique	λ^{-3}	λ^2
Spin-Echo	λ^{-3}	$\lambda^2-\lambda^4$

Tableau 18 : Gains attendus pour différentes techniques de diffusion neutronique en fonction de la longueur d'onde utilisée [156].

¹⁵⁵C. Andreani et al, J. Anal. At. Spectrom., **32** (2017) 1342-1347

¹⁵⁶ Workshop on applications of a very cold neutron source, Argonne, 2005

L'implémentation d'une source de neutrons très froids dans l'espace du modérateur inférieur à ESS (actuellement vide) est à l'étude. Une charge thermique de plusieurs centaines de watts, due à l'échauffement du modérateur par le rayonnement gamma de la source, est cependant attendue à la position de ce modérateur très froid, ce qui en rend la construction pour le moins complexe sur le plan de l'ingénierie.

À l'inverse, l'échauffement radiatif lié au rayonnement est estimé sur une source compacte à seulement quelques watts sur les composants cryogéniques et à 5 mW/cm^3 sur le matériau du modérateur en raison de la faible énergie des protons incident ($\sim 30 \text{ MeV}$ au lieu de 2 GeV) et donc de la plus faible énergie des particules secondaires produites par la source, les rayonnements gamma en particulier. La construction technique du dispositif en est donc considérablement simplifiée.

L'utilisation de neutrons très froids permettrait à priori des gains très importants sur les techniques d'écho de spin (NSE, Neutron Spin-Echo). Ces techniques sont relativement peu répandues en raison de leur difficulté d'implémentation technique. Leur potentiel étant toutefois immense, de très nombreuses propositions de nouvelles techniques expérimentales ont été faites pour augmenter les performances des instruments basés sur la diffusion de neutrons aux petits angles ou la réflectométrie (par ex. SESANS, LARMOR, SERGIS, SEMSANS, MIEZE).

7.8 Projections des performances des différents instruments sur ICONÉ

En raison du large éventail de techniques de diffusion des neutrons, il est difficile de répondre aux besoins de chaque instrument avec une seule source. Sur une HiCANS, ce problème peut être contourné en construisant plusieurs stations cibles offrant des structures temporelles d'impulsions différentes ([impulsions longues - faible taux de répétition] et [impulsions courtes - taux de répétition élevé] par exemple) à différents types d'instruments suivant leurs besoins. Un autre raffinement possible consiste à équiper chaque instrument d'un modérateur optimisé dédié. En supposant cette polyvalence, les simulations Monte-Carlo (MCNP – GEANT4 – McStas) montrent que le flux à la position de l'échantillon sur une HiCANS à haute brillance devrait être comparable au flux sur un réacteur de moyenne puissance (comme Orphée) ou une source de spallation de moyenne puissance (comme ISIS).

Les performances d'une large gamme d'instruments ont été estimées en calculant le flux de neutrons à la position de l'échantillon pour le design d'une source HiCANS ayant les caractéristiques suivantes :

→ **Design de référence ICONÉ : $E_p = 25 \text{ MeV}$, $I_{\text{peak}} = 80 \text{ mA}$, duty cycle = 4 %, P = 80 kW.**

Les performances de ces instruments supposent qu'ils bénéficient d'un spectre de modérateur optimisé et d'une structure temporelle optimisée, ce qui nécessite à minima 2 structures temporelles différentes et donc 2 cibles différentes. Cela permet d'ajuster de manière très efficace l'espace des phases de la source avec l'espace des phases des instruments de diffusion et donc d'utiliser la plupart des neutrons produits. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Technique	Flux sur l'échantillon	Spectromètres de référence	Potential gains
Réflectivité	$0,8 \times 10^7$ n/s/cm ²	HERMES@LLB 1×10^7 n/s/cm ² POLREF@ISIS $\sim 1 \times 10^7$ n/s/cm ²	Concept "SELENE" (voir ESTIA@ESS, gain $\times 10$) Advanced Deconvolution $\times 3$
Diffusion aux Petits Angles	$0,7 \times 10^6$ n/s/cm ² (low Q) $2,2 \times 10^6$ n/s/cm ² (med Q) $6,7 \times 10^6$ n/s/cm ² (high Q)	PAXY@LLB (low Q) $0,7 \times 10^6$ n/s/cm ² SANS2D@ISIS 1×10^6 n/s/cm ²	Optique focalisante pour les très petits angles (gain $\times 10$)
Diffraction de poudre	2×10^6 n/s/cm ²	G41@LLB 2×10^6 n/s/cm ²	Détecteur grand angle solide (7C2 type) (gain $\times 20$)
Imagerie (faisceau blanc)	$1,5 \times 10^6$ n/s/cm ² (for L/D = 240) $1,3 \times 10^7$ n/s/cm ² (for L/D = 80)	ICON@PSI 1×10^7 n/s/cm ² (for L/D = 240) CONRAD@HZB 1×10^7 n/s/cm ²	détecteurs MCP (détection $\times 5$)
Imagerie (résolue en temps)	1×10^5 n/s/cm ² (for L/D = 500 and dl/l = 1 %)	ANTARES@FRM2 5×10^5 n/s/cm ²	
TdV direct	2×10^4 n/s/cm ² (thermal) * 3×10^4 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 $6,8 \times 10^5$ n/cm ² /s	
Rétrodiffusion	6×10^6 n/cm ² /s *	OSIRIS@ISIS $2,7 \times 10^7$ n/cm ² /s	
3-Axes	Quelques %	2T@LLB 4F@LLB	MUSHROOM (LETx20 sur mono cristaux)
Spin-Echo	1×10^7 n/s/cm ²	MUSES@LLB 2×10^7 n/s/cm ² (at 5 Å)	Multi-MUSES ($\times 70$) Neutrons très froids

Tableau 19 : Flux sur l'échantillon pour différentes techniques expérimentales. Pour les spectroscopies en temps de vol (Direct ToF et Backscattering), les valeurs citées correspondent aux valeurs estimées dans [157] pour HBS, normalisées par un facteur 1/4 correspondant à la différence de performances entre HBS et ICONE.

La Figure 92 compare le cas particulier des performances d'instruments existants autour du réacteur Orphée et d'instruments équivalents sur la source ICONE. On constate que, pour les techniques de diffusion pouvant bénéficier des structures de faisceaux impulsions (SANS, réflectivité, diffraction), les performances des instruments seraient équivalentes, permettant de mener un programme scientifique de haut niveau. Pour les techniques ne pouvant bénéficier de la structure impulsionnelle du faisceau (radiographie en faisceau blanc ou écho de spin), les performances seraient réduites. Cependant, ces comparaisons sont basées sur le flux à la position de l'échantillon et le niveau actuel de la technologie. Dans le cas de la radiographie, la technologie des détecteurs progresse rapidement avec par exemple le développement des plaques à micro-canaux, qui donnent des efficacités de détection 5 fois supérieures aux technologies des scintillateurs. Cela permettrait d'améliorer les performances des mesures radiographiques sur ICONE au niveau actuel des performances autour d'Orphée. Dans le cas du écho de spin résonnant, le LLB a développé la technologie nécessaire pour construire un instrument grand angle (Multi-MUSES) qui augmenterait d'un facteur 70 les performances de l'instrument existant. Dans le cas de la diffraction des poudres, le flux à la position de l'échantillon n'est pas non plus le seul facteur de mérite. La conception du diffractomètre à poudre PRESTO sur ICONE permettrait d'atteindre des performances 10 à 30 fois supérieures simplement en augmentant la surface du détecteur par rapport aux instruments actuels.

¹⁵⁷ J. Voigt, S. Böhm, J.P. Dabrock, U. Rücker, T. Gutberlet, T. Brückel, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **884** (2018) 59–63.

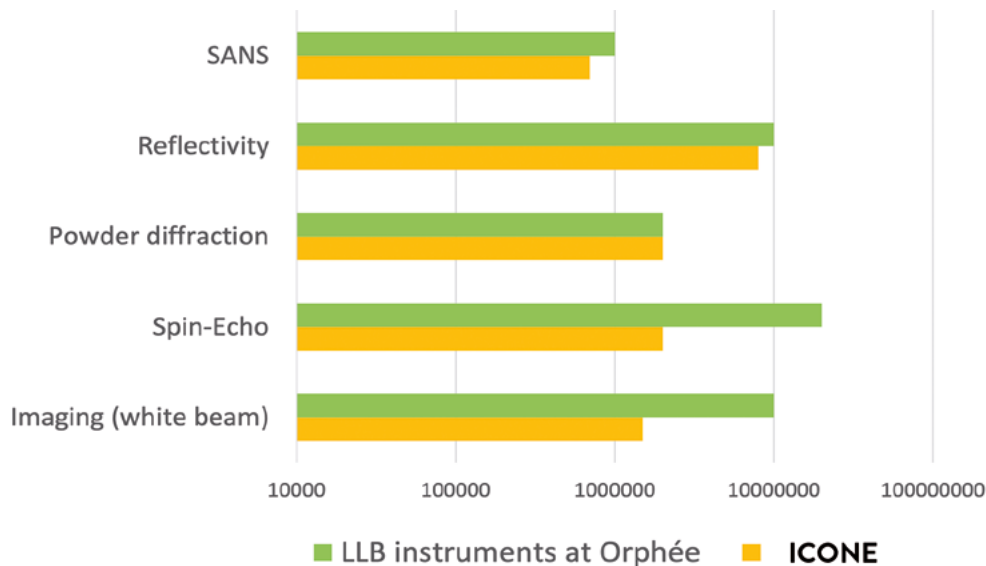


Figure 92 : Comparaison des performances entre différents instruments de diffusion neutroniques en termes de flux à la position de l'échantillon (en $n/cm^2/s$) pour les anciens instruments du LLB autour d'Orphée (vert) et pour des instruments équivalents sur ICONE (jaune).

7.9 Proposition de suite instrumentale pour ICONE

Nous proposons que la source ICONE se focalise sur un nombre d'instruments réduit mais les plus productifs possibles. Les instruments considérés dans le Tableau 20 reflètent la répartition des demandes actuelles des utilisateurs français.

En faisant l'hypothèse que les performances des instruments sont équivalentes aux performances des instruments sur une source de moyenne puissance telle que Orphée ou ISIS-TS2 au Royaume-Uni, il est possible de projeter la durée typique des expériences sur ces différents instruments.

Cette proposition est une proposition initiale qui peut évoluer en fonction de la priorité des besoins, des évolutions thématiques ou des financements disponibles. La possibilité de conserver une ou deux sorties de faisceau pour des projets ciblés nécessiterait de faire des choix. Par ailleurs, le coût de certains instruments est significativement plus élevé que d'autres, ce qui pourrait faire pencher les choix vers des techniques proposant un meilleur retour sur investissement.

Parmi les instruments incontournables, on peut citer les instruments de diffusion aux petits angles et les instruments de diffraction. Il semble cependant que les techniques utilisant les neutrons chauds sont actuellement moins utilisées que par le passé. Les techniques de radiographie sont peu coûteuses à mettre en œuvre et couvrent des thématiques très larges. À l'inverse, certains instruments de spectroscopie sont très onéreux et leurs performances ne seront pas nécessairement suffisantes pour répondre à certaines problématiques spécifiques. Ces expériences seront plus efficacement réalisées sur des sources plus puissantes telles que ESS.

Enfin, signalons qu'il n'y a plus d'accès à la PGAA en France. Si une source française permettait un accès simple et rapide à cette précieuse technique, une communauté d'utilisateurs pourrait être reconstituée et l'expertise à cette technique de nouveau développée et transmise.

Instrument	Durée typique d'un Run	Nr. Run / an
SANS 1 (matière molle)	2,5 jours	64
SANS 2 (matière dure)	5 jours	32
Poudre 1	5 jours	32
Poudre 2	2,5 jours	64
Poudre 3	5 jours	32
Réflectométrie	5 jours	32
Radiographie	5 jours	32
Spectroscopie en TdV directe	5 jours	32
Spectroscopie en TdV inverse	15 jours	10
Backscattering	10 jours	16
Spin-Echo	15 jours	10
TOTAL		356

Tableau 20 : Proposition d'une suite instrumentale sur ICONe et nombre d'expériences pouvant être réalisées 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 expériences peut varier beaucoup. Plus de 300 expériences pourraient être réalisées chaque année.

8

Infrastructure, opération et sécurité

En raison de l'utilisation d'un accélérateur de particules, ICONÉ sera une installation de recherche soumise au Code de la santé publique. L'énergie des particules étant inférieure à 300 MeV, l'installation ne sera pas une installation nucléaire de base (INB).

L'installation ne produira pas de déchets radiologiques à durée de vie longue ni d'éléments transuraniens.

8.1 Opération de l'installation

La Figure 93 présente un organigramme possible de l'installation ainsi que le personnel affecté à chaque tâche. Il a été évalué que 72 équivalents temps plein (ETP) seront nécessaires pour faire tourner l'installation, dont 70 % d'ingénieurs et de chercheurs et 30 % de techniciens.

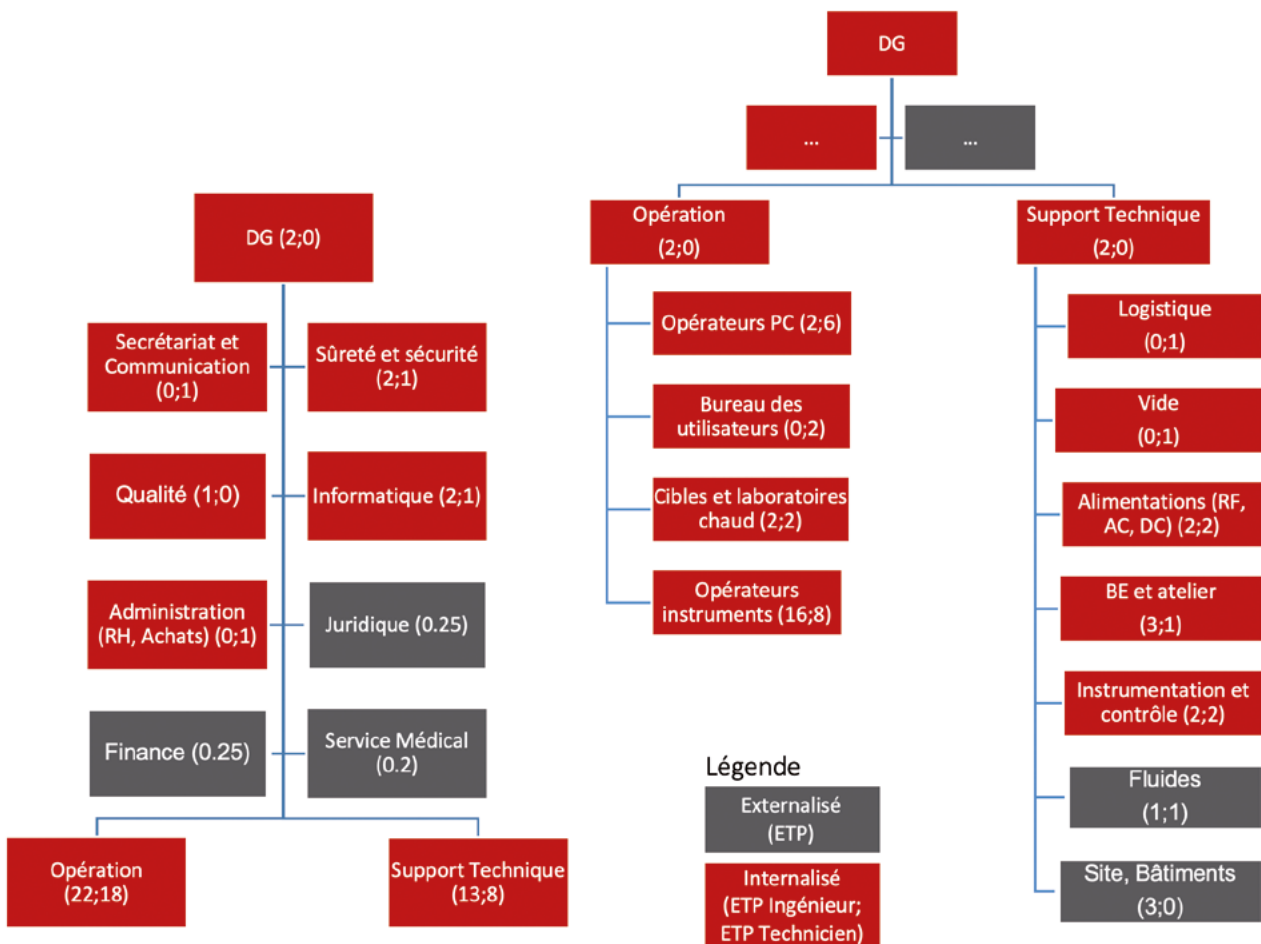


Figure 93 : Organigramme possible de l'installation

8.2 Sécurité radiologique

Plusieurs types de rayonnement sont produits pendant le fonctionnement d'une HiCANS, à commencer par un rayonnement gamma, induit par l'interaction des protons et des neutrons avec la cible ainsi que par l'interaction des neutrons avec le modérateur, le réflecteur, le blindage et d'autres matériaux structurels. Des neutrons et des rayonnements gamma sont également produits lorsque des protons s'échappent du faisceau et frappent la chambre à vide. Les générateurs de radio-fréquence (de type klystrons) produisent quant à eux un faible rayonnement X.

La conception et la construction d'une HiCANS devront donc être réalisées en tenant compte des exigences réglementaires afin de garantir un haut niveau de sûreté radiologique lors de l'exploitation, de la maintenance et de la manipulation des matières radioactives. Un concept général de sûreté radiologique devra être fourni. Les détails et la réalisation des procédures de sécurité, y compris la gestion des risques, devront être discutés avec les autorités de délivrance des licences nationales ou locales.

Les objectifs de la radioprotection d'une HiCANS seront de s'assurer qu'au cours de l'exploitation normale, de la maintenance et de la manipulation des composants radioactifs, la dose de rayonnement pour le personnel, les usagers et la population est maintenue en deçà des valeurs limites définies par les autorités. Ces objectifs sont généralement atteints en installant les dispositifs de sécurité qui comprennent un blindage approprié et des interdictions d'accès physique aux zones où le rayonnement est trop important. Un certain nombre d'agents de radioprotection qualifiés est nécessaire pour s'assurer du bon fonctionnement de la sécurité radiologique de l'installation.

Afin de maintenir l'exposition aux rayonnements aussi faible que possible, une protection contre les rayonnements sera construite dans différentes parties de l'installation, comme le long de toute la ligne de faisceau de protons, autour des cibles de neutrons, des guides de neutrons et des instruments. Si nécessaire, des systèmes de surveillance de la radioactivité des particules en suspension dans l'air seront installés. Les procédures de sécurité, y compris les verrouillages de sécurité du faisceau, les diagnostics de faisceau en temps réel et le contrôle du vide garantiront que la puissance moyenne du faisceau à une station cible ne dépasse pas la valeur de fonctionnement.

Tous les systèmes de sécurité radiologique seront surveillés pendant le fonctionnement de la source et leurs fonctionnalités périodiquement inspectées selon un plan de maintenance.

8.3 Gestion des déchets

Les radionucléides sont principalement produits par activation protonique et neutronique de la cible et par activation neutronique des composants du monolithe cible tels que le modérateur, le réflecteur, le blindage biologique et d'autres matériaux de structure. Ils sont également générés dans les composants de l'accélérateur et le blindage associé, par le faisceau de protons lui-même et les particules secondaires induites. Les matières radioactives produites seront considérées comme des déchets radioactifs (voir leur classification Figure 94) et devront suivre les filières classiques de déchets très faible activité (TFA) ou faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). Aucun déchet de haute activité (HA) ni à vie longue ne sera produit. L'installation ne produira pas non plus de déchets contenant des éléments transuraniens.






CATÉGORIE	Déchets dits à vie très courte	Déchets dits à vie courte	Déchets dits à vie longue
Très faible activité (TFA)	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	
Faible activité (FA)		 Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	 Stockage à faible profondeur à l'étude
Moyenne activité (MA)			 Stockage géologique profond à l'étude (projet Cigéo)
Haute activité (HA)	Non applicable		

Figure 94 : Classification des types de déchets radioactifs.

8.4 Classement de l'installation dans le cadre de la réglementation française

En France, les installations de recherche peuvent être classées en différentes catégories soumises à différentes réglementations :

- ICPE, installations classées protection de l'environnement ;
- CSP, Code de la santé publique ;
- INB, installations nucléaires de base.

La classification INB (installations nucléaires de base) recouvre uniquement les réacteurs nucléaires, les installations traitant des combustibles nucléaires et les accélérateurs de particules dont l'énergie des ions est supérieure à 300 MeV [158].

Depuis 2018, les accélérateurs de particules sont soumis au Code de la santé publique [159]. La réglementation définit les contraintes concernant la fabrication ou la production de sources de rayonnement ionisants. Les éléments de l'accélérateur ne sont pas soumis à ces contraintes. Les déchets, définis au sens des pièces qui n'ont pas d'utilisations ultérieures, ne sont pas non plus soumis à ces contraintes.

On notera que suivant la nomenclature Annexe 4/2797 du CSP, les installations de type « accélérateurs de particules » ont l'autorisation de gérer des quantités de déchets supérieures à 10 m³.

Certaines activités, telles que l'opération de tours aéroréfrigérantes ou l'entreposage de déchets, sont soumises à la réglementation ICPE.

¹⁵⁸ Décret n°2007-830 du 11 mai 2007 relatif à la nomenclature des installations nucléaires de base. Article 3.

¹⁵⁹ Décret n° 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire.

9

Investissements, coûts, calendrier, mise en service et démantèlement

9.1 Coûts d'investissement

Les principaux coûts d'investissement concernent :

- l'accélérateur de protons ;
- le monolithe cible-modérateur-rélecteur (CMR) ;
- la suite instrumentale ;
- le bâtiment et les infrastructures de support.

9.1.1 L'accélérateur de protons

L'accélérateur de protons est l'un des éléments clés d'une source de neutrons de type HiCANS. Il existe plusieurs technologies d'accélérateurs de protons disponibles dans le commerce qui peuvent fournir des faisceaux de protons continus : soit des cyclotrons, soit des accélérateurs tandem électrostatiques. Ces accélérateurs présentent l'inconvénient de fonctionner en mode continu et avec un courant de crête assez faible et ne sont donc pas adaptés aux instruments de diffusion neutronique en temps de vol. Sur la base de l'accélérateur ESS, il est possible d'extrapoler les coûts d'un accélérateur de faisceaux de protons pulsés à courant de crête élevé avec une énergie de faisceau de 25 MeV. Le coût évolue plus ou moins linéairement avec l'énergie du proton. Cependant, le coût n'évolue pas linéairement avec le courant de l'accélérateur. Un accélérateur à haute puissance (à courant crête élevé) est techniquement plus difficile à construire qu'un accélérateur à faible courant. Le coût d'un accélérateur fort courant de 25 MeV est estimé à 40 M€ (bâtiment non inclus).

9.1.2 L'ensemble cible-modérateur-rélecteur (CMR)

Le cœur de l'installation est l'ensemble cible-modérateur-rélecteur tel qu'illustré ci-dessous (Figure 96). La cible est entourée d'un modérateur thermique (ex. polyéthylène, PE), qui ralentit les neutrons rapides, diminuant leur énergie de l'ordre de quelques MeV à 10–500 meV. Un rélecteur en plomb, graphite ou béryllium augmente le flux de neutrons thermiques à l'intérieur du modérateur en raison de la rétrodiffusion. Cet ensemble est entouré d'un blindage biologique constitué de PE généralement boraté et de plomb.

En fonction de la puissance totale de la cible et du blindage requis, le coût d'une unité cible-modérateur-rélecteur peut varier entre quelques centaines de k€ sur une CANS jusqu'à 5 M€ sur une HiCANS.

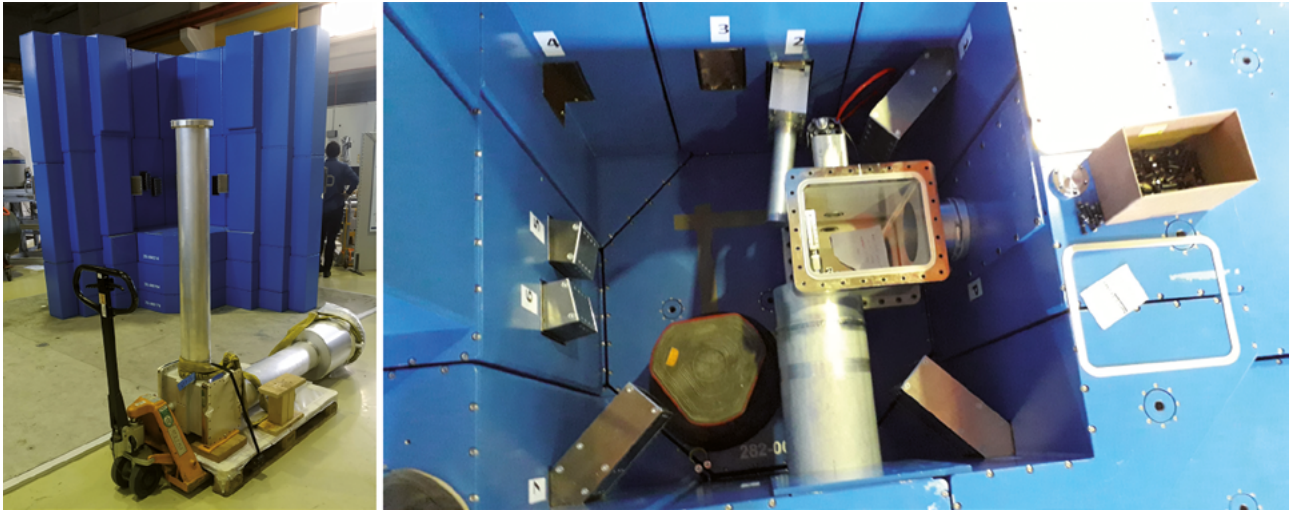


Figure 95 : Exemple du monolithe cible-modérateur-réflecteur de l'installation de test BIG-KARL@COSY. (gauche) A l'avant-plan, la pièce contenant la cible, le tube du faisceau de protons et le tube d'accès à la cible. A l'arrière-plan (en bleu), la moitié du système de blindage. (droite) Intérieur du blindage vu de dessus. On peut voir la boîte qui contiendra la cible et une série de ports métalliques qui traversent l'épaisseur du blindage pour extraire les neutrons.

9.1.3 Suite instrumentale

Les instruments sur une source de type HiCANS auront des designs similaires aux instruments d'ISIS ou ESS. En termes de coûts, un avantage est que le blindage requis sera moins important même si ces aspects nécessitent des calculs approfondis.

Un avantage des HiCANS est que la source sera adaptée aux besoins des instruments. Par conséquent, les besoins en choppers pour la mise en forme du faisceau ou la réduction du bruit de fond seront réduits. Par ailleurs, la longueur des instruments pourra également être plus courte si la source est adaptée à la résolution de l'instrument. Cela conduira à une réduction des coûts en optique neutronique, blindage et bâtiments.

Malheureusement, l'efficacité d'un certain nombre d'instruments dépendra toujours de la surface des détecteurs et de la couverture en angle solide de détection (sauf pour le SANS, la réflectivité et la radiographie). Peu de progrès ont été réalisés dans la réduction du coût des détecteurs de neutrons au cours des 20 dernières années. Cependant, une fois que la technologie des détecteurs au bore développée pour ESS aura été industrialisée, les coûts des détecteurs de neutrons pourraient éventuellement être réduits, mais probablement pas de manière importante en raison de la complexité intrinsèque de ces détecteurs.

En règle générale, le coût d'un instrument de diffusion de neutrons sur un CANS devrait être inférieur à celui sur d'autres sources de neutrons impulsives, mais seulement d'un facteur de 30 à 50 % au mieux. Des économies supplémentaires pourraient être réalisées en focalisant les objectifs scientifiques des instruments sur HiCANS, ce qui permettrait d'avoir des performances améliorées avec en parallèle un coût réduit, la contrepartie étant que les instruments seraient moins versatiles (résolution moins flexible, pas de polarisation, etc.).

Le coût d'un instrument peut aller de 0,5 M€ à 7 M€ selon sa complexité. Un instrument de radiographie sans capacité de résolution en temps de vol est très peu onéreux. À l'inverse, un instrument de spectroscopie en temps de vol à haute résolution est très coûteux en raison de son système de choppers et du système de détection.

9.1.4 Bâtiment

Les besoins en termes de bâtiment peuvent être divisés en 5 parties principales :

- accélérateur de protons ;
- plate-forme radiofréquence ;
- casemates cible-modérateur-blindage ;
- hall instrumental ;
- espace pour pompes, baies électroniques, salles de contrôle, tours de refroidissement, etc.

Les surfaces requises dépendent évidemment de la taille de la machine à construire, en particulier pour l'accélérateur. On peut toutefois considérer que ce dernier requiert une longueur de 1 à 2 mètres par MeV. Il a également besoin d'une casemate de protection radiologique. Un accélérateur de 20 MeV occupe donc typiquement une surface de l'ordre de 200 à 300 m². L'ensemble cible-modérateur-réfecteur-blindage (CMRB) (voir ci-dessus) occupe une surface de l'ordre de 10 - 15m². Cependant, afin de réduire encore le niveau de rayonnement, l'ensemble CMRB est installé dans une casemate en béton d'une surface au sol de l'ordre de 100 m². Il est très difficile d'estimer l'espace utilisé par les instruments car il peut varier d'un ordre de grandeur (voir l'exemple des instruments ESS). Une station de radiographie ou un réflectomètre sont des instruments plutôt courts qui peuvent n'avoir besoin que de 30 à 50 m², tandis que des instruments très longs tels que des diffractomètres à poudre à haute résolution peuvent nécessiter 100 à 150 m².

En règle générale, l'empreinte d'un groupe de 5 instruments autour d'une seule cible sera de l'ordre de 500 m² [160]. Des espaces supplémentaires pour les laboratoires, les ateliers et l'espace de travail doivent être ajoutés.

Des exigences particulières doivent être prises en compte en matière de protection contre les rayonnements et de sécurité dans les bâtiments, en particulier pour le logement du système d'accélérateur et du CMR. Pour la manipulation des composants activés pendant le fonctionnement, des locaux et des équipements spéciaux devront être prévus. Pour manipuler des composants de blindage ou d'autres pièces de poids plus élevé, des grues et des zones de stockage appropriées devront être prises en compte.

Deux études ont été mandatées pour étudier l'implantation d'une source de type HiCANS avec une suite de 10 instruments. Deux scénarios ont été considérés : l'installation dans un bâtiment existant et la construction d'un bâtiment neuf (voir Figures 97 et 98).

Les coûts des bâtiments dans les deux scénarios sont très proches, de l'ordre de 15 à 17 M€ pour une infrastructure couvrant une surface de 3000 m².

Ce coût ne couvre que la source de neutrons et les spectromètres de diffusion. Dans le cas d'une source de type « user facility » il est nécessaire d'ajouter des bureaux et différents laboratoires autour de l'installation. Le coût de ces équipements est estimé à 8 M€.

Cela porte l'investissement immobilier total à 25 M€.

Les détails des résultats des études sont présentés en Annexe.

¹⁶⁰ Le hall des guides du MLZ abrite 16 instruments sur une surface de 1200 m². Cela correspond à 75 m² par instrument en moyenne.

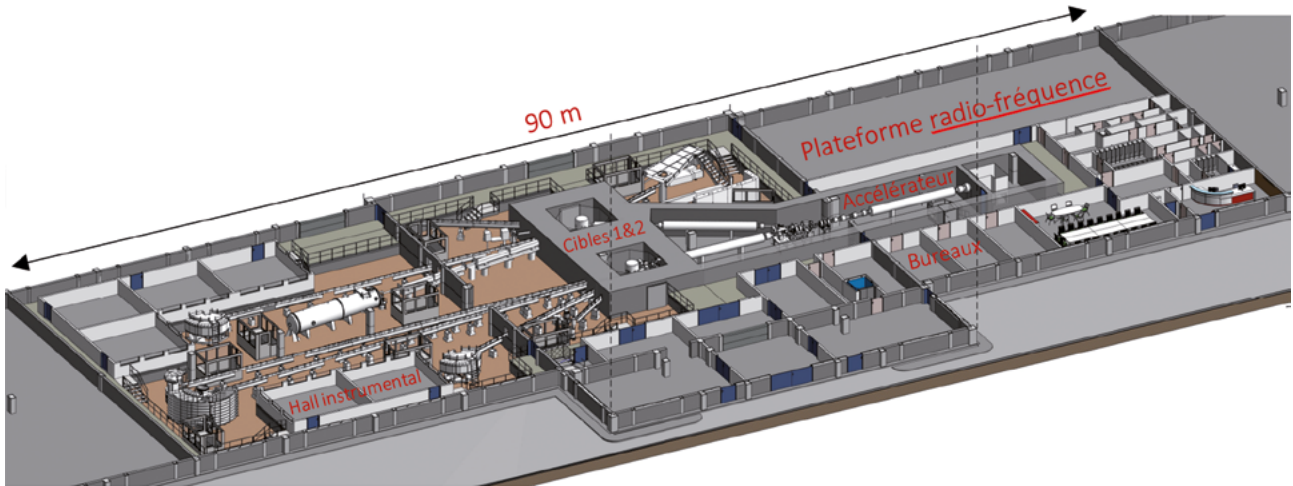


Figure 96 : Exemple d'intégration d'une source de type ICONE dans un bâtiment existant. Il est possible d'installer 10 appareils dans un espace restreint.

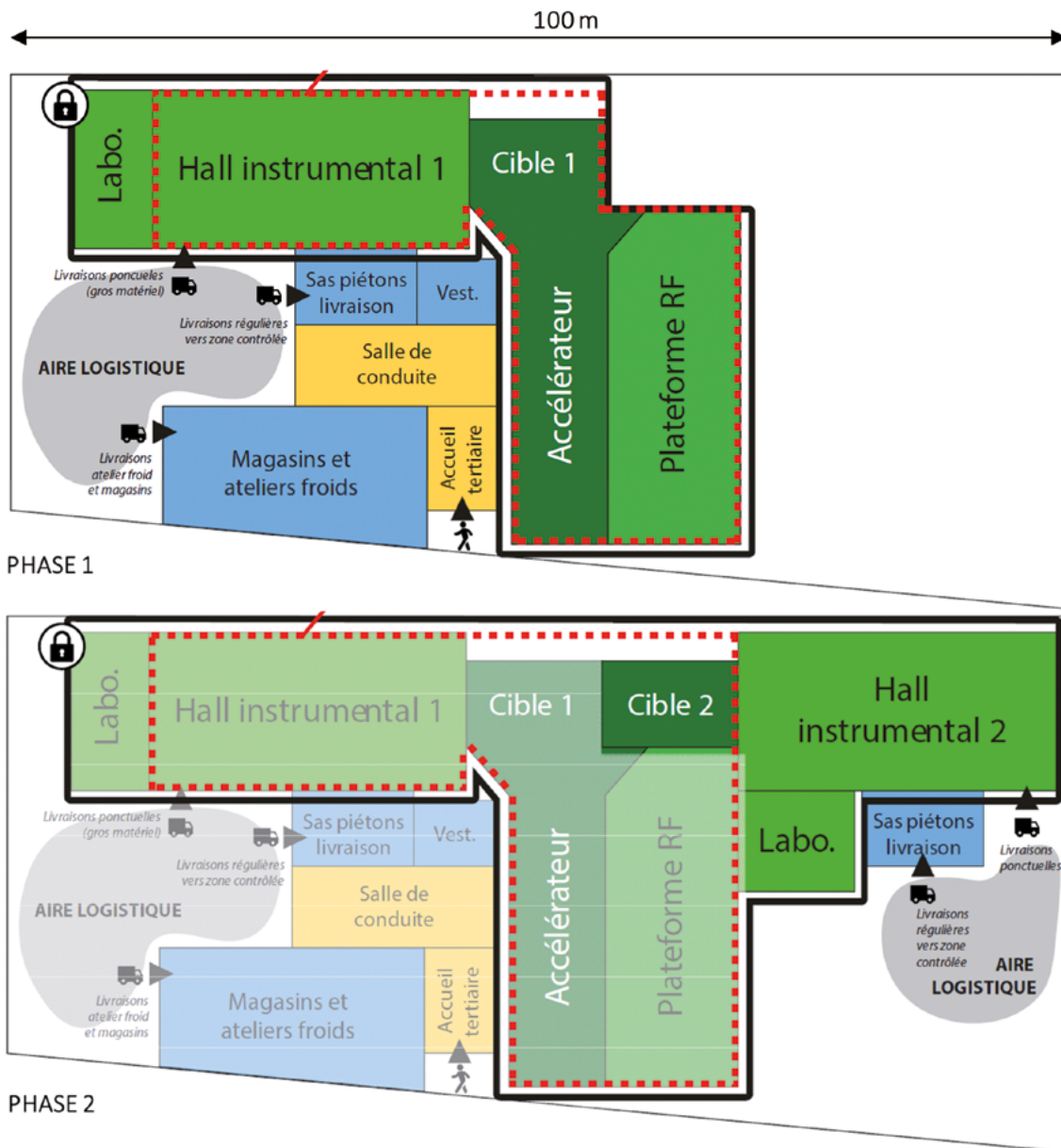


Figure 97 : Proposition d'organisation d'une installation dans un bâtiment neuf. La conception du bâtiment est prévue de façon à pouvoir être réalisée en 2 phases : une première phase avec 1 cible et 5 instruments suivie d'une deuxième phase consistant à construire un deuxième hall expérimental abritant une deuxième cible et 5 instruments supplémentaires.

9.2 Coûts d'opération

L'estimation des coûts de fonctionnement est difficile car le périmètre du coût peut être flou et il peut varier d'un pays à l'autre.

Comme outil d'estimation des coûts d'exploitation, nous basons notre calcul sur les chiffres des coûts d'exploitation des sources existantes [161]. À partir de ces chiffres, on peut estimer que les coûts de fonctionnement d'une installation sont de l'ordre de 4 % de l'investissement initial pour le fonctionnement de la source et de 0,2 % supplémentaires pour chaque instrument. Par exemple, pour une installation neutronique exploitant 20 instruments, cela conduit à des coûts d'exploitation typiques de l'ordre de 8 %, la moitié du coût étant dédiée à l'exploitation de la source et l'autre moitié du coût utilisée pour faire fonctionner les instruments. On peut considérer que sur une source de flux moyen fournissant des services aux utilisateurs, le support est composé de 2 scientifiques instrumentistes (« local contacts »), 1 technicien et 2 à 3 ETP pour le support général (radio-sécurité, administration, électronique, informatique, environnement échantillon...).

Les coûts d'amortissement n'étant pas pris en compte dans le coût d'exploitation des installations neutroniques, nous nous concentrons uniquement sur les coûts d'exploitation quel que soit l'investissement initial afin que les chiffres puissent être comparés aux chiffres existants [162]. Les coûts d'exploitation annuels peuvent être modélisés avec $C_{\text{année}} = I_0 \times (0,04 + N_i \times 0,002)$ où I_0 est l'investissement initial et N_i est le nombre d'instruments autour de l'installation.

La Figure 98 ci-dessous donne le coût d'une journée de mesures sur un instrument d'une installation en fonction de l'investissement initial et du nombre d'instruments autour de la source (en supposant un fonctionnement de 180 jours par an). Le coût de fonctionnement d'un instrument sur une source diminue à mesure que le nombre d'instruments autour de la source augmente. Lors de la construction d'une nouvelle source et de l'instrumentation associée, un équilibre doit être établi entre l'investissement initial (qui dépend aussi du nombre d'instruments) et le nombre d'instruments que l'institut souhaite faire fonctionner afin d'obtenir un coût raisonnable pour une journée de mesures sur un instrument.

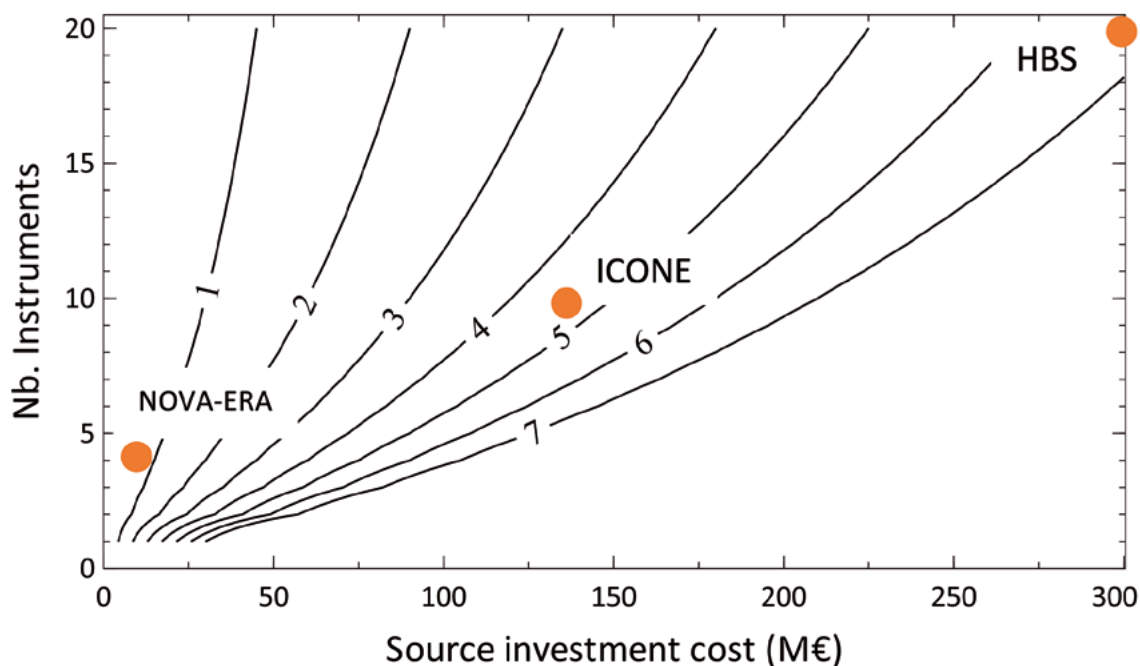


Figure 98 : Coût en k€ (isocontours) d'une journée de mesures sur un instrument (soit d'1 instrument-jour) en fonction de l'investissement initial et du nombre d'instruments autour de la source.

¹⁶¹ Report from the ILL Associates' Working group on *Neutrons in Europe for 2025*.

¹⁶² The initial investment usually represents roughly 1/3 of the total costs over the lifetime of most facilities.

9.3 Coûts de démantèlement

Les coûts de démantèlement doivent être inclus dans les coûts d'investissement des installations. Dans le cas d'ESS, alors que cette installation produira nettement plus de déchets que les installations de type HiCANS du fait de son fonctionnement à très hautes énergies de protons, les coûts de démantèlement ont été estimés à environ 10 % des coûts de construction (177 M€ pour un budget de construction de 1843 M€). Des valeurs similaires sont utilisées pour d'autres installations [163-164]. Une estimation plus précise pour une HiCANS est actuellement impossible à donner.

9.4 Estimation des coûts de construction de ICONE

Le tableau ci-dessous présente les coûts des équipements nécessaires à la construction d'une source HiCANS de type ICONE opérant 10 instruments.

Les coûts des équipements ont été évalués sur la base d'équipements similaires fabriqués pour d'autres installations (typ. ESS).

Le coût de construction d'un bâtiment pour accueillir la source a été évalué par le cabinet EGIS. Le coût du bâtiment est toutes dépenses confondues (TDC) et taxes incluses. L'estimation inclut une réserve pour aléas de 20 %.

Des inconnues demeurent sur les coûts de gestion et de mise en œuvre du projet, en particulier la mise en œuvre de l'accélérateur.

Le projet peut être décomposé en 3 phases :

- Phase 1 : Construction de ICONE-PILOTE proposant 3 à 4 instruments pour des utilisateurs experts ;
- Phase 2 : Construction de l'installation ICONE proprement dite utilisant une énergie plus élevée et proposant 10 instruments pour les utilisateurs ;
- Phase 3 : Basculement en mode installation pour utilisateurs à l'année 10. Ce basculement implique des investissements pour accueillir des bureaux et des laboratoires supplémentaires.

¹⁶³ IAEA Nuclear Energy Series, Decommissioning of Particle Accelerators, No. NW-T-2.9.

¹⁶⁴ Coûts de démantèlement dans d'autres installations : XFEL (7.4 %), ILL (8 %), RJH (11 %), ESS (10 %)

	ICONE - PILOTE						ICONE				TO-TAL
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7	n=8	n=9	n=10	
APD-TDR-R&D	2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
Bâtiment	0,0	0,0	5,0	5,0	0,8	0,0	3,0	3,2	0,0	8,0	25,0
Accélérateur	0,0	2,5	5,0	6,0	6,0	6,0	5,0	5,0	3,0	1,5	40,0
Cibles	0,0	0,0	2,0	3,0	1,0	0,0	2,0	3,0	1,0	0,0	12,0
Instruments	0,0	0,0	2,0	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0	34,0
Personnel	0,0	0,4	1,5	1,5	2,3	2,3	2,3	3,0	3,8	3,8	20,6
TOTAL	2,0	5,9	15,5	19,5	14,1	12,3	17,3	19,2	12,8	18,3	136,6
						69,2				67,5	

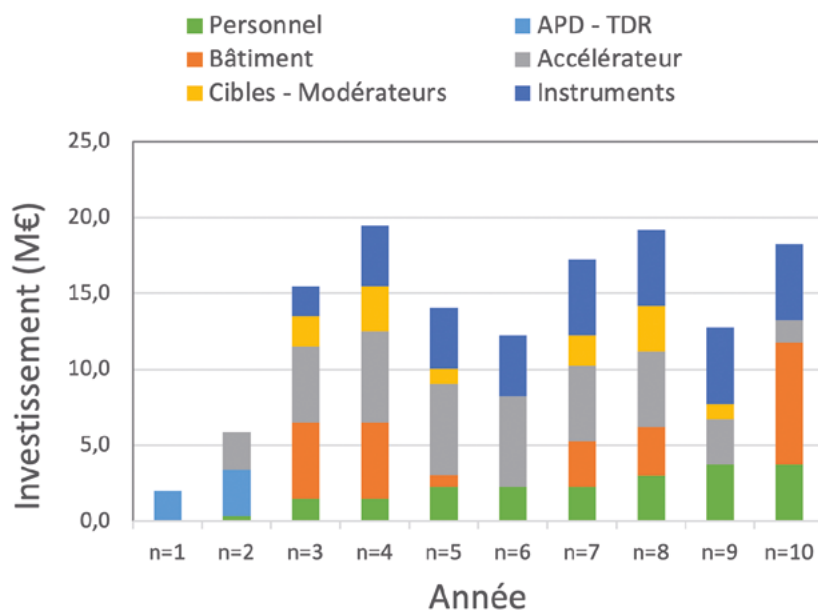


Figure 99 : Courbes d'investissement sur la durée de construction du projet.

Les coûts pour la réalisation de l'Avant-Projet Détaillé et d'un Technical Design Report (APD et TDR) ainsi que la poursuite des travaux de R&D seraient de l'ordre de 5 M€₂₀₂₂ sur les années 1 et 2.

Le coût de la construction de la première phase ICONE – PILOTE est d'environ 64 M€₂₀₂₂.

Le coût total de la construction de l'installation ICONE proposant une suite instrumentale de 10 appareils dans le cadre d'une « user facility » serait de l'ordre de 137 M€₂₀₂₂.

Ce coût doit être consolidé lors de la phase de réalisation de l'Avant-projet détaillée et dans l'état actuel, les aléas sont évalués à 30%.

Contributions extérieures au projet

Le laboratoire Léon Brillouin est actuellement le principal laboratoire français d'expertise en diffusion neutronique. Il serait impliqué dans le projet de construction de la source ICONÉ.

Sa contribution pourrait s'élever à une contribution en main-d'œuvre à hauteur de 15 ETP / an lors de la phase ICONÉ – PILOTE. Sur cette phase 1 (6 ans) cela correspondrait à une contribution de l'ordre de 6.75 M€.

De plus, dans la phase de R&D sur les HiCANS, 4 instruments du LLB ont été modifiés pour être utilisés sur les sources pulsées (un appareil de diffraction DIOGENE, un appareil de réflectivité HERMES, un appareil d'imagerie IMAGINE, et un appareil de spin-écho MUSES). Ces appareils pourraient être installés sur ICONÉ – PILOTE et correspondraient à une économie potentielle de l'ordre de 6 M€ en investissement.

Pour la réalisation de la phase 2, ICONÉ, la contribution en main-d'œuvre du LLB pourrait s'élever à 20 ETP/an, ce qui correspondrait à une contribution de l'ordre de 6 M€.

Les « ressources extérieures » sont potentiellement de l'ordre de 18 M€.

9.5 Calendrier de construction

	ICONÉ - PILOTE						ICONÉ			User facility		
Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Conceptual Design Report	[Green bar]											
Technical Design Report	[Green bar]											
Phase 1												
Building construction	[Green bar]											
Neutron instruments construction	[Green bar]											
Target Monolith TS1	[Green bar]											
Accelerator	[Green bar]											
Proton source	[Green bar]											
FFQ	[Green bar]											
DTL (12 MeV)	[Green bar]											
First protons on target												
Power ramping							[Green bar]					
Routine operation (5 instruments sur TS1)							[Green bar]					
Phase 2												
Building extension							[Green bar]					
Accelerator energy increase (25MeV)							[Green bar]					
Target Monolith TS2							[Green bar]					
Extra instruments							[Green bar]					
Beam on Target 2							[Green bar]					

BOT = « Beam on Target »

5 instruments pour « friendly users »

5 instruments en opération de routine

10 instruments pour les utilisateurs

10

Conclusions et recommandations

La diffusion neutronique joue un rôle majeur dans toutes les sciences de la matière, de la biologie moléculaire à la spintronique, en passant par l'étude des batteries ou des matériaux pour le stockage de l'hydrogène. Sans elle, de nombreuses avancées scientifiques, au cœur de nos sociétés et aujourd'hui essentielles pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux, ne verraient pas le jour.

Il n'est donc pas étonnant que l'offre instrumentale en diffusion neutronique s'étoffe dans de nombreux pays. On peut citer par exemple la mise en service récente de nouvelles sources de neutrons pour la recherche telles que OPAL en Australie, SNS aux États-Unis, JPARC au Japon, CMMR, CSNS et CARR en Chine, ou encore la jouvence du réacteur d'Oakridge. De nombreux projets sont aussi en cours, tels que la jouvence du réacteur du NIST à Washington, l'ouverture prochaine d'un réacteur de recherche en Argentine et en Russie, la construction d'une deuxième station cible autour de SNS aux États-Unis, le projet ISIS-II au Royaume-Uni et enfin la construction d'un nouveau hall instrumental au PSI.

Grâce à un modèle performant dans lequel un réseau d'installations nationales, non seulement complète mais aussi optimise l'exploitation d'une source à très haut flux (l'ILL), l'Europe occupe depuis 40 ans la position de leader mondial en diffusion neutronique. Toutefois, l'Europe est en passe de perdre sa position de leader si elle ne répond pas à temps à la question du vieillissement de son parc de sources. En effet, alors qu'elle a lancé la construction, dans le cadre d'un consortium européen, d'une nouvelle source à très haut flux, ESS, pour remplacer l'ILL à l'horizon 2030 [164], son réseau d'installations nationales est confronté à une perte de capacité significative avec entre autres la fermeture en 2019 de trois sources de moyenne puissance (Orphée en France, BER II à Berlin et JEEP II en Norvège).

La situation est particulièrement critique pour la France, qui a vu une chute de sa production scientifique suite à l'arrêt d'Orphée et, dans l'hypothèse actuelle de l'opération de 15 instruments à ESS, subirait une diminution de 90 % du temps de faisceau disponible pour les utilisateurs français par rapport aux années 2000. Les plus grandes précautions devront donc être prises pour assurer la transition entre ILL et ESS et ne pas perdre le grand vivier des utilisateurs non experts français afin de tirer pleinement profit de l'investissement français dans ESS [166].

Dans ce contexte, il est fondamental d'explorer de nouvelles voies pour construire des sources de rayonnement neutronique innovantes. Ces sources doivent avoir (i) des coûts de construction et d'opération raisonnables pour être accessibles aux échelles nationales et (ii) avoir des performances suffisantes pour accueillir un programme scientifique de haut niveau. Les études menées par différents instituts dans le monde montrent que la technologie basée sur les « High Current Accelerator-driven Neutron Sources (HiCANS) » répond à ces critères.

Cette technologie présente par ailleurs de nombreux avantages non négligeables. En premier lieu, elle est indépendante des ressources stratégiques en uranium et produit moins de déchets radioactifs qu'un réacteur classique. Elle est aussi modulable et évolutive. En effet, la structure temporelle des impulsions de neutrons peut être adaptée aux besoins de différents types d'instruments et il est possible d'améliorer les performances de la source au fil des progrès technologiques. Enfin, les flux neutroniques attendus rendent une telle installation compétitive avec les sources de moyenne puissance aujourd'hui disponibles pour un coût monétaire et énergétique inférieur.

¹⁶⁵ Voir 6ième protocole inter-gouvernemental.

¹⁶⁶ L'investissement français dans la construction de ESS sera supérieur à 300 M€.

Ce type de sources permettrait :

- (i) une implication directe de groupes de recherche de la communauté française dans la construction et l'exploitation d'instruments pour des études spécifiques sur des durées limitées (quelques années) ;
- (ii) le développement de nouvelles expériences combinant diffusion neutronique et d'autres techniques de caractérisation, notamment pour des études *operando* ;
- (iii) d'offrir un accès au faisceau réactif et souple, rendu nécessaire par l'évolution des moyens de financement de la recherche sur des durées très courtes, typiquement 3 années.

Nous avons décrit dans ce document les caractéristiques de la source et de l'instrumentation qui rendraient la recherche française en diffusion neutronique performante au niveau mondial.

La seule possibilité pour l'Europe de conserver son leadership est de conserver son modèle comportant un écosystème de sources équilibré entre sources nationales et source européenne. Quant à la France, si elle veut contribuer à l'effort de recherche tout en rentabilisant et faisant fructifier son investissement dans ESS, il est crucial qu'elle garde son expertise en neutronique. Construire la première HiCANS d'envergure, atteignant 2 ordres de grandeur au-delà de l'état de l'art en termes de flux de neutrons, lui permettrait d'atteindre cet objectif. On soulignera que d'autres pays européens suivent cette même trajectoire puisque plusieurs projets de construction de HiCANS sont à l'étude en Europe, en particulier en Allemagne (HBS) et en Espagne (ESS-Bilbao).

Dans ce contexte scientifique et compte tenu d'un calendrier serré et contraint, nous préconisons d'initier dès aujourd'hui la construction d'un démonstrateur de type HiCANS capable de dépasser les performances des machines existantes d'un ordre de grandeur, pour le faire ensuite évoluer d'un second ordre de grandeur afin de doter la France d'une source nationale compétitive au niveau international.

La France pourrait ainsi devenir un acteur majeur dans la construction de CANS à travers le monde à la faveur de l'expertise acquise lors de ce programme, qui constituerait la première démonstration des performances d'une HiCANS dans le monde. Un terreau d'industriels pourrait potentiellement prendre le relai de ces développements (ex. Thalès, TechnicAtome). Si le concept est démontré au cours de cette décennie, les sources de neutrons de type HiCANS devraient devenir un des éléments du paysage neutronique mondial et permettre à plus de pays d'accéder aux techniques neutroniques grâce à leurs faibles coûts de construction et d'opération.

Reviews

- *Research opportunities with compact accelerator-driven neutron sources*
I.S. Anderson et al., Physics Reports, **654** (2016) 1-58.
- *Compact accelerator-driven neutron sources*
C. Andreani, C.-K. Loong, G. Prete (Eds.) EPJ Plus Focus Point **131** (2016) 217. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2016.07.007>
- «*Focus Point on Compact accelerator-driven neutron source*»
The European Physical Journal Plus, ISSN: 2190-5444
- *The development of compact neutron sources*
J. Carpenter, Nature Rev. Phys., **1** (2019) 177-179. DOI:10.1038/s42254-019-0024-8
- 8th International Meeting of Union for Compact Accelerator-Driven Neutron Sources (UCANS-8)
F. Ott, A. Menelle, C. Alba-Simionesco (Eds.), EPJ Web Conf., **231** (2020)
- «*Low Energy Accelerator-driven Neutron Sources*»
LENS Report (League of European Neutron Sources, 2020).
- *Low energy accelerator-driven neutron facilities A prospect for a brighter future for research with neutrons.*
T. Brückel, T. Gutberlet, S. Schmidt, C. Alba-Simionesco, F. Ott & A. Menelle, , Neutron News **31** (2020) Pages 13-18.
- «*Compact Accelerator-based Neutron Sources (CANS)*»
AIEA TECDOC 1981, (2021).
- *Compact Neutron Sources for Neutron Scattering*
F. Ott, HAL Id: cea-01873010

Projets

- *Neutrons at ESS Bilbao: From Production to Utilisation*
J.P. de Vincente et al, STFC Technical Report RAL-TR-2013-016 (2013)
- Baseline design of a low energy neutron source at ESS Bilbao
F. Sordo et al., J Phys.:Conf. Ser. **549** (2014) 012001
- U. Rücker et al., The Jülich high-brilliance neutron source project, Eur. Phys. J. Plus 131 (2016) 19
- L. Silvestrin et al., SPES and the neutron facilities at laboratory Nazionali Legnaro, Eur. Phys. J. Plus 131 (2016) 72
- D. Baxter, Materials and neutronic research at the Low Energy Neutron Source, Eur. Phys. J. Plus 131 (2016) 83
- S. Alzubaidi et al., The Frankfurt neutron source FRANZ, Eur. Phys. J. Plus 131 (2016) 124
- Y. Kiyanagi, JCANS network of compact neutron facilities in Japan, Eur. Phys. J. Plus 131 (2016) 132
- S. Böhm et al., Neutron Scattering Instrumentation at Compact Neutron Sources. Workshop on "Neutron Scattering Instrumentation at Compact Neutron Sources", Gif-sur-Yvette, France, Juillet 2017, Gif sur Yvette, France. cea-01870227 (2017)
- P. Zakalek et al., High-Brilliance Neutron Source Project, 14th Int. Conf. Heavy Ion Accelerator Tech. HIAT2018, Lanzhou, China, JACoW-HIAT2018-WEZAA (2019) 117-121
- F. Ott et al., The SONATE project, a French CANS for Materials Sciences Research, EPJ Web Conf., **231** (2020) 01004. http://iramis.cea.fr/llb/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php?id_ast=2755
- Y. Otake, RIKEN Accelerator-driven compact neutron systems, EPJ Web Conf., 231 (2020) 01009
- *Conceptual Design Report, Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS)*
- T. Brückel, T. Gutberlet (Eds.), , Schriften des Forschungszentrums Jülich, General / Volume 8 (2020), ISBN 978-3-95806-501-7. https://www.fz-juelich.de/jcns/jcns-2/EN/Forschung/High-Brilliance-Neutron-Source/_node.html
- «High-Brilliance Neutron Source Project», P. Zakalek, et al., Jour. of Phys. Conf. 1401 (2020)012010. DOI:10.1088/1742-6596/1401/1/012010

Références techniques

- *Performances of Neutron Scattering Spectrometers on a Compact Neutron Source*
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.
- *Development of beryllium-based neutron target system with three-layer structure for accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy*
H. Kumada et al., Applied Radiation and Isotopes 106 (2015) 78 – 83. DOI:10.1016/j.apradi-so.2015.07.033
- *Development of a neutron generating target for compact neutron sources using low energy proton beams*
Y.Yamagata, et al., J Radioanal Nucl Chem (2015) 305:787–794. DOI:10.1007/s10967-015-4059-8

Autres liens

- UCANS Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources
<https://www.ucans.org/>
- JCANS Japan Collaboration on Accelerator-driven Neutron Sources
<https://www.jcans.net/>
- KCANS Korea Collaboration on Accelerator-driven Neutron Sources (KOMAC)
<https://www.komac.re.kr/>
- CCANS China Collaboration on Accelerator-driven Neutron Sources
<https://www.ep.tsinghua.edu.cn/column/156.html>
- ELENA European Low Energy accelerator-based Neutron facilities Association
<https://elena-neutron.iff.kfa-juelich.de/>
- LENS League of European Neutron Sources
<https://lens-initiative.org/>



UNE NOUVELLE SOURCE DE DIFFUSION NEUTRONIQUE FRANÇAISE

ANNEXES

1- État de l'art sur les CANS dans le monde	159
1.1 Intérêt international sur le potentiel des sources compactes de neutrons	159
1.2 Les CANS dans le monde	159
1.3 Exemples d'utilisation et performances des CANS pour la diffusion neutronique	161
1.3.1 Diffusion de neutrons aux petits angles	161
1.3.2 Diffraction sur poudres	161
1.3.3 Mesures de texture	163
1.3.4 Radiographie neutronique	164
1.3.5 Autres techniques analytiques	166
1.4 Les projets de HiCANS en Europe	167
1.4.2 La source HBS High Brilliance Source	167
1.4.4 La source LENOS en Italie	167
1.4.5 Le design de référence NOVA-ERA	167
1.4.6 La source LvB en Hongrie	167
2- Comparaison des performances de différents instruments de diffusion neutronique sur une source impulsionnelle et sur une source continue	169
2.1 Cas de la radio-tomographie neutronique	170
2.2 Cas de la diffusion aux petits angles et de la réflectivité	170
2.3 Diffraction de poudre	170
2.4 Conclusion	170
3- Choix des paramètres de fonctionnement d'une HiCANS	173
3.1 Contraintes technologiques	173
3.1.1 Technologie des accélérateurs	173
3.1.2 Matériaux pour la cible	173
3.1.3 Choix de l'énergie des protons	174
3.2 Proposition pour les paramètres de fonctionnement de ICONÉ	177
4- Développements techniques en cours pour lever les verrous technologiques des HiCANS	179
4.1 Les besoins techniques pour la construction d'une source haute brillance	179
4.2 Les cibles de production de neutrons – Développements au CEA Saclay	180
5- Propositions de designs d'instrument de diffusion neutronique pour la source ICONÉ	185
5.1 Diffractomètre de poudre PRESTO	185
5.2 Réflectomètre HERMES	186
5.3 Diffusion de neutrons aux petits angles (DNPA – SANS)	189
6- Infrastructure	191
7- Évaluation des risques liés à la production de neutrons et de radioéléments lors de l'opération de la source ICONÉ	195
7.1 Activation de l'accélérateur	195
7.1.1 Méthodologie	196

7.1.2 Matériaux mis en œuvre	197
7.1.3 Calculs d'activation à $E_p = 13$ MeV	197
7.1.4 Calculs d'activation à $E_p = 25$ MeV	199
7.2 Activation du modérateur et des protections biologiques	201
7.3 Interactions des neutrons avec les instruments de diffusion neutronique	202
7.4 Autres sources de rayonnement	202

8- Laboratoire Français utilisateurs de techniques neutronique sur les dernières années	203
8.1 Laboratoires Français ayant utilisé du temps ILL sur la période 2016 - 2021	203
8.2 Laboratoires Français ayant utilisé du temps 2FDN sur la période 2016 - 2021	211

Annexe 1

État de l'art sur les CANS dans le monde

1.1 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). UCANS-8 a été organisé à Paris en 2019 et a rassemblé 140 participants. [1] UCANS-9 a été organisé au Japon en 2021. UCANS-10 sera organisé à Budapest en 2023.
- Le Forschung Zentrum de Jülich organise un workshop annuel : "High Brilliance Source" meetings (Unkel, 2015...2022)[2].
- L'AIEA a organisé un Technical Meeting sur les "Non-spallation Accelerator-based Production of Neutrons" en Novembre 2019. Un TecDoc sur le sujet a été publié en 2021. TEC-DOC 1981.
- 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 rapport sur les CANS a été produit sur le sujet en 2021.
- Différents workshops thématiques plus spécifiques sont régulièrement organisés, sur l'instrumentation, la modération des neutrons, les cibles ou les accélérateurs.
- La création de l'association ELENA European Low Energy Accelerator-driven Neutron Sources.

1.2 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 Figures A1 et A2 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 peut 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 cette impression de foisonnement par le fait que ces installations, construites ou en phase de mise en service (commissioning), ont 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.

¹ <https://ucans8.sciencesconf.org/>

² HBS Workshop

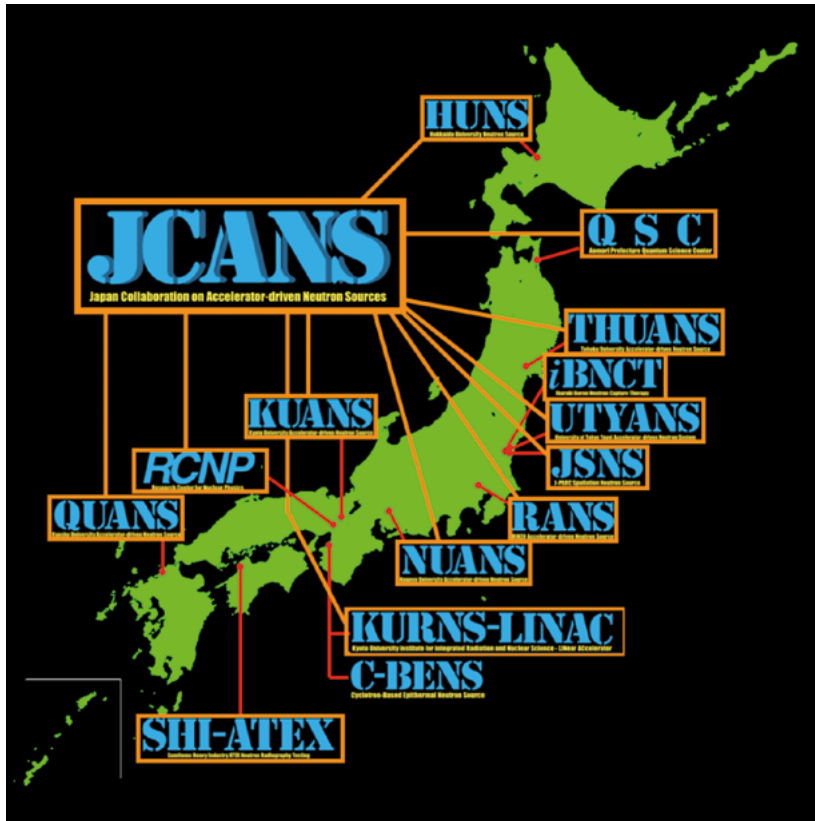


Figure A1 : Réseau JCANS (Japanese CANS). Un certain nombre de sources sont encore en phase de mise en service ou de projet.

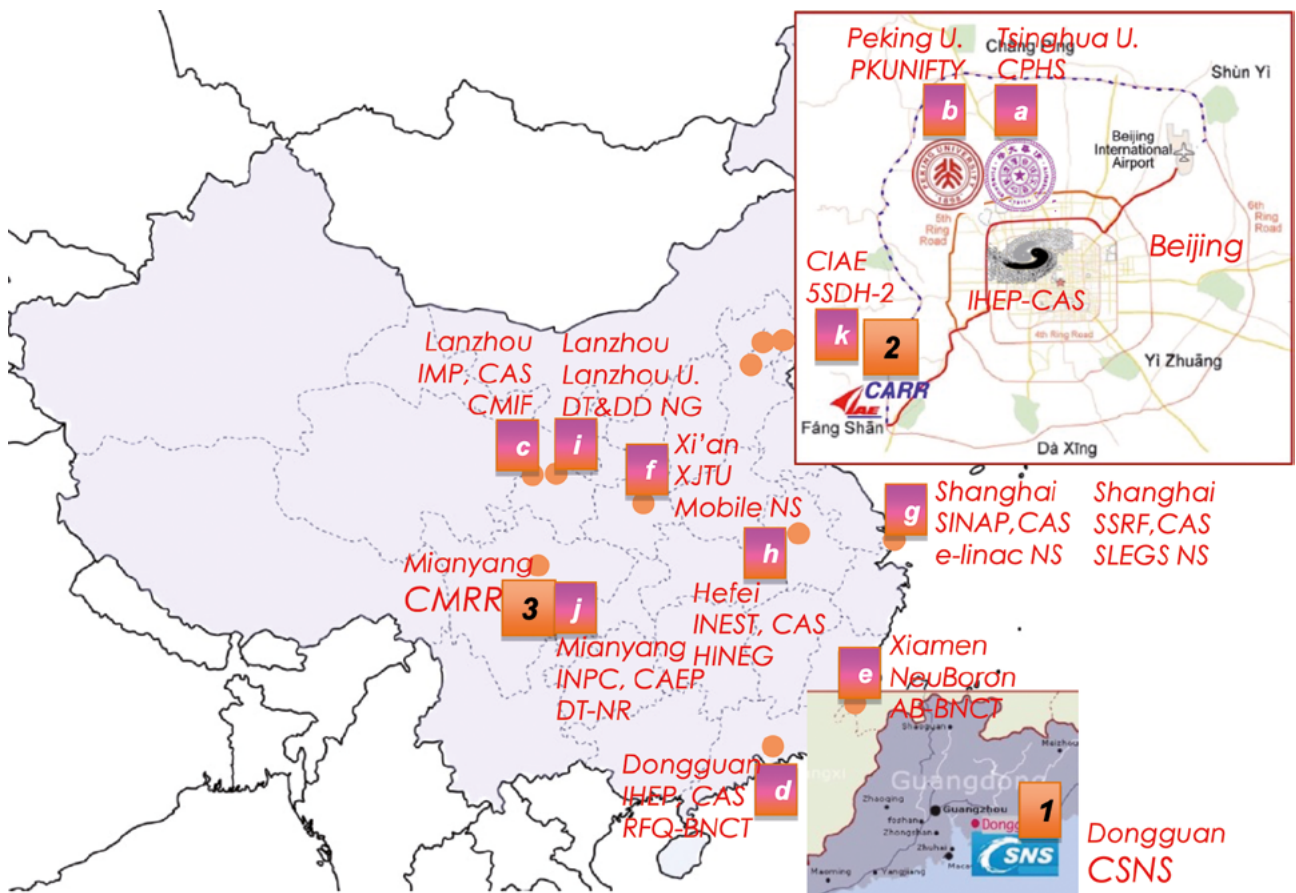


Figure A2 : Réseau de sources compactes en Chine. Au-delà des 3 sources majeures (CNS, CARR, CMRR), la Chine se dote d'un réseau dense de sources compactes de plus faibles performances pour des applications variées.

1.3 Exemples d'utilisation et performances des CANS pour la diffusion neutronique

Dans cette section, nous présentons quelques résultats expérimentaux obtenus sur des sources CANS de basse puissance (de 100 W à 1 kW sur la cible).

1.3.1 Diffusion de neutrons aux petits angles

Le rapport entre le flux neutronique des grandes installations et celui des CANS est très important, de l'ordre de 10^3 - 10^5 . Malgré cela, les CANS peuvent être compétitives dans de nombreux domaines importants, par exemple dans le développement de matériaux métallurgiques. La gamme en Q nécessaire pour ce type de mesure est centrée autour de la région de 1 nm^{-1} .

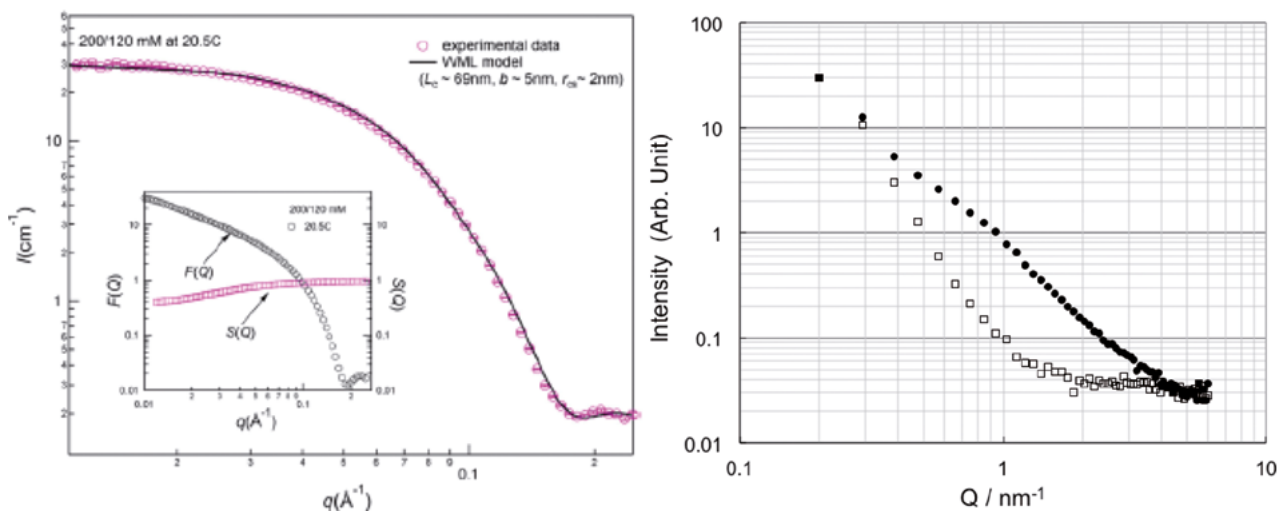


Figure A3 : (gauche) SANS data. CTAB (200 mM) micelles with 120 mM NaCl. Measured at LENS@13 MeV; 20 mA; 20 Hz, 600 μs ; $I_{av} = 0.24 \text{ mA}$; $P = 3 \text{ kW}$ [1]. (droite) SANS in steel samples with (filled markers) and without (open markers) nanoscopic precipitates [2].

L'instrument de diffusion des neutrons à angle intermédiaire, iANS, au HUNS est l'un de ces instruments. Il se concentre sur les études de structure nanoscopique dans les matériaux métalliques. Dans la Figure A3 à droite, des mesures de SANS sur des échantillons d'acier avec et sans précipités nanoscopiques sont présentées. La diffusion des neutrons aux petits/moyens angles a été mesurée avec des statistiques suffisamment bonnes dans la gamme Q de 0,2 à 5 nm^{-1} avec un temps de mesure d'environ 6 heures.

1.3.2 Diffraction sur poudres

HUNS est une source compacte utilisant un accélérateur d'électrons produisant des pulses de neutrons très courts. Cela permet d'observer relativement facilement les changements de forme des sauts de transmission aux positions des Bragg-edges liés aux changements de textures ou à la taille des cristallites. La Figure A4 (droite) présente un spectre de transmission avec les sauts de Bragg-edges pour différentes nuances de Fer α . Les profils de transmission ont été modélisés à l'aide du code RITS avec un bon accord entre la mesure et la modélisation.

² Das et al, Langmuir 2014

¹ M. Furusaka et al, Physics Procedia 60 (2014) 167-174. Activity of Hokkaido University Neutron Source, HUNS.

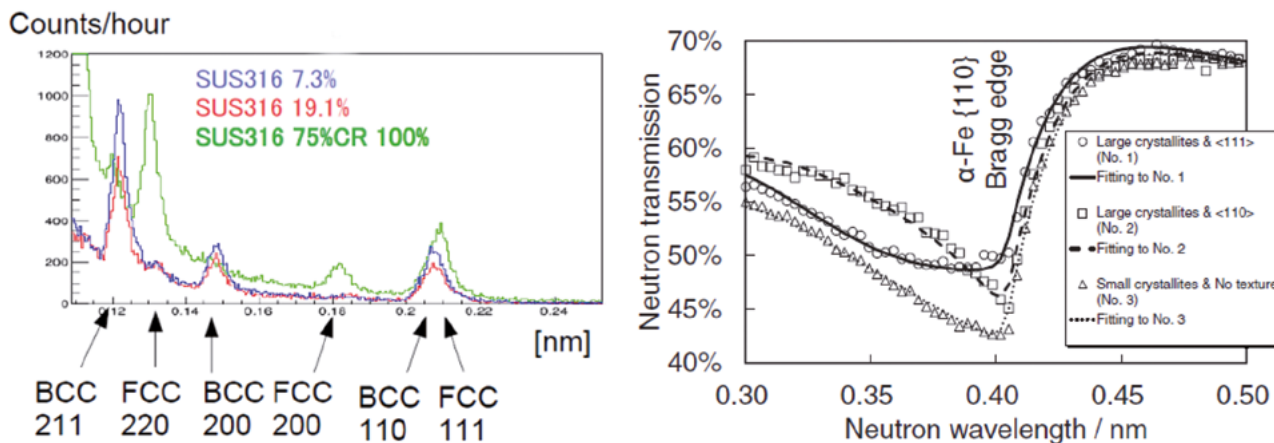


Figure A4 : (gauche) Diagramme de diffraction de poudre sur des échantillons d'acier permettant d'obtenir le rapport de composition austénite – martensite [3]. (droite) Spectre de transmission de type Bragg-edge mesuré à HUNS et fits des profils obtenus avec le programme RITS. [4]

Exemple de mesures de diffraction de poudre sur IPHI – Neutrons à une puissance de 200 W au CEA Saclay

Un instrument de diffraction neutronique a été construit autour de l'installation IPHI – Neutrons : DioGENE Diffractomètre Générique de Neutrons. L'instrument utilise un détecteur constitué de 256 tubes ^3He de longueur 50 cm et de diamètre 12 mm, avec une pression de 30 bars couvrant une surface angulaire de 120° et un angle solide de 0,7 sr. La pression de gaz dans les détecteurs (30 bars) fournit une efficacité de détection proche de 100 % pour les neutrons thermiques.

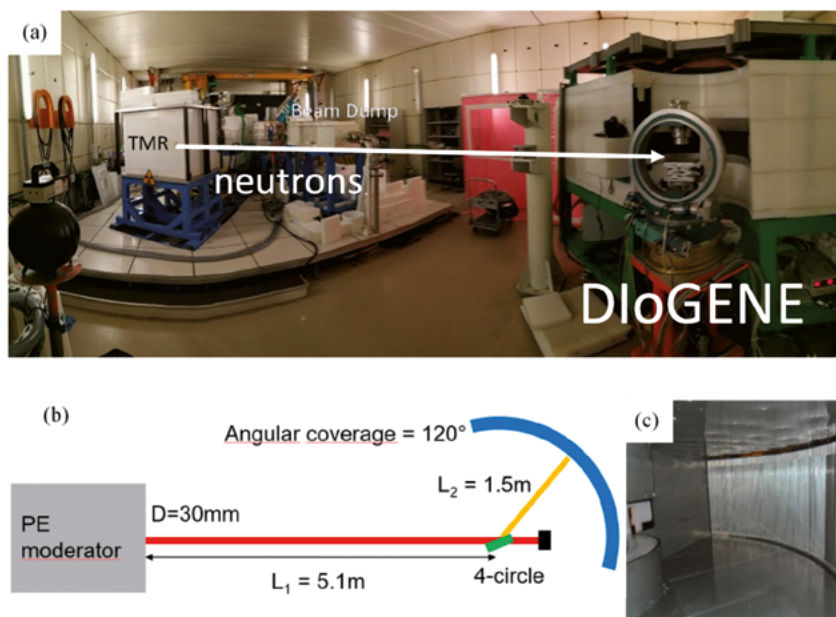


Figure A5 : (a) La casemate IPHI avec l'ensemble cible – codérateur (CMR) et l'instrument DioGENE. (b) Schéma de l'instrument (vue de dessus). (c) Intérieur du détecteur (tubes et Cd liner).

Le fonctionnement en mode temps de vol imposait l'utilisation d'un faible cycle utile (~1 %) correspondant à une faible puissance de 200 W. La Figure A6 montre le spectre en temps de vol du faisceau direct sortant du modérateur.

³ Ikeda, Yoshimasa; Takamura, Masato; Hakoyama, Tomoyuki; et al. TETSU TO HAGANE-JOURNAL OF THE IRON AND STEEL INSTITUTE OF JAPAN 104 (2018) 138-144.

⁴ R. Oishi et al, NIM A 600 (2009) 94-96. Rietveld analysis software for J-PARC;

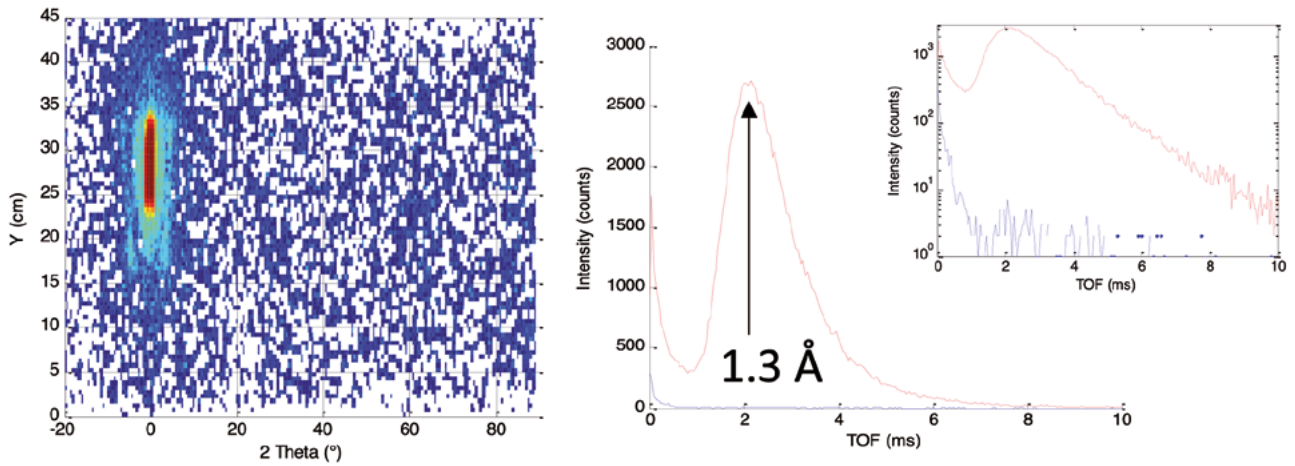


Figure A6 : (a) Faisceau direct sur le détecteur (intégration sur tous les canaux de temps de vol). (b) Information en TdV dans le faisceau direct (bleu : gammas ; rouge : neutrons).

Malgré la faible puissance effective du faisceau (200 W), il a été possible de réaliser des mesures de diffraction sur un barreau d'acier (voir figure ci-dessous).

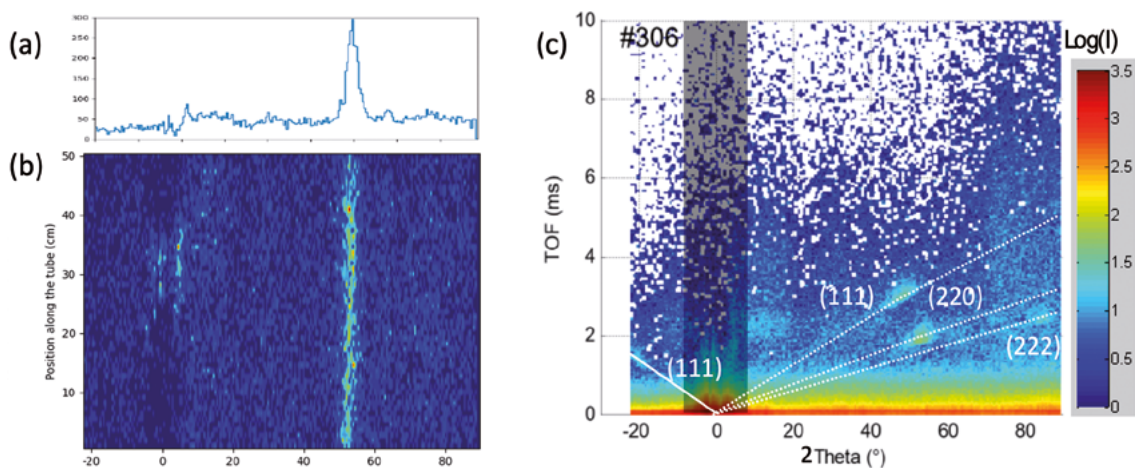


Figure A7 : (a) Pic de diffraction d'un cristal de graphite. (b) Raie de diffraction sur un barreau d'acier (data brutes sur le détecteur). (c) Spectre de diffraction en (Temps de vol, Angle) sur un barreau d'acier ; Mesure à $w = 100 \mu s$, $f = 32 \text{ Hz}$, $t = 60 \text{ min}$.

1.3.3 Mesures de texture

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

- RANS@RIKEN fonctionnant à une puissance de 100 W (puissance des 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 0,4 % de celui de TAKUMI et 0,2 % de 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.

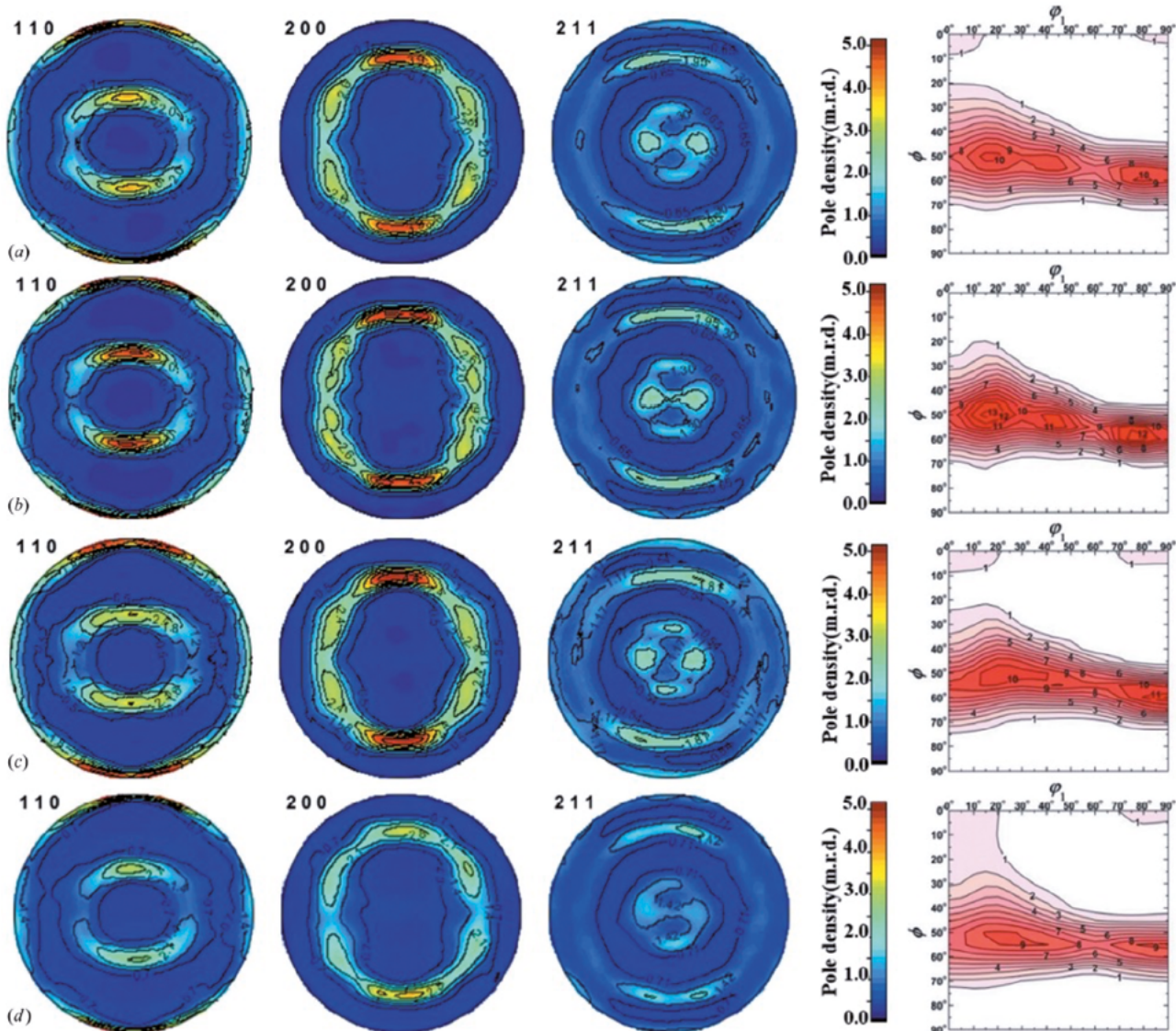


Figure A8 : Exemple de mesures de figures de pôle [5]. (a)-(b) Sur RANS (à une puissance de 100 W), avec 2 hypothèses différentes sur les paramètres de modélisation (« unequal d-range » et « equal d-range ») ; (c) Mesure sur TAKUMI@JPARC ; (d) Mesure sur HIPPO@LANSCE.

D'autres exemples ont été donnés lors du séminaire sur les sources de neutrons compacts organisé par la 2FDN [6].

1.3.4 Radiographie neutronique

En utilisant la radiographie neutronique, une observation quantitative non destructive de la migration de l'eau dans de l'acier peint corrodé pendant le processus de séchage peut être faite sur la source compacte RANS. La Figure A9 à gauche montre les distributions spatiales de l'eau. Les couleurs indiquent la teneur en eau.

⁵ Yoshimasa Ikeda, Tomoyuki Hakoyama, Masato Takamura, Yoshie Otake and Hiroshi Suzuki, J. Appl. Cryst. (2020), 53, 444-454.

⁶ Séminaire sur les sources de neutrons compacts (Paris, Avril 2018). http://2fdn.neel.cnrs.fr/IMG/pdf/Worshop_Cans/Menelle_CANS_existantes.pdf

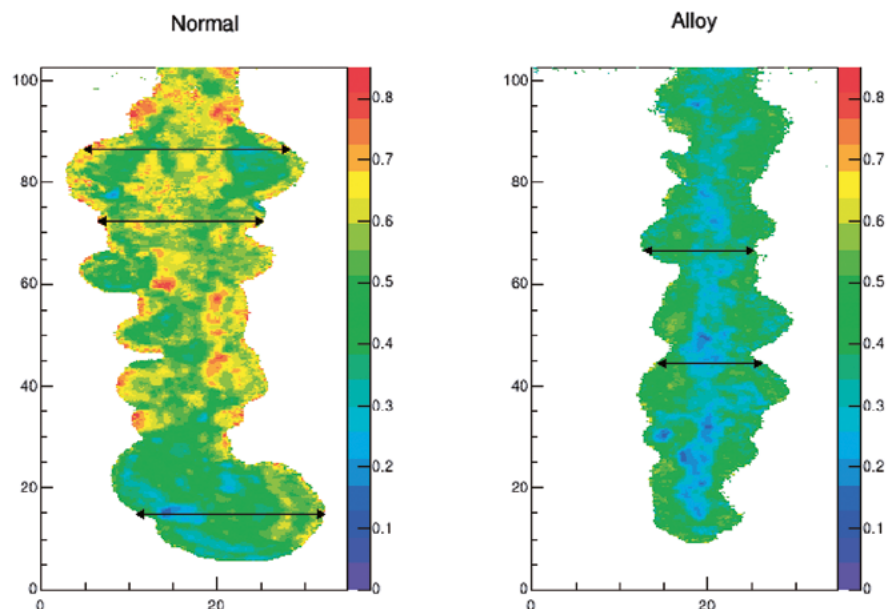


Figure A9 : Radiographies de plaques d'acier et d'un autre alliage ferreux corrodées et mise en évidence de la migration de l'humidité en fonction du temps dans les zones rouillées. Taille des pixels $0,8 \times 0,8 \text{ mm}^2$ Mesure effectuée à RANS en 5 minutes ; $E_p = 7 \text{ MeV}$; $I_{av} = 15 \mu\text{A}$; $P = 100 \text{ W}$ [7].

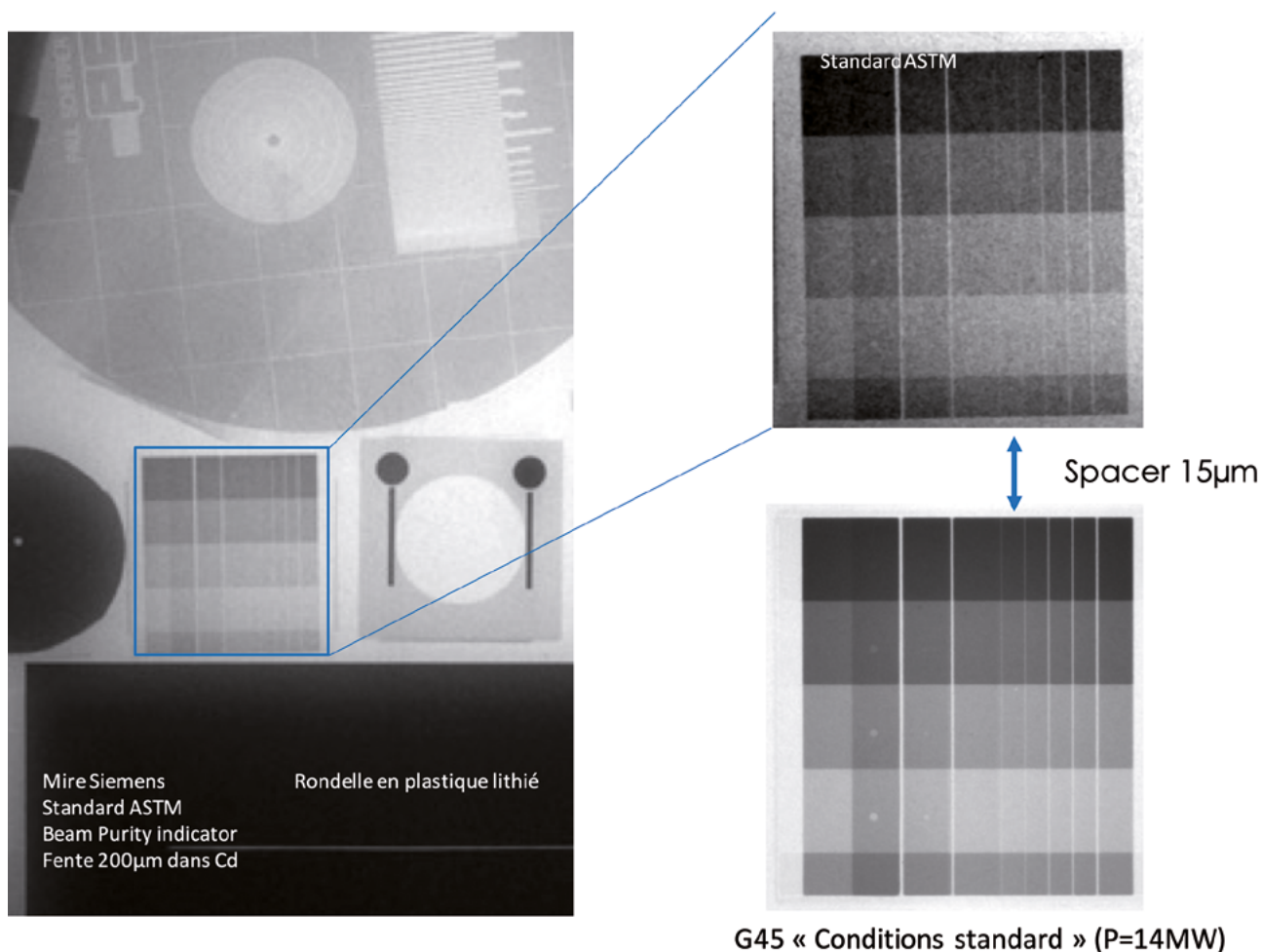


Figure A10 : Exemple de mesure sur IPHI – Neutrons de radiographie neutronique utilisant une image plate. Les temps d'exposition sont longs (60 minutes) mais permettent d'observer des détails à une échelle inférieure à $100 \mu\text{m}$.

⁷ Taketani, Atsushi; Wakabayashi, Yasuo; Otake, Yoshie; et al., MATERIALS TRANSACTIONS 59 (2018) 976-983. Quantification of Localized Water Image in Under-Film Corroded Steel with High Spatial Resolution, High Time Resolution, and Wide View by Neutron Radiography.

1.3.5 Autres techniques analytiques

La distribution des ions chlorure dans le béton est importante du point de vue de la maintenance préventive contre les attaques salines provoquant la détérioration de nombreuses structures en béton. En tant que mesure non destructive, l'analyse de type Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA) peut être appliquée comme technique de diagnostic non destructive. Récemment, au RANS, la technique de PGAA a été appliquée pour déterminer le profil de profondeur de la distribution des ions chlorure dans le béton. Les résultats ont montré que le système de détection était sensible à une concentration en ions chlorure de 1 kg/m^3 , ce qui est inférieur à la concentration limite en ions chlorure de $1,2$ à $2,5 \text{ kg/m}^3$ qui entraîne la corrosion.

L'un des éléments-clés de la maintenance préventive des infrastructures est de mener des inspections non destructives efficaces et rapides. Cependant, des méthodes efficaces doivent encore être établies, en particulier pour les parties profondes des bétons. Une nouvelle méthode d'imagerie par transmission pour les structures en béton massif utilisant des neutrons rapides a été appliquée au RANS. Des barres d'acier encastrées, un trou de vide et une poche d'eau ont pu être identifiées.

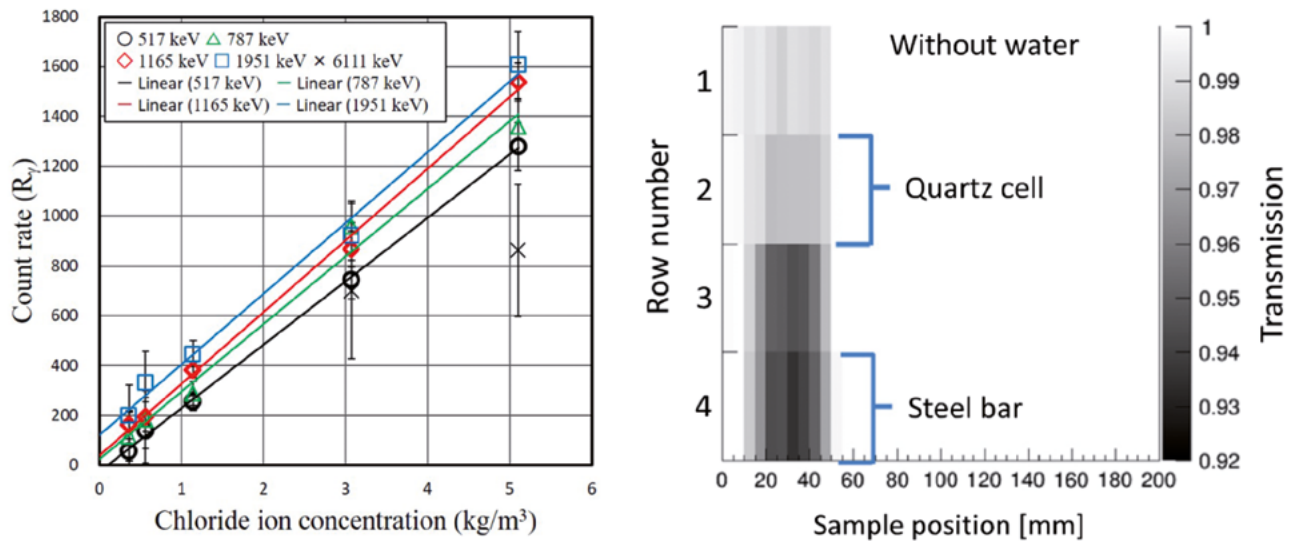


Figure A11 : (gauche) Dosage du chlore dans un béton par PGAA mesuré à RANS [8]. (droite) Observation de l'eau dans le béton en utilisant des neutrons rapides [9].

⁸ Wakabayashi, Yasuo; Yoshimura, Yuichi; Mizuta, Maki; et al., JOURNAL OF ADVANCED CONCRETE TECHNOLOGY 17 (2019) 571-578. Feasibility Study of Nondestructive Diagnostic Method for Chlorine in Concrete by Compact Neutron Source and PGA.

⁹ Seki, Yoshichika; Takekuni, Atsushi; Hashiguchi, Takao; et al. NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT 870 (2017) 148-155..

1.4 Les projets de HiCANS en Europe

En Europe, plusieurs instituts envisagent la construction de CANS ou de HiCANS utilisant les dernières technologies disponibles.

1.4.1 Le projet ARGITU à ESS-Bilbao

L'institut ESS-Bilbao est en charge de la contribution espagnole à la construction de l'ESS. Il a réalisé une étude de conception technique détaillée d'un modèle de HiCANS qui pourrait fournir des neutrons pour des instruments de diffusion neutronique [11]. Les paramètres de référence de la source ARGITU sont un accélérateur de protons de 31,5 MeV et une puissance sur la cible d'environ 50 kW. L'installation utiliserait une cible rotative en béryllium.

1.4.2 La source HBS High Brilliance Source

Le JCNS, Jülich Center for Neutron Scattering, au Forschung Zentrum Jülich propose la construction de la source HBS qui aurait les paramètres suivants : $E_p = 70$ MeV, $I_{peak} = 100$ mA, $P = 100$ kW, cible Ta [12]. Une vingtaine d'instruments de diffusion neutronique pourraient être installés autour de cette source.

1.4.3 Le design ICONÉ

La source ICONÉ utiliserait les paramètres suivants :

$E_p = 25$ MeV, $I_{peak} = 100$ mA, duty cycle = 4 %, $P = 80$ kW, cible Beryllium [13].

Ces paramètres ont été choisis parce qu'ils correspondent aux 20 premiers mètres du Linac de ESS. De ce fait, les différents composants (Source, RFQ, DTL) ne requièrent pas d'efforts supplémentaires de R&D.

1.4.4 La source LENOS en Italie

Le LNL ,Laboratori Nazionali di Legnaro, construit la source LENOS facility (LEgnaro NeutrOn Source facility)[14]. Les paramètres de la source sont $E_p = 70$ MeV, $I_{av} = 750$ μ A, cible en lithium. Cette installation est orientée vers des études de physique nucléaire.

1.4.5 Le design de référence NOVA-ERA

Le JCNS, Jülich Center for Neutron Scattering, au Forschung Zentrum Jülich a proposé un design de source de laboratoire aux performances modestes, NOVA-ERA (Neutrons Obtained Via Accelerator for Education and Research Activities) [15]. Les paramètres de la source sont $E_p = 10$ MeV, $I_{peak} = 1$ mA, $P = 1$ kW, cible en béryllium, duty cycle 4-10 %. Une telle source peut être construite à partir de composants industriels existants.

1.4.6 La source LvB en Hongrie

La compagnie hongroise Mirrotron Ltd. construit actuellement une CANS à basse énergie ($E_p = 3$ MeV) pour la caractérisation de ses produits, en particulier les miroirs de neutrons [16]. D'autres services tels que la radiographie sont envisagés.

¹¹ de Vicente, J.P.; Fernandez-Alonso, F.; Sordo, F.; Bermejo, F.J, RAL-TR-2013-016 Technical Report (2013). Neutrons at ESS-Bilbao: From Production to Utilisation.

¹² Conceptual Design Report Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS) General / Volume 8 ISBN 978-3-95806-501-7

¹³ http://iramis.cea.fr/llb/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php?id_ast=2755

¹⁴ P. Mastinu et al., Physics Procedia, 26 (2012) 261, Status of the LEgnaro NeutrOn Source facility (LENOS)

¹⁵ Conceptual Design Report NOVA ERA, General / Volume 7 ISBN 978-3-95806-280-1

¹⁶ <https://mirrotron.com/en/about/news-hirek>

Annexe 2

Comparaison des performances de différents instruments de diffusion neutronique sur une source impulsionnelle et sur une source continue

Les mesures de diffusion neutronique pour la caractérisation de la matière condensée nécessitent l'utilisation de neutrons thermalisés ayant soit un spectre « thermique » (300 K) avec un spectre centré autour de 1.8 Å soit un spectre « froid » (20 K) centré autour de 4 Å et proposant des longueurs d'onde allant jusqu'à 20 Å.

Les mesures de diffusion neutronique nécessitent la détermination de l'énergie ou de la longueur d'onde des neutrons. Deux techniques sont habituellement utilisées :

- La *monochromatisation* du faisceau à l'aide d'un cristal monochromateur ou d'un dispositif mécanique (sélecteur de vitesse). Cette technique est traditionnellement utilisée sur les sources continues, typiquement les réacteurs nucléaires. Seule une petite fraction des neutrons produits par la source sont effectivement utilisés pour les mesures. Cela est en général compensé par le très haut flux de neutrons produit sur un réacteur. La figure de mérite dans cette configuration est le nombre de neutrons produits par la source.
- La *mesure du temps de vol d'une impulsion de neutrons*. Cette technique est habituellement utilisée sur les sources de neutrons utilisant un accélérateur et produisant des impulsions de neutrons. La figure de mérite dans cette configuration est le flux crête dans le pulse de neutrons.

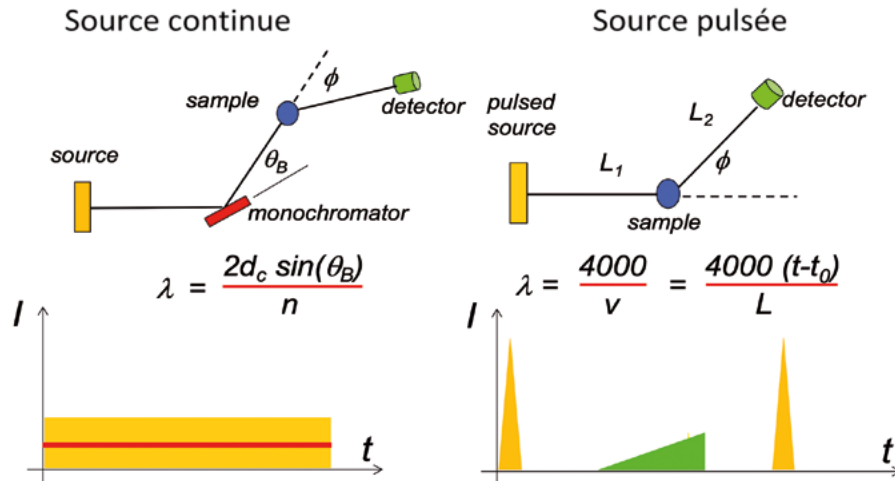


Figure A12 : Les différents modes de mesure en diffusion neutronique. (gauche) Monochromatisation du faisceau par la sélection d'une bande de longueur d'onde (en rouge) dans l'ensemble du spectre ; (droite) Mesure en temps de vol. Une impulsion de neutrons, en jaune, s'étale spatialement dans l'espace sur son trajet (vert) et l'énergie des neutrons est mesurée par leur temps de vol jusqu'au détecteur.

Dans le cas d'une source continue, seule une faible fraction des neutrons produits est utilisée (0,1-10 %). Dans le cas d'une source pulsée, l'ensemble des neutrons sont utilisés. C'est une des raisons pour laquelle une source à spallation de puissance modeste (typ. 50 kW) telle que ISIS Target Station 2, peut proposer des performances équivalentes à un réacteur de recherche tel que Orphée (14 MW).

En pratique, la discussion doit être nuancée car les techniques de diffusion neutroniques sont très variées et les performances peuvent varier d'une technique à l'autre. Dans la suite, nous comparons deux installations produisant la même quantité de neutrons :

- SPIRAL2 en fonctionnement continu à 33 MeV avec un courant moyen de $I_{av} = 5 \text{ mA}$;
- Une machine équivalente ($E_p = 33 \text{ MeV}$) mais fonctionnant en mode impulsionnel avec un courant crête de 100 mA et un cycle utile de 5 % ($I_{av} = 5 \text{ mA}$)

2.1 Cas de la radio-tomographie neutronique

Bien que cette technique ne soit pas une technique de « diffusion » neutronique, elle est proposée dans la plupart des centres de neutrons et utilisée en physique de la matière condensée.

Dans sa version habituelle (95 % des utilisations), cette technique ne nécessite pas la détermination de l'énergie des neutrons et l'ensemble du spectre disponible peut être utilisé pour les mesures. La source continue a les mêmes performances que la source impulsionnelle.

2.2 Cas de la diffusion aux petits angles et de la réflectivité

Ces techniques sont des techniques « basses » résolution. En général, il est possible d'utiliser une résolution en énergie allant jusqu'à 10 % (limite supérieure).

Considérons un spectre de neutrons froids dont l'intensité intégrée est de 1 sur les 2 sources. En mode impulsionnel, si l'instrument est optimisé, l'ensemble des neutrons peuvent être utilisés. Le flux sur l'échantillon est « 1 » par rapport au spectre incident.

En mode continu, en fonction des échelles de tailles qu'on souhaite mesurer, on choisira soit

- (i) Une configuration « grands Q » (dans l'espace réciproque) ;
Dans ce cas, on sélectionne une bande de longueur d'onde de 10% autour du flux crête à 5 Å (4,75 – 5,25 Å). L'ensemble de ces neutrons peuvent être utilisés 100 % du temps mais on n'en utilise que 10 %.
Le flux sur l'échantillon est « de 0,1 » par rapport au spectre incident
- (ii) Une configuration « petits Q » (dans l'espace réciproque) ;
Dans ce cas, on sélectionne une bande de longueurs d'onde de 10 % autour de 10 Å (9,5-10,5 Å). L'ensemble de ces neutrons peuvent être utilisés 100 % du temps mais on n'en utilise que 4 %.
Le flux sur l'échantillon est « de 0,04 » par rapport au spectre incident.

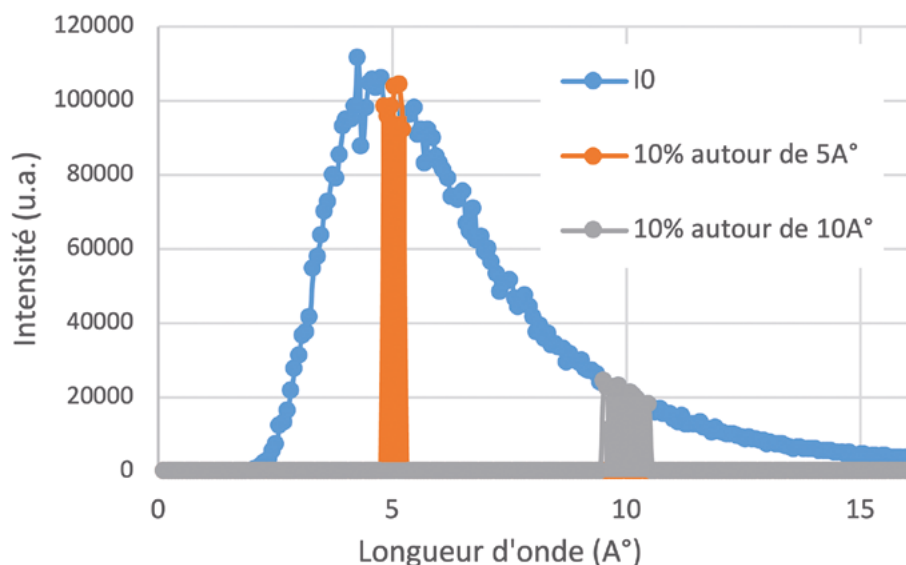


Figure A13 : (bleu) L'ensemble du spectre (bleu) est utilisable en temps de vol. Sur une source continue, il est nécessaire de sélectionner une bande de longueurs d'onde de 10 %, soit dans le pic du flux (orange), soit autour d'une longueur d'onde plus grande (gris).

2.3 Diffraction de poudre

Les mesures de diffraction sont un des cœurs de métier de la diffusion neutronique. Les instruments de diffraction de poudre sont très variés et leurs caractéristiques varient en fonction du domaine d'étude : (i) résolution de structure, (ii) structures magnétiques, (iii) suivi de transition de phase, (iv) diffusion sur des structures biologiques etc...

Pour simplifier, nous allons considérer l'exemple d'un instrument de diffraction de poudre « basse résolution » adapté par exemple au suivi de transitions de phases. La résolution typique moyenne sera fixée à 2 % (elle n'est pas strictement constante sur toute la gamme de vecteur de diffusion).

La résolution en énergie de cet instrument étant bien meilleure, il est très difficile d'exploiter l'ensemble du cycle utile de 4 % sauf à construire un instrument très long comme à ESS. Nous faisons l'hypothèse plus conservatrice que seul un cycle utile de 2 % est utilisable dans la mesure de diffraction, ce qui permet de limiter la longueur du spectromètre à 40 m sur la source impulsionnelle [17].

En mode continu, on sélectionne au maximum une bande de longueur d'onde de 1 % autour du flux crête à 2 \AA (0,19–0,21). L'ensemble de ces neutrons peuvent être utilisés 100 % du temps mais on n'en utilise que 3 % (borne supérieure). Le flux sur l'échantillon est de « 0,03 » par rapport au nombre de neutrons produits.

Un instrument de diffraction de poudre sur ICONA sera au premier ordre 10 fois plus efficace que sur SPIRAL2 (à surface de détecteur équivalente).

On peut mentionner trois autres considérations.

- L'instrument de diffraction sur la source continue est très compact (5 m) comparé à l'appareil sur la source impulsionnelle (40 m de guides de neutrons).
- La surface de détection est limitée sur un instrument utilisant un monochromateur. L'efficacité d'un instrument sur une source en temps de vol est proportionnelle à la surface de détection, qui peut être potentiellement décuplée. Cela a évidemment un coût financier.
- Un instrument de diffraction sur une source impulsionnelle peut-être très souple dans sa configuration et réaliser des mesures hautes résolution et basse résolution. Les instruments sur une source continue ont une configuration fixe.

Dans le cas des diffractomètres de type Laue (Ex. LADI@ILL), l'utilisation d'une source impulsionnelle n'apporte pas d'avantage ; une source continue est aussi efficace. Ce type de spectromètre est cependant très spécifique et assez rare (2-3 exemplaires dans le monde).

2.4 Conclusion

	Accélérateur impulsionnel (33 MeV – $I_{av} = 5 \text{ mA}$ – $I_{peak} = 100 \text{ mA}$)	SPIRAL2 Accélérateur continu (33 MeV – 5 mA – CW)
Radiographie	1	1
SANS	1	0,03–0,1
Poudre 2 % (CU 2 %)	1	0,03–0,06

Les valeurs données dans ce tableau ne sont que des valeurs indicatives et dépendent de différents paramètres de construction. Les incertitudes sur ces valeurs sont de +/- 50%. Elles donnent des ordres de grandeur.

¹⁷ Il n'est techniquement pas envisageable de considérer une source impulsionnelle avec un cycle utile de 2 % et un courant crête de 200 mA qui permettrait une comparaison à puissance égale.

Annexe 3

Choix des paramètres de fonctionnement d'une HiCANS

Nous considérerons ici les différents degrés de liberté dans la conception d'une source de neutrons basée sur un accélérateur compact et dérivons les paramètres de la machine que nous pensons appropriés pour une HiCANS dédié à la diffusion neutronique et qui fournirait des performances suffisantes pour être exploitée en tant qu'installation pour des expérimentateurs extérieurs. La discussion est limitée aux neutrons produits par des réactions nucléaires à basse énergie correspondant à des énergies de protons inférieures à 50 MeV frappant une cible de lithium ou de béryllium.

3.1 Contraintes technologiques

3.1.1 Technologie des accélérateurs

Les accélérateurs peuvent fonctionner en mode continu ou en mode impulsionnel. Pour la diffusion des neutrons, le fonctionnement le plus efficace est en mode impulsionnel pour bénéficier des techniques de temps de vol. La plupart des sources de spallation fonctionnent aujourd'hui en mode impulsionnel, ce qui permet d'exploiter la plupart des neutrons produits. Dans de telles machines impulsionnelles, le facteur clé de mérite est le flux de crête, qui est donné par le courant de crête de protons.

Dans la conception ESS [18], le courant de crête a été fixé à une valeur prudente de 62 mA. De nouvelles installations telles que l'IFMIF/EVEDA fonctionnent à des courants allant jusqu'à 125 mA [19]. Nous supposons donc qu'il est possible de faire fonctionner de manière fiable un accélérateur LINAC à un courant de crête de 100 mA, même si de tels accélérateurs à haute intensité ne sont pas courants.

Le choix de la particule ionique fait encore débat. Les données nucléaires sont assez rares dans la gamme 3-60 MeV et les sections efficaces sont mal connues. Des travaux expérimentaux sont en cours pour combler le vide de la base de données dans la gamme d'énergie d'intérêt [20]. Les premiers résultats suggèrent que les gains de rendement neutronique obtenus avec les deutérons ne dépassent pas au mieux 50 %, ce qui n'est pas suffisant pour justifier l'utilisation de deutérons plutôt que de protons. Les protons sont beaucoup plus faciles à manipuler que les deutérons et ils n'induisent pas non plus de problèmes d'activation dans les parties de l'accélérateur comme le font les deutérons. Par conséquent, dans la suite, nous ne considérerons que les protons.

3.1.2 Matériaux pour la cible

Le choix du matériau cible n'est pas trivial et nécessiterait une discussion approfondie. La situation peut se résumer comme suit.

Pour les énergies des protons inférieures à 3 MeV, le lithium est à privilégier en raison du faible seuil de réaction de stripping. C'est typiquement le choix fait pour les accélérateurs à basse énergie pour la Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) par exemple.

Pour les énergies des protons dans la gamme 3-60 MeV, le béryllium et le lithium sont à peu près équivalents en termes de rendement neutronique. Cependant, l'utilisation de niveaux de puissance (kW) importants sur la cible nécessitera de manipuler du lithium fondu, ce qui est difficile mais se justifie pour des puissances très élevées car cela rend le refroidissement plus efficace (voir IFMIF@5MW). Le béryllium quant à lui a un point de fusion très élevé (1287°C), ce qui permet de faire fonctionner une cible solide jusqu'à des densités de puissance de l'ordre de 0,5-1 kW/cm².

¹⁸ ESS Technical Design Report (2013). https://docdb01.ess.lu.se/DocDB/0002/000274/006/TDR_final_130423_online_ch1.pdf

¹⁹ Successful acceleration of a 125 mA deuteron beam @5 MeV in LIPAc (July 2019). <https://www.ifmif.org/>

²⁰ T. Gutberlet, HBS meeting (Unkel, 2018)

De 60 à 100 MeV, il existe plusieurs matériaux candidats (dont le carbone, le vanadium ou le tantale par exemple). Encore une fois, le manque de données nucléaires rend les choix non triviaux. Au-dessus de 100 MeV, la production de neutrons via les canaux de spallation commence à être efficace et une cible de matériau lourd devient le meilleur choix.

3.1.3 Choix de l'énergie des protons

Un choix clé dans la conception d'une installation est donc le choix de l'énergie du proton. Ce choix doit être pondéré par différents facteurs : (i) le rendement neutronique, (ii) le coût de l'accélérateur, (iii) la puissance déposée sur la cible.

Dans le cas du béryllium, il y a un seuil de 2 MeV pour la production de neutrons et au-dessus de 20 MeV le rendement est à peu près proportionnel à l'énergie du proton : Rendement $\propto (E_p - 12 \text{ MeV})$.

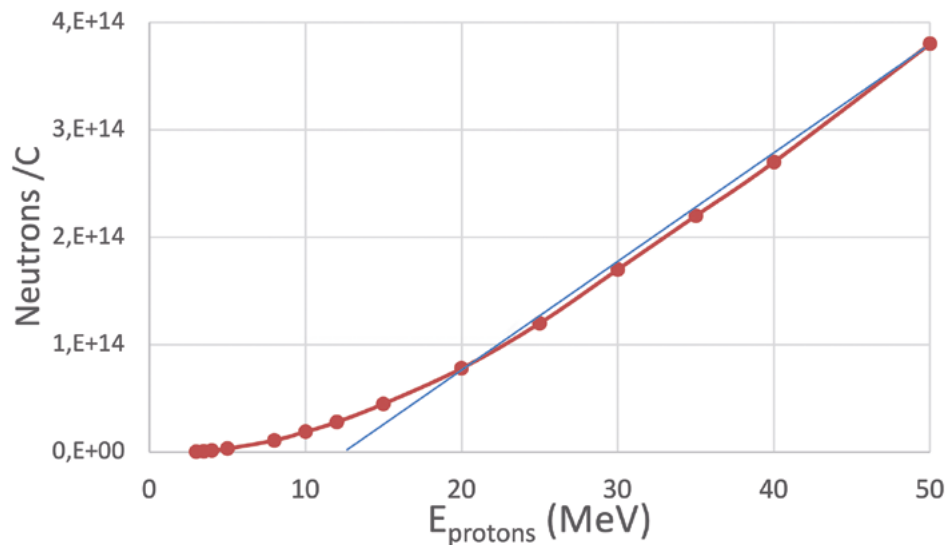


Figure A14 : Rendement en neutrons en fonction de l'énergie du proton sur une cible de béryllium (base de données ENDF).

La conception d'un ensemble cible-modérateur nécessite que la cible soit aussi petite que possible. Une taille typique (maximale) est de l'ordre de 100 cm². La thermo-hydraulique exige que la densité de puissance maximale soit comprise entre 0,5 et 1 kW/cm², ce qui fixe une limite de l'énergie du faisceau ionique à 50-100 kW. La Figure A15 montre la puissance déposée sur la cible en fonction de l'énergie du proton. La ligne orange à P = 50 kW correspond à une limite «sûre» où la conception thermo-hydraulique n'est pas trop difficile. La limite à P = 100 kW est probablement une limite dure au-delà de laquelle une cible fixe ne peut pas être utilisée et une cible tournante est nécessaire. Les différentes lignes de charge correspondent à des rapports cycliques croissants de la source.

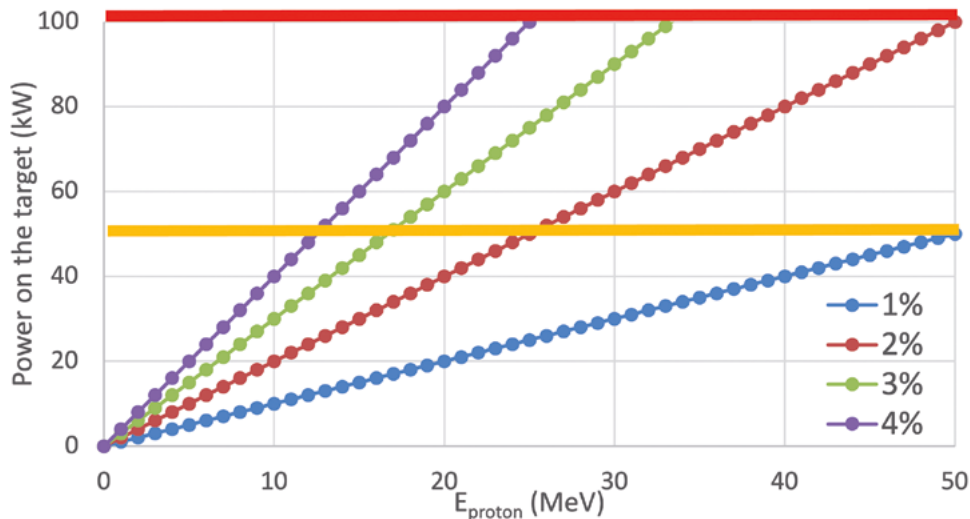


Figure A15 : Puissance déposée sur la cible en fonction de l'énergie des protons et pour des rapports cycliques de 1 % à 4 %.

À titre de référence, la source d'impulsions longues ESS fonctionne avec des impulsions de 2,86 ms à 14 Hz, correspondant à un rapport cyclique de 4 %. Dans ce scénario de fonctionnement, l'énergie maximale des protons pouvant être utilisée est d'environ 20-25 MeV. Si l'énergie du proton est augmentée à 50 MeV, le rapport cyclique doit être réduit en dessous de 2 %, sinon la densité de puissance sur la cible dépasserait des niveaux raisonnables. Ces chiffres ne sont bien sûr qu'indicatifs car la limite des 100 kW peut être soit difficile à atteindre, soit dépassée selon la technologie utilisée. Néanmoins, cela illustre que des compromis doivent être faits entre l'énergie du proton et le rapport cyclique pour une puissance donnée sur la cible. Ceci est illustré sur la Figure A16. Par exemple, pour une énergie proton $E_p = 20$ MeV, un courant crête de 100 mA et un rapport cyclique de 4 %, la puissance sur la cible serait de 80 kW et le rendement neutronique serait de $3,1 \times 10^{14}$ n/s. Si l'énergie du proton est augmentée d'un facteur 2 à 40 MeV alors que la puissance sur la cible reste limitée à 80 kW, le rapport cyclique doit être réduit à 2 % et le rendement neutronique est de $5,4 \times 10^{14}$ n/s. Pour une puissance donnée déposée sur la cible, le rendement neutronique est à peu près proportionnel à l'énergie du proton.

Il est difficile de définir un facteur de mérite simple car un certain nombre de paramètres «soft» jouent également un rôle.

Quel est le rapport cyclique le plus adapté ? Cela dépend des applications visées.

Pour les protons de plus faible énergie, le spectre des neutrons rapides est moins énergétique et donc plus facile à modérer.

Le fond gamma est également moins énergétique pour les protons de plus faible énergie.

Un accélérateur à faible consommation d'énergie coûte moins cher à construire.

Au-dessus de $E_p = 30$ MeV, de nouvelles voies d'activation s'ouvrent et conduisent à l'activation de parties d'accélérateurs, ce qui peut compliquer la maintenance.

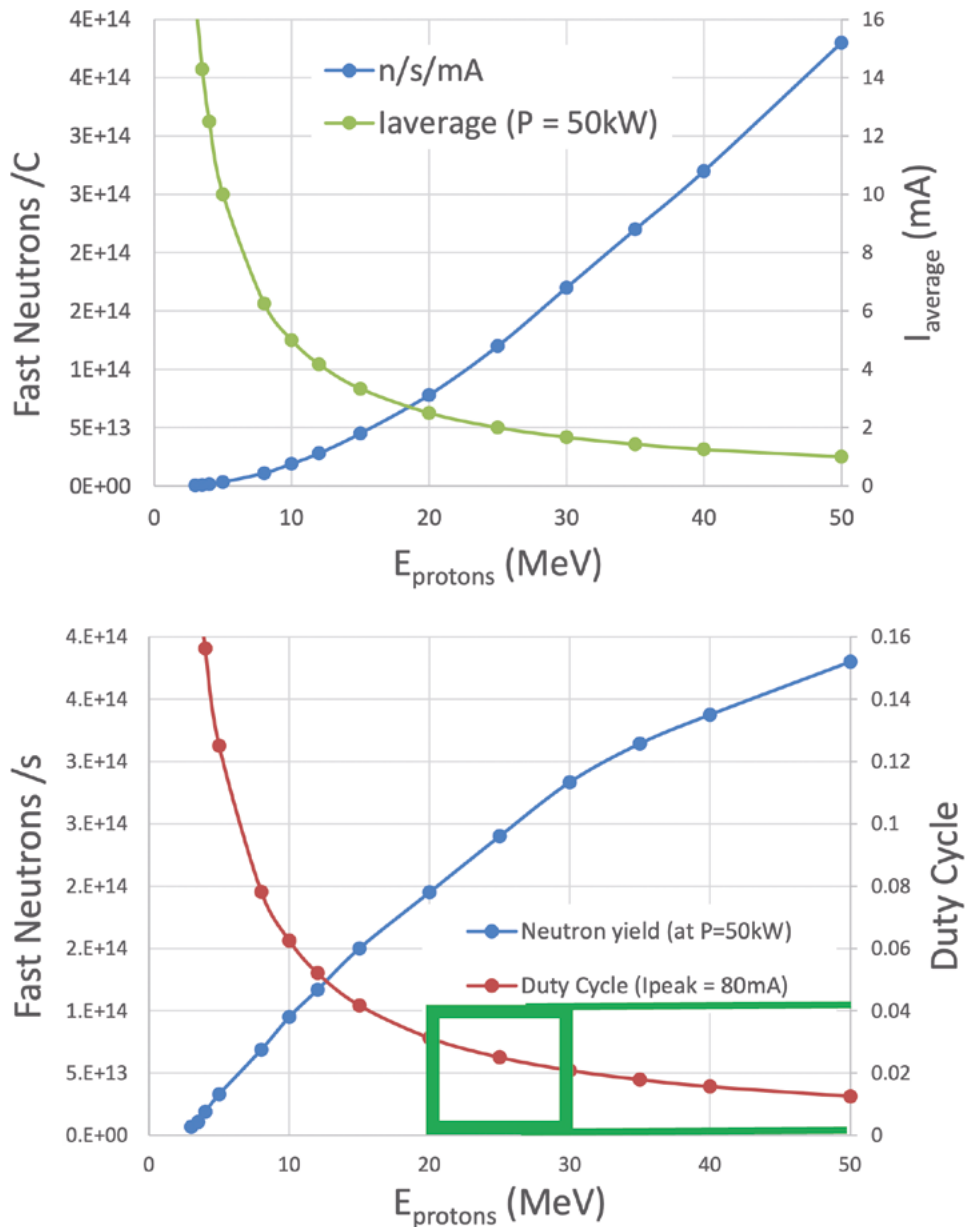


Figure A16 : (a) Rendement neutronique par Coulomb en fonction de l'énergie du proton et du courant moyen maximum pour limiter la puissance sur la cible à 50 kW. (b) Rendement réel avec une limite de puissance sur la cible fixée à 50 kW et rapport cyclique correspondant (pour $I_{\text{peak}} = 80 \text{ mA}$). Alors que le rendement neutronique par proton double en passant d'une énergie de proton de 20 MeV à 30 MeV, les limites de puissance sur la cible réduisent le gain à 45%. En parallèle, le rapport cyclique sur la cible est réduit (de 3% à 2% si $I_{\text{peak}} = 80 \text{ mA}$), ce qui facilite l'exploitation des impulsions neutroniques pour des expériences de diffusion. De 20 MeV à 30 MeV, le gain de flux est à peu près proportionnel à l'énergie de l'accélérateur. De 30 MeV à 50 MeV, le gain en flux est de 36% tandis que l'énergie du proton est augmentée de 67%.

En supposant que le coût et le fonctionnement de l'accélérateur sont proportionnels à son énergie, un simple facteur de mérite pourrait être défini comme $\text{FOM} = [\text{Neutrons Yield}/E_{\text{protons}}]$ (voir Figure A17), qui reflète le coût par neutron produit. Il est clairement efficace de travailler au-dessus de 10 MeV. Cependant, même si le rendement neutronique par proton augmente rapidement avec l'énergie du proton, le a de mérite est à peu près constant au-dessus de 10 MeV.

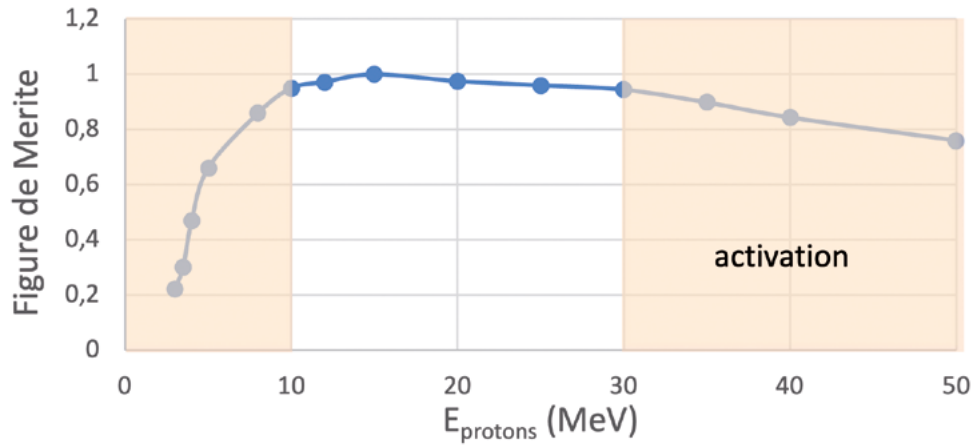


Figure A17. Figure de mérite définie comme [Flux Neutronique/Coût] (a.u.)

En dessous de $E_p = 15$ MeV, le rapport cyclique maximum est supérieur à 4 %, ce qui devient difficile à exploiter efficacement pour la diffusion neutronique ToF. Au-dessus de 30 MeV, les canaux d'activation des protons s'ouvrent et compliquent la maintenance de l'accélérateur. Par conséquent, une région de fonctionnement optimale pour CANS semble se situer dans la gamme 10–30 MeV.

3.2 Proposition pour les paramètres de fonctionnement de ICONÉ

À partir des considérations ci-dessus, nous avons décidé de définir les paramètres de référence ICONÉ comme :

- **$E_p = 20\text{-}30$ MeV,**
- **$I_{\text{crête}} = 100$ mA,**
- **rapport cyclique = 4 %, $P = 80$ kW,**
- **Be cible fixe.**

On notera que ces paramètres correspondent aux 20 à 30 premiers mètres du linac de l'ESS (sur 600 m). Ainsi, les composants (Source, RFQ et DTL) sont en principe disponibles sans nouveaux développements de R&D.

Annexe 4

Développements techniques en cours pour lever les verrous technologiques des HiCANS

Alors que la construction de sources compactes de basse puissance (< 1 kW) et de basse énergie ($E < 13$ MeV) est relativement facile à mettre en œuvre, la construction de sources compétitives avec les réacteurs de recherche et les sources à spallation de puissance moyenne nécessite une montée en puissance (50-100 kW) et en énergie ($E_p = 20-70$ MeV).

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

Les CANS actuelles sont en général limitées à des puissances de l'ordre du kW et 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. La construction de HiCANS compétitives nécessite des développements techniques nouveaux.

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

- ▶ **un accélérateur haute intensité avec un courant crête élevé ($I_{peak} \sim 100$ mA) ;**
De tels accélérateurs ne sont pas courants mais commencent à être disponibles (voir SNS aux États-Unis, IFMIF/EVEDA, IPHI@Saclay, ESS)
- ▶ **une cible métallique pouvant opérer à une densité de puissance élevée ;**
À la différence des sources à spallation, pour les sources 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 100 kW.
L'opération d'une cible de béryllium sur une durée supérieure à 1000 heures à une puissance de 20 kW a récemment été démontrée au Japon [21] et au CEA Saclay.
- ▶ **des modérateurs performants ;**
La fabrication d'un modérateur de neutrons thermiques et froids 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)
- ▶ **des instruments de diffusion neutronique ;**
Les technologies de construction d'instruments en temps de vol performants sont connues, en particulier après l'investissement méthodologique réalisé pour les instruments pour ESS. Des progrès sont encore possibles pour les optimiser pour un fonctionnement sur une HiCANS.

Différents instituts européens travaillent sur ces problématiques.

En France, le CEA a engagé un programme de recherche autour des CANS / HiCANS. Le projet SESAME « IPHI - Neutrons », financé par la région Île-de-France sur la période 2018-2021, a eu pour objectif de démontrer l'opération d'un accélérateur à fort courant de manière fiable, l'opération d'une cible à une puissance de 50 kW et la réalisation de mesures de diffusion neutronique en temps de vol.

Les résultats de ce projet sont disponibles dans différentes publications [22-23].

²¹ T. Kuhihara et al, EPJ Web of Conferences Volume 231 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023103001>

²² Long term operation of a 30 kW Beryllium target at IPHI.

J. Schwindling et al, Journal of Neutron Research, vol. 24, no. 3-4, pp. 289-298, 2022. DOI: 10.3233/JNR-220024

²³ Neutron scattering on DIOGENE at IPHI-neutrons.

J. Darpentigny and F. Ott, Journal of Neutron Research 24 (2022) 385-393 385. DOI 10.3233/JNR-220018

4.2 Les cibles de production de neutrons – Développements au CEA Saclay

Le CEA mène un programme de recherche pour développer des cibles adaptées aux HiCANS. Une des pistes explorées est celle d'une cible métallique en béryllium solide. Un financement SE-SAME de la région Île-de-France a permis d'étudier la construction d'une cible béryllium pouvant fonctionner à des puissances allant jusqu'à 50 kW.

Le choix technique s'est porté sur une séparation des fonctionnalités « production de neutrons » et « système de refroidissement » afin de développer un système :

1. **avec une maintenance est simple ;**

On ne remplace périodiquement que les éléments cibles (Be ou autre) mais on conserve le système de refroidissement.

2. **robuste.**

Le système est conçu de telle sorte qu'une défaillance de la cible ne conduise pas à une défaillance du système de refroidissement.

Ces deux objectifs permettent d'envisager un système de cible minimisant la production de déchets ainsi que les coûts d'exploitation et prévenant les possibles incidents de contamination radioactive entre la cible et le système de refroidissement.

Le concept technique repose sur des blocs cibles vissés sur une plaque de refroidissement en cuivre. La Figure A18 montre l'exemple d'un support en cuivre sur lequel différents types de matériaux cibles sont vissés.

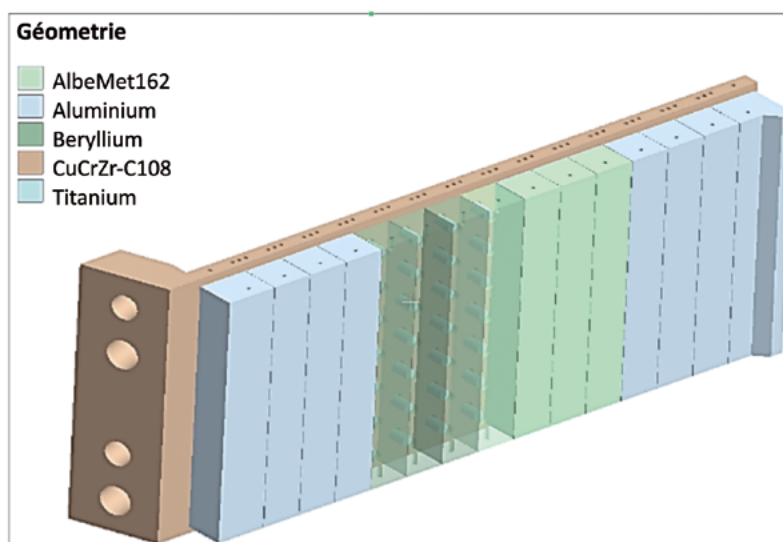


Figure A18 : Exemple du support de refroidissement en cuivre (orange) sur lequel différents types de matériaux sont vissés pour assurer un bon contact thermique. Le support en cuivre est refroidi par des micro-canaux qui le traversent transversalement.

Les simulations thermo-hydrauliques montrent qu'un tel système de refroidissement permet d'atteindre des puissances surfaciques de l'ordre de 500 W/cm².

Le concept de refroidissement d'une cible vissée a été validé en 2019 sur un prototype de cible qui a fonctionné à une puissance de 3 kW pendant plus d'une centaine d'heures.

Un modèle de cible pouvant soutenir une puissance de 50 kW a été construit en 2021. L'ensemble cible (Figure A19) est constitué d'une chambre en aluminium dans laquelle un support refroidi par eau porte 15 sous-cibles qui constituent une cible de dimensions 11 cm (hauteur) x 25 cm (longueur) orientée à un angle de 20° par rapport à l'axe du faisceau. Un hublot dans la chambre en aluminium permet d'observer le centre de la cible sans remise à la pression atmosphérique.

Les 15 sous-cibles sont chacune équipées de 2 thermocouples, l'un en haut et l'autre bas. En plus de contrôler l'évolution de la température des sous-cibles avec la puissance, ils permettent de vérifier le centrage du faisceau durant les prises de données.

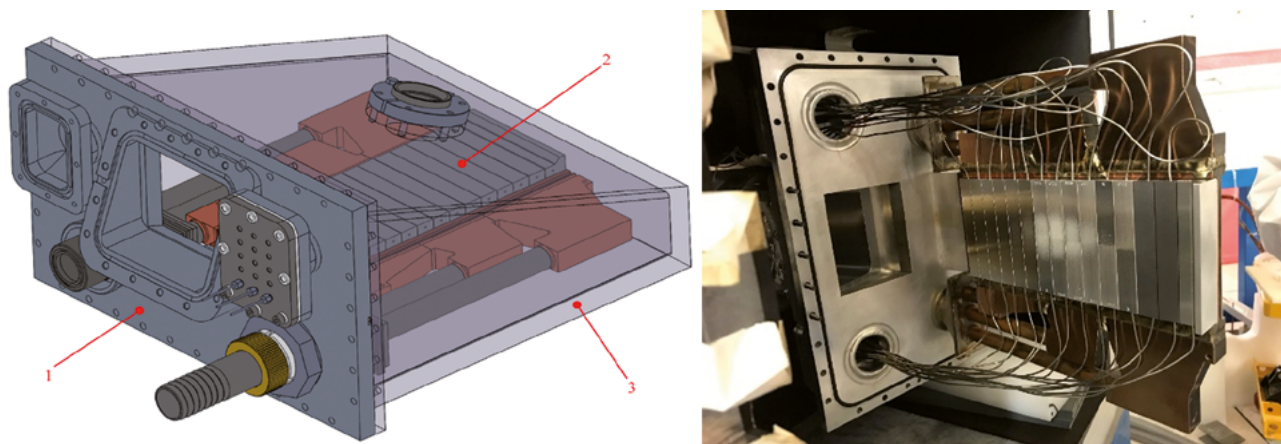


Figure A19 : Cible 50 kW, orientée à un angle de 20° par rapport au faisceau incident.

Un run de longue durée (> 100 heures) a été réalisé début 2022. Les runs ont été effectués sur une durée de 2 semaines par deux équipes de pilotes travaillant en 2 x 8. À titre de démonstration, un run en 3 x 8 a été effectué le dernier jour. En effet, sur une source de neutrons, il est à priori souhaitable de fonctionner en mode 24 h/24 afin de maximiser l'utilisation de la machine. C'est actuellement le mode d'exploitation standard des installations de diffusion neutronique.

La puissance déposée sur la cible était en moyenne de 28 kW. La valeur nominale de 50 kW n'a pas pu être atteinte car elle suppose un fonctionnement avec un balayage du faisceau sur l'ensemble de la cible à l'aide d'un aimant de balayage. Ce dernier n'avait cependant pas pu être installé pour ces tests.

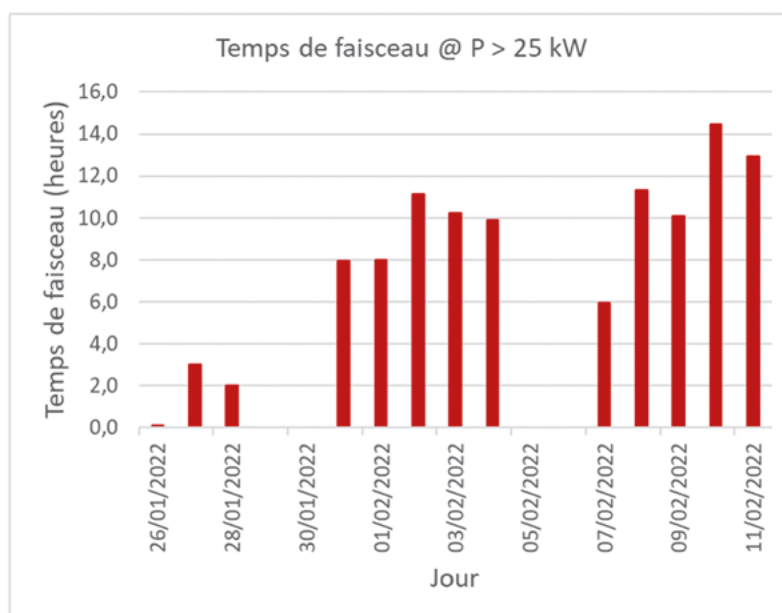


Figure A20 : durée quotidienne du faisceau à haute puissance sur la cible

Lors de ces tests, différents matériaux, différents types d'alliages et différents types de traitement de surface ont pu être testés. Certains matériaux présentent une formation significative de cloques (béryllium pur). D'un autre côté, certaines nuances de béryllium se comportent très bien avec un endommagement de surface très limité (voir Figure A21).

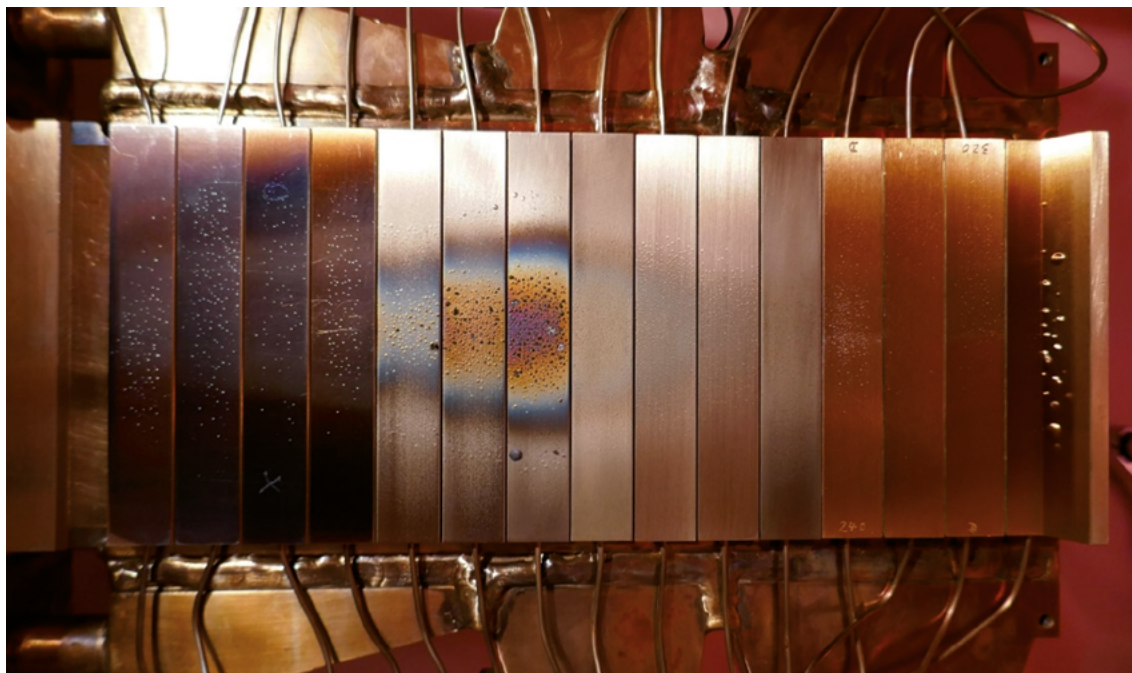


Figure A21 : Cible après ouverture de couvercle. L'endommagement de surface est très différent en fonction des matériaux utilisés.

Le concept de cible développé par le CEA est simple, robuste et versatile. Il peut s'adapter à différents matériaux cibles. Le béryllium est a priori l'option la plus performante dans la gamme d'énergie incidente 10-30 MeV. D'autres matériaux tels que le vanadium ou le tantale produisent aussi des neutrons dans cette gamme d'énergie, mais en quantité plus réduites (30 à 50 %).

La cible actuelle a pu être reconditionnée avec des nouvelles sous-cibles dans les semaines qui ont suivi le run de longue durée (100 heures). S'il s'avérait que la gestion du béryllium était un problème sur une installation industrielle, le système actuel pourrait être utilisé avec d'autres matériaux. Un test a d'ores et déjà été réalisé avec deux sous cibles en tantale.

Une limitation du système actuel est la densité de puissance maximale qui est de l'ordre de 500 W/cm². Pour une puissance sur la cible de 50 kW, la surface du système est de l'ordre de 100 cm². On peut signaler que iBNCT développe un ensemble cible très proche du design CEA et a aussi démontré le fonctionnement d'une cible avec des fluences de l'ordre de 3000 coulombs.

Le JCNS Jülich Center for Neutron Scattering du Forschung Zentrum Jülich développe actuellement un prototype de cible utilisant du tantale et pouvant travailler à des densités de puissances de l'ordre de 1 kW/cm². Le choix du tantale est lié au fait que dans le cas de la source HBS, il est envisagé de travailler à plus haute énergie (70 MeV) afin de maximiser le flux. Le processus de construction de la cible est validé. Il est cependant nécessaire de tester la cible en conditions d'irradiations aussi proches que possible du mode HBS pour évaluer sa durée de vie.

Le design de la cible permet des densités de puissance très élevées. La contrepartie est le couplage intrinsèque entre la cible et le circuit de refroidissement. De plus, l'utilisation du tantale conduit à des niveaux d'activation très élevés qui nécessitent un système de manutention totalement automatique pour effectuer le changement de cible. Le JCNS développe un tel système.



Figure A22 : Prototype de cible tantalum pour HBS.

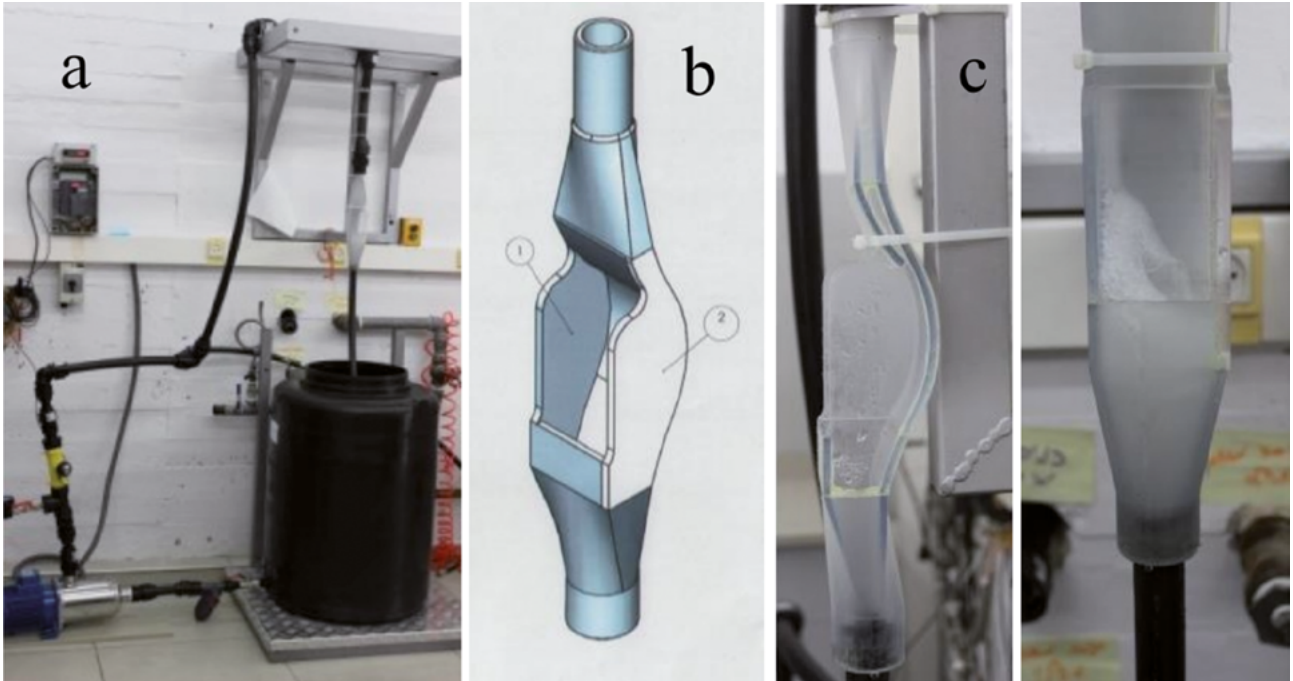


Figure A23 : Cible utilisant du lithium liquide sur l'installation SARAF [24].

En conclusion, différents instituts travaillent sur différentes solutions technologiques pour construire des cibles adaptées à un fonctionnement en mode HiCANS (50-100kW). Aucune cible ne fonctionne en mode routine mais aucun obstacle technologique majeur ne semble exister.

²⁴ A 50 kW Liquid-Lithium Target for BNCT and Material-Science Applications. M. Paul et al, The European Physical Journal Conferences 231:03004. DOI: 10.1051/epjconf/202023103004

Annexe 5

Propositions de designs d'instrument de diffusion neutronique pour la source ICONÉ

5.1 Diffractomètre de poudre PRESTO

Cette section décrit le design d'un instrument de diffraction installé sur un modérateur thermique de ICONÉ. Nous baptisons ce design PRESTO. Il est dérivé de l'instrument MAGIC en construction à ESS.

L'instrument est long (42 m) afin de pouvoir accéder à des résolutions de l'ordre de 1 %.

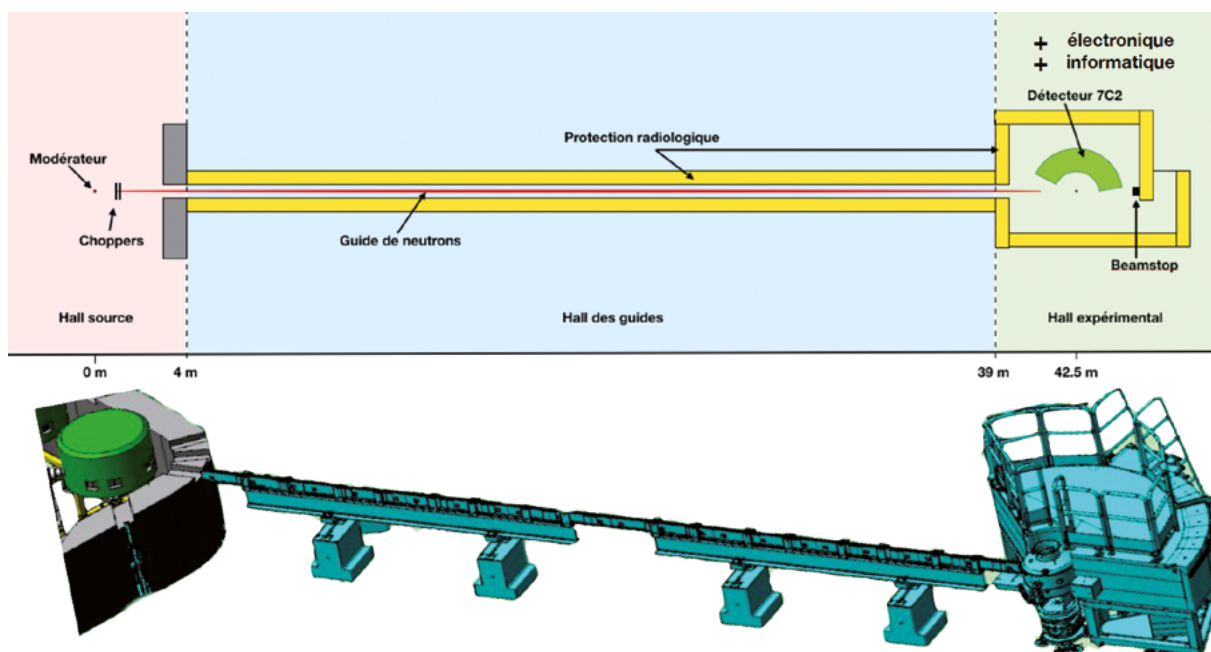


Figure A24 : Proposition de design d'un instrument de diffraction à haut flux.

Sur la base du design ci-dessus, des simulations Monte-Carlo ont été réalisées pour comparer les performances de l'instrument PRESTO et de l'instrument G41 du LLB à Orphée qui couvrait des thématiques scientifiques similaires à celles envisagées sur PRESTO.

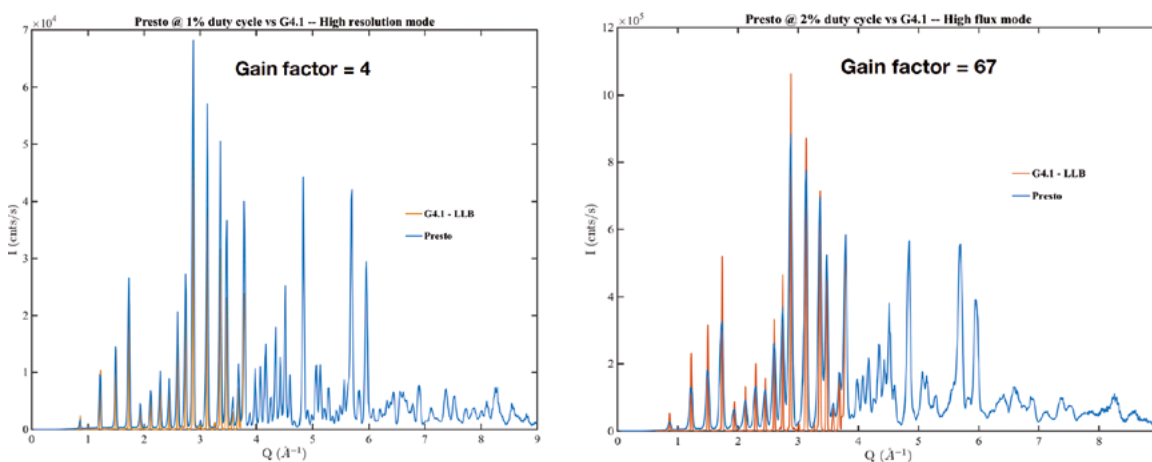


Figure A25 : Comparaison entre une mesure réalisée sur une poudre de $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$ sur G41@LLB et PRESTO en mode haute résolution et en mode haut flux. En mode haute résolution, les performances des deux instruments sont proches avec un gain d'un facteur 4 en en termes de flux pour PRESTO. En mode haut flux, PRESTO est beaucoup plus performant que G41, d'un facteur de l'ordre de 60. Dans les deux cas, PRESTO couvre une gamme en Q deux fois plus large que G41.

Le gain en performance entre les instruments G41 et PRESTO est dû à l'augmentation de la surface de détection (x 15), à l'augmentation de l'efficacité de détection (x 2,7) et à l'augmentation du flux incident (x 1,5).

Au-delà du simple gain en flux, l'instrument PRESTO permet de couvrir une fraction deux fois plus étendue de l'espace réciproque. De plus, l'instrument PRESTO dispose d'une résolution variable, ce qui permet de travailler soit en mode haute résolution, soit en mode haut flux. À priori, l'instrument peut être utilisé pour des études sur poudre ou sur monocristaux, de manière analogue à l'utilisation de l'instrument MAGIC@ESS.

5.2 Réflectomètre HERMES

L'objectif des techniques de réflectométrie est de déterminer la structure d'empilements de couches très minces à des échelles de tailles allant de 2 à 20 nm. Les techniques de réflectométrie neutronique sont adaptées à l'étude de couches minces de polymères ou bien de couches minces magnétiques. La finesse des systèmes que l'on souhaite habituellement étudier ne nécessite pas une résolution instrumentale élevée. Des résolutions $\delta Q/Q$ de l'ordre de 3 à 10 % sont en général utilisées pour la majorité des expériences. Pour cette raison, ces techniques peuvent efficacement exploiter des impulsions de neutrons longs.

La réflectométrie spéculaire est une technique particulièrement bien adaptée à l'utilisation des techniques de temps de vol. En effet, le signal que l'on souhaite mesurer suit une tendance générale de type $1/Q^4$ modulée par les détails de la structure en couche mince sur la surface (voir Figure A26). Dans l'espace expérimental (Intensité vs Longueur d'onde) sur une source impulsionnelle, les réflectivités suivent donc une dépendance en $1/Q^4$.

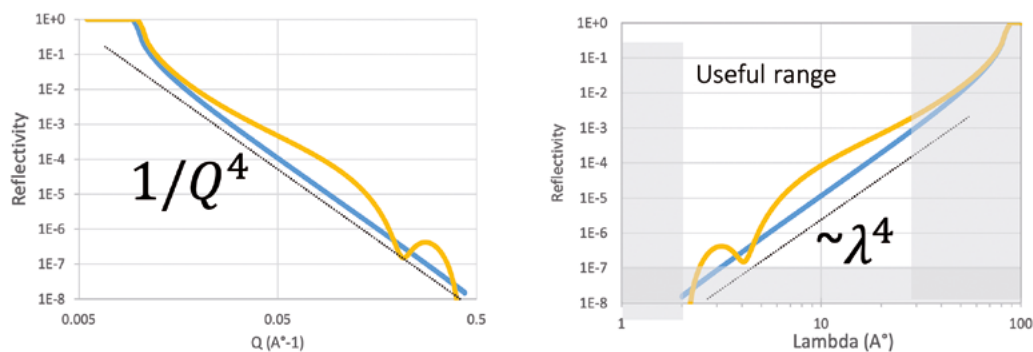


Figure A26 : (gauche) réflectivité sur un substrat de silicium nu (bleu) et sur un substrat de silicium oxydé (jaune). La réflectivité suit une tendance générale en $1/Q^4$ avec des modulations autour de cette tendance générale lorsqu'il y a d'autres interfaces à la surface du système. (droite) Dans l'espace expérimental (Intensité vs Longueur d'onde) sur une source impulsionnelle, les réflectivités suivent une dépendance en δ^4 . Dans les calculs présentés, un angle d'incidence de 4° a été utilisé.

Une source de neutrons froids émet un spectre de neutrons proche d'un spectre Maxwellien dont l'intensité suit une loi allant de $1/\lambda^3$ à $1/\lambda^5$ pour les très grandes longueurs d'ondes (voir Figure A27). Comme mentionné précédemment, la tendance générale des réflectivités des échantillons varie comme λ^4 (Figure A26b, courbe orange). Le flux incident varie de $1/\lambda^2$ à $1/\lambda^4$ dans la plage utile (Figure A27a, courbe bleue). Ainsi, l'intensité mesurée (Figure A27b, courbe grise) ne varie que sur 2 à 3 ordres de grandeur tandis que la réflectivité mesurée varie sur 4 à 5 ordres de grandeur. À des longueurs d'onde plus courtes (grandes valeurs Q), la réflectivité et l'intensité incidente chutent fortement pour des longueurs d'onde inférieures à la longueur d'onde maximale du spectre incident (voir la forte baisse de la courbe grise sur la Figure A24b pour $\lambda < 2 \text{ \AA}$) conduisant à des intensités non mesurables.

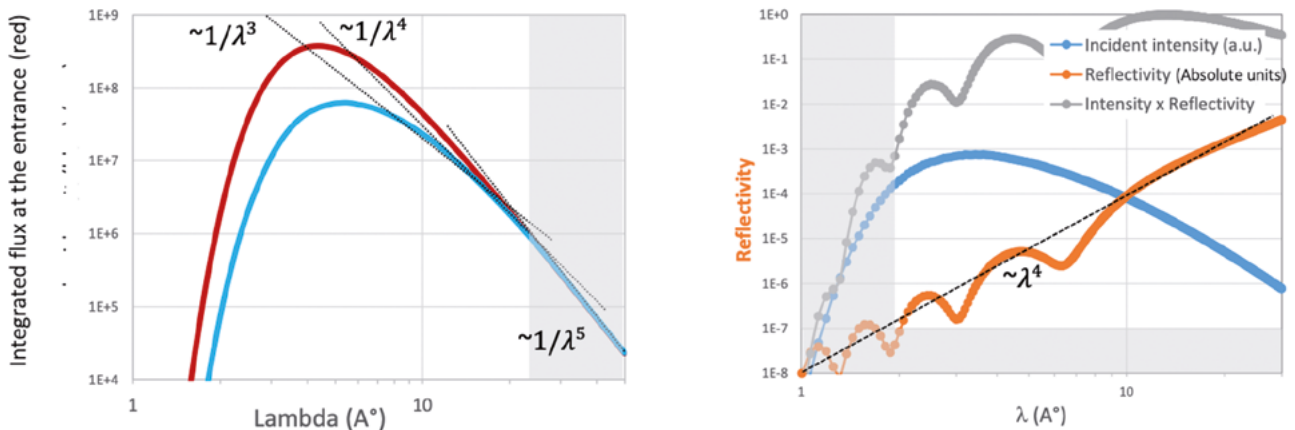


Figure A27 : (a) Émission d'un spectre de neutrons par un modérateur à une température de 20 K (courbe rouge). Après un voyage de quelques mètres dans un guide de neutrons (avec un revêtement $m = 3$), la distribution en longueur d'onde est modifiée (courbe bleu). La dépendance en longueur d'onde suit une loi allant de $1/\lambda^3$ à $1/\lambda^5$ dans la région utile ($\lambda < 25 \text{ \AA}$) (b) Exemple de mesures de réflectivité sur un substrat de silicium oxydé (5 nm) dans une configuration typique du réflectomètre HERMES au LLB ($\theta_i = 4^\circ$). (en bleu) intensité incidente sur l'échantillon I_{in} ; (en gris) intensité mesurée I_{mes} ; (orange) réflectivité normalisée $R = I_{mes} / I_{in}$.

Si on se place dans la perspective d'un instrument « basse résolution » adapté à des études de la matière molle sur des couches et des interfaces très minces (2-5 nm), une résolution $\delta Q/Q$ de l'ordre de 10 % est suffisante. Dans l'hypothèse d'une source dont la fréquence de répétition est de 20 Hz et la longueur des impulsions est de 2 ms, la Figure A28 montre les courbes de résolution et les gammes de longueur d'ondes utilisables pour des instruments de différentes longueurs. Un instrument possédant une grande base de vol (courbe verte, 32 m) permet d'obtenir des résolutions en énergie élevées mais la bande de longueur d'ondes utilisable est réduite ($\lambda < 6 \text{ \AA}$). À l'inverse, un instrument court (courbe bleue, 8 m) aura une résolution en énergie plus faible mais pourra exploiter une gamme de longueur d'onde plus large ($\lambda < 24 \text{ \AA}$). Les simulations montrent que la résolution en énergie se dégrade rapidement aux courtes longueurs d'ondes jusqu'à atteindre des valeurs supérieures à 30 %. Ce problème peut être pallié par l'utilisation d'un double disque chopper qui permet de travailler à une résolution $\delta Q/Q$ constante. Cette résolution est simplement fixée par la distance entre les deux disques du chopper. En pratique, cette distance varie de quelques cm pour les hautes résolutions jusqu'à plusieurs dizaines de cm si on souhaite travailler à des résolutions de l'ordre de 10 %. Expérimentalement, cette distance peut être ajustée, aux dépend du flux neutronique, en fonction des besoins de l'expérience à réaliser.

Dans le contexte d'une source sur laquelle on souhaite privilégier des expériences in situ ou couplant plusieurs techniques expérimentales tout en maximisant le flux, nous proposons de construire un instrument le plus court possible. Un instrument court permet de maximiser la gamme en longueurs d'onde et donc de réaliser des expériences couvrant une très grande gamme de vecteurs de diffusion sans changer de configuration expérimentale. Ce dernier point est particulièrement important si on souhaite par exemple étudier une cinétique de manip ou bien l'évolution d'un système operando ou utiliser une technique de caractérisation en parallèle. Une configuration instrumentale fixe semble le choix le plus avisé. Nous proposons donc une configuration avec un instrument de 12 m, permettant d'exploiter des longueurs d'onde allant jusqu'à 16 Å, couplé à un système de double disque chopper permettant d'ajuster la résolution de manière continue (voir Figure A28b).

Réflectomètre à haut flux (horizontal)	
Gamme de longueurs d'onde Résolution	$1 < \lambda < 20 \text{ \AA}$ (modérateur bispectral) $3\% < \delta\lambda/\lambda < 10\%$.
Taille de l'échantillon Type d'échantillons	20 à 50 cm ² (vus par la tranche) Films minces sur substrats
Divergence angulaire	0.3° à 0.1° x 3°.
Périodicité cristallographique Distances inter-réticulaires	Jusqu'à 30 Å $0.45 \text{ \AA} < d < 50 \text{ \AA}$
Temps de mesure	Max 3 heures par mesure de réflectivité (pour $R_{\min} = 10^{-6}$)
Environnements échantillons Température Autre	-50°C – 100°C Atmosphère contrôlée, cellule air-liquide et solide-liquide

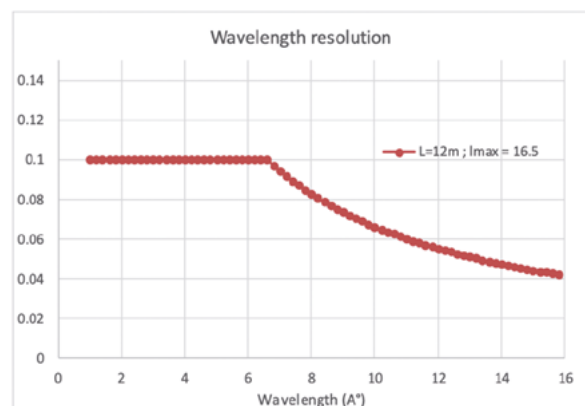
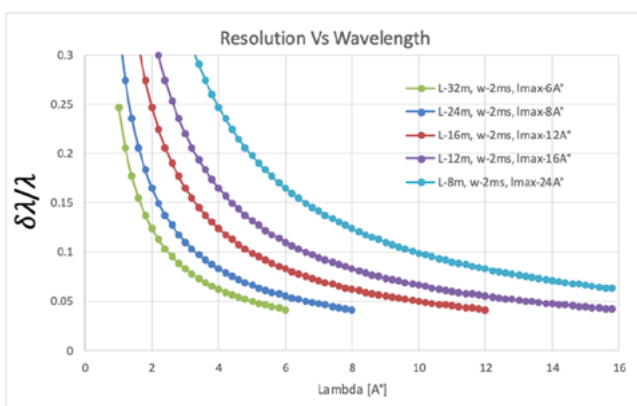


Figure A28 : (a) Résolution $\delta\lambda/\lambda$ pour différentes configurations instrumentales ($L=8$ à 32 m). (b) La fonction de résolution $\delta\lambda/\lambda$ et la gamme de longueur d'onde utilisable (de 1 à 16 Å) pour un instrument de longueur 12 m utilisant un « double disk chopper » pour améliorer la résolution aux courtes longueurs d'ondes.

Nous considérons donc un instrument constitué d'un guide droit de longueur 8 m avec un coating $m = 4$ et une section de $100 \times 50 \text{ mm}^2$; un collimateur de 2 m avec $F_1 = 2 \text{ mm}$ et $F_2 = 2 \text{ mm}$ équipé d'un guide latéral avec un coating $m = 4$ et un détecteur situé à 2 m de la position échantillon.

Les performances d'un tel instrument ont été simulées à l'aide du logiciel McStas. La Figure A29 présente des exemples de mesures sur un système de référence Ni(20nm) // Si pour différents angles d'incidence sur le système. Un angle d'incidence de 6° permet de réaliser une mesure donnant accès à des réflectivités de l'ordre de 10^{-6} pour des vecteurs de diffusion de l'ordre de $Q \sim 0.4 \text{ \AA}^{-1}$ avec une statistique et une résolution tout à fait satisfaisante.

Le flux incident sur l'échantillon est de $8 \times 10^6 \text{ n/cm}^2/\text{s}$, ce qui est comparable aux instruments CRISP à ISIS et HERMES au LLB ($10^7 \text{ n/cm}^2/\text{s}$).

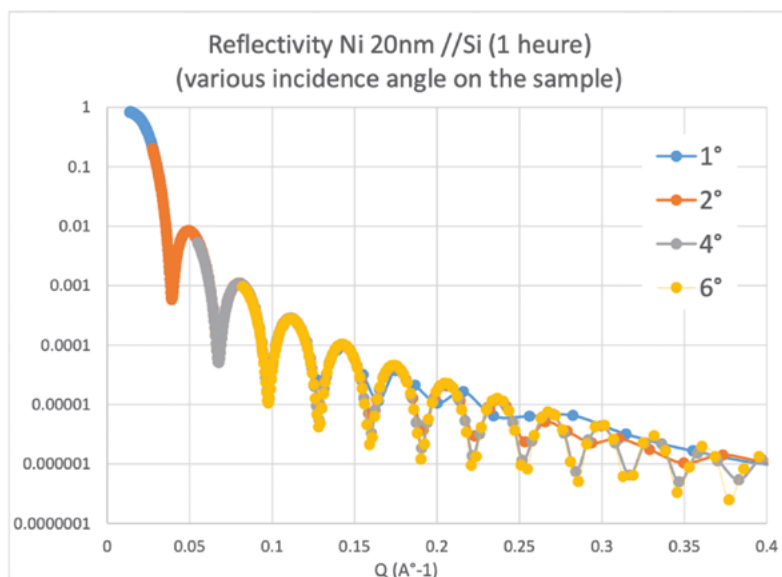


Figure A29 : Simulation de mesures de réflectivité sur un système Ni(20nm) // Si pour différents angles d'incidence. Il est possible d'accéder à une gamme de réflectivité de 10^6 en un temps raisonnable de 1 heure.

L'instrument actuel est optimisé pour des échantillons typiques de « matière molle » déposés sur des wafers de 50 mm (2 pouces).

Dans le cas d'études sur des échantillons de petite taille (typ. $< 1 \text{ cm}^2$), le concept SELENE a été développé au cours de la dernière décennie et sera implémenté sur l'instrument ESTIA à ESS. Le retour d'expérience de cet instrument en termes de performance et d'exploitation permettra d'évaluer s'il est utile de considérer tel instrument sur une source de type HiCANS. Il n'y a techniquement aucun obstacle puisque la structure temporelle de ESS et celle de ICONE sont très proches.

5.3 Diffusion de neutrons aux petits angles (DNPA – SANS)

Des considérations similaires s'appliquent aux instruments de diffusion aux petits angles en termes de résolution $\delta Q/Q$. Un instrument de SANS pourrait être assez court ($< 15 \text{ m}$) tout en étant installé proche de la source et en pouvant utiliser la totalité des pulses longs.

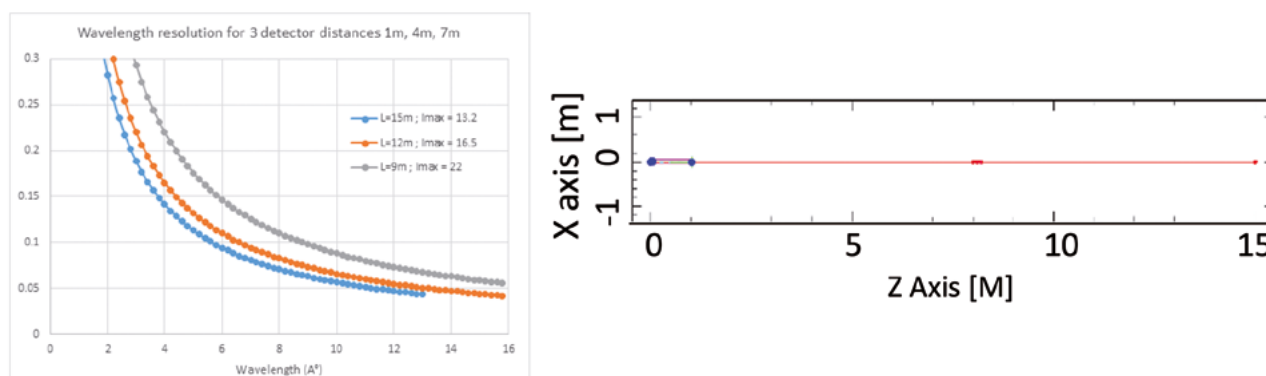


Figure A30 : (a) Résolution en longueur d'onde en fonction de la longueur de la base de vol. Il est possible de majorer la résolution à une valeur constante (ex. 10 %) par l'utilisation d'un double disk chopper. (b) Schéma de l'instrument utilisé pour les simulations Monte-Carlo. L'instrument est précédé d'un guide droit $m = 2$.

Annexe 6

Infrastructure

La construction d'une installation de diffusion neutronique nécessite un bâtiment avec des besoins spécifiques pouvant accueillir un accélérateur, des cibles, des instruments de diffusion neutronique, des ateliers de maintenance et des bureaux.

Une étude a été réalisée par la société EGIS sur la base d'une installation utilisant un accélérateur de 25 MeV, 2 cibles de production de neutrons et une suite instrumentale de 10 instruments de diffusion neutronique [25].

Le schéma de la Figure A31 représente l'organisation fonctionnelle de l'ensemble du projet.

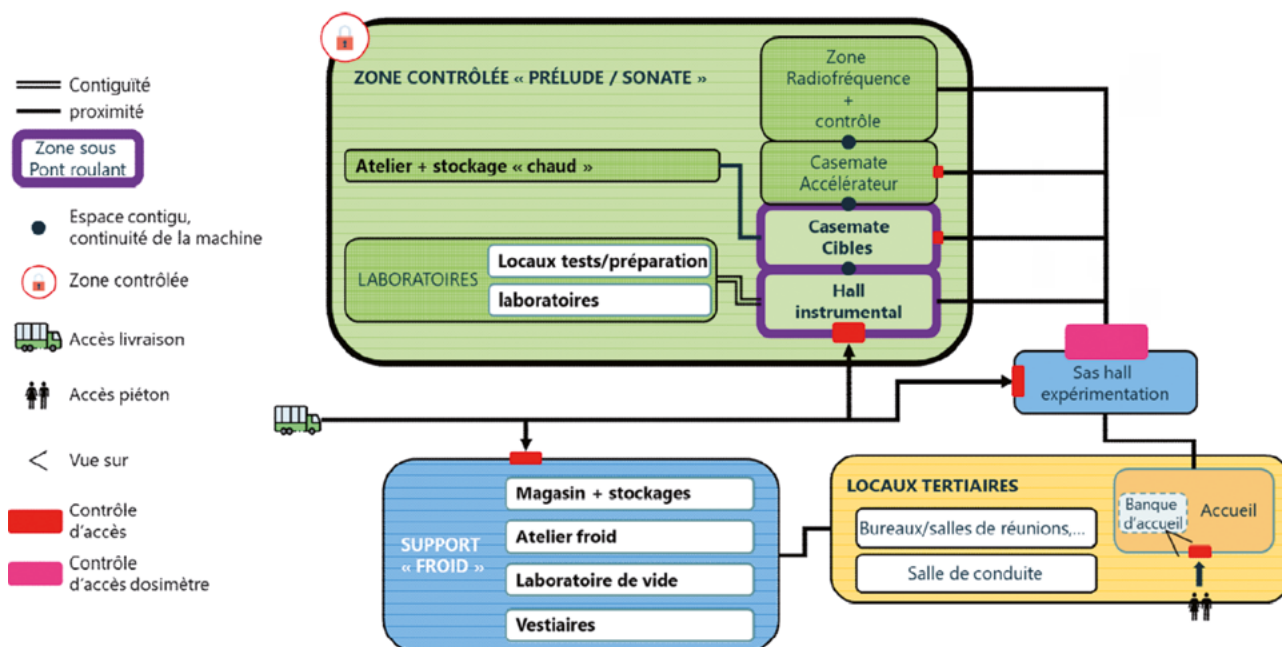


Figure A31 : Schéma fonctionnel général d'une installation de diffusion neutronique.

Le concept de source HiCANS étant nouveau, la possibilité de développer le projet en 3 phases distinctes successives a été étudié. Les 3 phases envisagées sont

1. la construction d'un prototype démonstrateur avec une énergie réduite et un nombre limité d'instruments de diffusion neutronique installé sur une cible unique de production de neutrons ;
2. l'extension du projet avec une deuxième cible avec la construction de nouveaux instruments, ainsi que l'augmentation de l'énergie du faisceau de protons ;
3. la construction de locaux tertiaires pour l'accueil des scientifiques et des chercheurs extérieurs.

²⁵ Opération de construction du projet Sonate Programme fonctionnel, Étude EGIS (2022)
Opération de construction du projet Sonate Programme technique, Étude EGIS (2022)

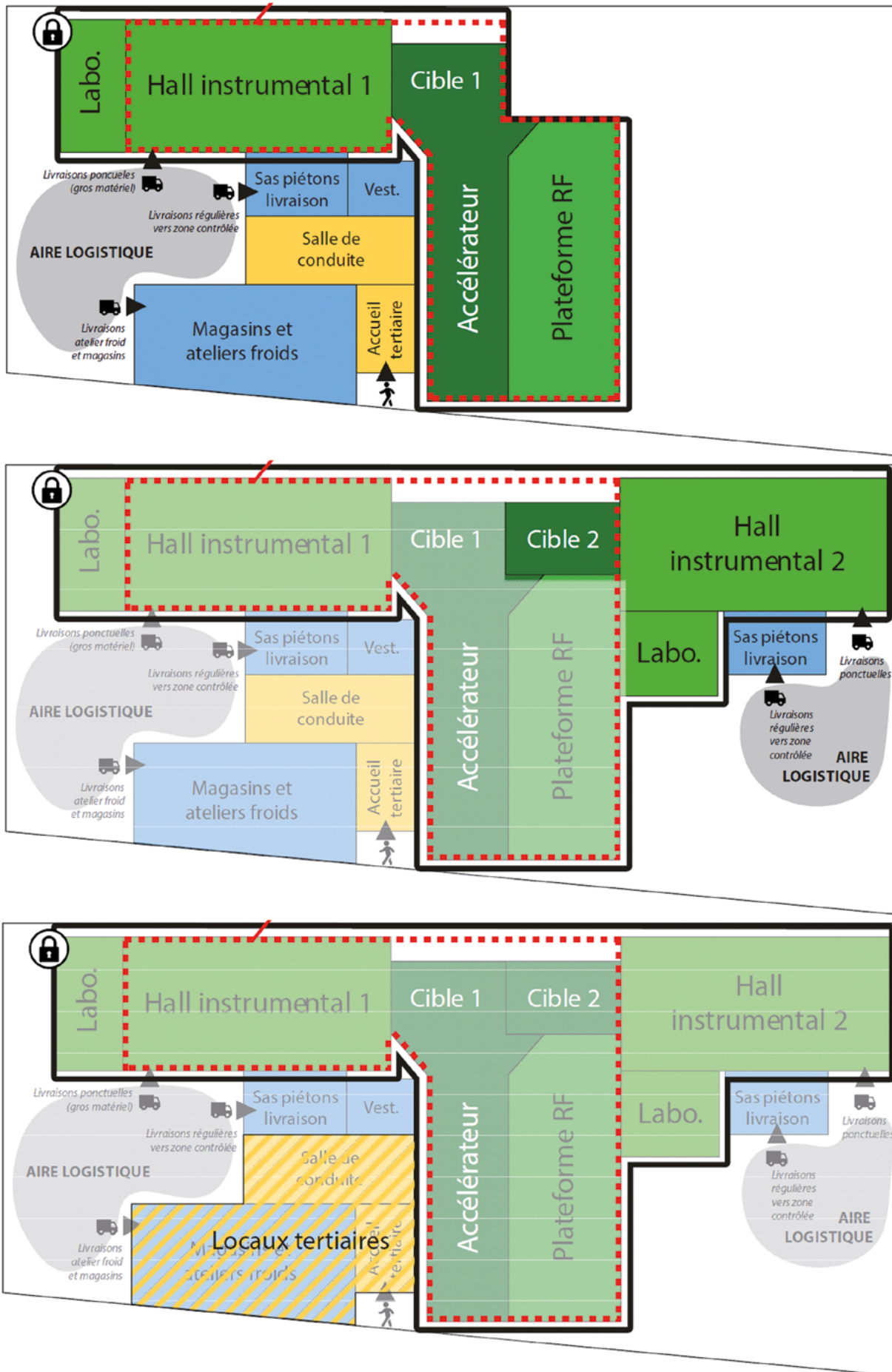


Figure A32 : Proposition d'implantation en 3 phases. (Phase 1) Un premier accélérateur d'énergie moyenne (8-13 MeV), une plateforme radiofréquence, une cible, un hall expérimental, (Phase 2) Augmentation de l'énergie de l'accélérateur et construction d'un deuxième hall instrumental, (Phase 3) Création d'espaces tertiaires au-dessus de l'ensemble Magasins et ateliers froids.

Entités et sous-entités	Nb de locaux	Surface utile	Total surface utile	Surf. ext.	Phase Prélude	Phase Sonate	Phase Tertiaire
ZONE CONTROLEE			2042		1371	671	0
EXPERIMENTATION			1000				
ACCELERATEUR			862				
LABORATOIRES			180				
SUPPORT "FROID"			400		235	165	0
SAS LIVRAISON	2	50	100		50	50	
VESTIAIRES			70				
MAGASIN			135				
ATELIER			95				
ESPACES TERTIAIRES			864		140	0	724
Accueil			20		20		
Salle de conduite	1	60	60		60		
Bureaux - administration			88				
Bureaux - techniciens			184				
Bureaux - physiciens			272				
Bureaux - visiteurs			48				
Salles de réunion			62				
Locaux supports			130				
ESPACES EXTERIEURS				692			
Stationnement				688			
Stockage bouteilles de gaz	pm						
Réservoir d'azote liquide	1	4		4	4		
Stockage déchets	pm						
Aire de livraison	pm						
TOTAL (hors circulations et espaces extérieurs et inutilisés)			3306		1746	836	724
TOTAL surfaces extérieures				692			

Tableau A1 : Surfaces des différents équipements.

Le coût total TDC [168] d'une telle installation (accélérateur et instrumentation neutronique non compris) est de 18 M€(2022).

¹⁶⁸ TDC: Toutes Dépenses Confondues (valeur TTC + frais Maîtrise d'Ouvrage + Maîtrise d'œuvre + aléas + provisions actualisation et révision). Ratio HT/TDC fixé à 1.6.

Annexe 7

Évaluation des risques liés à la production de neutrons et de radioéléments lors de l'opération de la source ICONÉ

En France, les installations de recherche peuvent être classées en différentes catégories soumises à différentes réglementations :

- ICPE, installations classées protection de l'environnement
- CSP, Code de la santé publique
- INB, installations nucléaires de base

La classification installations nucléaires de base (INB) recouvre uniquement les réacteurs nucléaires, les installations traitant des combustibles nucléaires et les accélérateurs de particules dont l'énergie des ions est supérieure à 300 MeV [169].

Depuis 2018, les accélérateurs de particules sont soumis au Code de la santé publique [170]. La réglementation définit les contraintes liées à la fabrication ou à la production de sources de rayonnement ionisants. Les éléments de l'accélérateur ne sont pas soumis à ces contraintes. Les déchets, définis au sens des pièces qui n'ont pas d'utilisations ultérieures, ne sont pas non plus soumis à ces contraintes.

On notera que suivant la nomenclature Annexe 4/2797 du CSP, les installations de type « accélérateurs de particules » ont l'autorisation de gérer des quantités de déchets supérieures à 10 m³.

Certaines activités telles que l'opération de tours aéroréfrigérantes ou de l'entreposage de déchets sont soumises à la réglementation ICPE.

L'objectif de cette annexe est de faire l'inventaire des radioéléments produits lors de l'opération de la source ICONÉ. Nous considérons deux types d'installations :

- PRELUDE, un démonstrateur dont l'énergie des protons est de 13 MeV ;
- ICONÉ, une installation dont l'énergie des protons est de 25 MeV.

Cette distinction est faite principalement parce que la production de radionucléides dépend quantitativement et qualitativement de l'énergie des protons incidents sur la cible. Une énergie de protons plus élevée conduit à l'ouverture de nouveaux canaux d'activation et à la production de nouveaux types de radionucléides.

7.1 Activation de l'accélérateur

Les paramètres utilisés dans ces calculs sont :

- des faisceaux de protons de puissance 80 kW et d'énergie 13 MeV et 25 MeV ;
- deux types de matériaux cibles sont considérés :
 - o béryllium pur,
 - o AlBeMet ,
- l'hypothèse d'un fonctionnement continu d'une durée de 2000 heures est considérée.

	Puissance 80 kW	$\langle I \rangle$ [mA]	Flux protons [p/s]
PRELUDE	Ep=13 MeV	6,15	$3,85 \times 10^{16}$
ICONÉ	Ep=25 MeV	3,20	$2,00 \times 10^{16}$

Tableau A2 : Caractéristiques du faisceau de protons pour un fonctionnement de PRELUDE et ICONÉ à une puissance faisceau de 80 kW.

¹⁶⁹ Décret n°2007-830 du 11 mai 2007 relatif à la nomenclature des installations nucléaires de base. Article 3.

¹⁷⁰ Décret n° 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire.

7.1.1 Méthodologie

Dans cette étude préliminaire, on se focalise sur l'ensemble cible-système de refroidissement qui sera la source principale de production de radioéléments. On néglige pour le moment l'activation des pièces en amont de l'accélérateur (source d'ions, RFQ, DTL) qui devraient subir des activations très inférieures à celles de la cible.

L'**activation proton** de la cible est évaluée en deux étapes. Tout d'abord, le spectre en énergie des protons dans la cible est déterminé avec le code **SRIM2008** (Ziegler & al, 2010). Ensuite le code d'activation **FISPACT-II** (version 4.0) (Sublet & al, 2017) est utilisé avec la bibliothèque de données nucléaires **TENDL-2019** (bibliothèque de données nucléaires décrivant les interactions proton/matériau).

L'**activation neutron** des éléments de l'ensemble cible est évaluée en deux étapes. Tout d'abord, le flux et le spectre en énergie des neutrons dans les différents éléments sont évalués avec le **code de simulation Monte-Carlo Geant4** (Allisson & al, 2016). Le code **FISPACT-II** est alors utilisé avec la bibliothèque de données nucléaires **JEFF-3.3**. L'évaluation des caractéristiques du flux de neutrons interagissant avec l'ensemble cible nécessite d'une part l'évaluation des caractéristiques (spectre en énergie, distribution angulaire) des neutrons produits lors de la réaction proton/cible et nécessite d'autre part de faire des hypothèses sur la géométrie et les matériaux de l'ensemble cible/modérateur/réfecteur/blindage. Ces derniers points sont détaillés dans la partie C.

Un modèle simplifié de l'ensemble cible est présenté sur la figure ci-dessous. Le design définitif de la cible n'est pas figé, mais le prototype de cible existant (fonctionnel) est une hypothèse de départ réaliste.

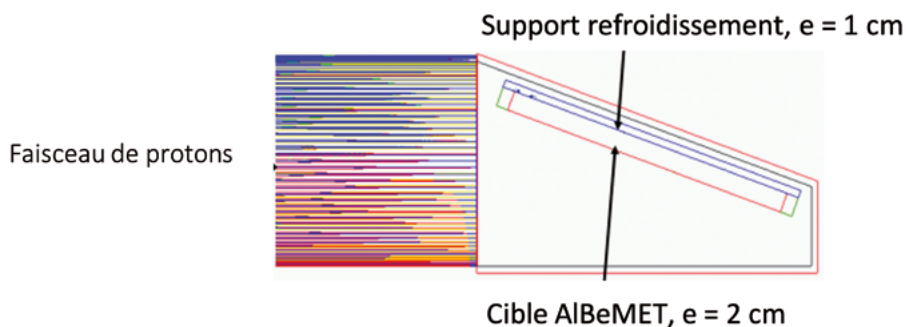


Figure A33 : Exemple de modèle simplifié pour l'interaction du faisceau de protons avec la cible.

Par cm^2 de surface cible, le flux de protons interagissant avec la cible est de $3,85 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2/\text{s}$ pour des protons de 13 MeV et de $2,00 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2/\text{s}$ pour des protons de 25 MeV.

Le volume de la cible est de 442 cm^3 ($24 \times 11,5 \times 1,6 \text{ cm}^3$) et celui du support en cuivre est de 180 cm^3 ($26 \times 11,5 \times 0,6 \text{ cm}^3$). Les masses irradiées des matériaux sont présentées dans le Tableau A3.

	Volume [cm ³]	Densité [g/cm ³]	Masse [kg]	Flux total [n/cm ² /s] Ep=13 MeV		Flux total [n/cm ² /s] Ep=25 MeV	
				Thermique (E<500 meV)	Total	Thermique (E<500 meV)	Total
Cible Béryllium	442	1,848	0,82	2.6e+11	2.1e+12	4.0e+11	3.8e+12
Cible AlBeMet	442	2,1	0,93	2.6e+11	2.1e+12	4.0e+11	3.8e+12
Cible Tantale	442	16,4	7,25	6.2e+09	1.2e+11	4,6e+10	9.0e+11
Support Cuivre	180	8,7	1,57	1.0e+10	7.3e+10	7.5e+10	5.5e+11

Tableau A3 : Récapitulatif des masses de matières irradiées de l'ensemble cible.

7.1.2 Matériaux mis en œuvre

7.1.2.1 Cible

Le prototype de cible actuel le plus performant et durable utilise de l'AlBeMET :

	Be	Al	O	C	Mn	Cr	Ta	Au	W	Mo	Hg	Co
Pourcentage massique [%w]	62	37	0,2	0,1	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875

Tableau A4 : Composition chimique donnée en pourcentage massique du matériau AlBeMet de chez Materion.

7.1.2.2 Support de refroidissement

Le support de refroidissement est essentiellement constitué de MoldMAX. Le faisceau de protons n'interagit pas avec le support de refroidissement. La profondeur de pénétration des protons est inférieure à l'épaisseur de la cible.

	Cu	Ni	Si	Cr
Pourcentage massique [%w]	90,04	7,28	1,74	0,94

Tableau A5 : Composition chimique en pourcentage massique du cuivre MoldMaxV, utilisé comme support de la cible.

7.1.3 Calculs d'activation à $E_p = 13$ MeV

7.1.3.1 Cible béryllium – $E_p = 13$ MeV

Nucleus	Activity [Bq]	$T_{1/2}$	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
Be7	4,40E+07	53j	4,40E+07	4,40E+07
C10	5,13E+06			
C11	2,82E+03			
H3	3,32E-05			
Be10	3,69E-11			

Tableau A6: Activation proton de la cible en béryllium pur pour des protons de 13 MeV

Nucleus	Activity [Bq]	$T_{1/2}$	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
He6	3,65E+12	0.8	0	0
H3	3,35E+07	12,3 ans	3,35E+07	3,35E+07
Be10	1,02E+04			

Tableau A7: Activation neutron de la cible en en béryllium pur pour des protons de 13 MeV.

7.1.3.2 Cible ALBeMET – E_p = 13 MeV

Nucleus	Activity [Bq]	T _{1/2} (secondes)	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
Si27	3,91E+12	4.15	0	0
Na21	6,75E+10	22.4	5.8E+2	0
N13	6,27E+10	594	3.1E+10	0
Al26m	2,25E+10	6.35	0	0
Mn52m	2,06E+10	1260	2,06E+10	0
Mn52	5,41E+09	5.6d	5,41E+09	2.3E+9
Tc96	4,54E+09			
Tc95	3,10E+09			
Fe55	2,50E+09			
Tc96m	1,97E+09			
Co55	1,81E+09			
Tc94	1,50E+09			
F18	1,47E+09			
Hg197	1,16E+09			
Tl201	9,42E+08			
Re183	9,40E+08			
Tl200	9,22E+08			
Re182m	9,01E+08			
Tl199	8,12E+08			
Tc100	7,57E+08			
Rest	1,05E+10			

Tableau A8: Activation proton de la cible en ALBeMet pour des protons de 13 MeV.

Nucleus	Activity [Bq]	T _{1/2} (secondes)	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
He6	2,57E+12	0.8	0	0
Al28	3,90E+11	134.4	1.77E+10	0
Mg27	2,60E+11	567.6	1.25E+11	0
Au198	8,56E+10	2.7j	8.64E+10	1.42E+10
Mn56	2,60E+10			
Ta182	1,09E+10			
W187	9,10E+09			
Hg197	2,33E+09			
Co60	2,08E+09			
Cr51	1,18E+09			
Ta180	6,04E+08			
Hg203	5,74E+08			
Ta183	4,71E+08			
W185	3,46E+08			
Hg199m	3,24E+08			
Au196	3,06E+08			
Mo99	1,90E+08			
Tc99m	1,67E+08			
V52	1,37E+08			
W181	8,40E+07			
Rest	3,46E+08			

Tableau A9: Activation neutron de la cible en ALBeMet pour des protons de 13 MeV et une puissance faisceau de 80 kW.

7.1.3.3 Support Cuivre – E_p = 13 MeV

Nucleus	Activity [Bq]	T _{1/2}	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
Cu64	8,15E+12	45720	8,08E+12	8,49E+08
Cu66	1,71E+12	307.2	4,42E+11	0
Co58	8,81E+10	70j	8,8E+10	8,2E+10
Co58m	5,71E+10			
Al28	1,96E+10			
Cr51	1,89E+10			
Ni65	1,21E+10			
Co62	1,80E+09			
Co60	1,12E+09			
V52	9,97E+08			
Fe55	8,20E+08			
Ni63	6,55E+08			
Al29	6,15E+08			
Si31	4,74E+08			
Cr55	3,20E+08			
Co57	1,93E+08			
Co61	1,67E+08			
Cu62	1,38E+08			
V53	4,39E+07			
Mg27	3,37E+07			
Rest	4,24E+07			

Tableau A10 : Activation neutron du Support Cuivre pour des protons de 13 MeV.

7.1.4 Calculs d'activation à E_p = 25 MeV

7.1.4.1 Cible béryllium – E_p = 25 MeV

Nucleus	Activity [Bq]	T _{1/2}	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
Be7	1,06E+13	53j	1,06E+13	1,06E+13
Li8	4,54E+11	0.8	0	0
H3	1,91E+11			
B8	6,79E+10			
C10	1,19E+08			
C11	2,53E+05			
Be10	2,58E-06			

Tableau A11 : Activation proton d'une cible béryllium pure pour des protons de 25 MeV.

Nucleus	Activity [Bq]	T _{1/2}	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
He6	5,42E+12	0.8	0	0
Li8	1,79E+11	0.8	0	0
Li9	2,32E+10			
H3	1,05E+10			
Be10	1,58E+04			

Tableau A12 : Activation neutron d'une cible béryllium pure pour des protons de 25 MeV.

7.1.4.2 Cible AlBeMET – E_p = 25 MeV

Nucleus	Activity [Bq]	T _{1/2}	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
Be7	7,40E+12	53j	7,40E+12	7,40E+12
Si27	6,64E+12	4.15	0	0
Al26m	3,27E+12			
Mg23	4,14E+11			
Li8	3,16E+11			
H3	1,33E+11			
N13	1,31E+11			
Al25	9,40E+10			
Na21	8,02E+10			
Si26	5,46E+10			
Cr51	5,14E+10			
B8	4,72E+10			
O15	4,34E+10			
F17	3,67E+10			
Co58m	2,89E+10			
Co58	2,54E+10			
Mn52m	2,09E+10			
W179	1,75E+10			
C11	1,71E+10			
Ne19	1,55E+10			
Rest	2,60E+11			

Tableau A13 : Activation proton de la cible AlBeMet pour des protons de 25 MeV.

Nucleus	Activity [Bq]	T _{1/2}	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
He6	3,81E+12	0.8	0	0
Mg27	6,33E+11			
Al28	6,04E+11	134.5	2.7E+10	0
Au198	1,32E+11			
Li8	1,26E+11	0.4	0	0
Mn56	4,02E+10			
Ta182	1,68E+10			
Li9	1,63E+10			
Na24	1,50E+10			
W187	1,41E+10			
H3	7,68E+09			
Hg197	3,97E+09			
Cr51	3,73E+09			
Ta180	3,44E+09			
Au196	3,24E+09			
Co60	3,22E+09			
Co58	2,02E+09			
N16	1,44E+09			
Ta183	1,12E+09			
Hg203	1,01E+09			
Rest	7,04E+09			

Tableau A14 : Activation neutron de la cible AlBeMet pour des protons de 25 MeV.

7.1.4.3 Support Cuivre – Ep = 25 MeV

Nucleus	Activity [Bq]	T _{1/2}	Activité [Bq] (10 minutes)	Activité [Bq] (7 jours)
Cu64	1,38E+13	45720	1,37E+13	4,76E+00
Cu66	2,64E+12	307.2	6,82E+11	0
Cu62	1,57E+12	582	7,68E+11	0
Co58	1,68E+11	70j	1,68E+11	1,68E+11
Co58m	1,19E+11			
Al28	5,97E+10			
Cr51	4,52E+10			
Ni65	4,22E+10			
Co57	3,30E+10			
Co62	1,77E+10			
Co61	1,68E+10			
Ni57	1,22E+10			
Co60	4,40E+09			
V52	4,28E+09			
Cu61	2,73E+09			
Fe55	2,16E+09			
Al29	1,91E+09			
Ni63	1,18E+09			
Co56	1,13E+09			
Fe59	8,02E+08			
Rest	3,73E+09			

Tableau A15 : Activation neutron du support de la cible en béryllium pure pour des protons de 25 MeV.

7.2 Activation du modérateur et des protections biologiques

La cible de production de neutrons est installée dans un modérateur de neutrons composé d'eau, lui-même installé au sein d'un blindage radiologique composé de plomb de polyéthylène.

Aucune activation majeure du modérateur et des protections biologiques n'est attendu. La production de tritium via l'irradiation des neutrons sur l'eau légère du modérateur est négligeable. L'installation n'utilisera pas d'eau lourde.

Les fuites de neutrons hors du shielding de l'ensemble cible-modérateur conduiront à une légère activation des murs en béton de la casemate. La casemate en béton sera dimensionnée pour que le débit de dose à l'extérieur de la casemate soit inférieur à 0,5 µSv/heure.

L'interaction des neutrons avec l'argon de l'air de la casemate conduit à la production d'Ar41. La valeur d'équilibre est atteinte au bout de quelques heures en raison de la courte durée de vie de Ar41 (110 minutes).

Le volume de la casemate cible serait de l'ordre de 150 m³.

L'activité volumique serait de l'ordre 3300 Bq/m³ (ordre de grandeur) [171]

En pratique, l'activation d'autres éléments de l'ensemble cible dominera le débit de dose de Ar41 dans la casemate.

Les faisceaux de neutrons extraits de l'ensemble cible et de la casemate seront conduits aux spectromètres dans des guides sous vide. Il n'y aura donc aucune activation de l'air dans le hall instrumental.

¹⁷¹ Puisque le débit de dose efficace pour 1 Bq/m³ d'Ar 41 est égal à 2,2 10⁻⁴ µSv/h, le débit de dose ambiant serait donc de 0,7 µSv/heure dans la casemate sans renouvellement de l'air dans la casemate. Si on souhaite descendre à un niveau de 0,5 µSv/heure, il sera nécessaire d'attendre 2 heures avant d'autoriser l'accès à l'intérieur de la casemate.

7.3 Interactions des neutrons avec les instruments de diffusion neutronique

Les neutrons produits par la source seront acheminés via des guides sous vide à différents instruments de diffusion neutronique. Ces neutrons seront diffusés/absorbés par les échantillons étudiés et mesurés dans des détecteurs de neutrons.

Les mesures habituelles de protection des personnels seront appliquées. L'expérience sur les instruments existants du Laboratoire Léon Brillouin montre qu'il est facilement possible d'atteindre des débits de dose inférieurs à 0,5 $\mu\text{Sv}/\text{heure}$ autour des instruments de diffusion neutronique (via des protections biologiques adaptées).

Les échantillons suivront le protocole habituel de suivi (contrôle radiologique + traçage).

7.4 Autres sources de rayonnement

L'utilisation de klystrons pour la production d'ondes radio-fréquence pour le fonctionnement de l'accélérateur conduit à la production de rayons X. De tels klystrons sont déjà en opération sur l'installation IPHI et des mesures de protection radiologiques sont en place.

L'utilisation d'amplificateurs à l'état solide, qui est une autre option technique considérée, ne conduirait pas à la production de rayonnement X.

Annexe 8

Laboratoires Français utilisateurs de techniques neutroniques sur les dernières années

8.1 Laboratoires Français ayant utilisé du temps ILL sur la période 2016 - 2021

	Laboratoire	Ville
1	AGROSUP DIJON	DIJON
2	AIX-MARSEILLE UNIVERSITY	MARSEILLE
3	ANDRA, CHATENAY MALABRY	CHÂTENAY-MALABRY
4	AREVA NP ,LYON	LYON
5	ARTS ET METIERS PARISTECH, METS ,METZ	METZ
6	BORDEAUX INP/ ENSCBP, PESSAC	PESSAC
7	C-TEC CONTELLIUM TECHNOLOGY CENTER SAS	VOREPPE
8	CBS, CNRS UMR5048 ,MONTPELLIER	MONTPELLIER
9	CEA - DSM/IRAMIS/LLB/GSBD ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
10	CEA - SPR, GRENOBLE	GRENOBLE
11	CEA CADARACHE - DEN/DEC/CP, SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE	Saint-Paul-Lez-Durance
12	CEA CADARACHE DEN/DEC/SFER/LCU, SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE	SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
13	CEA CADARACHE DEN/DEC/SPUA/LMPC, SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE	ST PAUL LEZ DURANCE
14	CEA GRENOBLE DRT/LITEN	GRENOBLE
15	CEA GRENOBLE DRT/LITEN/DSEN/SGPAC/LPAC	GRENOBLE
16	CEA GRENOBLE DRT/LITEN/DTEN/STN/LT2N	GRENOBLE
17	CEA GRENOBLE DSV/IRTSV/CBM	GRENOBLE
18	CEA GRENOBLE DSV/IRTSV/LPCV	GRENOBLE
19	CEA GRENOBLE INAC/SI3M/PCI	GRENOBLE
20	CEA GRENOBLE INAC/SPRAM, GRENOBLE	GRENOBLE
21	CEA GRENOBLE INAC/SPSMS	GRENOBLE
22	CEA GRENOBLE INAC/SYMMES, GRENOBLE	GRENOBLE
23	CEA GRENOBLE/DRT/LITEN/DTH/LCPEM	GRENOBLE
24	CEA LETI, GRENOBLE	GRENOBLE
25	CEA MARCOULE DTCD-SECM-LDMC	BAGNOLS SUR CEZE
26	CEA Paris-Saclay	Gif-sur-Yvette
27	CEA SACLAY IRFU, DRF	GIF-SUR-YVETTE
28	CEA SACLAY/DRF/IRFU/DPHN ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
29	CEA SPESI ST PAUL LEZ DURANCE	ST PAUL LEZ DURANCE
30	CEA-CADARACHE LLCC ,SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE	ST PAUL LEZ DURANCE
31	CEA, DRF/NIMBE/LIONS	GIF-SUR-YVETTE
32	CEA/CNRS UMR 3299 SIS2M-LIONS, GIF-SUR-YVETTE	GIF SUR YVETTE
33	CEA/DIF/DPTA, BRUYERES LE CHATEL	BRUYERES-LE-CHATEL

	Laboratoire	Ville
34	CEA/DPC/SCM, SACLAY ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
35	CEA/DRF/SYMMES/STEP	GRENOBLE
36	CEA/DSM/DRECAM/SCM, SACLAY ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
37	CEA/DSM/IRFU/SPHN, SACLAY ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
38	CEA/SPINTEC	GRENOBLE
39	CEMES - CNRS, TOULOUSE	TOULOUSE
40	CENBG, BORDEAUX ,GRADIGNAN	Gradignan
41	CENTRALE MARSEILLE	MARSEILLE
42	CENTRALESUPELEC ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
43	CENTRE DE BIOCHIMIE STRUCTURALE, MONPELLIER	MONPELLIER
44	CENTRE DE RECHERCHE PAUL PASCAL ,PESSAC	PESSAC
45	CEP, UNIVERSITÉ PARIS SUD ,CHATENAY MALABRY	CHATENAY MALABRY
46	CERMAV-CNRS	St Martin d'Hères
47	CHU HENRI MONDOR, CRETEIL	Creteil
48	CIRIMAT UMR 5085	TOULOUSE
49	CNAM GRENOBLE	ST MARTIN D'HERES
50	CNCE/DSM/DAPNIA/SPHN, SACLAY ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
51	CNCE/LLB-LAB LEON BRILLOUIN, SACLAY ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
52	CNRS - IBPC/LBT, PARIS	Paris
53	CNRS - ICS ,STRASBOURG	STRASBOURG
54	CNRS - IGE UMR 5001 GRENOBLE	SAINT MARTIN D HERES
55	CNRS - IMM	MARSEILLE
56	CNRS - IRCER	Limoges
57	CNRS - SIMaP Laboratory	SAINT MARTIN D'HERES
58	CNRS / IBS	Grenoble Cedex 9
59	CNRS GRENOBLE - INSTITUT NEEL	Grenoble
60	CNRS IBCP LYON INSTITUT DE BIOLOGIE ET CHIMIE DES PROTEINES	LYON
61	CNRS UMR5513 LTDS	ECULLY
62	CNRS-BIP ,MARSEILLE	MARSEILLE
63	CNRS-CBMN-UMR 5248	PESSAC
64	CNRS-IPGP, PARIS	PARIS
65	CNRS-LNCMI TOULOUSE	TOULOUSE
66	CNRS, GRENOBLE	GRENOBLE
67	CNRS, INSTITUT DE BIOLOGIE PHYSICO-CHIMIQUE ,PARIS	PARIS
68	CNRS, PARIS / UMR7590-IMPIC	PARIS
69	CNRS/BIOENERG & INGEN, MARSEILLE	MARSEILLE
70	CNRS/CEMHTI, ORLEANS	ORLEANS
71	CNRS/CERMAV-CNRS-UGA, GRENOBLE	GRENOBLE
72	CNRS/COLLEGE DE FRANCE/LCMCP ,PARIS	PARIS
73	CNRS/CPMA-CHIM PHYS MATER AMORPH, ORSAY	ORSAY
74	CNRS/CRISMAT- CRIST & SCIEN MATERIAU, CAEN	CAEN
75	CNRS/CRMD, ORLEANS	ORLEANS
76	CNRS/CRMHT, ORLEANS	ORLEANS

	Laboratoire	Ville
77	CNRS/CRPP CENT RECH PAUL PASCAL, BORDEAUX ,PES-SAC	Pessac
78	CNRS/CRTBT-RECH TRES BASS TEMP, GRENOBLE	GRENOBLE
79	CNRS/CSNSM/IN2P3, ORSAY	ORSAY
80	CNRS/EDIFIS, FAC SCIENCES & TECHN DE ST JEROME ,MARSEILLE	MARSEILLE
81	CNRS/GEMPPM, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES AP-PLIQUEES (INSA) ,VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
82	CNRS/GMCM/UNIV RENNES I, RENNES	RENNES
83	CNRS/GPM/UMR6634/UNIV DE ROUEN ,SAINT ETIENNE DU ROUVRAY	SAINT ETIENNE DU ROUVRAY
84	CNRS/ICMCB, BORDEAUX ,PESSAC	PESSAC
85	CNRS/ICMN	ORLEANS
86	CNRS/ICMPE/CMTR, THIAIS	THIAIS
87	CNRS/ICMPE/GESMAT, THIAIS	Thiais
88	CNRS/ICMPE/SPC, THIAIS	THIAIS
89	CNRS/IMN INST DES MATERIAUX DE NANTES	NANTES
90	CNRS/INSA DE LYON ,VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
91	CNRS/INSP/UPMC/UMR 7588, PARIS	PARIS
92	CNRS/INST EUROP DES MEMBRANES, MONTPELLI ,MONTPELLIER	MONTPELLIER
93	CNRS/INSTITUT EUROPEEN DE MEMBRANES/UMR5635, MONTPELLIER	MONTPELLIER
94	CNRS/IPCMS, STRASBOURG	STRASBOURG
95	CNRS/IRC, VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
96	CNRS/IS2M, MULHOUSE	MULHOUSE
97	CNRS/ISCR UMR6226, RENNES	RENNES
98	CNRS/LAB DE RHEOLOGIE, GRENOBLE	GRENOBLE
99	CNRS/LAB DES FLUORURES, UNIV DU MAINE	LE MANS
100	CNRS/LABORATOIRE DE PHYS D SOLIDES (LPS), ORSAY	ORSAY
101	CNRS/LAMMI-AG MOL & MAT INOR, UNIV MONTPELLIER 2	MONTPELLIER
102	CNRS/LCC-LAB CHIM DE COORDINAT, TOULOUSE	TOULOUSE
103	CNRS/LCMI-CHAMPS MAGNET INTENSE, GRENOBLE	GRENOBLE
104	CNRS/LCMTR, THIAIS	THIAIS
105	CNRS/LCSM/UMR 7555, UNIVERSITE NANCY I ,VAN-DOEUVRE-LES-NANCY	VAN-DOEUVRE-LES-NANCY
106	CNRS/LDSMM, UNIV LILLE 1	VILLENEUVE-D'ASCQ
107	CNRS/LFCR/UMR5150 - UPPA, PAU	Pau
108	CNRS/LMCP LAB MIN CRIST, PARIS	PARIS
109	CNRS/LMGC-MECA & GENIE CIVIL, UNIV MONTPELLIER 2	MONTPELLIER
110	CNRS/LMI - UMR5615 ,VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
111	CNRS/LMPQ, PARIS	PARIS
112	CNRS/LNCMI, GRENOBLE	GRENOBLE
113	CNRS/LPCML - UNIV LYON 1	VILLEURBANNE
114	CNRS/LPMCN, UNIV C. BERNARD-LYON 1 ,VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
115	CNRS/LPMMC, GRENOBLE	GRENOBLE

	Laboratoire	Ville
116	CNRS/LPMMH/ESPCI, PARIS	PARIS
117	CNRS/LPTL-UPMC,PARIS	PARIS
118	CNRS/LURE, CENTRE UNIV PARIS-SUD	ORSAY
119	CNRS/MATEIS, INSA ,VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
120	CNRS/PECSA/UPMC, PARIS	PARIS
121	CNRS/PMC-PHYS MILIEUX CONDENSES, PARIS	PARIS
122	CNRS/THALES UNITE MIXTE DE PHYSIQUE, PALAISEAU	PALAISEAU
123	CNRS/UMEP/UMR8207, LILLE	VILLENEUVE D'ASQ
124	CNRS/UMR 5819, GRENOBLE	GRENOBLE
125	CNRS/UMR5587/LCVN ,MONTPELLIER	MONTPELLIER
126	CNRS/UMR7556/LPM, UNIV NANCY I ,VAN- DOEUVRE-LES-NANCY	VANDOEUVRE-LES-NANCY
127	CNRS/UMR7590/IMPIC, UNIV PARIS VI	PARIS
128	CNRS/UPMC/PHENIX/UMR 8234 ,PARIS	PARIS
129	COLLEGE DE FRANCE ,PARIS	PARIS
130	CRG SNBL AT ESRF ,GRENOBLE	GRENOBLE
131	DEC SEC SAINT PAUL LEZ DURANCE	SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
132	DEC/SESC/LLCC, CADARACHE	SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
133	DRECAM/LLB, SACLAY ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
134	DRN/SPRC/LEPH, CADARACHE	SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
135	ECE PARIS	PARIS
136	ECOLE CENTRALE DE LYON - INSTITUT DES NANOTECH- NOLOGIES DE LYON	LYON
137	ECOLE CENTRALE DE NANTES	NANTES
138	ECOLE MINES ATLANTIQUE IMT ,NANTES	Nantes
139	ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE LYON	LYON
140	ECOLE DES MINES, ST ETIENNE	SAINT-ETIENNE
141	EDF R&D	MORET LOING ET OR- VANNE
142	EFS, RHONE ALPES ,LA TRONCHE	LA TRONCHE
143	ENSA PARIS MALAQUAIS	PARIS
144	ENSAM-PARIS	PARIS
145	ERGTP ,VARCES	VARCES
146	ESPCI PARITECH, PARIS	PARIS
147	ETABLISSEMENT FRANCAIS DU SANG	IVRY-SUR-SEINE
148	FAC SCIENCES ET TECHNOLOGIE - UNIVERSITE DE LOR- RAINE ,VANDOEUVRE LES NANCY	VANDOEUVRE LES NANCY
149	FAC SCIENCES FONDAMENTALES/BIOMEDICALES, UNIV PARIS DESCARTES	Paris
150	FAST UMR 7608, PARIS	ORSAY
151	FOTON/INSA-RENNES	Rennes
152	GANIL, CEA/DRF-CNRS/IN2P3 ,CAEN	CAEN
153	GEM, NANTES	NANTES
154	I2BC, ORSAY	ORSAY
155	I2M	TALENCE
156	I2M-ENSAM	PESSAC

	Laboratoire	Ville
157	IAB U1209 UMR5309, LA TRONCHE	LA TRONCHE
158	IC2MP - INSTITUT DE CHIMIE DES MILIEUX ET MATERIAUX DE POITIERS	POITIERS
159	ICA-ALBI / ECOLE DES MINES	Albi
160	ICBMS - UNIVERSITY CLAUDE BERNARD LYON 1	VILLEURBANNE
161	ICMMO - SP2M - UMR 8182	ORSAY
162	ICMUB - UMR CNRS 6302, DIJON	DIJON
163	ICR - AIX-MARSEILLE UNIVERSITY	Marseille
164	ICSM CEA/CNRS/UM/ENSCM ,BAGNOLS SUR CÈZE	BAGNOLS SUR CÈZE
165	IFP ENERGIES NOUVELLES ,RUEIL-MALMAISON	RUEIL-MALMAISON
166	IFREMER	PLOUZANE
167	IFSTAR	PARIS
168	IGDR - UMR6290 - CNRS - UNIV DE RENNES 1	RENNES
169	IJL - FAC SCIENCES ET TECHNOLOGIE, VANDOEUVRE ,VANDOEUVRE LES NANCY	VANDOEUVRE LES NANCY
170	ILM - UCBL 1, VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
171	ILV, UNIV VERSAILLES	VERSAILLES
172	IM2NP/UMR CNRS 7334/ UNIV AIX-MARSEILLE SUD TOULON	MARSEILLE
173	IMMM - UMR CNRS 6283, LE MANS	Le Mans
174	IMP/SITE UCB LYON 1 ,VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
175	IMPMC, PARIS	PARIS
176	IMT LILLE DOUAI	DOUAI
177	INL ECOLE CENTRALE LYON ,ECULLY	ECULLY
178	INOVOTION ,LA TRONCHE	LA TRONCHE
179	INP - PHELMA ,GRENOBLE	GRENOBLE
180	INP TOULOUSE	TOULOUSE
181	INPG, GRENOBLE	GRENOBLE
182	INRA	Ardon
183	INRA - GMPA ,THIVERVAL-GRIGNON	Thiverval-Grignon
184	INRAE	ORLÉANS CEDEX 2
185	INSA LYON, VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
186	INSA OF RENNES	RENNES
187	INSAVALOR ,VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
188	INSERM	CRETEIL
189	INSERM/GIN, GRENOBLE	LA TRONCHE
190	INST PHYS NUCLEAIRE, LYON ,VILLEURBANNE	VILLEURBANNE
191	INST. SCIENCES CHIMIQUES - UNIV DE RENNES 1	RENNES
192	INSTITUT CHARLES GERHARDT MONTPELLIER, UMR5253	MONTPELLIER
193	INSTITUT CHARLES SADRON, CNRS UPR22 ,STRASBOURG	STRASBOURG
194	INSTITUT CURIE, PARIS	PARIS
195	INSTITUT DE CHIMIE - UMR 7177, UNIV STRASBOURG	STRASBOURG
196	INSTITUT DE MINERALOGI PARIS 5	PARIS 5
197	INSTITUT DE MINÉRALOGIE ET PHYSIQUE DES MILIEUX CONDENSÉS (IMPMC), PARIS	PARIS
198	INSTITUT DE PHYSIQUE NUCLEAIRE ORSAY	Orsay

	Laboratoire	Ville
199	INSTITUT DE RECHERCHE DE CHIMIE PARIS - IRCP	PARIS
200	INSTITUT DE RECHERCHE EN GÉNIE CIVIL ET MÉCANIQUE (GEM) UMR CNRS 6183 ,SAINT-NAZAIRE	SAINT-NAZAIRE
201	INSTITUT DES MATERIAUX JEAN ROUXEL ,NANTES	NANTES
202	INSTITUT DES NEUROSCIENCES, UGA, GRENOBLE	LA TRONCHE
203	INSTITUT EUROPÉEN DES MEMBRANES - UMR5635	MONTPELLIER
204	INSTITUT JEAN LAMOUR, NANCY	NANCY
205	INSTITUT PLURIDISCIPLINAIRE HUBERT CURIE ,STRASBOURG	STRASBOURG
206	INSTITUT UTINAM - CNRS UMR 6213, UNIV FRANCHE-COMTE ,BESANCON	BESANCON
207	IP2I Lyon	Villeurbanne
208	IPR - UNIV RENNES 1	RENNES
209	IRSN, FONTENAY	FONTENAY AUX ROSES
210	IRT JULES VERNE	BOUGUENAI
211	ISAE-ENSMA	CHASSENEUIL-DU-POITOU
212	ISIS/ULP, STRASBOURG	STRASBOURG
213	ISM - GSM ,TALENCE	TALENCE
214	ISTERRE - MAISON DES GEOSCIENCES ,SAINT MARTIN	SAINT MARTIN
215	L'OREAL	AULNAY SOUS BOIS
216	L2C - LABO CHARLES COULOMB UMR 5221 CNRS ,MONTPELLIER	MONTPELLIER
217	LAB PHYS CHIM ETAT SOL, UNIV PARIS SUD	ORSAY
218	Lab. for Interdisciplinary Physics (LIPHY) - CNRS	St Martin d'Hères
219	LABEX PALM-PARIS-SACLAY	SACLAY
220	LABO CHIMIE ET BIOLOGIE DES METEAUX - BIG, UGA GRENOBLE	GRENOBLE
221	LABO INTERDISCIPLINAIRE CARNOT DE BOURGOGNE ,DIJON	DIJON
222	LABO MATIERE ET SYSTEMES COMPLEXES (LMSC) ,PARIS	PARIS
223	LABORATOIRE 3SR/UMR 5521 ,GRENOBLE	GRENOBLE
224	LABORATOIRE D'ANNECY DE PHYSIQUE DES PARTICULES ,ANNECY LE VIEUX	ANNECY LE VIEUX
225	LABORATOIRE DE BIOLOGIE PHYSICO-CHEMIE DES PROTEINES MEMBRANAIRES	PARIS
226	LABORATOIRE DE CHIMIE DES POLYMERES ORGANIQUES ,PESSAC	PESSAC
227	Laboratoire de Microbiologie, Adaptation, Pathogénie, Université de Lyon	Villeurbanne
228	LABORATOIRE DE PHYSIOLOGIE CELLULAIRE VÉGÉTALE ,GRENOBLE	GRENOBLE
229	LABORATOIRE DES IMRCP - UMR5623, CNRS ,TOULOUSE	TOULOUSE
230	LABORATOIRE HYDRASA - UMR 7285 IC2MP, POITIERS	POITIERS
231	LABORATOIRE TIMC-IMAG - UGA/CNRS	LA TRONCHE
232	LAPP-CNRS-IN2P3, ANNECY ,ANNECY-LE-VIEUX	Annecy-le-Vieux
233	LCPA - UNIVERSITE DU LITTORAL, DUNKERQUE	DUNKERQUE
234	LCPO UMR5629 CNRS / Univ Bordeaux / Bordeaux INP	Pessac
235	LE MANS UNIVERSITE	LE MANS

	Laboratoire	Ville
236	LEGI ,GRENOBLE	GRENOBLE
237	LEMHE-ICMMO, UNIV PARIS SUD ,ORSAY	ORSAY
238	LEPMI/UMR5279, GRENOBLE ,SAINT MARTIN D'HÈRES	SAINT MARTIN D'HÈRES
239	LGIT, UNIV J. FOURIER	GRENOBLE
240	LISBP, TOULOUSE	TOULOUSE
241	LKB/CNRS/ENS/UPMC, PARIS	PARIS
242	LMGC - UNIVERSITE DE MONTPELLIER	MONTPELLIER
243	LNCMI-CNRS	Grenoble
244	LPC/CNRS/ENSI, CAEN	CAEN
245	LPCES-ICMMO UMR 8182 ,ORSAY	ORSAY
246	LPCNO - INSA, TOULOUSE	Toulouse
247	LPPI UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE	CERGY-PONTOISE
248	LPSC GRENOBLE	GRENOBLE
249	LPTMC -UNIV. PARIS VI	PARIS
250	LRCS-UPJV, AMIENS	AMIENS
251	LTDS UMR 5513, ECULLY	ECULLY
252	LTPCM-ENSEEG-INPG, ST MARTIN D'HERES	ST MARTIN-D'HÈRES
253	MADIREL (UMR7246) CNRS/AIX MARSEILLE UNIVERSITE	MARSEILLE
254	MAIN SECURITE ,GIERES	GIERES
255	MINT ,ANGERS	Angers
256	MMSB	LYON
257	MREID, UNIV DU LITTORAL, DUNKERQUE	DUNKERQUE
258	MSMP LAB., ENSAM	AIX-EN-PROVENCE
259	NEUTRONOPTICS ,CLAIX	CLAIX
260	ORANO ,PARIS	PARIS
261	ORANO, CHATILLON	CHATILLON
262	PHLAM/LAB PHYS LASERS ATOMES MOLECULES, UNIV SCIENCES ET TECH DE LILLE ,VILLENEUVE-D'ASCQ	VILLENEUVE-D'ASCQ
263	PSCM ESRF GRENOBLE	GRENOBLE
264	RENAULT, GUYANCOURT	Guyancourt
265	SAFT BORDEAUX	BORDEAUX
266	SAINT-GOBAIN CREE ,CAVAILLON CEDEX	CAVAILLON
267	SORBONNE UNIVERSITE	Paris
268	SPINTECH, UMR CEA/CNRS/UJF/G-INP ,GRENOBLE	GRENOBLE
269	SPMS, CENTRALESUPELEC, BAT EIFFEL ,GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
270	SPRC/LPN, CEA CADARACHE, SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE	Saint-Paul-Lez-Durance
271	STMicroelectronic	Crolles
272	SYNCHROTRON SOLEIL, GIF-SUR-YVETTE	GIF-SUR-YVETTE
273	SYNERGIE ,GRENOBLE	GRENOBLE
274	SYNTHELIS	LA TRONCHE
275	TIMC-IMAG, UJF ,LA TRONCHE	LA TRONCHE
276	TOTAL M&S, SOLAIZE	SOLAIZE
277	UCCS/ENSCL/UMR 8181, UNIV LILLE 1 ,VILLENEUVE D'ASCQ	VILLENEUVE D'ASCQ
278	UFR BIOLOGIE, UJF GRENOBLE	GRENOBLE

	Laboratoire	Ville
279	UFR PHYSIQUE ET GENIE ELECTRIQUE, UJF GRENOBLE	GRENOBLE
280	UGA	MARNE LA VALLÉE
281	UJF - TIMC-GMCAO, LA TRONCHE	LA TRONCHE
282	UMET - UNIVERSITE LILLE	Villeneuve d'Ascq
283	UMR 5239 CNRS - ENS LYON - UCBL - LBMC	LYON
284	UNIV DU MAINE, LE MANS	LE MANS
285	UNIV NANCY	NANCY
286	UNIV ROUEN, LAB SMS ,MONT SAINT AIGNAN	MONT SAINT AIGNAN
287	UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ	BESANCON
288	UNIVERSITÉ CERGY PONTOISE	CERGY PONTOISE
289	UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1	LYON
290	UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE	Aubière
291	UNIVERSITE D ANGERS	ANGERS
292	UNIVERSITE DE BORDEAUX ,TALENCE	Talence
293	UNIVERSITE DE BOURGOGNE	Dijon
294	UNIVERSITE DE CAEN NORMANDIE	CAEN
295	UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE, LAB. CHRONO-ENVIRONNEMENT	BESANCON
296	UNIVERSITE DE LILLE	LILLE
297	UNIVERSITE DE LORRAINE, LABORATOIRE CRM2	NANCY
298	UNIVERSITE DE MONTPELLIER	MONTPELLIER
299	UNIVERSITÉ DE NANTES	NANTES
300	UNIVERSITE DE PICARDIE, AMIENS	AMIENS
301	UNIVERSITE DE POITIERS ,POITIERS CEDEX	POITIERS
302	UNIVERSITE DE SAVOIE ,CHAMBERY	CHAMBERY
303	UNIVERSITE DE STRASBOURG	Strasbourg
304	Université du Mans, Le Mans	Le Mans
305	Université Grenoble Alpes	621 avenue Centrale
306	UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL	CHAMPS-SUR-MARNE
307	UNIVERSITE PARIS DESCARTES	PARIS
308	UNIVERSITE PARIS SACLAY	ORSAY
309	UNIVERSITE PARIS SUD	GIF-SUR-YVETTE
310	UNIVERSITÉ PARIS-EST ,MARNE-LA-VALLÉE	MARNE-LA-VALLÉE
311	UNIVERSITE PAUL SABATIER - TOULOUSE	TOULOUSE
312	UNIVERSITY HENRI POINCARÉ - NANCY 1	VANDOEUVRE LES NANCY
313	UPEC, CRETEIL	CRETEIL
314	UPPA, PAU	Pau
315	XENOCS	GRENOBLE

8.2 Laboratoires Français ayant utilisé du temps 2FDN sur la période 2016 - 2021

	Laboratoire	Ville
1	Institut Clément Ader	ALBI
2	LRCS	Amiens
3	DPTA	Arpajon
4	Institut Pascal	Aubière Cedex
5	Institut des Biomolécules Max Mousseron	Avignon cedex 9
6	DEN/MAR/DE2D/SEVT	Bagnols sur Ceze
7	DEN/MAR/ICSM	BAGNOLS SUR CEZE CEDEX
8	DEN/DMRC/SFMA	Bagnols-sur-Cèze
9	UTINAM institute	Besançon
10	CRISMAT	Caen
11	STP	Caen
12	Laboratoire de Physicochimie des Polymères et des Interfaces	CERGY-PONTOISE
13	Institut Galien Paris-Sud	Châtenay-Malabry
14	Génie mécanique	Compiègne
15	Agrosup Dijon - UMR PAM	DIJON
16	INTERFACES	Dijon
17	Labratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère (LPCA)	Dunkerque
18	Institut PPrime	FUTUROSCOPE CHASSE-NEUIL
19	DEN/DANS/DMN/SEMI	Gif Sur Yvette
20	DRF/IRFU/DEDIP	Gif sur Yvette
21	DRF/IRFU/DACM	GIF SUR YVETTE
22	DRF/IRAMIS/NIMBE	GIF SUR YVETTE CEDEX
23	Synchrotron Soleil	GIF SUR YVETTE CEDEX
24	DRF/IRAMIS/SPEC	GIF SUR YVETTE Cédex
25	DEN/DMN/SRMA	GIF SUR YVETTE Cédex
26	DRF/IRFU/SPhN	Gif-sur-Yvette
27	DRF/IRAMIS/DIR	Gif-sur-Yvette
28	Structures, Properties and Modeling of Solids Laboratory (SPMS)	Gif-sur-Yvette
29	DRF/IRAMIS/LLB	Gif-Sur-Yvette Cedex
30	Jülich Centre for Neutron Science	Grenoble
31	Laboratoire des Matériaux et du Génie Physique	Grenoble
32	DRF/IRFU/LNCMI	GRENOBLE
33	CERMAV	Grenoble
34	LITEN-DEHT-STB	GRENOBLE
35	LNCMI	Grenoble
36	DTNM	Grenoble
37	DEHT	grenoble
38	DRF/BIG/LCBM	Grenoble
39	Institut NEEL	GRENOBLE CEDEX 09
40	DTNM/SENCI/LMSE	GRENOBLE CEDEX 9

	Laboratoire	Ville
41	DRF/INAC/MEM/MDN	GRENOBLE CEDEX 9
42	Institut Laue Langevin	GRENOBLE CEDEX 9
43	DRF/INAC/SyMMES	GRENOBLE CEDEX 9
44	DRF/INAC/Pheliqs	GRENOBLE CEDEX 9
45	DTNM/SEN/LSN	GRENOBLE CEDEX 9
46	DTNM-SERE-LMA	GRENOBLE CEDEX 9
47	European Synchrotron Radiation Facility	GRENOBLE CEDEX 9
48	LIPhy	Grenoble Cedex 9
49	Institut des Molécules et Matériaux du Mans	Le Mans
50	I3M	LE MANS CEDEX 9
51	Institut de Chimie Radicalaire	Marseille
52	MADIREL	Marseille
53	Laboratoire de Chimie et Physique	Metz
54	Laboratoire d'étude des Microstructures et et de Méca- nique des Matériaux (LEM3)	METZ
55	LEM3	METZ CEDEX 03
56	Institut Charles Gerhardt Montpellier	Montpellier
57	Laboratoire Charles Coulomb	Montpellier
58	Institut Européen des Membranes	Montpellier
59	Materials and Mechanics of Component	MORET LOING ET OR- VANNE
60	Institut Jean Lamour	Nancy
61	CRM2	Nancy
62	BIA Nantes	nantes
63	CEMHTI (Conditions Extremes, Matériaux à Haute Tem- pérature et Irradiation)	ORLEANS
64	FAST	ORSAY
65	Laboratoire de Physique des Solides	ORSAY CEDEX
66	Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay	Orsay Cedex
67	LEM	Palaiseau
68	LPEM	Paris
69	Matière et Systèmes Complexes Laboratory	Paris
70	Institut de Recherche de Chimie-Paris	Paris
71	LCMCP	Paris
72	Laboratoire de Réactivité de Surface	Paris
73	IPCM	Paris
74	Nanosciences et nanotechnologies pour la santé et l'énergie	Paris
75	Chaire de chimie du solide et de l'énergie	Paris
76	Physico-chimie et dynamique des surfaces	paris
77	Laboratoire de Biochimie Théorique (LBT)	Paris
78	Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques	Paris
79	PIMM	Paris
80	LPTMC	Paris
81	UMR 1159 - Réhabilitation chirurgicale mini-invasive et robotisée de l'audition	Paris cedex 18
82	PHENIX	PARIS CEDEX 5

	Laboratoire	Ville
83	SIMM	PARIS CEDEX 5
84	IMPMC	Paris Cedex 5
85	IPREM	PAU
86	Centre de Recherche Paul Pascal	Pessac
87	R&D	PESSAC
88	ICMCB	Pessac
89	LCPO	PESSAC CEDEX
90	URGM	Plouzané
91	Institut des sciences chimiques de Rennes	RENNES
92	Laboratoire FOTON	RENNES
93	Geosciences Rennes	rennes
94	Chimie du Solide et Matériaux	Rennes
95	Institut de Physique de Rennes	Rennes cedex
96	Verres et Céramiques	Rennes Cedex
97	Institut Français du Pétrole et des Energies Nouvelles	RUEIL MALMAISON Cédex
98	DRT	Saclay
99	Laboratoire d'Electrochimie et Physico-chimie des Matériaux et Interfaces (LEPMI)	Saint Martin d'Hères
100	physique	Saint Martin d'Hères
101	SIMAP	Saint Martin d'Hères Cedex
102	Geochimie	SAINT MARTIN D'HÈRES
103	DER/SPRC/LEPh	Saint Paul les Durance
104	DEN/DEC/SESC	Saint Paul lez Durance
105	Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP)	SAINT-ETIENNE
106	LPMA	SAINT-FONS CEDEX
107	INP CNRS, Université Grenoble Alpes	Saint-Martin-d'Hères
108	DEN/DER/SPESI/LDCI	Saint-Paul-Lez-Durance
109	DEN/DEC/SA3E	St Paul Lez Durance
110	IPCMS	Strasbourg
111	INSTITUT DE CHIMIE	STRASBOURG
112	Institut Charles Sadron	Strasbourg Cedex 2
113	Institut des Sciences Moléculaires	TALENCE
114	Université Bordeaux	Talence
115	chimie	talence
116	ICMPE	Thiais
117	SPC	Thiais
118	chemistry	Thiais
119	GMPA - CEPIA - MIA	Thiverval Grignon
120	Laboratoire des IMRCP	Toulouse
121	CEMES	Toulouse
122	Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse - Génie des Interfaces et Milieux Divisés	Toulouse
123	Laboratoire de Chimie de Coordination	Toulouse
124	Geosciences Environment Toulouse	Toulouse
125	CIRIMAT - ENSIACET	Toulouse

	Laboratoire	Ville
126	Laboratoire Hétérochimie Fondamentale et Appliquée - LHFA	TOULOUSE
127	CNES Laboratoire d'expertise	Toulouse
128	INP	Toulouse
129	GeoRessources	Vandoeuvre-les-nancy
130	SPE	Villenave d'Ornon
131	Unité de Catalyse et Chimie du Solide (UCCS)	Villeneuve d'Ascq
132	Laboratoire PHLAM	Villeneuve d'Ascq cedex
133	MATEIS	Villeurbanne
134	Institut de Nanotechnologies de Lyon	Villeurbanne
135	Laboratoire des Multimatériaux et Interfaces (UMR 5615)	Villeurbanne
136	IMP	Villeurbanne
137	Adaptation to Extreme Environments	Villeurbanne
138	Institut Lumière Matière	Villeurbanne Cedex

