

# La diffusion de neutrons

## L'European Spallation Source (ESS)

**Résumé** Dès le début des années 1940, le développement des réacteurs nucléaires a permis l'étude des propriétés de la matière par diffusion de neutrons. L'utilisation de faisceaux de neutrons des réacteurs de recherche est à l'origine de nombreuses expériences et avancées scientifiques. Depuis la fin des années 1990, les nouvelles sources d'envergure sont basées sur le processus de spallation, modifiant considérablement les méthodes expérimentales et l'analyse des données. L'European Spallation Source (ESS), qui verra ses premiers neutrons en 2026, est le plus récent et plus ambitieux projet en date.

**Mots-clés** Diffusion de neutrons, spallation, temps de vol, accélérateurs, Europe, ESS.

**Abstract** European Spallation Source (ESS)

Since the early 1940s, the development of nuclear reactors paved the road for the study of nuclear and magnetic properties of matter by neutron scattering. Since then, the neutrons generated in nuclear research reactors have been used as a fundamental tool for studies in condensed matter. The 21<sup>th</sup> century is the start of a new era in which neutrons are generated through spallation, dramatically changing the way data are collected and analyzed. The European Spallation Source (ESS) is the latest and most ambitious of these projects.

**Keywords** Neutron scattering, spallation, time-of-flight, accelerators, Europe, ESS.

### Les sources de neutrons : historique

James Chadwick a découvert en 1932 l'existence du neutron en bombardant une cible de béryllium par des particules  $\alpha$  émises par la désintégration radioactive du polonium, les flux émis étaient très faibles [1]. À partir des années 1940, les réacteurs de recherche utilisant la fission d'éléments radioactifs ont pris le relais des petites sources existantes, avec des flux de cœur atteignant  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>/s au début des années 1970. À l'exception du réacteur pulsé IBR-2 (Dubna, Russie), ces sources sont à flux continu. Avant de pouvoir être utilisés, les neutrons doivent subir une étape de monochromatisation par un monochromateur ou un hachage du faisceau afin de créer des pulses pour réaliser des mesures en temps de vol. Les deux solutions ne transportent jusqu'à l'échantillon qu'une infime partie des neutrons produits (~ 1 %). Aussi les possibilités d'études offertes par la diffusion de neutrons ont motivé le développement de nouvelles sources, toujours plus intenses.

Depuis sa divergence en 1974, le réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble produit les faisceaux de neutrons les plus intenses au monde. Les limites des réacteurs de recherche semblent donc atteintes et les derniers réacteurs d'envergure ayant divergé sont le réacteur FRM-II à Munich en 2004 et le réacteur PIK à Saint-Petersbourg en 2011, ce dernier n'étant toujours pas ouvert aux utilisateurs.

Depuis les années 1980, vu les limites atteintes par les réacteurs, mais aussi pour des questions sociétales, les sources à spallation ont été utilisées comme nouvelles sources de neutrons et en représentent l'avenir. Ces sources utilisent des accélérateurs de particules (parfois combinés à un anneau de stockage) afin d'accélérer les protons émis jusqu'à des hautes énergies (~ 100 MeV-2 GeV) pour bombarder une cible de métal lourd (mercure, tungstène...). Les collisions des protons fragmentent les noyaux de la cible. C'est un processus très efficace qui s'accompagne de l'expulsion de 20 à 30 neutrons par proton. Ces neutrons, une fois modérés (« thermalisés »), peuvent être utilisés pour réaliser des expériences de diffusion. La technique permet aujourd'hui d'atteindre les flux

intégrés des réacteurs. L'ESS (European Spallation Source – en construction, voir plus loin), la deuxième cible de SNS (à Oak Ridge, États-Unis) ou encore J-PARC (au Japon) sont les exemples les plus récents.

Du fait des technologies mises en œuvre, les sources à spallation sont majoritairement pulsées. Les neutrons sont émis pendant un court laps de temps de façon périodique, typiquement entre 20 et 60 Hz. L'intervalle entre les pulses permet la séparation des longueurs d'onde au niveau de la position échantillon par la méthode de temps de vol. Les neutrons thermiques (plus énergétiques) ont une vitesse plus élevée que les neutrons froids, et la distance entre le modérateur et l'échantillon sépare naturellement les longueurs d'onde. L'ensemble des neutrons produits peut donc, théoriquement, être utilisé.

Une technologie alternative, plus économique, est actuellement en développement partout dans le monde : les sources de neutrons basées sur des accélérateurs beaucoup plus compacts que dans les sources à spallation (CANS : « compact accelerator-based neutron source ») [2]. Ces sources, également pulsées, utilisent un faisceau de protons d'énergie comprise entre 3 et 50 MeV sur une cible légère (Be, Li...). Ce processus est moins efficace que la spallation mais devrait permettre à terme de déployer un réseau de sources nationales en soutien aux sources de premier plan. C'est le cas notamment du projet de source compacte français SONATE (présenté dans l'article qui suit).

### L'European Spallation Source (ESS)

Depuis 2013, l'ESS est en cours de construction par un consortium de dix-sept pays européens à Lund, dans le sud de la Suède [3]. C'est une source à spallation utilisant un accélérateur linéaire de 600 m pour accélérer un faisceau de protons à 2 GeV (~ 95 % de la vitesse de la lumière). Les protons sont générés par une source d'ions qui produit un faisceau à 75 keV, accélérés par des cavités radiofréquence (3,6 MeV) et le Drift Tube Linac (90 MeV) avant d'atteindre leur énergie maximale dans une série de cavités supraconductrices.

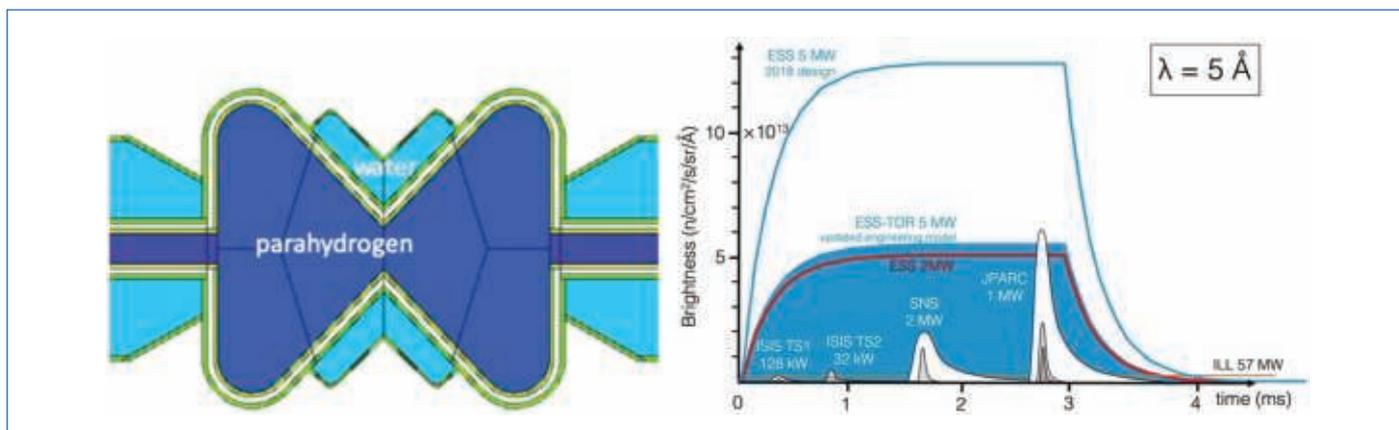


Figure 1 - À gauche : modérateur bi-spectral de l'ESS. À droite : comparaison des brillances instantanées des différentes sources de neutrons en fonctionnement. © ESS.

À puissance nominale (5 MW), l'accélérateur, qui fonctionnera à une fréquence de 14 Hz, aura un courant en crête de 62,5 mA (2,5 mA intégrés). Le faisceau de protons est envoyé sur la cible, une roue en tungstène de 2,5 m de diamètre.

Les neutrons de haute énergie sont ensuite modérés par deux modérateurs adjacents, froid et thermique, en forme de papillon. Le modérateur froid utilise de l'hydrogène liquide (para-H<sub>2</sub>), le modérateur thermique de l'eau (figure 1). Chaque instrument peut accéder aux deux spectres (froid et thermique) indépendamment et/ou simultanément.

Généralement, les sources à spallation sont dites à pulses courts. Le pulse de protons est de l'ordre d'une microseconde (μs) et génère un pulse de neutrons de ~ 100 μs après modération. L'ESS est une source à pulse long avec un pulse de protons d'une durée de 2,86 ms, bien supérieure au temps de modération. Cette particularité permet d'atteindre une intensité intégrée (moyenne temporelle du flux) équivalente à celle de l'ILL avec une intensité instantanée (flux au pic) vingt-cinq fois supérieure (voir figure 1).

La contrepartie des pulses longs est une dégradation de la résolution  $\Delta\lambda/\lambda$  des instruments (voir encadré). En s'appuyant sur la formule (2), il apparaît immédiatement que les hautes résolutions ne sont possibles qu'en allongeant le temps de vol des neutrons, et donc la longueur des instruments.

L'ESS offrira une large gamme d'instruments, de longueur comprise entre 30 et 160 m. Les hautes résolutions (diffraction, mesures inélastiques) seront atteintes sur les instruments de 160 m. Pour un instrument de cette taille, la gamme de longueur d'onde utile sera de 1,7 Å. Un système de disques occultants (« choppers ») permettra de choisir cette gamme sur le faisceau blanc, par exemple de 5 à 6,7 Å.

L'ensemble cible/modérateur est situé dans une structure d'acier et de béton assurant la protection radiologique : le monolithe. Quarante-deux ouvertures (« beamports ») permettent d'extraire les faisceaux modérés et de les transporter sur les instruments, localisés dans quatre bâtiments (Nord, Sud, Est et Ouest) (figure 2).

Les premiers neutrons sont prévus fin 2025 avec une ouverture aux utilisateurs de l'installation en 2027 sur six premiers appareils.

### La construction des instruments

La conception et la construction de l'instrumentation ESS se fait sur le principe de l'« in-kind », chaque pays partenaire apportant son savoir-faire et ses moyens matériels et humains.

### Encadré

#### Spallation et instrumentation en temps de vol

La relation entre le temps de vol d'un neutron sur une distance L et sa longueur d'onde λ est donnée par :

$$t(\text{msec}) = 0,2528 \cdot \lambda(\text{Å}) \cdot L(\text{m}) \quad (1)$$

Sur source pulsée, la résolution d'un instrument est définie par la durée du pulse de neutrons, τ, et leur temps de vol, t<sub>0</sub> :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\tau}{t_0} \quad (2)$$

La gamme de longueur d'onde accessible simultanément à un instrument situé à une distance L de la source dépend de la fréquence de celle-ci,  $\nu = 1/T_0$ , et donc de l'intervalle entre les pulses T<sub>0</sub> :

$$\Delta\lambda(\text{Å}) = \frac{T_0(\text{msec})}{0,2528 L(\text{m})} \quad (3)$$

Comme sur une source continue, l'optimisation d'un instrument est donc un compromis entre le flux et la résolution recherchée.

Une première série de quinze instruments couvrant la majorité des besoins scientifiques a été sélectionnée pour construction (voir figure 3). Une extension à vingt-deux instruments sera réalisée dans un second temps.

Dans ce contexte, la France participe à la construction de six instruments dont cinq par le biais du Laboratoire Léon Brillouin et d'un lot d'environnement échantillon (pression, cryogénie et champ magnétique) [4].

### Vers l'étude de nouveaux champs scientifiques

Les mesures sur sources de neutrons pulsées sont un changement important dans la méthode de collecte, de traitement et d'analyse des données [5]. Il s'agit d'un changement de paradigme par rapport aux expériences réalisées sur des réacteurs. L'ESS, qui sera la première source à pulses longs, nécessite le développement d'une instrumentation complètement nouvelle. La haute brillance de l'ESS permettra d'ouvrir de nouveaux champs scientifiques avec la généralisation des mesures de diffusion de neutrons polarisés, l'étude d'échantillons submillimétriques, des mesures de cinétique, *in operando*, ou encore la possibilité d'études paramétriques complexes (champ/température/pression...).

La formation des utilisateurs et la caractérisation des échantillons sont primordiaux au succès de l'ESS. Néanmoins, un maillage européen de sources plus modestes, sur le modèle des CANS, sera nécessaire à son bon fonctionnement.

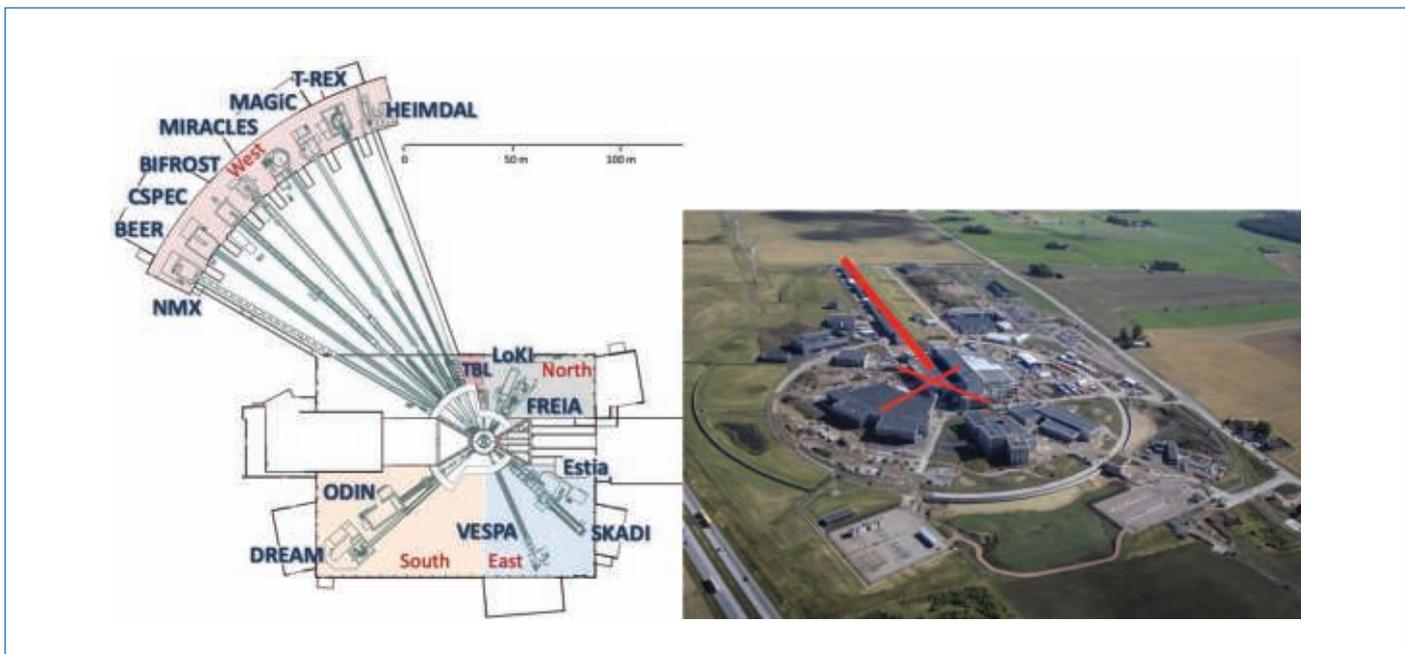


Figure 2 - À gauche : disposition des quinze premiers instruments dans les quatre halls expérimentaux. À droite : photo aérienne de l'avancement des travaux en octobre 2020.

	Large-Scale Structures					Spectroscopy				
	Life Science	Soft Condensed Matter	Chemistry of Materials	Energy Research	Other	Life Science	Soft Condensed Matter	Chemistry of Materials	Energy Research	Other
<b>ODIN</b> Imaging Instrument	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>SKADI</b> General Purpose SANS	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>LoKI</b> Broadband SANS	✓	✓	✓	✓	✓					
Surface Scattering	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>FREIA</b> Horizontal Reflectometer	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>ESTIA</b> Vertical Reflectometer	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>HEIMDAL</b> Powder Diffractometer	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>DREAM</b> Powder Diffractometer	✓	✓	✓	✓	✓					
Monochromatic powder Diffractometer	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>BEER</b> Engineering Diffractometer	✓	✓	✓	✓	✓					
Extreme conditions Diffractometer	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>MAGIC</b> Magnetism Diffractometer	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>NMX</b> Macromolecular Diffractometer	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>CSPEC</b> Cold Chopper Spectro.	✓	✓	✓	✓	✓					
Broadband Spectrometer	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>T-REX</b> Thermal Chopper Spectro.	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>BIFROST</b> Crystal Analyser Spectro.	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>VESPA</b> Vibrational Spectroscopy	✓	✓	✓	✓	✓					
<b>MIRACLES</b> Backscattering Spectro.	✓	✓	✓	✓	✓					
High Resolution Spin-Echo	✓	✓	✓	✓	✓					
Wide Angle Spin-Echo	✓	✓	✓	✓	✓					
Particle Physics Beamline						✓				

life science	magnetism & superconductivity
soft condensed matter	engineering & geo-science
chemistry of materials	archeology & heritage conservation
energy research	particle physics

Figure 3 - Tableau des vingt-deux instruments prévus à l'horizon 2030. Les instruments encadrés sont ceux construits en partie par la France.

- [1] J. Chadwick, Possible existence of a neutron, *Nature*, **1932**, 129, p. 312, <https://doi.org/10.1038/129312a0>  
 [2] F. Ott *et al.*, Performances of neutron scattering spectrometers on a compact neutron source, *J. Phys., Conf. Ser.*, **2018**, 1021, 012007.  
 [3] K.H. Andersen *et al.*, Nuclear instruments and methods in physics research, Section A, **2020**, 957, 163402, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163402>  
 [4] [https://iramis.cea.fr/llb/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_sstechnique.php?id\\_ast=2756](https://iramis.cea.fr/llb/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php?id_ast=2756)  
 [5] <https://scipp.github.io>

**Xavier FABRÈGES**, ingénieur de recherche CNRS, responsable de la ligne MAGIC à l'ESS, et **Stéphane LONGEVILLE**, directeur de recherche du CEA, Laboratoire Léon Brillouin, CEA Saclay.

\* [xavier.fabreges@cea.fr](mailto:xavier.fabreges@cea.fr) ; [stephane.longeville@cea.fr](mailto:stephane.longeville@cea.fr)