

# Cahier des charges relatif à l'achat d'un équipement d'assemblage mécanique de monochromateur à déformation plastique de cristaux

## MOTS CLEFS

Neutrons  
Monochromateur  
Déformation plastique  
Lames  
Fluorophlogopite (Mica synthétique Fluoré)  
Spectromètre à neutrons SHARPER

## RESUME

Le présent document constitue le cahier des charges relatif à l'équipement d'un assemblage mécanique de monochromateur à double focalisation à déformation plastique, qui permettra la courbure des cristaux qu'il devra supporter : des lames de fluorophlogopite (Mica synthétique Fluoré) de 200,0 mm, 20,0 mm et 0.5 mm de respectivement longueur, hauteur et épaisseur. Ce matériau est déjà disponible et sera fourni par le CEA. Le système proposé devra permettre :

- le montage mécanique de 15 empilements individuels, constitués de 20 de ces lames de fluorophlogopite pour une épaisseur totale de 10 mm par empilement.
- la courbure et l'orientation de ces empilements
- la rotation globale de l'ensemble autour d'un axe vertical.

Le monochromateur équipé de ses 300 lames de fluorophlogopite sera installé sur le spectromètre à neutrons SHARPER (opéré et géré par IRAMIS/LLB à l'Institut Laue Langevin, Grenoble, France).

## 1. OBJET ET INTERVENANTS

Le présent document vise à exprimer le besoin du Laboratoire Léon Brillouin (LLB) du CEA concernant l'acquisition d'une mécanique de monochromateur à déformation plastique de cristaux

Celui-ci sera installé sur le spectromètre à neutrons SHARPER (opéré et géré par IRAMIS/LLB à l'Institut Laue Langevin, ILL, Grenoble, France).

Situé dans ILL7 sur la branche H153 du guide de neutrons froids H15, SHARPER est un spectromètre inélastique utilisant la technique de temps-de-vol. L'instrument est utilisé pour accéder aux modes dynamiques dans la matière condensée en mesurant l'échange d'énergie entre un faisceau de neutrons monochromatique incident et l'échantillon.

A partir du faisceau continu et « blanc » délivré par le guide de neutrons H153, les cristaux sélectionnent par réflexion de Bragg sur un monochromateur une longueur d'onde et donc une énergie incidente  $E_i$ . Un chopper de Fermi permet de pulser ce faisceau monochromatique et définir l'instant  $t_0$  de son interaction avec l'échantillon. Une horloge compte alors le temps  $t$  pris par le faisceau diffusé pour atteindre les détecteurs situés à une distance  $d$  connue de l'échantillon. La vitesse  $v=d/(t-t_0)$  des neutrons est une mesure directe ( $E=1/2.m v^2$ ) de l'énergie du faisceau diffusé. Le transfert d'énergie  $E_f - E_i$  correspond à l'énergie d'un mode dynamique de l'échantillon.

Un système de trois disk choppers situé en amont du monochromateur permet d'éliminer les harmoniques (les sous multiples entiers) de la longueur d'onde incidente choisie qui pourraient ne pas être filtrées par le monochromateur.

Un guide escamotable situé entre ce système de disk chopper et le monochromateur permet de passer d'un fonctionnement de l'instrument en « time focusing » (TF, guide escamoté) à un mode monochromatique (MM, guide dans le faisceau). Le TF permet une augmentation de la résolution en énergie sur une zone étroite de transfert d'énergie tout en offrant un haut flux. Le mode MM offre une résolution constante sur une gamme étendue de transfert d'énergie mais au prix d'une baisse de flux.

Actuellement SHARPER est équipé d'un monochromateur à graphite pyrolytique (HOPG Highly Oriented Pyrolytic Graphite). Les atomes sont arrangés en couches ou plans, comme les couches d'une mille-feuille. La distance entre ces plans atomiques, l'espace interréticulaire est notée  $d$ . Pour le graphite HOPG,  $d=3.35 \text{ \AA}$  ce qui permet d'utiliser la bande de longueur d'onde entre 2 et 6  $\text{\AA}$  délivrée par le guide à neutrons.

L'utilisation des bandes en longueurs d'onde supérieures, de 6 à 15  $\text{\AA}$ , nécessite l'utilisation de cristaux d'espace interréticulaire assez grand, d'au minimum  $15/2=7.5 \text{ \AA}$ . Le meilleur candidat répondant à ce critère est le fluorophlogopite (Mica synthétique Fluoré). Son espace interréticulaire de 9.24  $\text{\AA}$  permet en effet d'utiliser les neutrons de 6 à 18.5  $\text{\AA}$ .

Par rapport à son homologue naturel, la fluorophlogopite présente l'avantage de ne pas contenir d'hydrogène qui produirait un bruit de fond incohérent important. D'autre part, les

atomes hydrogène du mica naturel étant remplacés par des atomes de fluor (masse moléculaire 35 g/mol) permettent de ne pas créer d'effet de recul après interaction avec un neutron incident (1 g/mol). Cette propriété permet de s'assurer que la longueur d'onde dirigée par l'échantillon est rigoureusement celle souhaitée (à quelques pourcents près).

Les cristaux de fluorophlogopite présentent en outre l'avantage d'être ductiles, une propriété essentielle pour optimiser leur mosaïcité pour la réflexion de Bragg.

En courbant ces cristaux fluorophlogopites, la mécanique de monochromateur permettra de faire évoluer cette mosaïcité, ce qui permettra de maximiser le flux à l'échantillon.

**Intervenant :** Le maître d'ouvrage est le CEA/DRF/IRAMIS/LLB.

**Responsables de l'équipement :**

L'interlocuteurs désignés par le CEA dans le cadre de la présente demande est :

Jean-Marc Zanotti

Laboratoire Léon Brillouin/CRGSHARPER

Institut Laue Langevin

71 Avenue des Martyrs

38000 Grenoble

France

tél. : 04 76 20 75 82

Email : [jean-marc.zanotti@cea.fr](mailto:jean-marc.zanotti@cea.fr)

## 2. SPECIFICATIONS TECHNIQUES

Les paragraphes suivants décrivent les spécifications techniques minimales que doit remplir l'équipement souhaité.

### 2.1 Description générale : sélection de longueur d'onde par diffraction de Bragg.

Pour extraire une longueur d'onde précise d'un faisceau de neutrons blancs (c'est-à-dire un faisceau qui contient des neutrons avec une large gamme de longueurs d'onde), il est possible d'utiliser un cristal et appliquer la loi de Bragg.

Eléments et principes de la loi de Bragg :

1. Faisceau de neutrons blancs : Le faisceau contient des neutrons de différentes longueurs d'onde (comme la lumière blanche contient toutes les couleurs).
2. Cristal : Un cristal est fait d'atomes disposés de façon très régulière. Ces atomes sont arrangés en couches ou plans, un peu comme les couches d'une mille-feuille. La distance entre ces plans atomiques est notée  $d$ .
3. Diffraction : Quand les neutrons interagissent avec le cristal, ils sont "diffusés" ou "réfléchis" par ces plans atomiques. Mais tous les neutrons ne sont pas diffusés de la même manière. Seules certaines longueurs d'onde seront réfléchies sous certains angles.
4. Loi de Bragg : La loi de Bragg énonce que pour qu'un neutron soit réfléchi par les plans du cristal, il doit respecter cette condition :  $n\lambda = 2d\sin(\theta)$  où :

- $n$  est un entier (généralement 1 pour le premier ordre de diffraction),
  - $\lambda$  est la longueur d'onde du neutron,
  - $d$  est l'espace interréticulaire,
  - $\theta$  est l'angle entre le faisceau incident de neutrons et le plan du cristal.
5. Choisir une longueur d'onde : En ajustant l'angle  $\theta$  du cristal par rapport au faisceau de neutrons, on peut sélectionner une longueur d'onde précise. Si on fixe  $\theta$ , seuls les neutrons avec une longueur d'onde  $\lambda$  qui satisfait l'équation de Bragg seront réfléchis. Les autres longueurs d'onde passeront à travers ou seront diffusées dans d'autres directions.
  6. Notion de mosaïcité : un cristal parfait ne réfléchit qu'une bande très étroite de longueur d'onde ce qui est dans la pratique inutilisable en raison d'un flux de neutron très faible. La mosaïcité est une propriété importante à prendre en compte lorsqu'on utilise un cristal pour la diffraction de neutrons. Un cristal parfait a ses plans atomiques parfaitement alignés, mais dans un cristal réel, il peut y avoir des petites variations dans l'orientation des différentes parties du cristal. Ces petites variations sont appelées mosaïcité.

En d'autres termes, un cristal mosaïque est constitué de petits domaines, ou blocs, qui sont légèrement désorientés les uns par rapport aux autres. Cela signifie que, plutôt que d'avoir un seul angle  $\theta$  où la diffraction selon la loi de Bragg se produit, il y a en réalité une petite gamme d'angles possibles.

**Résumé :** Pour extraire une longueur d'onde spécifique d'un faisceau de neutrons blancs, on oriente un cristal à un certain angle  $\theta$ . Selon la loi de Bragg, seul un neutron ayant une longueur d'onde particulière  $\lambda$  sera réfléchi à cet angle, permettant ainsi de "filtrer" cette longueur d'onde. Pour des raisons pratiques, il est parfois nécessaire d'augmenter artificiellement la mosaïcité des cristaux.

## 2.2 Caractéristiques techniques

### 2.2.1 Considérations de principe :

Un exemple de monochromateur à déformation plastique dont fait l'objet ce marché est donné en illustration de l'article par Mikula et al., Physica B 283 (2000) 289-294.

La déformation plastique sera à appliquer uniquement au 200.0 mm de la longueur des lames de fluorophlogopite.

Il est indispensable que l'équipement puisse :

1. **Assurer le montage mécanique** des lames de fluorophlogopite avec la précision indiquée plus bas (2.2.2.2)
2. **Assurer la courbure contrôlée** de 15 empilements individuels, composés chacun de 20 lames de fluorophlogopite (dimensions : 200,0 mm de longueur, 20,0 mm de hauteur et 0,5 mm d'épaisseur). Cela correspond à une épaisseur de **10 mm par empilement**. Cette courbure des lames sera désignée ci-après comme « **courbure horizontale** ».

3. **Permettre l'arrangement angulaire** des 15 empilements superposés verticalement de manière à ce qu'ils épousent un arc de cercle. On parlera de courbure verticale.
4. Ces deux courbures verticales et horizontales devront être **pilotables électroniquement**.
5. L'équipement sera déposé en position verticale sur une table de rotation capable de pivoter autour de son axe vertical (pour sélectionner une longueur d'onde). Cet angle de rotation de -180 à 180° devra être pilotable électroniquement. La table de rotation est accouplée à un goniomètre. La table de rotation et le goniomètre ne font pas partie de ce cahier des charges.

## 2.2.2 Caractéristiques détaillées :

### 2.2.2.1 Matériaux :

- Alliages légers pour minimiser le poids total de l'équipement tout en assurant la rigidité nécessaire.
- Matériaux non magnétiques pour éviter les perturbations dans les champs magnétiques.
- Excellente résistance à la radiation (acier inoxydable de type 316L ou équivalent).
- Poids : la structure doit être légère tout en garantissant la rigidité nécessaire.
- Dimensions : l'équipement devra s'insérer dans un espace correspondant à un cylindre de 50 cm de rayon et 50 cm de hauteur.

### 2.2.2.2 Mouvements et alignements :

- **\*\*Réglages angulaires\*\*** :
  - o Précision des angles :  $\pm 0,01^\circ$ .
  - o Gamme d'ajustement :  $\pm 5^\circ$ .
- **\*\*Moteurs\*\*** : système motorisé (préférence pour des moteurs pas à pas avec encodeurs) au standard ILL. Attention : les moteurs et encodeurs font partie de l'équipement.
- **\*\*Logiciel de contrôle\*\*** : logiciel NOMAD (ILL).

### 2.2.2.3 Stabilité et précision :

- **\*\*Tolérances\*\*** :  $0.1^\circ$
- Stabilité de position :  $\pm 0,005$  mm sur 24 h.
- **\*\*Réduction des vibrations\*\*** : intégration de dispositifs d'amortissement (pads anti-vibrations, structure rigide).
- **\*\*Environnement thermique\*\*** : fonctionnement stable dans une plage de température de 15 à 30 °C.

### 2.2.2.4 Système de contrôle de la relaxation plastique :

Les lames de fluorophlogopites constituent un matériau ductile. Il est possible qu'après plusieurs cycles de déformation elles subissent une déformation plastique permanente. L'assemblage mécanique de ce monochromateur devra intégrer un mécanisme permettant d'éviter que les lames de fluorophlogopites ne restent dans une position courbée indésirable lors d'un changement de courbure. Pour éviter toute rémanence

d'une courbure indésirable, le système devra donc assurer un retour efficace à la position sans courbure.

#### *2.2.2.5 Maintenance et durabilité :*

- **\*\*Accès\*\*** : conception compatible avec l'environnement Sharper et facilitant l'entretien (pièces amovibles et modulaires).
- **\*\*Durée de vie\*\*** : conception pour un fonctionnement continu pour 10 ans minimum
- **\*\*Maintenance\*\*** : fournir la documentation nécessaire
- **\*\*Compatibilité\*\*** : remplacement rapide des composants standards (ex. roulements, moteurs).

#### *2.2.2.6 Contrainte de sécurité :*

- **\*\*Blindage neutronique\*\*** :
  - Inclusion de matériaux absorbants les neutrons (ex. B<sub>4</sub>C fritté ou équivalent).
  - Prévention des fuites de neutrons en dehors des zones de faisceau.
- **\*\*Conformité\*\*** : respect des normes de sécurité en vigueur pour les installations de neutrons (ex. norme ISO 23146).

#### *2.2.2.7 Tests :*

- **\*\*Tests de performance\*\*** :
  - Mesure de la précision angulaire et linéaire optiquement (laser).
  - Validation de la stabilité sur plusieurs cycles de fonctionnement.
- **\*\*Validation en conditions réelles\*\*** :
  - Tests sur ligne de faisceau sous flux neutronique.
  - Analyse de la qualité de la sélection en longueur d'onde.

Les tests et validations doivent faire l'objets de rapports détaillés fournis avec le système.

## 3. ENVIRONNEMENT

L'équipement sera installé dans le bâtiment ILL7 sur la branche H153 du guide de neutrons froids H15, au sein de la tourelle de l'instrument SHARPER.

## 4. DELAI, LIVRAISON, INSTALLATION ET MISE EN SERVICE

### 4.1 Délai attendu

La livraison est attendue avant le 01 mai 2026.

## 4.2 Livraison

La livraison se fera au Laboratoire Léon Brillouin/CRGSHARPER – Bâtiment ILL7, Instrument SHARPER, Institut Laue Langevin

Le Titulaire assurera :

- L'emballage de l'équipement, adapté au moyen de transport utilisé et permettant une manutention aisée dans les conditions d'accès existantes,
- La protection de l'équipement pour le stockage, de manière à éviter toute détérioration en particulier par les chocs pendant le transport, le déchargement et la dépose de l'équipement dans le local prévu.

## 4.3 Installations et mise en service

La mise en service par le titulaire se fera sous la supervision du LLB.

## 5. TESTS SUR SITE CEA

Les tests s'assurant du bon fonctionnement de l'équipement seront réalisés par le personnel LLB sur l'instrument SHARPER à l'ILL.

## 6. GARANTIE

Le Titulaire devra garantir l'équipement pour une période de 12 mois à compter de la date de réception de l'équipement par le CEA.

## 7. FORMATION

Le Titulaire devra fournir les documents nécessaires à l'utilisation de l'équipement au CEA.

## 8. RECEPTION

La réception est prononcée par le CEA après livraison sur la ligne de l'instrument SHARPER et fait l'objet d'un procès-verbal signé par les responsables du CEA.

le 14/04/2025



Jean-Marc ZANOTTI