La Source et les faisceaux sortis

La source et les faisceaux sortis

Le neutron est une particule difficile à produire. Son coût de production élevé vient, d'une part de la nocivité des particules produites dont il faut se protéger et des produits de fission qu'il faut confiner et stocker, d'autre part des multiples éléments et circuits de sécurité nécessaires pour assurer la sûreté de l'installation (prévention des accidents). Le nombre, ou plutôt le flux (nombre de particules traversant une unité de surface pendant 1 seconde) maximum de neutrons que l'on sait actuellement générer est limité par la quantité de chaleur (produite par la réaction de fission) par unité de volume de combustible que l'on parvient à évacuer. Par exemple, le RHF de Grenoble, réacteur actuellement le plus performant du monde, produit un flux de $1.5*10^{15}$ neutrons/cm^2.s, chiffre à comparer au flux délivré par un laser de puissance moyenne (10^{20} photons/cm^2.s) ou celui fourni par un générateur X de laboratoire (10^{18} photons/cm^2.s).
La mise en œuvre d'une expérience de diffusion neutronique va comporter plusieurs étapes et mettre en jeu plusieurs dispositifs expérimentaux ; il faut :

- produire un flux de neutrons le plus intense possible (fission des noyaux d'uranium dans le cœur),
- amener l'énergie des particules produites dans la gamme de celle des phénomènes étudiés (thermalisation),
- sélectionner, avec le moins de perte possible, les neutrons ayant tous la même direction de propagation (collimation) et une énergie choisie (monochromatisation),
- mesurer, après qu'ils aient interagi avec l'échantillon, la proportion de ceux qui ont été déviés et dont la trajectoire fait un angle (2θ) avec la direction initiale (analyse angulaire) et/ou ceux dont l'énergie finale a varié (analyse en énergie).

1 - Le réacteur Orphée

ORPHÉE est un réacteur essentiellement destiné à fournir des faisceaux de neutrons pour les besoins de la recherche fondamentale.

Caractéristiques principales

Flux thermique maximal dans le réflecteur (n cm^{-2}s^{-1})	-	3.10^{14}
Puissance du cœur (MW)	-	14
Fluide caloporteur	-	H_2O
Surface d'échange (m^2)	-	20,68
Volume total du cœur (dm^3)	-	56
Hauteur active (cm)	-	90
Puissance dégagée dans les plaques combustibles (MW)	-	12,6
Flux calorifique (W cm^{-2}) :		
moyen	-	61
maximal	-	172
Flux calorifique maximal du filet chaud (W cm^{-2})	-	206
Température maximale de paroi (° C)	-	123,5
Densité de puissance du réseau (MW dm^{-3}) :		
moyenne	-	0,25
maximale	-	1,2
Pression cœur (bar) :		
entrée	-	4
sortie	-	2
Vitesse d'eau (ms^{-1})	-	7,5
Charge en ^{235} U (kg)	-	5,88
Durée du cycle (jour)	-	100
Taux de combustion moyen (% ^{235} U brûlé)	-	30

Piscine cœur

❑ Le cœur

Le cœur, très compact, est contenu à l'intérieur d'un caisson parallélépipédique en zircaloy de section carrée (25 x 25 cm^2) ; sa hauteur active est de 90 cm.

Il est composé de 8 assemblages combustibles à plaques parallèles dont la matière fissile est constituée par un alliage d'aluminium et d'uranium enrichi en ^{235}U, disposés autour d'un élément réflecteur central en béryllium.

La fine division du réseau en plaques combustibles minces (1,27 mm) séparées par des canaux d'eau étroits (2,1 mm) permet une très grande surface d'échange thermique par unité de volume (de l'ordre de 0,6 m^2 par dm^3), donc une puissance spécifique élevée, elle-même condition de la production de flux neutroniques importants.

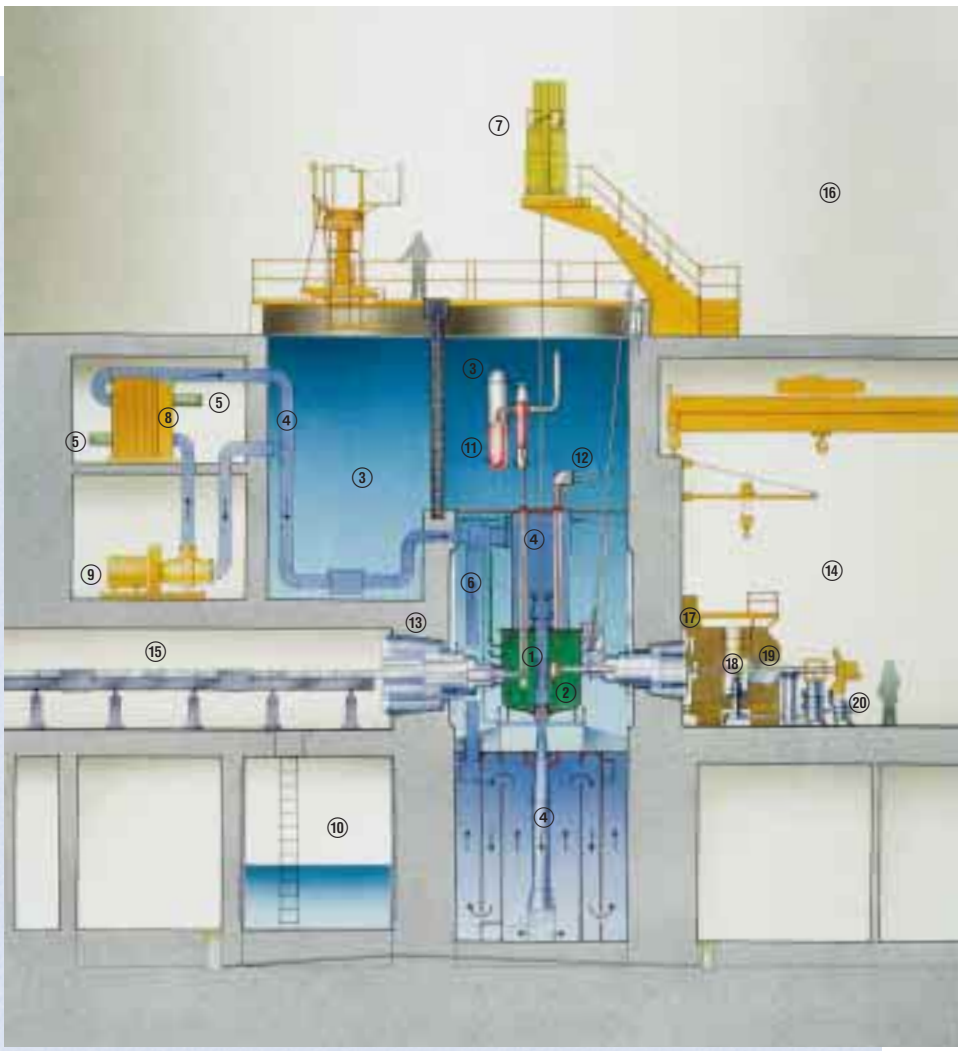
La masse totale d'uranium 235 du cœur est inférieure à 6 kg.

Le cœur est renouvelé entièrement tous les cent jours.

Le contrôle de la réactivité est effectué au moyen de plaques absorbantes (Hafnium) se déplaçant verticalement dans les assemblages de contrôle.

Le cœur est disposé dans un réflecteur d'eau lourde circulant de bas en haut dans une cuve en acier inoxydable. La protection biologique est assurée par de l'eau ordinaire déminéralisée, contenue dans une piscine de 4,5 m de diamètre et de 15 m de haut, elle-même entourée par un mur de béton de 1,50 m d'épaisseur. Le diamètre total du bloc réacteur ainsi constitué est de 7,50 m.

1. Cœur
2. Réflecteur d'eau lourde
3. Piscine et canal de transfert
4. Circuit primaire
5. Circuit secondaire
6. Circuit d'eau lourde
7. Mécanisme de commande des barres de contrôle
8. Echangeur
9. Pompe
10. Bâche de vidange de la piscine
11. Source froide
12. Source chaude
13. Canal tangentiel
14. Hall des expérimentateurs
15. Guide à neutrons
16. Hall-pile
17. Protection primaire fixe
18. Monochromateur
19. Protection du monochromateur
20. Spectromètre



Bloc réacteur, coupe verticale

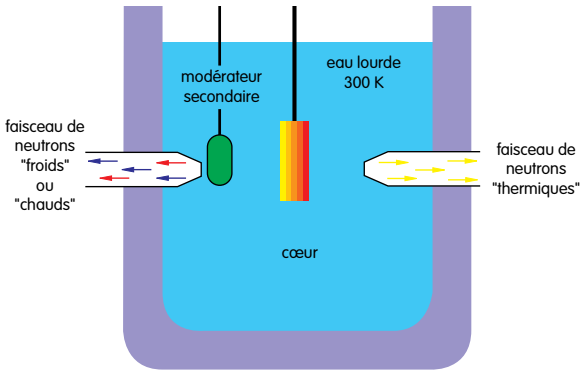
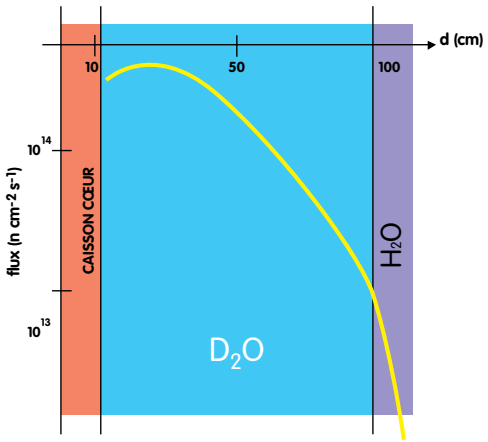


Schéma du modérateur



Flux de neutrons thermiques en fonction de la distance au cœur

❑ La thermalisation des neutrons

Le modérateur

La réaction de fission en chaîne dans le cœur, casse les noyaux d'uranium 235 en éléments plus légers et libère en moyenne 2,5 neutrons par atome d'uranium consommé. Ces neutrons ont une énergie cinétique d'environ 1 million d'électron-volt, beaucoup trop grande pour qu'ils soient utilisables en physique de la matière condensée. Afin de les ralentir, ils sont mis en contact avec un matériau adéquat (le modérateur) où, par chocs successifs avec les atomes, ils cèdent la plus grande partie de leur énergie. Les matériaux les plus adaptés au rôle de modérateur sont des matériaux constitués d'atomes légers : l'eau, le graphite, le béryllium... De plus, on veut minimiser les évènements où, au cours du choc, l'atome du modérateur capture le neutron ; cette condition a fait choisir pour ORPHÉE un modérateur « eau lourde » qui entoure le cœur. Les neutrons de fission y sont ralentis, et après quelques chocs, ils ont en moyenne une énergie (vitesse) comparable à l'énergie cinétique des atomes ralentisseurs (~ 0,025 eV pour un modérateur à 300 K). C'est au sein de ce bidon que plongent les canaux par lesquels on prélève les neutrons « thermiques ».

Les sources « froides » et « chaudes »

Pour les besoins de certaines expériences on désire avoir une source de neutrons d'énergie soit plus faible (~ 0,001 eV), soit plus élevée (~ 1 eV). On obtient de tels neutrons grâce à des modérateurs secondaires qui, placés dans l'eau lourde, créent des conditions locales modifiant l'énergie (la vitesse) moyenne des neutrons. Un récipient rempli d'hydrogène liquide (température 20K) constituera une source de neutrons lents ; un bloc de graphite chauffé à 1400 K fournira des neutrons de grande énergie. Ce sont respectivement les sources froides et chaudes.

Source froide annulaire

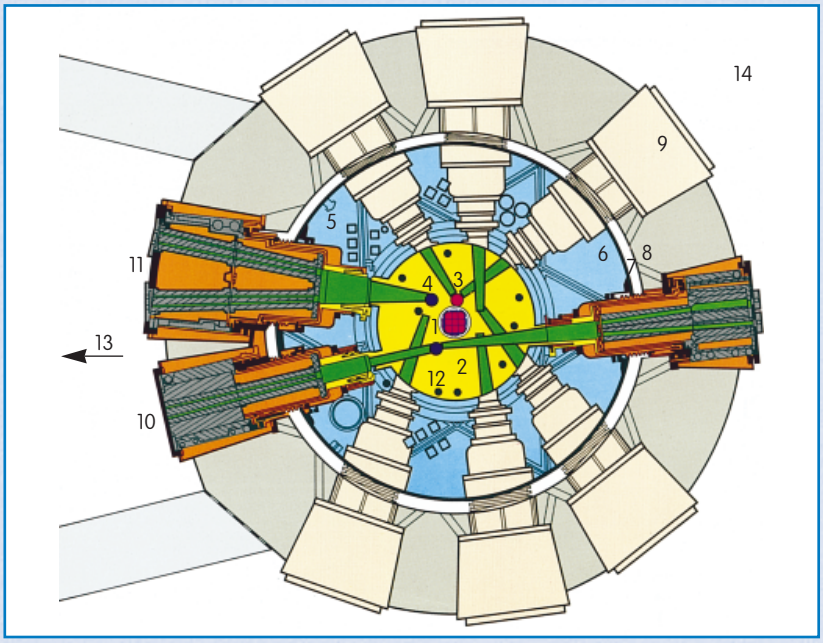
❑ Les canaux

Le réacteur est équipé de 9 canaux horizontaux, tangentiels au cœur, permettant l'utilisation de 20 faisceaux de neutrons. Le « nez » de ces canaux est situé dans le modérateur à proximité du cœur, là où le flux des neutrons thermalisés par l'eau lourde est maximal ; trois canaux visent deux « sources froides », deux autres canaux une « source chaude ». Il est ainsi possible de sélectionner le spectre de neutrons le mieux adapté aux utilisations souhaitées.

De 2 canaux visant les sources froides sont extraits six faisceaux canalisés par des « guides à neutrons » sortant du bâtiment réacteur pour être utilisés dans un hall attenant (hall des guides à neutrons).

9 canaux verticaux servent à l'irradiation d'échantillons divers et à l'analyse par activation. Dans ce dernier cas, les échantillons sont expédiés par une liaison pneumatique au Laboratoire Pierre Sue, laboratoire commun au CEA et au CNRS.

1. Cœur
2. Réflecteur d'eau lourde
3. Source chaude
4. Source froide
5. Piscine
6. Cuvelage de la piscine
7. Vide annulaire
8. Doublante piscine
9. Canal simple
10. Canal simple
11. Canal double
12. Canal vertical
13. Hall des guides à neutrons
14. Hall des expérimentateurs



Bloc pile, coupe horizontale

Salle de conduite du réacteur Orphée

2 - Les faisceaux sortis

❑ Le guide de neutrons

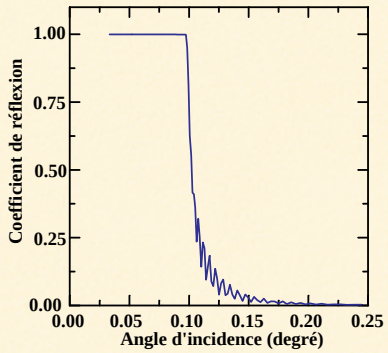
Le guide G1 et le déviateur G1 bis (en dessous)

Le premier élément de la majorité des appareils de spectrométrie neutronique est un monochromateur. Sa fonction est de prélever, dans le faisceau polychromatique extrait du modérateur, les neutrons dont la longueur d'onde se situe à l'intérieur d'une bande plus ou moins étroite et de les diriger sur l'échantillon. Les autres neutrons du faisceau, c'est-à-dire entre 90 et 99 % du total, traversent le monochromateur et vont se perdre dans le béton de protection ! Il est clair qu'une disposition permettant à plusieurs spectromètres prélevant des longueurs d'onde différentes, d'être placés sur un même faisceau représente une utilisation plus rationnelle des neutrons produits. Cependant les spectromètres sont des appareils volumineux et ceci n'est possible qu'en les disposant les uns derrière les autres, et donc de plus en plus loin de la source. En rappelant que les neutrons sont des particules neutres qui se comportent, du point de vue de leur dynamique dans le vide comme un gaz parfait, le flux de particules à la distance d de la source est proportionnel à $1/d^2$ (angle solide sous lequel on voit la source) ; ainsi disposés les appareils successifs seraient de moins en moins lumineux. Les guides de neutrons, en « canalisant » les particules, vont permettre de distribuer loin du cœur, des faisceaux qui conservent leur divergence angulaire, c'est-à-dire sans qu'il y ait perte de flux. Cet effet guide est d'autant plus marqué que la longueur d'onde est plus grande.

Dépôt de couches minces par pulvérisation cathodique.
Vue d'ensemble de la machine utilisée pour la fabrication de guides supermiroirs (photo CILAS).

Guide à simple réflexion totale

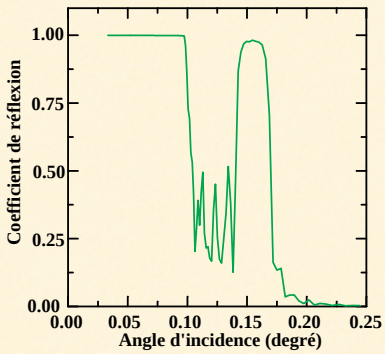
La propagation de l'onde associée au neutron fait intervenir l'indice « n » du milieu, qui dépend de la nature des atomes qui le composent. A une interface, le passage d'un milieu « n_1 » à un milieu « n_2 » va entraîner un changement de la direction de propagation et sous certaines conditions ($n_2<n_1$; angle d'incidence < angle critique) l'onde ne pourra pas « traverser » ; on aura réflexion totale. L'angle critique dépend de la différence (n_2-n_1) et de la longueur d'onde du neutron. Ce phénomène, bien connu pour les ondes électromagnétiques (fibre optique), est utilisé pour transporter sans perte les neutrons sur des distances de plusieurs dizaines de mètres. Le guide est un tube creux, en verre épais, dont la paroi interne est polie et recouverte d'une couche de nickel. Cependant l'indice de ce matériau, bien que l'un des meilleurs, n'est que peu différent de l'indice du vide et l'angle critique de réflexion totale est petit (0.5 d° pour une longueur d'onde de 0.5 nm).



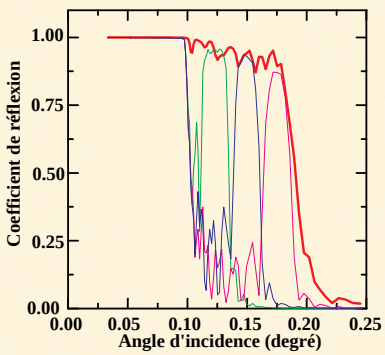
Réflexion par une couche épaisse de nickel (300 nm).
Tous les neutrons arrivant sur la surface avec un angle inférieur à l'angle critique sont réfléchis. C'est le plateau de réflexion totale. Pour des angles d'incidence supérieurs, ils sont en partie transmis, en partie réfléchis.

Guide à supermiroirs

Pour augmenter les performances des guides, on utilise les interférences constructives entre les ondes réfléchies par une alternance de couches d'épaisseurs contrôlées, qui créent une succession de pics de diffraction au-delà de l'angle critique. La technique actuelle permet de déposer des multicouches nickel-titane donnant au guide un angle critique apparent double de celui d'un guide à simple réflexion totale.



Réflexion par une multicouche périodique d'un matériau réflecteur comme le nickel (11 nm) et d'un matériau espaceur comme le titane (11 nm) surmonté d'une couche épaisse de nickel.
On retrouve le plateau de réflexion totale du cas précédent, mais en plus, un phénomène d'interférences constructives entre les ondes réfléchies par les couches de nickel crée un pic de réflexion pour un angle d'incidence particulier supérieur à l'angle critique. C'est cet effet qui va être utilisé pour prolonger le plateau de réflexion totale.



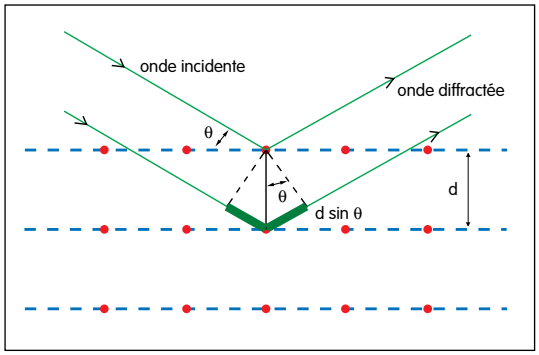
Réflexion par une multicouche non-périodique de nickel et de titane surmontée d'une couche épaisse de nickel.
On arrive ainsi à créer une série de pics dans le prolongement du plateau de réflexion totale. La somme de ces pics donne une extension au plateau de réflexion totale. On obtient ainsi un angle critique apparent beaucoup plus grand. Plus l'extension recherchée est importante, plus les couches doivent être nombreuses et fines.

❑ La sélection des neutrons

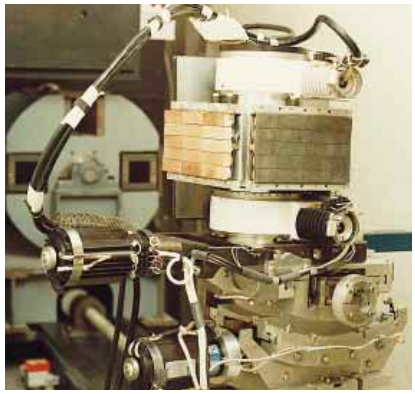
Le monochromateur

En relation avec la dualité onde-corpuscule il existe deux familles de monochromateurs :

• Les monocristaux, qui fonctionnent sur le principe de la diffraction d'une onde par un système périodique.



Réflexion de Bragg sur un réseau périodique d'atomes.

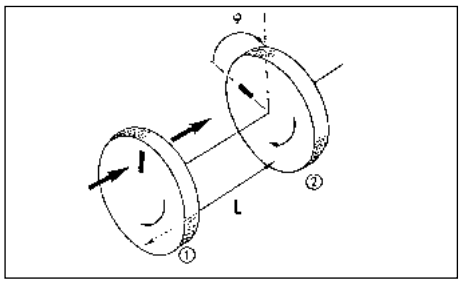


Montage permettant le choix entre différents cristaux monochromateurs. (photo ILL).

Si d est la périodicité du milieu, dans le plan d'incidence, seuls les neutrons ayant une longueur d'onde (λ) vérifiant la relation de Bragg $n\lambda = 2d\sin\theta$ seront réfléchis en phase. Les cristaux les plus couramment utilisés sont le cuivre, le germanium, certains alliages, et surtout le graphite pyrolitique.

Si tous les plans réflecteurs sont parfaitement parallèles entre eux, peu de neutrons incidents vérifieront la relation de Bragg : le faisceau diffracté sera très bien résolu mais aura une intensité très faible. Pour augmenter la « réflectivité » on utilise des cristaux dont les plans d'atomes présentent un certain désordre d'orientation (mosaïcité). Les cristaux les plus couramment utilisés (cuivre, germanium, graphite pyrolitique) ont des mosaïcités comprises entre 0,5 et 1 d°.

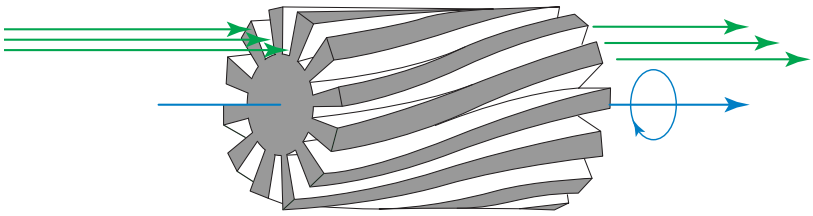
• Les systèmes mécaniques, qui sélectionnent les particules selon leur vitesse.



Monochromateur à disques.

Partie terminale du monochromateur à chopper «Mibémol»

Chaque disque est en matériau absorbant et comporte une fente transparente. Ils sont distants de L et tournent à la même vitesse angulaire ω. Si les fentes font entre elles un angle constant φ, seuls les neutrons ayant une vitesse $V \simeq \omega L/\varphi$ sont transmis.



Sur un cylindre de longueur L, on trace des « sillons » hélicoïdaux (pas de l'hélice = P). Si le cylindre tourne autour de son axe à la vitesse angulaire ω, chaque sillon ne transmet que les neutrons ayant une vitesse $V \simeq P\omega/2\pi$.

Sélecteur de vitesse.

Le sélecteur mécanique est bien adapté à la production de faisceaux de grande longueur d'onde ($\lambda_0 > 0{,}6$ nm). Il permet aussi, lorsqu'une bonne résolution en énergie n'est pas nécessaire (par exemple pour la diffusion aux petits angles) d'augmenter le flux disponible en fabriquant un faisceau « peu » monochromatique ($\Delta V/V \simeq 10$ à 20 %).

Monochromateur focalisant

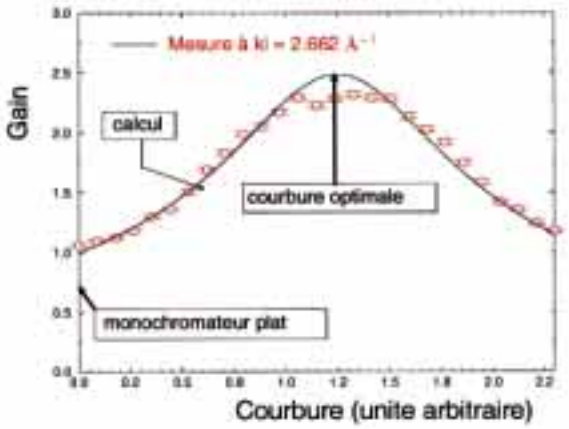
La source (volume de modérateur en regard du nez du canal) est une source étendue dont il est possible d'extraire des faisceaux de grande dimension : à Orphée environ 24*90 mm2.

Le monochromateur focalisant va, au prix d'une perte minime de qualité, « concentrer » le faisceau monochromatique et augmenter ainsi le flux qui arrive sur l'échantillon.

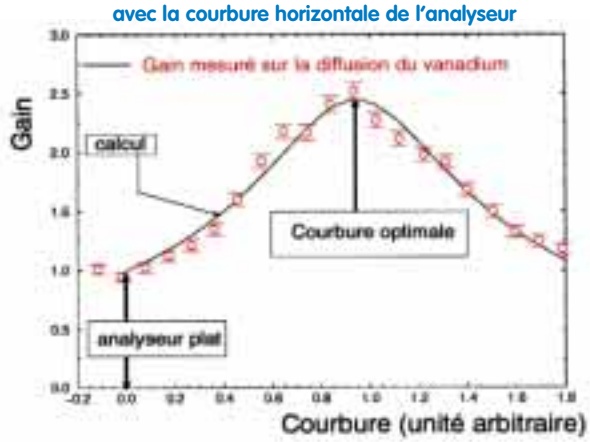
Le principe est celui de la réflexion d'une onde par une surface courbe (analogie avec la focalisation d'un faisceau de lumière). Mais il faut tenir compte ici de la condition de Bragg pour la réflexion dans le plan d'incidence. De ce fait les conditions de focalisation vont dépendre de la longueur d'onde.

Montage à focalisation variable dans les 2 plans (analyseur 1T).
Assemblage de cristaux plans à orientation modulable permettant de faire varier les courbures de l'ensemble.

Gain d'intensité
avec la courbure verticale du monochromateur



Gain d'intensité
avec la courbure horizontale de l'analyseur



Condition de focalisation

- verticale

$$\frac{1}{R_V} = \frac{1}{2\sin\theta_0}\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}\right)$$

- horizontale

$$\frac{1}{R_H} = \frac{\sin\theta_0}{2}\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}\right)$$

avec :
R_v rayon de courbure verticale
R_H rayon de courbure horizontale
Z_1 distance source-monochromateur
Z_2 distance monochromateur-point focal
θ_0 angle de Bragg

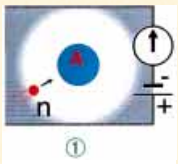
❑ La détection des neutrons

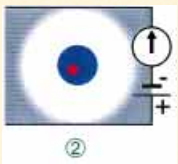
Le détecteur

Après avoir interagi avec différents constituants (noyaux et/ou spins électroniques) de l'échantillon, le neutron a une direction de propagation et une énergie différentes de leurs valeurs initiales. C'est de l'amplitude de ces changements et de la proportion des neutrons qui les subissent que l'on obtiendra les informations sur les distances et les mouvements présents dans l'échantillon étudié. L'élément final du spectromètre sera donc un détecteur, qui compte le nombre de neutrons qui le traversent (indépendamment de leur énergie, ce paramètre étant mesuré par un dispositif annexe).

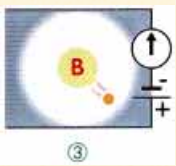
Le neutron ne créant pas d'ions sur son passage, sa détection doit toujours mettre en jeu une réaction nucléaire. La majorité des détecteurs de neutrons fonctionne sur un même principe : une chambre est remplie d'un gaz dont un constituant absorbe fortement les neutrons thermiques en réémettant une particule chargée ; un champ électrique accélère cette charge qui, en se cognant aux autres atomes du gaz, va les ioniser en produisant des électrons secondaires (amplification) ; la cathode récolte ces électrons et donne une impulsion électrique que l'on détecte.

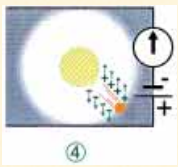
Les 6 étapes de la détection d'un neutron thermique :



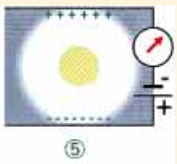


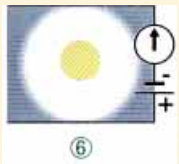
L'absorption du neutron par le noyau A





déclenche l'émission d'une particule ionisante qui, accélérée par un champ électrique, crée des charges.





Récoltées par les électrodes, ces charges produisent une impulsion de courant que l'on détecte.

Il faut que le noyau A :

- soit une molécule gazeuse à la température ambiante,
- « aime » beaucoup capturer les neutrons,
- émette une particule très ionisante.

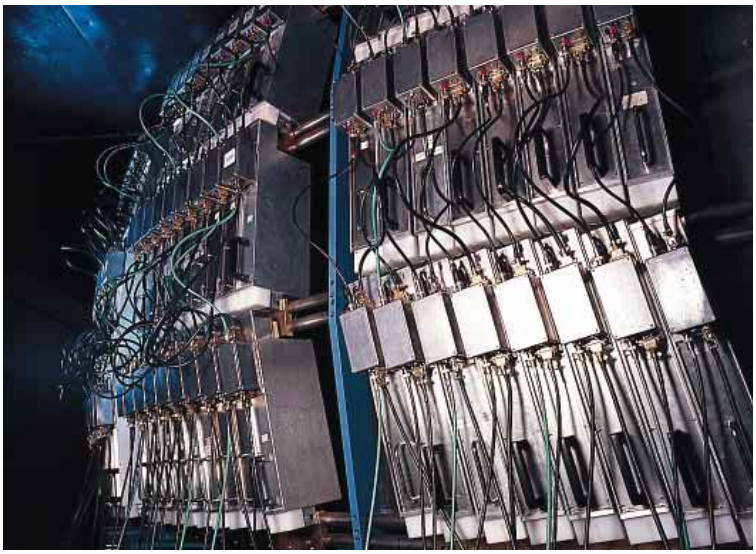
Deux bons candidats :

$^{10}B + n \Rightarrow {}^{7}Li + {}^{4}He$ (Gazeux sous forme BF_3)
- Avantages : bonne efficacité, bon marché.
- Inconvénient : très toxique.

$^{3}He + n \Rightarrow {}^{3}T + p$ (Gazeux naturellement)
- Avantages : bonne efficacité, non toxique.
- Inconvénient : très cher, très sensible aux impuretés.

Multidétecteur

Après diffusion par l'échantillon, les directions de propagation des particules sont réparties dans tout l'espace. La mesure de cette loi de répartition en intensité $I(2\theta)$ permet d'obtenir, à condition d'explorer un domaine angulaire aussi vaste que possible, la relation d'ordre qui caractérise le diffuseur étudié (structure). L'expérience sera d'autant plus rapide (ou d'autant plus précise, au choix de l'expérimentateur) que l'on se donnera les moyens de mesurer simultanément cette intensité dans plusieurs directions.



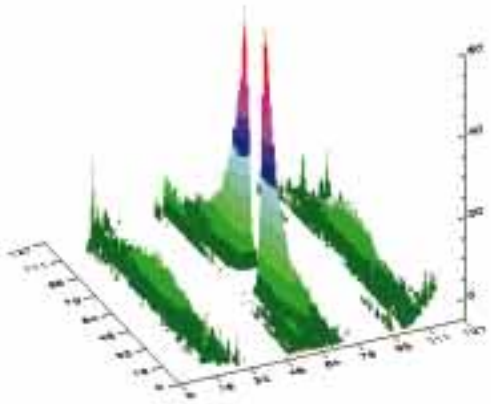
Une méthode consiste à juxtaposer plusieurs détecteurs individuels.

Banc de détecteurs du spectromètre Mibemol

Une autre possibilité est de concevoir un détecteur étendu qui, par son architecture interne, donne la position de l'atome absorbeur, à l'origine de la particule ionisante détectée.
Ce sont les multidétecteurs ou PSD (Position Sensitive Detector).

Il en existe de plusieurs types :
- à 1 dimension, avec repérage de l'abscisse de l'impact (linéaire) ou de la variable angulaire (type banane),
- à 2 dimensions dans un plan où l'on repère, grâce à un réseau de fils perpendiculaires, à la fois l'abscisse et l'ordonnée du point d'absorption du neutron (détecteur XY).

Multidétecteur XY de 64x64 cellules, en cours d'assemblage (photo ILL).



Représentation 3D du nombre de neutrons recueillis dans chaque cellule d'un multidétecteur plan XY de 128 x 128 cellules (diffusion par un polymère cristal liquide)