

Le Service d'Optique des Neutrons



INSTITUT LAUE LANGEVIN

NEUTRONS
FOR SOCIETY

P. Courtois

Service d'Optique des Neutrons

3 groupes – 15 personnes

- **Le Groupe Monochromateur**

Cristaux Mosaïques & Monochromateurs

- **Le Groupe Multicouches**

Super-Miroirs & Super-Miroirs Polarisants

- **Le Groupe ³Helium**

Filtres Polarisants ³Helium

Le Service d'Optique des Neutrons

Au Service de la science...

Production de composants d'Optique Neutrons performants **Cristaux Mosaïques, Super-Miroirs et Filtres ³Helium**

- Assurer la maintenance des instruments ILL
- Assurer la livraison de filtres polarisants ³He
- Assister les scientifiques dans le cadre de leurs expériences
- Proposer des améliorations aux instruments existants
- Programme Millennium et Endurance1
- Développer de nouveaux composants

Optiques Neutrons

Des Composant clés à l'ILL

- Monochromatisation
- Optimisation du Flux ou Résolution
- Polarisation
- Focalisation - filtres – collimation...

- **Monochromateurs:** 29 instruments

D2B, D19, D10, D4-IN1, D3, D9, Salsa, IN20, IN8, Thales, Lagrange, D16, IN6-Sharp, IN4, IN16B, PN3, D7, BRISP, IN13, IN1, D1B, D23, s-Adam, IN12, IN22, IN13, S18, GRANIT

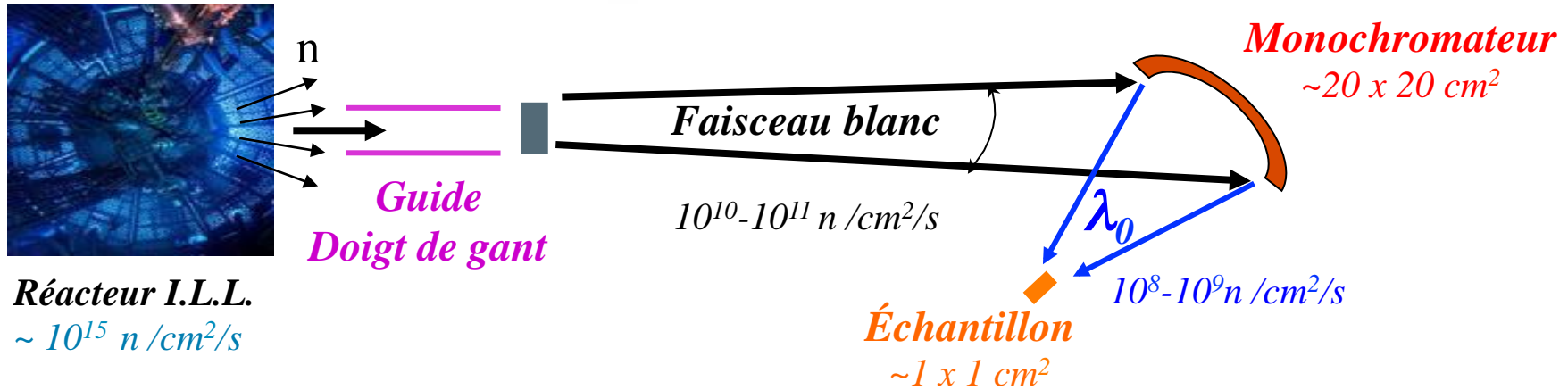
- **Super-Miroirs** (hors guide): 11 instruments

D22, D33, LADI, D17, Figaro, D7, IN5, IN15, WASP, PF1B, s-ADAM

- **Filtres Helium3:** 7 instruments

D3, D17, D22, D33, PF1B, s-ADAM, IN20 (+ Panther)

Monochromateurs Neutrons



Sélection d'un bande de longueur d'onde $\lambda_0 = 2 d \sin\theta_B$

- Grande surface active pour couvrir le faisceau direct (de 100 à 400 cm² !)
- Focalisation verticale (gain en flux)
- Focalisation Horizontale (option spectromètres trois axes)

Monochromateurs Neutrons

Cristaux mosaïques

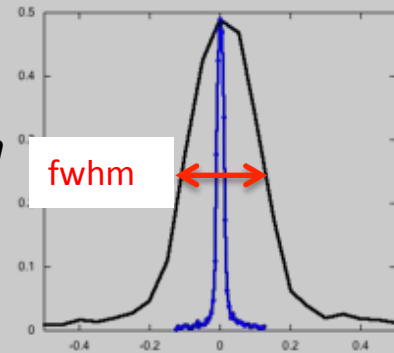


Cristal mosaïque: cristal avec défauts structuraux

Mosaïque

largeur à mi hauteur du pic de diffraction

Pour un cristal parfait : $\text{fwhm} \approx 0^\circ$!



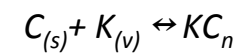
- Permet d'optimiser le flux de neutrons en fonction d'une résolution donnée
- **Mosaïque \approx divergence du faisceau incident**
 $0.2^\circ < \text{FWHM} < 0.6^\circ$
- Taille cristal monochromateur \approx taille échantillon

Cristaux pour Monochromateurs

Cristal	orientation	Mosaïque	Neutrons	Application	origine
Si $d_{111} = 3.13 \text{ \AA}$	(111) (113)	Perfect bent	Froids Thermiques	Haute résolution	<i>Industrie</i>
C (graphite) $d_{002} = 3.35 \text{ \AA}$	HOPG(002)	0.5° - 2°	Froids Thermiques	Haut Flux	<i>Industrie</i>
Cu $d_{111} = 2.08 \text{ \AA}$	(111) (220) (200) (331)	0.01° - 3°	Chauds Thermiques	Haute resolution Haut flux	Production ILL
Ge (dopé) $d_{111} = 3.26 \text{ \AA}$	(111) (113) (335)	< 0.3°	Froids Thermiques	Haute résolution	Production ILL
KC_8 $d_{002} = 5.3 \text{ \AA}$	(002)	2° - 5°	Froids	Haut flux	Production ILL
Cu_2MnAl $d_{111} = 3.43 \text{ \AA}$	(111)	0.2° - 0.6°	Chauds Thermiques	Neutrons Polarisés	Production ILL

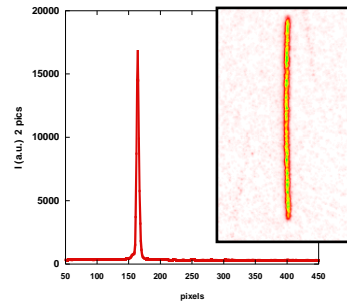
Cristallogénèse

Croissance de Monocristaux de grande taille

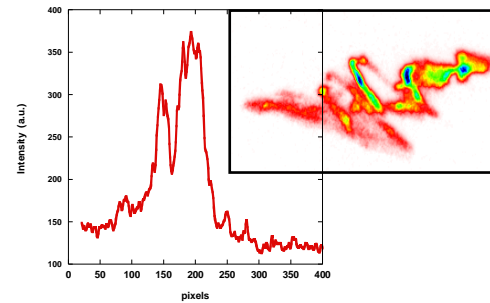


Qualité des Monocristaux

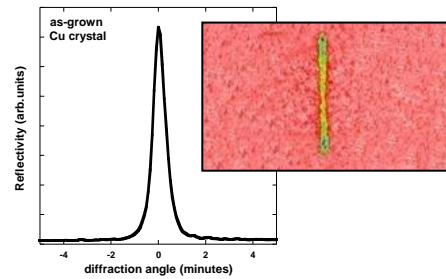
Caractérisation non destructive par Diffraction RX-durs



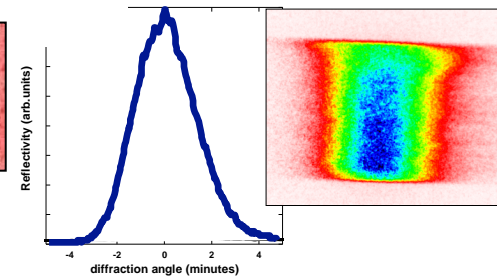
Cristal parfait Si



Cristal mauvais



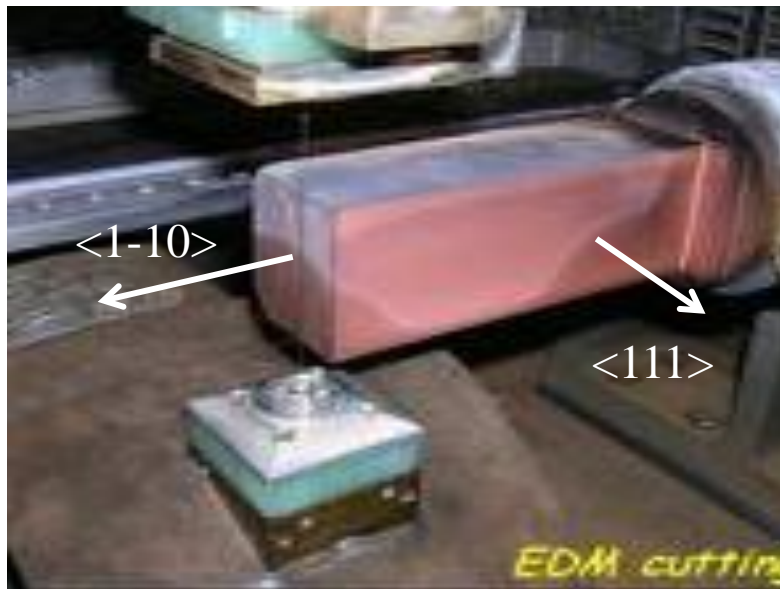
Cristal Cu brut



Cristal Cu mosaïque

Préparation

Découpe Cristaux Orientés

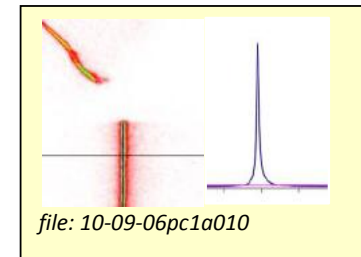


Découpe par électroérosion

- *précision découpe ± 0.01 mm*
- *précision orientation $\pm 0.025^\circ$*



Pièces de Cu monocrystallines



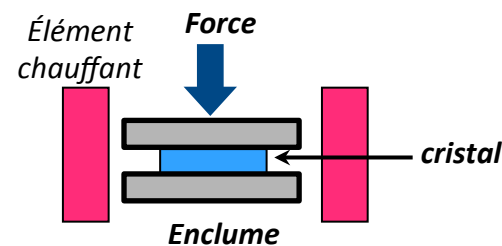
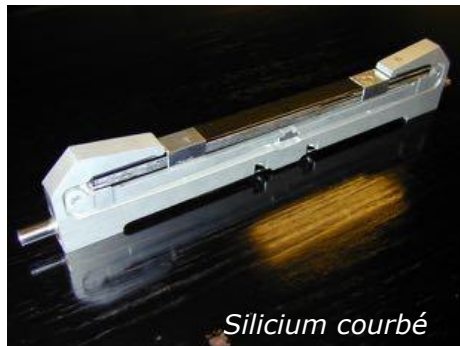
Contrôle Qualité

Mosaïque = 0.02°
➤ *inadaptée pour monochromateurs !*

Optimisation de la mosaïque

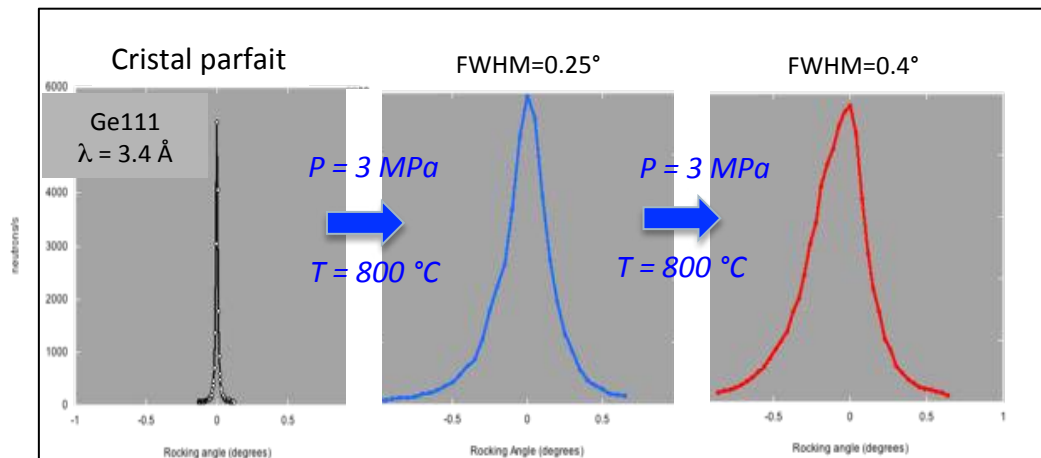
Différentes techniques...

- Déformations plastiques à hautes températures (Cu, Ge, CaF₂)
- Traitements thermiques (Heusler, Graphite intercalé)
- Technique de l'« Onion peel » (Cu, Ge)
- Cristaux parfaits courbés (Si)

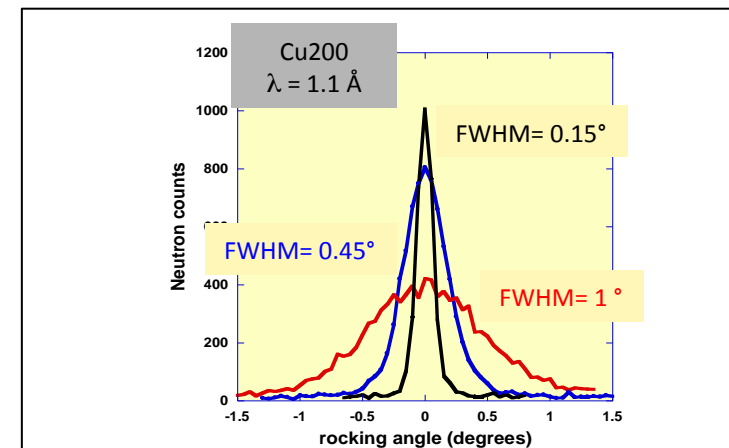


Cristaux Mosaïques Cu & Ge

Propriétés Neutroniques



- **Germanium:** Cristal initial = cristal parfait
- 2 traitements thermiques (P,T) pour produire une mosaïque de 0.4°
- Réflectivité $\approx 50\text{-}55\%$ ($\lambda = 3.4 \text{ \AA}$)



- **Cuivre:** mosaïque initiale = 0.02°
- Après pressages (P,T)
- $0.1^\circ < \text{mosaïque} < 3^\circ$
- Réflectivité $R \approx 50\%$ ($\lambda = 1.1 \text{ \AA}$)

Monochromateurs Cuivre

Diffractomètres et Spectromètres Trois Axes

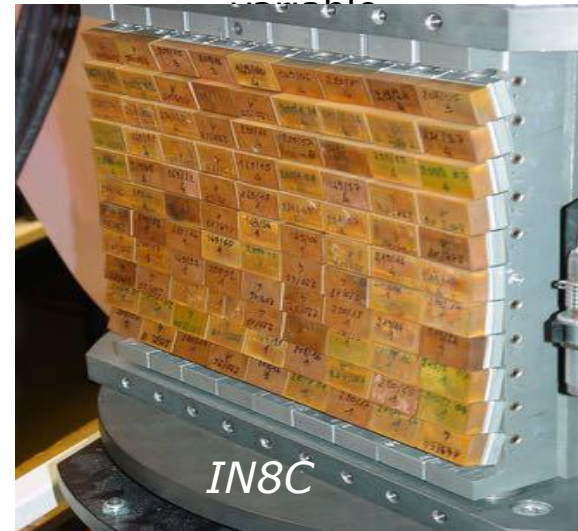
Monochromator Cu(200)
Focalisation Verticale



D20
300 x 75 mm²

Flux = $9.8 \cdot 10^7$ n cm⁻² s⁻¹ ($\lambda = 1.3 \text{ \AA}$)

Monochromator Cu(200)
Double focalisation variable



IN8C
230 x 180 mm²

Flux = $4.6 \cdot 10^8$ n cm⁻² s⁻¹ ($\lambda = 1.5 \text{ \AA}$)
(faisceau primaire $\sim 2.5 \cdot 10^{10}$ n cm⁻²s⁻¹)

Nouveaux monochromateurs Ge

Diffractomètres



D20 - Ge(111)
300 x 75 mm²



D2B - Ge(335)
300 x 50 mm²

Neutrontech

D20

Haut Flux

- 60 cristaux Ge(111)
- Mosaïque **FWHM = 0.4°**
- Focalisation Verticale ($\lambda = 3.6 \text{ \AA}$)

D2B

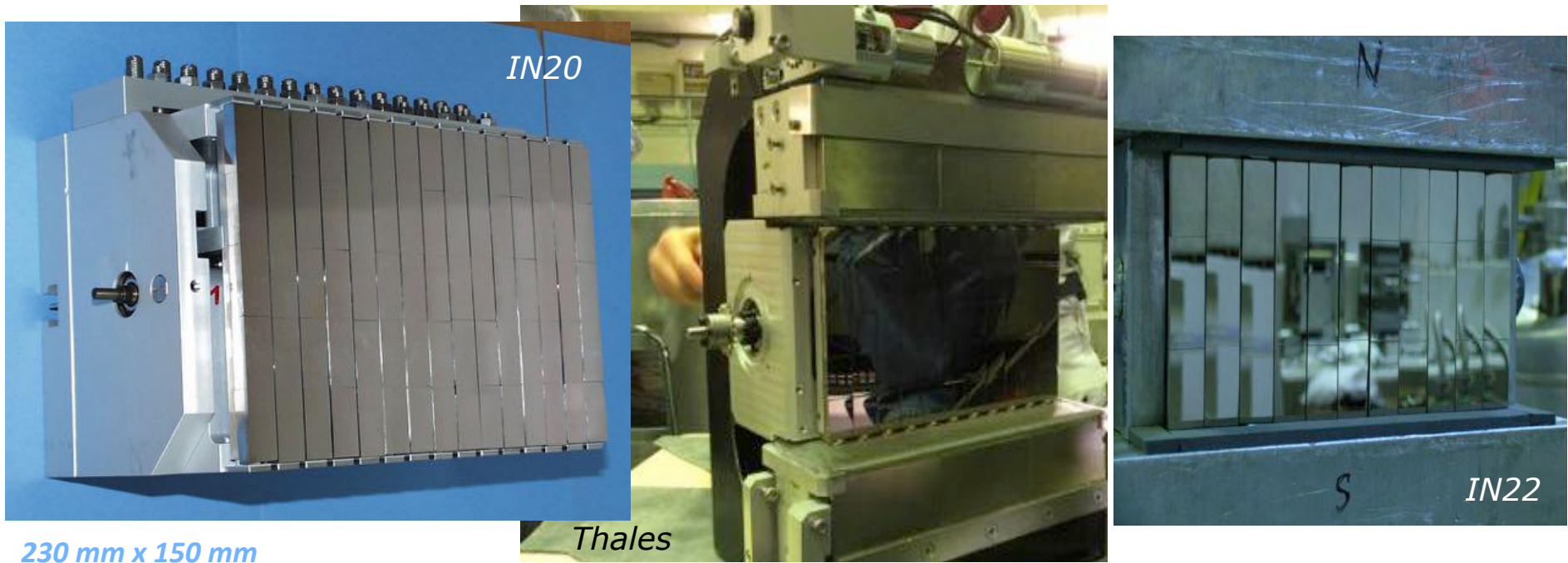
Haute résolution

- 30 cristaux Ge(335)
- Mosaïque **FWHM = 0.25°**
- Focalisation Verticale ($\lambda = 3.15 \text{ \AA}$)

THE EUROPEAN NEUTRON SOURCE

Monochromateurs Heusler

Spectromètres trois axes IN20, THALES et IN22-Neutrons Polarisés



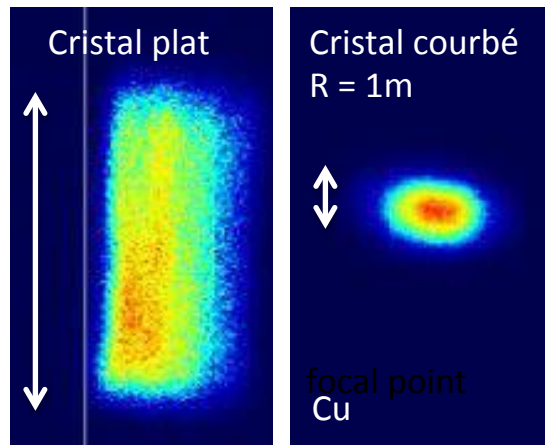
230 mm x 150 mm

Neutrontech

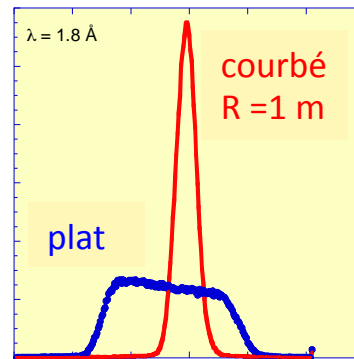
THE EUROPEAN NEUTRON SOURCE

Cristaux mosaïques courbés

Optimisation de la focalisation verticale des faisceaux de neutrons



Faisceau direct $h = 30 \text{ mm}$



Gain en flux $\times 5$

largeur image mi-hauteur = 4 mm



Cu



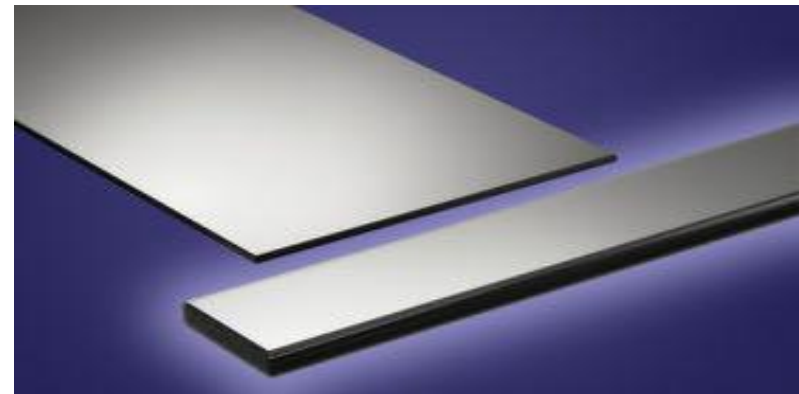
Ge

➤ **Nouveau monochromateur Ge pour D1B**

Miroirs & Super-Miroirs Neutrons

Applications

- Guides de neutrons
- Benders
- Filtres $T > 90\%$
- Monochromateurs $\Delta\lambda/\lambda > 10\%$
- Polariseurs / Analyseurs $P > 95\%$

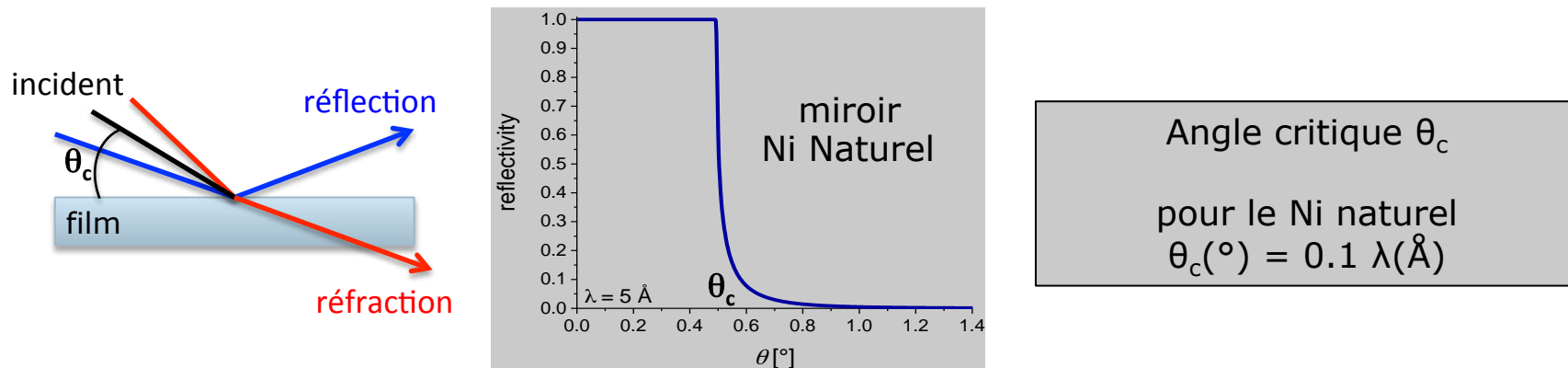


Production I.L.L.

- $m=4$ Ni/Ti - $R > 75\%$
- $m=3.2$ Co/Ti - $R > 70\%$
- $m=3.6$ Fe/Si - $R > 80\%$

Miroirs Neutrons

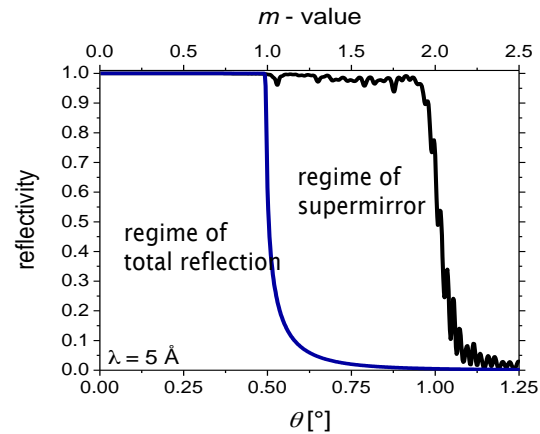
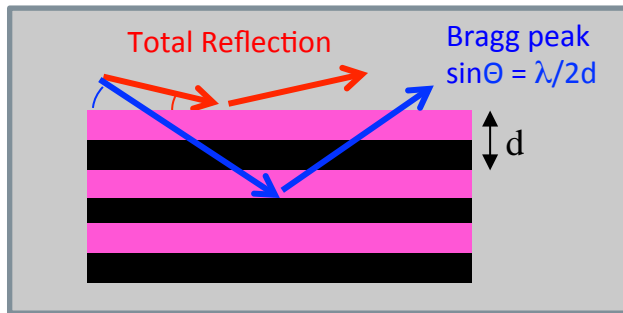
Principe



- Transport des neutrons vers les instruments
- mais performances limitées car angles critiques faibles, notamment dans le cas des neutrons thermiques ($\lambda < 4 \text{ \AA}$)
- Améliorations des performances : augmentation de l'angle critique
➔ **Super-Miroirs**

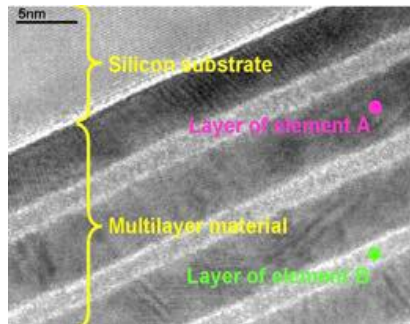
m Super-Miroirs

Augmentation de l'angle critique



Angle critique θ_c

m Super-Miroir
 $\theta_c(^\circ) = m \cdot 0.1 \lambda(\text{\AA})$



Optimisation du flux de neutrons

$$Gain = \left(\frac{\theta_c^{sm}}{\theta_c^{Ni}} \right)^2 \propto m^2$$

attention : augmentation de la divergence !
 (Théorème de Liouville)

Production des Super-Miroirs

Dépôts réactifs en Phase Vapeur



*Sputtering machine PI
Production 0.8 m² / jour*



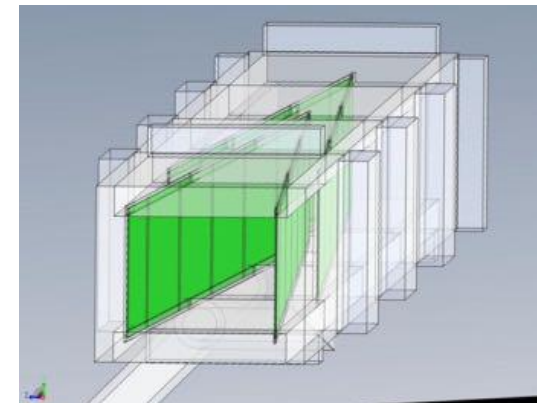
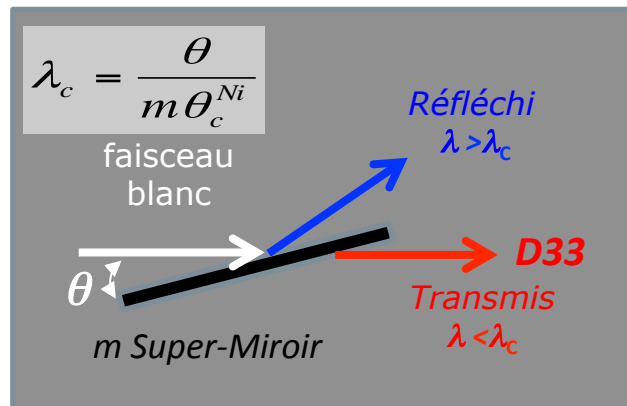
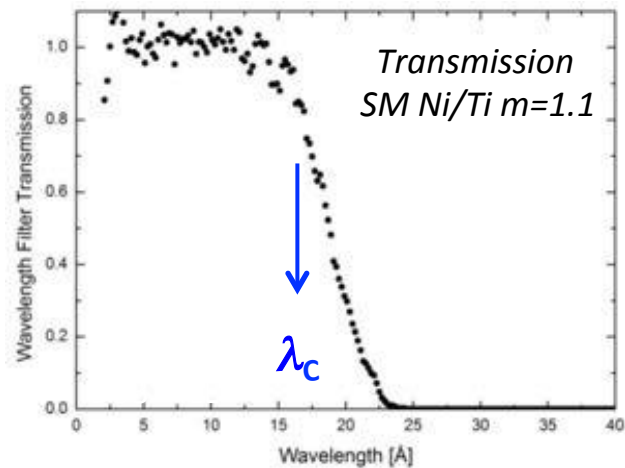
*Sputtering machine EVE
Production 0.2 m² / jour*

THE EUROPEAN NEUTRON SOURCE

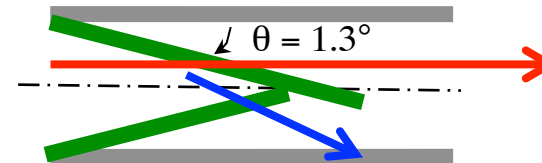
Filtres en V pour neutrons froids

Instrument D33

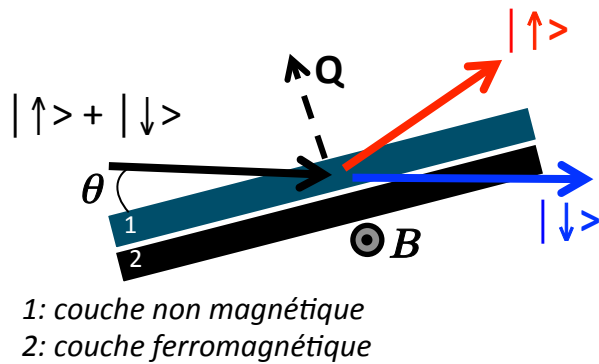
Suppression des neutrons pour $\lambda > \lambda_c$



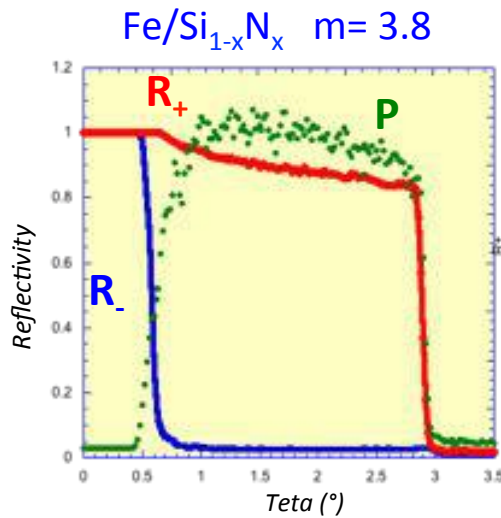
- $\theta = 1.3^\circ \rightarrow \lambda_c = 12 \text{ \AA}$
- Longueur du filtre en V = 842 mm !



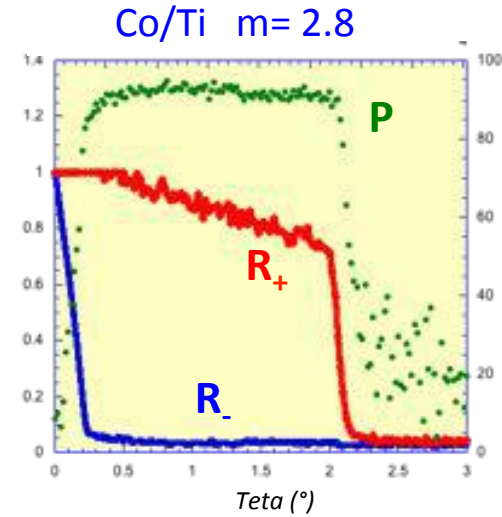
Super-Miroirs Polarisants Fe/Si & Co/Ti



- Sélection d'un état de spin
- neutrons **spin up** réfléchis
 - neutrons **spin down** transmis
 - Faisceau Polarisé



- R > 80; P > 95%**
- Polariseur
 - *mais Réflexion totale aux petits angles*



- R > 70 % ; P > 95%**
- Couche anti-réflexion
 - Analyse de Polarisation
 - *mais activation Co !*

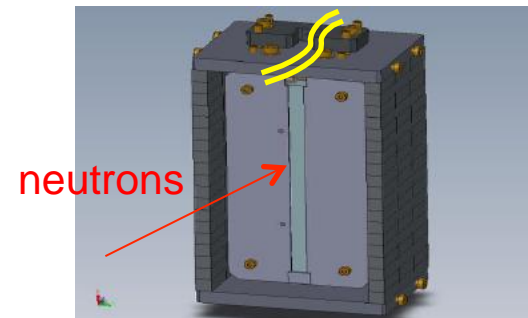
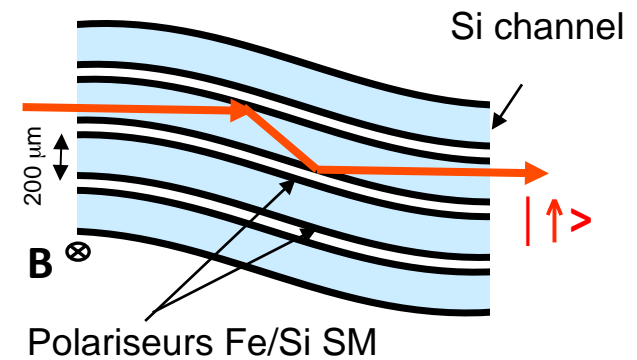
Polariseur S-Bender pour D17

Fe/Si Super-Miroirs

- $m = 3.2$ Fe/Si SM
- Substrat Silicium (0.2 mm)
- Géométrie en réflexion (spin up transmis)
- 60 lames (L= 50 mm; H= 160 mm; l = 12 mm)

Très bonnes performances

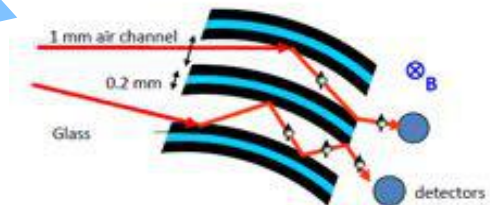
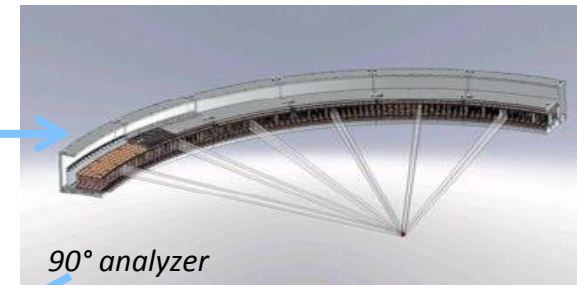
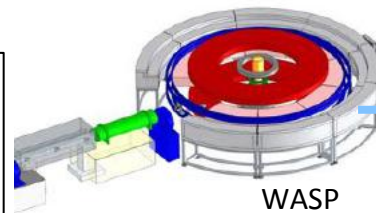
- $P_{\text{neutrons}} > 95\%$ (5.5 Å)
- Transmission $\sim 40\%$ (neutrons polarisés)



Analyseur « grand angle » pour WASP

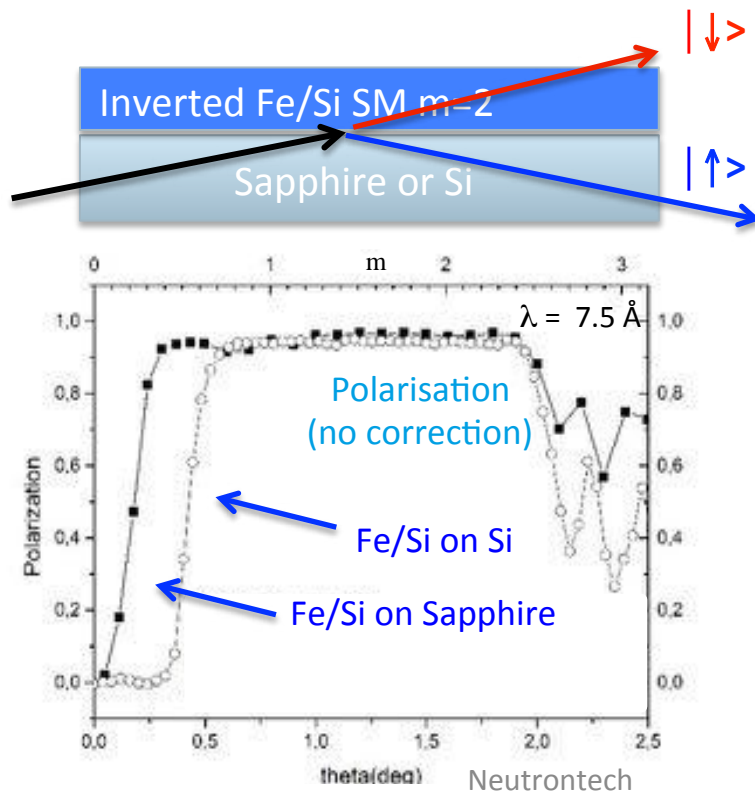
Co/Ti Super-Miroirs

- $m=2.8$ Co/Ti SM
- C-benders (courbure $R = 7\text{m}$)
- Optimisé pour $\lambda = [4 - 12 \text{ \AA}]$
- Couverture angulaire 90° (2018)
- 90 cassettes - 3330 miroirs
(6660 dépôts)
- Miroirs double face
(h 141 x l 254 mm²)
- ~ 7 ans de production !



Nouveau polariseur Fe/Si

A.K. Petukhov et al. NIMA A838 (2016) 33-38



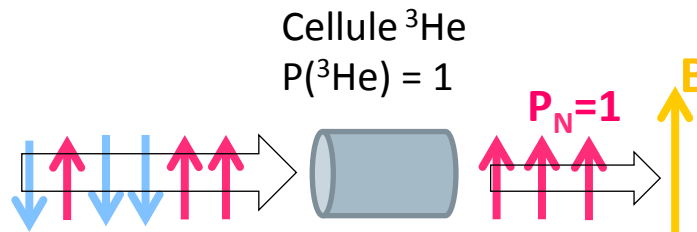
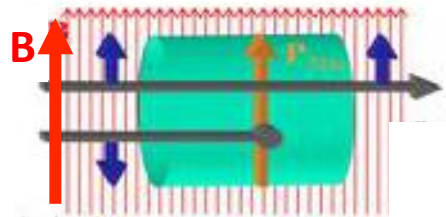
Dépôts Fe/Si sur saphir

- m=2 Fe /Si sur Si ($SLD_{Si} < SLD^{*Fe}$)
- m=2 Fe /Si sur Saphir ($SLD_s > SLD^{*Fe}$)
- Thick substrate 10 mm
- Entrée des Neutrons par le côté substrat

- Suppression de la réflexion totale aux petits angles
- **Polarisation des neutrons pour les petits angles ("low Q region")**

Filtres Polarisants ³Hélium

Principe



³Helium
 $\sigma_{a\uparrow\uparrow} \approx 0 \rightarrow$ transmission
 $\sigma_{a\uparrow\downarrow} \approx 6000 \text{ barns} \rightarrow$ absorption

Si le gaz ³He est polarisé alors le faisceau de neutrons transmis par la cellule est polarisé
 ($P_{\text{He}} = 1 \rightarrow P_{\text{neutrons}} = 1$) !

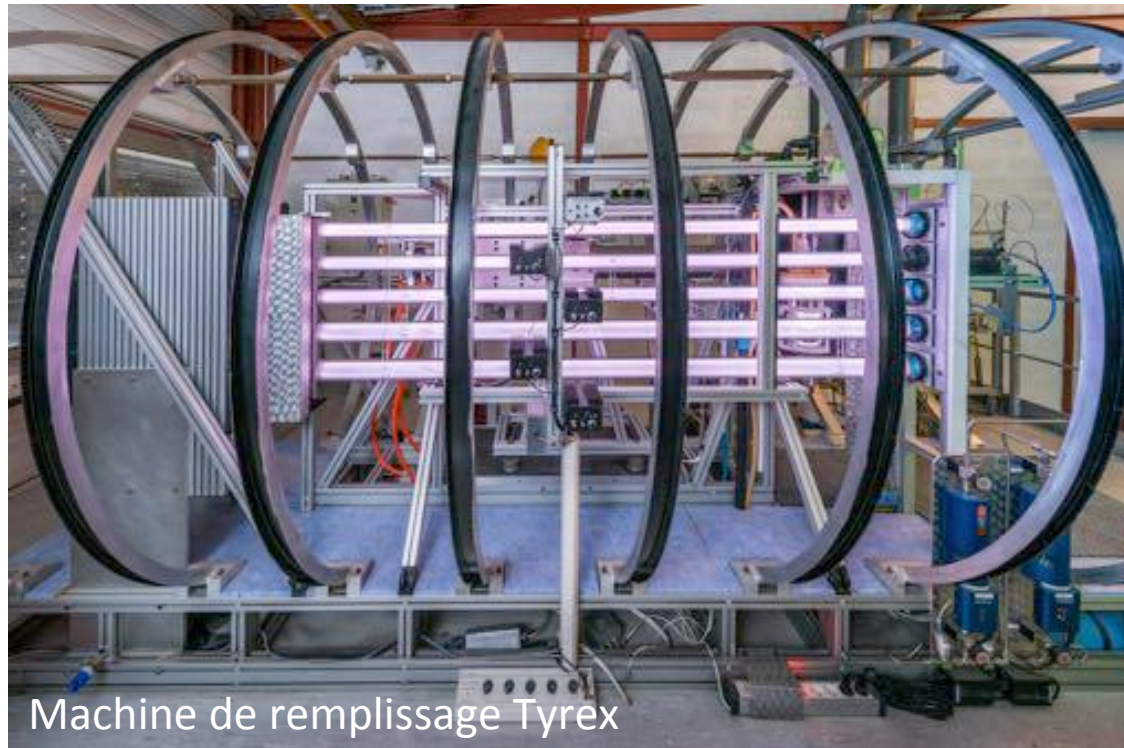
Polarization ³He: $P(t) = \exp(-t/T_1)$, T_1 temps de relaxation de la cellule

- Pour réaliser des expériences, il est nécessaire que $T_1 > 100\text{h}$
- Cellules ³He de haute qualité $T_w > 200\text{h}$
- Environnement magnétique très homogène $\left(\frac{\partial B / \partial r}{B}\right) < 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$

THE EUROPEAN NEUTRON SOURCE

Production de Filtres Polarisants ^3He

Technique MEOP (Metastability Exchange Optical Pumping)



Machine de remplissage Tyrex

THE EUROPEAN NEUTRON SOURCE

Production de Filtres Polarisants ^3He

Machine de remplissage Tyrex



piston

remplissage des cellules

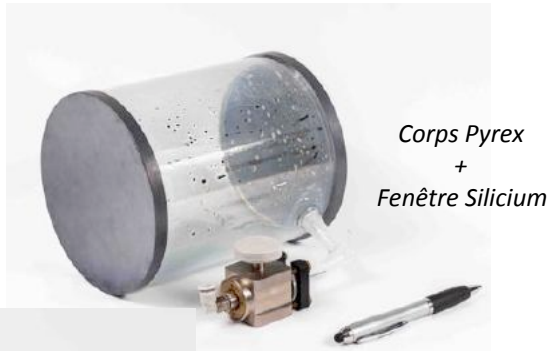
Technique MEOP

Metastability Exchange
Optical Pumping

- Haut taux de production > 1 bar-litre/h
- Pression gaz ^3He jusqu'à 4 bars
- Polarisation ^3He > 75%
→ $P_N > 95\%$
- Transmission > 30 %

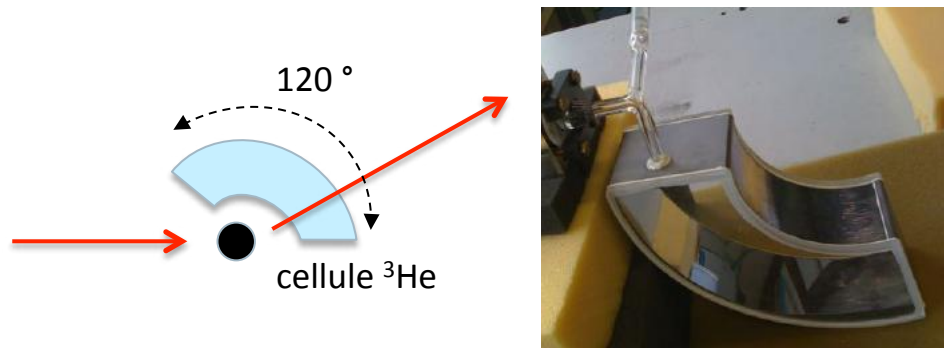
Filtres Polarisants ^3He

Fabrication des Cellules – $T_w > 200 \text{ h}$



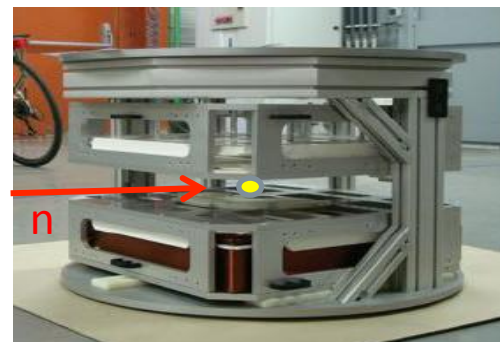
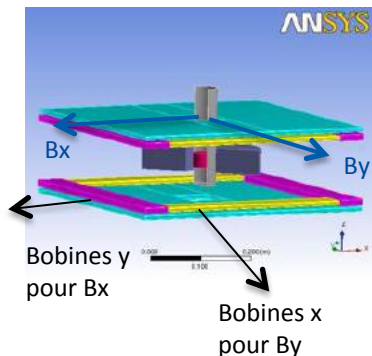
Analyse de Polarisation XYZ « Grand Angle »

Système PASTIS2 – IN20



Cellules Bananes

- Ouverture angulaire max = 120°
- Fenêtres Si (bruit de fond)
- $T_w > 200$ h



Neutrontech

Environnement Magnétique

- μ -metal et bobines Cu (Bx, By et Bz)
- 22 bobines de corrections !
- ≈ 3 ans de mise au point !

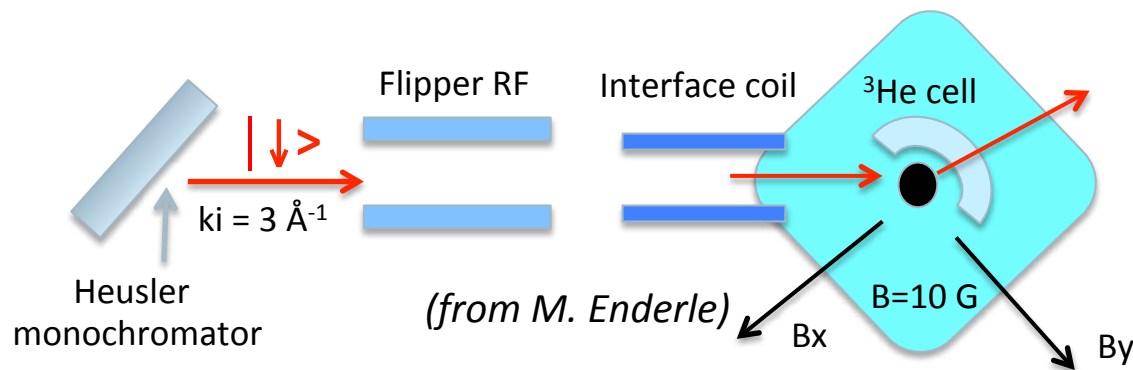
Gradient de champ relatif: $8,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$

$T_{\text{mag}}(2\text{bar}) \approx 380\text{h}$

THE EUROPEAN NEUTRON SOURCE

PASTIS 2 : Premiers tests sur IN20

M. Enderle et al. Journal of Physics: Conf. Series 862(2017) 012005



Résultats prometteurs

- Cellule : $P_0(^3\text{He}) = 77\%$
 $T_w = 200\text{h}$
- $T_{1\text{exp}} = 70\text{ h (H // x)}$
- $T_{1\text{exp}} = 113\text{ h (H // z)}$

- PASTIS 2 opérationnel
- **Développement d'un système PASTIS 3 plus simple et plus performant ! (fin 2018)**

Le Service d'Optique des Neutrons

Monochromateur

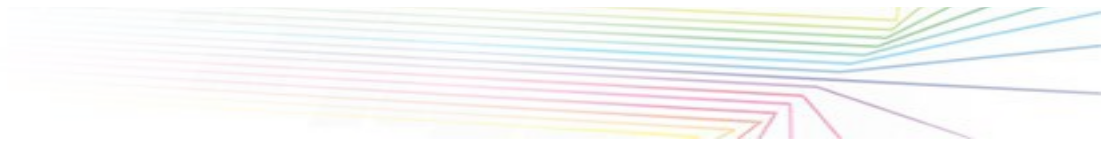
J. Baudin
P. Gausmann
R. Hehn
C. Menthonnex
B. Mestrallet

Helium3

D. Jullien
P. Mouveau
T. Nicolas
S. Pethukov (*et ^3He*)

Miroirs

T. Bigault
G. Delphin
A. Vittoz
F. Philit



Merci pour votre Attention

Meilleurs Voeux pour 2018!!