

Caractérisation Neutronique de MEGAPIE

Une cible de spallation au PbBi liquide à haute puissance

Franco Michel-Sendis

CEA Saclay, Irfu/SPhN

9 octobre 2009



Les application des sources intenses de neutrons

Sources de neutrons : essentielles à l'étude de la physique !

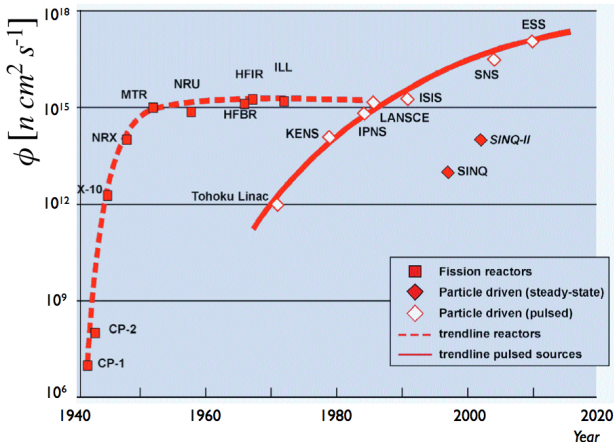
- ▶ Physique avec les neutrons (*SINQ*, *SNS*, *ESS*)
- ▶ Sonde Neutron (Matériaux, Biologie...)
- ▶ Faisceaux radioactifs, neutrinos (*EURISOL*...)

Aujourd'hui cibles de spallation (recherche) : puissances de 1 MW

- ▶ Transmutation des actinides mineurs dans ADS dédié (XT-ADS/MYRRHA)

Futur : pas technologique supplémentaire ; puissance $> 100 \text{ MW}_{th}$

Le développement des sources de neutrons dans le monde



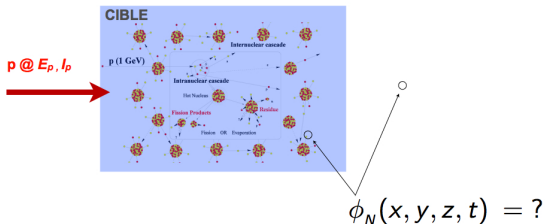
Réacteurs : $\sim 200\text{ MeV/n}$
 Cibles : $\sim 30\text{ MeV/n}$

Cibles de spallation : Défis technologiques

- ▶ Évacuation de la puissance (type de cible ; liquide/solide)
- ▶ Tenue de la cible à l'irradiation (dommages (dpa), choix des matériaux)
- ▶ Fonctionnement haute puissance (contrôle, diagnostic et fiabilité)
- ▶ Gestion du démantèlement : (bilan de résidus, produits d'activation, effet sur l'environnement)
- ▶ Couplage Faisceau / Cible (caractérisation des flux)

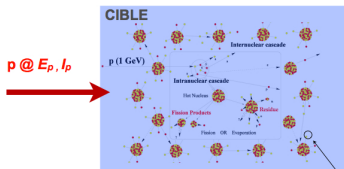
L' expérience MEGAPIE permet de répondre à plusieurs de ces questions

Comment convertir des protons en neutrons ?



Comment convertir des protons en neutrons ?

$$\blacktriangleright \phi_N(\vec{r}, t) = \tilde{\phi}_N(\vec{r}, t) \times I_p(t)$$



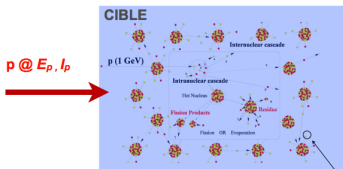
$$\phi_N(x, y, z, t) = ?$$

Comment convertir des protons en neutrons ?

$$\blacktriangleright \phi_N(\vec{r}, t) = \tilde{\phi}_N(\vec{r}, t) \times I_p(t)$$

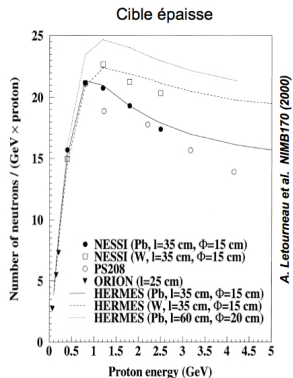
$$\blacktriangleright \tilde{\phi}_N(\vec{r}, t) = f(\text{Faisceau, Cible, Environnement})$$

Etudier le couplage Faisceau / Cible !



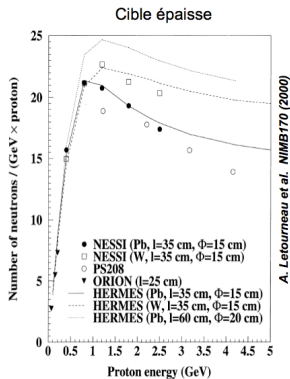
$$\phi_N(x, y, z, t) = ?$$

Quelle énergie, quelle géométrie ?

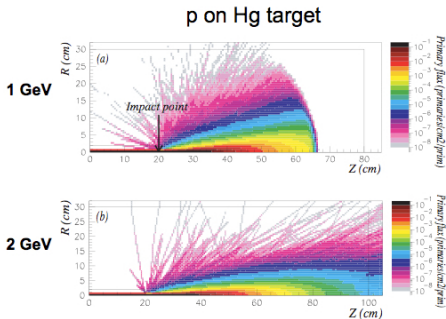


**Noyaux lourds,
Optimum vers 1 GeV proton**

Quelle énergie, quelle géométrie ?



**Noyaux lourds,
 Optimum vers 1 GeV proton**



A. Herrera-Martinez et al. CERN-AB-2006-013 ATB

Optimisation de la Géométrie

Quelle matériau choisir ?

Le choix dépend de l'application finale !

Bon compromis : PbBi (LBE)

- ▶ Température de fusion basse
- ▶ Bonne transparence aux neutrons thermiques
- ▶ Eutectiques : pas de dommage de structure sur le liquide

		Pb	Bi	PbMg (97.5% Pb)	PbBi (45% Pb)	Hg
ρ	(g/cm ³)	11.35	9.75	10.6	10.5	13.55
T_{fusion}	(C)	327.5	271.3	250	125	-38.87
C	(J/gK)	0.14	0.15	0.15	0.15	0.12
$\overline{\sigma}_{abs}$	(barn)	0.17	0.034	0.17	0.11	389

Le projet MEGAPIE @ SINQ (PSI)

MEGAwatt Pilot Experiment :

Première cible de spallation au
PbBi liquide à haute puissance
(1MW), concept avec fenêtre.

Initiative lancée en 1999 pour

- ▶ Concevoir
- ▶ Construire
- ▶ Opérer
- ▶ Démanteler



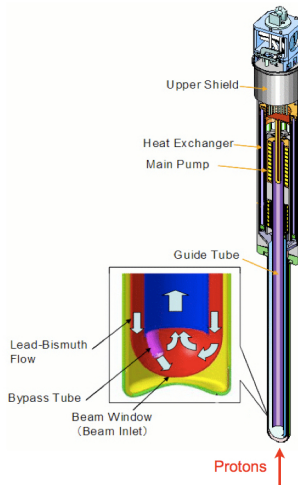
Le projet MEGAPIE @ SINQ (PSI)

MEGAwatt Pilot Experiment :

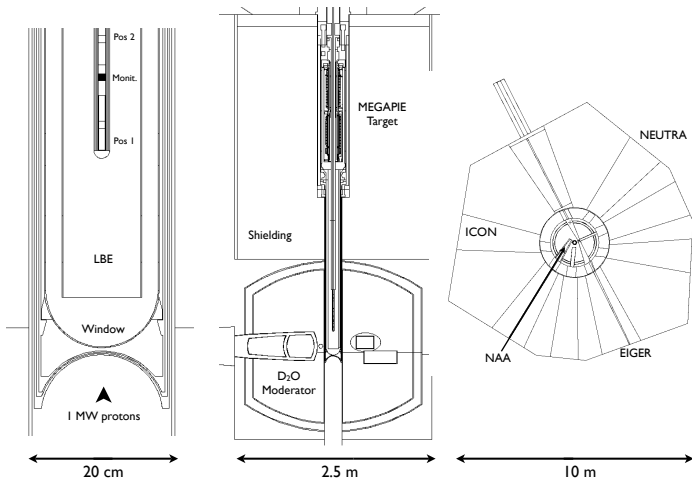
Première cible de spallation au
PbBi liquide à haute puissance
(1MW)

Initiative lancée en 1999 pour la

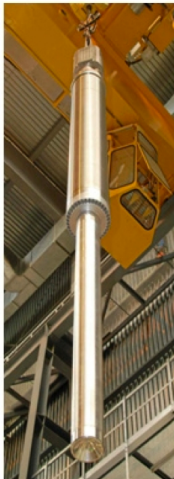
- ▶ Concevoir
- ▶ Construire
- ▶ Opérer
- ▶ Démanteler



Simulation MEGAPIE sous MCNPX

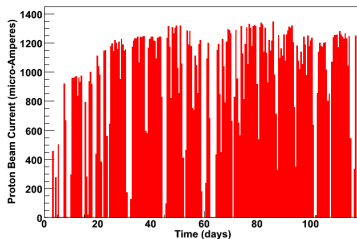


Performance de MEGAPIE



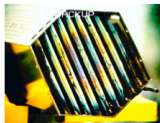
MEGAPIE a fonctionné avec succès pendant 4 mois en 2006 :

- ▶ $E_p = 575 \text{ MeV}$, $\bar{I}_p = 960 \mu\text{A}$

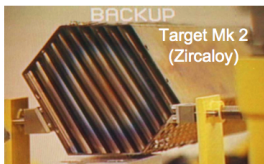


- ▶ 80 % de neutrons en plus par rapport aux anciennes cibles solides de SINQ.

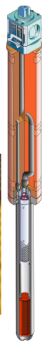
Cibles solides de SINQ



Target Mk 1
(Zircaloy)
after 0.5 Ah
water
purification off

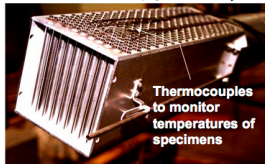


Target Mk 2
(Zircaloy)
Removed after 6.8 Ah of beam
(water purification on)

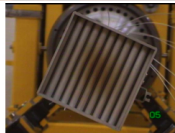


Incident
proton beam

Target Mk 3
(lead rods in SS-tubes,
bottom row empty Al-tubes)



Exposed
to 10 Ah
of beam;



Responsabilité de l'Irfu : caractériser le flux neutronique à l'intérieur de la cible



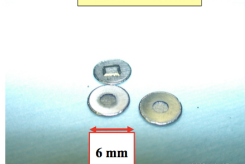
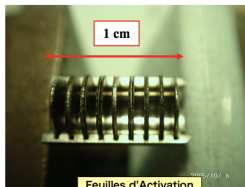
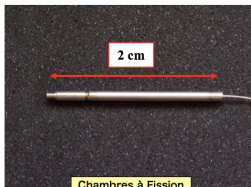
Conception d'un détecteur de neutrons innovant dans des conditions difficiles ('central rod') :

- ▶ Flux γ , n (10^{13} /s/cm²)
- ▶ Perturbations EM
- ▶ Température (200 / 400 °C)
- ▶ Corrosion
- ▶ Espace confiné (diamètre= 1.3 cm)

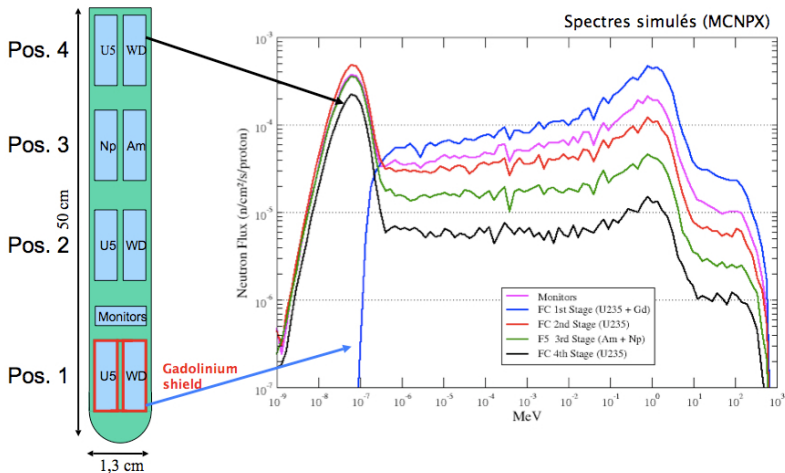
Le détecteur de neutrons

2 techniques différentes :

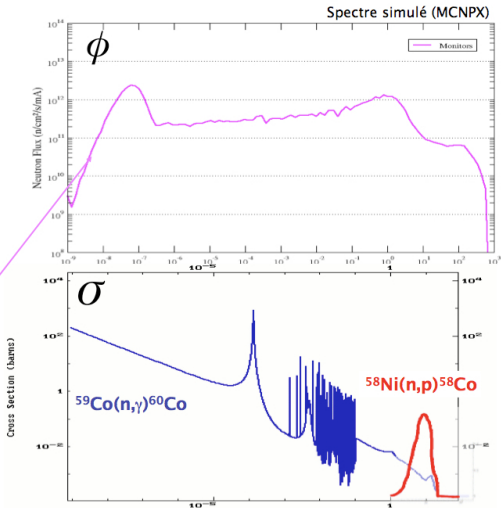
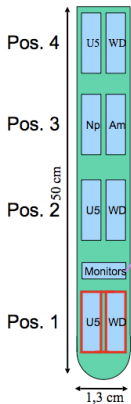
- ▶ Chambres à fission micrométriques :
évolution temporelle du flux
- ▶ Feuilles d'activation métalliques ultra pures :
normalisation absolue du flux, forme du spectre



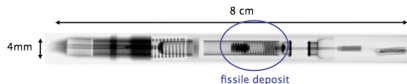
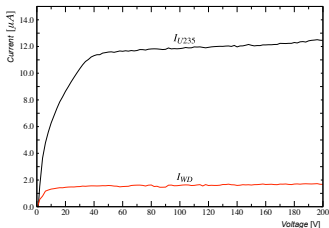
Le détecteur de neutrons



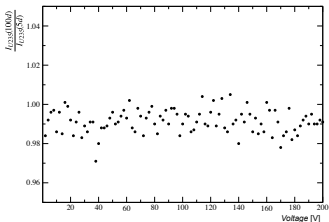
Le détecteur à neutrons



Fonctionnement des chambres à fission



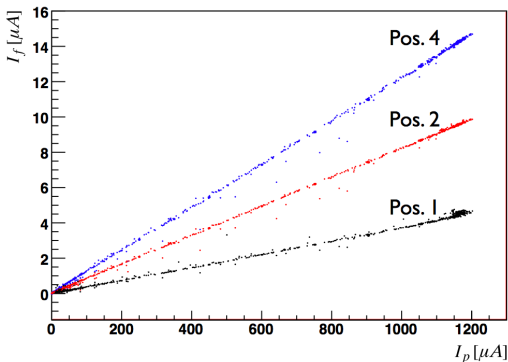
*S. Chabod et al., Nucl. Instr. And Meth. A 562 (2006) 618-620



$$I_f = (I_{U235} - I_{WD})$$

$$I_f = \frac{1}{V} N_f \bar{\sigma}_f \tilde{\phi}_N \times I_p$$

Mesure du taux de fission



Au début de l'irradiation :

$$I_f = \frac{1}{\Gamma} N_f \overline{\sigma_f} \tilde{\phi}_N \times I_p$$

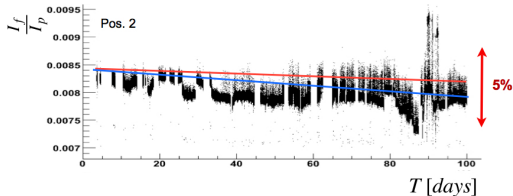
- ▶ Pas d'évolution du dépôt fissile
- ▶ Composition du LBE non altérée
- ▶ Mesure de $\tau_f = \overline{\sigma_f} \tilde{\phi}_N$

Comparaison taux de fission mesurés / simulés

Position	1 (Gd)	2	4
τ_f mesuré	$3.04 \cdot 10^{-10}$ (3%)	$2.35 \cdot 10^{-9}$ (3%)	$9.76 \cdot 10^{-10}$ (3%)
τ_f simulé	$5.80 \cdot 10^{-10}$ (2%)	$6.92 \cdot 10^{-9}$ (2%)	$2.53 \cdot 10^{-9}$ (2.5%)
C/E	1.9 (3.6%)	2.9 (3.6%)	2.6 (3.9%)

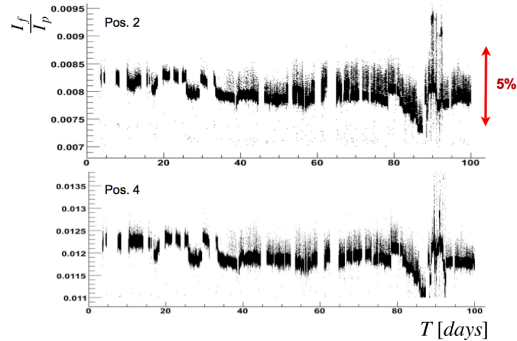
$[\tau] = \text{fiss} / \text{s} / \text{at} / \text{mA}$

Réponse des chambres à fission avec le temps



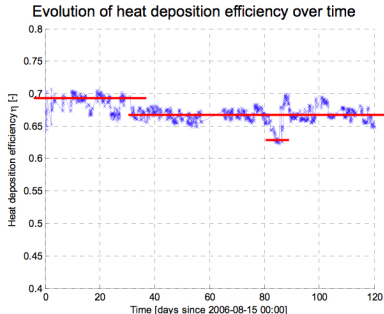
$$\frac{I_f}{I_p} = \frac{1}{\Gamma} N_f \bar{\sigma}_f \tilde{\phi}_N e^{-\int_0^t \tilde{\phi} I_p(t') \bar{\sigma}_a dt'}$$

Réponse des chambres à fission avec le temps



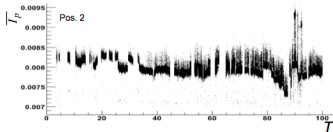
$$\frac{I_f}{I_p} = \frac{1}{\Gamma} N_f \bar{\sigma}_f \tilde{\phi}_N e^{-\int_0^t \tilde{\phi}_p(t') \bar{\sigma}_a dt'}$$

Réponse des chambres à fission avec le temps



M. Dierckx, MEGAPIE Thermohydraulic Post Test Analysis, SCK-CEN-R-4537

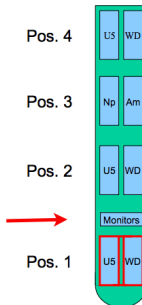
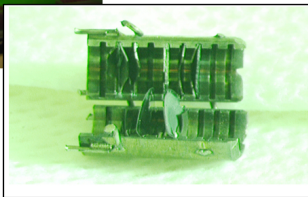
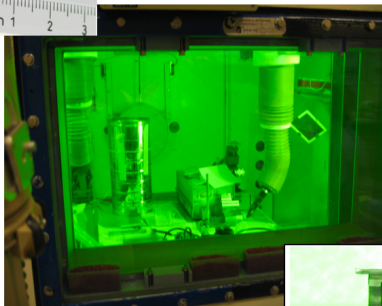
- ▶ Information sur I_p seule n'est pas suffisante pour décrire complètement I_f
- ▶ Fluctuations de la "Configuration faisceau" :
Profil, divergence, I_p ...
- ▶ Effet de l'évolution des dépôts fissiles masqué



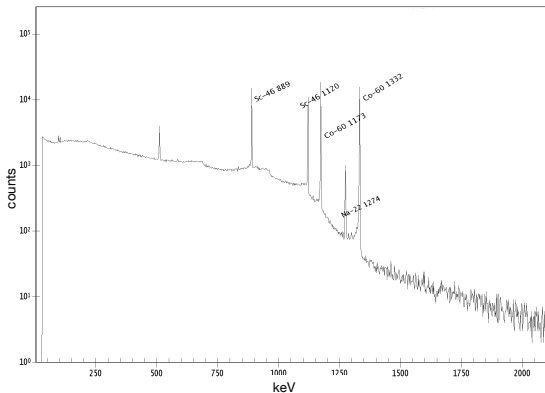
Récupération des feuilles d'activation



PSI HotLab



Spectrométrie γ



Spectre γ feuille AlCo

Feuille Co :
Mesure de l'activité A
du ^{60}Co

- ▶ Réaction de référence :
 $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$

Mesure du taux d'activation

Taux moyen d'activation mesuré :

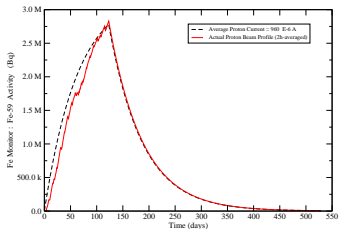
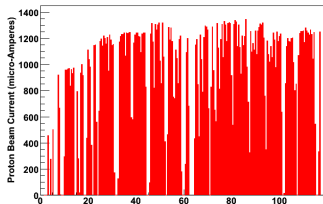
$$\tau_A = \sigma_A \bar{\phi} = \frac{A}{N(1 - e^{-\lambda T_{irr}})e^{-\lambda T_{cool}} \bar{I}_p}$$

Où :

$$\bar{I}_p = 960 \mu A$$

$$T_{irr} = 123 \text{ j}$$

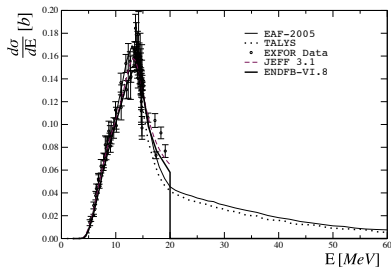
$$T_{cool} = 406 \text{ j}$$



Comparaison taux d'activation calcul / mesure

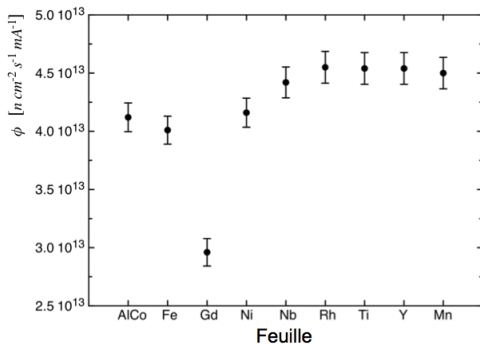
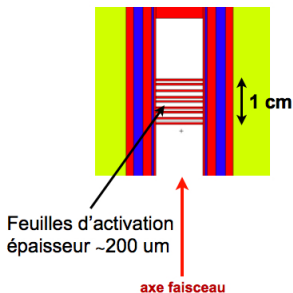
Réaction	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$
$\bar{\tau}_{\text{meas.}}$	$2.10 \cdot 10^{-10}$ (2.1%)	$7.0 \cdot 10^{-12}$ (8.2%)	$3.70 \cdot 10^{-13}$ (3.2%)	$3.70 \cdot 10^{-14}$ (2.45%)
$\bar{\tau}_{\text{simul}}$	$4.4 \cdot 10^{-10}$ (5%)	$1.22 \cdot 10^{-11}$ (6%)	$7 \cdot 10^{-13}$ (15%)	$1.2 \cdot 10^{-13}^*$ (28%)
C/E	2.1 (5.4%)	1.7 (10%)	1.9 (15%)	3.3* (28%)

$[\tau] = \text{fiss/s/at/mA}$



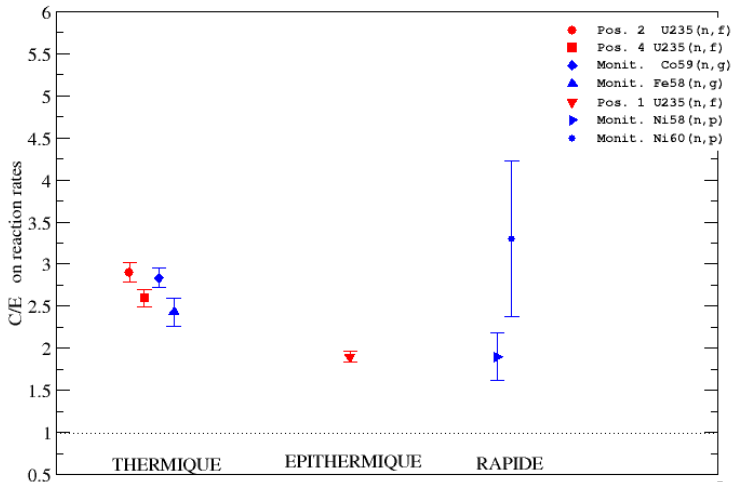
$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$: 40 % du taux de réaction au delà de 20 MeV

Effet d'ombre de la feuille Gd

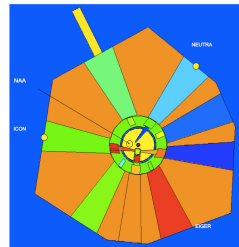
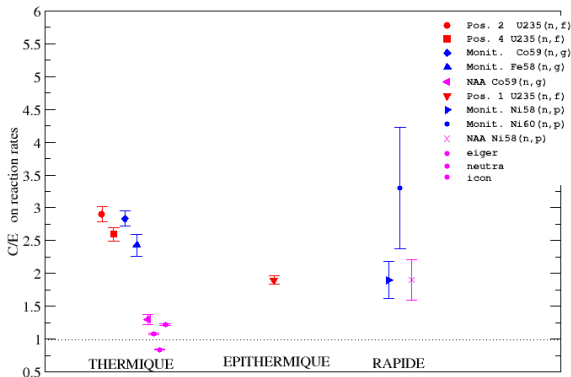


Caractérisation neutronique MEGAPIE

F. Michel-Sendis et al. *Neutronic performance of the MEGAPIE spallation target under high power proton beam*, submitted to NIM-B, 2009.



Caractérisation neutronique MEGAPIE



L. Zanini et al. *Neutronic and Nuclear post-test analysis of MEGAPIE*, PSI-Bericht 08-04

Etudes de sensibilité

1. Production de neutrons :

Etudes de sensibilité

1. Production de neutrons :

Modèles Bertini/Dressner, INCL4/ABLA, ISABEL/ABLA, CEM2K :

- ▶ Dispersion de 2% à 8% sur $\tilde{\phi}$ calculée dans le détecteur .

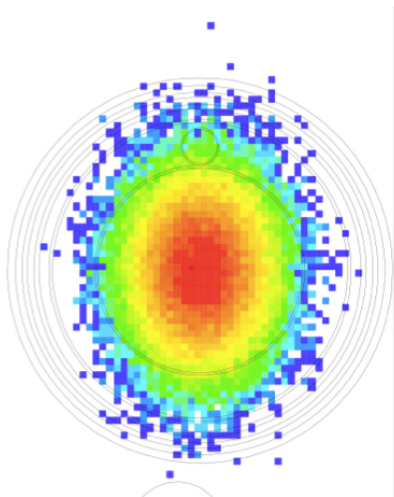
Etudes de sensibilité

1. Production de neutrons :

Modèles Bertini/Dressner, INCL4/ABLA, ISABEL/ABLA, CEM2K :

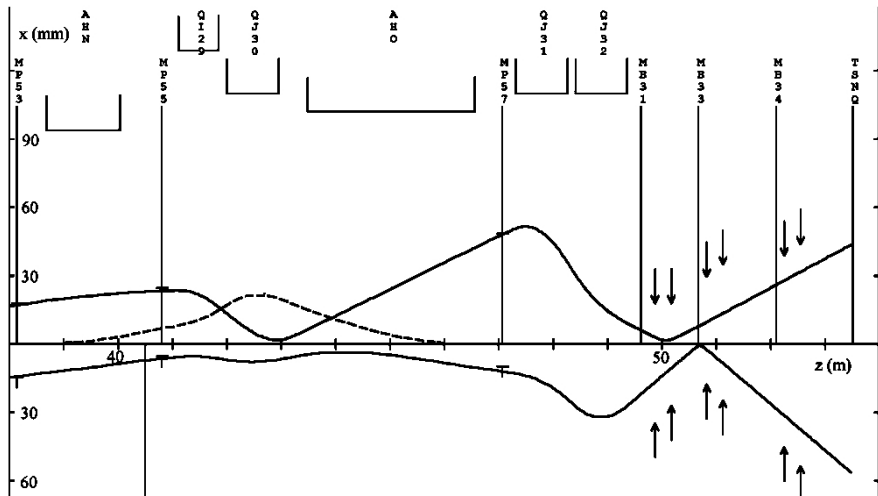
- ▶ Dispersion de 2% à 8% sur $\tilde{\phi}$ calculée dans le détecteur .
- ▶ Impact de la description du faisceau

Modélisation du profil faisceau

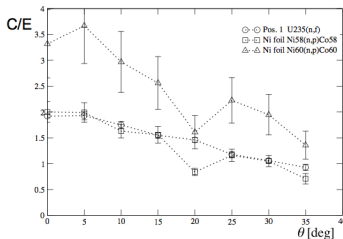
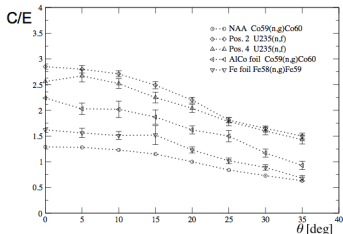
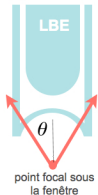


- ▶ Nécessité de préserver la fenêtre : éclatement du faisceau
- ▶ Description de la tâche faisceau basée sur l'analyse des cibles solides irradiées
- ▶ Impact de la description :
variations de 10 à 15 % sur le flux
- ▶ Simulation : protons en trajectoires parallèles, pas de divergence angulaire.

Transport du faisceau jusqu'à SINQ



Modélisation du profil faisceau



- Sensibilité du flux à la dispersion angulaire des protons incidents

Etudes de sensibilité

2. Transport des neutrons

► Effet de la Température

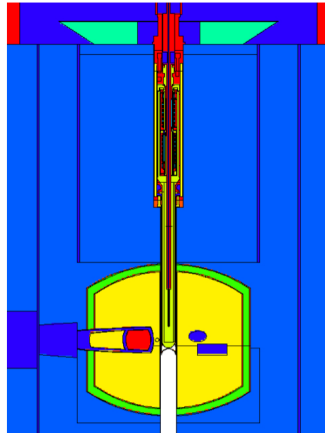
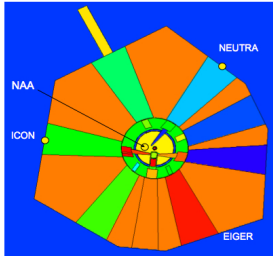
- Du modérateur
(300 K au lieu de 310K) : **biais de 2%**
- Du LBE
(entre 700 K et 300K) : **pas d'effet observé.**
- Dilatation différentielle des structures
(central rod, +1.4 cm) : **effet de 2%**

Etudes de sensibilité

2. Transport des neutrons

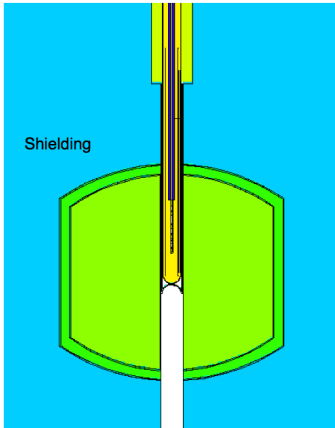
- ▶ Effet de la Température
 - Du modérateur
(300 K au lieu de 310K) : **biais de 2%**
 - Du LBE
(entre 700 K et 300K) : **pas d'effet observé.**
 - Dilatation différentielle des structures
(central rod, +1.4 cm) : **effet de 2%**
- ▶ Description de la géométrie

Géométrie de référence

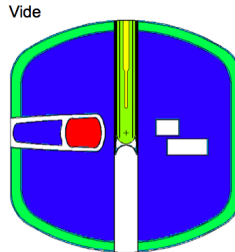


Modèles géométriques simplifiés

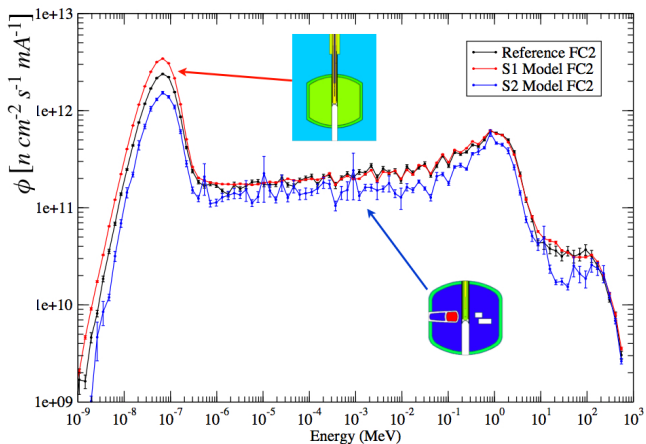
Modèle S1



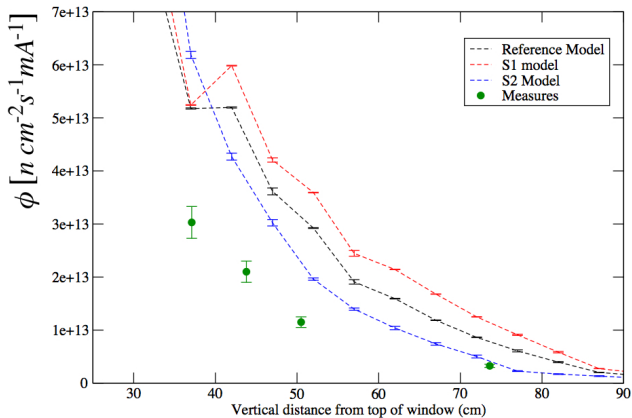
Modèle S2



Modèles géométriques simplifiés



Modèles géométriques simplifiés



Conclusion étude des sensibilités

- ▶ Neutrons rapides :

directement sensibles à la production de neutrons

Modèles de spallation (< 8%)

Caractéristiques Faisceau

Profil (XY) (10% – 15%)

Divergence angulaire (jusqu'à un
facteur 2)

- ▶ Neutrons thermiques et épithermiques :

très sensibles au transport

Modèles géométriques (jusqu'à 30%)

Température (D₂O, LBE) (< 3%)

Evolution du LBE (poisons neutroniques) (< 5%)

Conclusions

1. Caractérisation neutronique dans la cible :

- ▶ Premières mesures d'un flux de neutrons à l'intérieur d'une cible liquide de spallation
- ▶ Sensibilité à la description faisceau (outil diagnostique pour futurs sources de neutrons?)
- ▶ Simulation surestime les flux à l'intérieur de la cible

2. Performances générales

- ▶ Bonne fiabilité / opérabilité du système (tenue de la fenêtre)
- ▶ Rendement neutronique SINQ : MEGAPIE / cibles solides ~ 1.8
- ▶ Demantèlement commencé : cible découpée
- ▶ **Validation cible PbBi liquide haute puissance**

Perspectives

1. Post-Irradiation Experiment (PIE)

- ▶ Analyse d'échantillons PbBi (projet ANDES) :
Bilan radiologique, comparaison avec modèles
- ▶ Analyse fenêtre (dommages dpa)
- ▶ Test mécaniques post-irradiation (structures et systèmes)
- **Validation matériaux**
- **Validation du processus de démantèlement**

2. Mise à profit des acquis de MEGAPIE

- ▶ Cibles HLM comme technologie standard SINQ (~ 2013)
- ▶ XT-ADS/MYRRHA : Actualisation du design
- ▶ **Communauté Métaux lourds liquides**
(Cible de spallations, Gen IV) : MEGAPIE = manip de référence

