

Définition par Modélisation, Optimisation et Caractérisation d'un Système de Spectrométrie de Neutron par Sphères de Bonner Étendu au Domaine des Hautes Énergies

par Sébastien Serre

Directeur de thèse : Didier Paul

Co-encadrants : Véronique Lacoste, Karine Castellani-Coulié

Travaux de thèse réalisés à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons



Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence
UMR 6242 CNRS, Universités Paul Cézanne, Provence et Sud Toulon-Var



Plan de la présentation

1. Contexte & motivations
2. Spectrométrie des neutrons par la technique des Sphères de Bonner
3. Définition par modélisation du Spectromètre de neutron
4. Extension du Spectromètre de neutron au domaine des hautes énergies
5. Caractérisation par simulations Monte Carlo du Spectromètre de neutron
6. Tests de mesure auprès d'une source neutronique $^{241}\text{Am-Be}$ de référence
7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Énergies
8. Conclusion & perspectives

1. Contexte & motivations

1. Contexte & motivations

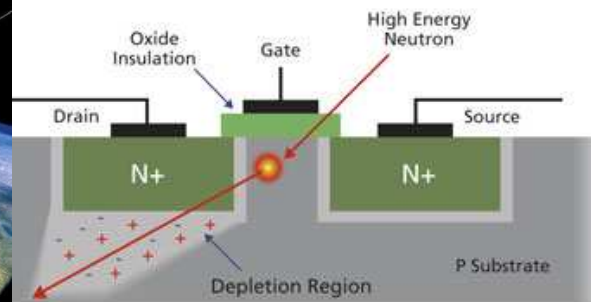
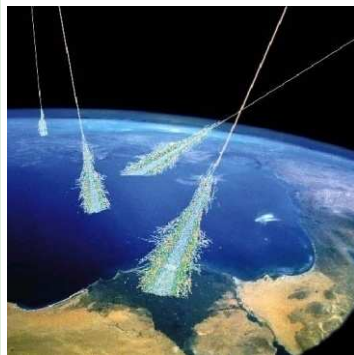
Missions du Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons

→ Caractérisation des champs de neutrons aux postes de travail :

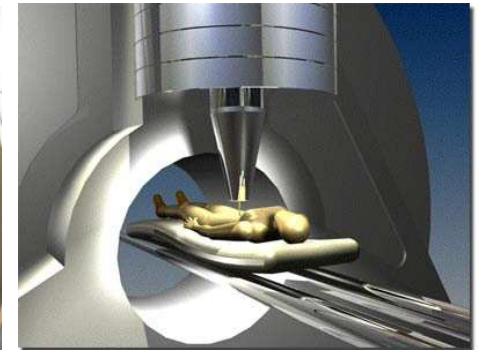
Industries, installations médicales et de recherche

⇒ Importantes demandes pour la caractérisation de champs de neutrons qui s'étendent jusqu'au domaine des hautes énergies :

Environnement neutronique atmosphérique / Analyse du Soft Error Rate aux altitudes terrestres



Installations émergentes de proton thérapie / Dosimétrie d'ambiance & dosimétrie individuelle du patient



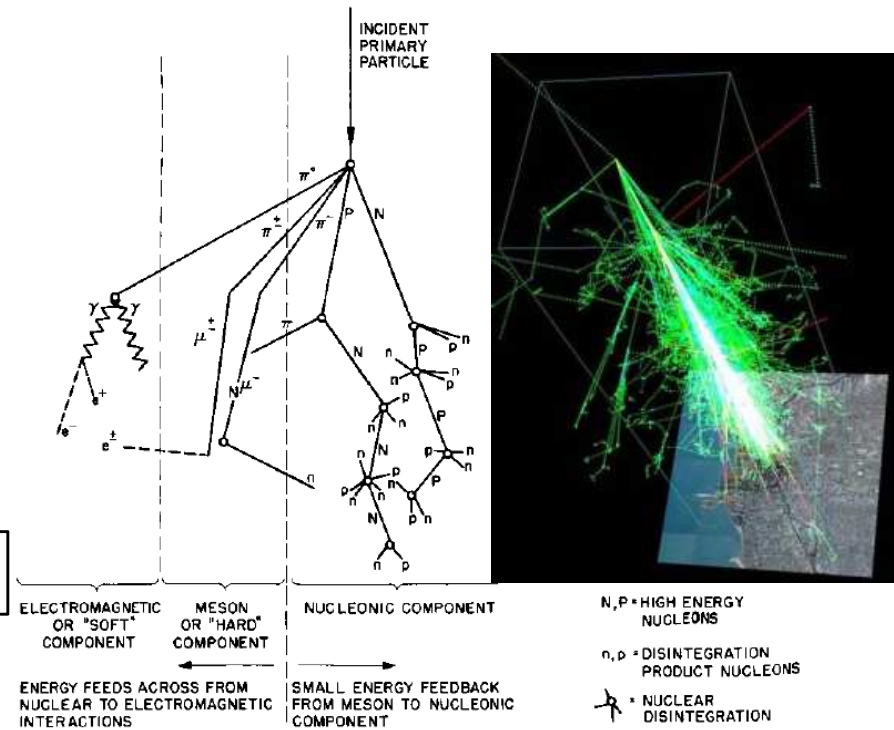
⇒ Développement d'un nouveau système de spectrométrie de neutron basé sur le principe des sphères de Bonner

1. Contexte & motivations

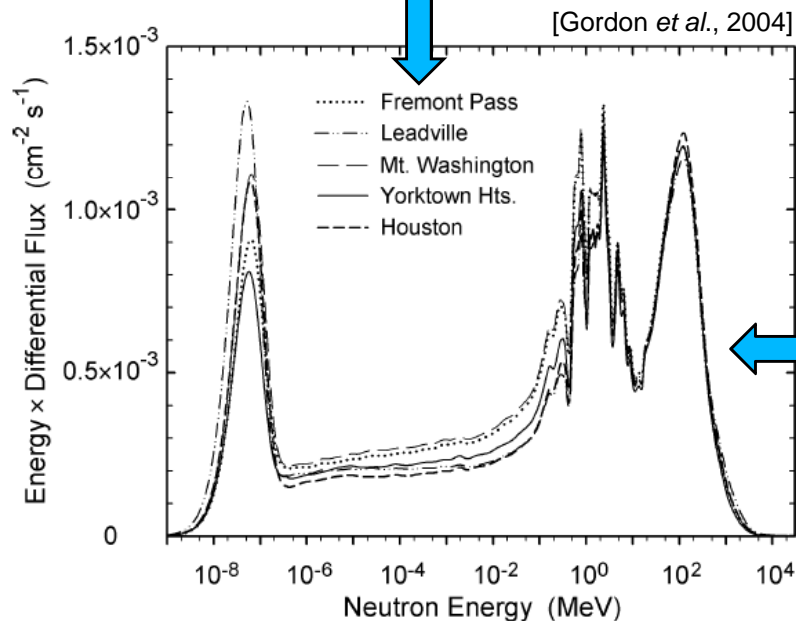
L'environnement radiatif atmosphérique

Induit par le rayonnement cosmique 'primaire' depuis la stratosphère

Proliférations de rayons cosmiques 'secondaires' jusqu'au niveau du sol terrestre



Neutrons atmosphériques d'origine cosmique



Spectre des neutrons atmosphériques aux altitudes terrestres

- 13 décades en énergie : neutrons thermiques ⇒ GeV
- Très faibles débits de fluence ~ 1 × 10⁻² cm⁻²s⁻¹

L'intensité du rayonnement neutronique varie selon :

- La profondeur atmosphérique altitude
- La coupure de rigidité géomagnétique → influence du champ magnétique terrestre
- Les phases du cycle de l'activité solaire

1. Contexte & motivations

Emergence des aléas logiques jusqu'aux applications terrestres

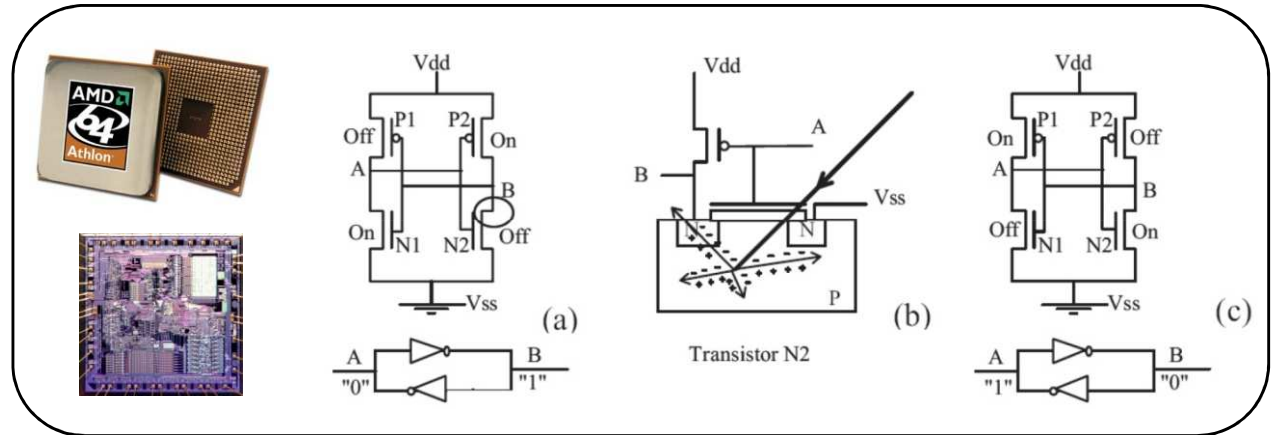
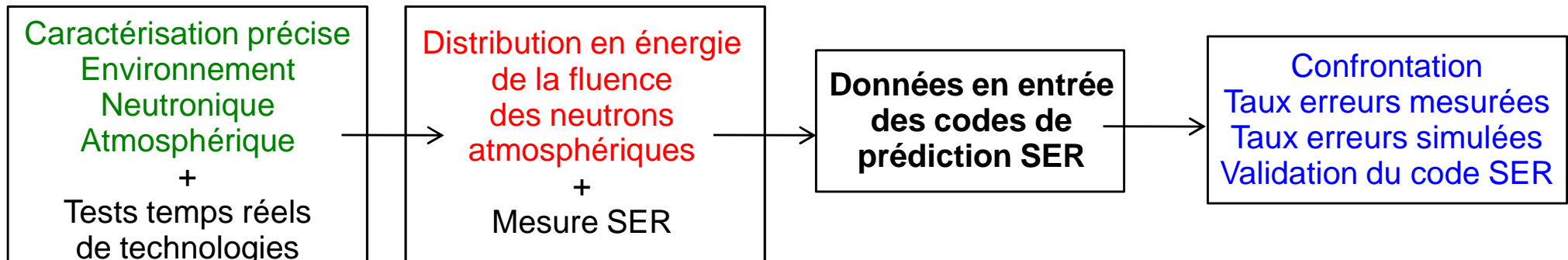
1960 : Emergence de la problématique des effets des rayons cosmiques sur l'électronique terrestre commercialisée

Aujourd'hui, **le rayonnement des neutrons atmosphériques = une des principales causes d'apparition spontanée d'erreurs réversibles et non destructives dans les circuits mémoriels digitaux**

Termes-clés : **Aléas logiques, Soft errors, Soft Error Rate (SER)**

Prédiction / mesure du taux d'aléas logiques (SER) pour les technologies actuelles submicroniques

➔ *Préoccupation majeure sur le plan international pour l'industrie du semi-conducteur*



$$SER = \int \sigma(E) \cdot \left(\frac{d\phi}{dE} \right) dE$$

$$\sigma(E) = \frac{\text{fails}}{(\text{bits} \cdot \text{fluence})}$$

2. Spectrométrie des neutrons par la technique des Sphères de Bonner

2. Spectrométrie des neutrons par la technique des sphères de Bonner

Principe de la détection

Série de modérateurs sphériques munis d'un détecteur central de neutrons thermiques

→ Thermalisation sélective des neutrons dans des 'sphères' de diamètres croissants

⇒ Modérateurs fortement **hydrogénés**

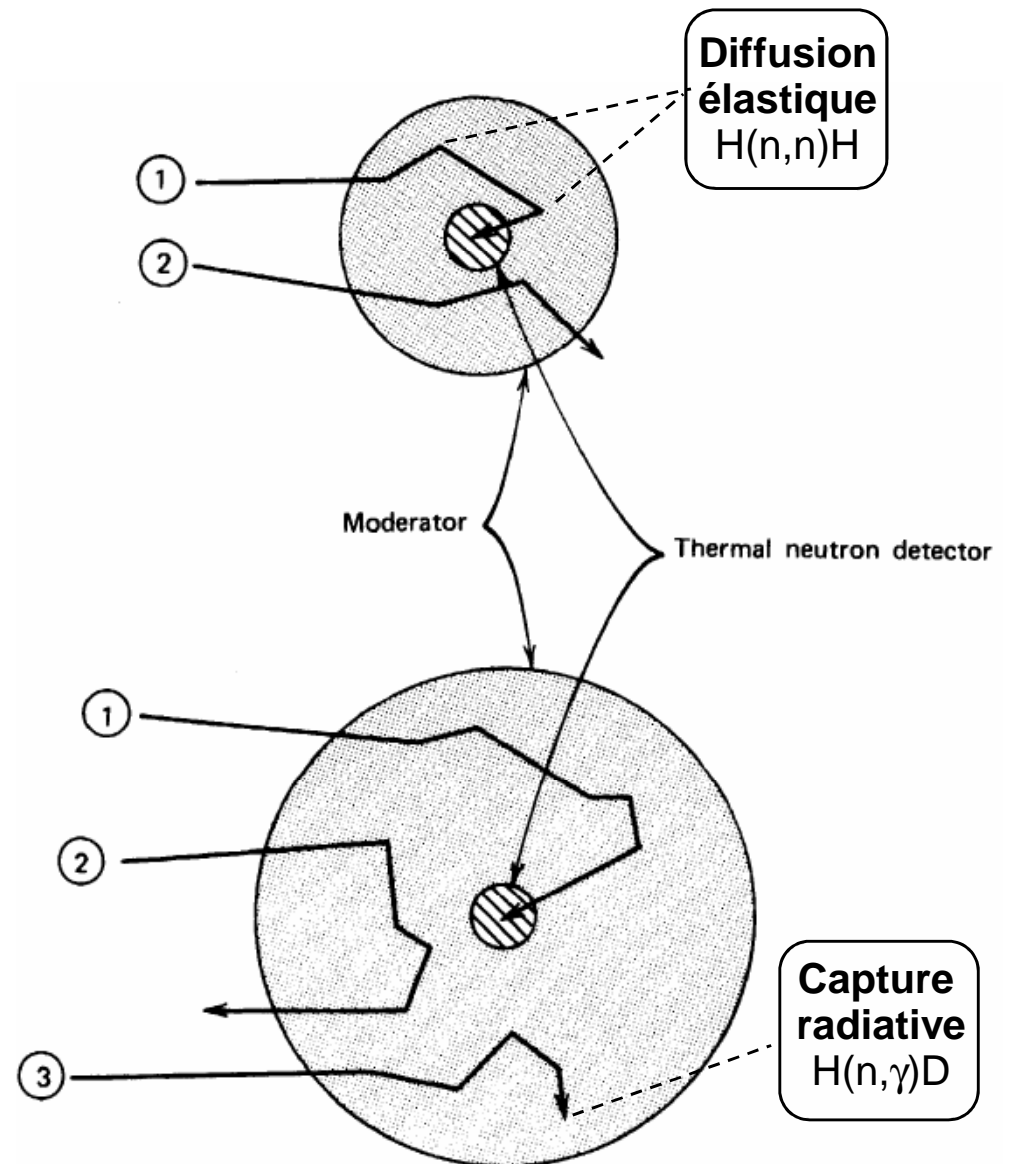
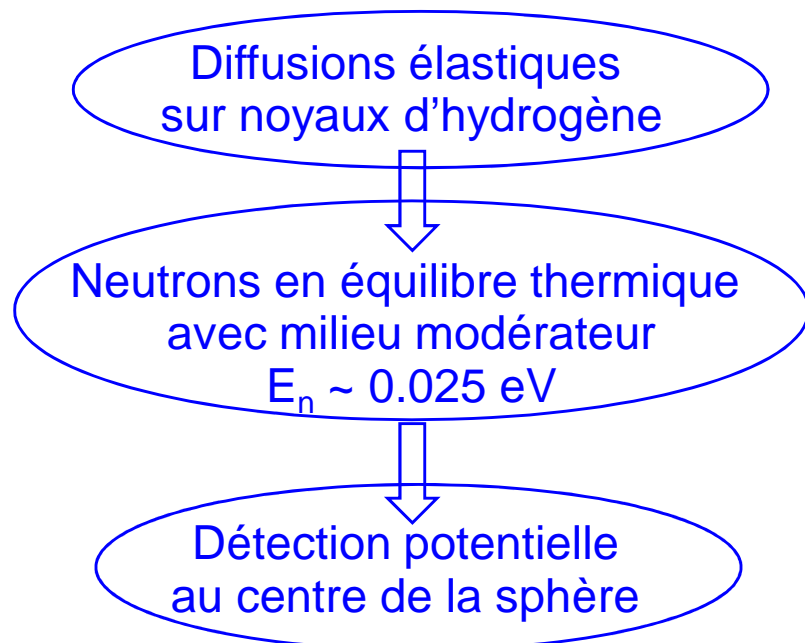


Figure extraite de [Knoll, 1979]

2. Spectrométrie des neutrons par la technique des sphères de Bonner

À l'origine du système généralisé des sphères de Bonner...

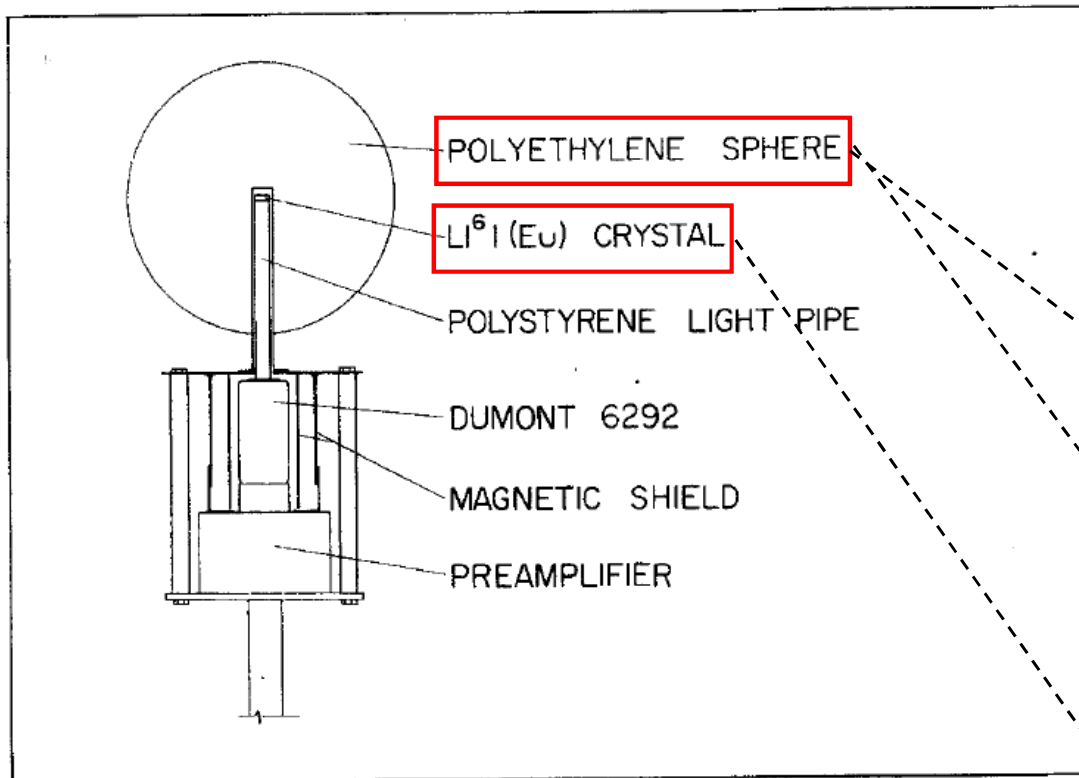


Figure extraite de [Bramblett *et al.*, 1960]

Prototype d'un spectromètre de neutron conçu et caractérisé par Bramblett, Ewing et Bonner

Nucl. Instr. and Meth., **9**, 1-12 (1960)

- ❖ 5 sphères modératrices :
Diamètre 2", 3", 5", 8" et 12"
- ❖ Matériau modérateur :
Le polyéthylène (C₂H₄)_n
⇒ grand pouvoir de ralentissement
+ faible pouvoir de capture
- ❖ Détecteur central de neutrons thermiques :
Un scintillateur cylindrique
⁶LiI(Eu) 4×4 mm

2. Spectrométrie des neutrons par la technique des sphères de Bonner

Les détecteurs actifs de neutrons thermiques

Type de détecteur	Réaction de détection (/de conversion)	Section efficace de la réaction ($E_n=0.025$ eV)
Cristal scintillateur ^6LiI	$^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ ($Q=+4.78$ MeV)	940 barn
Compteur proportionnel gazeux $^{10}\text{BF}_3$	$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ($Q=+2.792$ MeV)	3843 barn
Compteur proportionnel gazeux ^3He	$^3\text{He}(n,p)\text{T}$ ($Q=+764$ keV)	5321 barn

Détection indirecte:

→ Réaction nucléaire exo énergétique (énergie Q)

→ Libération de particules chargées

→ Mesure du dépôt d'énergie dans le volume actif de détection (charge électrique)



1 neutron détecté \equiv 1 'pulse' électrique

Chaîne électronique d'acquisition

'Spectre' d'impulsions électriques

Taux de comptage de neutrons détectés associé à chaque sphère modératrice

2. Spectrométrie des neutrons par la technique des sphères de Bonner

Définition et formalisme mathématique de la spectrométrie des neutrons

Fluence de particules Φ :

Quotient de dN par da , où dN est le nombre de particules incidentes sur une sphère de section da

Réponse en fluence de neutron d'une sphère de Bonner de diamètre d , munie d'un détecteur central thermique actif :

$$R_d(E_n) = \frac{M_d}{\Phi(E_n)}$$

Indication de la sphère d en Nombre de coups de neutron

Fluence de neutrons mono énergétiques (E_n) en neutron/cm²

Nombre de 'coups / (neutron/cm²)' \equiv cm²

Spectrométrie de neutron

\equiv Mesure de la "fluence spectrale" de neutrons

$$\Phi_E(E) = \frac{d\Phi(E)}{dE}$$

(cm⁻² MeV⁻¹)

Si $R_d(E_n)$ est supposée connue (fonction continue de E), et si spectre $\Phi_E(E)$ supposé connu :

$$M_d = \int R_d(E) \Phi_E(E) dE$$

Approche numérique de la convolution :

$$M_d = \sum_i R_d(E_i) \Phi(E_i)$$

Représentation vectorielle / matricielle :

$$M_d = \sum_i R_{di} \Phi_i \quad i=(1,2,\dots, n_E)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}\Phi$$

Mesure indications des n_D sphères
 M_d ($d=1,2,\dots,n_D$)

Matrice de réponse En fluence
 $(n_D \times n_E)$

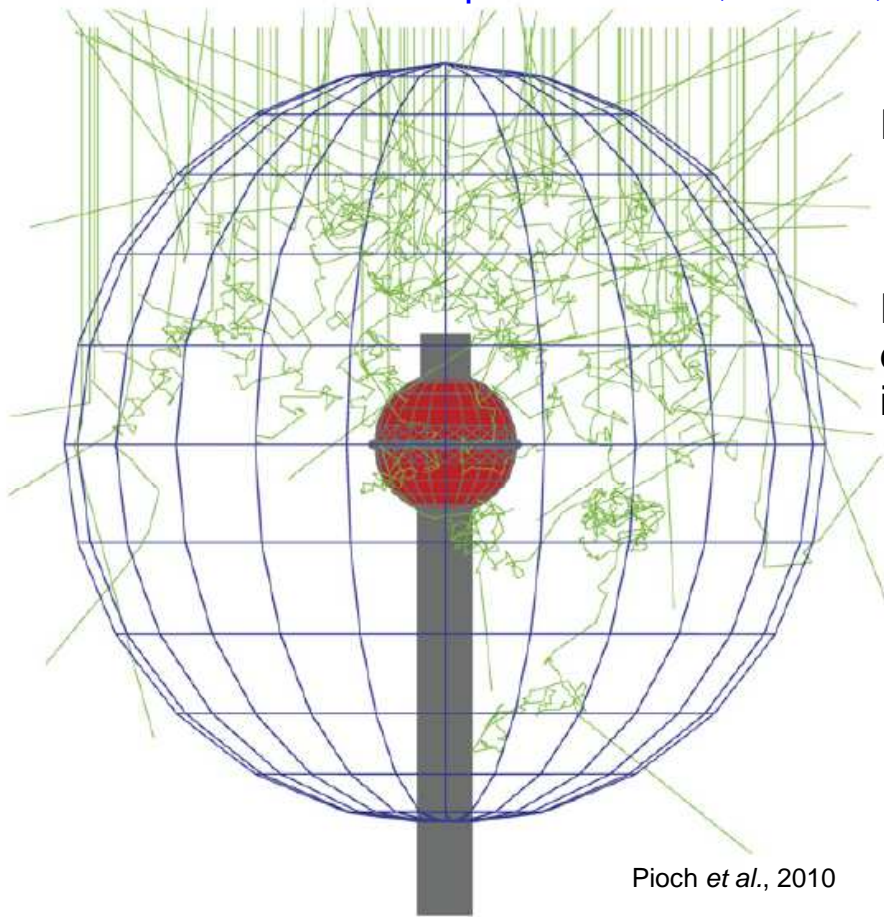
Procédure Mathématique Déconvolution

Information spectrale Vecteur fluence Φ
 Φ_i ($i=1,2,\dots, n_E$)

2. Spectrométrie des neutrons par la technique des sphères de Bonner

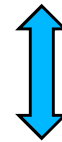
Calculs par simulations numériques Monte Carlo de la matrice des réponses en fluence d'un système multi sphère conventionnel

Codes de transport : MCNPX, FLUKA, PHITS, GEANT4...



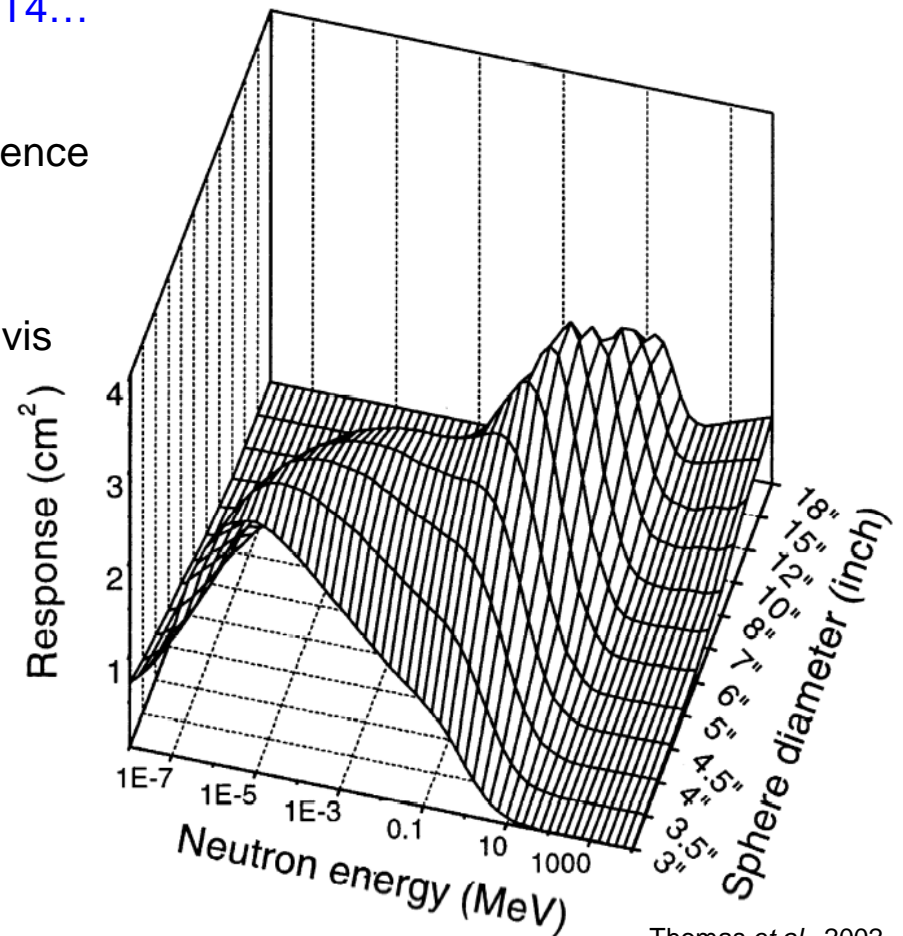
Pioch et al., 2010

Réponse en fluence



Efficacité vis-à-vis de la fluence incidente

Fonctions de réponse d'un système conventionnel

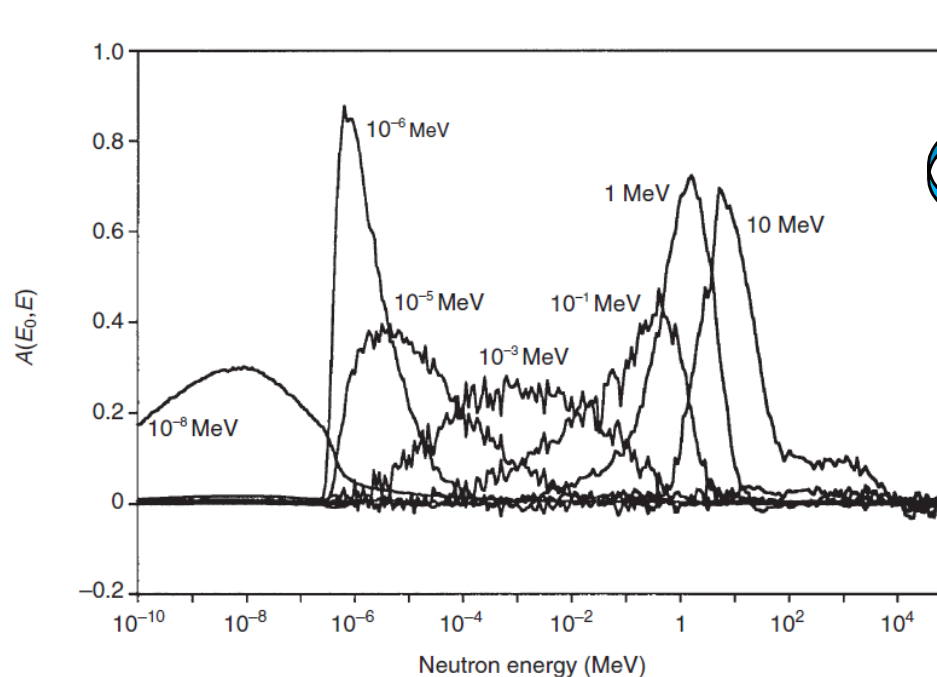


Thomas et al., 2002

2. Spectrométrie des neutrons par la technique des sphères de Bonner

Choix du développement d'un spectromètre de neutron par sphères de Bonner pour la caractérisation de l'environnement neutronique atmosphérique

Système de sphères de Bonner \Leftrightarrow Système multi sphère \Leftrightarrow "Bonner Sphere Spectrometer" ('BSS')



Pouvoir de résolution du BSS EML (USA)
(Approche de Backus et Gilbert)
[Reginato, 2002], [Goldhagen et al., 2002]

Maîtrise d'un système BSS

→ détermination et connaissance précise de la matrice des réponses en fluence

Crucial pour obtenir des données spectrométriques fiables

Caractéristiques d'un système BSS

Faiblesses :

- Faible résolution en énergie
- Recouvrement important des fonctions de réponse
- Indépendance linéaire des fonctions de réponse limitée

Avantages :

- Réponse quasi-isotrope
- Mise en œuvre simple / grande stabilité / transportable
- Fonctions de réponse couvrent sans discontinuité le domaine du régime thermique jusqu'à la centaine de MeV
- Possibilité d'extension de la réponse aux hautes énergies

Force et avantage majeur : Le seul système actuel de spectrométrie neutronique capable de couvrir plus de 11 décades en énergie

3. Définition par modélisation du Spectromètre de neutron

3. Définition par modélisation du Spectromètre de neutron

Modélisation d'un jeu de sphères de polyéthylène $(C_2H_4)_n$ comprenant 10 diamètres différents :
3", 3.5", 4", 4.5", 5", 6", 7", 8", 10" et 12"
densité massique considérée : 0.95 g/cm^3

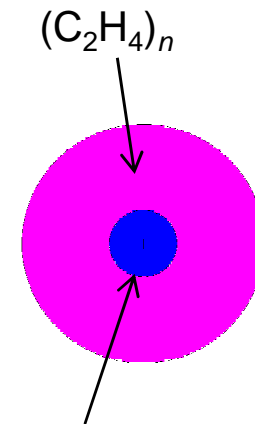
Détecteur central de neutrons thermiques considéré et modélisé :

Choix d'un compteur proportionnel gazeux sphérique à ^3He

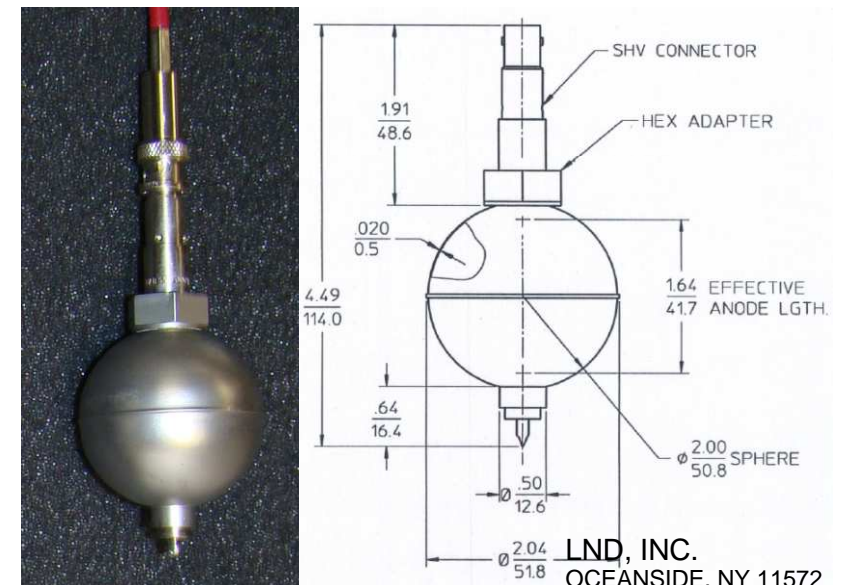
➔ Modèle LND 2705, LND Inc. (États-Unis)

- Diamètre externe de 5.08 cm
 - Grand volume sensible de détection de 64.57 cm^3
 - Haute pression de remplissage : $p_{\text{He}} = 9.7 \text{ atm}$
- ⇒ Sensibilité théorique aux neutrons thermiques
~ 75 cps / nv ('coups par seconde par unité de fluence')

1^{er} stade de la modélisation :
configuration géométrique très simplifiée

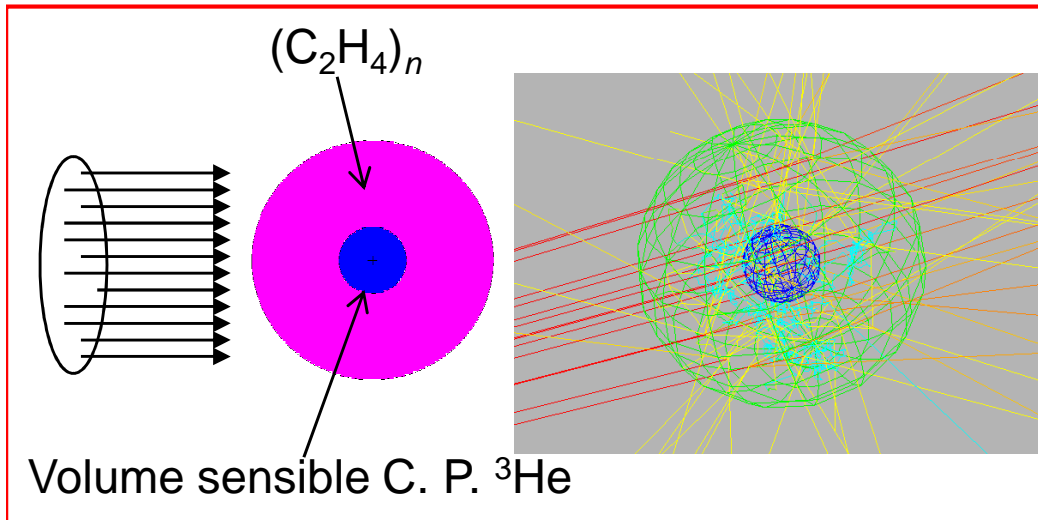


Compteur Proportionnel ^3He



3. Définition par modélisation du Spectromètre de neutron

Modélisation simplifiée – Calculs Monte Carlo des fonctions de réponse



Calcul de la Réponse en fluence

Hypothèse :

Chaque événement ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ est enregistré et contribue à l'indication M_d de la sphère de Bonner

Algorithme de calcul soumis à MCNPX :

$$R_d(E_n) = \sum_j \Phi_j a_{source} n_{He} V_{sensible} \sigma_{n,p}(E_j)$$

→ Variable E_j : énergie des neutrons modérés / thermalisés ($E_j \leq E_n$)

→ Grandeur Φ_j : **Estimation de la fluence par longueur de trace traversant le volume sensible (tally 'F4')**

Carte physique F4 de MCNPX :

$$\Phi_j \propto \frac{1}{V_{sensible}} \sum_{k=1}^K l_k(E_j)$$

Code de transport MCNPX version 2.6.0

MCNPX™ ≡ MCNP™ + LAHET™

Simulation du parcours neutron (avant interaction) dans la matière

$$l = - \frac{1}{\sum_i \sigma_{t,i} N_i} \ln \zeta$$

← Nombre aléatoire $0 \leq \zeta < 1$
 Sections efficaces totales $\sigma_{t,i}$ Densité matériaux N_i

3. Définition par modélisation du Spectromètre de neutron

○ **Domaine en énergie :**

$E_n = 10^{-9} \text{ MeV} \rightarrow E_n = 10 \text{ GeV}$

○ **Sections efficaces d'interaction extraites de la bibliothèque ENDF/B-VI.8**

→ Evaluations complètes des données nucléaires depuis le régime thermique jusqu'à 20 MeV

→ Extension des évaluations jusqu'à 150 MeV (sous-librairie LA150)

→ Traitement thermique spécial des diffusions H(n,n)H dans le polyéthylène : Vibrations des molécules $(\text{CH}_2)_n \Rightarrow$ Matrice $S(\alpha,\beta)$

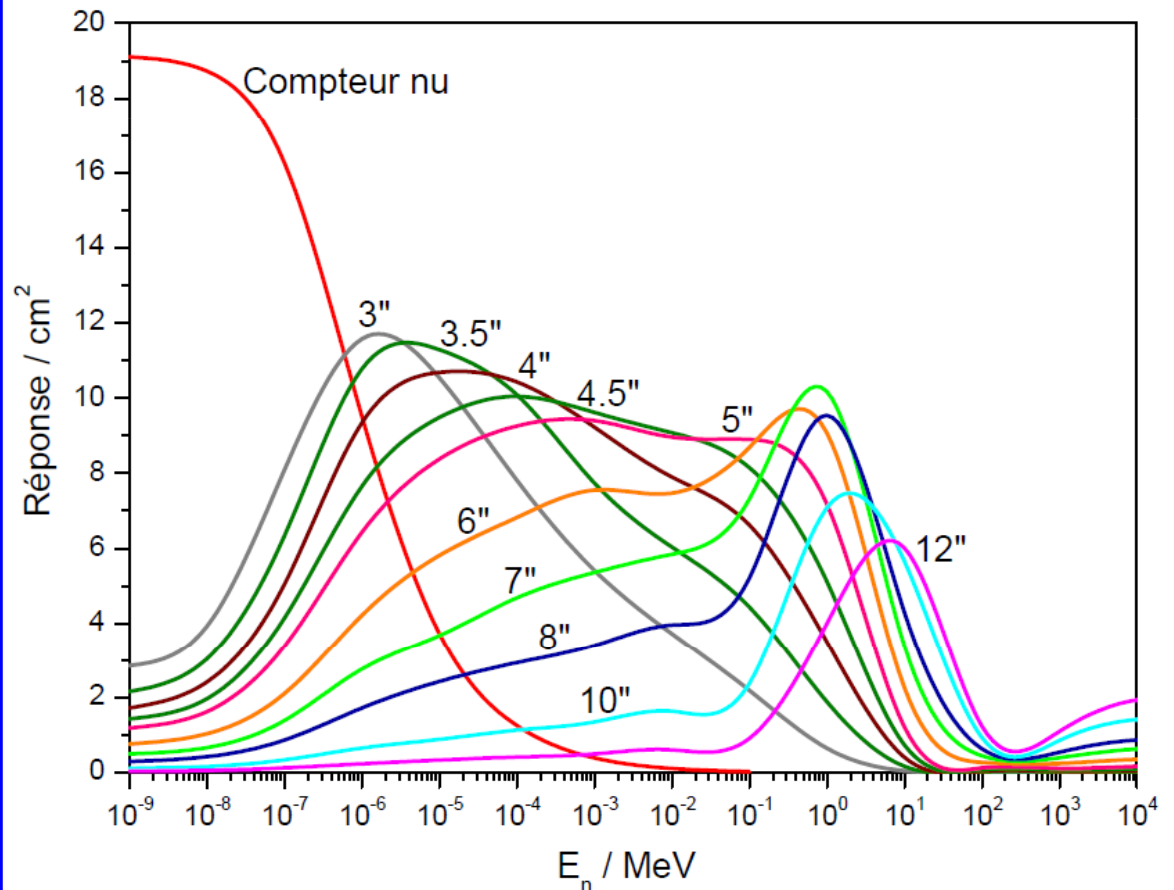
○ **Au-delà de 150 MeV, Modèle physique de Bertini couplé avec le générateur FLUKA ($E_n \geq 3.5 \text{ GeV}$)**

→ Zone de transition $20 \leq E_n \leq 150 \text{ MeV} \Rightarrow$ Option physique "mix and match" active

○ **Incertitude statistique MC du tally F4 pour**

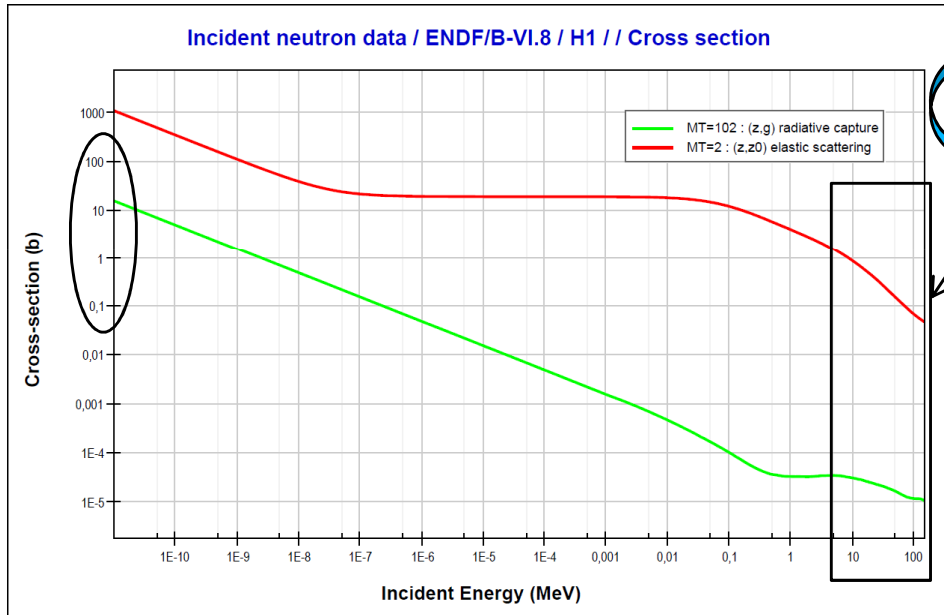
$$R_d(E_n) \quad \frac{s(R)}{R} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \leq 2\%$$

Établissement de la matrice de réponse au moyen du code MCNPX



⇒ Chute des réponses à partir de 10 MeV
⇒ Très faible efficacité au-delà de 100 MeV

3. Définition par modélisation du Spectromètre de neutron



Cause de la "déficience" du système de sphères de Bonner conventionnel $E_n > \sim 10$ MeV

Chute de la section efficace de diffusion élastique H(n,n)H

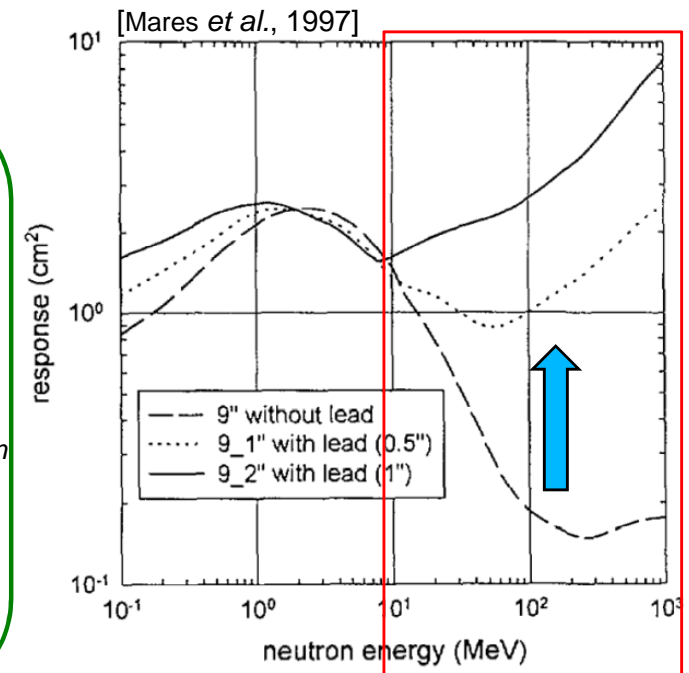
A partir de $E_n \sim 100$ MeV
Perte de l'efficacité des noyaux H légers pour dégrader l'énergie des neutrons incidents

Il est possible d'accroître la réponse en fluence de sphères de Bonner dans le domaine hautes énergies

Incorporation dans le modérateur $(C_2H_4)_n$ de certains matériaux lourds convertisseurs sous forme de coquille sphérique

→ Générations de neutrons secondaires de basses énergies dans $(C_2H_4)_n$

- ✓ Idée initialement développé par Ktyuchkov et Semenova en 1987 par calculs MC
- ✓ 1^{er} développement d'un spectromètre de neutron étendu aux hautes énergies avec du Plomb convertisseur ⇒ Mares et Schraube en 1997



4. Extension du Spectromètre de neutron au domaine des hautes énergies

4. Extension du Spectromètre de neutron au domaine des hautes énergies

Technique des matériaux convertisseurs – Etude de la modification de sphères de Bonner conventionnelles

Sélection de matériaux convertisseurs

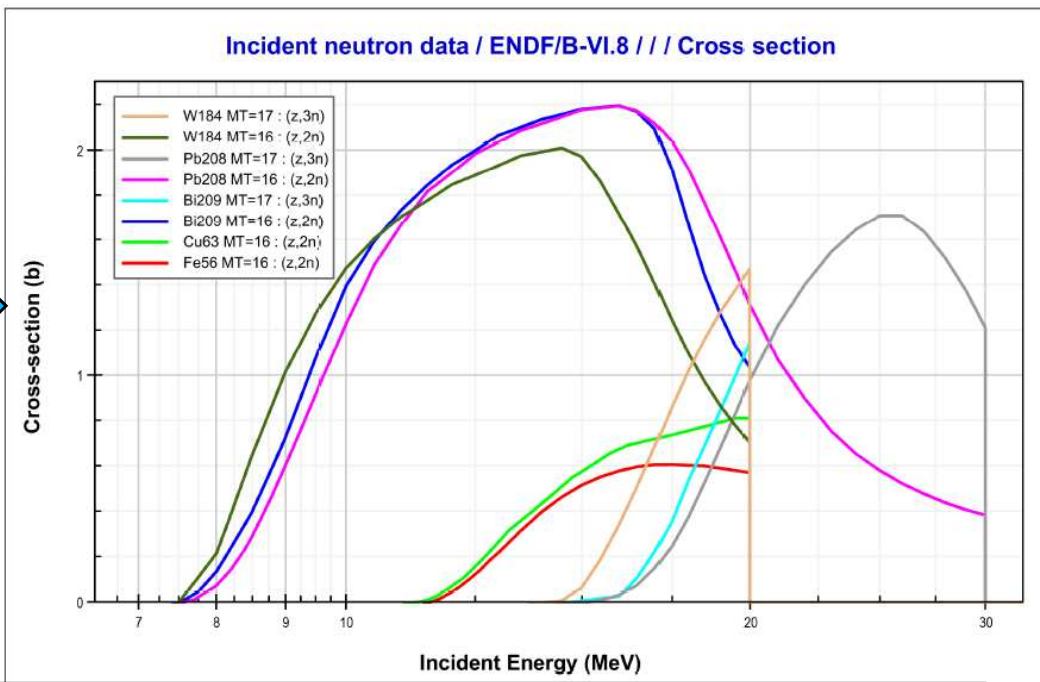
Matériaux de nature métallique

→ Grand numéro atomique / Densité massique élevée

→ Grandes sections efficaces de réactions (n, xn')

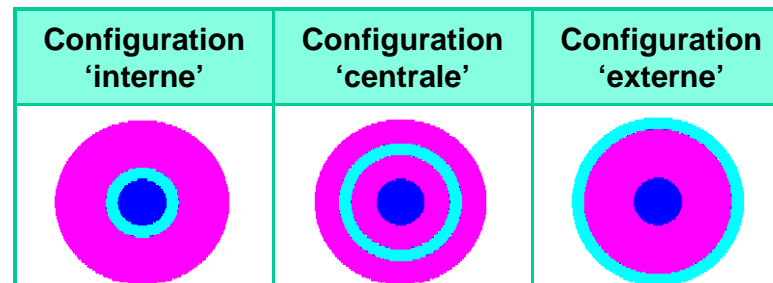
• Seuil des réactions $(n, 2n')$ ~ 8 MeV
 ⇒ **Emission de neutrons secondaires de basses énergies**

• A partir de 100 MeV, les processus de spallation entretiennent les réactions (n, xn')
 ⇒ **Multiplication neutronique**



Métal	Z	ρ (g/cm ³)
Fer (Fe)	26	7.86
Cuivre (Cu)	29	8.96
Bismuth (Bi)	83	9.80
Plomb (Pb)	82	11.34
Tungstène (W)	74	19.30

Modélisation simplifiée / Calcul de la réponse par simulations MCNPX de la sphère 7" modifiée
 3 positionnements de coquille métallique de 0.5" d'épaisseur

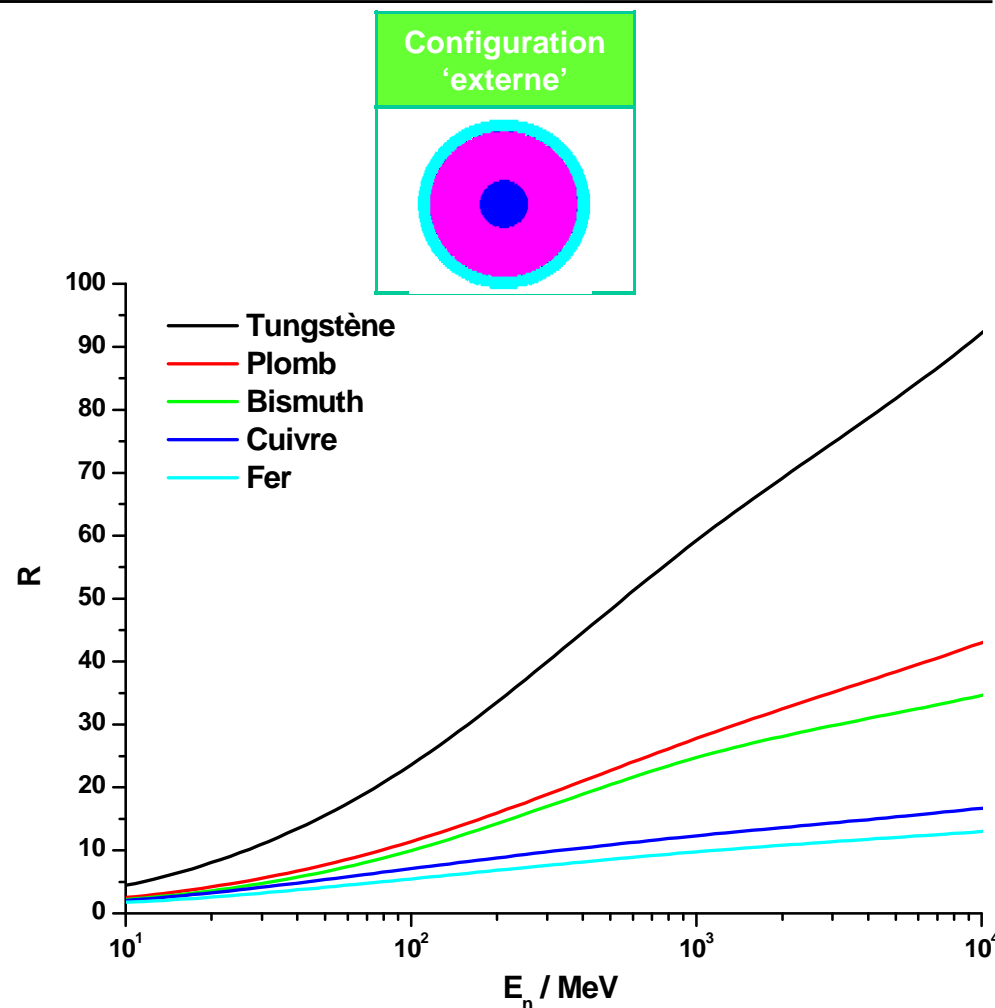
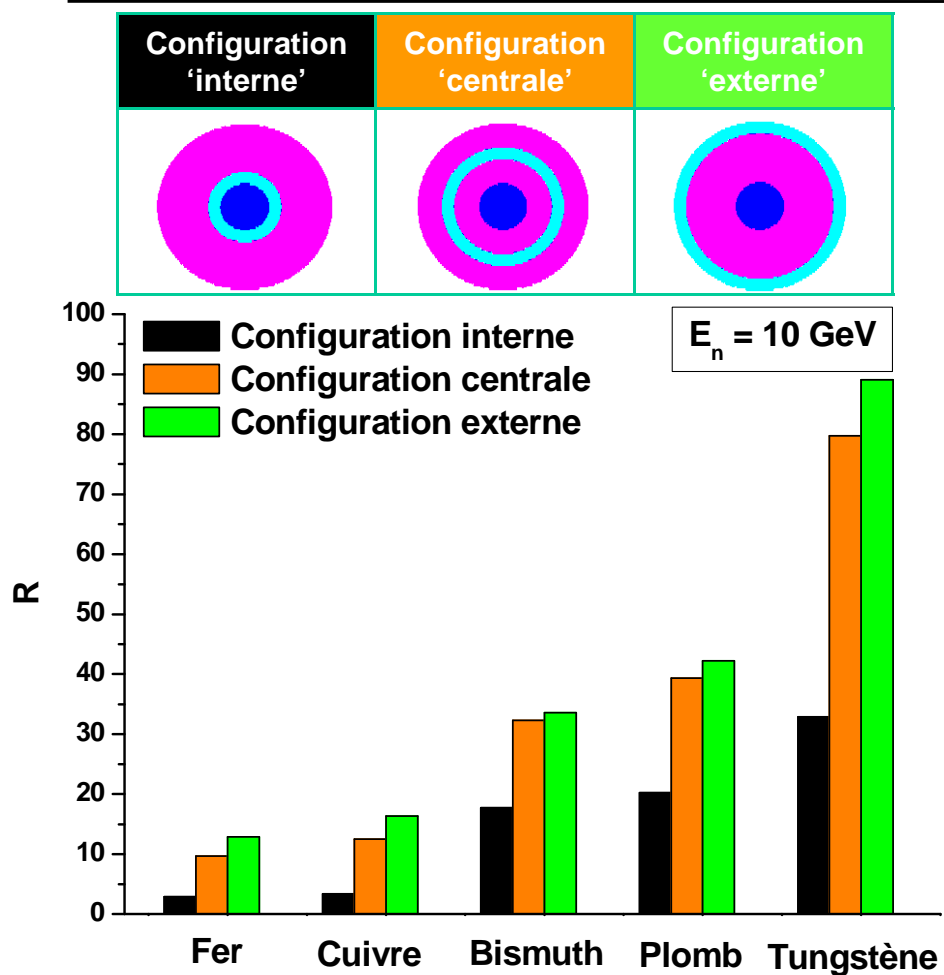


4. Extension du Spectromètre de neutron au domaine des hautes énergies

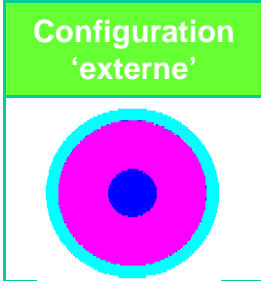
Calculs MCNPX

Optimisation de la réponse 'haute énergie'
Sphère 7" – Coquille métallique d'épaisseur 0.5"

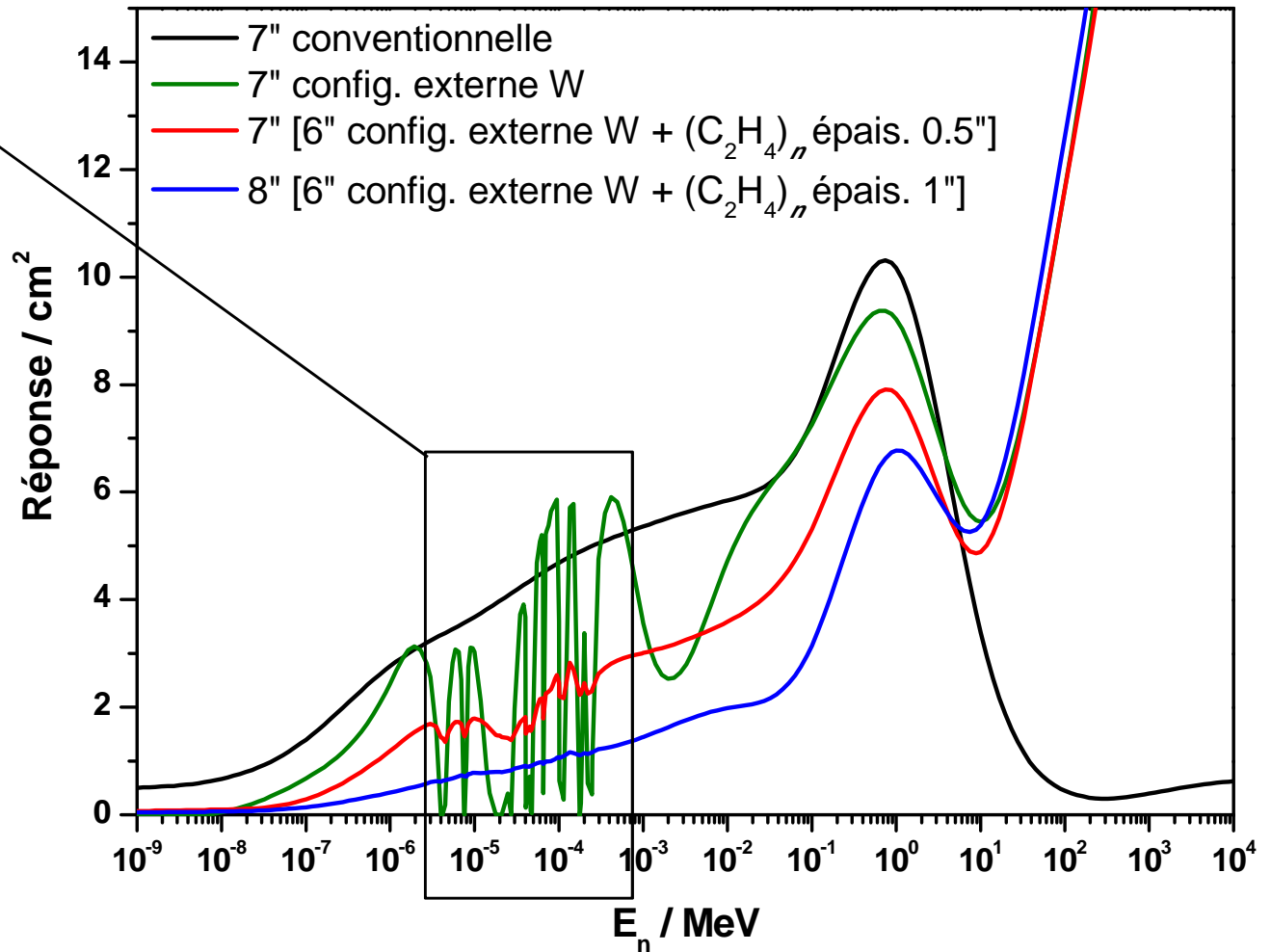
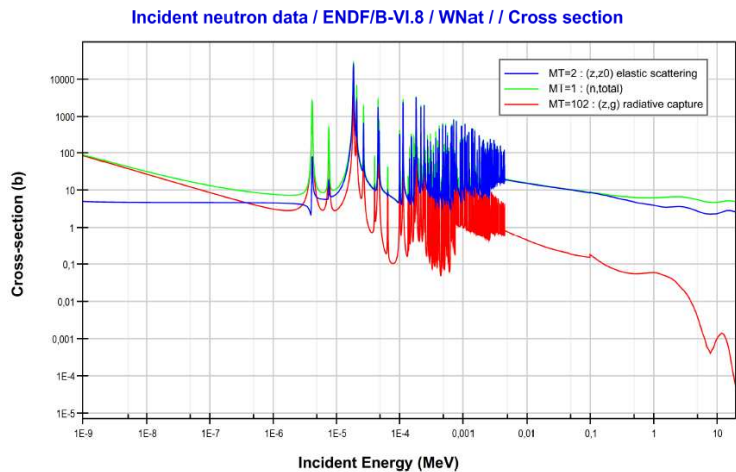
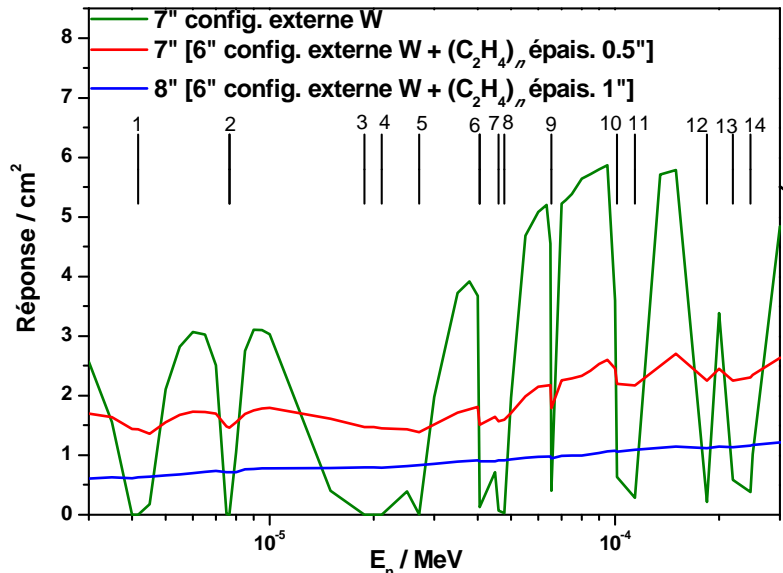
$$R = \frac{\text{Réponse de la sphère 7" modifiée}}{\text{Réponse de la sphère 7" conventionnelle}}$$



4. Extension du Spectromètre de neutron au domaine des hautes énergies



Optimisation de la configuration 'externe' – Tungstène
 Calcul MCNPX de la Réponse ↔ Structures résonnantes



4. Extension du Spectromètre de neutron au domaine des hautes énergies

Optimisation de la réponse de trois configurations de sphères métalliques Pb / W pour $E_n > 10$ MeV

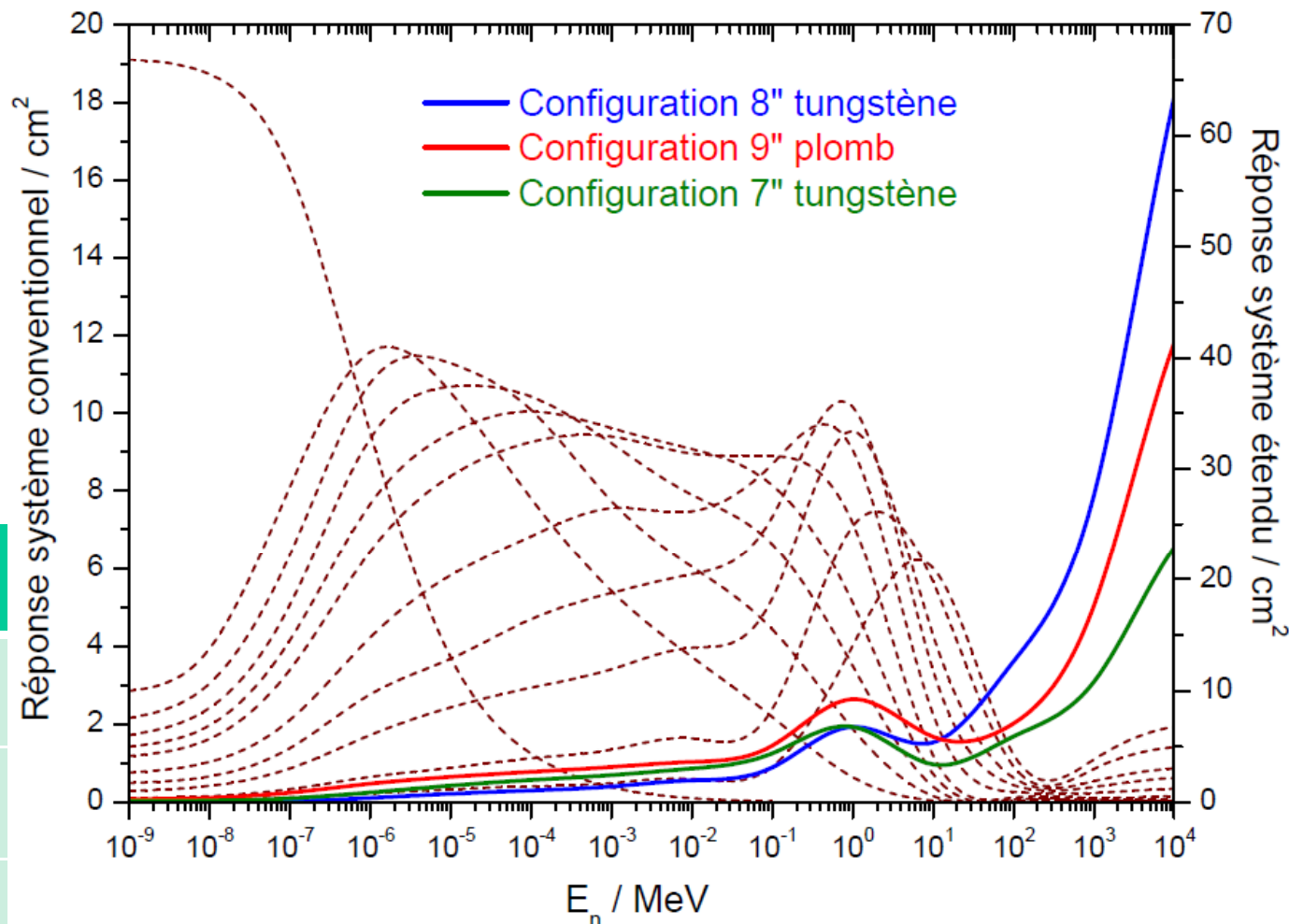
→ Positionnement
coquilles métalliques Pb et W

→ Quantité / Epaisseur
matériaux convertisseurs Pb et W

→ Epaisseur
couche externe modératrice $(C_2H_4)_n$

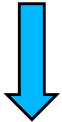
Les trois configurations métalliques retenues :

Sphère	Epaisseur coquille	Masse totale
8" W	0.5" $m_W=15$ kg	$m_{tot}=18.5$ kg
9" Pb	0.5" $m_{Pb}=12.4$ kg	$m_{tot}=17.3$ kg
7" W	0.25" $m_W=5.6$ kg	$m_{tot}=8.1$ kg



4. Extension du Spectromètre de neutron au domaine des hautes énergies

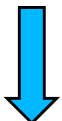
Sur la base de ce travail
d'extension et d'optimisation
du système BSS conventionnel
au-delà de la dizaine de MeV



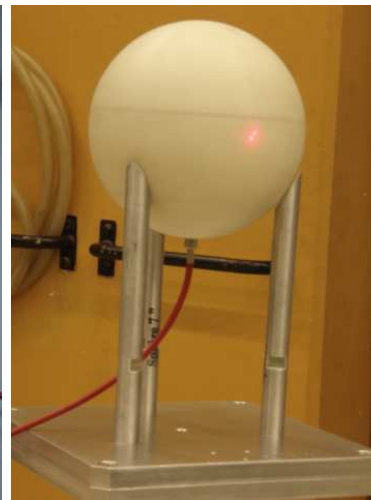
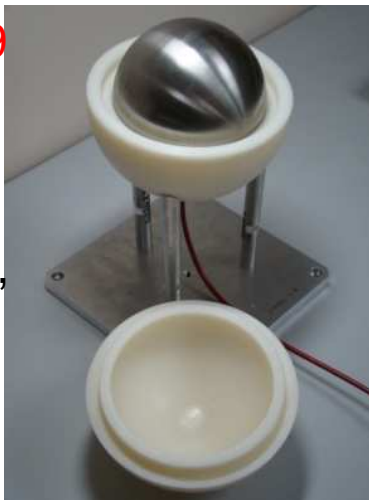
Rédaction Cahier des Charges
Technique IRSN

[Serre et Martin, 2007]

Réf. DRPH/SDE/LMDN/2007-849
(5/12/2007)

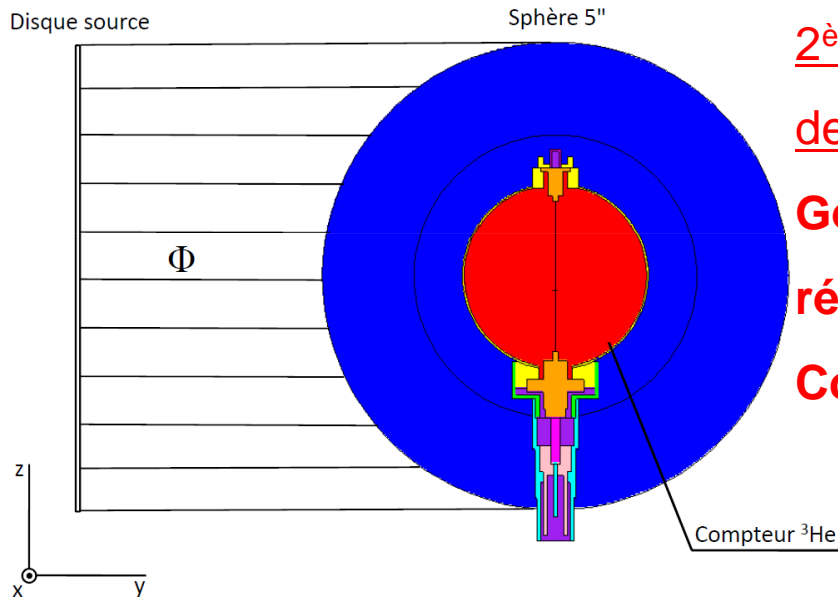


Fabrication des différentes pièces,
ajustements et réalisation
du système de spectrométrie
de neutron étendu
au domaine des hautes énergies

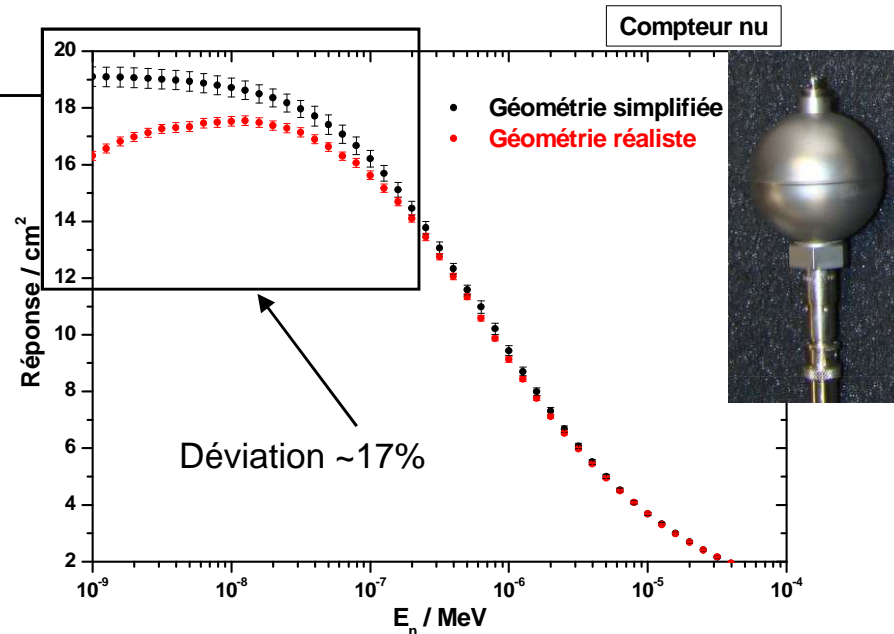


5. Caractérisation par simulations Monte Carlo du Spectromètre de neutron

5. Caractérisation par simulations Monte Carlo du Spectromètre de neutron

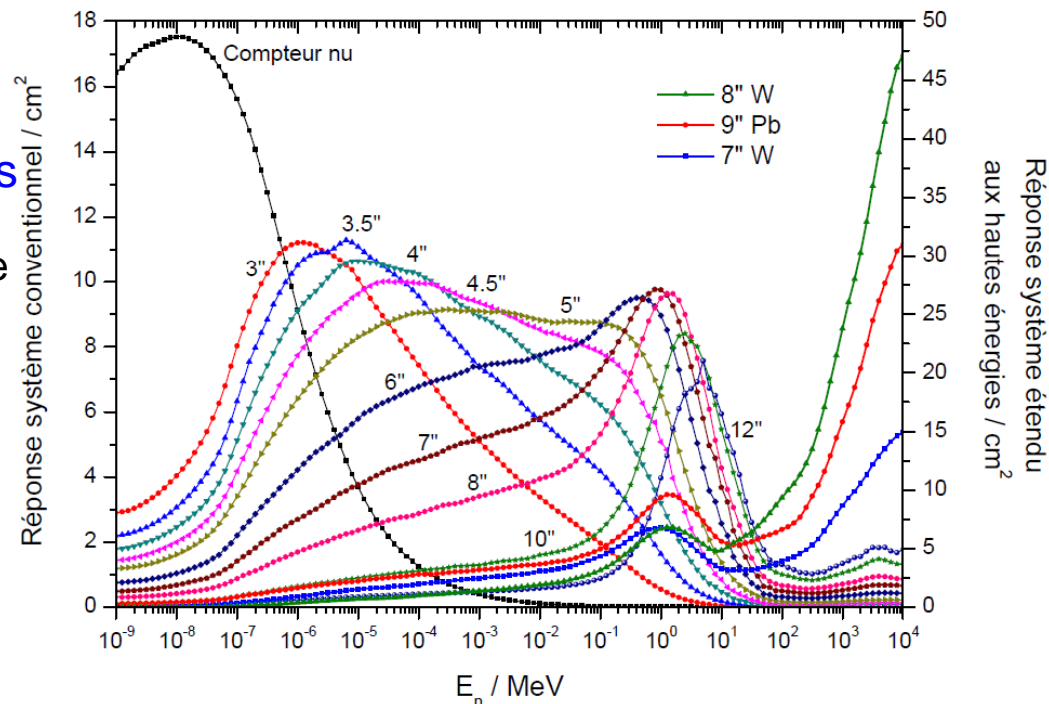


2^{ème} stade
de modélisation :
Géométrie réaliste du Compteur ³He

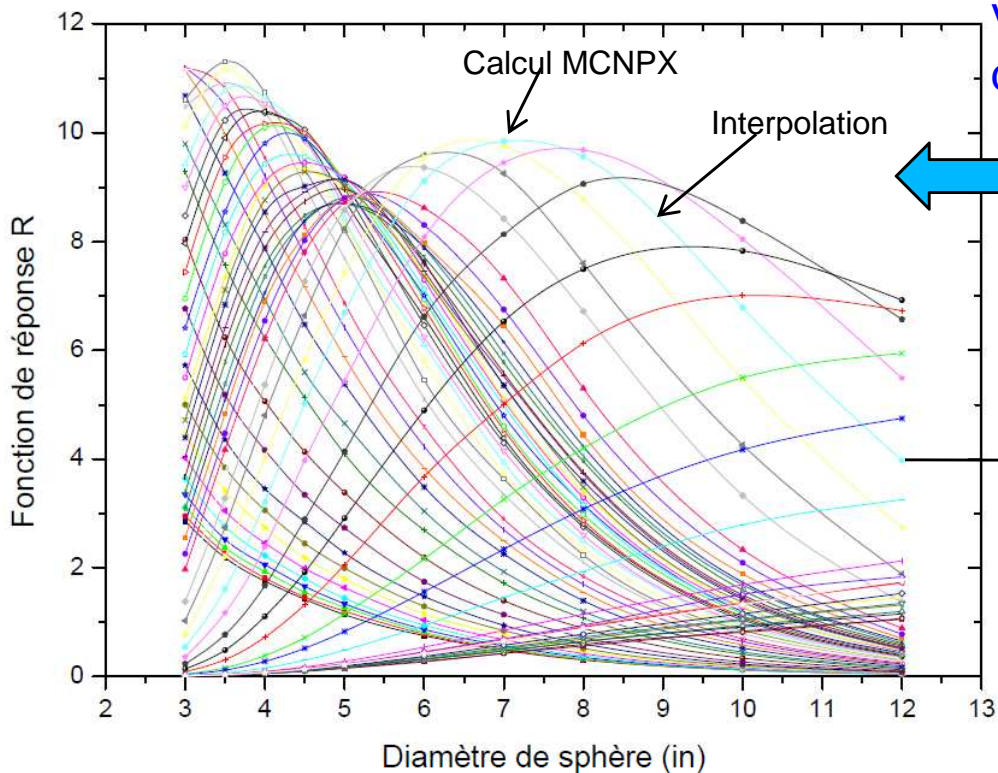


Matrice de réponse finale du BSS Hautes Energies

- Calculs MCNPX de 1430 valeurs de réponse en fluence $R_d(E_n)$
- 10 énergies E_n par décade (équidistantes log)
- $E_n = 150 \text{ MeV} \rightarrow E_n = 10 \text{ GeV}$: Générateur hautes énergies LAQGSM03.01
- $s(R) / R < 1\%$ + technique réduction variance (tally F4)
 \Rightarrow Temps de calculs CPU < 29 jours



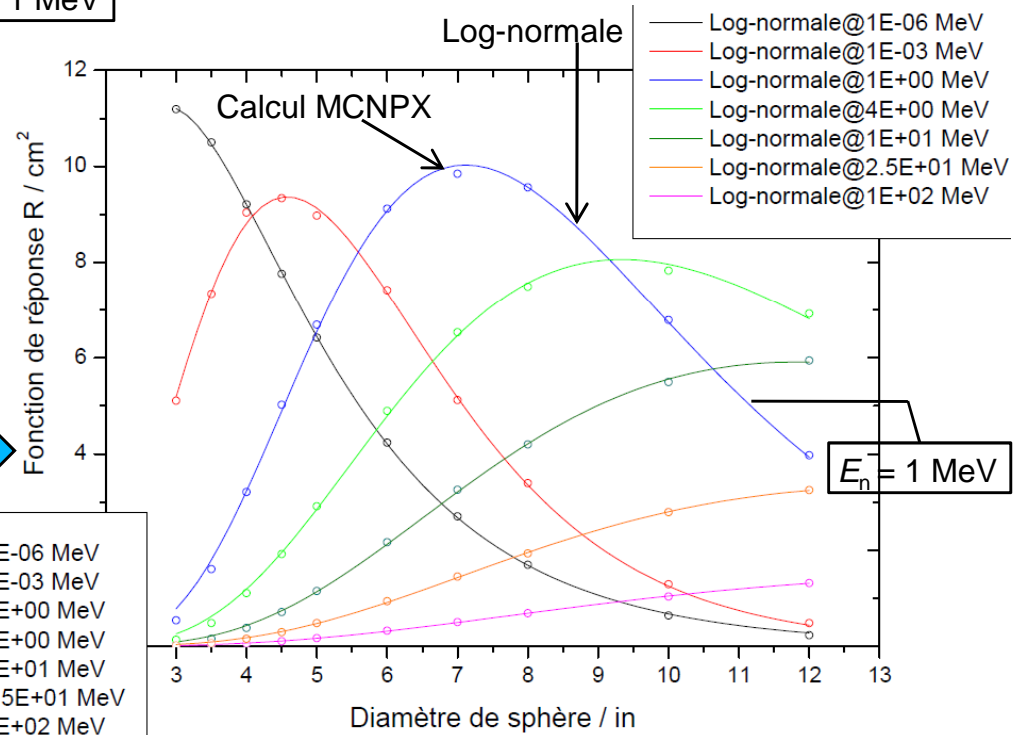
5. Caractérisation par simulations Monte Carlo du Spectromètre de neutron



Vérification semi-empirique des calculs Monte Carlo de réponses en fluence / Sphères conventionnelles

Représentation $R_d(E_n)$ versus diamètre sphère d_i
 Courbes de réponse $R_d(d_i, E_n) \rightarrow$ Interpolation ("*cubic spline*")
 Energie $E_n \equiv$ paramètre

$E_n = 1 \text{ MeV}$



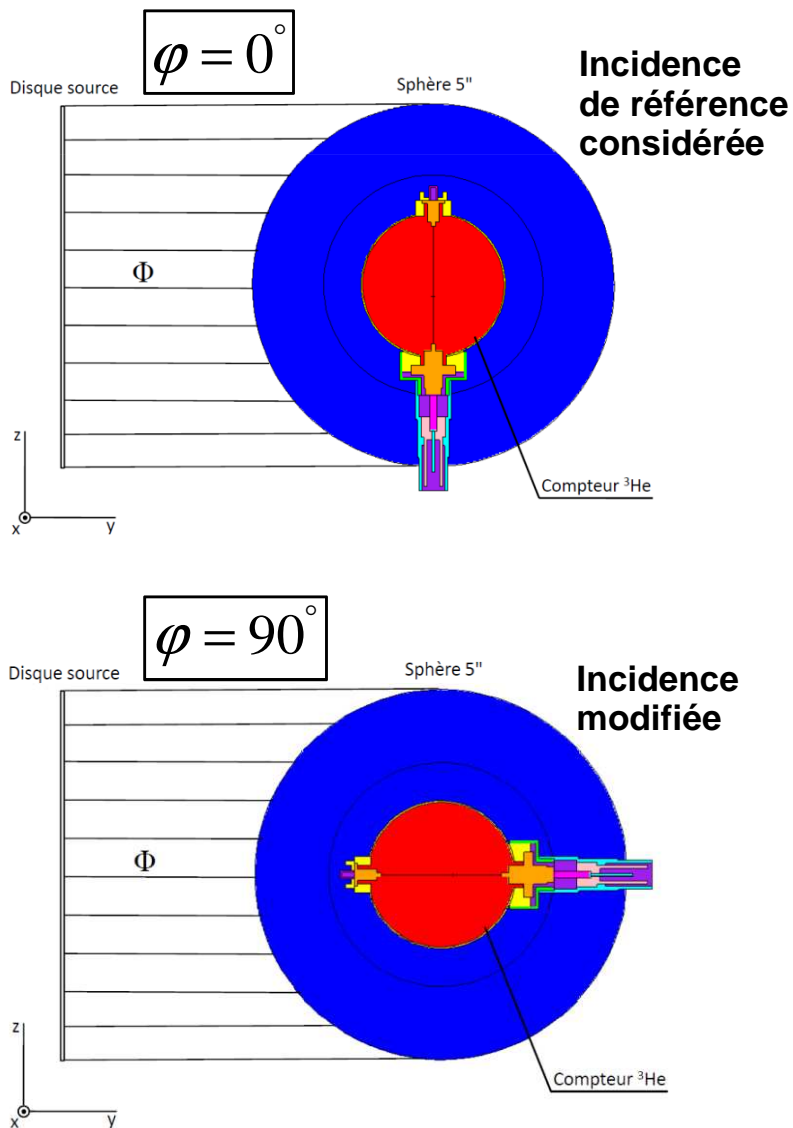
Représentation semi-empirique généralisée de réponses BSS [Zaborowski, 1981]:

$$R(d_i, E_n) = \frac{P_1(E_n)}{P_2(E_n)d_i} \exp\left(-\frac{(\ln d_i - P_3(E_n))^2}{2P_2^2(E_n)}\right)$$

\Rightarrow Très bon accord entre hypothèse Log-normale et Calculs MCNPX

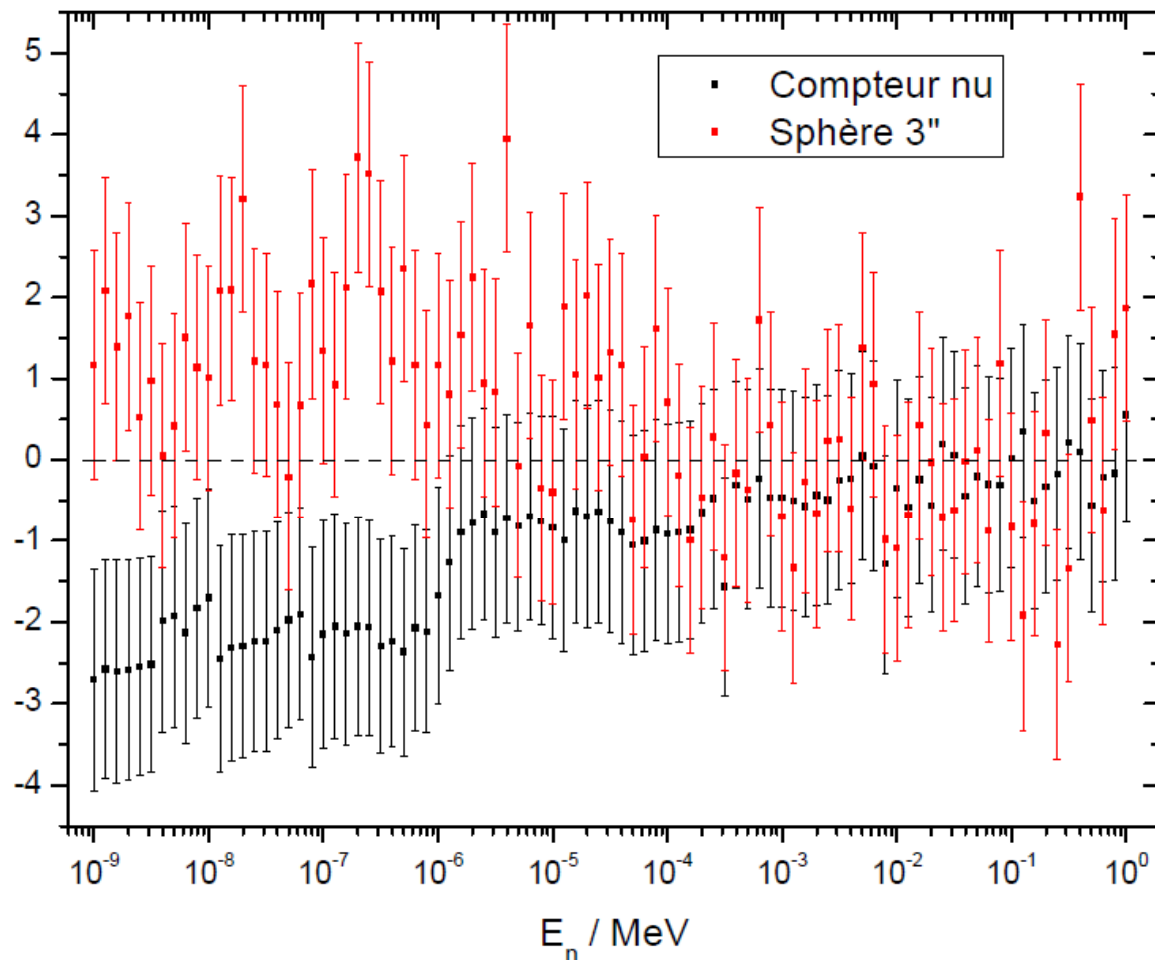
5. Caractérisation par simulations Monte Carlo du Spectromètre de neutron

Dépendance angulaire des Réponses en fluence calculées



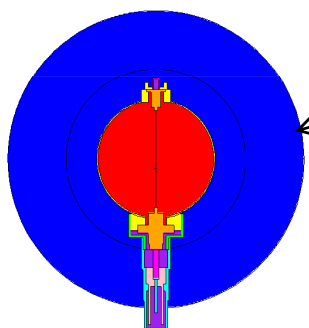
$$\frac{\Delta R}{R} (\%) = \frac{[R(\varphi = +90^\circ) - R(\varphi = 0^\circ)]}{R(\varphi = 0^\circ)} \Rightarrow \text{Moy.} \leq 3\%$$

Déviatiion (%) $[R(\varphi = 90^\circ) - R(\varphi = 0^\circ)] / R(\varphi = 0^\circ)$



5. Caractérisation par simulations Monte Carlo du Spectromètre de neutron

Influence de la densité massique du modérateur (C_2H_4)_n sur les Réponses en fluence calculées



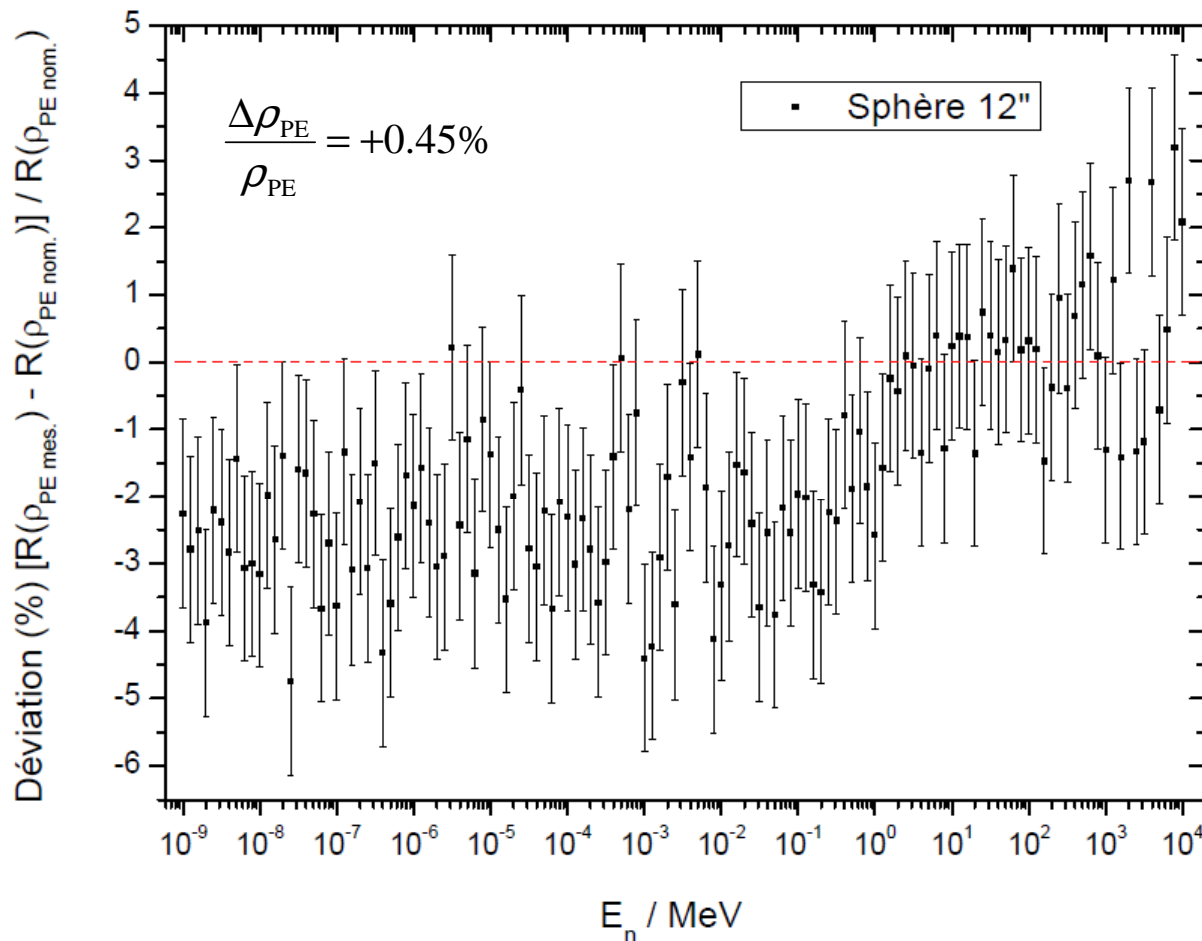
Fournisseur matière
Densité nominale
⇒ $\rho_{PE} = 0.954 \text{ g/cm}^3$

(haut poids moléculaire
500 000 mol/g)

Mesures densité ρ_{PE} (Laboratoire National de métrologie et d'Essais)

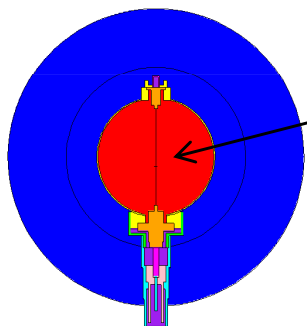
	Échantillon 1	Échantillon 2
ρ_{PE} (g/cm ³)	0.9543 ± 0.0031	0.9577 ± 0.0044
Diamètre	3"	6", 7"
	Échantillon 3	Échantillon 4
ρ_{PE} (g/cm ³)	0.9583 ± 0.0037	0.9589 ± 0.0055
Diamètre	8", 10" et 12"	3.5", 4", 4.5" et 5"

$$\frac{\Delta R}{R} (\%) = \frac{[R(\rho_{PE_{mes.}}) - R(\rho_{PE_{nom.}})]}{R(\rho_{PE_{nom.}})} \Rightarrow Moy. \leq 4\%$$



5. Caractérisation par simulations Monte Carlo du Spectromètre de neutron

Influence de la densité atomique en ^3He du gaz sensible de détection sur les Réponses en fluence calculées



LND 2705 ($d_{\text{C.P.}} = 5.08 \text{ cm}$)
Pression nominale stipulée par LND Inc.
 $p_{\text{He}} = 9.7 \text{ atm}$

⇒ Densité atomique effective :
 $n_{\text{He}} = 2.4246 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

Définition efficacité de détection du Compteur nu ^3He aux neutrons (E_n)

$$\varepsilon_{\text{C.P.}}(E_n) = \frac{4R_{\text{C.P.}}(E_n)}{\pi d_{\text{C.P.}}^2}$$

$$E_n = 10^{-9} \text{ MeV} \rightarrow \varepsilon_{\text{C.P.}} = 80.5\%$$

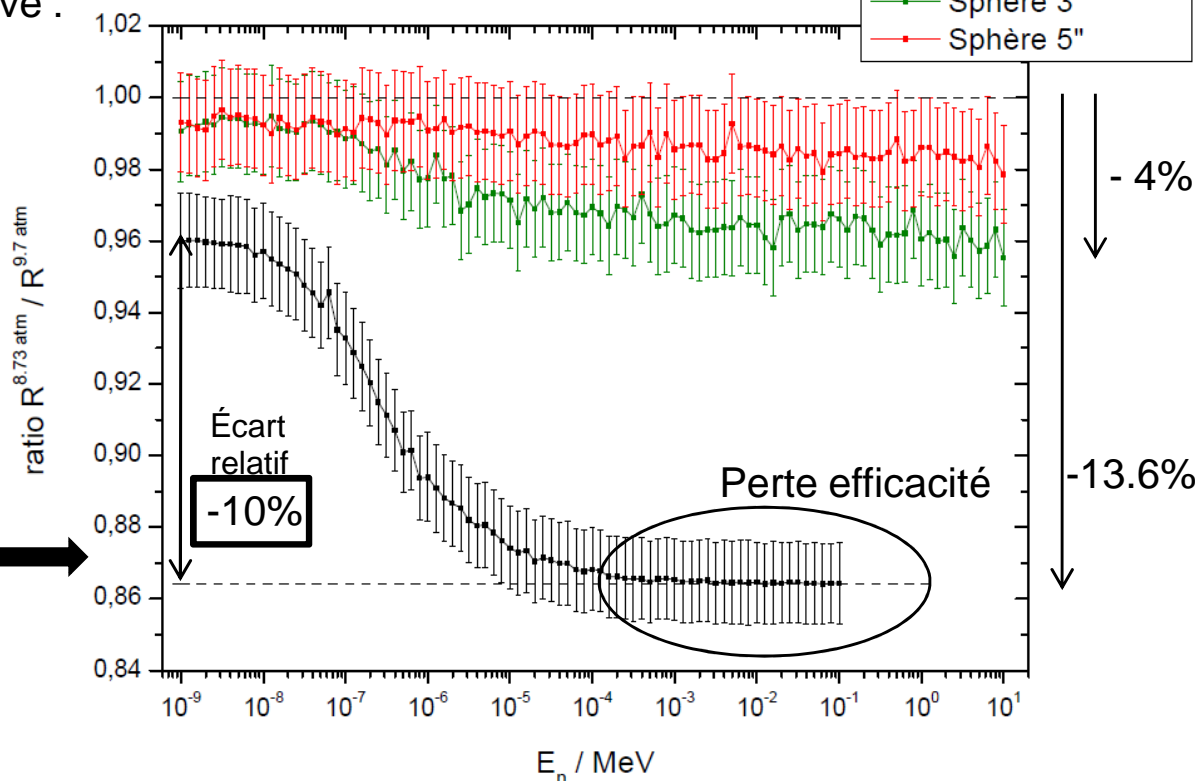
$$E_n = 10^{-6} \text{ MeV} \rightarrow \varepsilon_{\text{C.P.}} = 45\%$$

$$E_n = 10^{-3} \text{ MeV} \rightarrow \varepsilon_{\text{C.P.}} = 0.6\%$$

Hypothèse étude

$$\frac{\Delta p_{\text{He}}}{p_{\text{He}}} (\%) = \frac{\Delta n_{\text{He}}}{n_{\text{He}}} (\%) = -10\%$$

évolution du ratio $\frac{R^{8.73 \text{ atm}}}{R^{9.7 \text{ atm}}}$



6. Tests de mesure auprès d'une source neutronique $^{241}\text{Am-Be}$ de référence

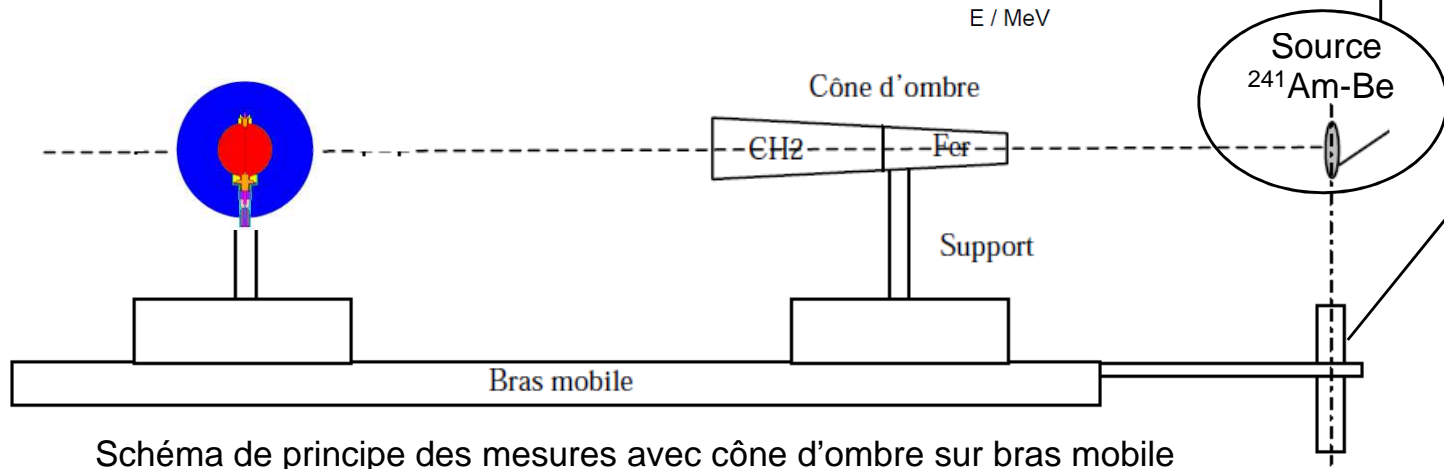
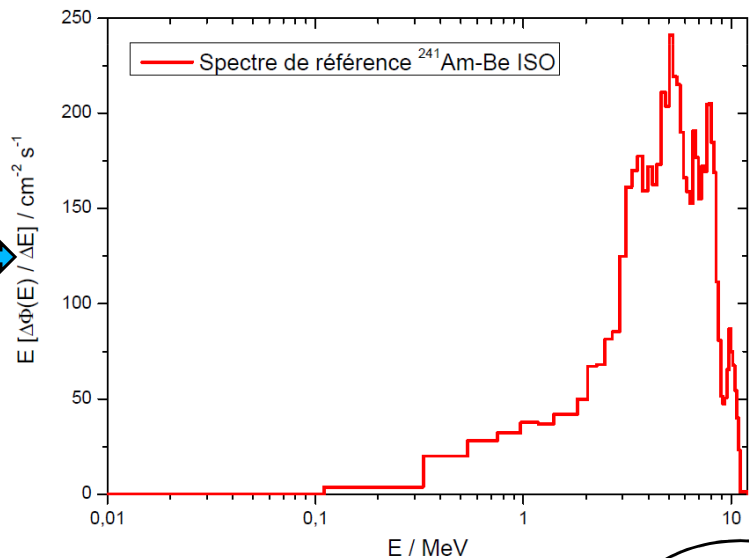
6. Tests de mesure auprès d'une source neutronique $^{241}\text{Am-Be}$ de référence

Premiers tests de mesure du spectromètre auprès d'une source radioactive $^{241}\text{Am}^9\text{Be}(\alpha,n)$ appartenant à l'IRSN et recommandée par le standard ISO

Taux d'émission de la source : 3.72×10^7 neutrons / s (4π stéradian)

Débit de fluence de $295.81 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ à 1 m de la source

Distribution en énergie de la fluence neutronique $^{241}\text{Am}^9\text{Be}(\alpha,n)$ de référence selon la norme ISO 8529-1



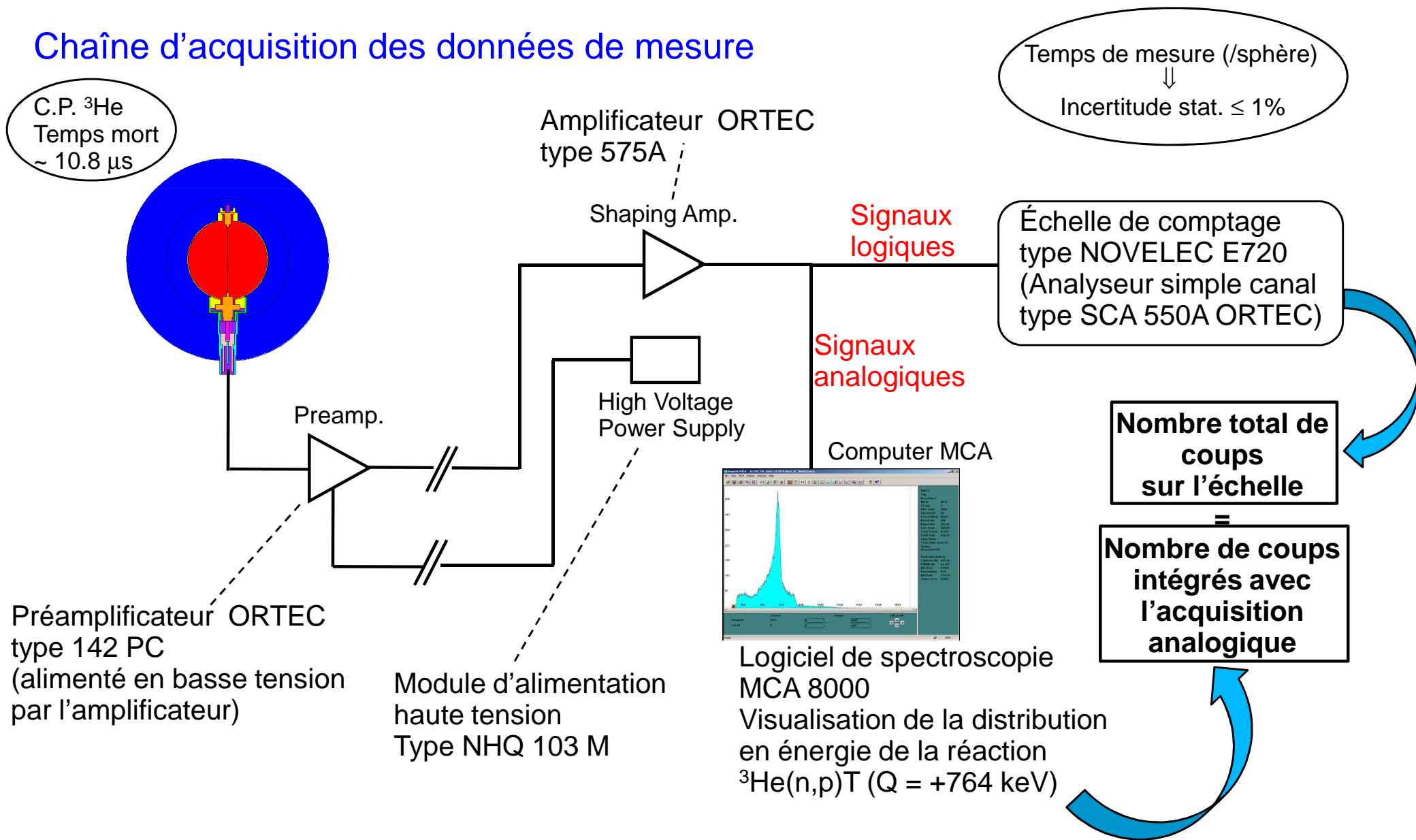
Irradiateur source $^{241}\text{Am-Be}$ installation CEZANE IRSN/LMDN



Schéma de principe des mesures avec cône d'ombre sur bras mobile

6. Tests de mesure auprès d'une source neutronique $^{241}\text{Am-Be}$ de référence

Chaîne d'acquisition des données de mesure



6. Tests de mesure auprès d'une source neutronique $^{241}\text{Am-Be}$ de référence

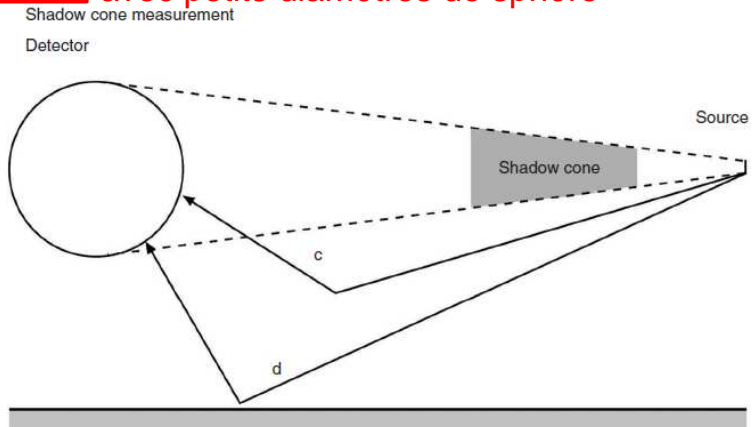
Résultats de validation expérimentale préliminaire des fonctions de réponse Calculées ($E_n \leq 10$ MeV)

Représentation du ratio
(en fonction
du diamètre de sphère)

$$\frac{R_{\text{expérimental}}}{R_{\text{calcul ISO}}} \equiv \frac{M_{\text{expérimental}}}{M_{\text{calcul ISO}}}$$

Calculs MCNPX

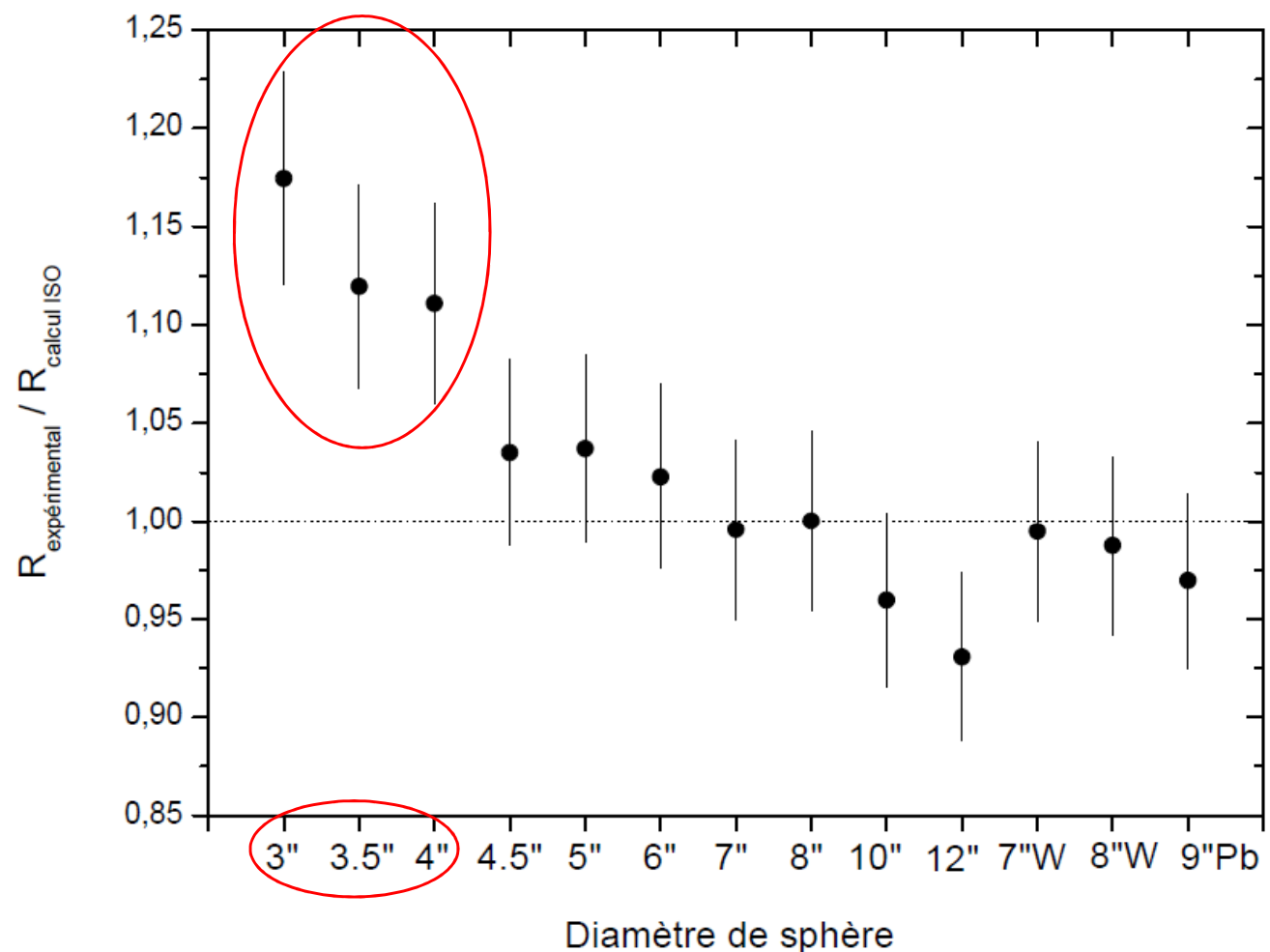
! Problème Technique cône d'ombre avec petits diamètres de sphère



$$M_{\text{expérimental}} = R_{\text{expérimental}} \Phi_{\text{Am-Be}}$$

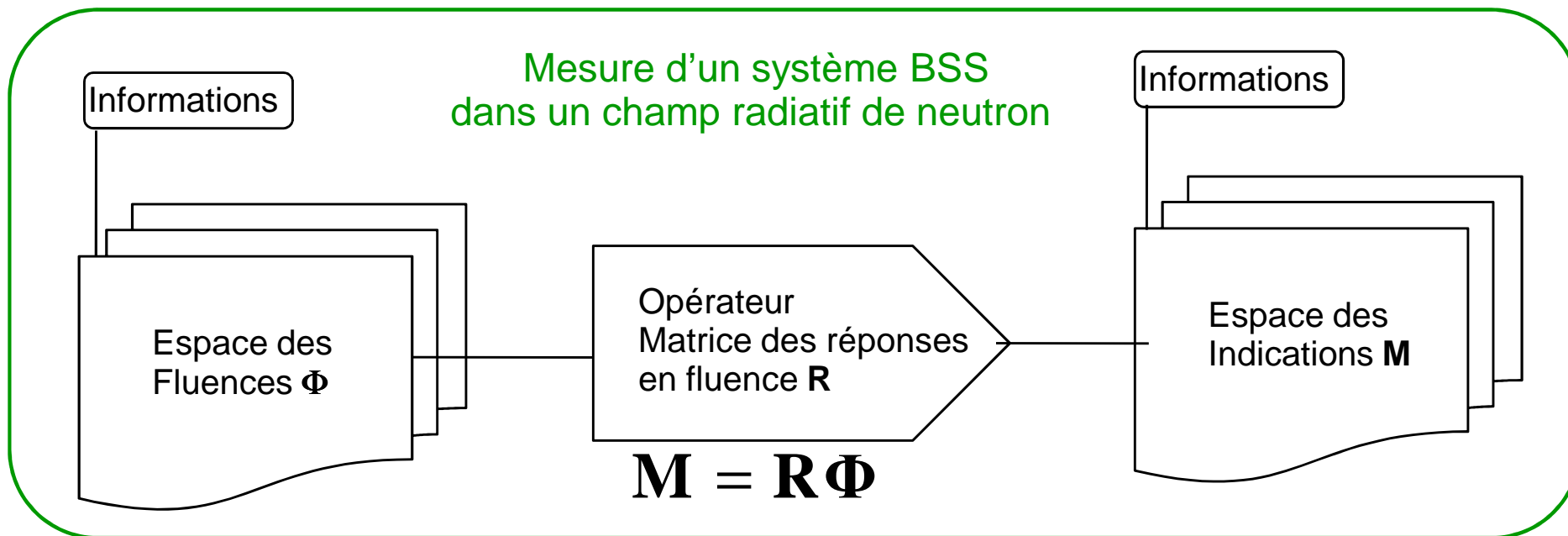
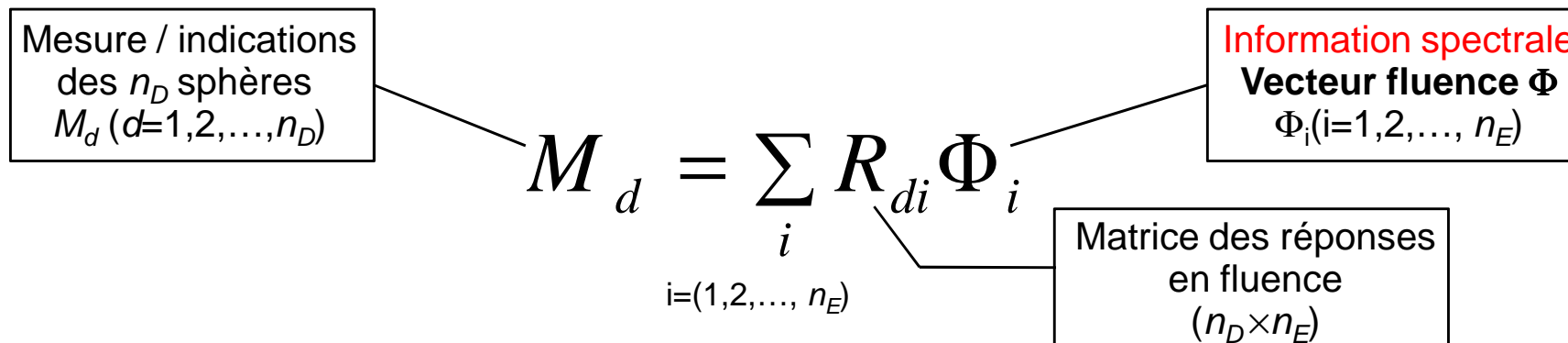
$$M_{\text{calcul ISO}} = R_{\text{calcul ISO}} \Phi_{\text{Am-Be ISO}}$$

avec $\Phi_{\text{Am-Be}} \equiv \Phi_{\text{Am-Be ISO}}$



6. Tests de mesure auprès d'une source neutronique $^{241}\text{Am-Be}$ de référence

La déconvolution, ou "la résolution du problème inverse de la spectrométrie"



La déconvolution : 'Connaissant' les quantités M et R \longrightarrow on cherche à obtenir la fluence spectrale Φ

6. Tests de mesure auprès d'une source neutronique $^{241}\text{Am-Be}$ de référence

Premiers résultats de déconvolution - Le code de déconvolution GRAVEL

Code de déconvolution employé  **GRAVEL** (Programme GRV_FC33 tiré du package UMG version 3.3)

Code d'ajustement, par **la méthode des moindres carrés**, requérant un **spectre d'entrée estimé**, lequel est ensuite ajusté de manière itérative jusqu'à ce qu'une **solution de spectre** soit obtenue, de sorte que :

Pour converger vers une solution physique cohérente, Une "information a priori" sur le spectre doit être implémentée dans la procédure de déconvolution

$$\chi^2 = \sum_{d=1}^{n_D} (f \cdot C_d - M_d)^2 w_d = \min$$

Indication calculée de la sphère d

Indication de mesure de la sphère d

f : facteur d'ajustement
 $w_d = 1 / s^2(M_d)$

Convolution de l'estimation, de la solution ou bien de la solution intermédiaire de spectre avec la fonction de réponse calculée $R_d(E)$

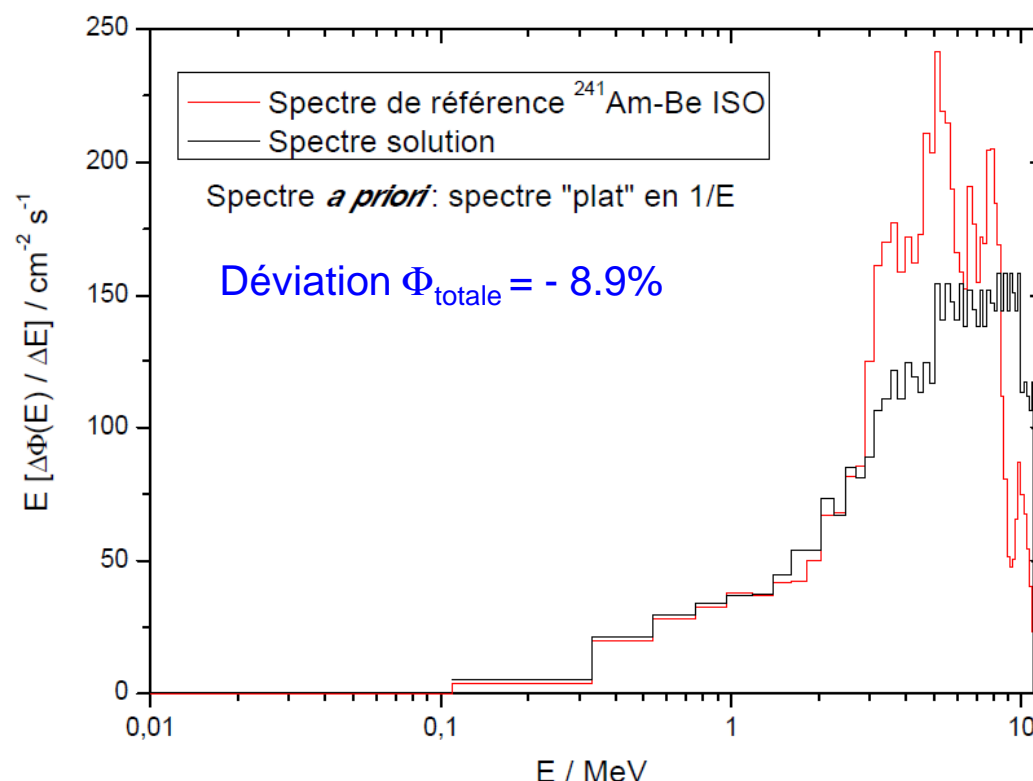
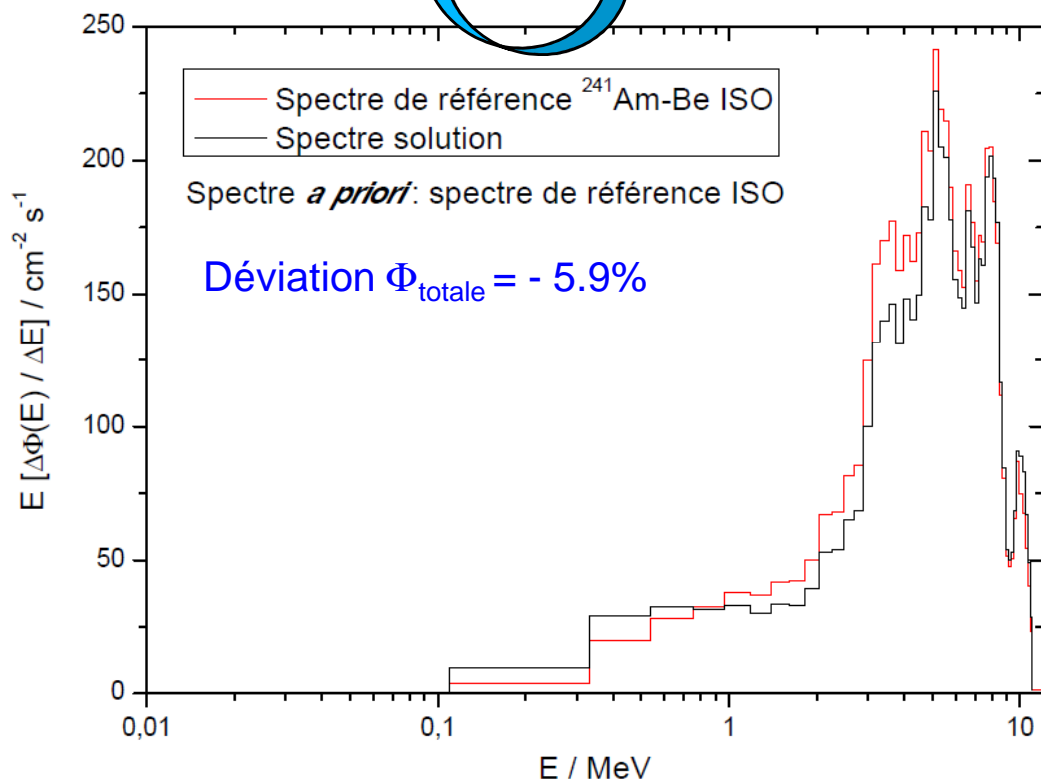
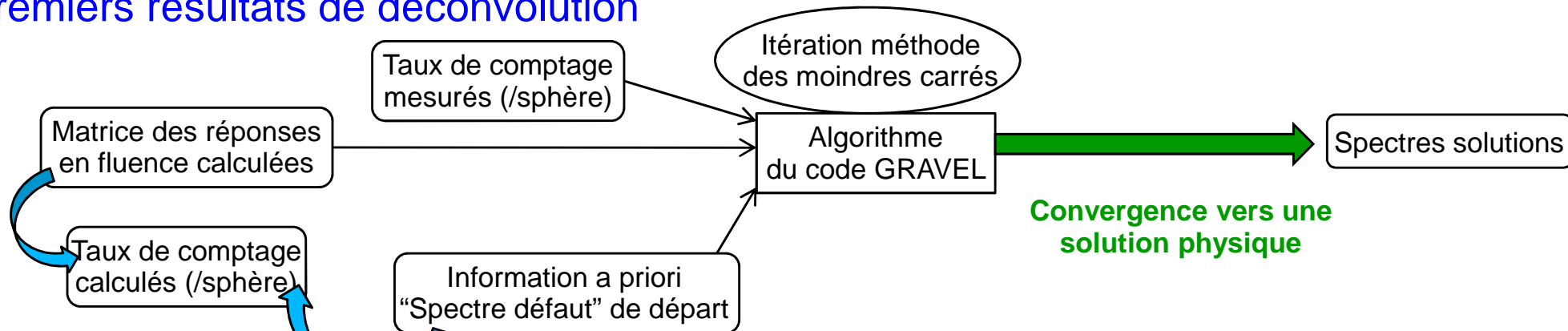
Algorithme GRAVEL
Processus itératif
Méth. moindres carrés

Spectre initial modifié

Convergence des Données calculées vers les Données expérimentales

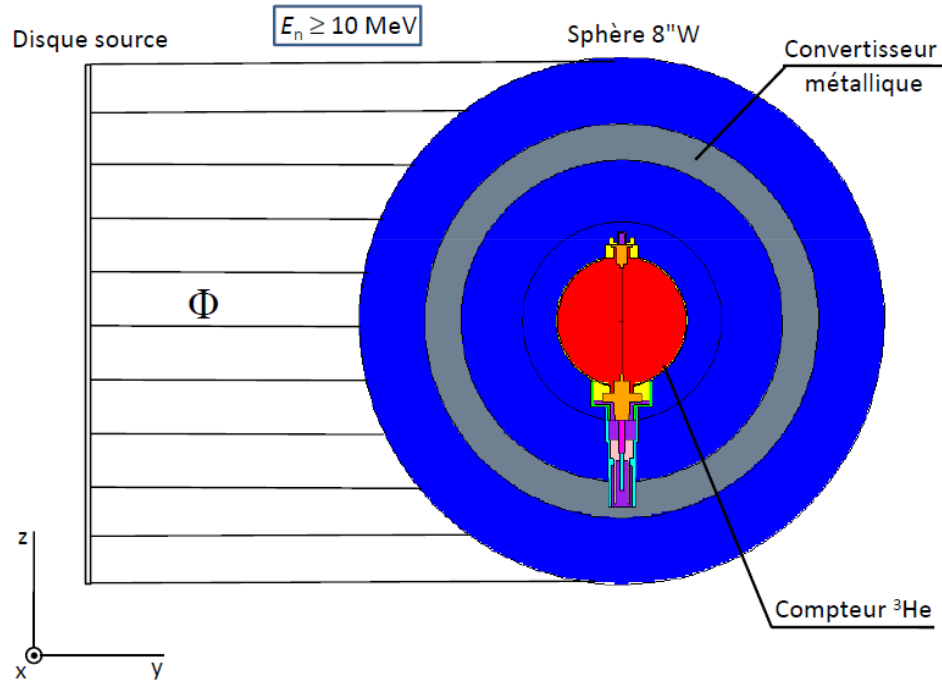
6. Tests de mesure auprès d'une source neutronique $^{241}\text{Am-Be}$ de référence

Premiers résultats de déconvolution



7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Énergies

7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies



Simulations numériques / Code de transport MCNPX version 2.6.0
 Extension de la réponse en fluence d'un système BSS conventionnel muni d'un compteur haute sensibilité à ^3He au domaine des **Hautes Énergies** ($E_n \geq 10 \text{ MeV}$)

Démultiplication de la probabilité de capture neutronique au sein du compteur ^3He central par la production de neutrons secondaires de basses énergies dans les matériaux métalliques convertisseurs (Pb, W) :

Interaction { neutron - noyau lourd } $10 \text{ MeV} \leq E_n \leq 150\text{-}200 \text{ MeV}$ **Bases de données nucléaires évaluées**

Réactions de “prééquilibre”, de “noyau composé” (évaporation) \longrightarrow **réactions (n,xn')**

Interaction { neutron - noyau lourd } $150\text{-}200 \text{ MeV} \leq E_n \leq 10 \text{ GeV}$ **Modèles de cascade intranucléaire**

Réactions de “spallation” \longrightarrow **réactions (n,xn')**

7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Etude des bases de données nucléaires évaluées “Hautes Energies”

Les calculs MCNPX de la matrice de réponse du spectromètre s'appuient sur la base de données nucléaires ENDF/B-VI.8

➔ Plusieurs bibliothèques de données nucléaires évaluées (200 MeV max.) sont laissées au libre choix de l'utilisateur pour effectuer des simulations Monte Carlo au moyen du code de transport MCNPX

Etude et comparaison des bibliothèques de données nucléaires ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.0 et JEFF-3.1

ENDF/B ‘Evaluated Nuclear Data File’ (Etats-Unis) / **Code d'évaluation GNASH (150 MeV max.)**

JEFF ‘Joint Evaluated Fission and Fusion’ project (Europe de l'Ouest) / **Code d'évaluation TALYS (200 MeV max.)**

Ces bibliothèques ne contiennent pas directement les données nucléaires mesurées, mais sont déterminées par des codes de calcul de sections efficaces correctement ajustés à partir de résultats expérimentaux

En dessous de 20 MeV, bibliothèques complètes et issues en amont d'une grande quantité de données expérimentales

Au-delà de 20 MeV jusqu'à 200 MeV, quasi-inexistence de mesures expérimentales de référence

→ Prédications des modèles théoriques GNASH et THALYS par extrapolation de paramètres des données disponibles

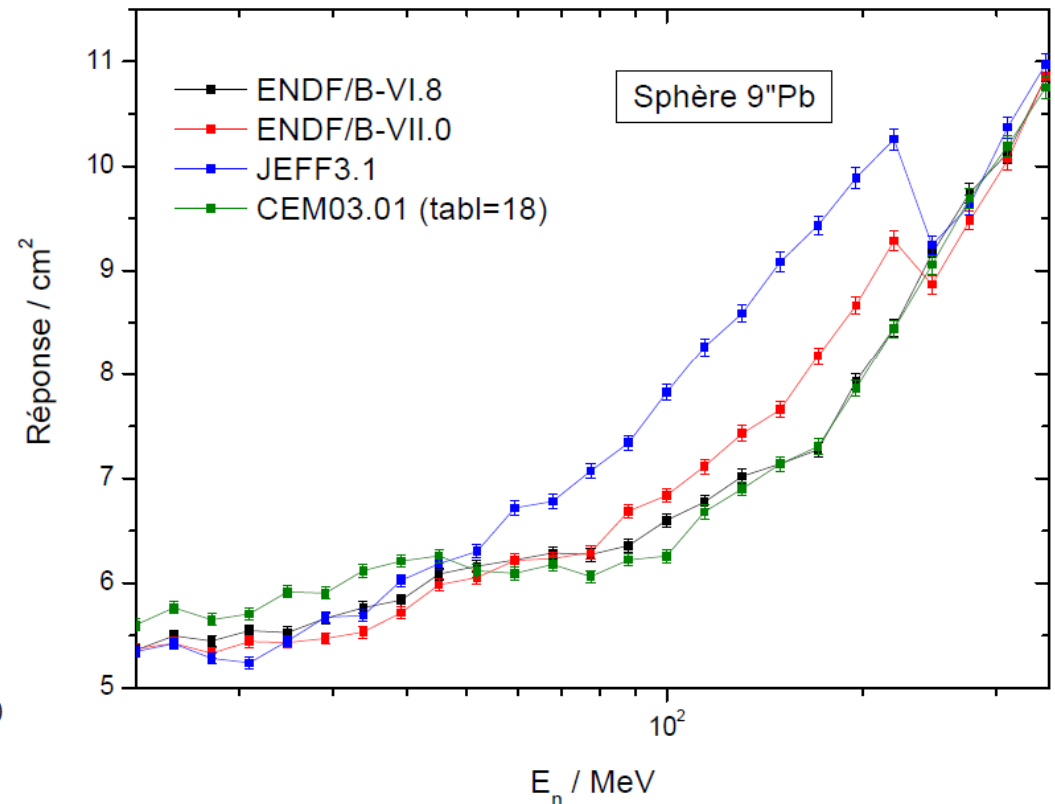
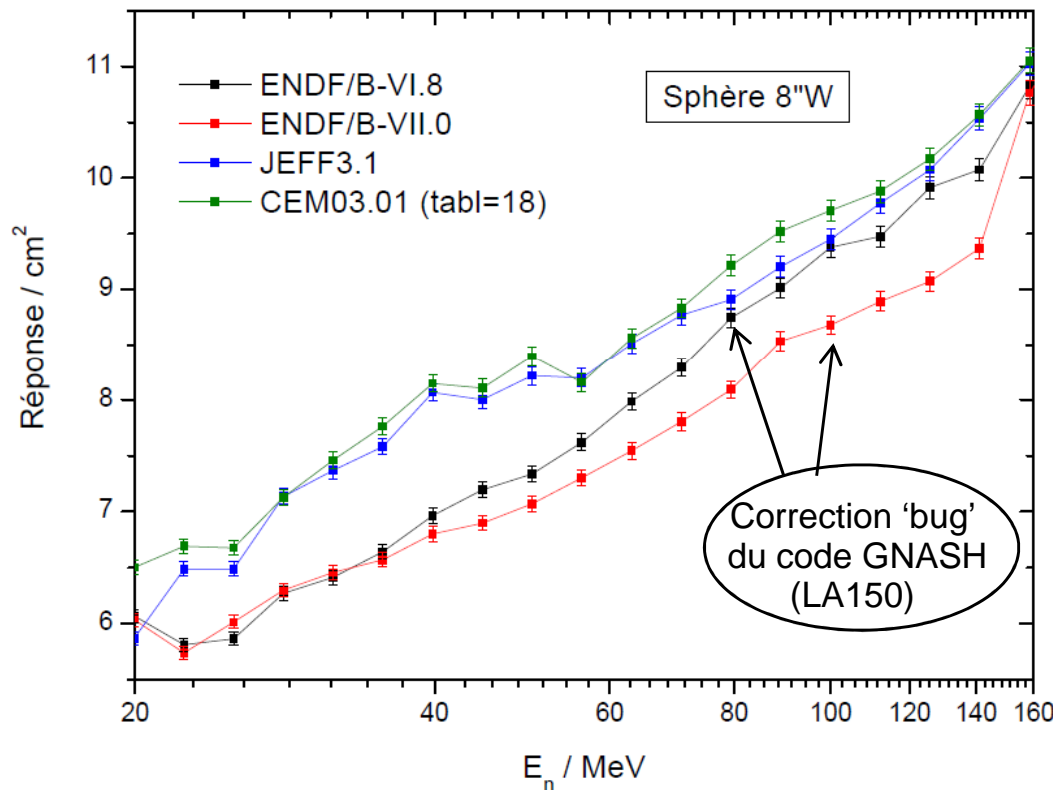
⇒ Matrices de covariance des données de sections efficaces non disponibles

7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Etude des bases de données nucléaires évaluées "Hautes Energies"

Résultats Sphères 8"W & 9"Pb / Comparaison des bases de données nucléaires avec le modèle CEM03.01

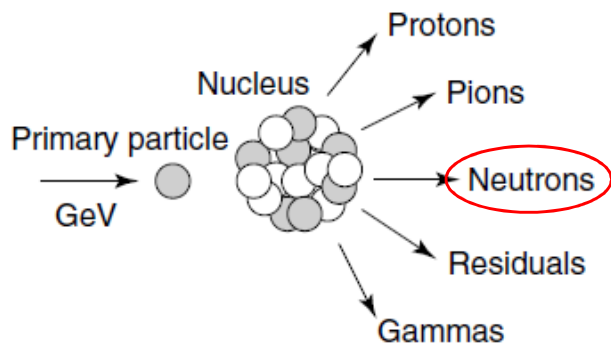
Sphère 9"Pb 30% d'écart max. relevé entre ENDF/B-VI.8 et JEFF-3.1



7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Etude des modèles de cascade intranucléaire

La réaction de spallation

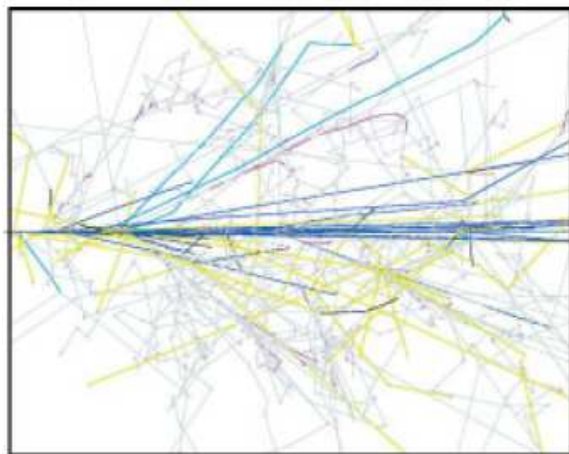


Réaction nucléaire non-élastique qui se produit lorsque des particules énergétiques (protons, neutrons ou pions) interagissent avec un noyau atomique "complexe" / "lourd" (Rayonnement Cosmique, accélérateurs de particules)

➡ Energies incidentes 100-150 MeV → plusieurs GeV

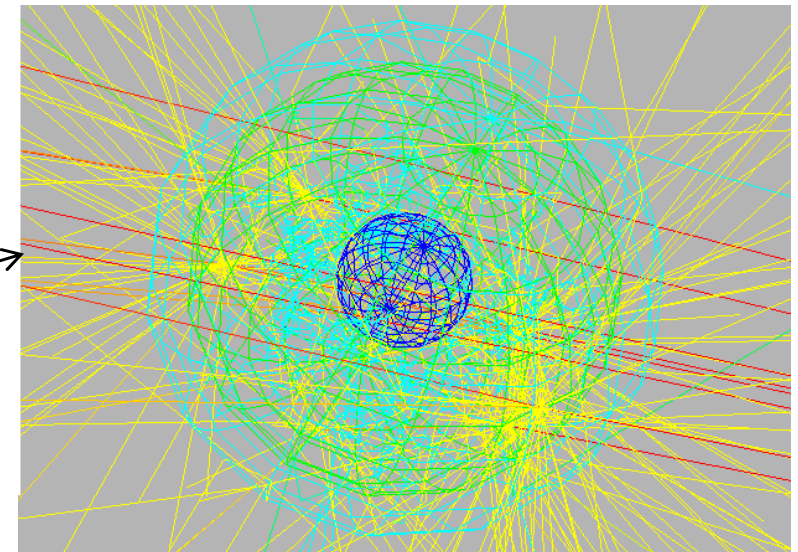
➡ La particule incidente "voie" séparément les nucléons du noyau cible

Cibles épaisses ⇒ réactions secondaires ⇒ "cascades nucléaires"



Protons
 $E = 1 \text{ GeV}$
sur cible épaisse Pb
Simu. GEANT4

Sphère 9" Pb
(Géométrie Simplifiée)
 $E_n = 1 \text{ GeV}$
Simu. MCNPX
Visualisation des neutrons secondaires



7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Cadre théorique de la réaction de spallation

Deux étapes principales [Serber, 1947] :

- ❖ Une phase rapide (10^{-23} s) de collision entre le noyau cible et le projectile
 - Suite de collisions individuelles
 - Le noyau est laissé dans un état excité
 - ⇒ **Cascade intranucléaire**

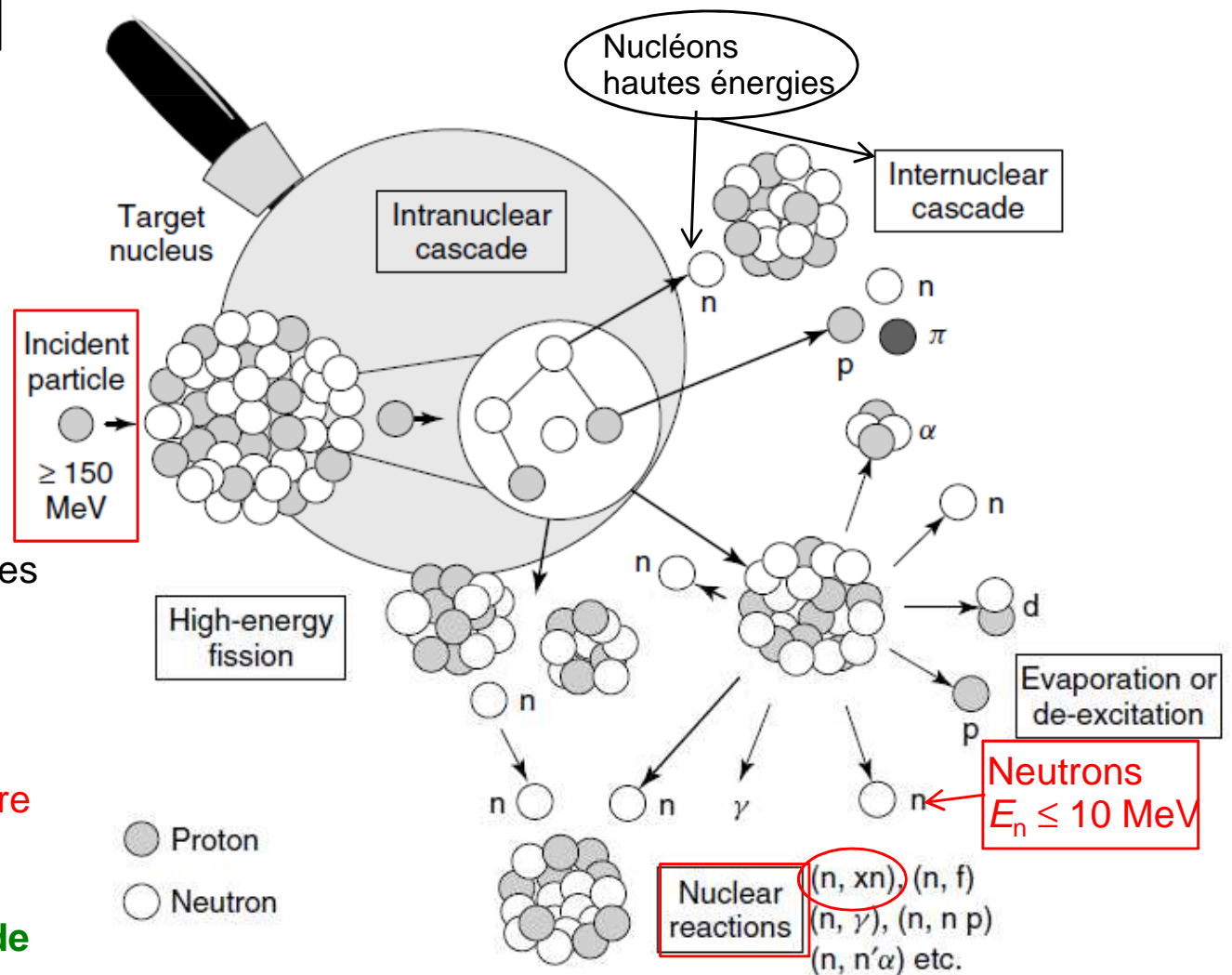
- ❖ Une 2^{de} phase plus lente (10^{-20} s)
 - Le préfragment formé évacue son excès d'énergie en émettant préférentiellement des neutrons (cas des noyaux lourds)
 - ⇒ **Evaporation**

- ❖ Introduction d'une transition étape intermédiaire d'une **émission de prééquilibre**



Développement de modèles de cascade intranucléaire

Etude des modèles de cascade intranucléaire



7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Etude des modèles de cascade intranucléaire 'INC' / MCNPX 2.6.0

Bertini	ISABEL	INCL4	CEM03.01	LAQGSM03.01
H.W. Bertini ORNL	Extension VEGAS	INC - Liège	Dubna INC MEM	Extension QGSM
Évaporation EVAP (Dresner)	Évaporation EVAP (Dresner)	Évaporation ABLA	Évaporation GEM2	Évaporation GEM2
Nucléon-noyau 3.5 GeV Pion-nucléon 2.5 GeV Bertini-Scaled /FLUKA (Nucléons) 10 GeV	Nucléon-noyau Noyau(A≤4)-noyau 1 GeV	Nucléon-noyau 2 GeV Pion-nucléon 2 GeV	Nucléon-noyau 5 GeV Pion-nucléon 2.5 GeV	Toutes particules élémentaires & noyaux 1 TeV

De manière générale, l'incertitude physique majeure associée au pouvoir prédictif des modèles INC :

→ Détermination des distributions angulaires et énergétiques des particules produites par collisions non élastiques

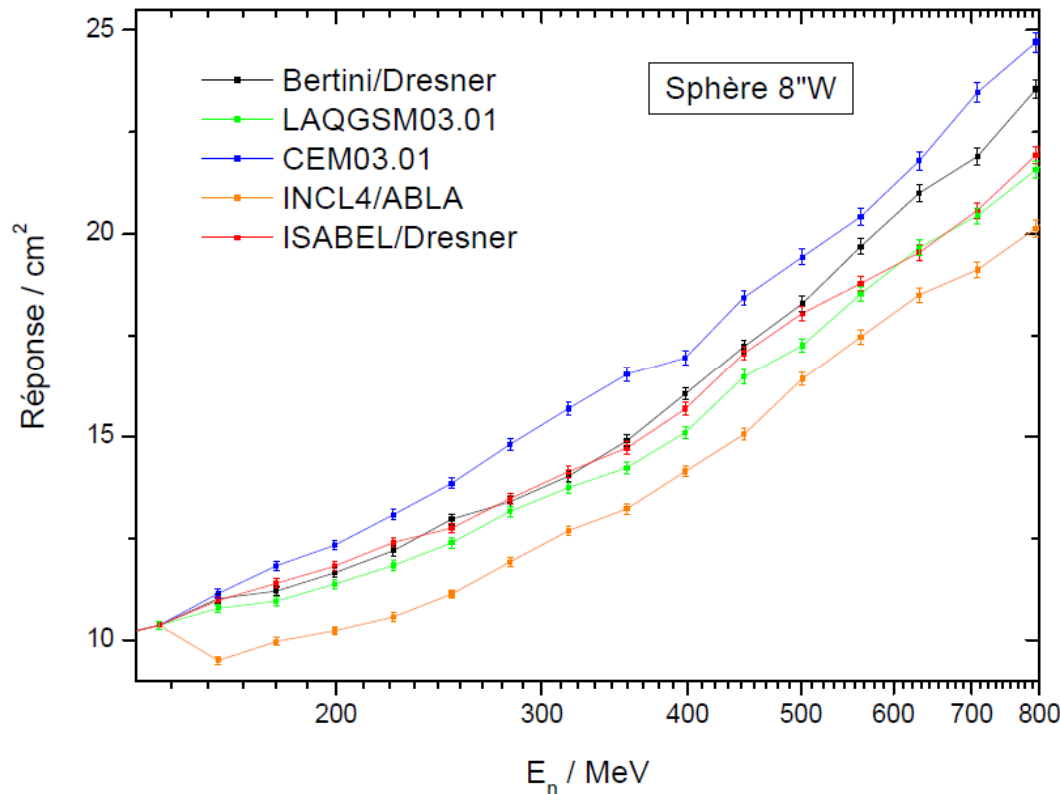
→ Détermination des multiplicités de particules  **Prédiction de la production de neutrons secondaires par spallation selon modèles INC / MCNPX: Précision ~ 10-15%**

7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Etude des modèles de cascade intranucléaire 'INC' / MCNPX 2.6.0

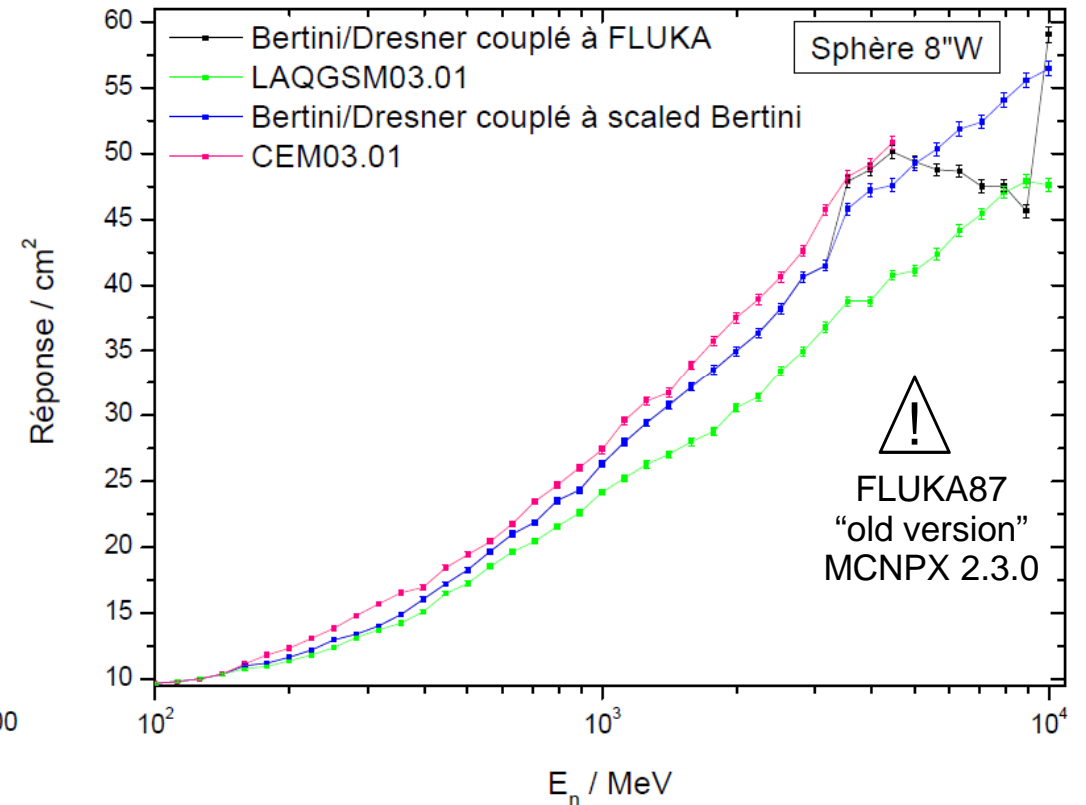
Sphère 8''W
 $150 \text{ MeV} \leq E_n \leq 800 \text{ MeV}$

Ecarts de réponse max. relevés entre CEM03.01 et INCL4 ~25%



Sphère 8''W
 $150 \text{ MeV} \leq E_n \leq 10 \text{ GeV}$

Ecarts de réponse max. relevés entre Bertini / Scaled Bertini et LAQGSM ~22%

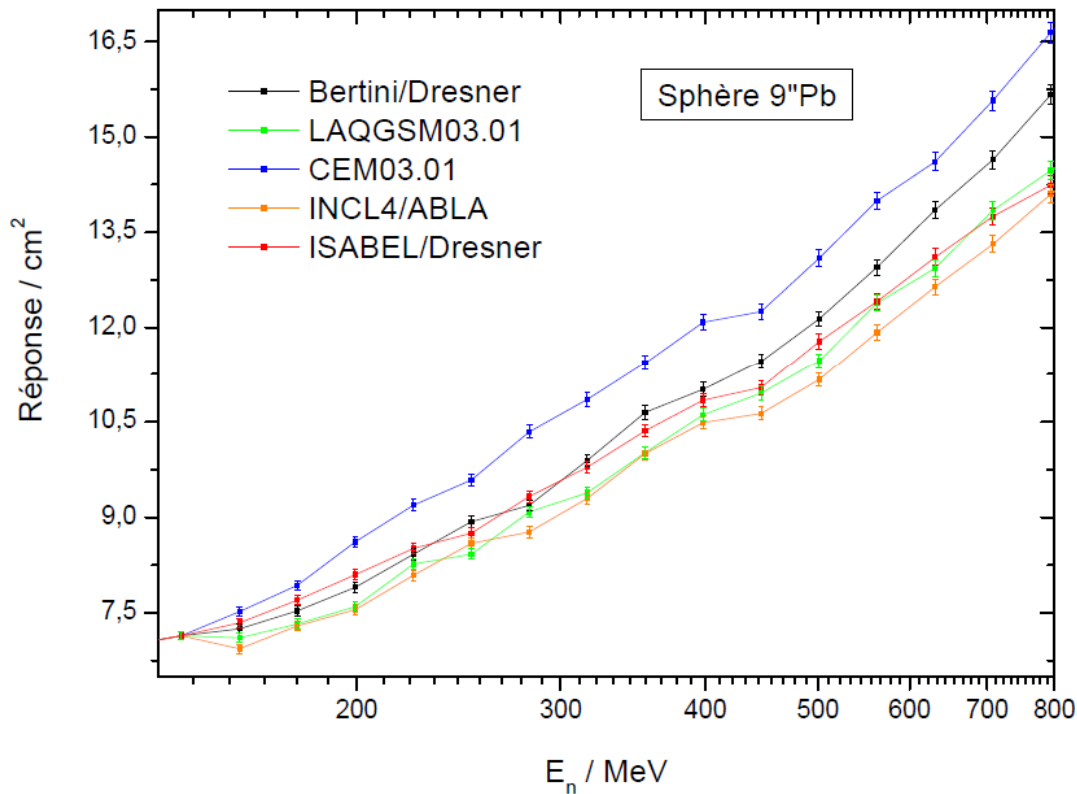


7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Etude des modèles de cascade intranucléaire 'INC' / MCNPX 2.6.0

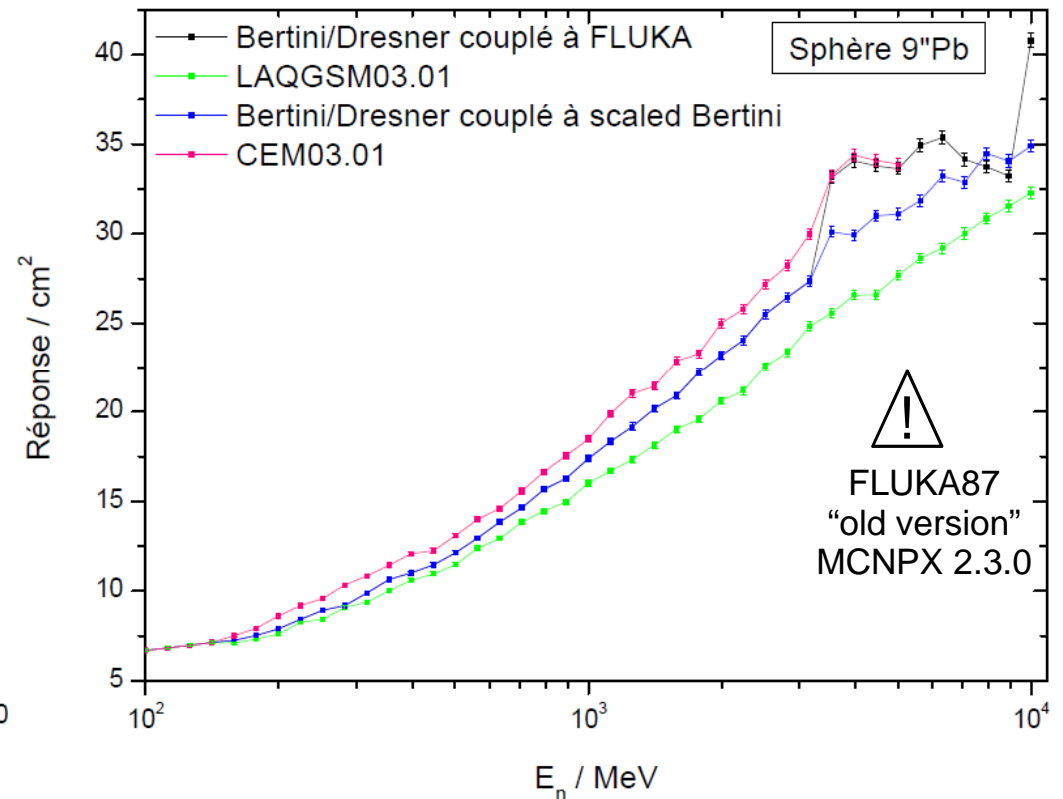
Sphère 9" Pb
 $150 \text{ MeV} \leq E_n \leq 800 \text{ MeV}$

Ecarts de réponse max. relevés entre CEM03.01 et INCL4 ~18%



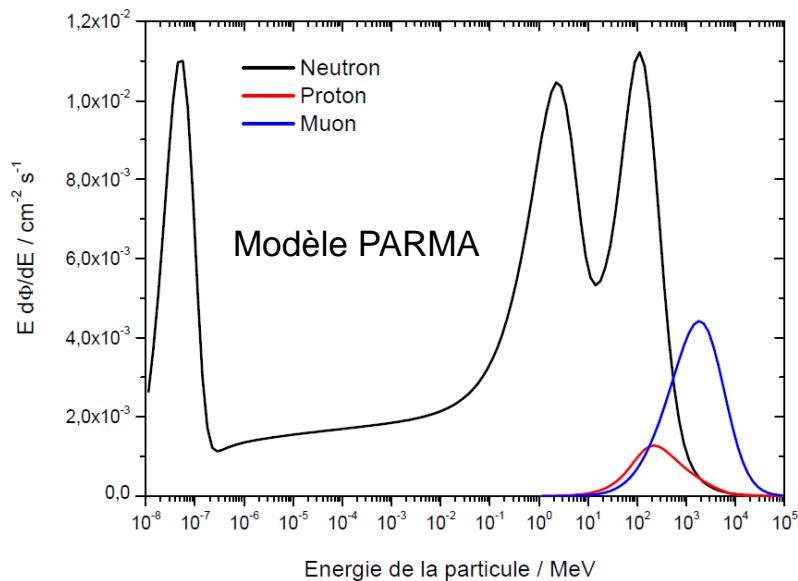
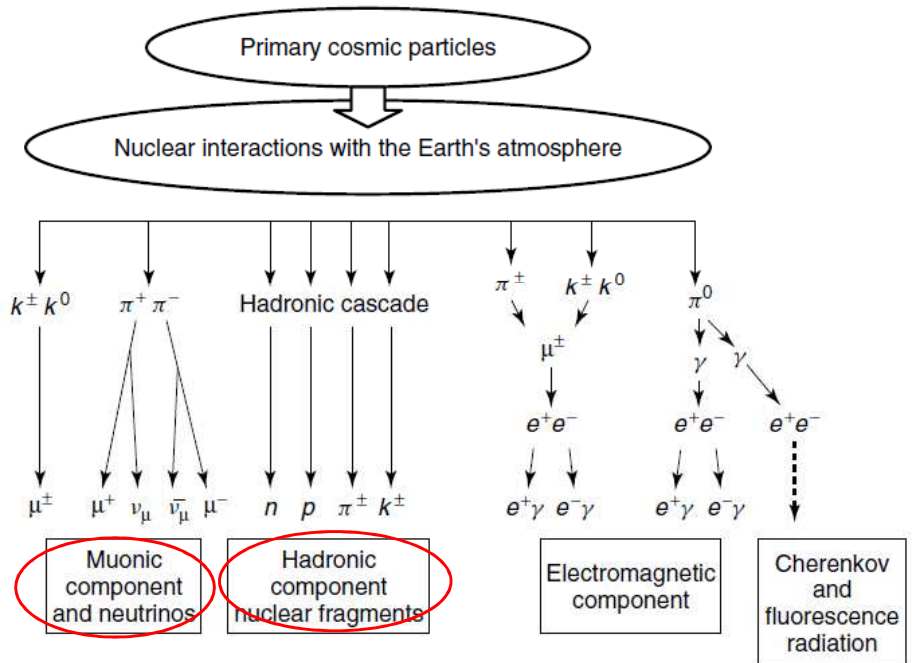
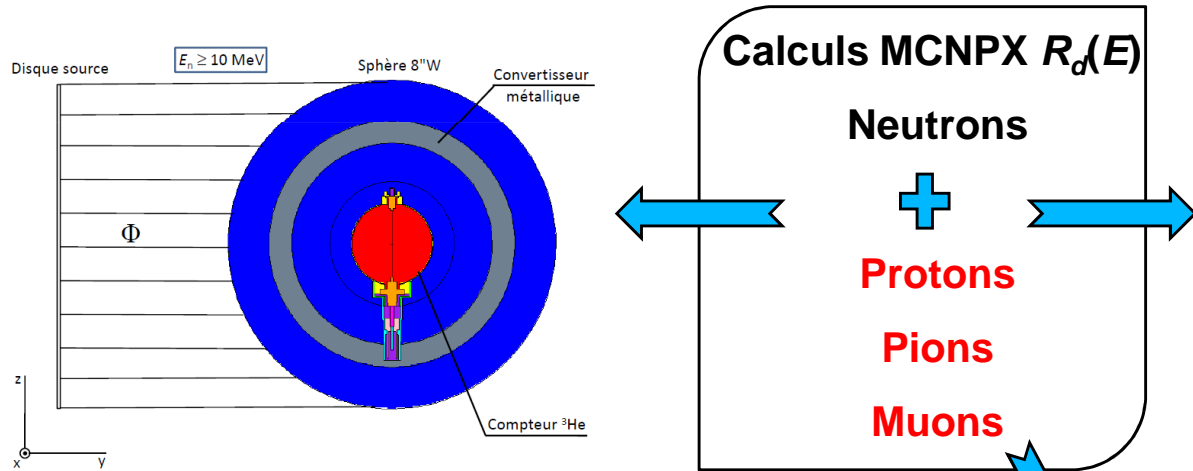
Sphère 9" Pb
 $150 \text{ MeV} \leq E_n \leq 10 \text{ GeV}$

Ecarts de réponse max. relevés entre Bertini / Scaled Bertini et LAQGSM ~18%



7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Sensibilité du spectromètre aux particules chargées atmosphériques



Mise en situation "réelle"
Site potentiel de mesure en altitude (Pic du Midi)

- ⇒ Estimations des taux de comptage associés aux neutrons, protons & muons à partir de spectres déterminés par le modèle PARMA
- ⇒ Possibles corrections du taux de comptage brut pour futures campagnes de mesure

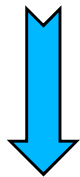
7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Sensibilité du spectromètre aux particules chargées atmosphériques

Détermination de la distribution en énergie du débit de fluence des neutrons
modèle analytique PARMA
(basé sur le code Monte Carlo PHITS) [Sato *et al.*, 2008]

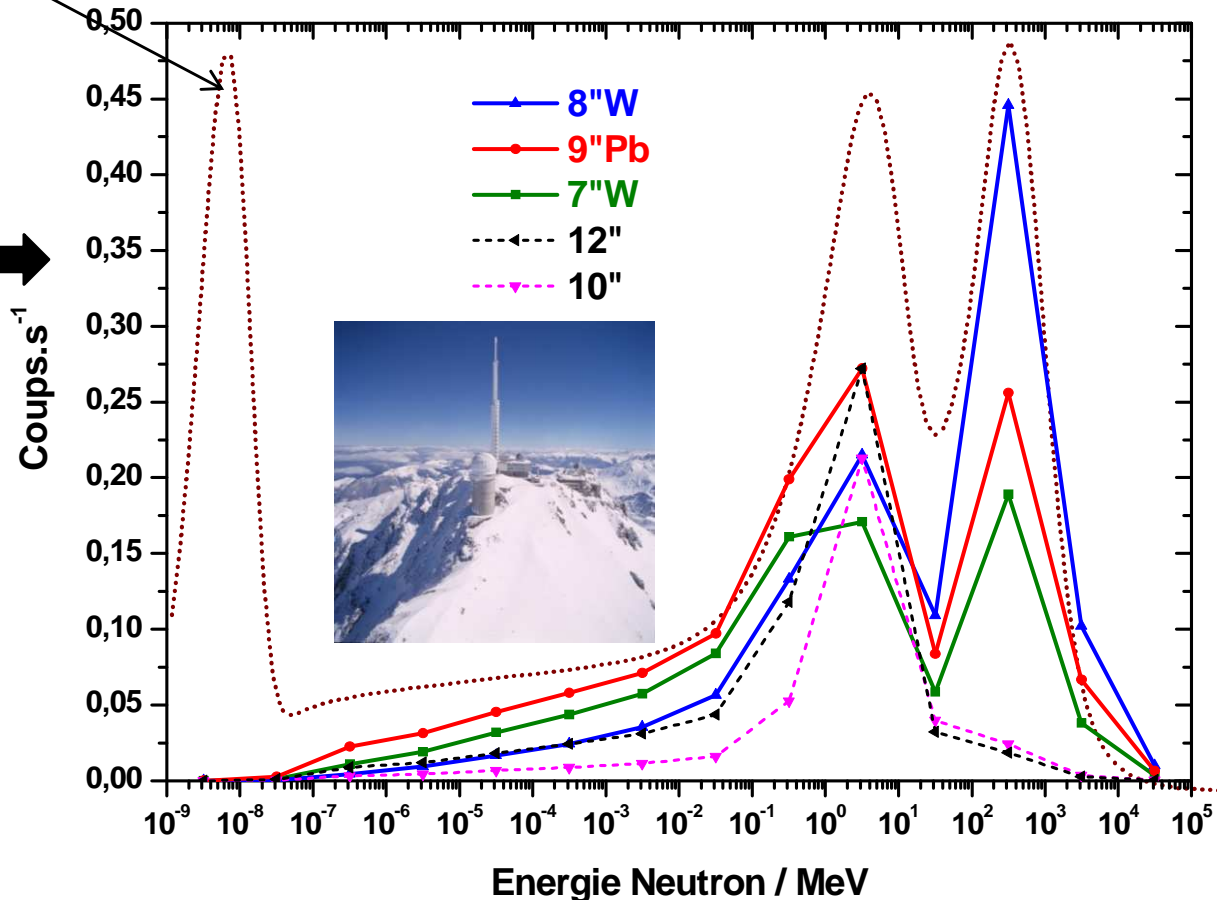
Taux de comptage neutrons
=
Convolution du Spectre neutron
avec la Réponse aux neutrons

Taux de comptage particules chargées atmosphériques ?



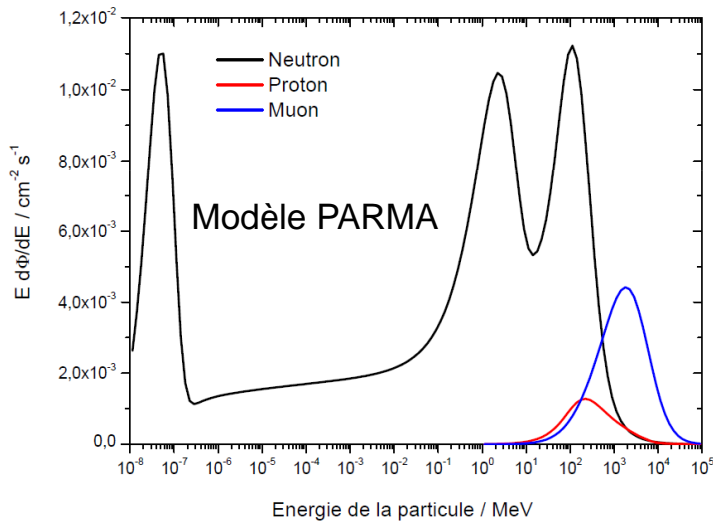
Calculs MCNPX des réponses à ces particules chargées de hautes énergies
+ Convolutions Spectres correspondants

Pic du Midi Altitude = 9462 ft
Latitude : 42°56' N, Longitude : 0°08' E
Coupure de rigidité = 5.59 GV
Conditions de mesure soumises à une activité solaire minimum



7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Sensibilité du spectromètre aux particules chargées atmosphériques

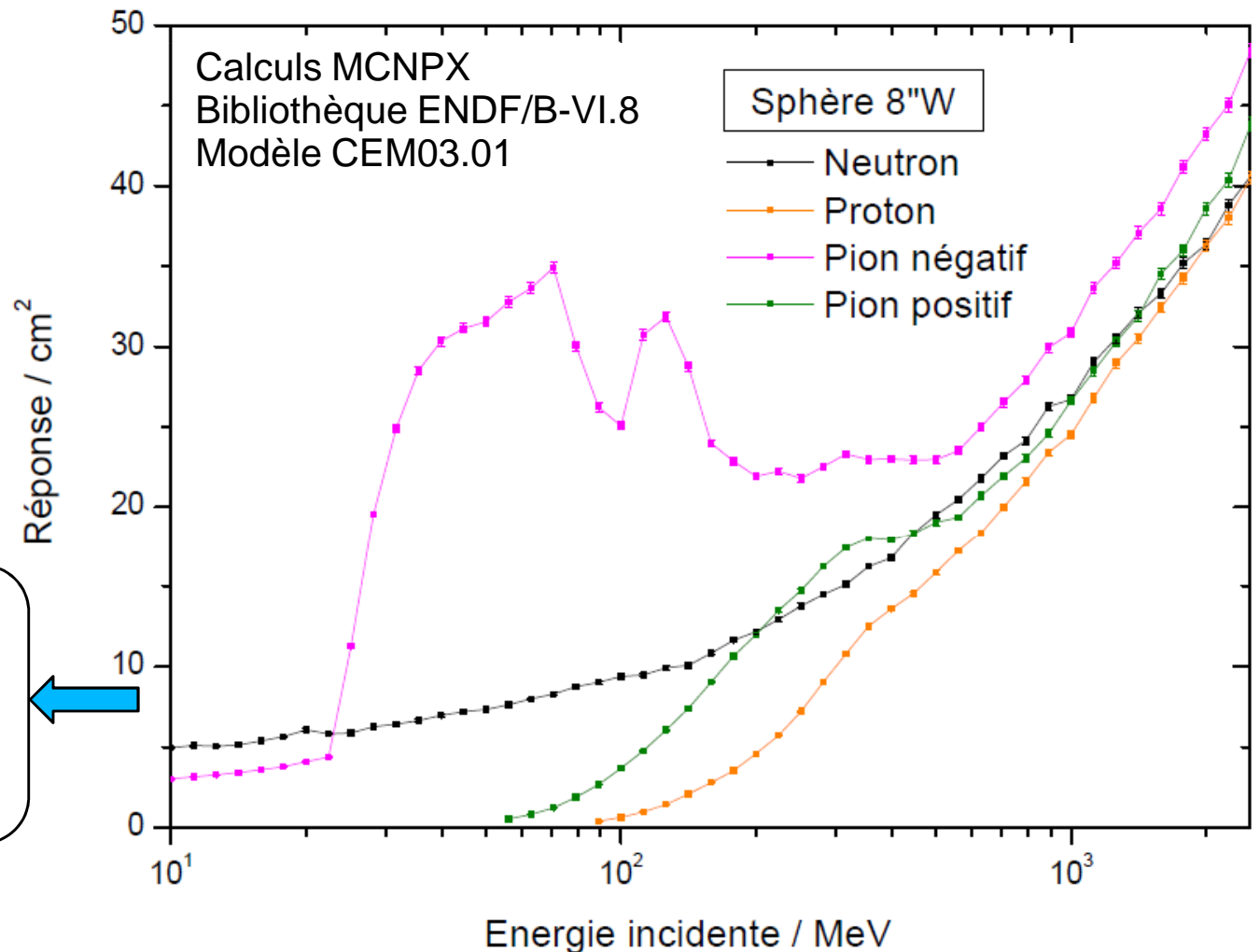


Spectres particules
Pic du Midi



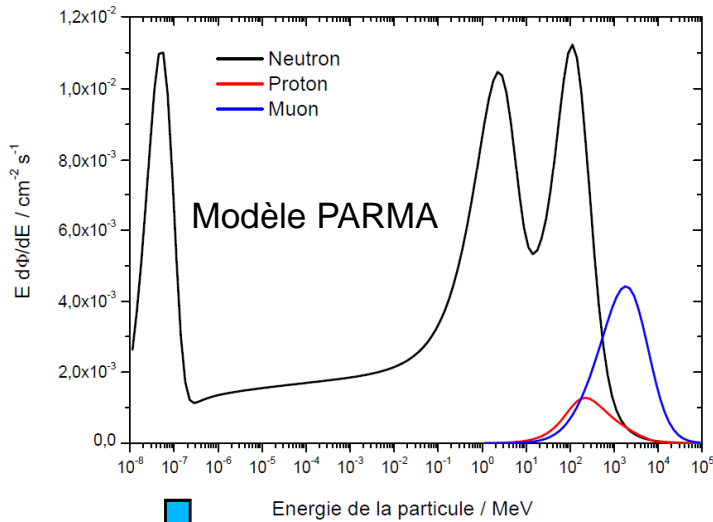
$$113 \text{ MeV} \leq E \leq 2.84 \text{ GeV}$$

$$\frac{\text{Taux de comptage proton}}{\text{Taux de comptage neutron}} \cong 20\%$$



7. Caractérisation par simulations Monte Carlo de la réponse du Spectromètre aux Hautes Energies

Sensibilité du spectromètre aux particules chargées atmosphériques



Energie de la particule / MeV

Spectres particules
Pic du Midi

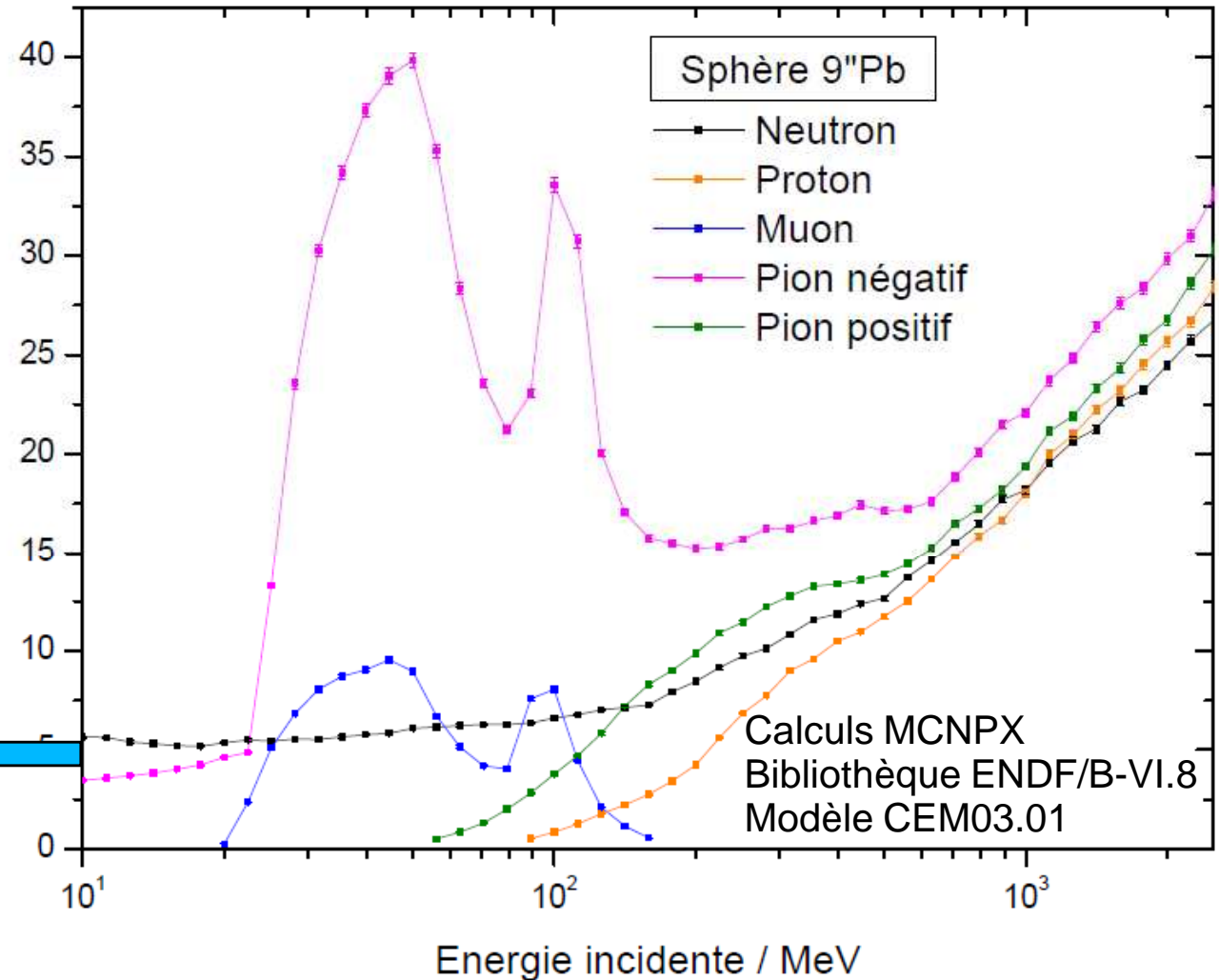
$$113 \text{ MeV} \leq E \leq 2.84 \text{ GeV}$$

$$\frac{\text{Taux de comptage proton}}{\text{Taux de comptage neutron}} \cong 22\%$$

$$22.5 \text{ MeV} \leq E \leq 142 \text{ MeV}$$

$$\frac{\text{Taux de comptage muon}}{\text{Taux de comptage neutron}} \cong 3.5\%$$

Réponse / cm²



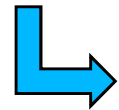
Calculs MCNPX
Bibliothèque ENDF/B-VI.8
Modèle CEM03.01

8. Conclusion & perspectives

8. Conclusion générale

❖ **Définition par modélisation, optimisation et réalisation d'un système de spectrométrie de neutron par sphères de Bonner de haute sensibilité et étendu au domaine des hautes énergies**

Développement abouti d'un spectromètre de neutron destiné à la mise en œuvre de campagnes de mesure en environnement radiatif naturel atmosphérique



Acquisition des données du spectre des neutrons atmosphériques sur site potentiel de mesure Pic du Midi (9462 ft, 5.59 GV)

Temps de mesure estimé ~10 heures \Leftrightarrow acquisition parallèle des 13 sphères avec une statistique minimum requise de 10 000 coups neutron /sphère

❖ **Caractérisation précise et détaillée du spectromètre par simulations numériques MCNPX**

- ✓ Etablissement de la matrice de réponse complète du spectromètre
- ✓ Validité des calculs MCNPX de réponse / Vérification semi-empirique
- ✓ Isotropie de la réponse du spectromètre
- ✓ Influence des paramètres densité $(C_2H_4)_n$ et 3He sur la détermination de la réponse du spectromètre

❖ **Tests de mesure auprès d'une source $^{241}Am-Be$ de référence**

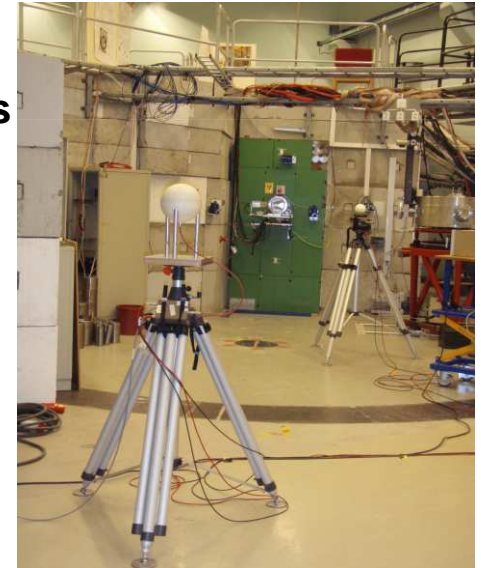
\Rightarrow Résultats de validation expérimentale préliminaire des fonctions de réponse calculées ($E_n \leq 10$ MeV)

❖ **Caractérisation de la réponse du spectromètre dans le domaine des Hautes Énergies**

\Rightarrow Etude approfondie et maîtrise du contenu de la physique du noyau et des réactions nucléaires intégrée dans le code de transport MCNPX au-delà de 10 MeV jusqu'au GeV

8. Perspectives

- **Inter-comparaison des résultats de calculs de réponse MCNPX avec d'autres codes de transport Monte Carlo** tels que FLUKA, GEANT4...
- **Poursuite de la validation expérimentale de la matrice de réponse auprès de sources polyénergétiques** ($^{241}\text{Am-Be}$, ^{252}Cf) selon recommandations ISO
- **Validation expérimentale auprès de faisceaux monénergétiques** ($E_n \leq 20 \text{ MeV}$) caractérisés de référence (tel que ceux du LMDN, IRSN)
- **Exploitation des données de mesures effectuées auprès des faisceaux Hautes Energies** (50 et 150 MeV) du TSL (The Svedberg Laboratory, Suède)
- **Poursuite de la validation expérimentale de la matrice de réponse auprès d'installations fournissant des champs neutroniques Hautes Energies de référence** (tels que ceux du CERF, CERN)
- **Etape ultime : Mesure de l'environnement neutronique atmosphérique sur site en altitude**



Conférence & publication



❖ Travaux de thèse présentés au « 8th European Workshop on RADiation Effects on Components and Systems », Sept. 2008, Jyväskylä, Finland

❖ S. Serre, K. Castellani-Coulié, D. Paul, and V. Lacoste

“Optimization Using Monte Carlo Calculations of a Bonner Sphere Spectrometer Extended to High Energies for the Neutron Environments Characterization”

IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol. 56, No. 6, 3582- 3590,

December 2009