

1^{er} juillet 2025

journées des L.A.R.D, Saclay

Conception d'un champ neutronique majoritairement épithermique et sa caractérisation : mesures par activation neutronique de feuilles de ^{197}Au et développement d'une méthode originale utilisant le nouveau détecteur NFM

Enya MOBIO

Direction de thèse :

Daniel SANTOS, directeur de recherche (CNRS-UGA)
Amokrane ALLAOUA, Responsable de laboratoire (ASNR)

Sommaire

01

Contexte

- I. Définition des champs de neutrons épithermiques
- II. Utilité des champs épithermiques

02

Conception d'un champ neutronique épithermique

- I. Etude d'un modérateur pour l'accélérateur T400
- II. Etude et conception d'un modérateur pour l'accélérateur AMANDE

03

Résultats

- I. Caractérisation des neutrons épithermiques
- II. Résultats et discussions

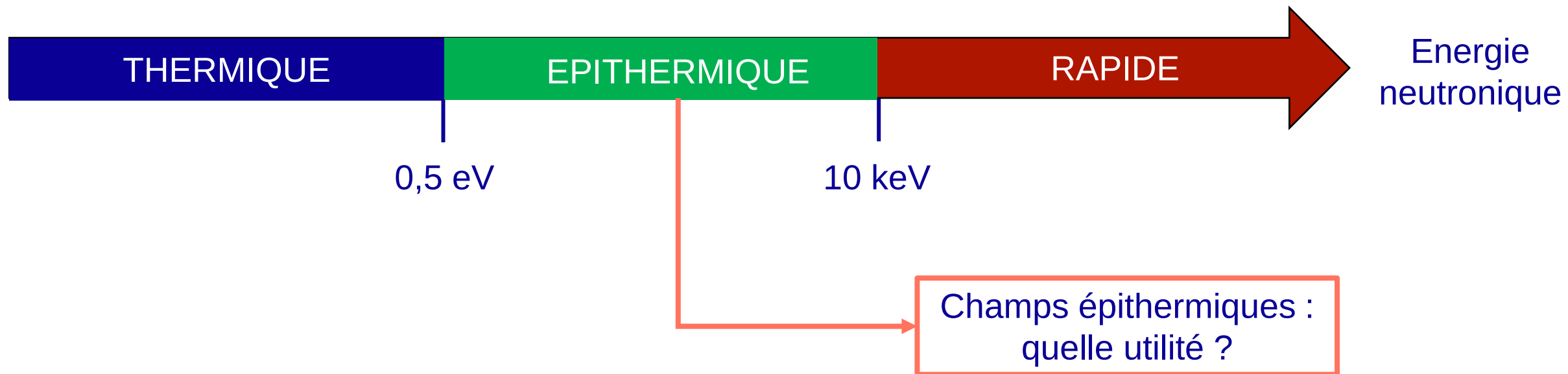
04

Conclusions et perspectives

- I. Conclusions
- II. Perspectives

I – DÉFINITION DES CHAMPS DE NEUTRONS ÉPITHERMIQUES

Distribution de neutron d'énergie épithermique



Domaine d'utilisation des champs de neutrons épithermiques :

➤ **AB-BNCT** (Accelerator Based – Boron Neutron Capture Therapy)

➤ **Industrie**

- **Etalonnage** d'instruments dans des champs **épithermiques de référence**

➤ **Dosimétrie**

- Dosimétrie = mesure de la dose (Energie déposée **en ionisation** /kg)
- **Diversité des plages d'énergie** pour l'étalonnage d'appareils de radioprotection

Intérêt du LMDN

Sommaire

01

Contexte

- I. Définition des champs de neutrons épithermiques
- II. Utilité des champs épithermiques

02

Conception d'un champ neutronique épithermique

- I. Etude d'un modérateur pour l'accélérateur T400
- II. Etude et conception d'un modérateur pour l'accélérateur AMANDE

03

Campagnes de mesures

- I. Caractérisation des neutrons épithermiques
- II. Discussions

04

Conclusions et perspectives

- I. Conclusions
- II. Perspectives

I – ETUDE D'UN MODÉRATEUR POUR L'ACCÉLÉRATEUR T400

Caractéristiques de l'accélérateur T400 :

- Accélérateur de **deutons** à une énergie de 150 à 400 keV
- Cible de **titane deutérié** (TiD) (2 mg.cm^{-2})
- Réaction ${}^2\text{H}({}^2\text{H},n){}^3\text{He}$
- Energie neutrons = **3 MeV**
- Intensité maximale de l'accélérateur = **3 mA**
- Production neutronique sur 4π stéradians = **$2,14.10^9 \text{ n.s}^{-1}$**

➡ **Avantage :**

Production de neutrons T400 > Accélérateur AMANDE

➡ **Contrainte :**

Neutrons **rapides** à modérer



Accélérateur T400



Ligne de l'accélérateur T400

Critères pour le modérateur de l'accélérateur T400 :

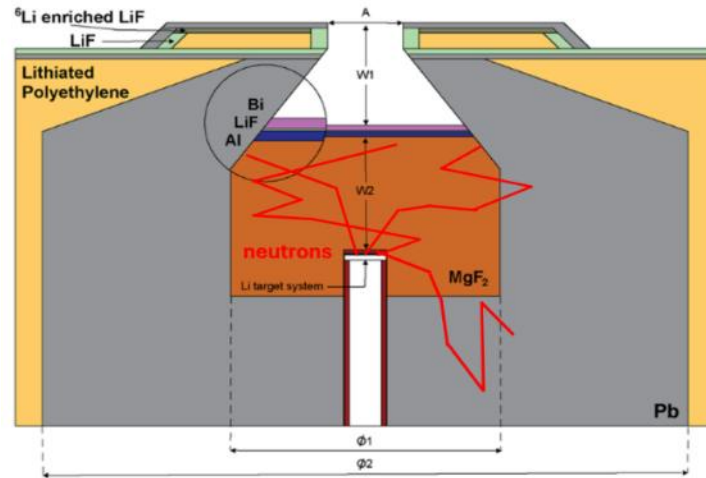
- **Energie** : majoritairement entre 0,5 eV et 10 keV (flux épithermique >90%)
- **Mécanique** : masse inférieure à 3,5 T
- **Budget** : < 80 000 €
- **Dose** : 1 mSv en moins de 8h



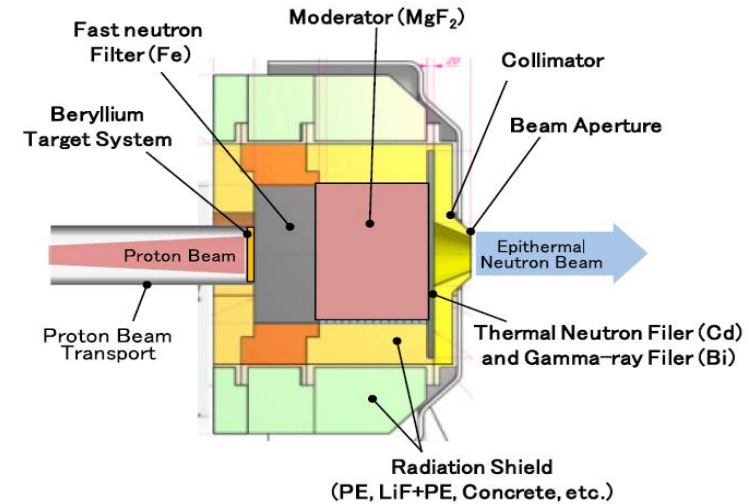
I – ETUDE D'UN MODÉRATEUR POUR L'ACCÉLÉRATEUR T400

a) Etude des modérateurs

- Recensement des **modérateurs** et **matériaux** pour l'AB – BNCT



Ref : M.S. Gordon et al.



Ref : H. Kumada et al. (Université de Tsukuba)

- Recensement des **modérateurs** et **matériaux** pour l'AB – BNCT

- Réaction typique de l'AB-BNCT : ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$

$$E_p(2,5 \text{ MeV}) \rightarrow E_{n_moy} = 0,55 \text{ MeV}$$

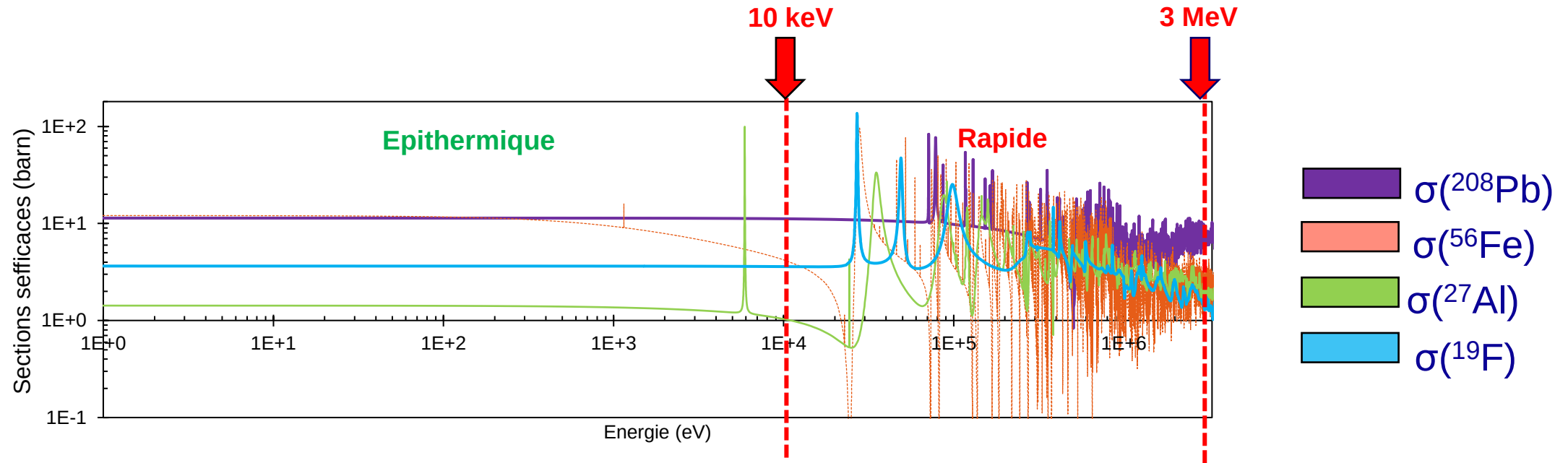
- Réaction(T400) $\rightarrow E_{n_moy} = 3 \text{ MeV}$



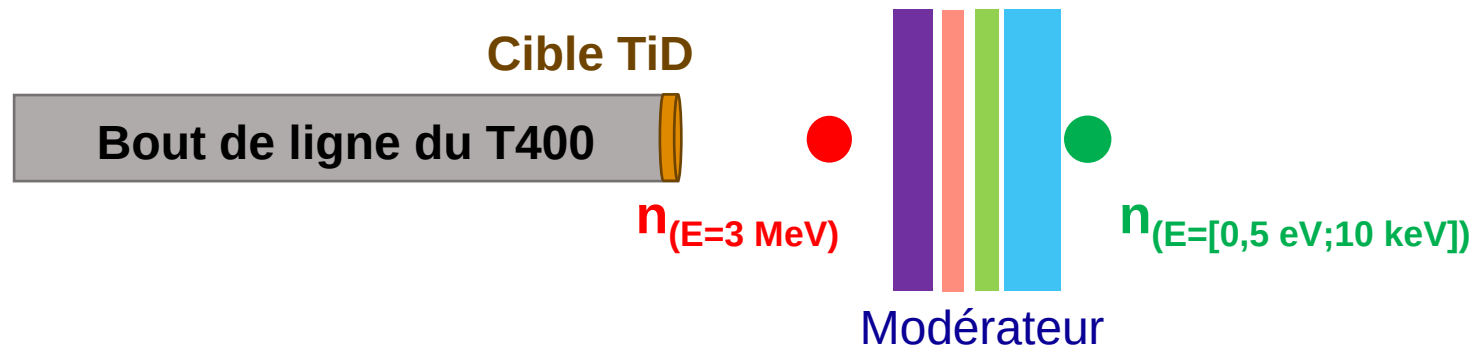
Étude des matériaux et de leurs propriétés modératrices

b) Modélisations avec le code de calcul Monte-Carlo MCNP

- Simulations **MCNP** avec différents matériaux selon leurs **sections efficaces** entre 1 meV et 3 MeV :

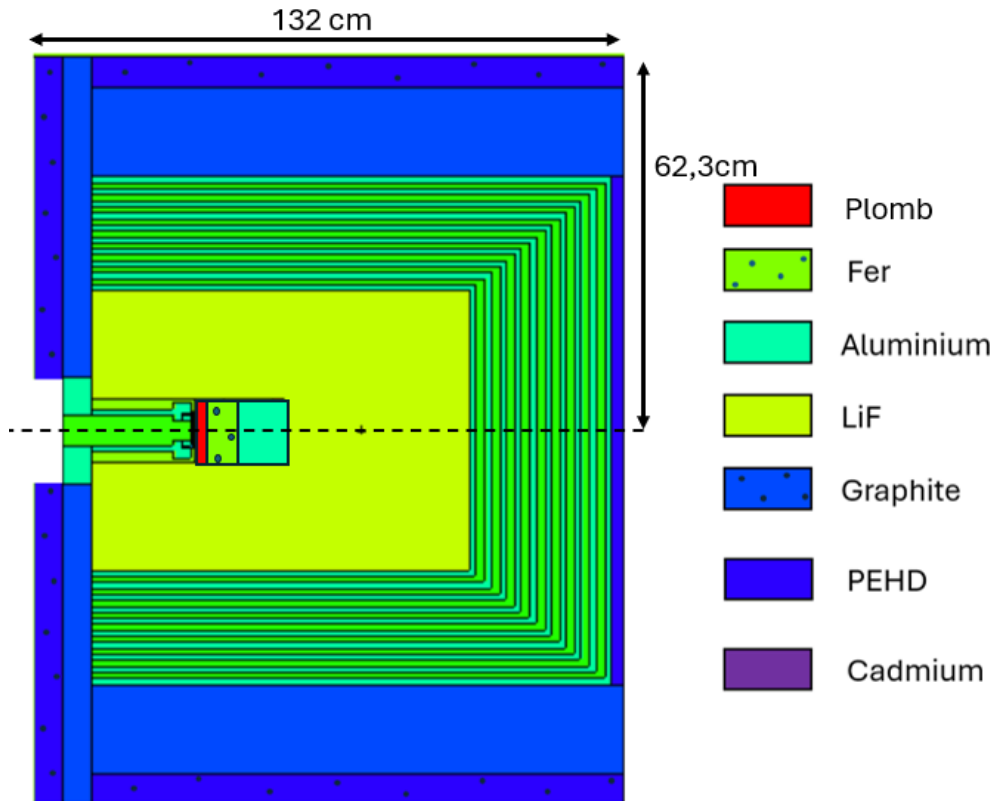


Sections efficaces de diffusion élastique du ^{208}Pb , ^{27}Al , ^{19}F et ^{56}Fe en fonction de l'énergie du neutron



- Matériaux
- Epaisseurs
- Ordre/disposition

➤ Configuration MCNP finale :



- Un bouchon de **plomb**
- 2 couches de fer et **d'aluminium**
- Alternance de couches **d'aluminium** et de **fluorure de lithium**
- **Graphite** et **PEHD** pour la réflexion + la modération des neutrons thermiques
- **Cadmium** pour s'affranchir des neutrons thermiques

Modélisation finale du modérateur obtenu pour le T400

Energie	Distribution en flux	Débit équivalent de dose
Thermique	3,54%	3,87 %
Epithermique	93,16%	77,33 %
Rapide	3,30%	18,80 %

➤ Dépôt de 1 mSv en moins de 7h

☒ Energie

☒ Dose

☒ Mécanique

➡ Etude industrielle = Budget matière > 80 000 € (+ coût mise en œuvre)

☐ Budget

Projet ajourné
dans le cadre de la
thèse

➡ Nécessité d'un champ épithermique pour la 2nd partie de la thèse : caractérisation

II – ETUDE D'UN MODÉRATEUR POUR L'ACCÉLÉRATEUR AMANDE

Caractéristiques de l'installation AMANDE :

- Accélérateur Tandetron de 2 MV
- Faisceaux de **protons** ou de **deutons**
- Production de neutrons **mono-énergétiques** de quelques **keV** à **20 MeV**
- Différentes réactions possibles



Installation AMANDE

Choix de la réaction ?

Choix de la réaction ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$:

- Réaction privilégiée pour l'**AB-BNCT**
- **Réaction à seuil** ($E_{p_seuil} = 1880 \text{ keV}$)
- Energie moyenne des protons proche du domaine épithermique
- Nécessité d'un modérateur peu volumineux

Energie protons (keV)	Energie moyenne des neutrons (keV)
1881	30,9
1882	32,6
1883	34,9
1884	37,9
1885	41,0
1886	43,3

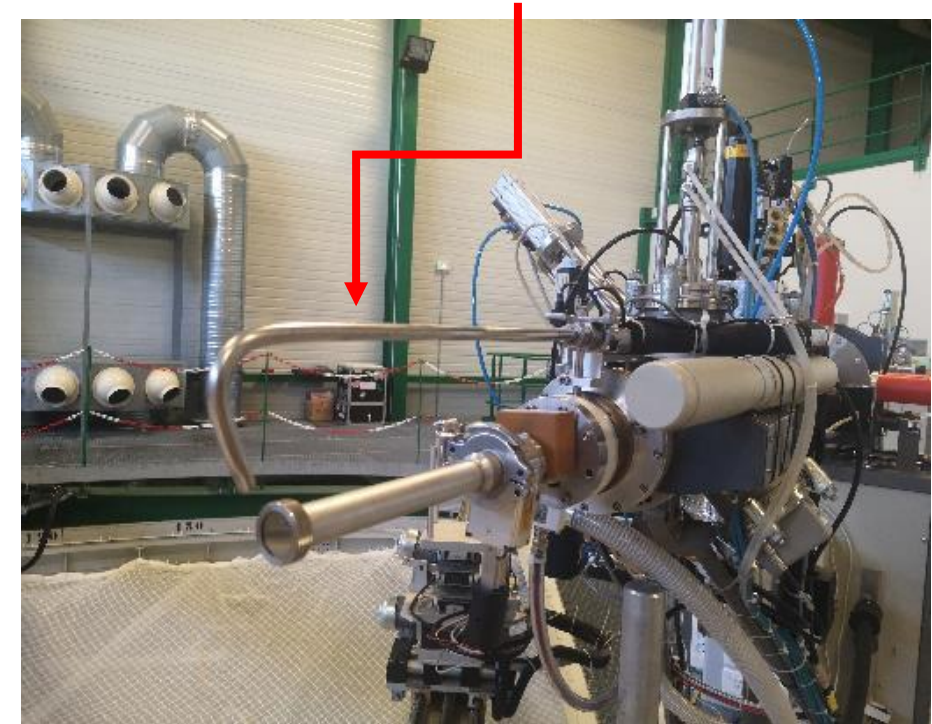
Energie des neutrons (TARGET+ MCNP) à 0° pour E_p de 1881 keV à 1886 keV

II – ETUDE D'UN MODÉRATEUR POUR L'ACCÉLÉRATEUR AMANDE

Critères pour le modérateur de l'accélérateur AMANDE :

- ~~Dose~~
- Energie : champ avec une composante **épithermique**
- Mécanique : masse sur le bras articulé de l'accélérateur (**<60 kg**) + tube de refroidissement
- Budget (<10 000 €)
- Délais : permettre la **conception, fabrication, réception** et **caractérisation** durant la thèse

Conception du modérateur

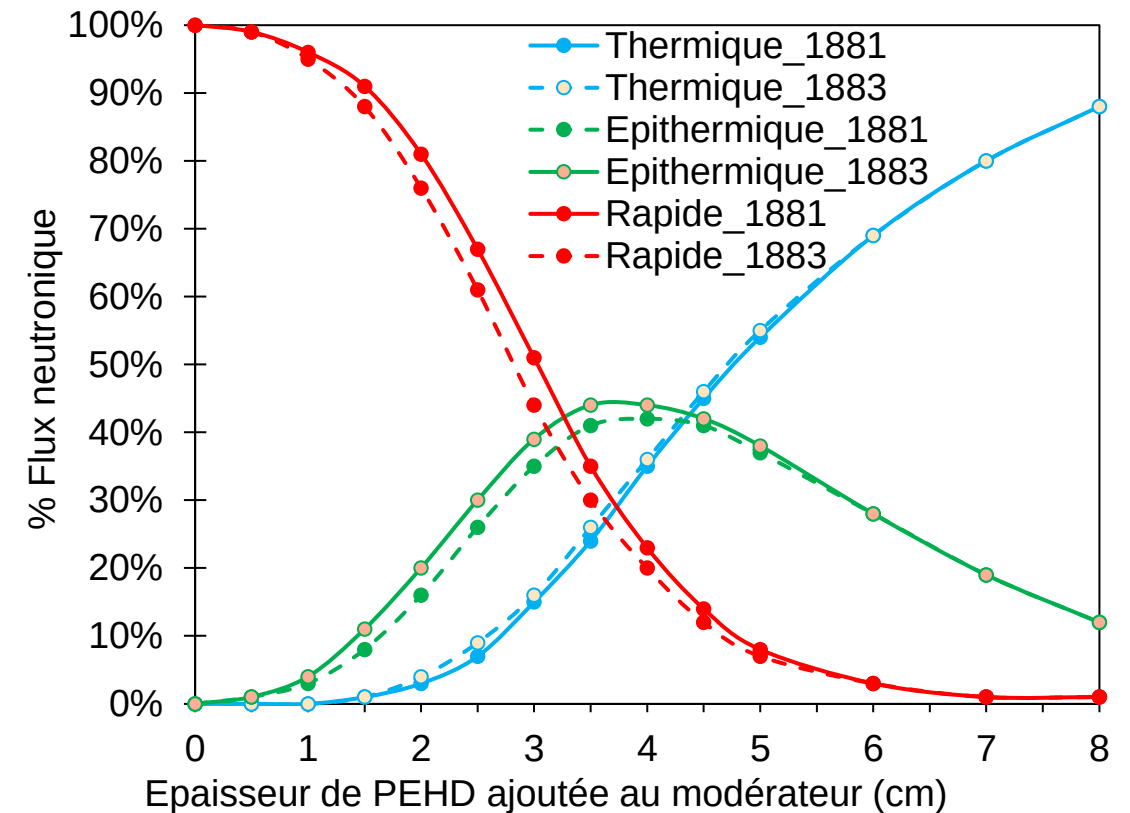
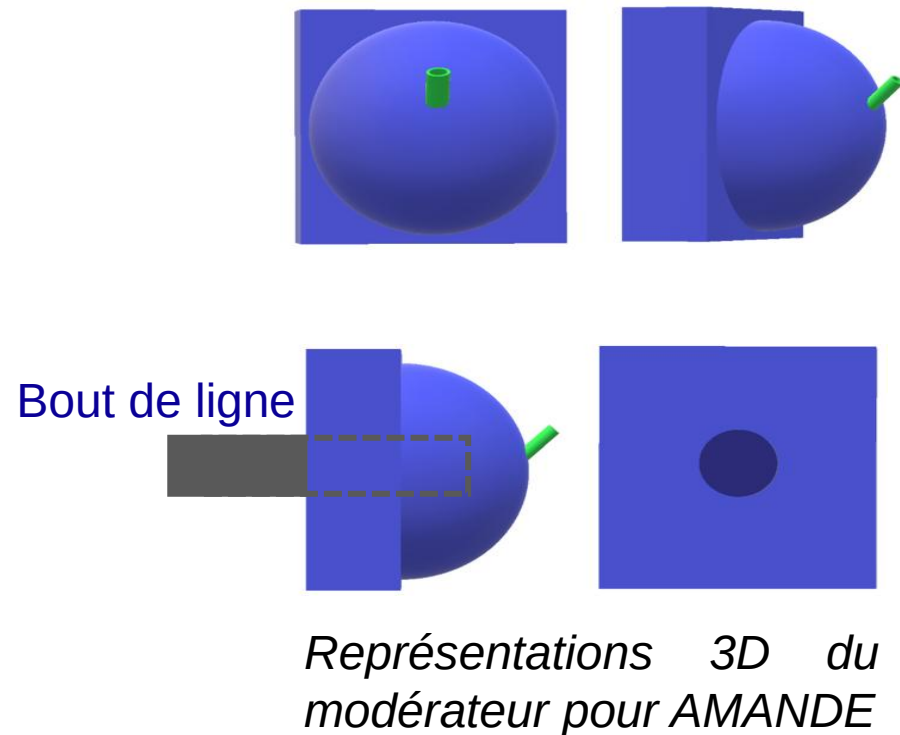


Bout de ligne de l'accélérateur AMANDE

II – ETUDE D'UN MODÉRATEUR POUR L'ACCÉLÉRATEUR AMANDE

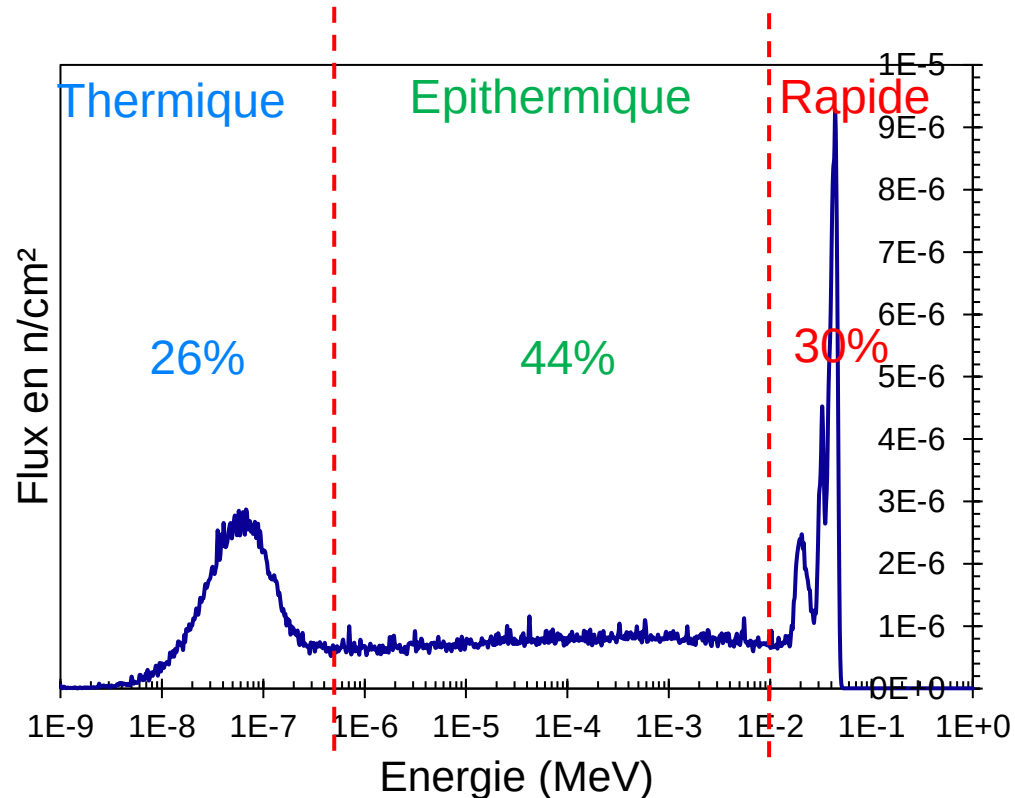


Détermination par modélisation de la **configuration optimale** de PEHD du modérateur :



II – ETUDE D'UN MODÉRATEUR POUR L'ACCÉLÉRATEUR AMANDE

Spectre du **flux neutronique** en sortie d'un modérateur de **3,5 cm** d'épaisseur ($E_p = 1883$ keV) :



Modérateur final :



- Poids < **10 kg**
- Matériaux **PEHD** + tube d'**inox** (refroidissement)
- Réception **décembre 2023**
- Campagne de mesure **janvier 2024**

Sommaire

01

Contexte

- I. Définition des champs de neutrons épithermiques
- II. Utilité des champs épithermiques

02

Conception d'un champ neutronique épithermique

- I. Etude d'un modérateur pour l'accélérateur T400
- II. Etude et conception d'un modérateur pour l'accélérateur AMANDE

03

Résultats

- I. Caractérisation des neutrons épithermiques
 - A) Par activation neutronique
 - B) Avec le NFM
- II. Résultats et discussions

04

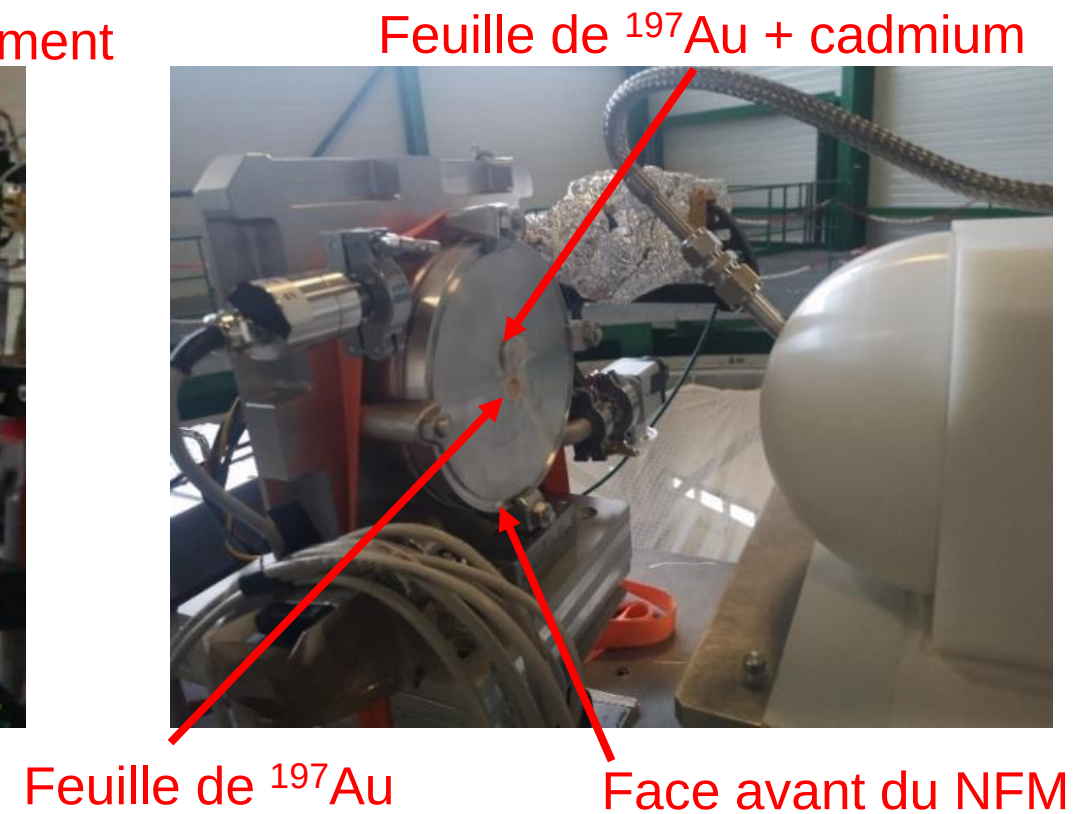
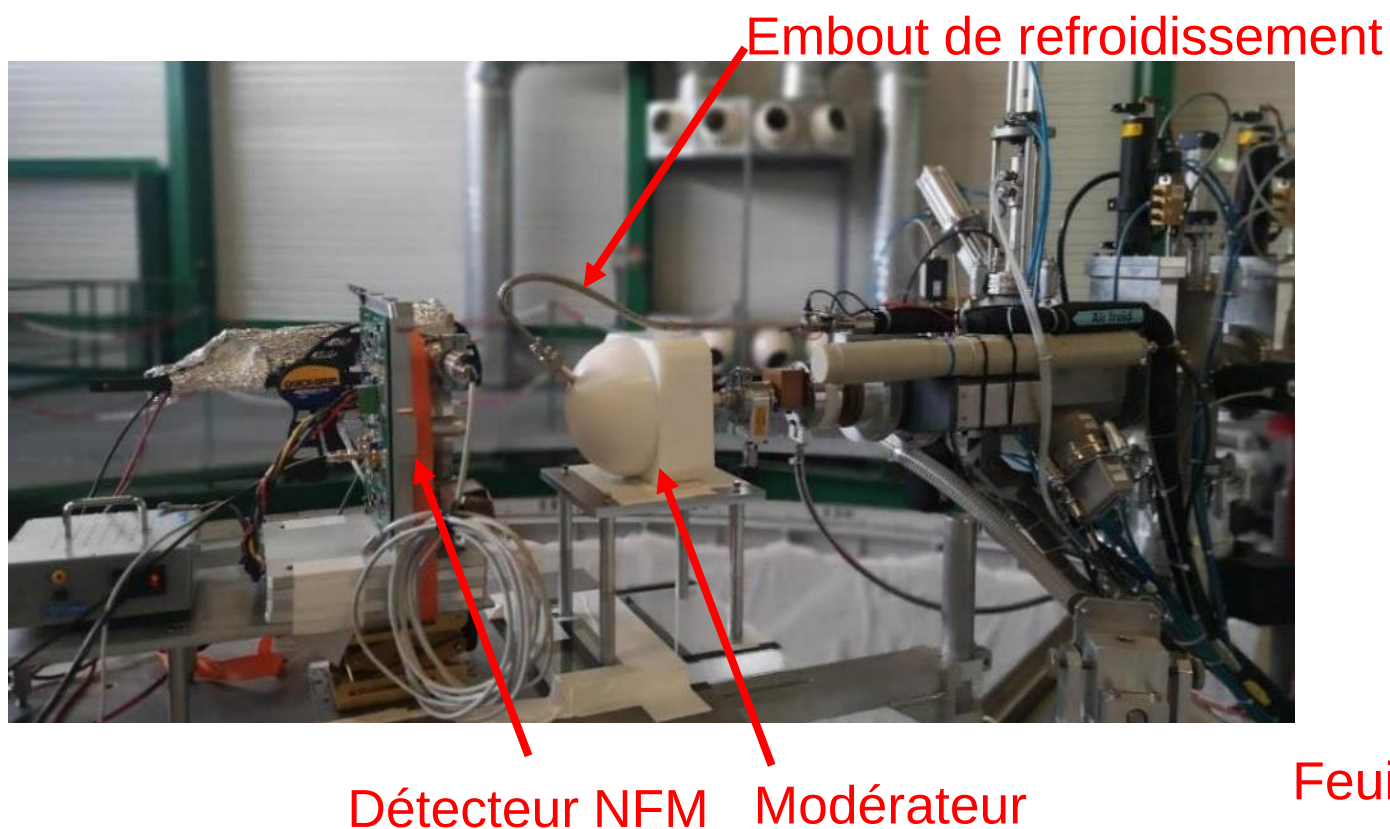
Conclusions et perspectives

- I. Conclusions
- II. Perspectives

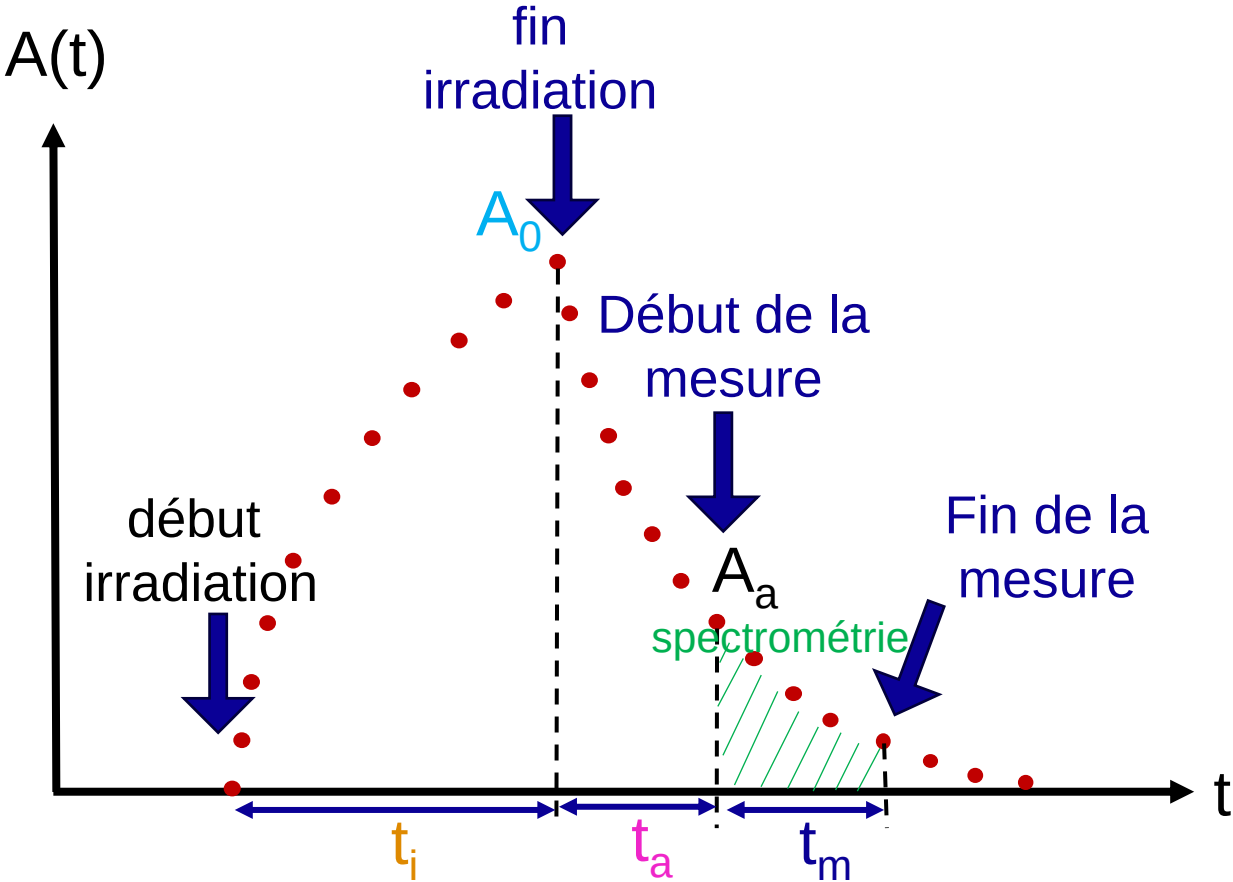
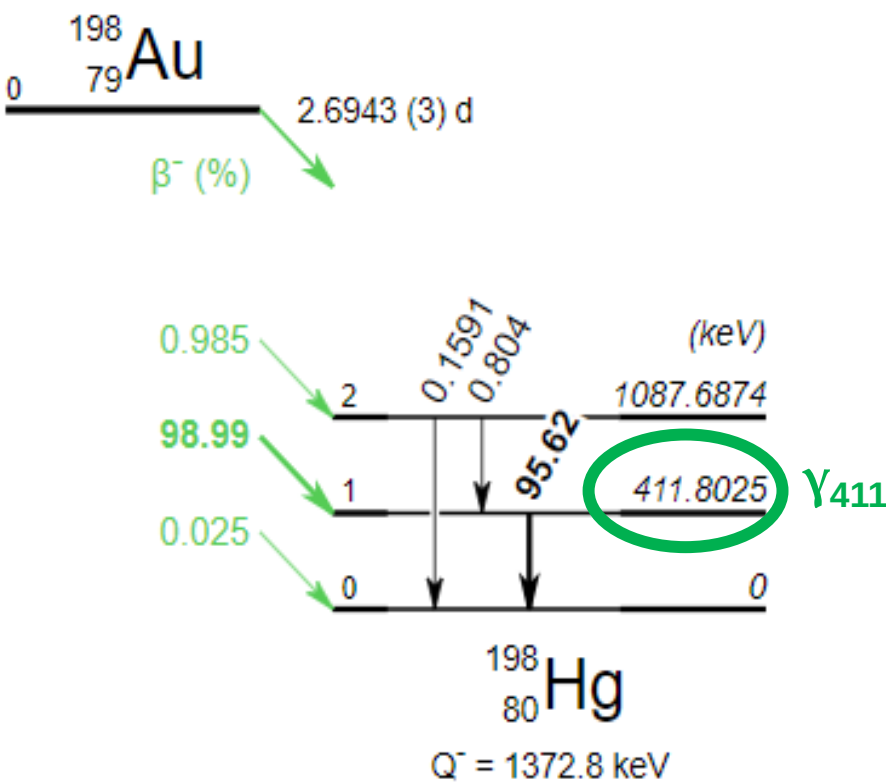
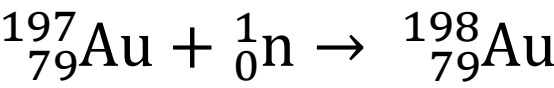
I – CARACTÉRISATION D'UN CHAMP ÉPITHERMIQUE

- A) Par méthode d'activation neutronique
- B) Avec le NFM

Caractériser en métrologie neutronique = déterminer une grandeur de référence (ex. flux neutronique) avec plusieurs systèmes de détection



■ Détermination de l'activité des feuilles irradiées



$$A_0 = \frac{\lambda t_m \dot{C}}{q \epsilon} \frac{e^{\lambda t_a}}{(1 - e^{-\lambda t_i})(1 - e^{-\lambda t_m})}$$

→ Pourquoi deux feuilles ?

I – A) ANALYSE PAR ACTIVATION NEUTRONIQUE

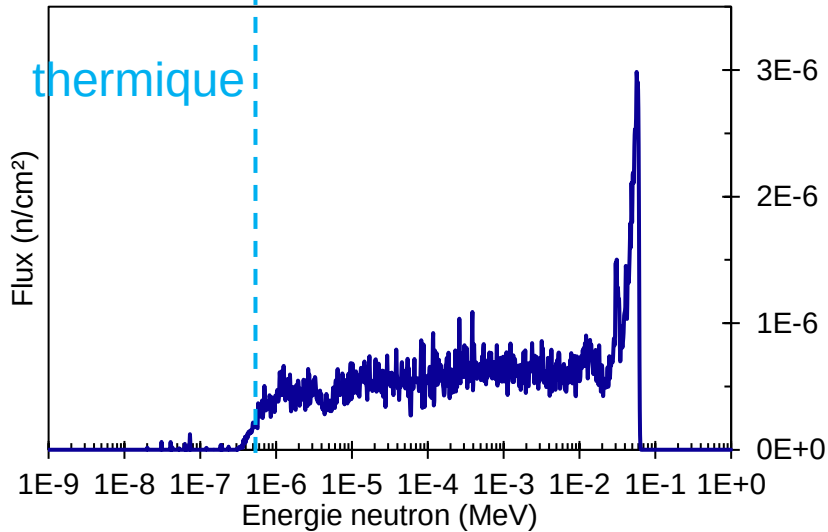
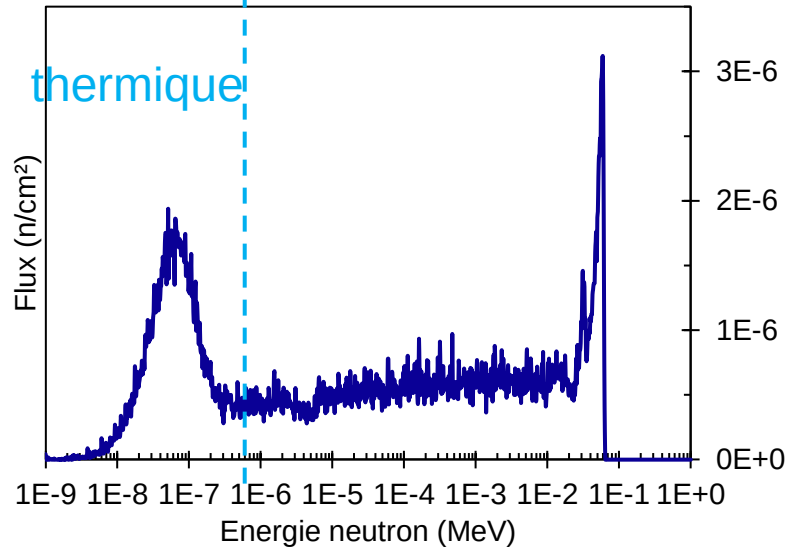
Feuille de ¹⁹⁷Au



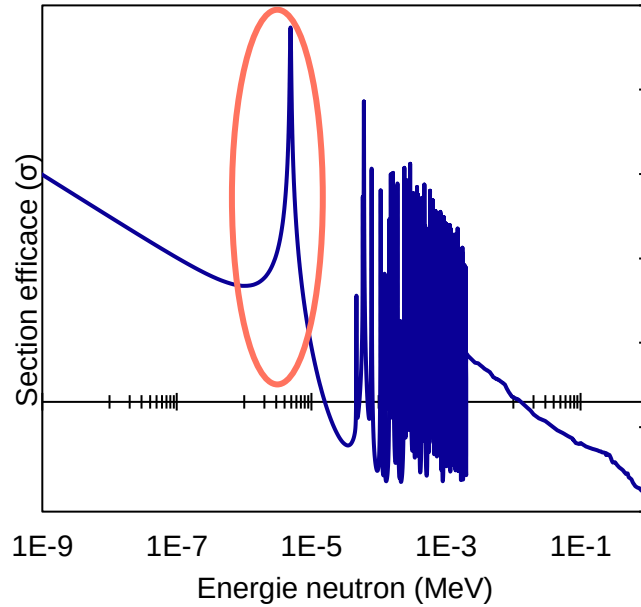
Feuilles de Cd



Flux neutronique simulé

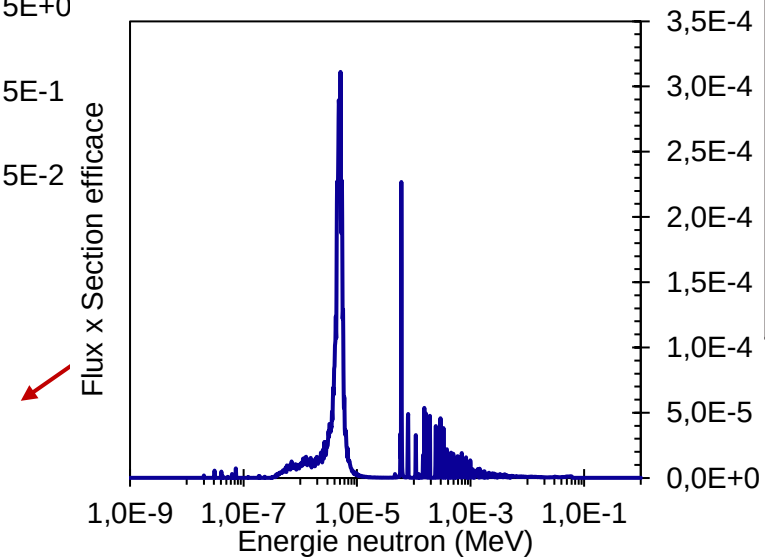
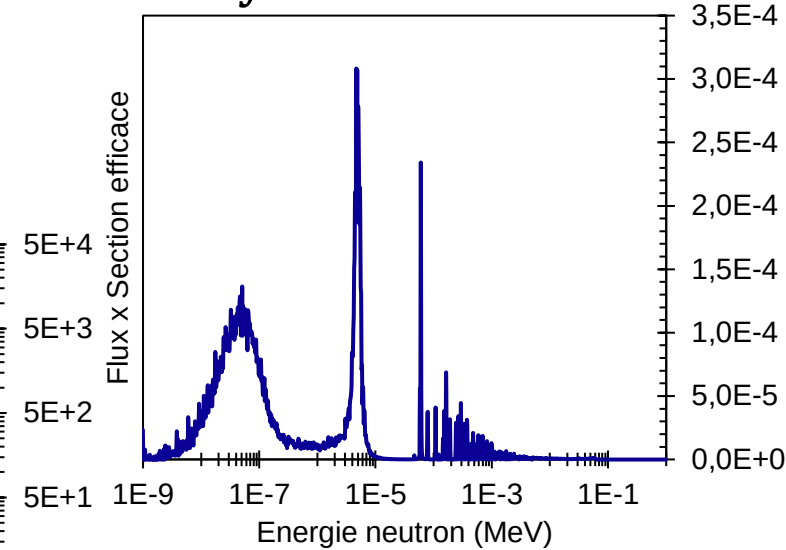


Résonance de 4,9 eV



σ(n,γ) pour le ¹⁹⁷Au

$$N_c \propto \int \Phi(E) \cdot \sigma(E) dE$$



Nc neutronique par la feuille de ¹⁹⁷Au

Détermination du flux à partir de l'activité :

$$A_0 = \frac{\lambda t_m \dot{C}}{q \varepsilon} \frac{e^{\lambda t_a}}{(1 - e^{-\lambda t_i})(1 - e^{-\lambda t_m})} \Rightarrow \begin{aligned} \Phi_{th} &= \frac{\overbrace{\exp(\lambda t_a) A_a}^{A_0} F_{Cd}}{\sigma_{th} G_{th} N (1 - e^{-\lambda t_i})} \\ \Phi_{épi} &= \frac{\exp(\lambda t_a) A_{aCd}}{I G_{res} N (1 - e^{-\lambda t_i})} \end{aligned}$$

σ_{th} = la section efficace thermique moyennée
 I = l'intégrale d'activation de résonance
 G_{th} = le facteur d'auto-atténuation thermique
 G_{res} = le facteur d'auto-atténuation de résonance
 $\dot{C}$ = taux de comptage

q = Intensité raie gamma
 ε = efficacité du détecteur
 λ = constante de radioactivité
 $t_{i,a,m}$ = durée d'irradiation, d'attente et de mesure
 $F_{Cd} = \frac{A_0 - A_{0Cd}}{A_0}$

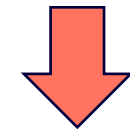
Paramètres pour AMANDE :

- $\sigma_{moyth, AMANDE} = 71 \text{ b}$ (par simulation)
- $\sigma_{t,res AMANDE} = 30770 \text{ b}$
- ($I_{197Au} = 1118 \text{ b}$)

Résultats expérimentaux :

- $\Phi_{th} = (1,10 \pm 0,08).10^3 \text{ n.cm}^{-2}.s^{-1}$
- $\Phi_{épi} = (8,53 \pm 0,84).10^2 \text{ n.cm}^{-2}.s^{-1}$

Détermination du flux neutronique
par activation ✓



Comparaison par des simulation
MCNP6

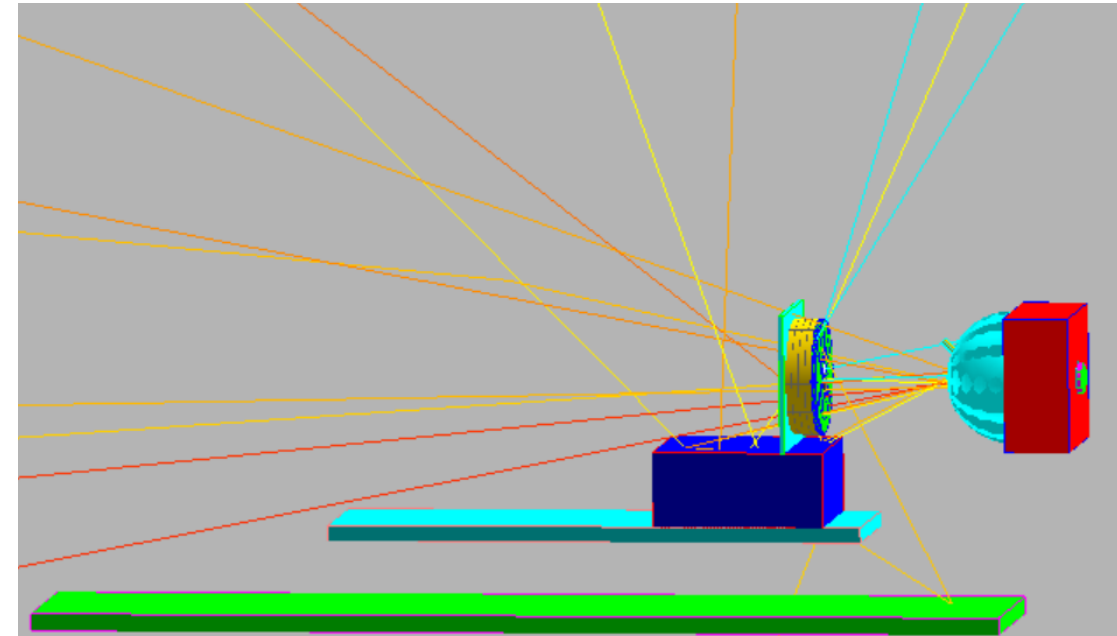
■ Flux déterminés par simulations MCNP

- Utilisation du tally F4 – flux volumique
- Ajout des feuilles de ^{197}Au + cadmium, collées au NFM
- Normalisation

$$\begin{array}{ccc} \text{F4} & & \\ \text{n.cm}^{-2} & \longleftrightarrow & \text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1} \\ \text{(pour 1 neutron source)} & & \end{array}$$

■ Résultats simulés

- $\Phi_{\text{th}}(E_n=[1 \text{ meV} ; 0,5 \text{ eV}]) = (7,52 \pm 0,32).10^2 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- $\Phi_{\text{épi}}(E_n=[0,5 \text{ eV} ; 10 \text{ keV}]) = (1,06 \pm 0,05).10^3 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$



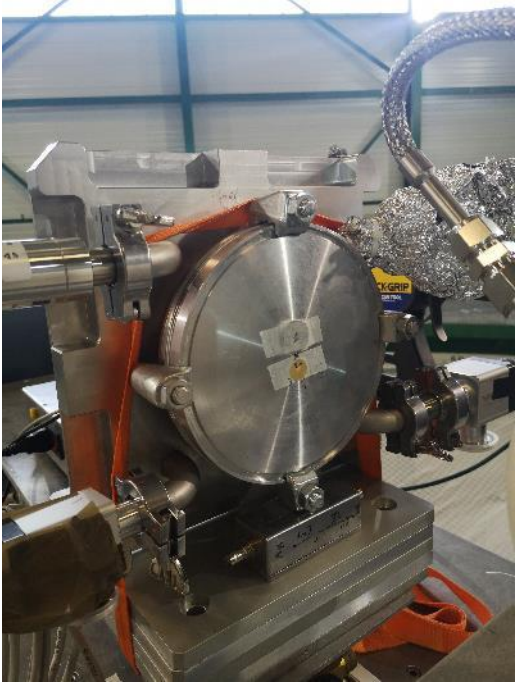
Représentation 3D de la simulation : modérateur + NFM + supports

Détermination des flux neutroniques :

- ☐ Par la méthode d'activation neutronique ✓
- ☐ Par le détecteur NFM

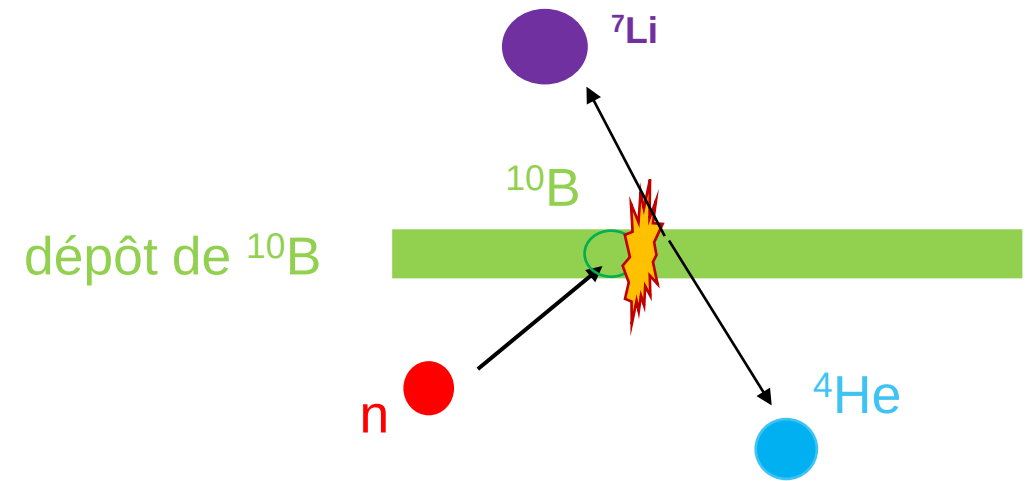


■ Présentation du Neutron Flux Monitor (NFM)



Neutron flux monitor

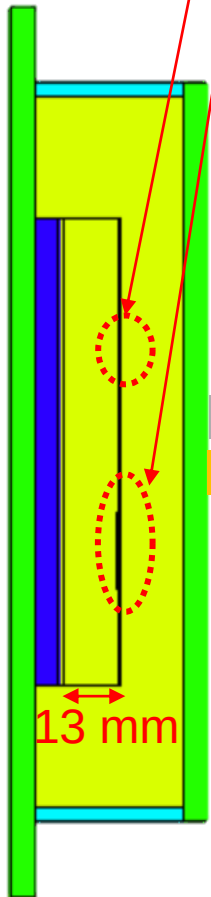
- Compteur gazeux
- Gaz : 80% Ar + 20% CO₂
- Pression : 1100 mbar
- Version expérimentale avec une anode pixelisée
- Deux ¹dépôts de ¹⁰B, d'épaisseur 200 nm



$$\begin{array}{l} 94\% \left\{ \begin{array}{l} E_{\text{Li}} = 840 \text{ keV} \\ E_{\text{He}} = 1,47 \text{ MeV} \end{array} \right. \\ 6\% \left\{ \begin{array}{l} E_{\text{Li}} = 1,06 \text{ MeV} \\ E_{\text{He}} = 1,78 \text{ MeV} \end{array} \right. \end{array}$$

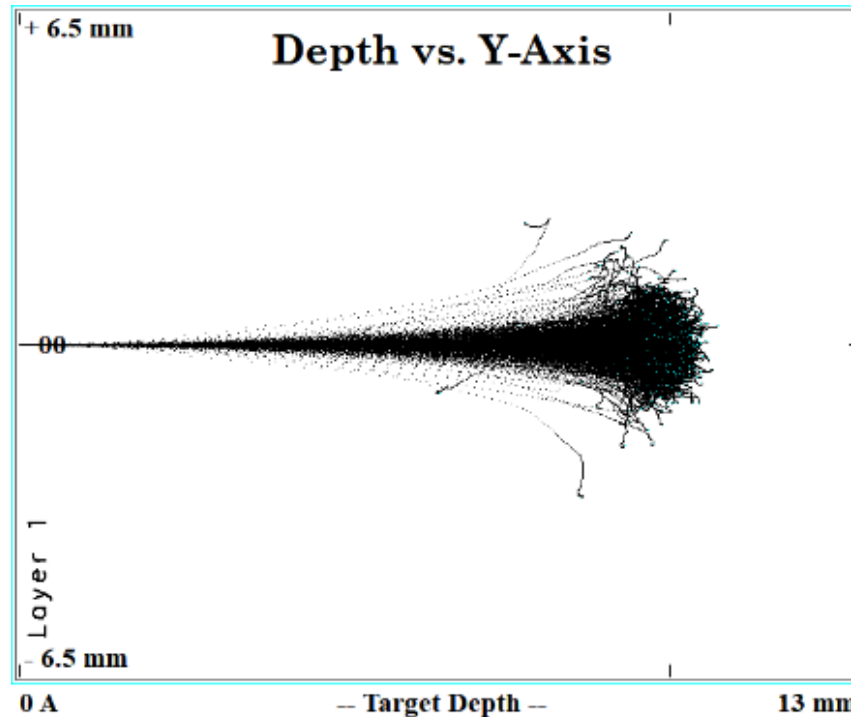
¹B. Clement, A. Bes et al. Boron-10 conversion layer for ultra-cold neutron detection, JINST, 2019

Dépôts de ^{10}B

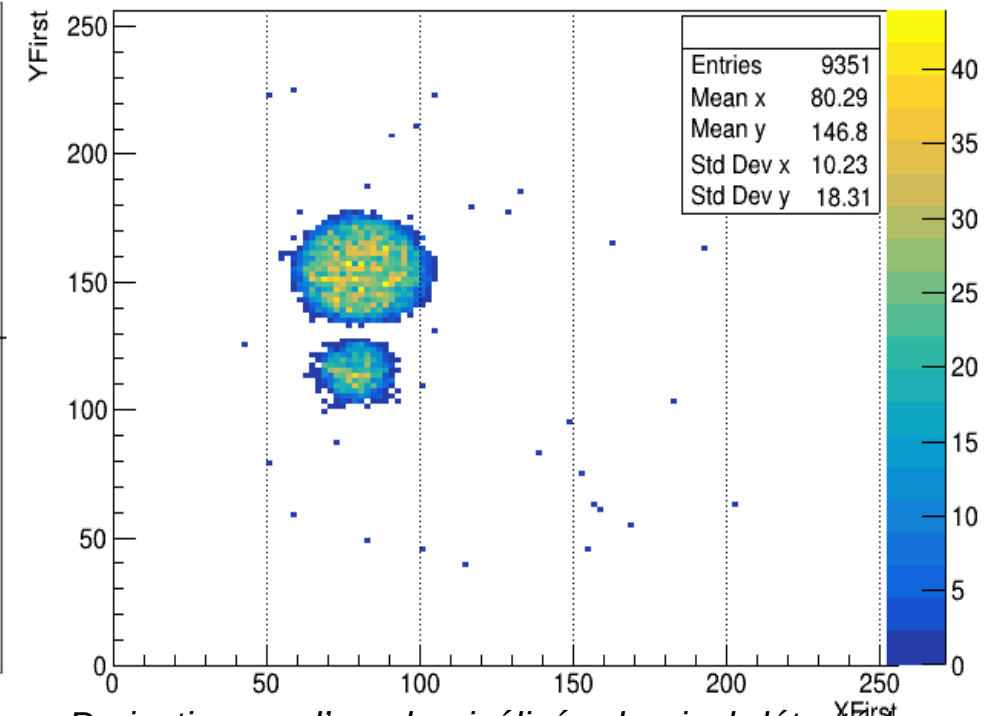


Modélisation MCNP de la géométrie du NFM

- Modélisation MCNP du NFM
- Largeur volume actif = 13 mm
- Dépôt de l'énergie totale des α et noyaux de ^7Li dans le volume actif



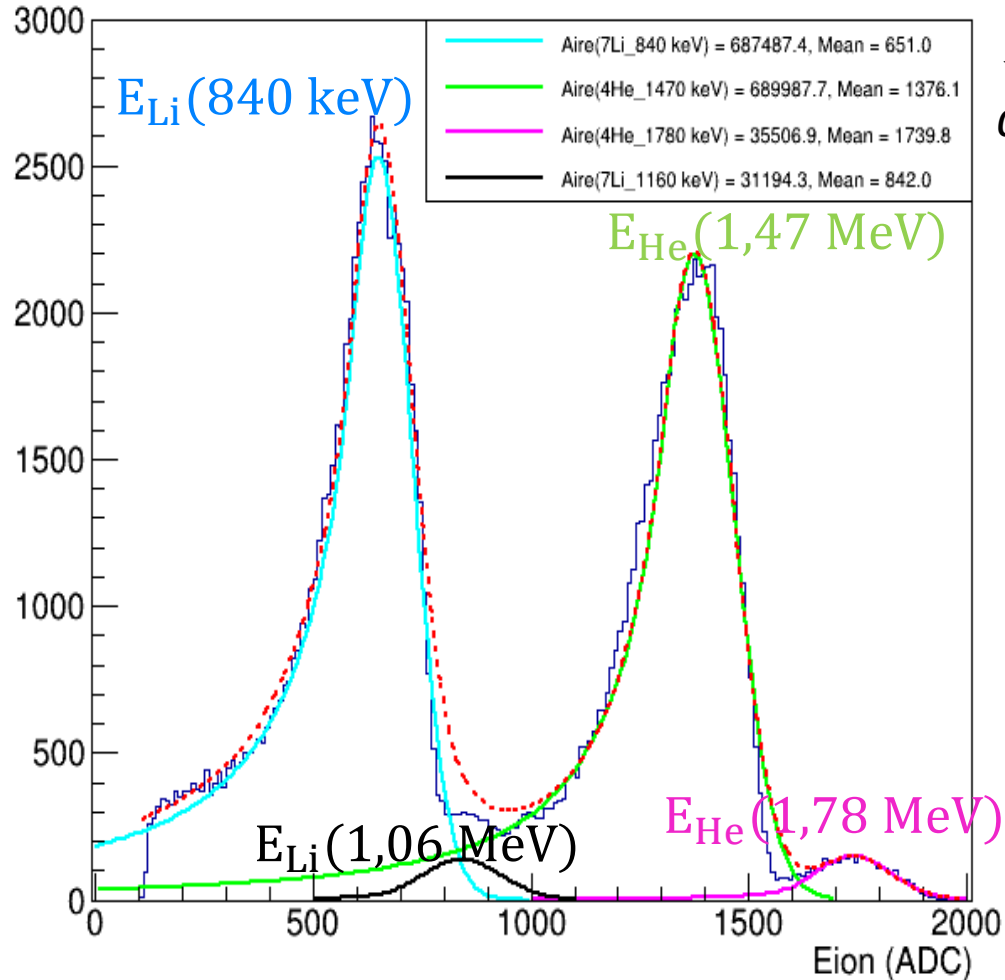
Alphas d'énergie 1,8 MeV dans le volume actif du NFM (SRIM)



Projection sur l'anode pixélisée du pixel détecté lors du dernier échantillonnage d'un évènement

■ Rappel de l'objectif : Déterminer de $\Phi(E_{\text{epi}})$ et $\Phi(E_{\text{th}})$ avec le NFM

1 Détermination du nombre de captures



◀ *Spectre expérimental des événements du NFM lors de l'irradiation avec le modérateur sur AMANDE*

Ajustements fonction de Crystal-Ball (Landau)



Perte d'énergie dans les dépôts

Comparaison des particules alpha et des noyaux de ${}^7\text{Li}$:

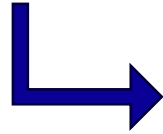
$$A_{{}^7\text{Li}} = A_{{}^4\text{He}} \quad (\text{différence} < 1\%)$$

➤ Nombre de captures déterminé à partir des particules alpha

2 Développement d'une méthode permettant de remonter à $\Phi(E_{\text{epi}})$ et $\Phi(E_{\text{th}})$ à partir de N_c du NFM

$$\Phi(E_{\text{epi}})[\text{n. cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = \frac{N_c}{N_0 * \sum_{0,5\text{eV}}^{10\text{keV}} \sigma(E) dE \left(1 + \frac{k_1}{k_2} + \frac{k_3}{k_2}\right)}$$

Avec k_1 , k_2 , k_3 = proportions flux thermique, épithermique et rapide simulés



$$\Phi(E_{\text{th}}) = \left(\Phi_{\text{th}}^{\text{simu}} / \Phi_{\text{épi}}^{\text{simu}} \right) \Phi(E_{\text{epi}})$$

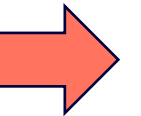
3 Résultats $\Phi(E_{\text{epi}})$ et $\Phi(E_{\text{th}})$ expérimentaux avec le NFM

▪ Flux expérimentaux :

➤ $\Phi_{\text{th}} = (6,03 \pm 0,34) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

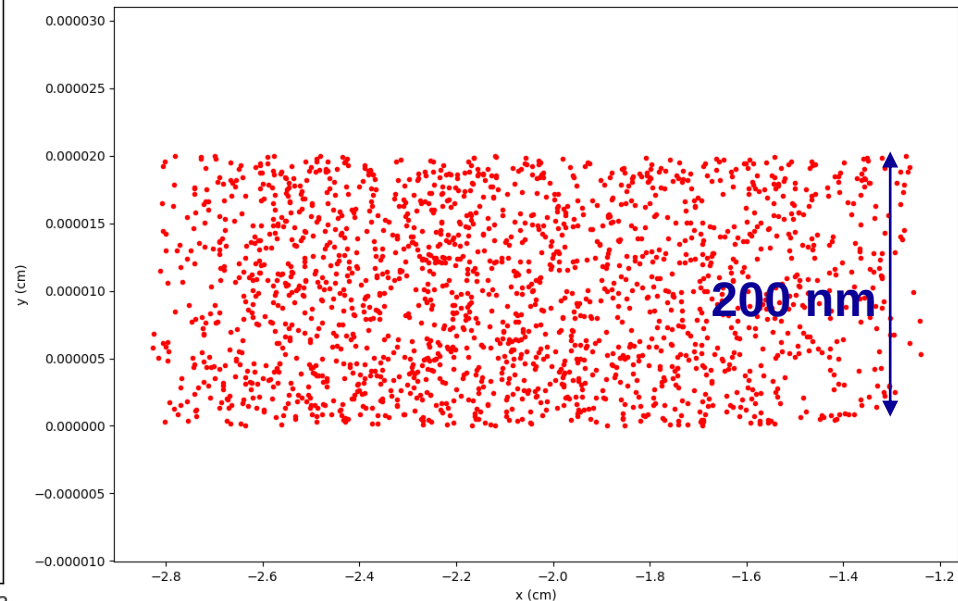
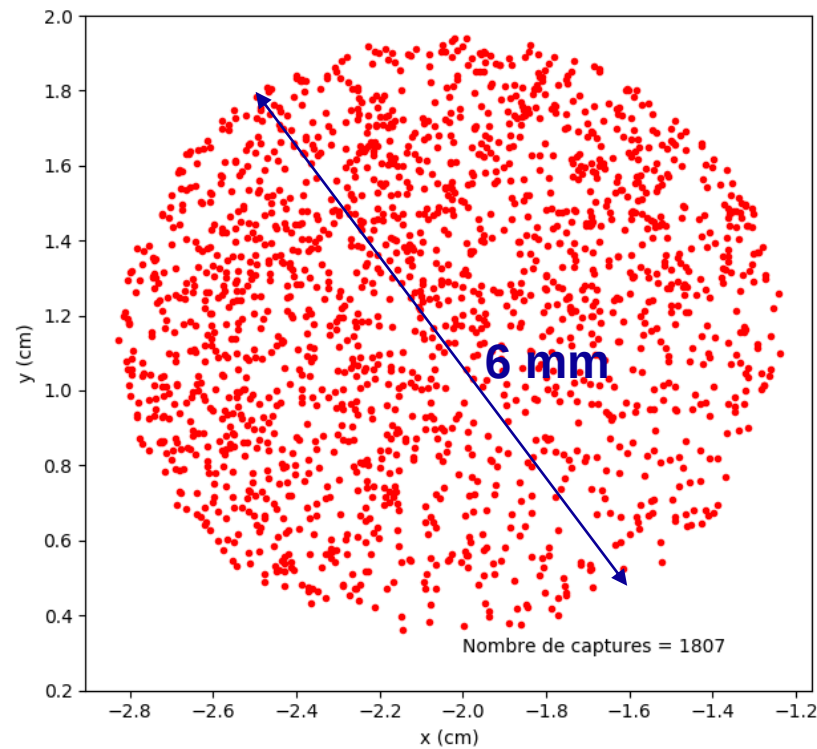
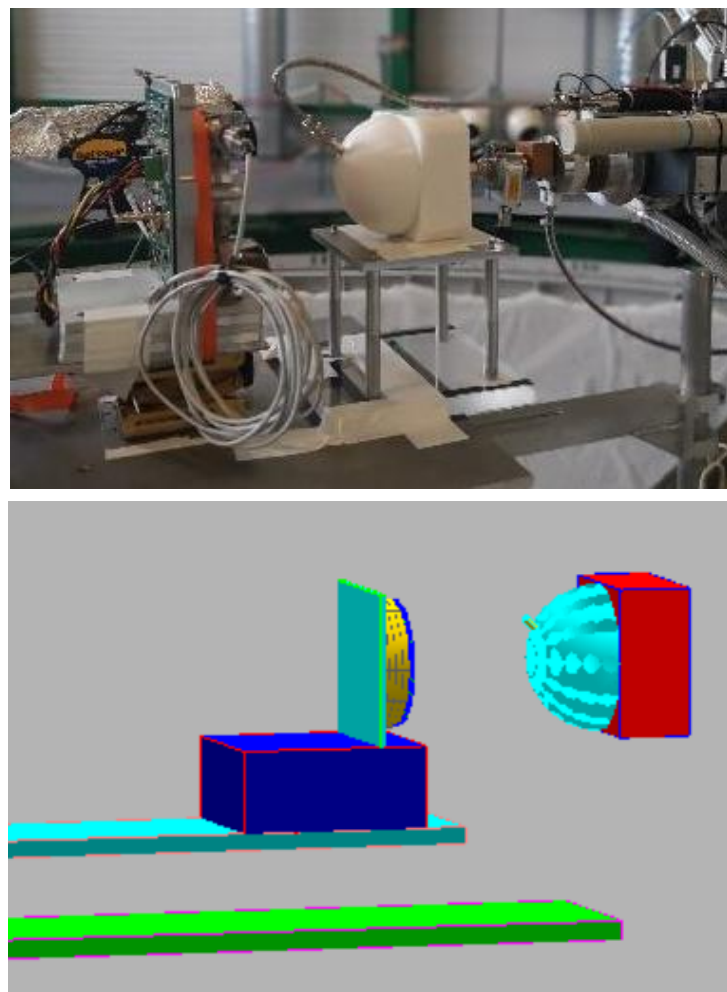
➤ $\Phi_{\text{épi}} = (9,64 \pm 0,55) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Comparaison avec une simulation

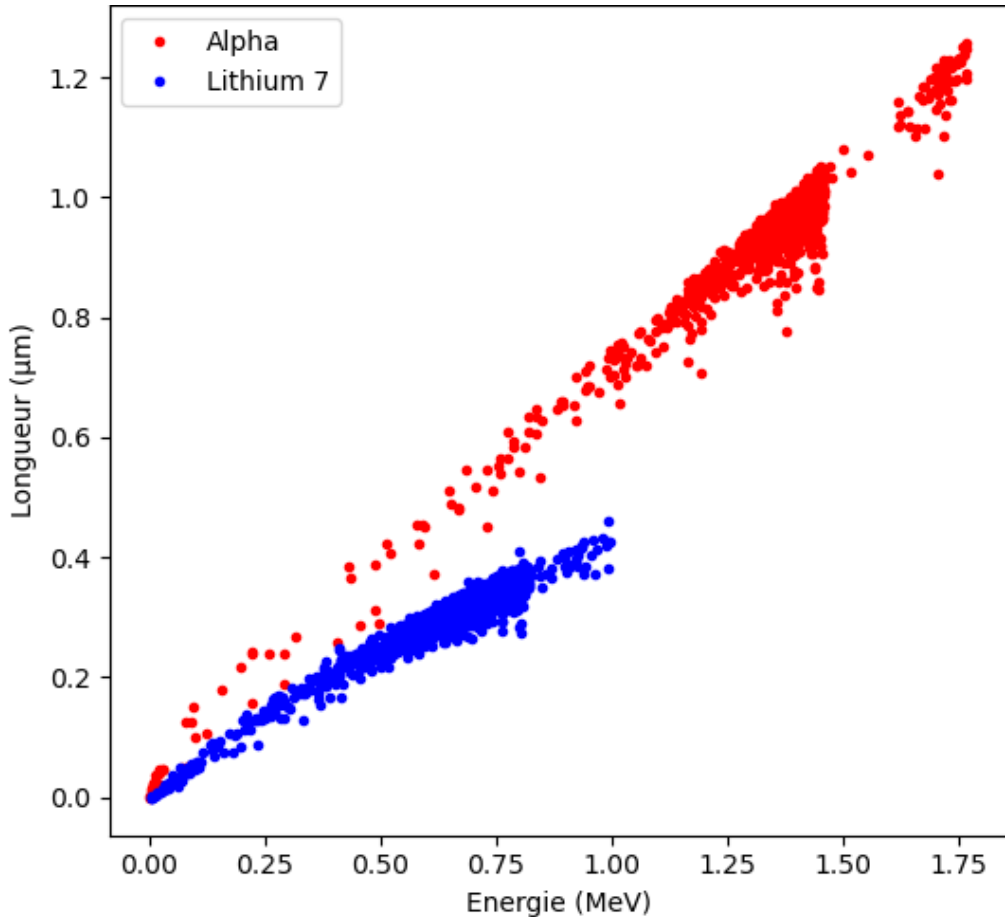


■ Détermination de $\Phi(E_{\text{epi}})$ et $\Phi(E_{\text{th}})$ par simulations MCNP

- Utilisation du PTRAC de MCNP + Easy_PTRAC (développement ASNR)
- Algorithme Python suivant les α et ${}^7\text{Li}$ produits dans les dépôts de ${}^{10}\text{B}$:



Captures neutroniques dans le dépôt de ${}^{10}\text{B}$ du NFM



Longueurs des particules alpha et ^7Li dans le volume gazeux en fonction de l'énergie déposée en ionisation

- Energie déposée dans le volume actif
- Longueur des traces des ^7Li > longueur des particules alphas

Normalisation : Application des conditions expérimentales

Résultats $\Phi(E_{\text{epi}})$ et $\Phi(E_{\text{th}})$ simulés

- $\Phi_{\text{th}} (E_n=[1 \text{ meV} ; 0,5 \text{ eV}]) = (5,66 \pm 0,25).10^2 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- $\Phi_{\text{épi}} (E_n=[0,5 \text{ eV} ; 10 \text{ keV}]) = (9,08 \pm 0,40).10^2 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

➤ Feuilles de ^{197}Au

Flux thermal : Φ_{th}

$$\begin{aligned} \text{v.c} &= (7,52 \pm 0,32) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \text{v.e}_{\sigma_{\text{th}}(71 \text{ b})} &= (1,10 \pm 0,08) \cdot 10^3 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \text{v.e}_{\sigma_{\text{th}}(98 \text{ b})} &= (7,70 \pm 0,63) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \frac{C}{E} &= 1,46 \quad u = 46 \% \quad \sigma_{\text{th}} = (71 \text{ b}) \\ \frac{C}{E} &= 0,98 \quad u = 2 \% \quad \sigma_{\text{th}} = (98 \text{ b}) \end{aligned}$$

Flux épithermique : Φ_{epi}

$$\begin{aligned} \text{v.c} &= (1,06 \pm 0,05) \cdot 10^3 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \text{v.e} &= (8,53 \pm 0,84) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \frac{C}{E} &= 0,58 \quad u = 20 \% \end{aligned}$$

➤ NFM

Flux thermal : Φ_{th}

$$\begin{aligned} \text{v.c} &= (5,66 \pm 0,25) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \text{v.e} &= (6,03 \pm 0,34) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \frac{C}{E} &= 0,94 \quad u = 6 \% \end{aligned}$$

Flux épithermique : Φ_{epi}

$$\begin{aligned} \text{v.c} &= (9,08 \pm 0,40) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \text{v.e} &= (9,64 \pm 0,55) \cdot 10^2 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \frac{C}{E} &= 0,94 \quad u = 6 \% \end{aligned}$$

Sommaire

01

Contexte

- I. Définition des champs de neutrons épithermiques
- II. Utilité des champs épithermiques

02

Conception d'un champ neutronique épithermique

- I. Etude d'un modérateur pour l'accélérateur T400
- II. Etude et conception d'un modérateur pour l'accélérateur AMANDE

03

Résultats

- I. Caractérisation des neutrons épithermiques
- II. Résultats et discussions

04

Conclusions et perspectives

- I. Conclusions
- II. Perspectives

V – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

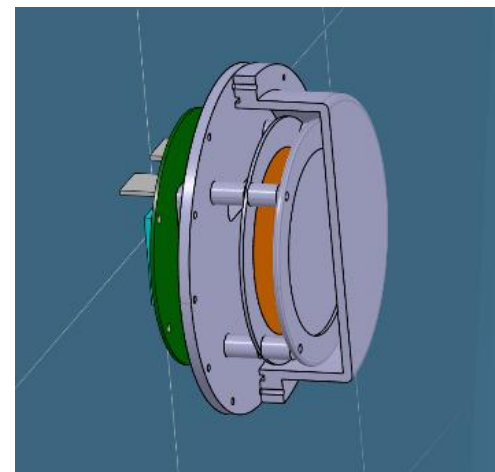
CONCLUSIONS

- Conception de modérateurs pour le T400 et AMANDE
- Analyse par activation neutronique
- Développement de la méthode d'analyse du NFM
- Comparaison avec des simulations

PERSPECTIVES

- Sans l'anode pixélisée
- Utilisation du NFM dans des champs d'intensité type AB-BNCT
- Ajout d'une couche de cadmium au NFM
- modérateur optimal pour l'accélérateur T400 (collaboration ASNR/CNRS)
- Accélérateur GN400 du LMDN (passage de 3 mA (T400) à 8 mA)

NFM sans anode pixélisée



Accélérateur T400 du LMDN



Accélérateur GN400 du LMDN (fin 2025)

Merci pour votre attention