

Thulliez Loïc

Cursus universitaire :

- CPGE au lycée Champollion (Grenoble)
- École d'ingénieur Phelma Grenoble-INP

Motivations :

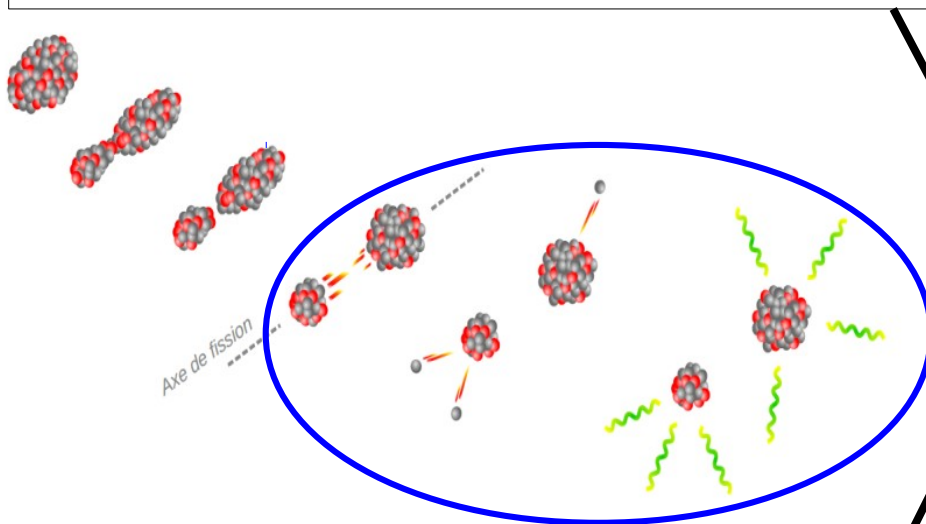
- Physique nucléaire
- Recherche fondamentale
- Interconnexions : théories/modèles – expériences – applications

Connaissance du sujet de thèse :

- Réseaux des enseignants + e-mail

Sujet de thèse : **Caractérisation des fragments de fission**

- Développement du dispositif expérimental **FALSTAFF**
⇒ caractérisation des **fragments de fission** des actinides
encadré par Diane Doré (CEA-Saclay/DRF/Irfu/SPhN)

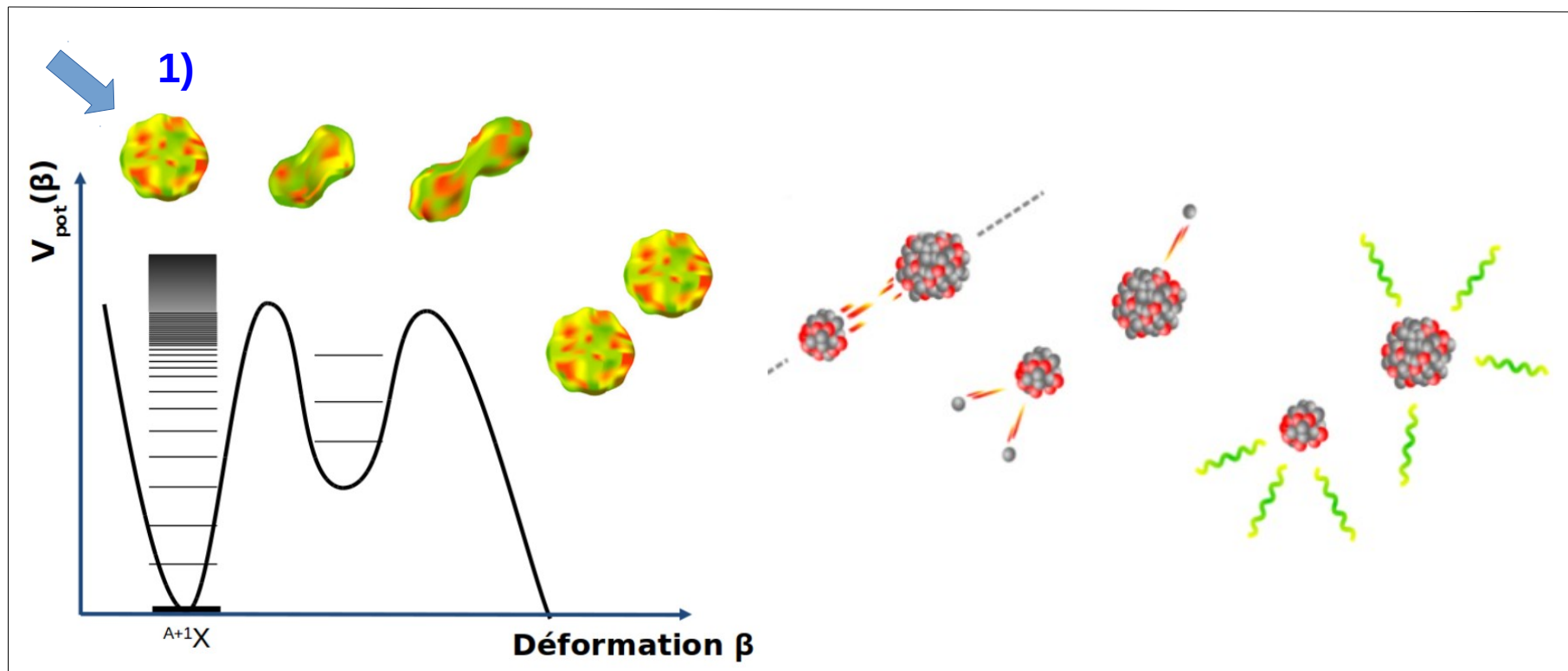


**Compréhension de la fission
+
Support à l'industrie nucléaire**

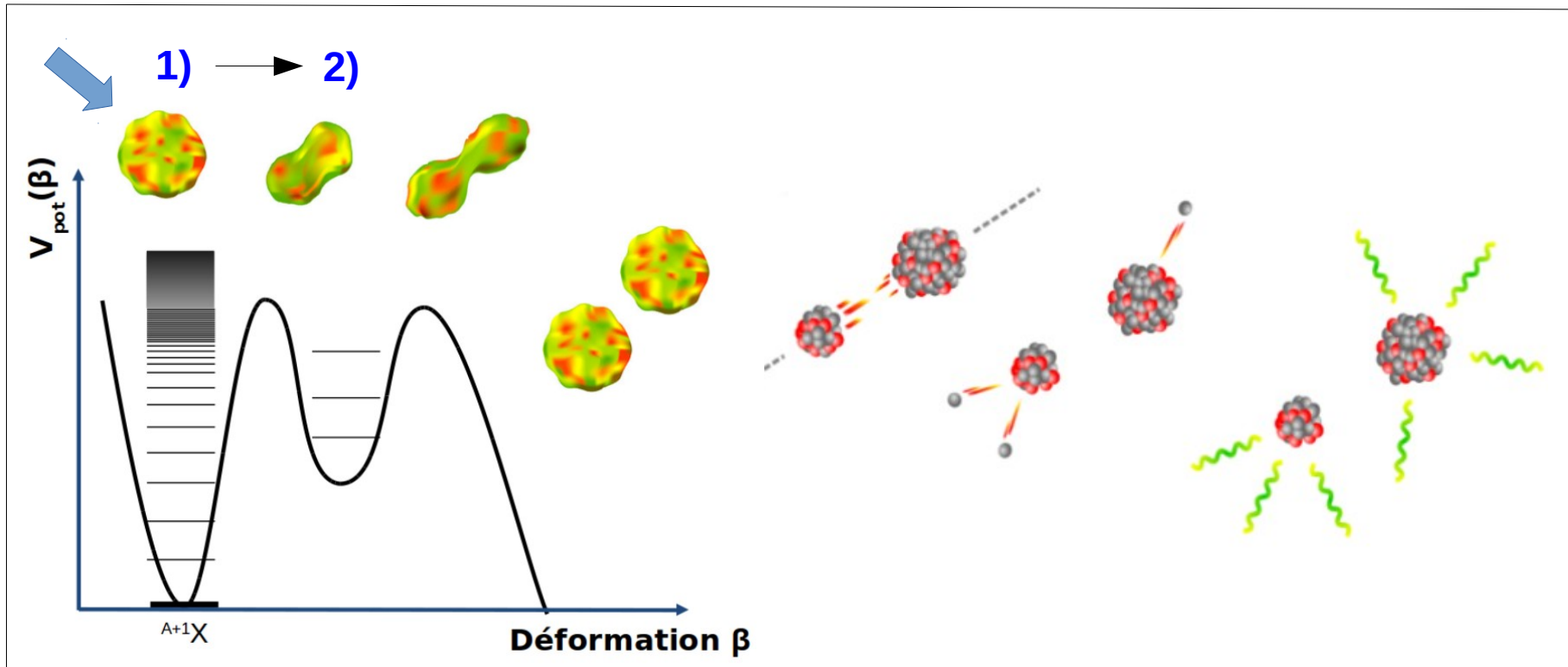
(Co-financement P2IO et CEA/DEN)

- Modélisation de la désexcitation des fragments avec le code **FIFRELIN**
⇒ étude de l'influence des modèles sur les observables de fission :
n et γ prompts
encadré par Olivier Litaize (CEA-Cadarache/DEN/SPRC)

1) Formation du noyau composé



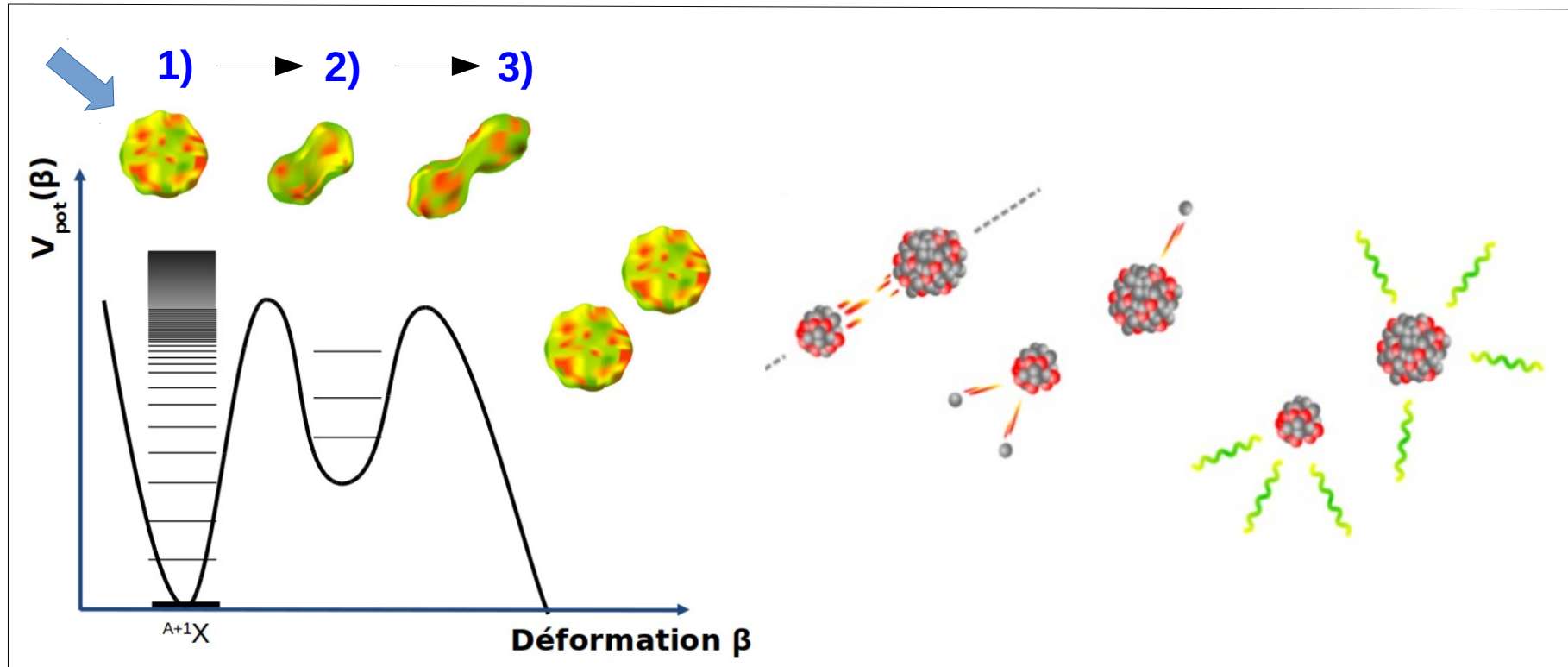
1) Formation du noyau composé



2) Déformation

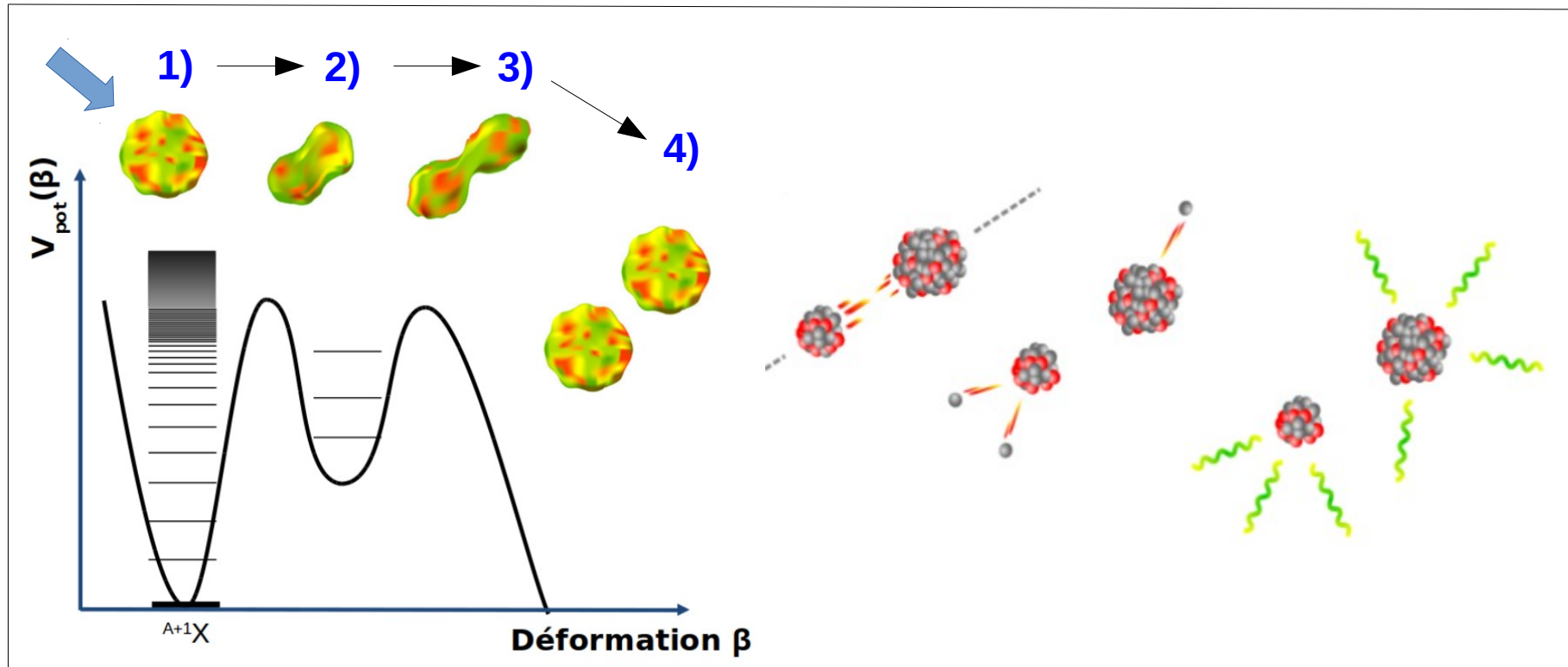
Section efficace

- 1) Formation du noyau composé 3) Apparition d'un col
Point selle



- 2) Déformation
Section efficace

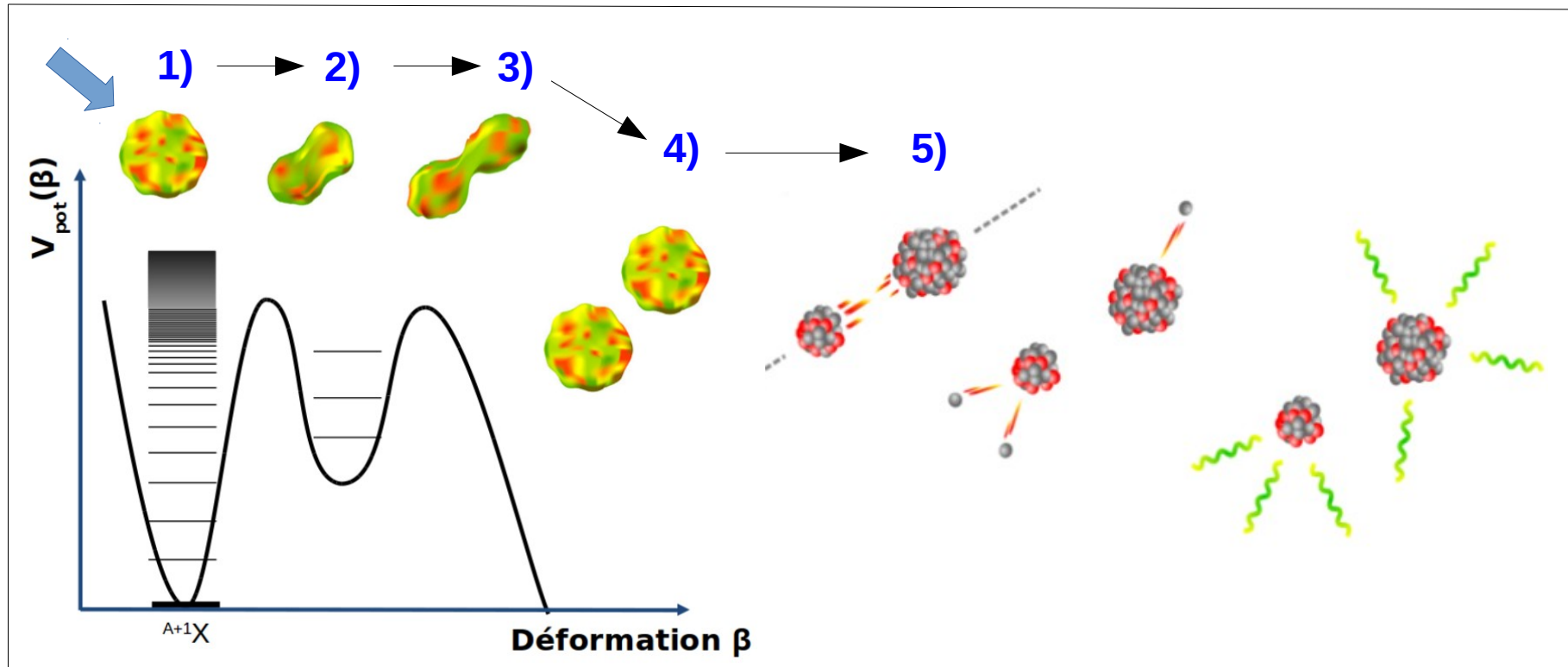
- 1) Formation du noyau composé
2) Déformation
3) Apparition d'un col
Point selle



- 2) Déformation
Section efficace

- 4) Rupture du col
Point de scission
Rendement en masse et en charge

- 1) Formation du noyau composé
2) Déformation
3) Apparition d'un col
4) Rupture du col
5) Répulsion coulombienne
- Point selle**
- Énergie cinétique (KE)



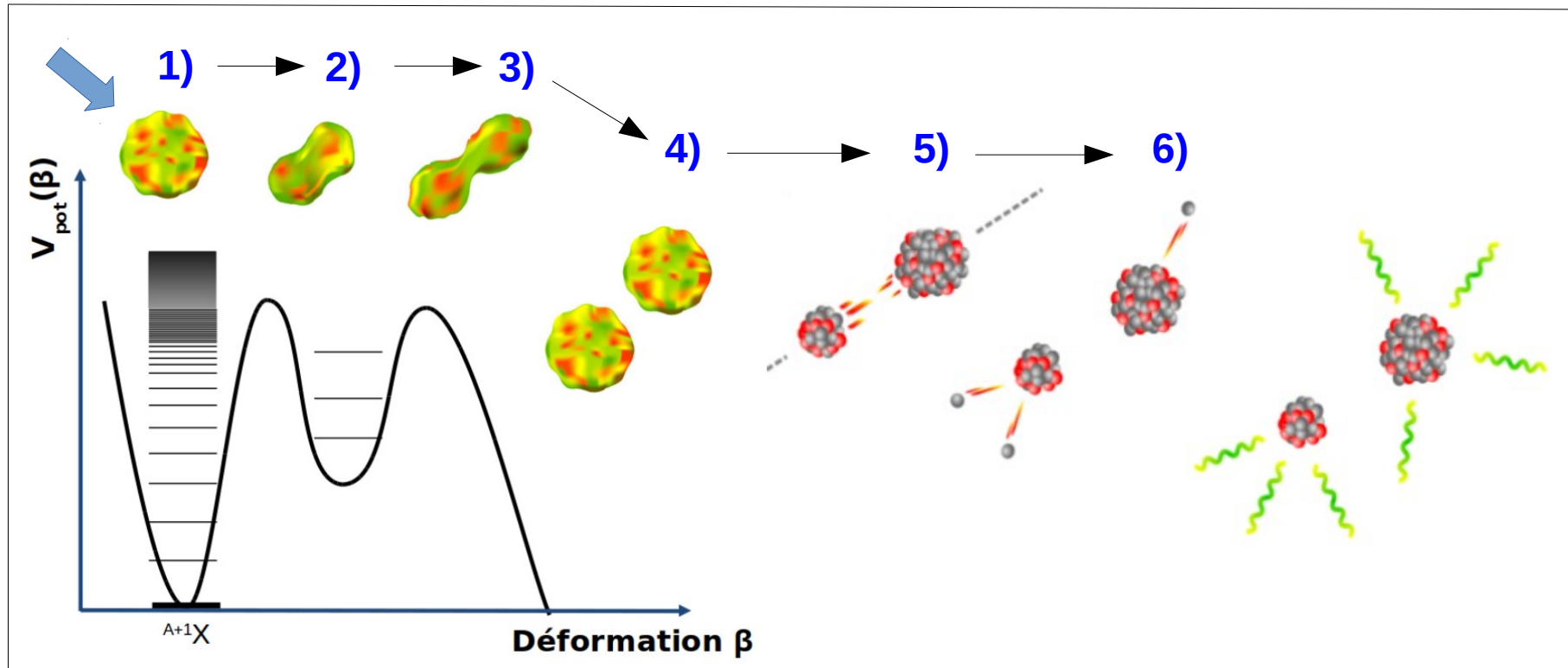
- 2) Déformation
Section efficace

- 4) Rupture du col
Point de scission
Rendement en masse et en charge

1) Formation du noyau composé

3) Apparition d'un col
Point selle

5) Répulsion coulombienne
Énergie cinétique (KE)



2) Déformation
Section efficace

4) Rupture du col
Point de scission
Rendement en masse et en charge

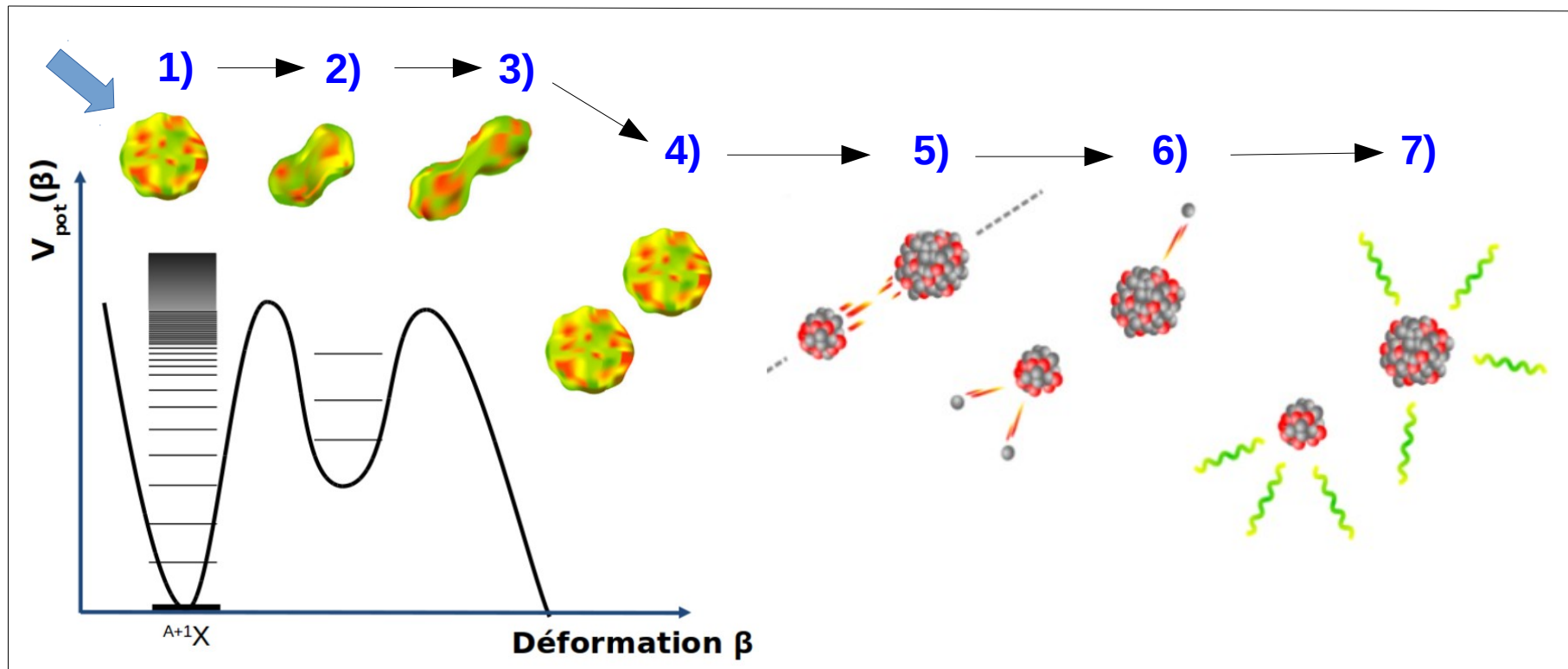
6) Émission de neutrons
Nombre, énergie, Θ ...

1) Formation du noyau composé

3) Apparition d'un col
Point selle

5) Répulsion coulombienne
Énergie cinétique (KE)

7) Émission de γ
Nombre, énergie, Θ ...



2) Déformation
Section efficace

4) Rupture du col
Point de scission
Rendement en masse et en charge

6) Émission de neutrons
Nombre, énergie, Θ ...

I. Présentation du code FIFRELIN

II. Études de sensibilité des spectres gammas de fission

II. 1. aux modèles de moment angulaire J_{initial}

II. 2. aux modèles de fonction de force gamma

Perspectives

III. Présentation du dispositif FALSTAFF

IV. Influence des matériaux sur la reconstruction des observables

Perspectives

Conclusion générale

FIFRELIN DANS LE PROCESSUS DE FISSION

Définir une fragmentation → États initiaux → Schéma de niveaux → Désexcitation

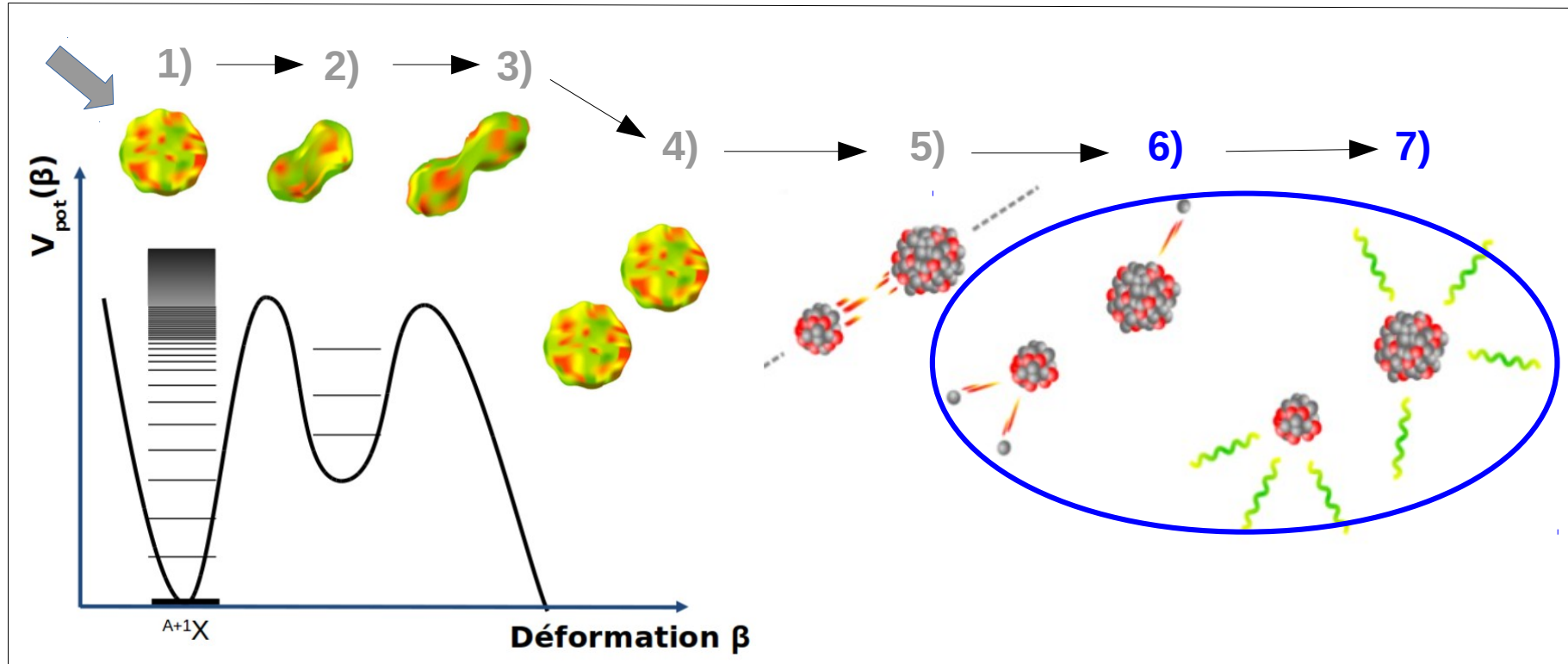


1) Formation du
noyau composé

3) Apparition d'un col
Point selle

5) Répulsion coulombienne
Énergie cinétique (KE)

7) Émission de γ
Nombre, énergie, Θ ...



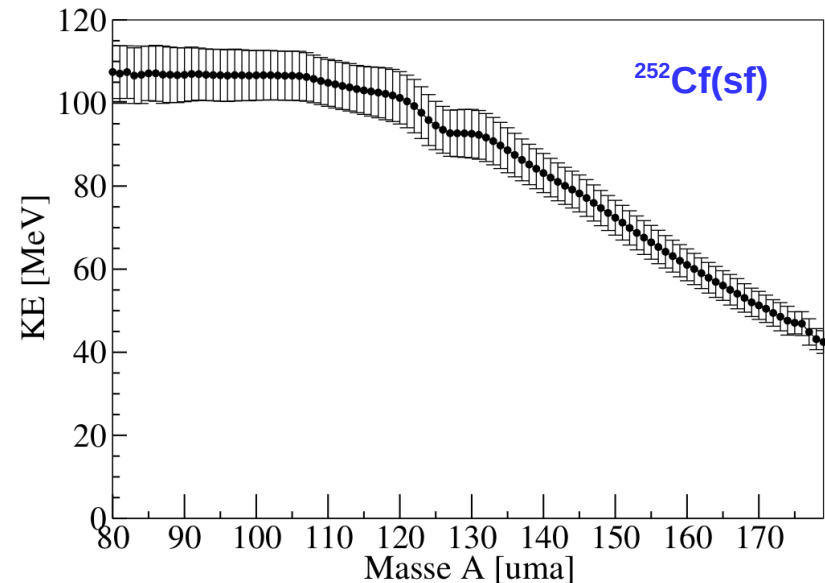
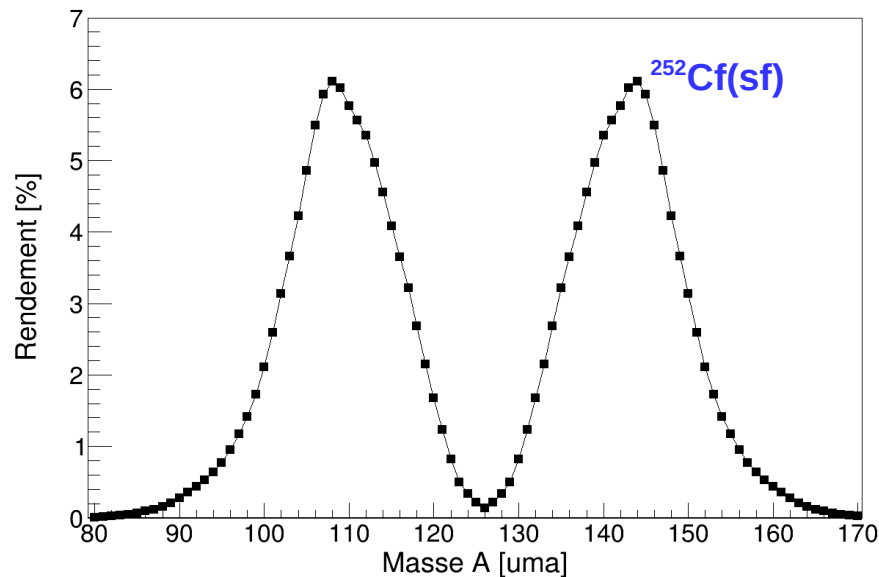
2) Déformation
Section efficace

4) Rupture du col
Point de scission
Rendement en masse et en charge

6) Émission de neutrons
Nombre, énergie, Θ ...

Étape 1: Définir une fragmentation

- Distribution expérimentale en masse $Y(A_{\text{pré}})$
- Distribution théorique en charge nucléaire $Z(A)$
- Distribution expérimentale en énergie cinétique $KE(A)$

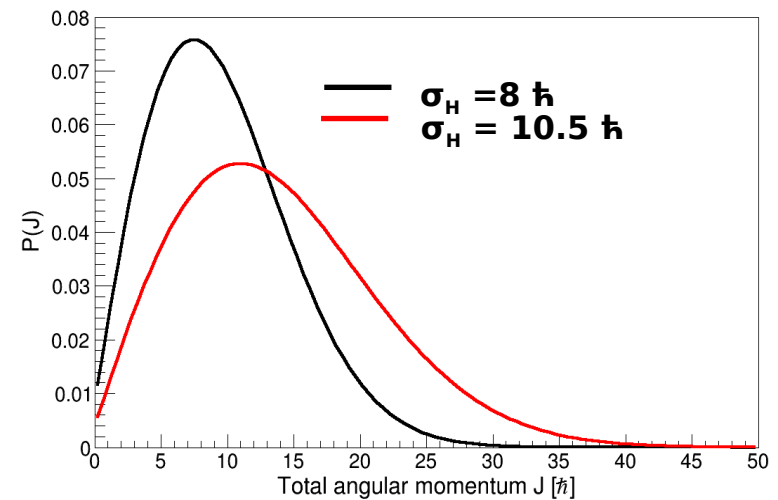


⇒ Étude réalisée sur la fission spontanée du $^{252}\text{Cf(sf)}$

Étape 2: Définir un état initial $(E^*, J, \pi)_{L, H}$

$$\Rightarrow P_{L, H}(J_{L, H}) = \frac{(2J+1)}{2\sigma_{L, H}^2} e^{-\frac{(J+1/2)^2}{2\sigma_{L, H}^2}}$$

$\sigma_{L, H}$ = variance ou spin cut-off

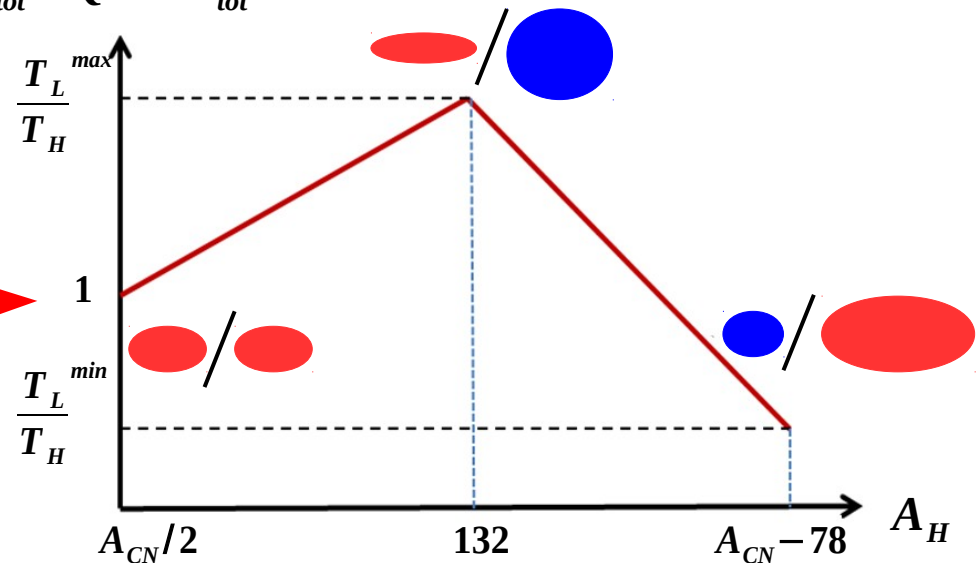


⇒ Partage de l'énergie d'excitation : $E_{tot}^* = Q - KE_{tot}$

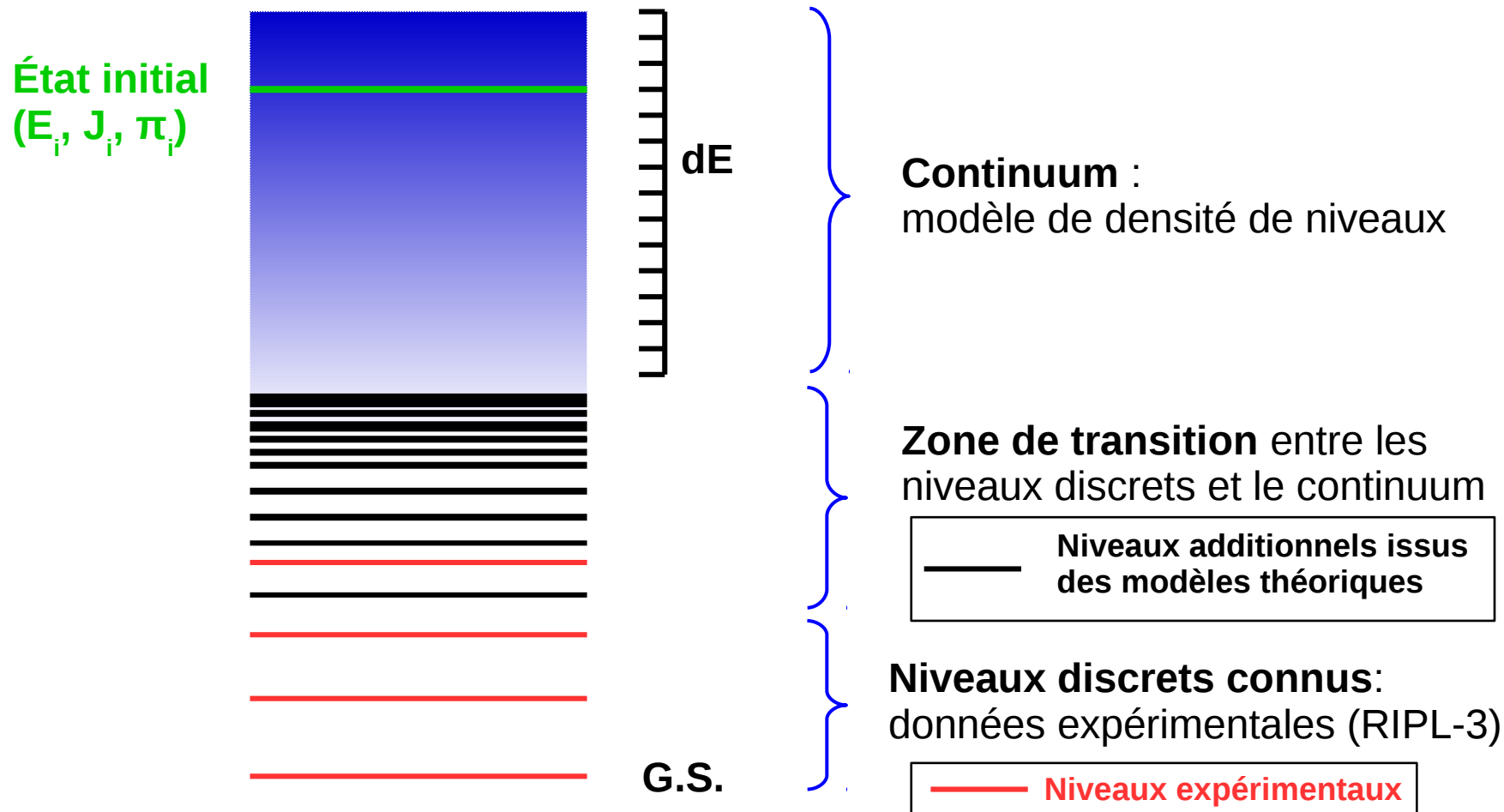
Hyp : $E_i^* = \underbrace{E_i^{rot}}_{\text{collective}} + \underbrace{E_i^{int}}_{\text{intrinsèque}}$

$$E_{L, H}^{rot} = \frac{J(J+1)\hbar^2}{2kI_{rig}}$$

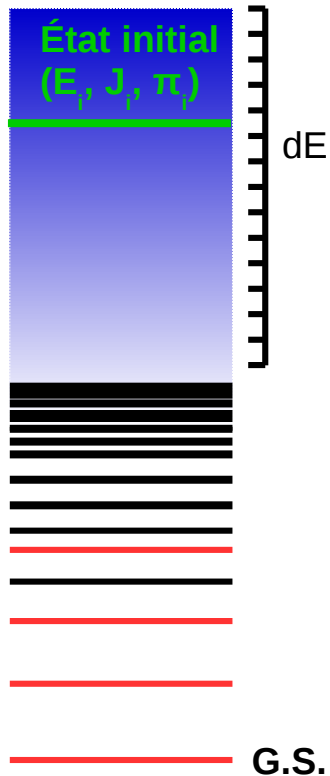
$$E_{L, H}^{int} = a_{L, H} T_{L, H}^2$$



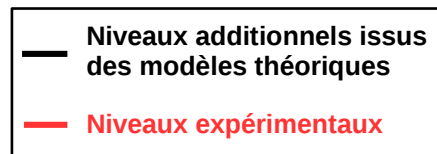
Étape 3: Construire le schéma de niveaux des FFs



Étape 4: Réaliser la désexcitation avec le formalisme Hauser-Feshbach

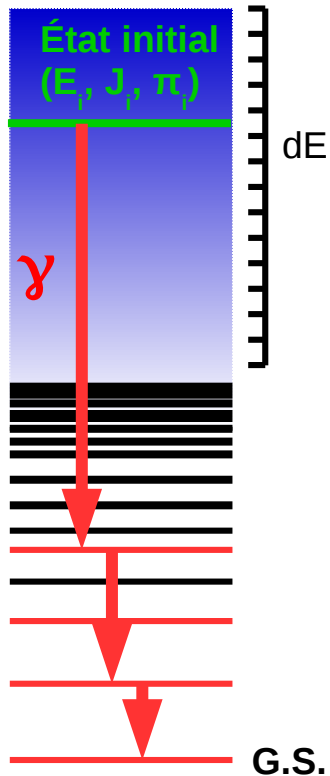


A

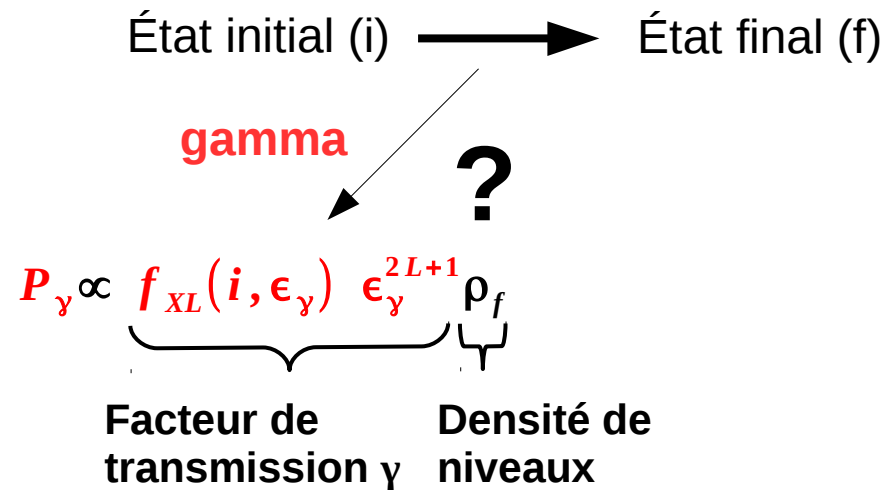
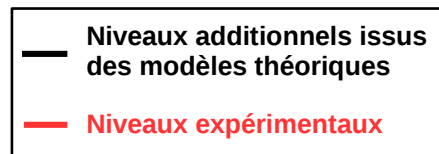


État initial (i) → État final (f)

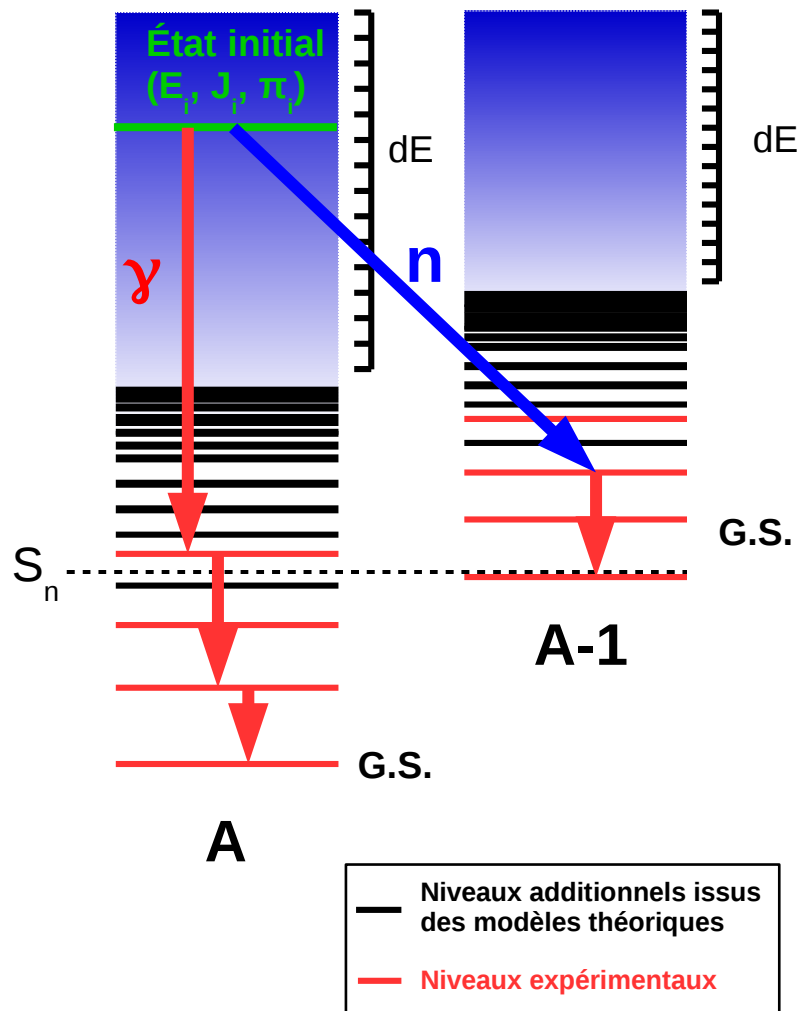
Étape 4: Réaliser la désexcitation avec le formalisme Hauser-Feshbach



A



Étape 4: Réaliser la désexcitation avec le formalisme Hauser-Feshbach



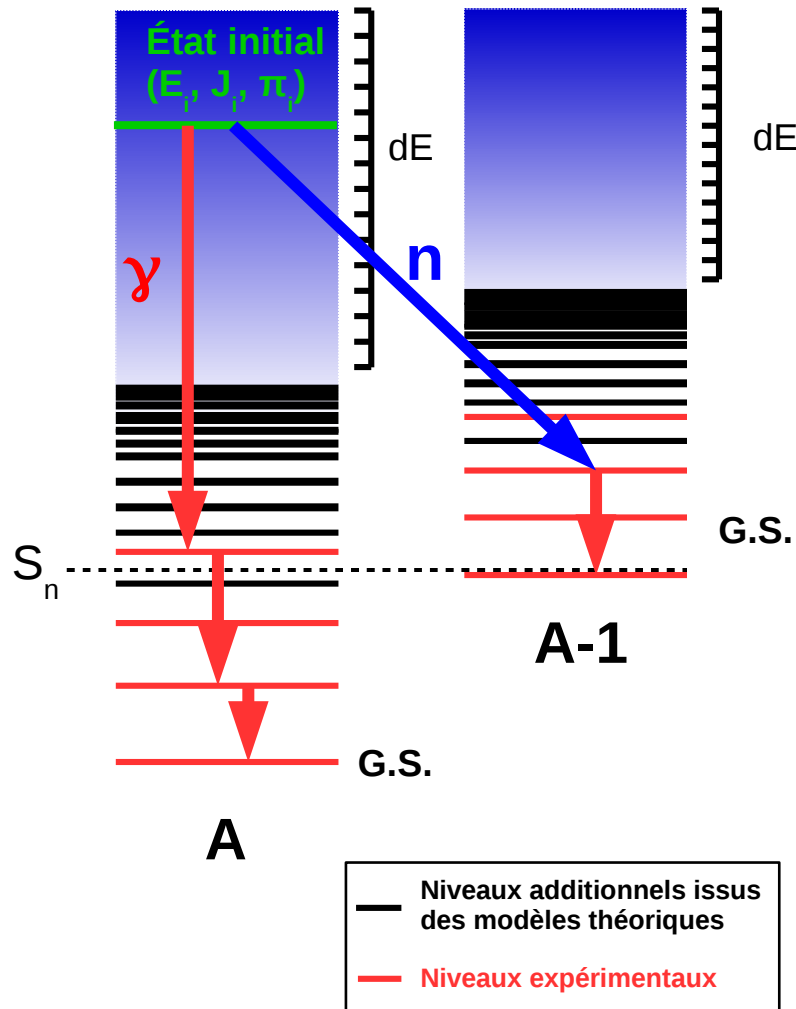
État initial (i) → État final (f)

gamma ? **neutron**

$$P_\gamma \propto \underbrace{f_{XL}(i, \epsilon_\gamma)}_{\text{Facteur de transmission } \gamma} \underbrace{\epsilon_\gamma^{2L+1} \rho_f}_{\text{Densité de niveaux}} \underbrace{\rho_f}_{\text{Facteur de transmission } n}$$

$$P_n \propto \underbrace{T_n(i, \epsilon_n)}_{\text{Facteur de transmission } n} \rho_f$$

Étape 4: Réaliser la désexcitation avec le formalisme Hauser-Feshbach



État initial (i) → État final (f)

gamma ? **neutron**

$$P_\gamma \propto \underbrace{f_{XL}(i, \epsilon_\gamma)}_{\text{Facteur de transmission } \gamma} \underbrace{\epsilon_\gamma^{2L+1}}_{\text{Densité de niveaux}} \underbrace{\rho_f}_{\text{Facteur de transmission } n}$$

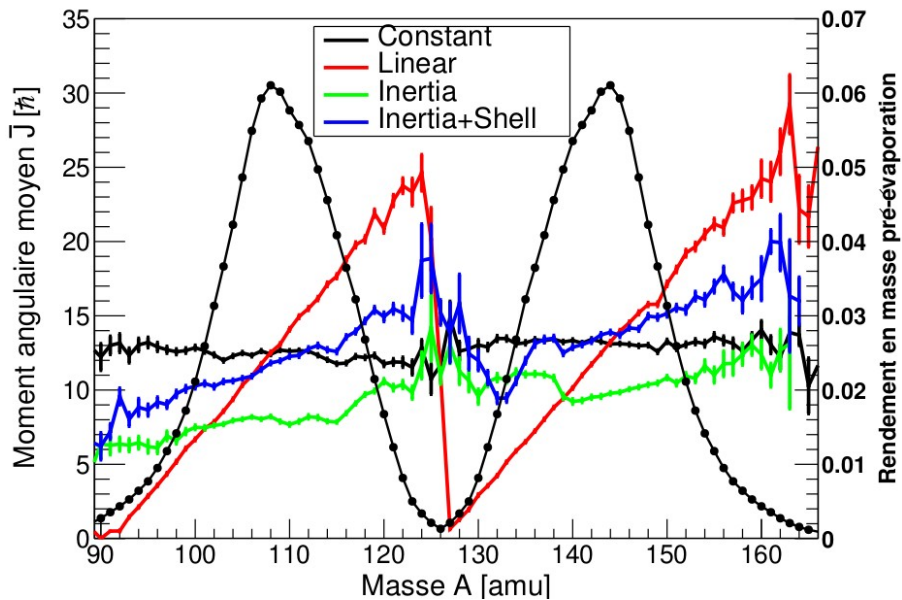
$$P_n \propto \underbrace{T_n(i, \epsilon_n)}_{\text{Facteur de transmission } n} \underbrace{\rho_f}_{\text{Densité de niveaux}}$$

Observables de fission :

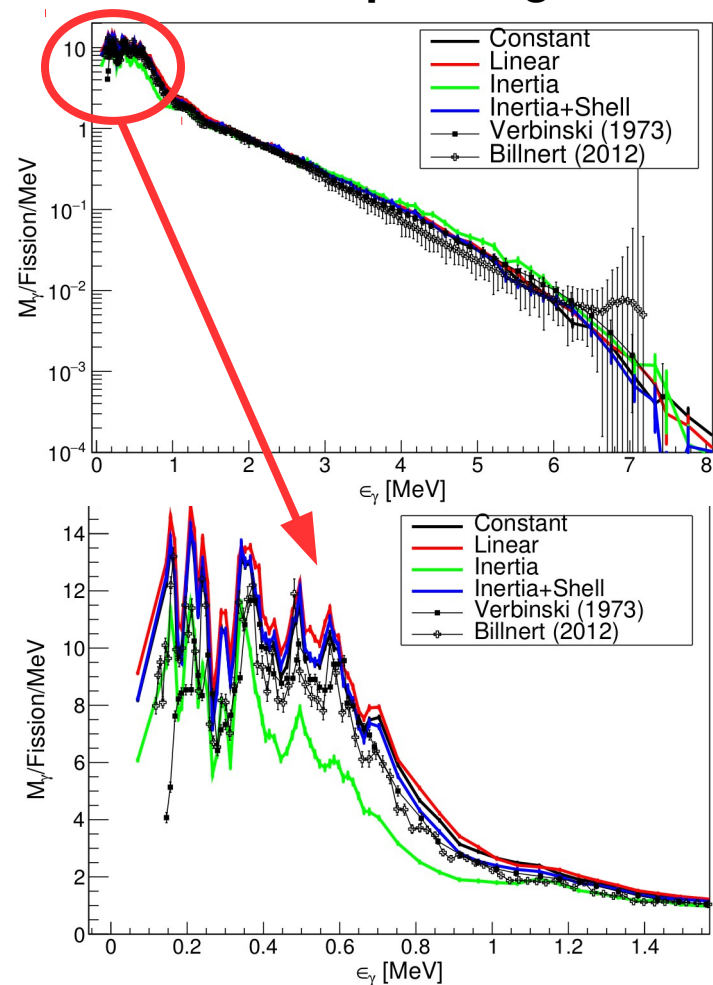
- Spectres neutrons et gammas
- Multiplicités neutrons et gammas
- Énergies moyennes
- Corrélations entre diverses observables

Modèles de spin cut-off décrivant J_{initial} :

$$P_{L,H}(J_{L,H}) = \frac{(2J+1)}{2\sigma_{L,H}^2} e^{-\frac{(J+1/2)^2}{2\sigma_{L,H}^2}}$$



Observable : spectre gamma



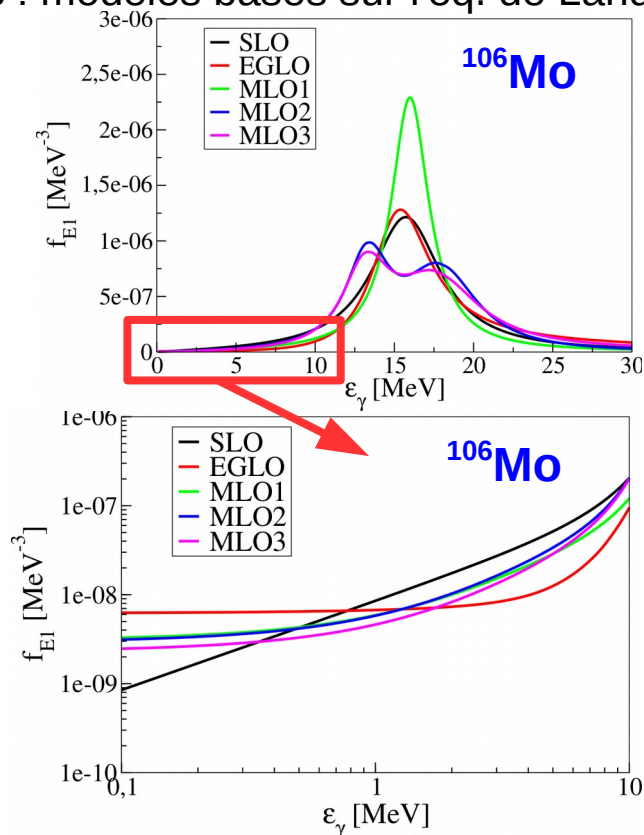
⇒ Lorsque la valeur de J_{initial} diminue, moins de gamma de faible énergie émis

Modèles de fonction de force gamma :

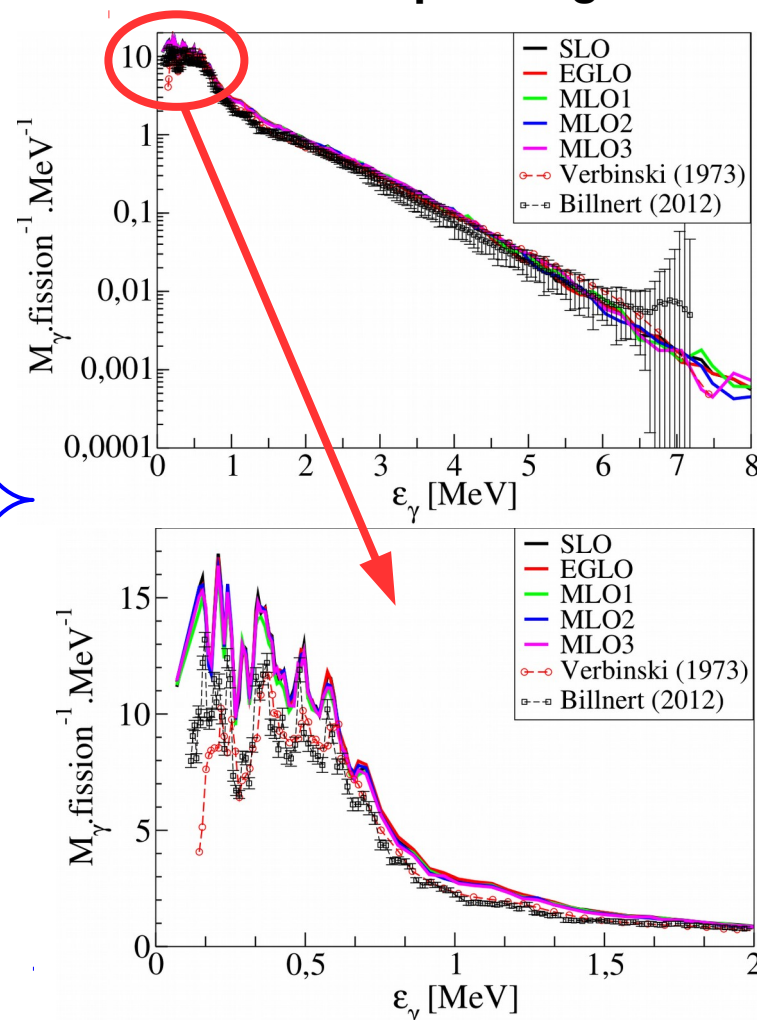
$$P_\gamma \propto f_{XL}(i, \epsilon_\gamma) \epsilon_\gamma^{2L+1} \rho_f$$

SLO/EGLO : modèles empiriques

MLOs : modèles basés sur l'éq. de Landau-Vlasov



Observable : spectre gamma



⇒ Pas d'impact des fonctions de force gamma sur les spectres gammas

Perspectives :

- Tests de l'influence des densités de niveaux microscopiques HFB : $\rho(E, J, \pi)$ **(en cours)**
- Étude systématique de l'évolution des propriétés des particules émises en fonction de l'énergie initiale du système : $^{238}\text{U}(n, f)$ pour $E_n \in [0.9 ; 5.8]$ MeV

Besoin de données :

- Données d'entrée : $Y(A_{\text{pré}})$, $KE(A)$
- $\bar{\nu}(A)$, PFNS, PFGS ...
- Pour un panel de noyaux sur une large gamme en énergie

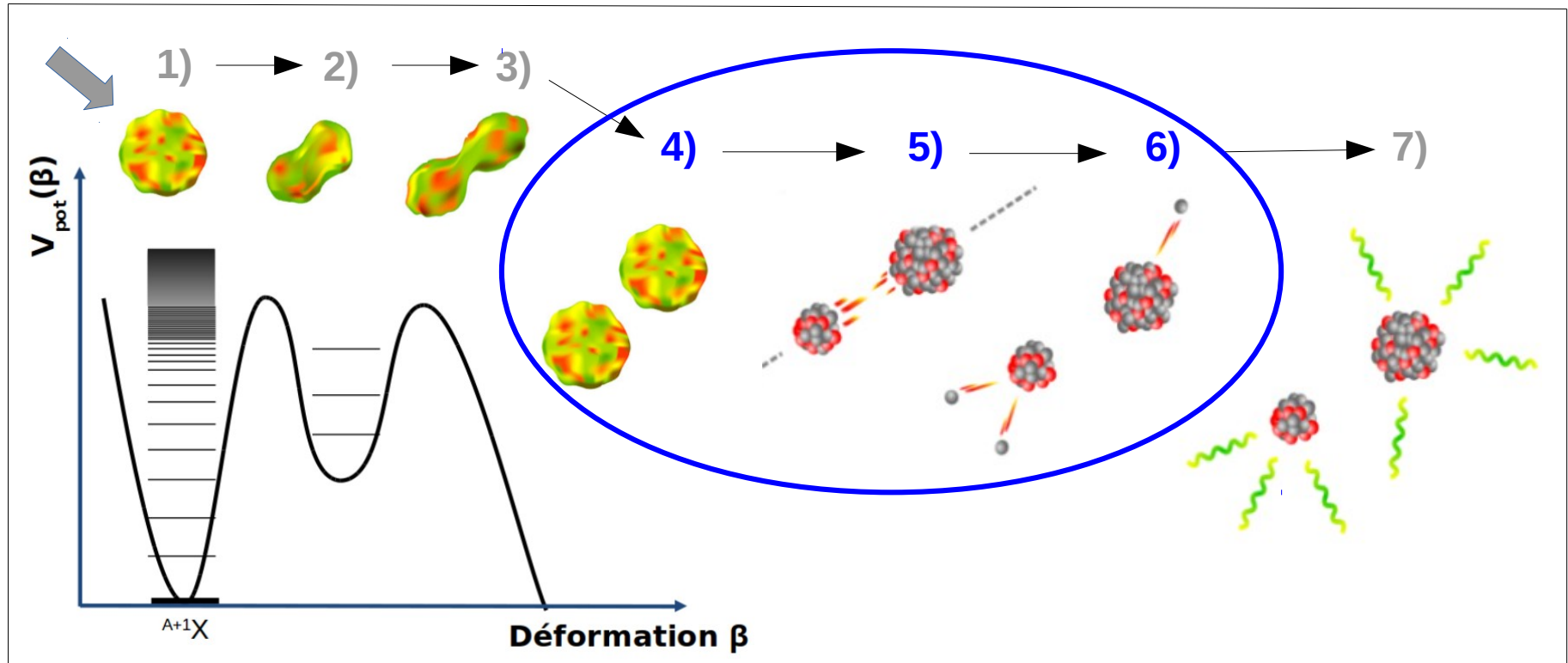
Installation de **FALSTAFF @NFS**

1) Formation du
noyau composé

3) Apparition d'un col
Point selle

5) Répulsion coulombienne
Énergie cinétique (KE)

7) Émission de γ
Nombre, énergie, Θ ...



2) Déformation
Section efficace

4) Rupture du col
Point de scission
Rendement en masse et en charge

6) Émission de neutrons
Nombre, énergie, Θ ...

Étude de la fission **induite par neutron** : $n + {}^A\text{X} \rightarrow {}^{A+1}\text{X}^* \rightarrow \text{FF}_L + \text{FF}_H$

✓ **connaissance de l'état initial** du noyau fissionnant

▶ **faible énergie cinétique** des fragments : $\text{FF}_L \sim 110 \text{ MeV}$ et $\text{FF}_H \sim 80 \text{ MeV}$

⇒ forte interaction avec la matière

⇒ **importante correction de perte d'énergie**

⇒ **difficulté d'identification des FFs**

Étude de la fission **induite par neutron** : $n + {}^A\text{X} \rightarrow {}^{A+1}\text{X}^* \rightarrow \text{FF}_L + \text{FF}_H$

✓ **connaissance de l'état initial** du noyau fissionnant

▶ **faible énergie cinétique** des fragments : $\text{FF}_L \sim 110 \text{ MeV}$ et $\text{FF}_H \sim 80 \text{ MeV}$

⇒ forte interaction avec la matière

⇒ **importante correction de perte d'énergie**

⇒ **difficulté d'identification des FFs**

Systèmes étudiés :

Noyaux : ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{237}\text{Np}$...

Énergies des neutrons : $\sim 100 \text{ keV}$ à 40 MeV

} **@NFS (SPIRAL2)**

Étude de la fission **induite par neutron** : $n + {}^AX \rightarrow {}^{A+1}X^* \rightarrow FF_L + FF_H$

✓ **connaissance de l'état initial** du noyau fissionnant

► **faible énergie cinétique** des fragments : $FF_L \sim 110$ MeV et $FF_H \sim 80$ MeV

⇒ forte interaction avec la matière

⇒ **importante correction de perte d'énergie**

⇒ **difficulté d'identification des FFs**

Systèmes étudiés :

Noyaux : ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{237}\text{Np}$...

Énergies des neutrons : ~ 100 keV à 40 MeV

} **@NFS (SPIRAL2)**

⇒ faisceaux de neutrons $\Phi_n = 10^6$ n/cm²/s
section efficace $\sigma_{(n,f)} \sim 0.01 - 1$ barn

} ► Faible taux de réaction

Étude de la fission **induite par neutron** : $n + {}^AX \rightarrow {}^{A+1}X^* \rightarrow FF_L + FF_H$

✓ **connaissance de l'état initial** du noyau fissionnant

► **faible énergie cinétique** des fragments : $FF_L \sim 110$ MeV et $FF_H \sim 80$ MeV

⇒ forte interaction avec la matière

⇒ **importante correction de perte d'énergie**

⇒ **difficulté d'identification des FFs**

Systèmes étudiés :

Noyaux : ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{237}\text{Np}$...

Énergies des neutrons : ~ 100 keV à 40 MeV

@NFS (SPIRAL2)

⇒ faisceaux de neutrons $\Phi_n = 10^6$ n/cm²/s
section efficace $\sigma_{(n,f)} \sim 0.01 - 1$ barn

► **Faible taux de réaction**

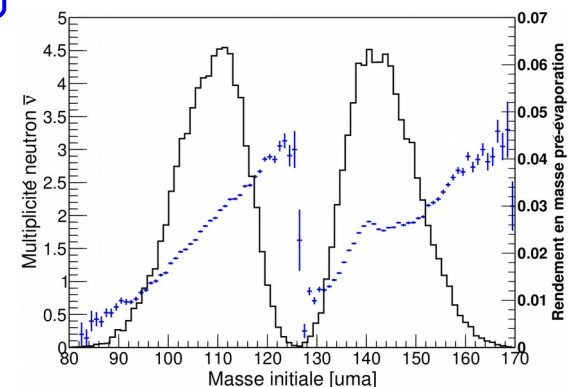
Observables d'intérêt :

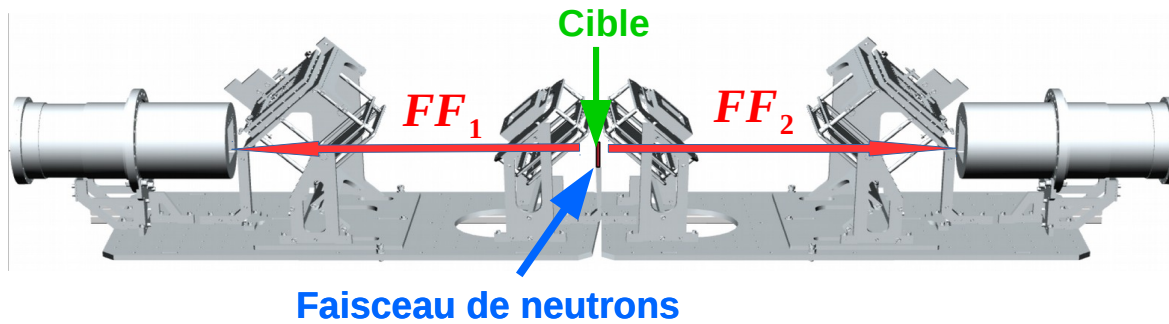
→ Masse avant évaporation de neutron **A_{avant}**

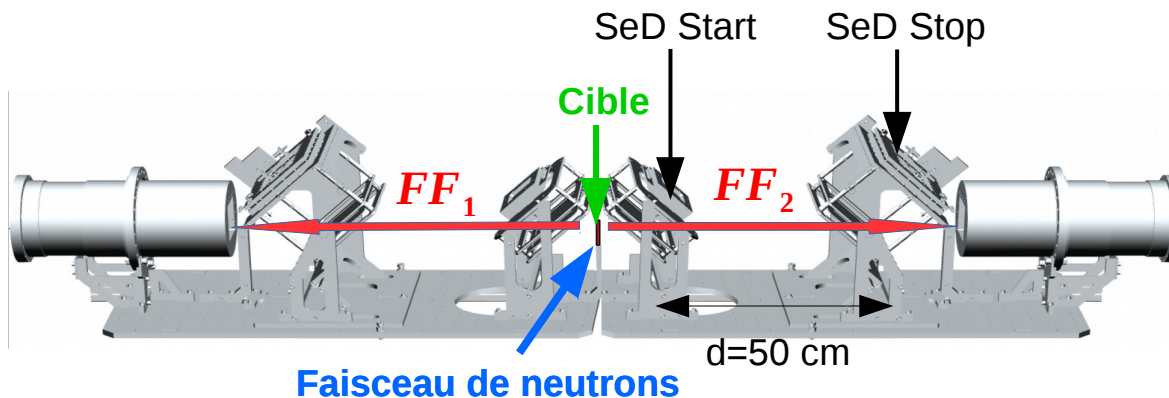
→ Masse après évaporation de neutron **A_{après}**

⇒ Multiplicité neutron **$\bar{\nu}(A)$**

→ Énergie cinétique **KE**







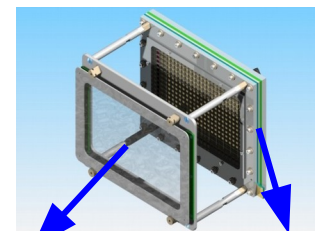
A^{avant} : Méthode 2V = mesures des vitesses en coïncidence

Technique du temps de vol (TOF)

⇒ résolution temporelle $\sigma_t \sim 120 \text{ ps}$

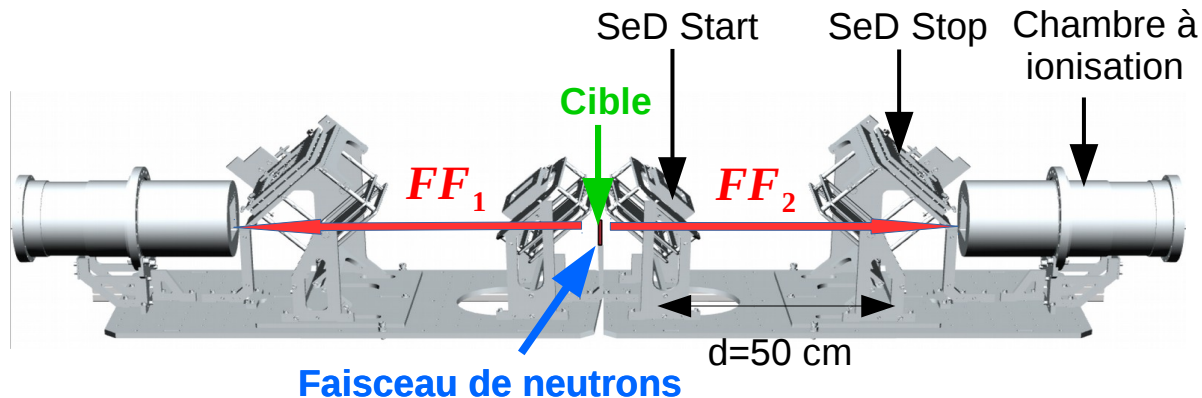
⇒ résolution spatiale $\sigma_{x,y} \sim 1 \text{ mm}$

Détecteurs SeDs



Feuille émissive

Détecteur d'électrons



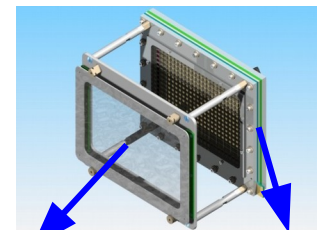
A^{avant} : Méthode 2V = mesures des vitesses en coïncidence

Technique du temps de vol (TOF)

⇒ résolution temporelle $\sigma_t \sim 120 \text{ ps}$

⇒ résolution spatiale $\sigma_{x,y} \sim 1 \text{ mm}$

Détecteurs SeDs



Feuille émissive

Détecteur d'électrons

A^{après} : Méthode EV = mesures de vitesse et d'énergie

⇒ résolution en énergie $\Delta E/E \sim 1 \%$

prise en compte des pertes d'énergie

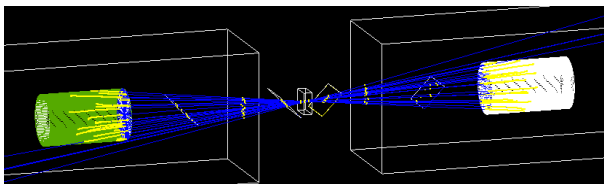
⇒ connaissance des épaisseurs traversées

⇒ identification de la charge nucléaire **Z**

Chambre à ionisation axiale

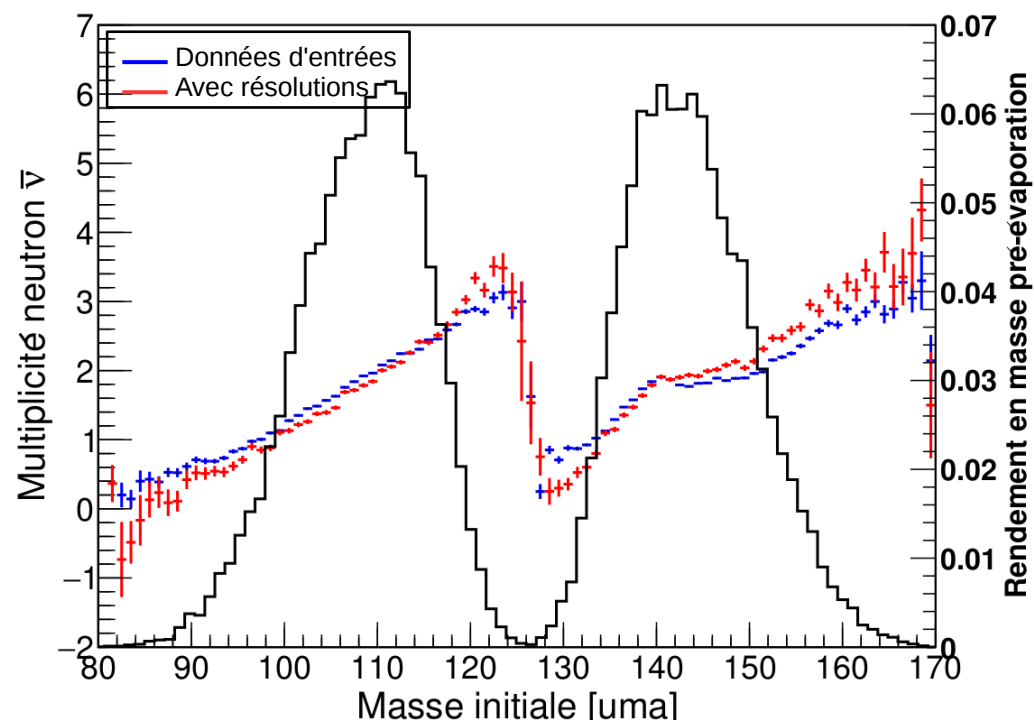
Validation des choix expérimentaux

1/ Simulation du dispositif avec GEANT4



2/ Analyse des données

⇒ reconstruction de A^{avant} et $A^{\text{après}}$
 ⇒ $\bar{\nu}(A^{\text{avant}})$



⇒ Les données d'entrées et reconstruites sont comparables

⇒ **validation des détecteurs (résolutions)**

Importance de l'épaisseur des matériaux

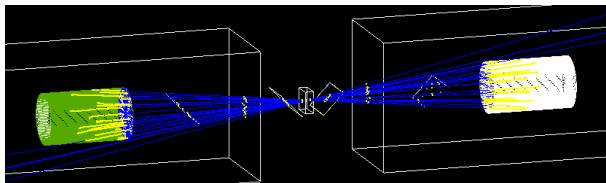
Épaisseur constructeur :

⇒ $E_p = 0.5 \mu\text{m} \pm 20 \%$

→ Limite basse → $E_p = 0.4 \mu\text{m}$

→ Limite haute → $E_p = 0.6 \mu\text{m}$

1/ Simulation GEANT4, avec des matériaux d'épaisseur **0.5 μm**



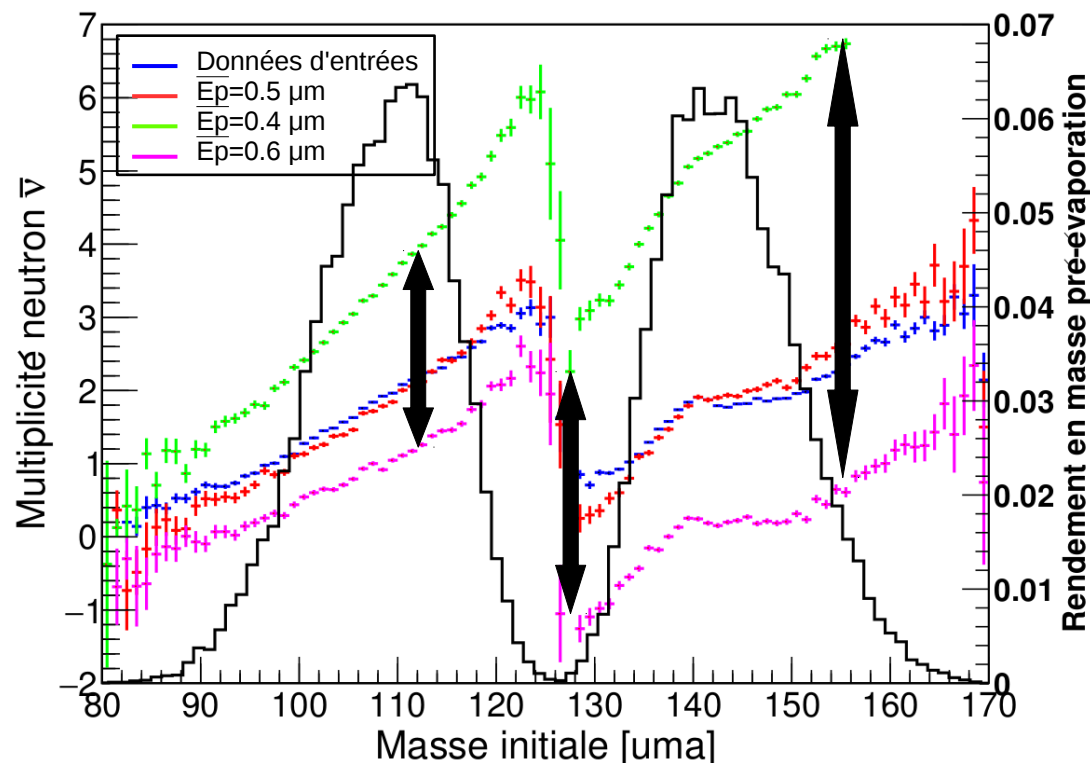
2/ Analyse des données

⇒ $E_p = 0.5 \mu\text{m}$ **VALIDE**

⇒ $E_p = 0.4 \mu\text{m}$ **NON VALIDE**

⇒ $E_p = 0.6 \mu\text{m}$ **NON VALIDE**

⇒ **Tolérance du constructeur trop importante pour se fier à son épaisseur moyenne lors de la reconstruction des observables**



Cartographie d'une feuille émissive :

Banc de mesure d'épaisseur : Technique de transmission alpha

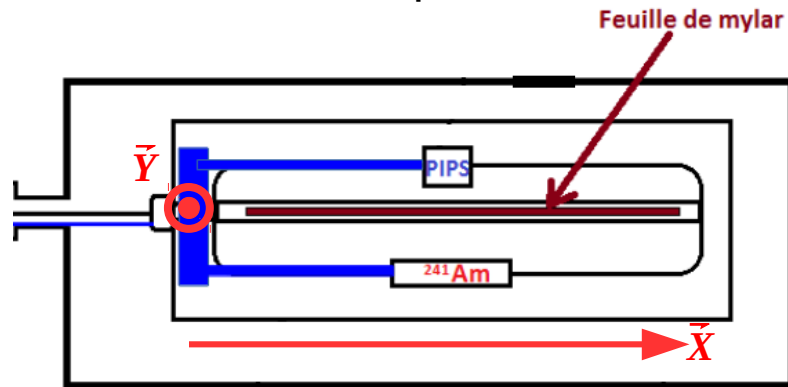
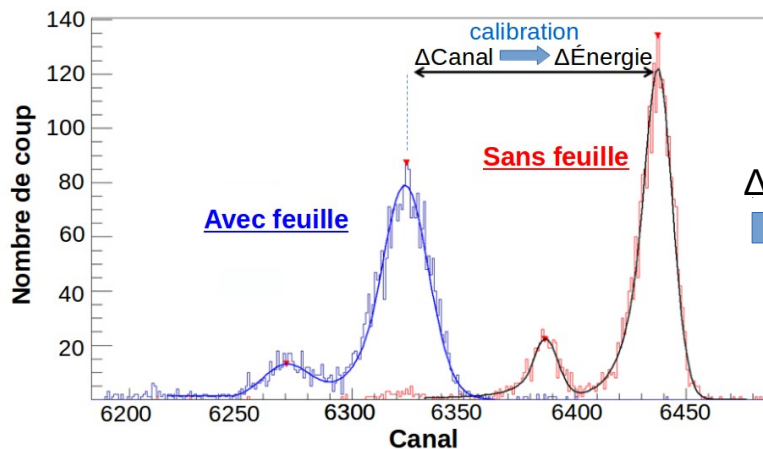
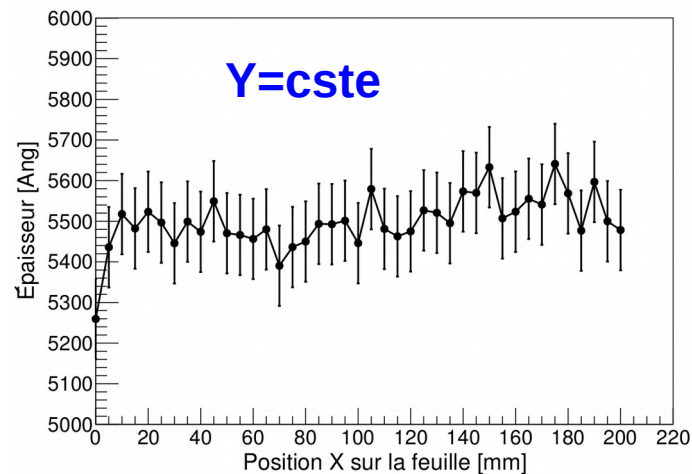


Schéma du dispositif de mesure d'épaisseur



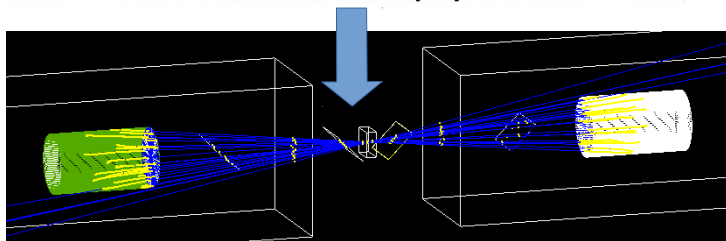
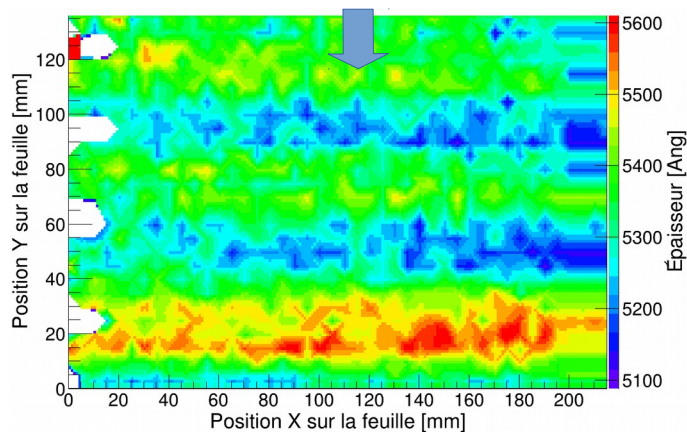
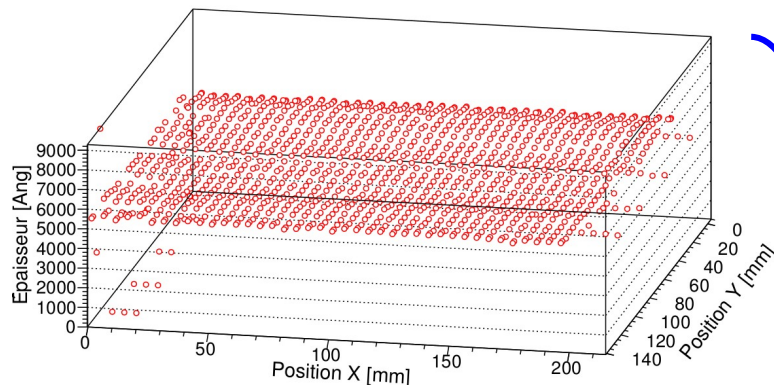
$\Delta E \Rightarrow \Delta\text{épaisseur}$

SRIM



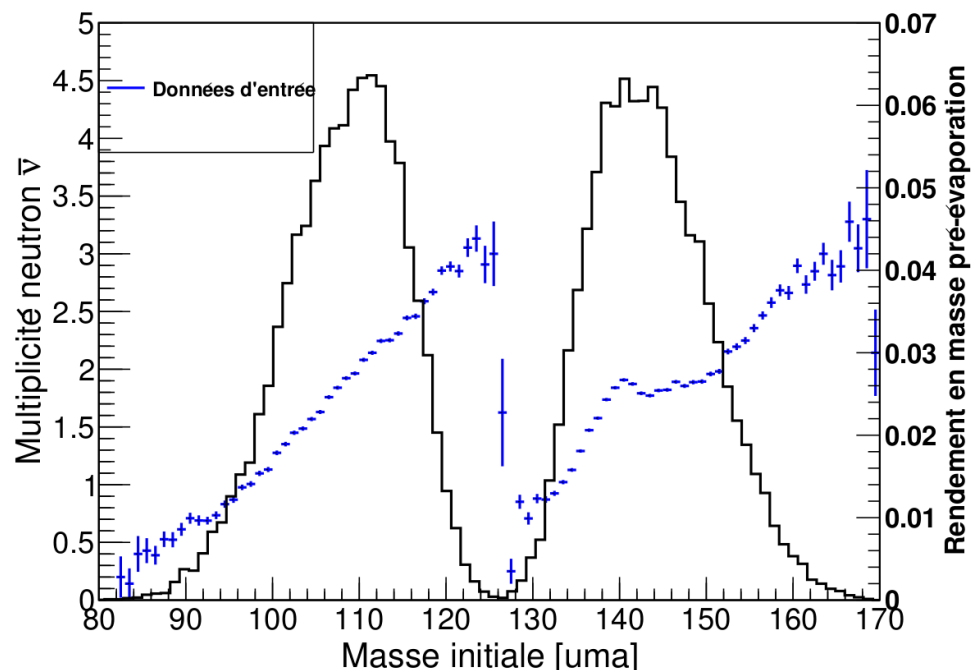
IMPACT DE L'HOMOGÉNÉITÉ DES MATÉRIAUX SUR LES OBSERVABLES PHYSIQUES

Mesures expérimentales → Analyses



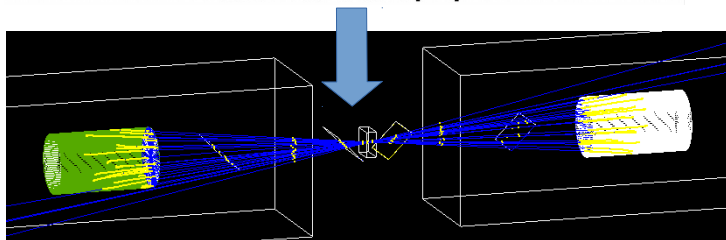
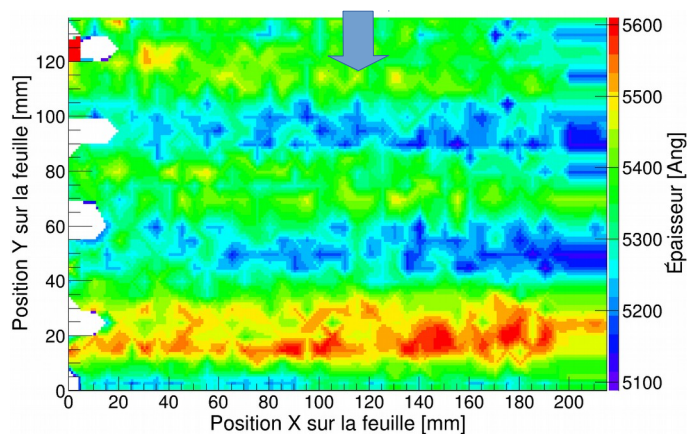
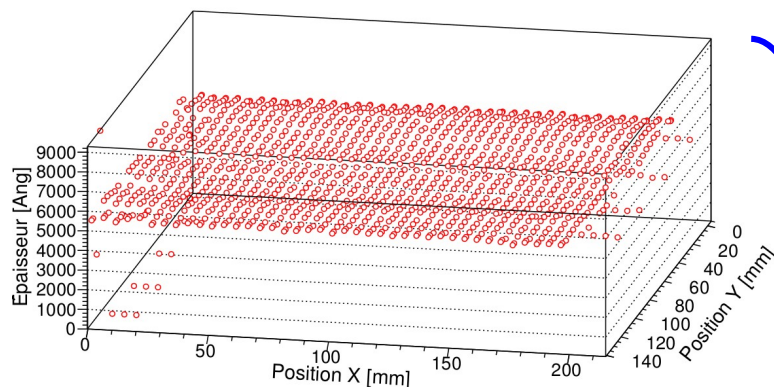
Mesures expérimentales : $\Delta X = 5$ mm

Impact du pas de mesure sur la reconstruction
des observables :



IMPACT DE L'HOMOGÉNÉITÉ DES MATÉRIAUX SUR LES OBSERVABLES PHYSIQUES

Mesures expérimentales → Analyses

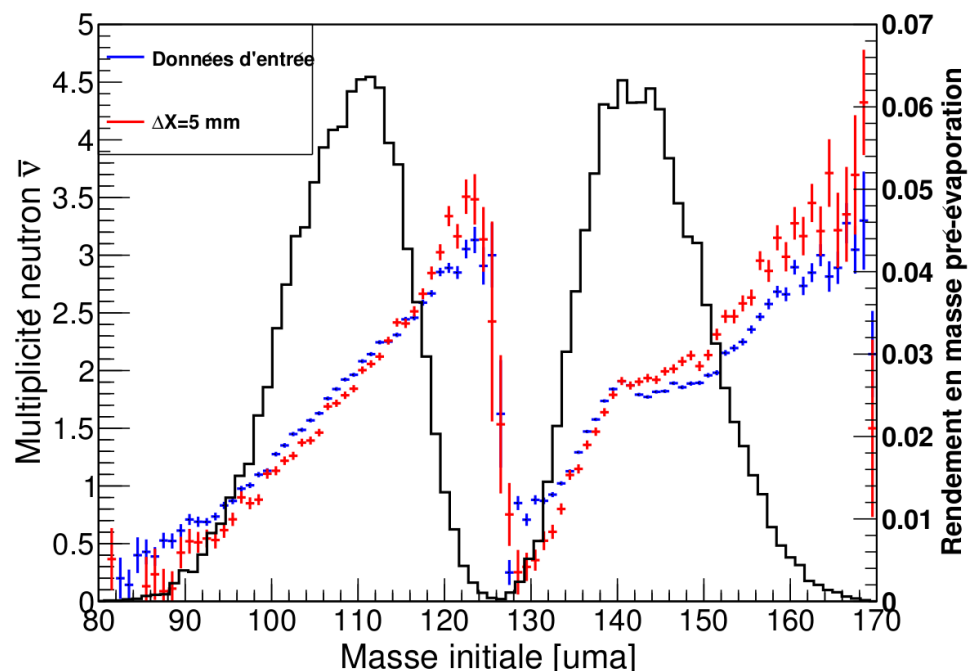


Mesures expérimentales : $\Delta X = 5$ mm

Impact du pas de mesure sur la reconstruction
des observables :

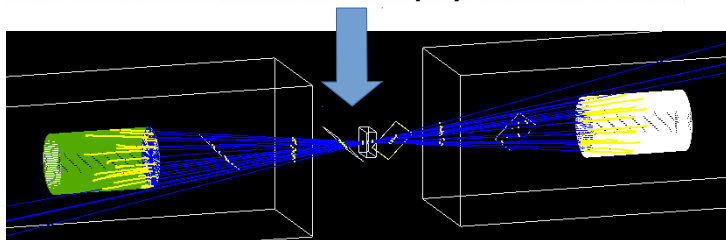
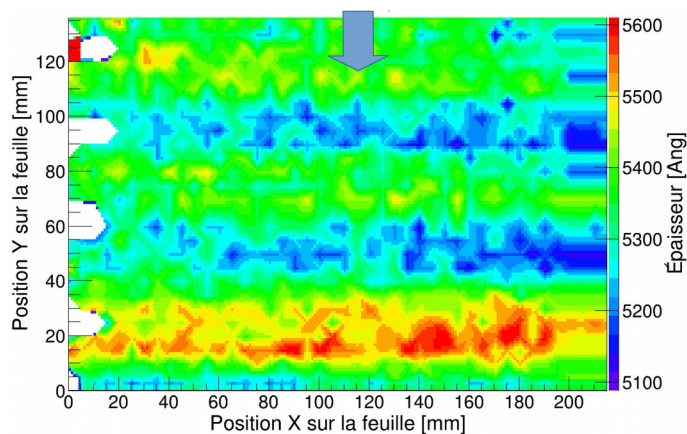
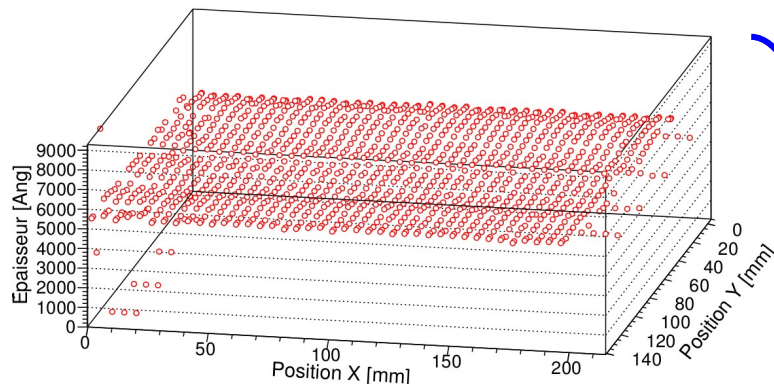
→ pas $\Delta X = 5$ mm

⇒ OK



IMPACT DE L'HOMOGÉNÉITÉ DES MATÉRIAUX SUR LES OBSERVABLES PHYSIQUES

Mesures expérimentales → Analyses



Mesures expérimentales : $\Delta X=5$ mm

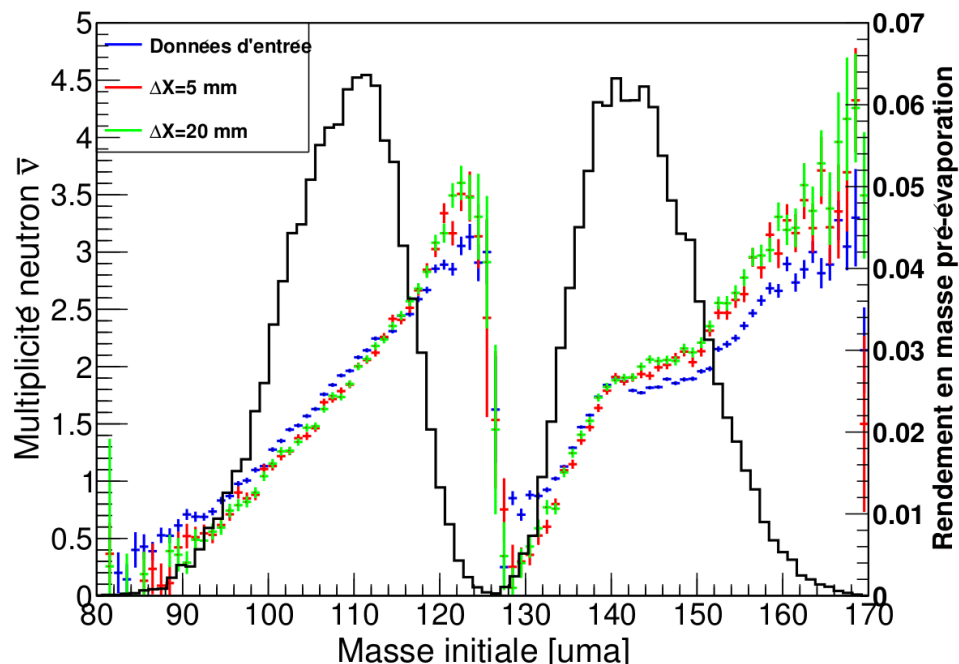
Impact du pas de mesure sur la reconstruction des observables :

→ pas $\Delta X=5$ mm

⇒ OK

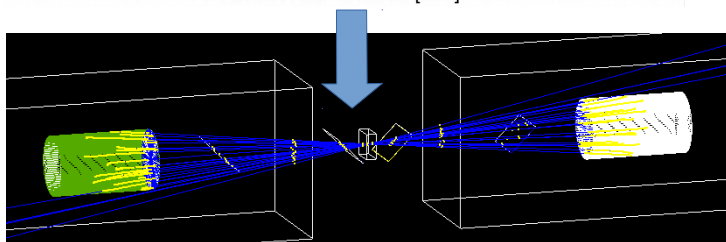
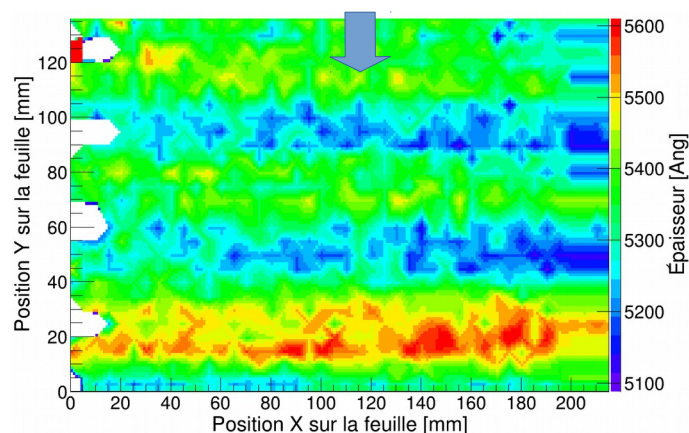
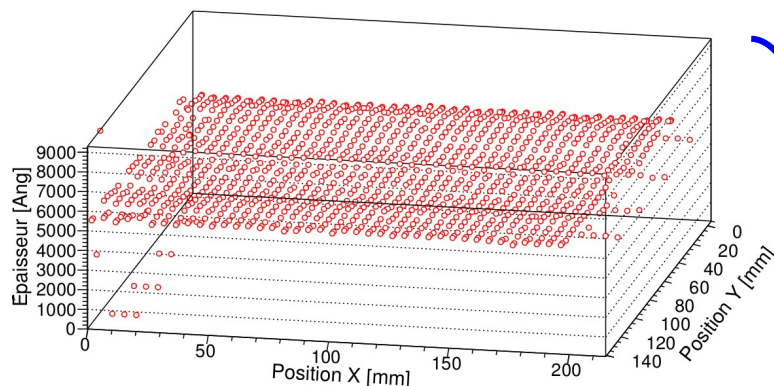
→ pas $\Delta X=20$ mm

⇒ OK



IMPACT DE L'HOMOGÉNÉITÉ DES MATÉRIAUX SUR LES OBSERVABLES PHYSIQUES

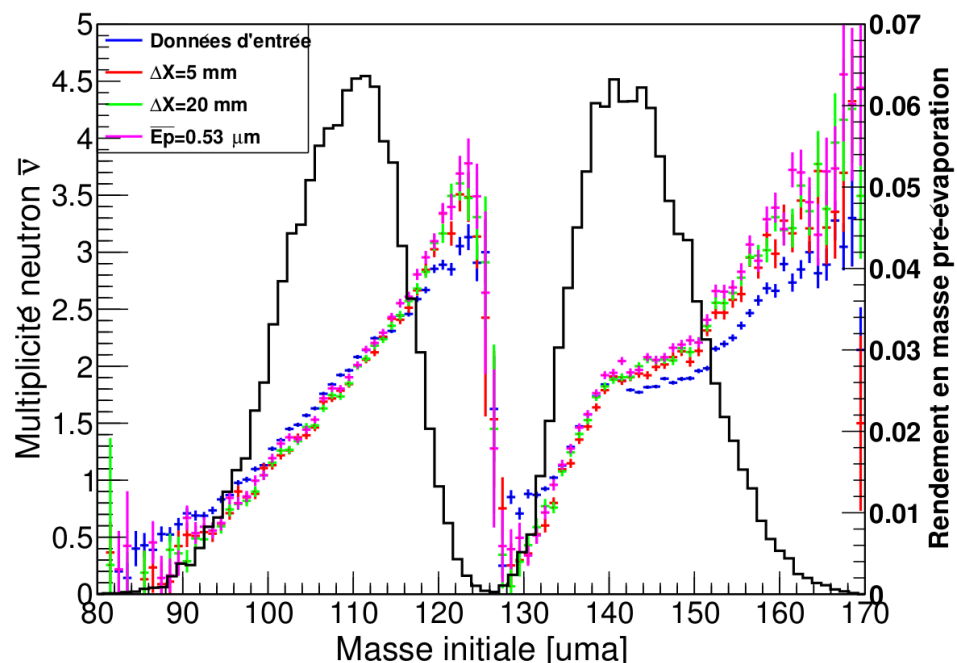
Mesures expérimentales → Analyses



Mesures expérimentales : $\Delta X=5$ mm

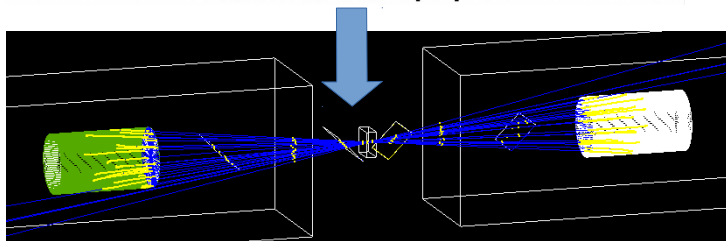
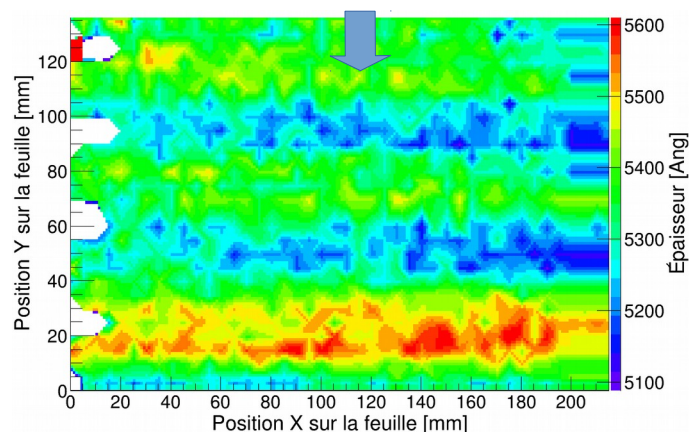
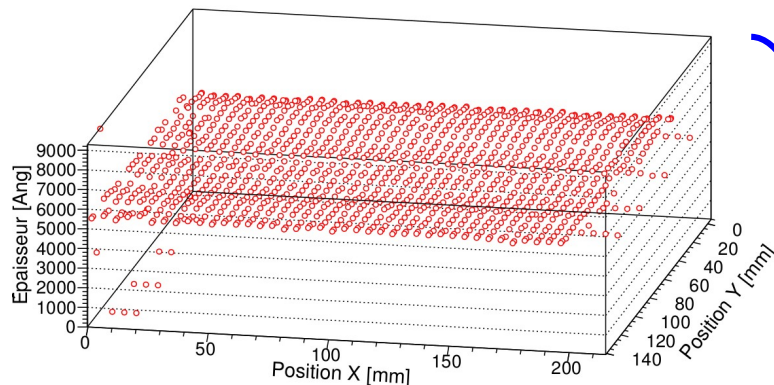
Impact du pas de mesure sur la reconstruction des observables :

- pas $\Delta X=5$ mm ⇒ OK
- pas $\Delta X=20$ mm ⇒ OK
- feuille homogène $ep=0.53$ μm ⇒ OK



IMPACT DE L'HOMOGÉNÉITÉ DES MATÉRIAUX SUR LES OBSERVABLES PHYSIQUES

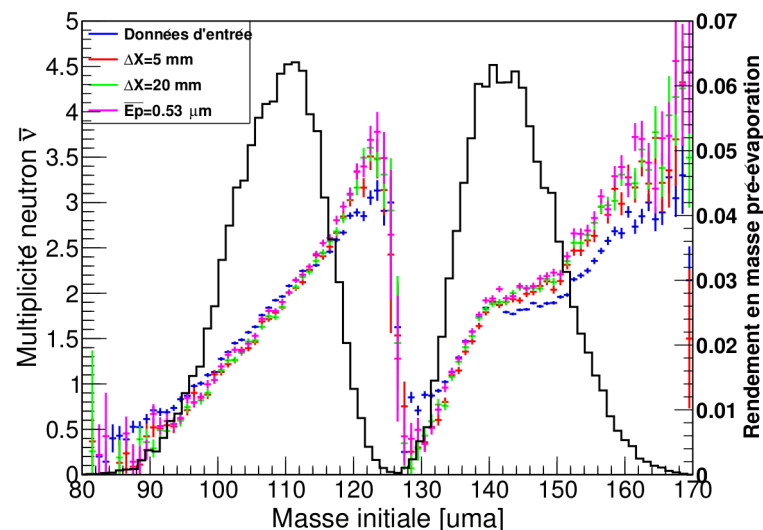
Mesures expérimentales → Analyses



Mesures expérimentales : $\Delta X=5$ mm

Impact du pas de mesure sur la reconstruction des observables :

- pas $\Delta X=5$ mm ⇒ OK
- pas $\Delta X=20$ mm ⇒ OK
- feuille homogène $ep=0.53$ μm ⇒ OK



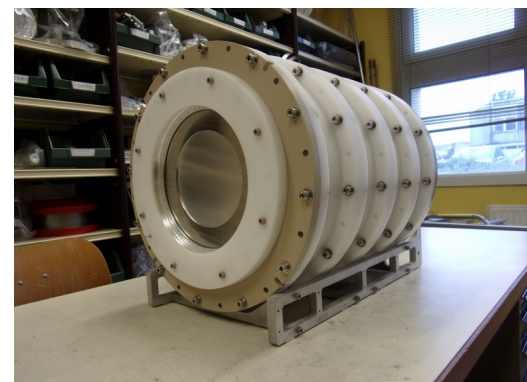
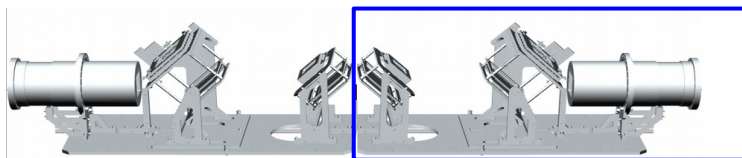
⇒ Nécessité de réaliser les mesures pour connaître l'épaisseur moyenne de la feuille, un pas de mesure de 20 mm suffit

Conclusions :

- Mise en place d'un dispositif de mesure d'épaisseur
- Étude de l'impact de l'homogénéité sur la reconstruction des observables
- Mise en place de la simulation GEANT4 et d'une analyse commune simulation/données expérimentales
- Mise en place du nouveau système d'acquisition d'un bras du dispositif FALSTAFF

Travail à réaliser :

- Intégration et caractérisation de la chambre à ionisation axiale
- Étalonnage du détecteur sous faisceaux d'ions
- Détermination d'une méthode permettant de caractériser la charge nucléaire Z
- Caractérisation du 1^{er} bras du dispositif



Chambre à ionisation (40x50 cm²)

MERCI DE VOTRE ATTENTION

D. Doré, E. Berthoumieux, A. Letourneau, E. Dupont, S. Panebianco, T. Materna
DRF/Irfu/SPhN

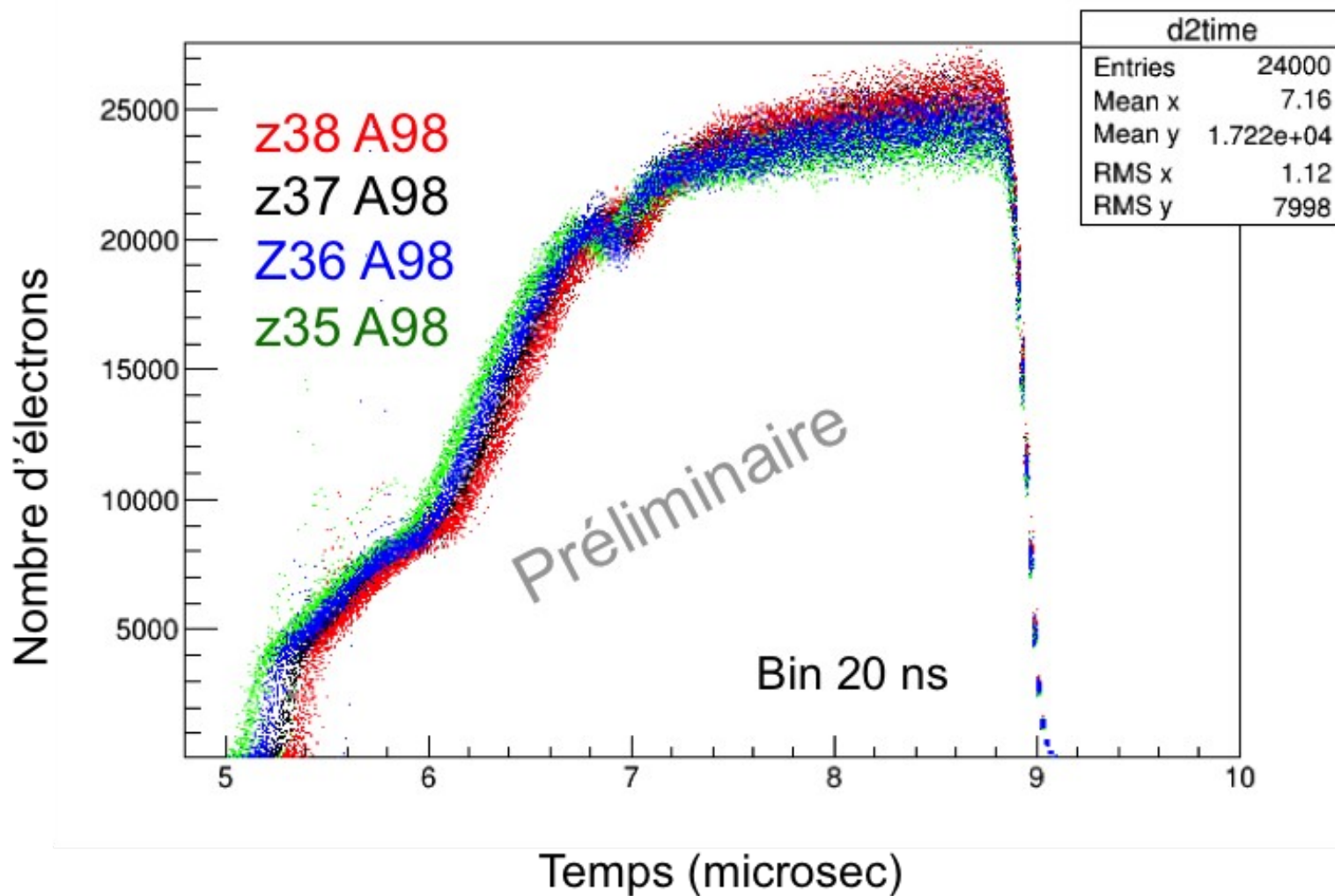
O. Litaize, O. Sérot
CEA-Cadarache/DEN/SPRC

P. Legou, M. Kebbiri, Y. Piret, J.P. Mols, M. Combet, M. Riallot
DRF/Irfu/Sédi

F. Farget, M.O. Frégeau, X. Ledoux, J. Pancin
GANIL,CEA/DRF-CNRS/IN2P3

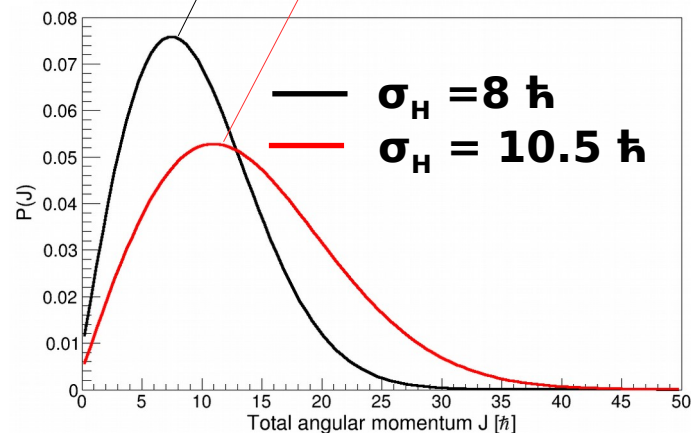
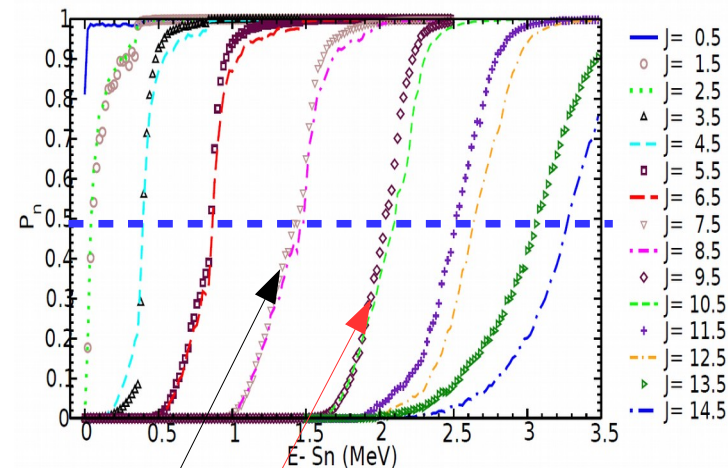
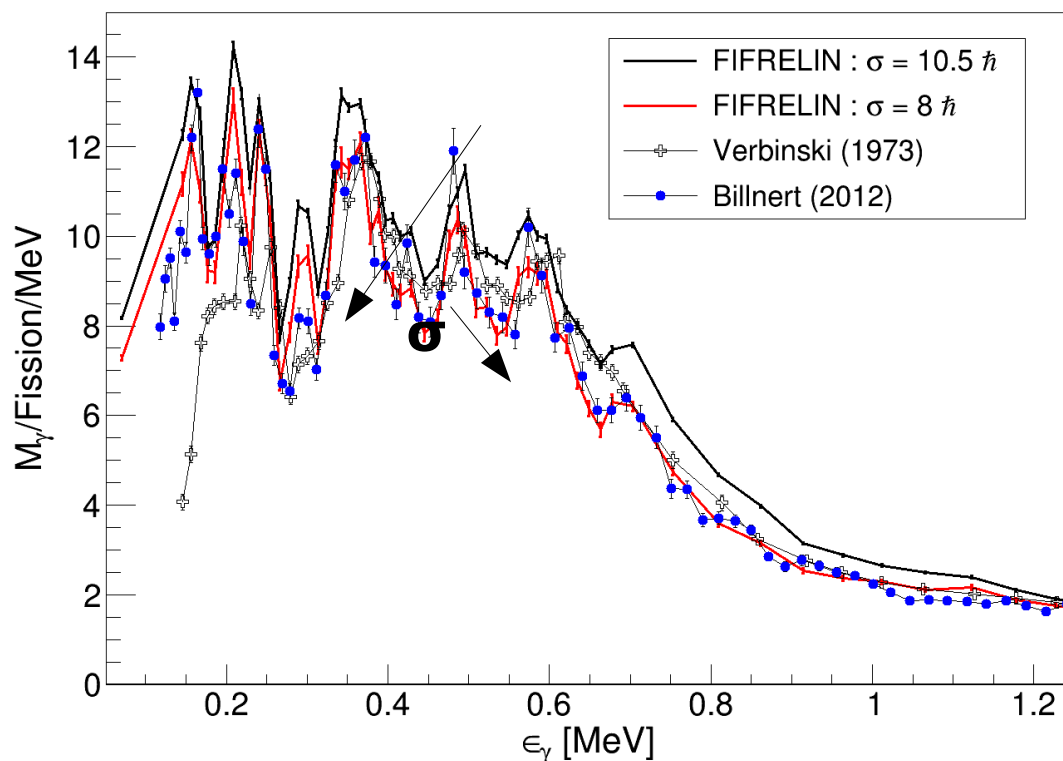
F.R. Lecolley
CNRS/IN2P/LPCC

S. Oberstedt
ER JRC IRMM, Geel, Belgium

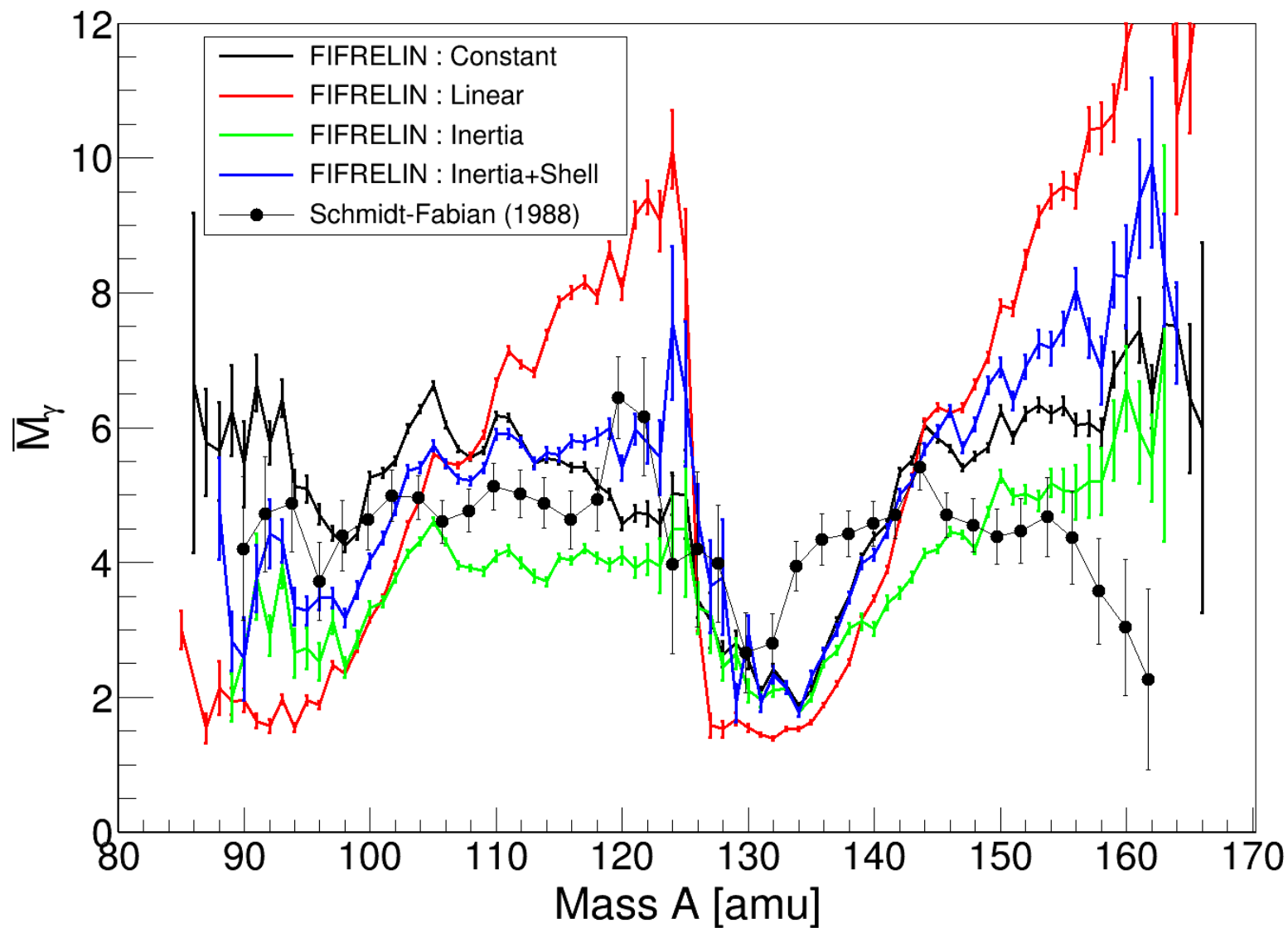


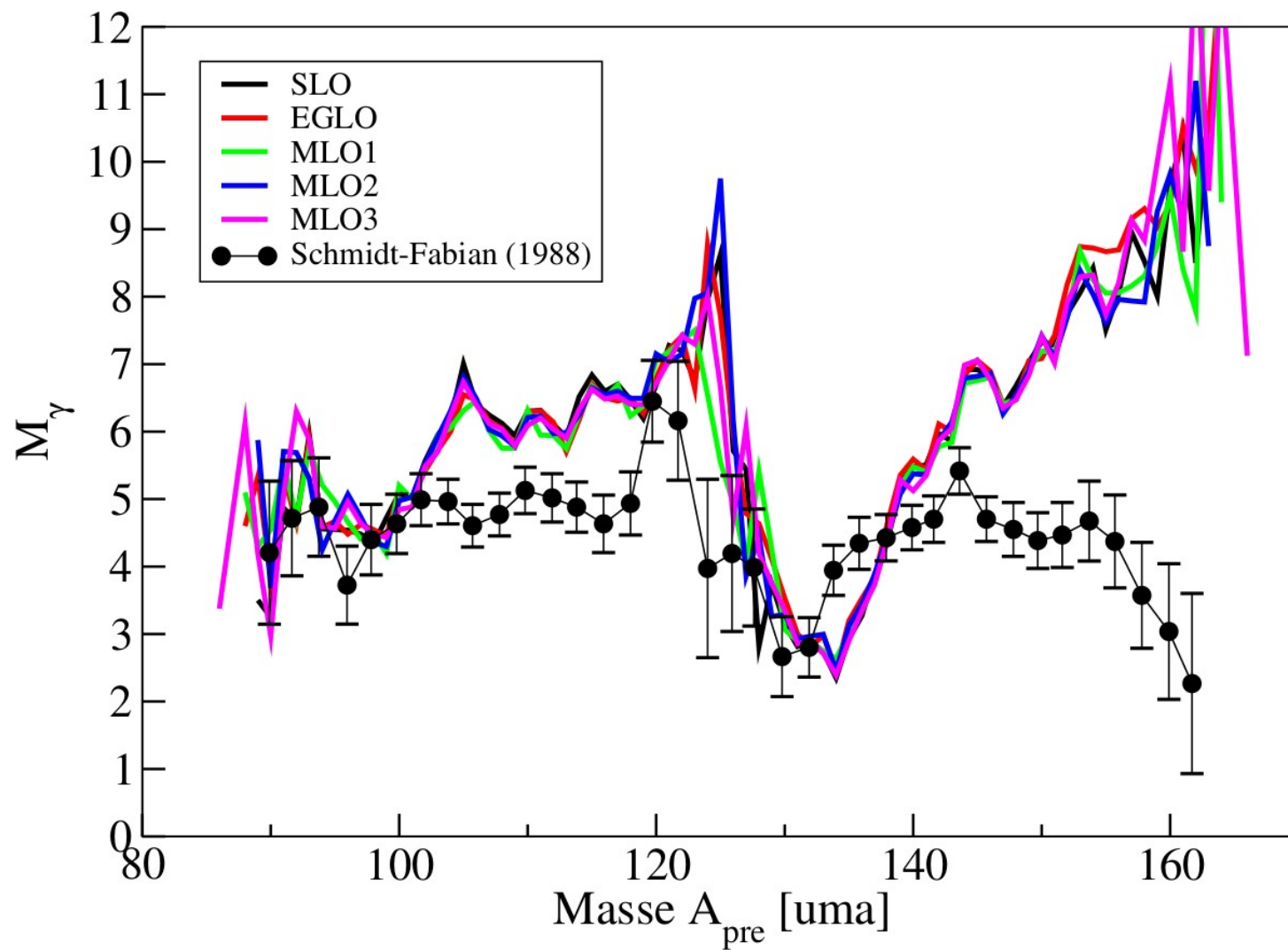
Cas d'école :

Influence du spin cut-off sur le spectre gamma avec le modèle **Constant**:



$\sigma \rightarrow J \rightarrow$ Moins de γ de faible énergie émis





b) Observables gammas moyennées:

| ²⁵² Cf | $\langle J_L \rangle$ [\hbar] | $\langle J_H \rangle$ [\hbar] | $\langle \varepsilon_\gamma \rangle$ [MeV] | $\langle E_\gamma^{\text{Tot}} \rangle$ [MeV] | $\langle M_\gamma^{\text{Tot}} \rangle$ |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|
| Verbinski (1973) | / | / | 0.88 ± 0.04 | 6.84 ± 0.3 | 7.80 ± 0.3 |
| Billnert (2012) | / | / | 0.80 ± 0.01 | 6.64 ± 0.08 | 8.30 ± 0.08 |
| Constant | 12.39 | 13.18 | 0.81 | 7.74 ± 0.01 | 9.40 ± 0.02 |
| Linear | 13.17 | 12.54 | 0.80 | 8.07 ± 0.01 | 9.99 ± 0.02 |
| Inertia | 8.00 | 10.45 | 0.90 | 6.29 ± 0.02 | 6.89 ± 0.03 |
| Inertia+Shell | 12.22 | 13.96 | 0.80 | 7.67 ± 0.02 | 9.46 ± 0.03 |

⇒ Résultats dépendants des paramètres expérimentaux: $E_{\gamma}^{\text{threshold}}$ et $T_{\text{coincidence}}$

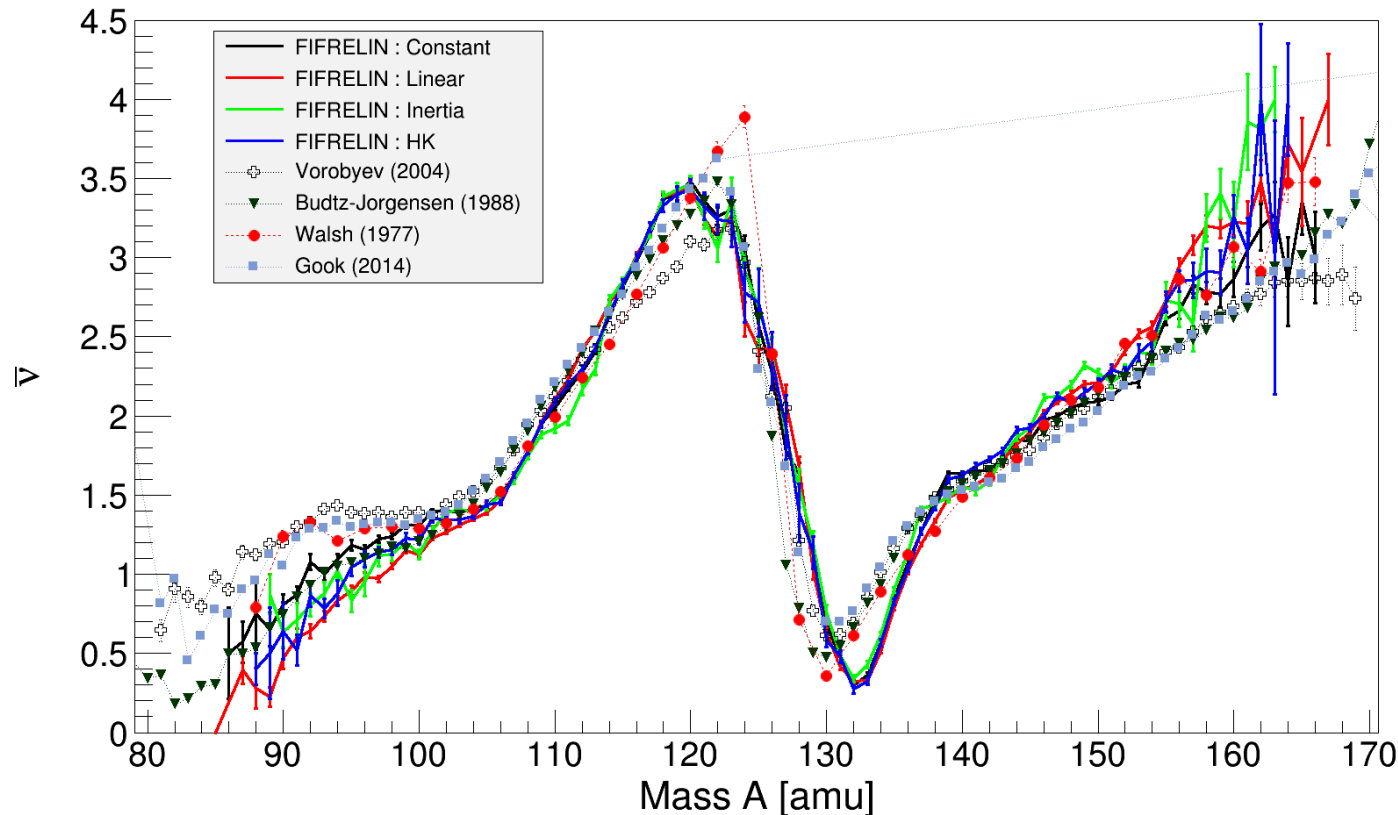
→ Études réalisées par Brunson (1982)

→ Calculs FIFRELIN réalisés avec $E_{\gamma}^{\text{threshold}} = 110$ keV et $T_{\text{coincidence}} = 3$ ns

→ Multiplicité gamma trop forte ~ 1γ

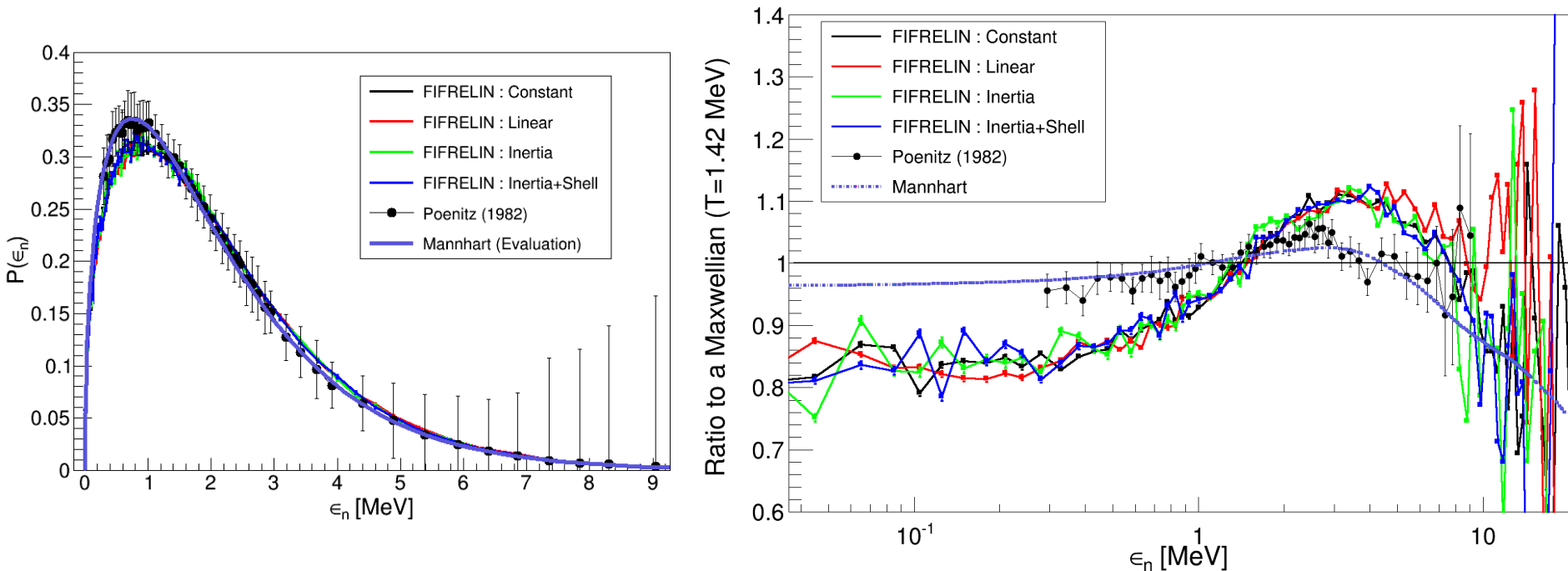
→ Énergie totale gamma trop forte ~ 1 MeV

III.d) Neutron multiplicity as a function of mass :



- ➔ Overall agreement
- ➔ Under-estimation (Light) and over-estimation (Heavy) for very asymmetric fragmentation
- ➔ Constant seems to better reproduce the data

b) Spectre neutron :



⇒ Les 4 modèles sont en accord entre eux
 ⇒ Spectres neutrons trop durs par rapport aux données expérimentales et évaluées