

# Technique de la cinématique inverse pour l'étude des rendements isotopiques des fragments de fission aux énergies GANIL

**Olivier DELAUNE**

**Université de Caen Basse-Normandie**

**Soutenance de thèse**

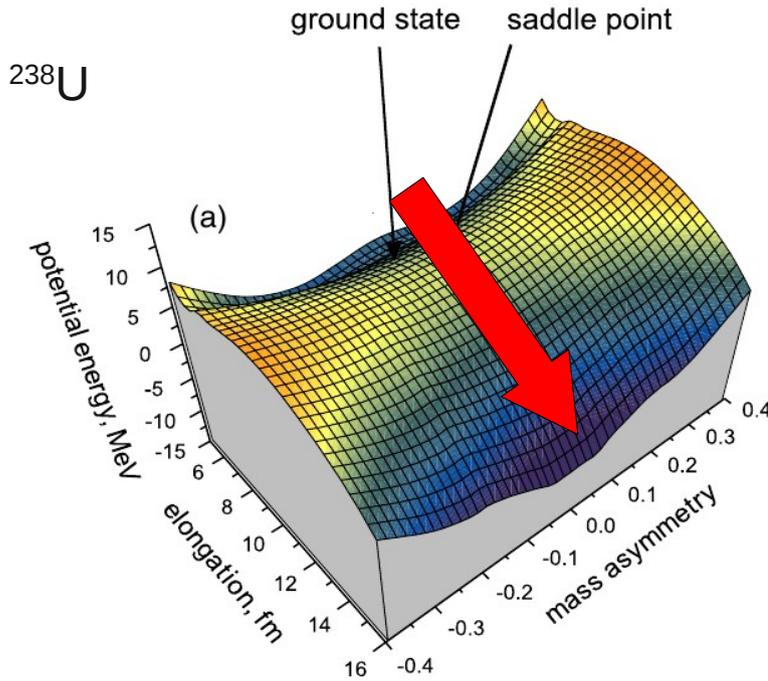
**sous la direction de Fanny FARGET et Abdelouahad CHBIHI  
Caen, mardi 30 octobre 2012**

# Plan

- ♦ Pourquoi et comment étudier la fission ?
- ♦ Fission induite par transfert et fusion avec VAMOS
- ♦ Fusion-fission avec LISE
- ♦ Résultats et discussion

# Description macro-microscopique de la fission

A. V. Karpov et al., J. Phys. G 35, 2008



Phénomène dynamique

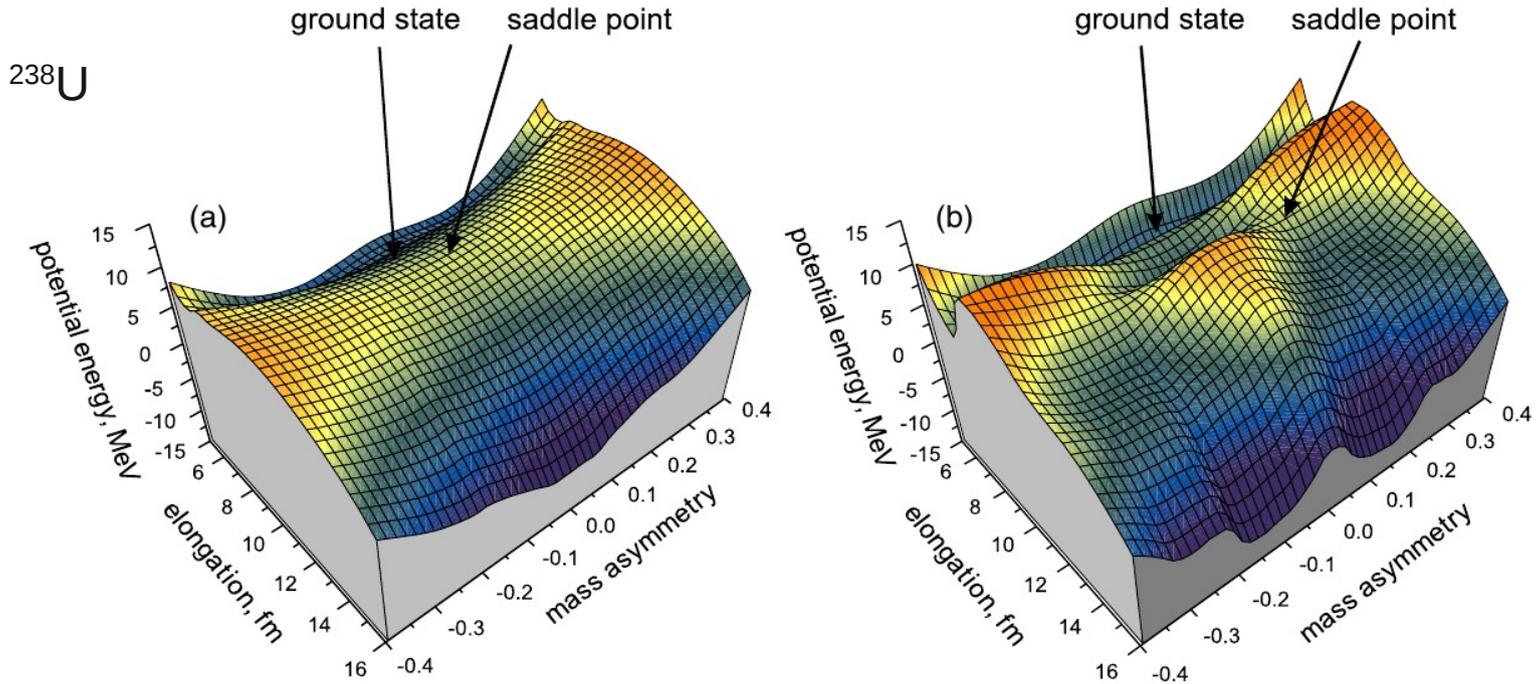
Compétition fission/évaporation

Modèle de la goutte liquide :

- > Fission symétrique
- > Déformation identique des deux fragments de fission

# Description macro-microscopique de la fission

A. V. Karpov et al., J. Phys. G 35, 2008



Modèle de la goutte liquide :

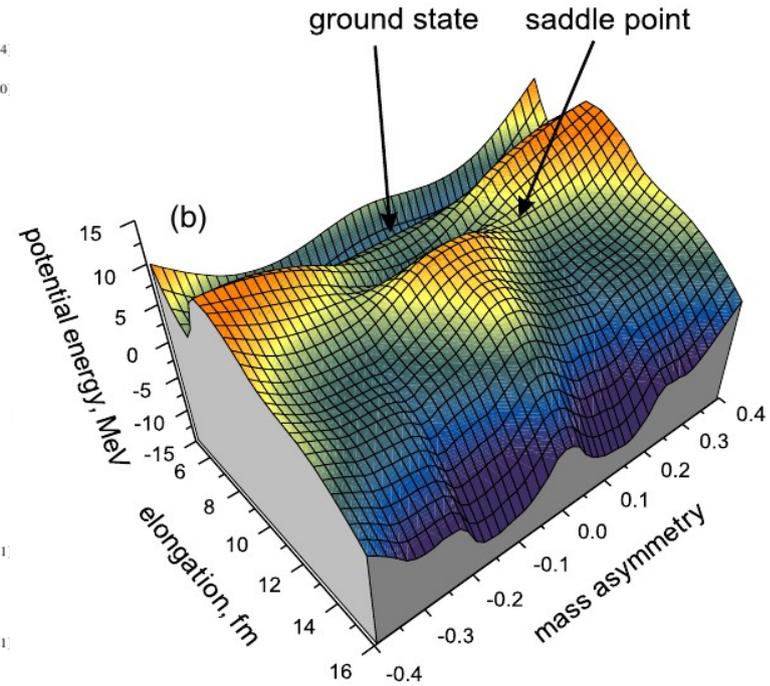
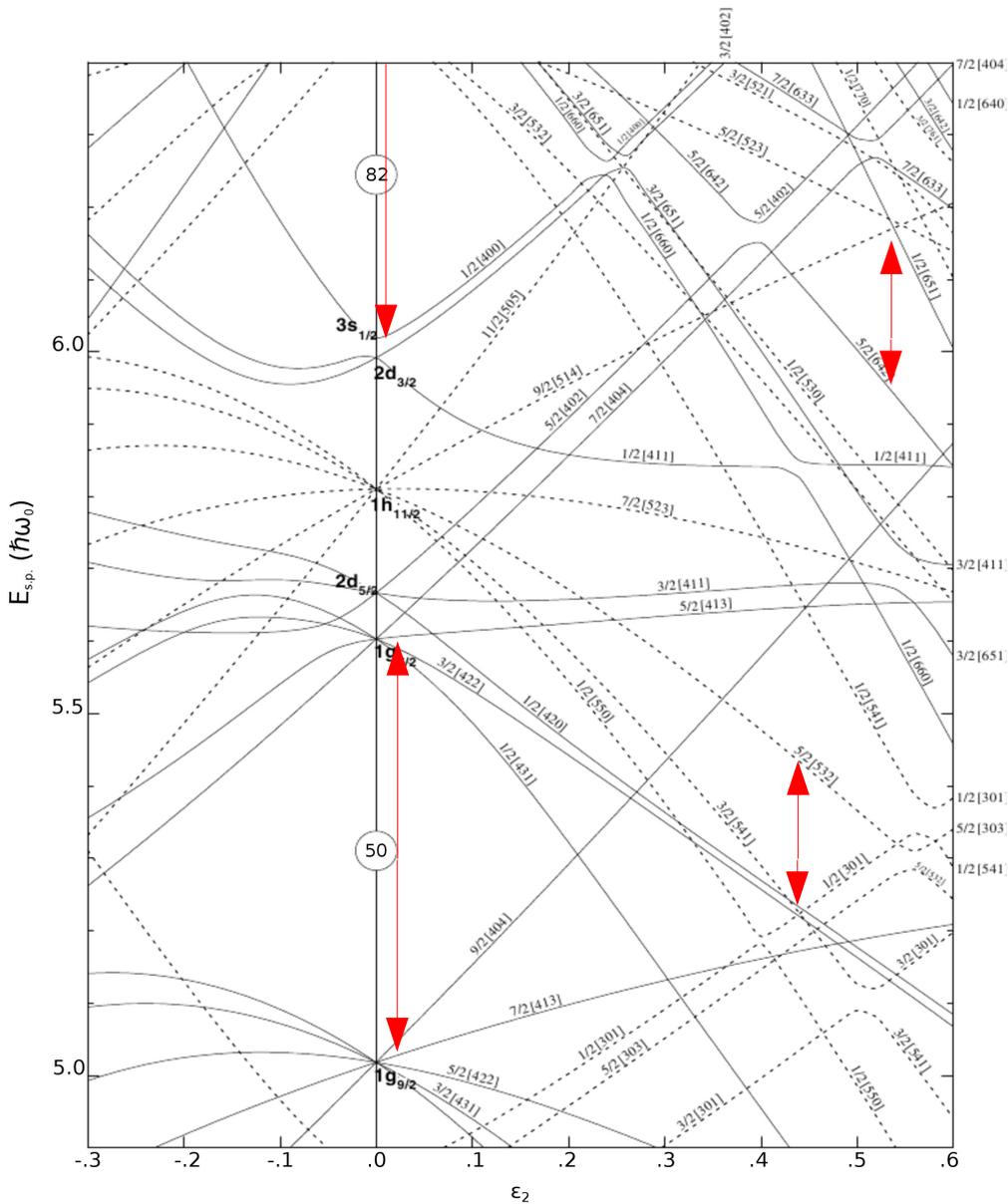
- > Fission symétrique
- > Déformation identique des deux fragments de fission

Prise en compte des effets de couches :

- > Minima de l'énergie potentielle modifiés
- > Fission asymétrique

# Description macro-microscopique de la fission

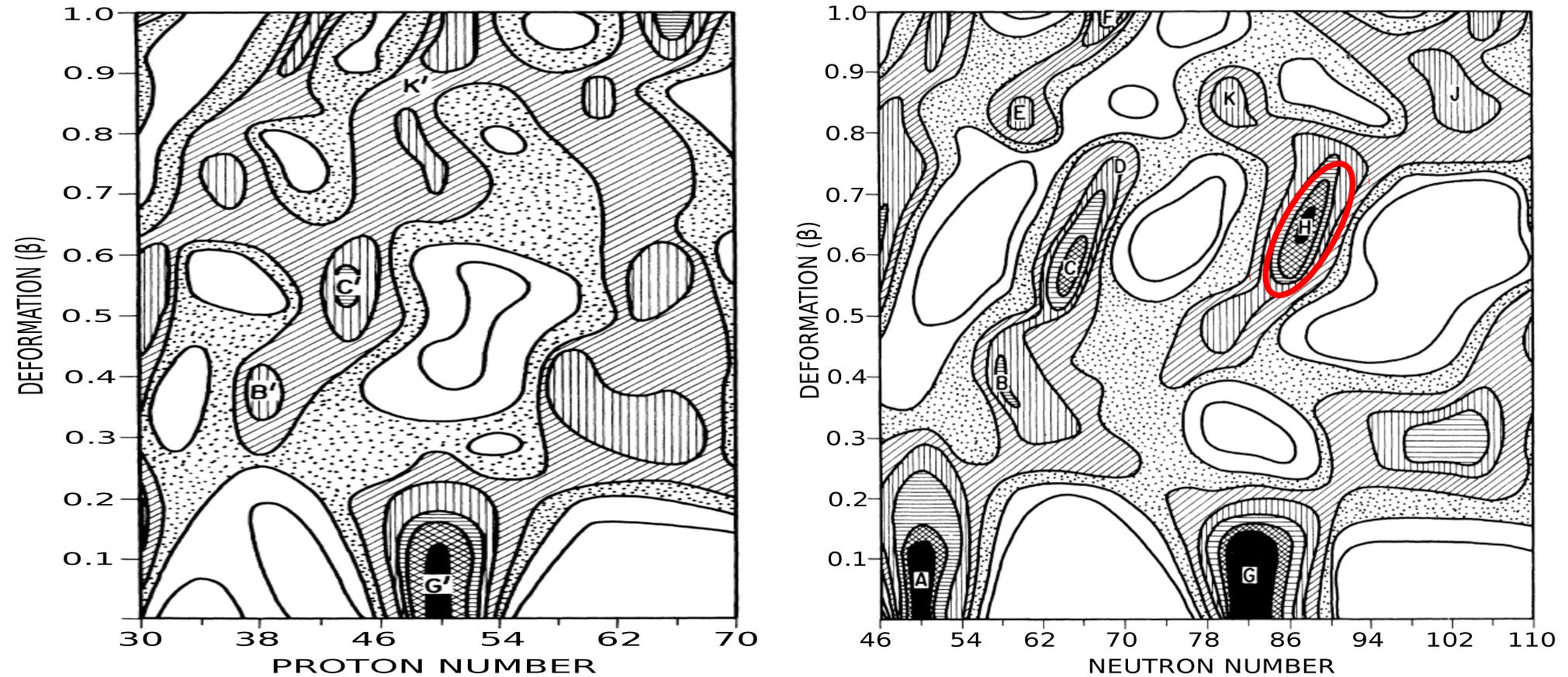
B. Singh et al., Nucl. Dat. Sh. 97, 2002



Prise en compte des effets de couches :  
 > Minima de l'énergie potentielle modifiés  
 > Fission asymétrique

Quels gaps en énergie à ces déformations ?

# Influence des gaps des couches proton et neutron

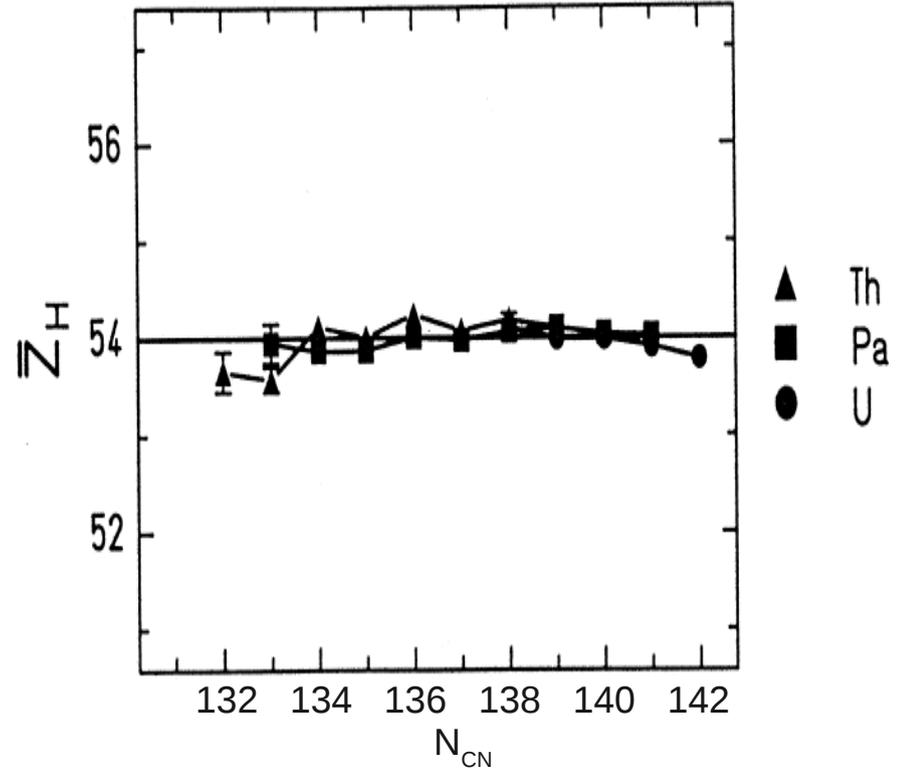
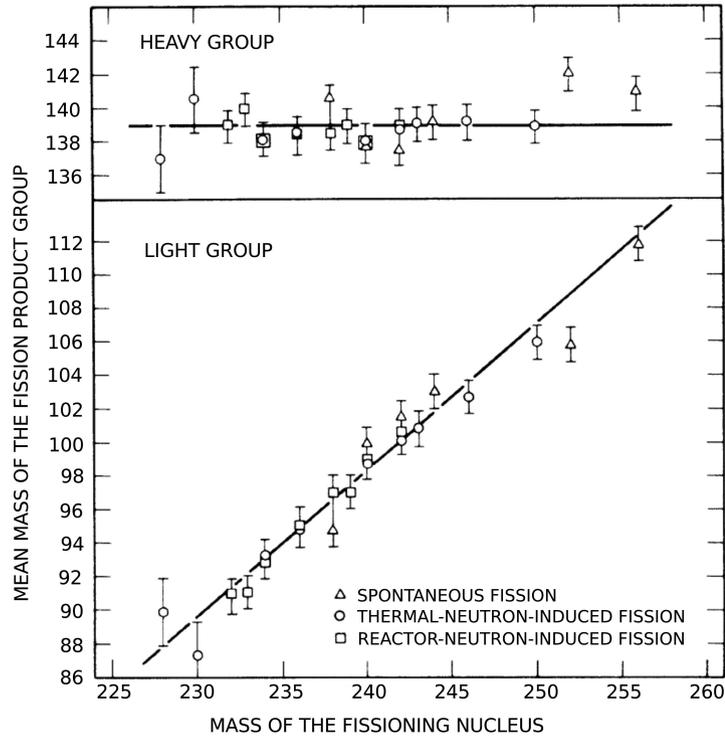


B.D. Wilkins *et al.*, Phys. Rev. C 14 (1976)

Importante correction de couche pour  $N \approx 86, 88, 90$  ?  
Aucun effet visible pour les protons

# Influence des gaps des couches proton et neutron : apport de l'expérience

K. F. Flynn et al., PRC 5 (1972) 1725-1729

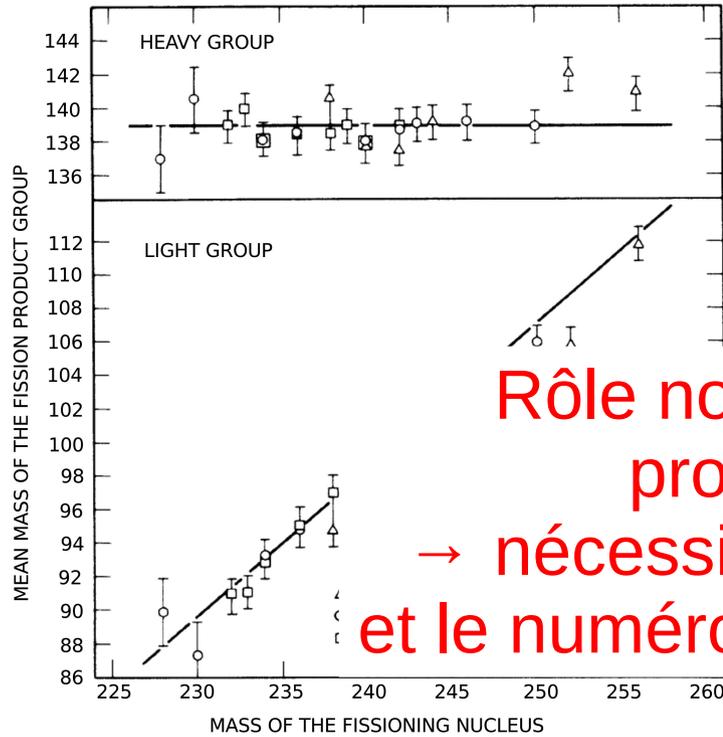


K.-H. Schmidt et al., NPA 665 (2000) 221-267

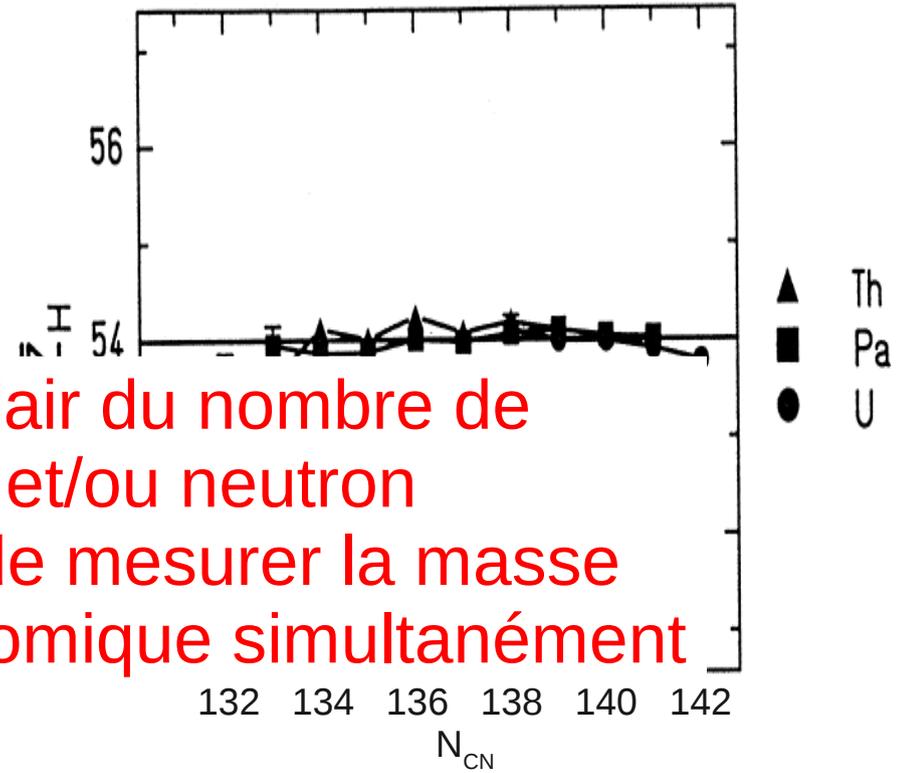
- $\langle A_{\text{lourd}} \rangle$  constant ( $A \approx 139$ )
- $\langle Z_{\text{lourd}} \rangle$  constant ( $Z \approx 54$ )
- Aucune information sur la distribution en neutrons

# Influence des gaps des couches proton et neutron : apport de l'expérience

K. F. Flynn et al., PRC 5 (1972) 1725-1729



Rôle non clair du nombre de proton et/ou neutron  
 → nécessité de mesurer la masse et le numéro atomique simultanément



K.-H. Schmidt et al., NPA 665 (2000) 221-267

- $\langle A_{\text{lourd}} \rangle$  constant ( $A \approx 139$ )
- $\langle Z_{\text{lourd}} \rangle$  constant ( $Z \approx 54$ )
- Aucune information sur la distribution en neutrons

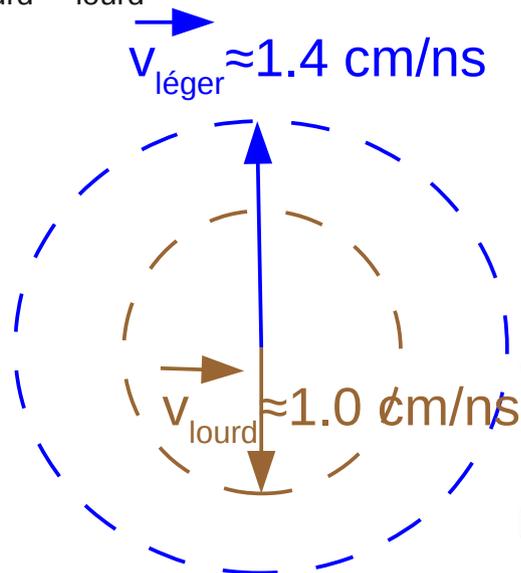
# Distributions isotopiques en cinématique directe

L'énergie cinétique des produits de fission lourds n'est pas suffisante pour obtenir une résolution suffisante

=> difficulté importante pour mesurer le Z des fragments lourds

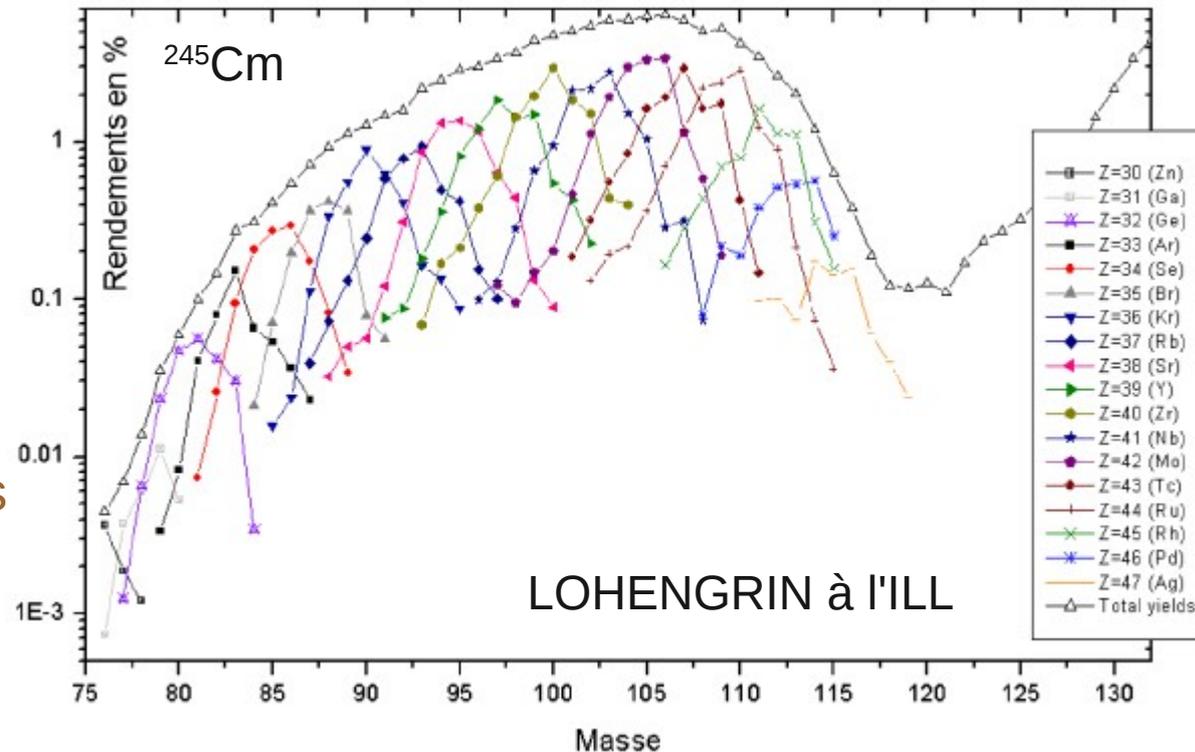
TKE  $\approx$  200 MeV

$$A_{\text{léger}} v_{\text{léger}} = A_{\text{lourd}} v_{\text{lourd}}$$



référentiel du système fissionnant

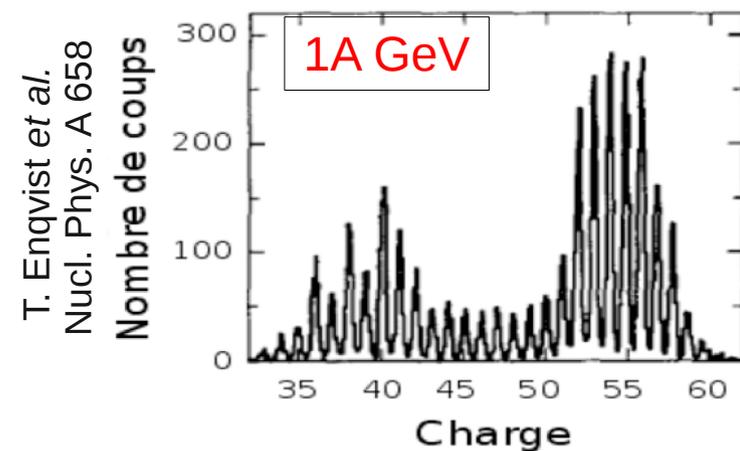
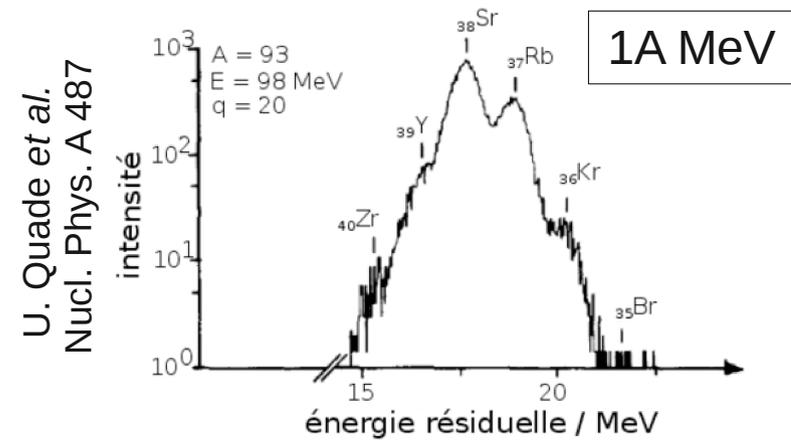
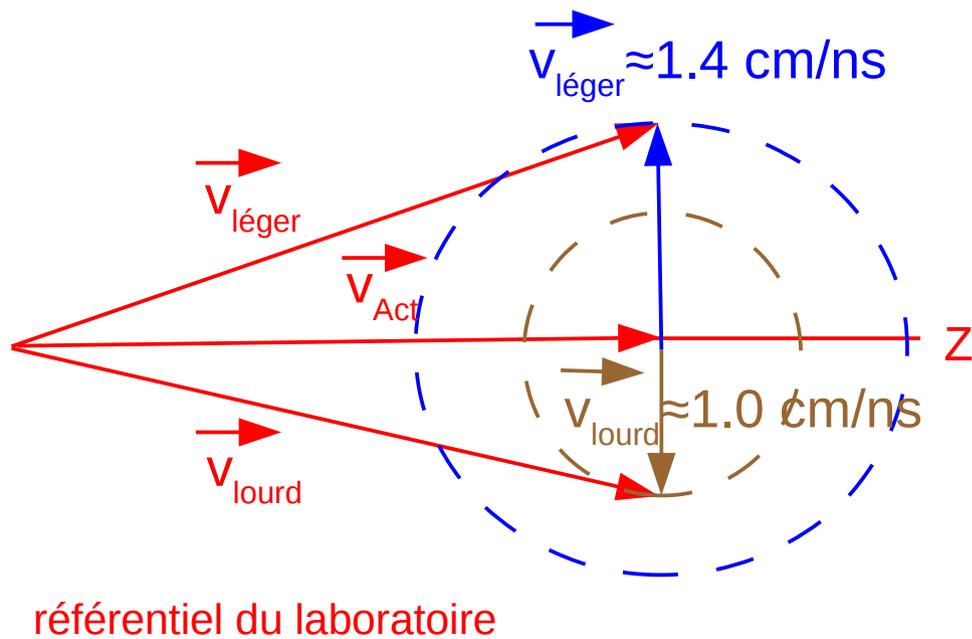
~ référentiel du labo



D. Rochman *et al.* Nucl. Phys. A 710 (2002) 3

# Distributions isotopiques en cinématique inverse

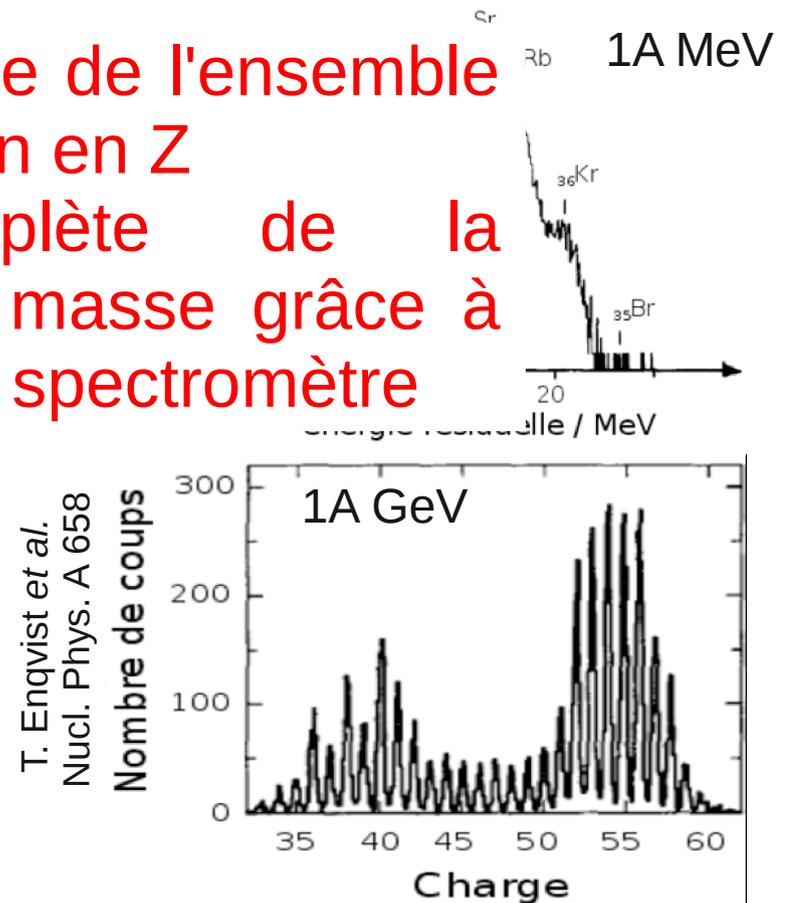
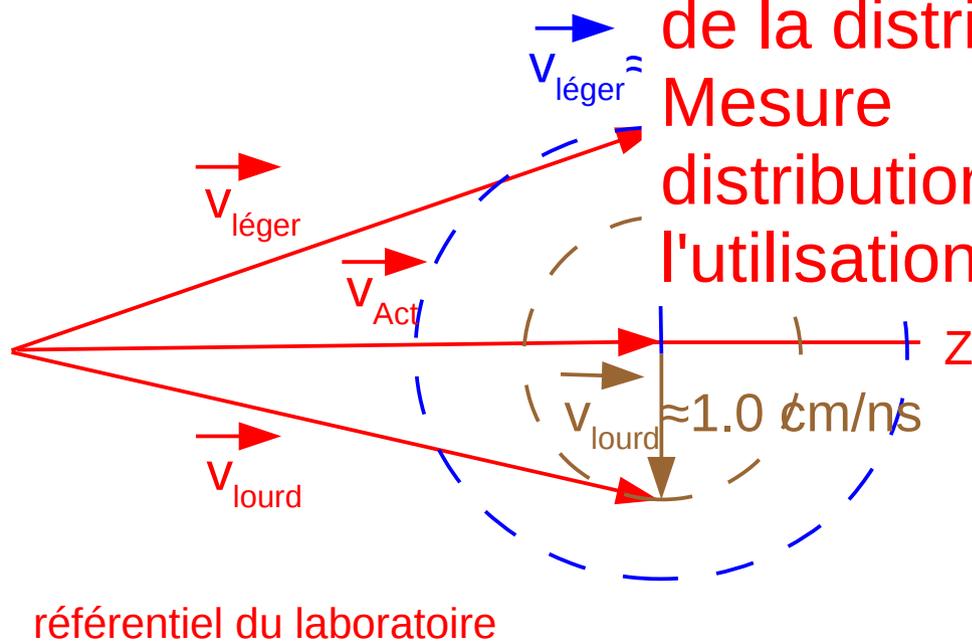
- Produits de fission focalisés vers l'avant : transmission améliorée
- Produits de fission avec une énergie cinétique plus importante : amélioration de l'identification (meilleure résolution)



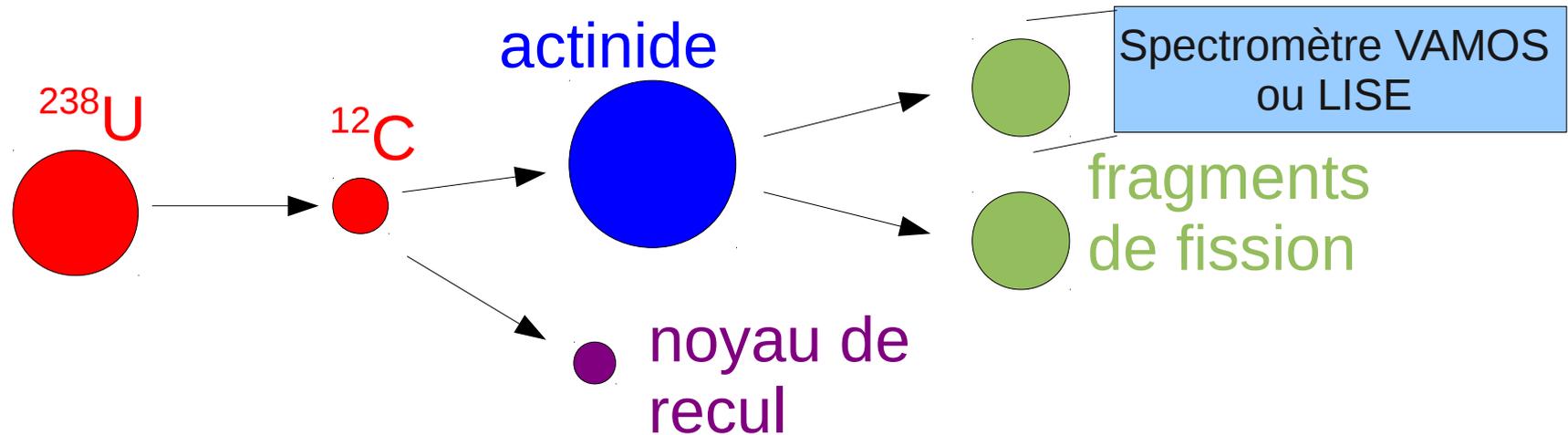
# Distributions isotopiques en cinématique inverse

- Produits de fission focalisés vers l'avant : transmission améliorée
- Produits de fission avec une énergie cinétique plus importante : amélioration de l'identification (meilleure résolution)

Mesure possible de l'ensemble de la distribution en Z  
Mesure complète de la distribution en masse grâce à l'utilisation d'un spectromètre



# Étude de la fission avec la cinématique inverse

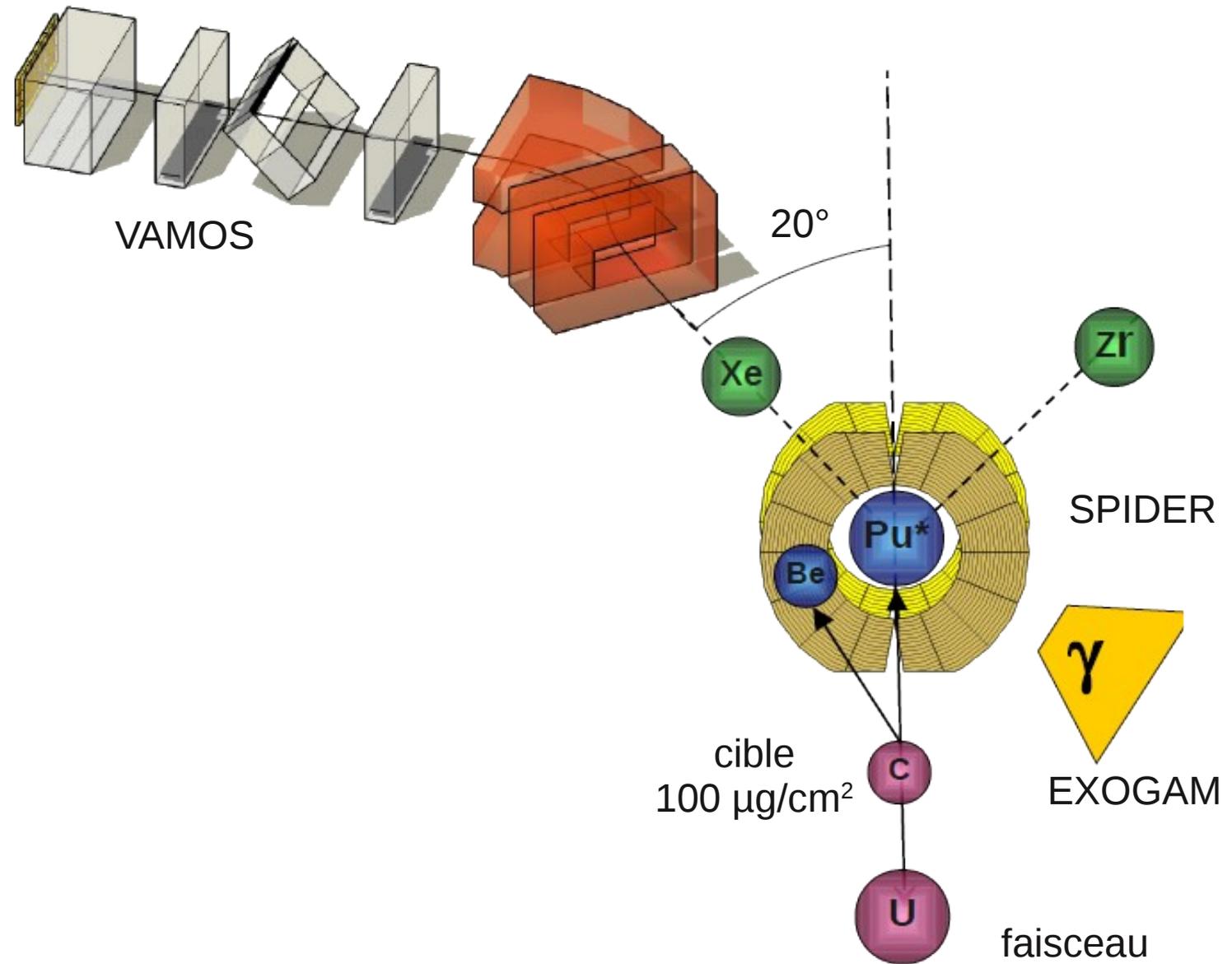


	expérience VAMOS		expérience LISE	
Faisceau	$^{238}\text{U}$ à 6,1 A MeV		$^{238}\text{U}$ à 24 A MeV	
Cible	$^{12}\text{C}$ (0,1 mg/cm <sup>2</sup> )		$^9\text{Be}$ (15 mg/cm <sup>2</sup> )	$^{12}\text{C}$ (15 mg/cm <sup>2</sup> )
$E_{\text{CM}}$	70 MeV		≈ 185 MeV	≈ 240 MeV
Réactions	Fusion	Transfert	Fusion complète et incomplète	
Actinides produits	$^{250}\text{Cf}$	$^{238}\text{U}$ , $^{239}\text{Np}$ , $^{240,241}\text{Pu}$	$^{247}\text{Cm}$	$^{250}\text{Cf}$
Énergie d'excitation	45 MeV	≈ 10 MeV	≈ 180 MeV	≈ 220 MeV

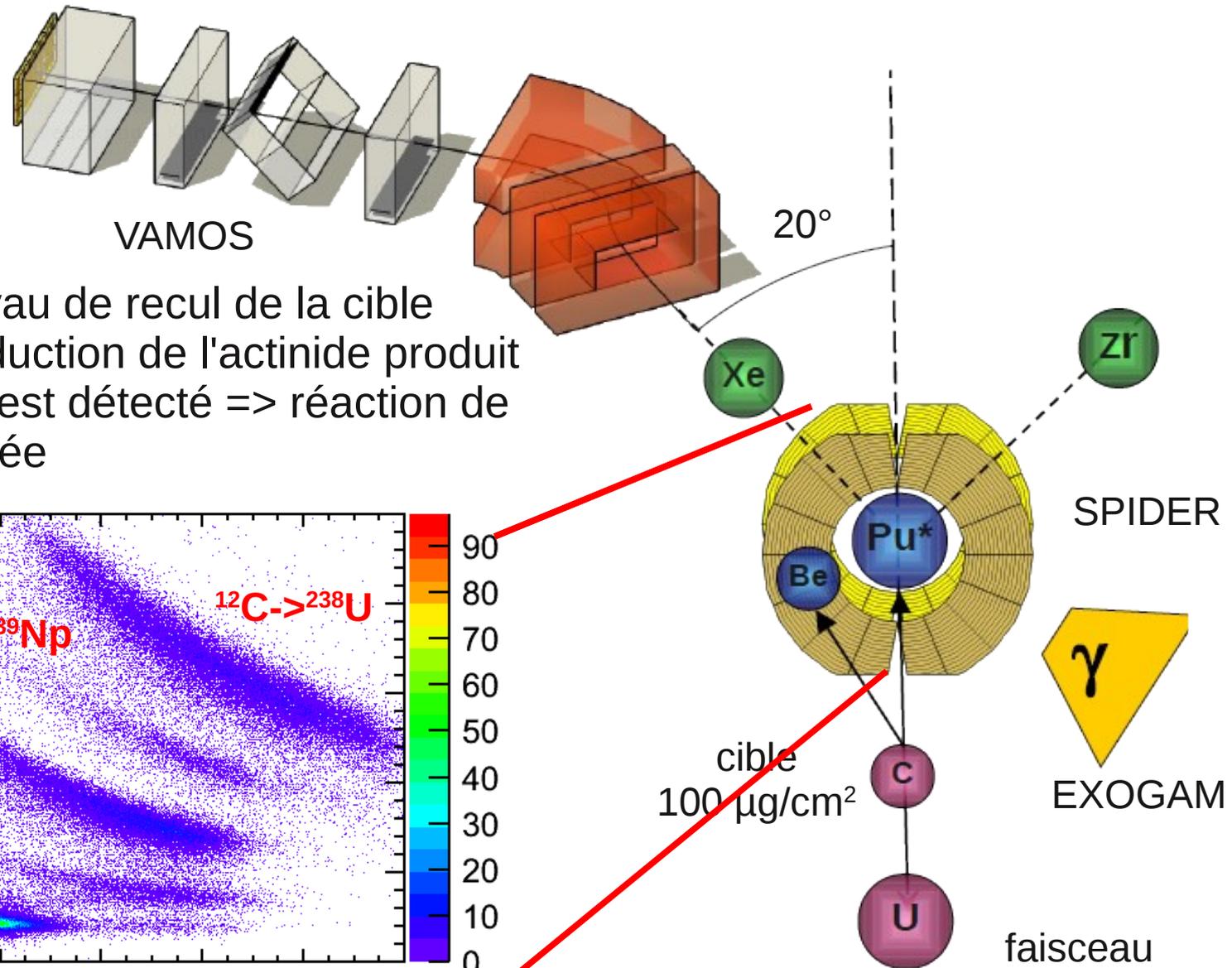
# Plan

- ♦ Pourquoi et comment étudier la fission ?
- ♦ **Fission induite par transfert et fusion avec VAMOS**
  - ♦ Identification des produits de fission
  - ♦ Rendements isotopiques
- ♦ Fusion-fission avec LISE
- ♦ Résultats et discussion

# Fission induite par transfert et fusion

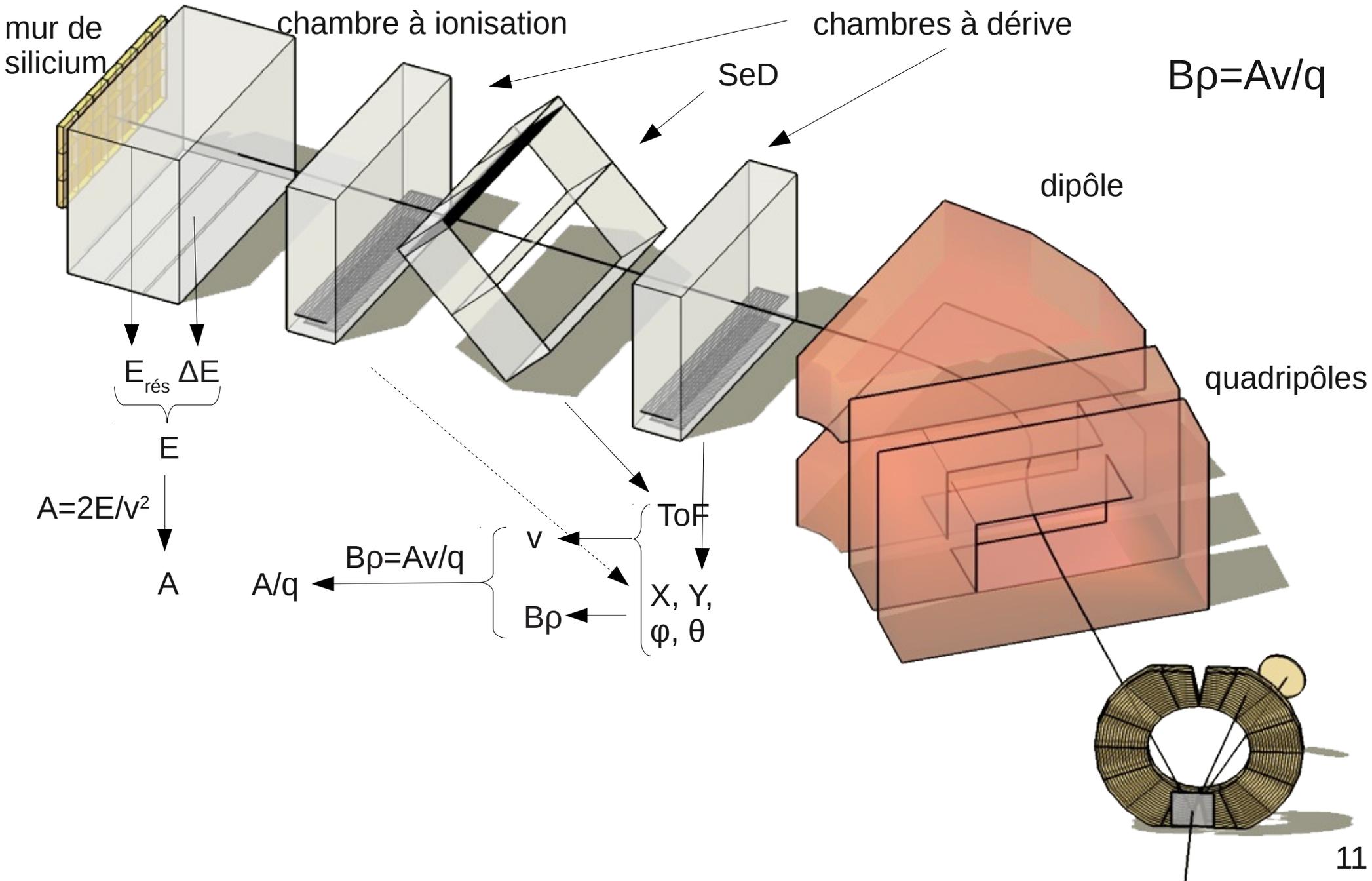


# Fission induite par transfert



- identification du noyau de recul de la cible dans SPIDER => déduction de l'actinide produit
- si aucun transfert n'est détecté => réaction de fusion-fission supposée

# VAMOS : identification



# VAMOS : identification

mur de  
silic

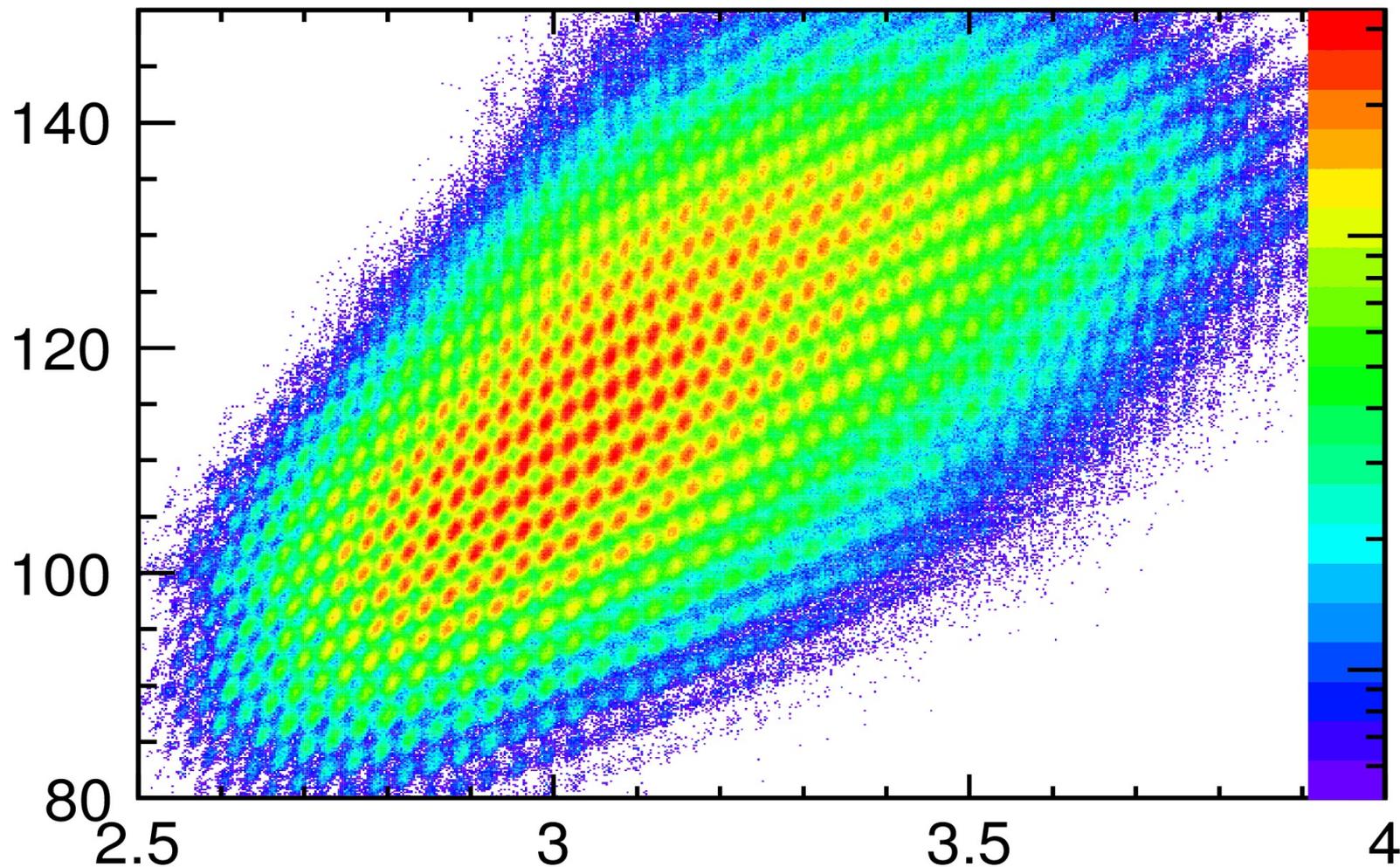


chambre à ionisation



chambres à dérive

A



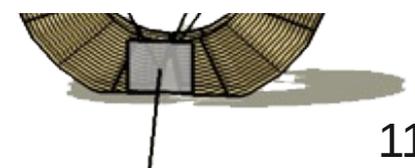
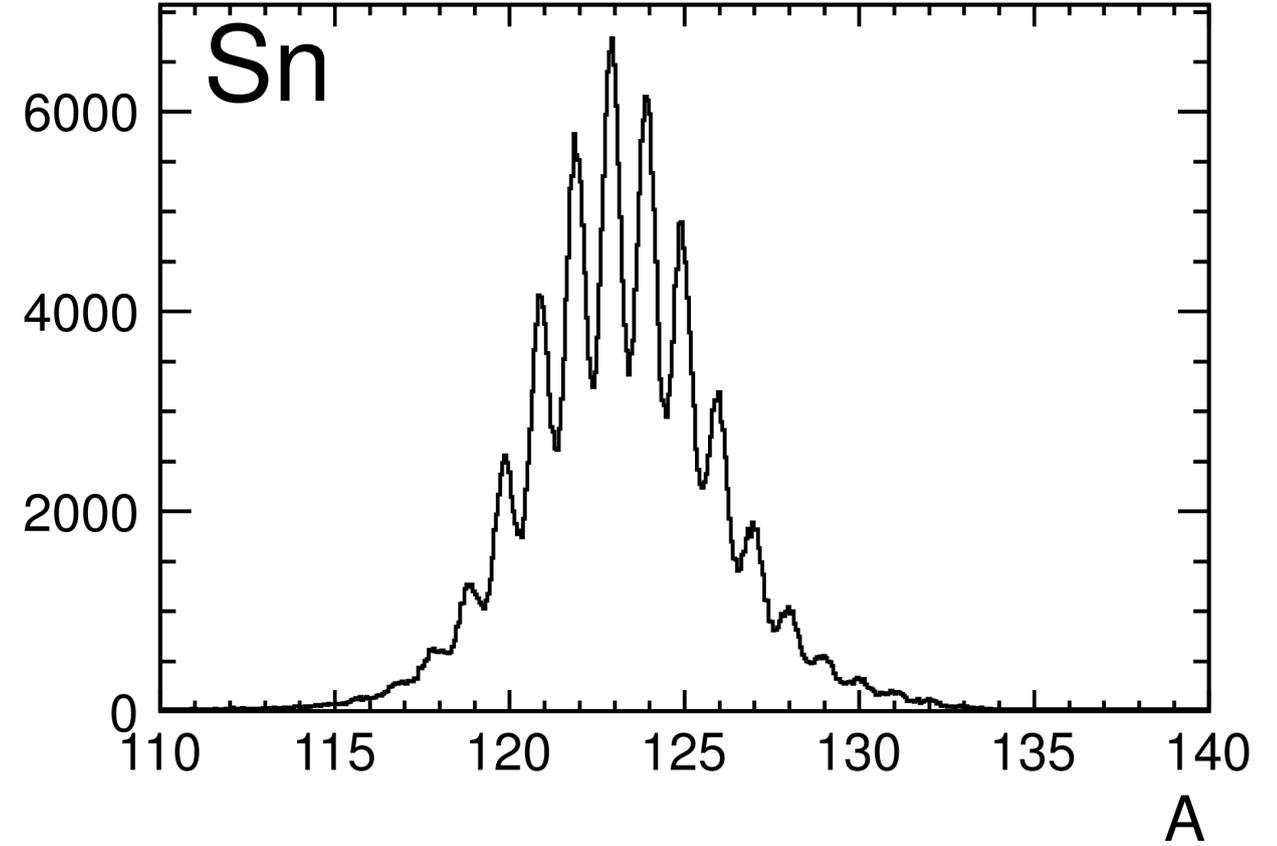
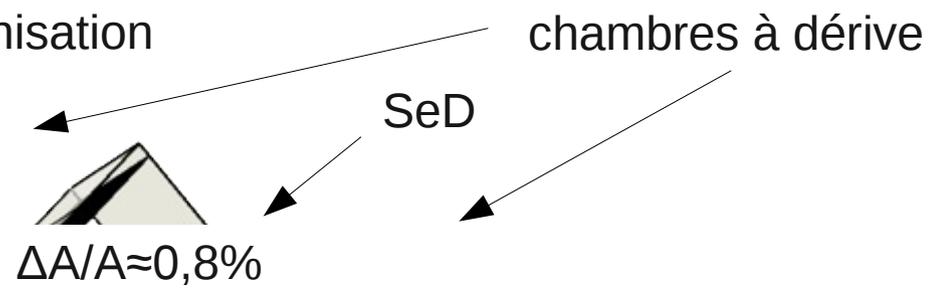
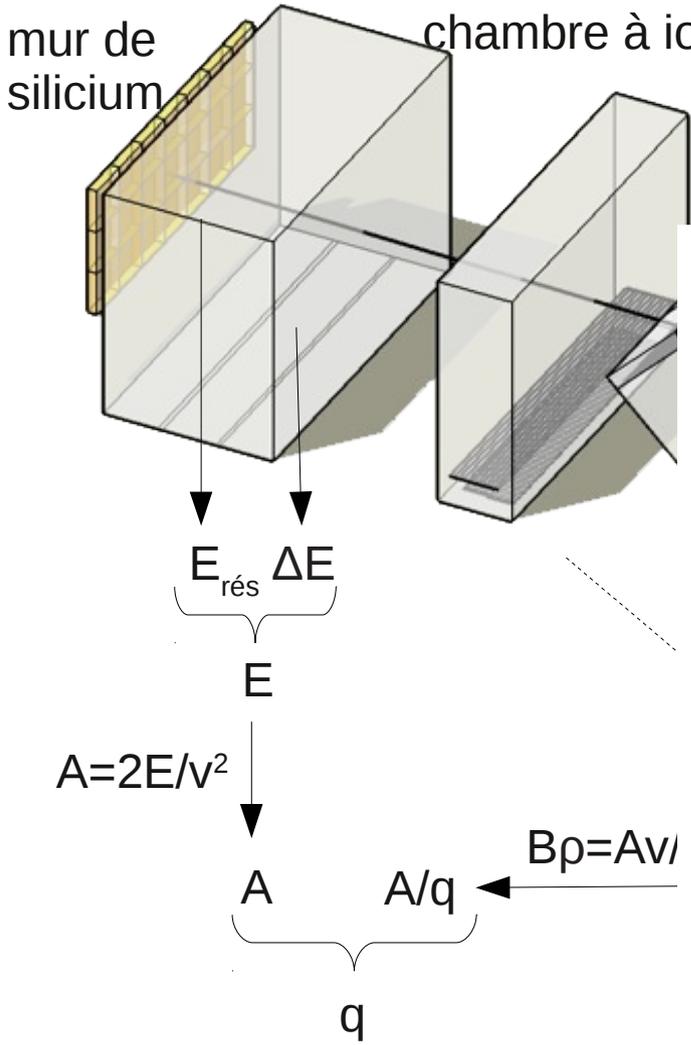
$10^2$

pôles

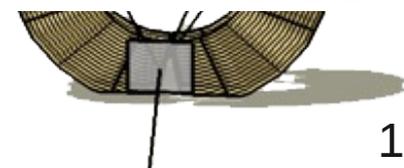
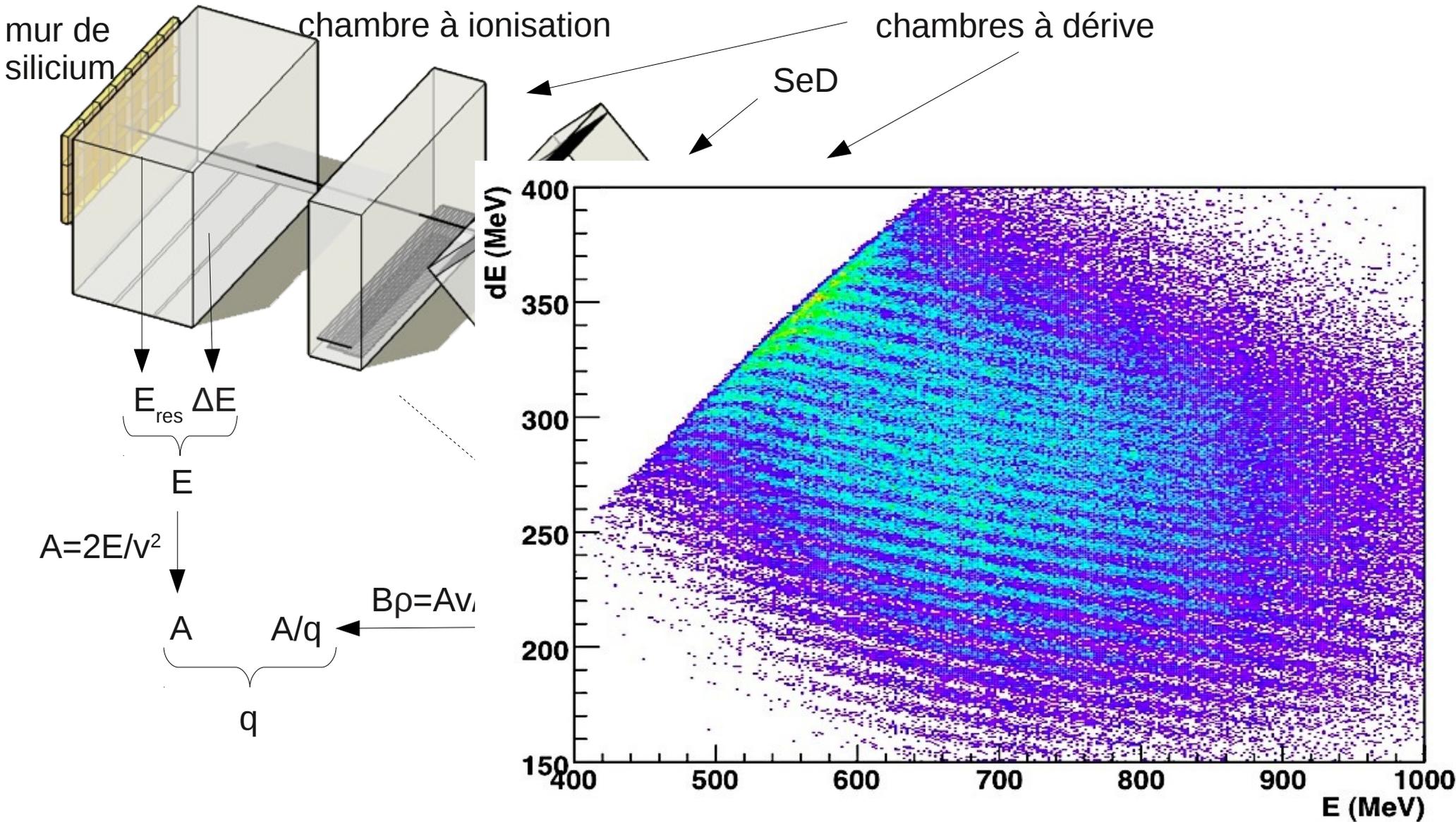
10

A/q

# VAMOS : identification



# VAMOS : identification



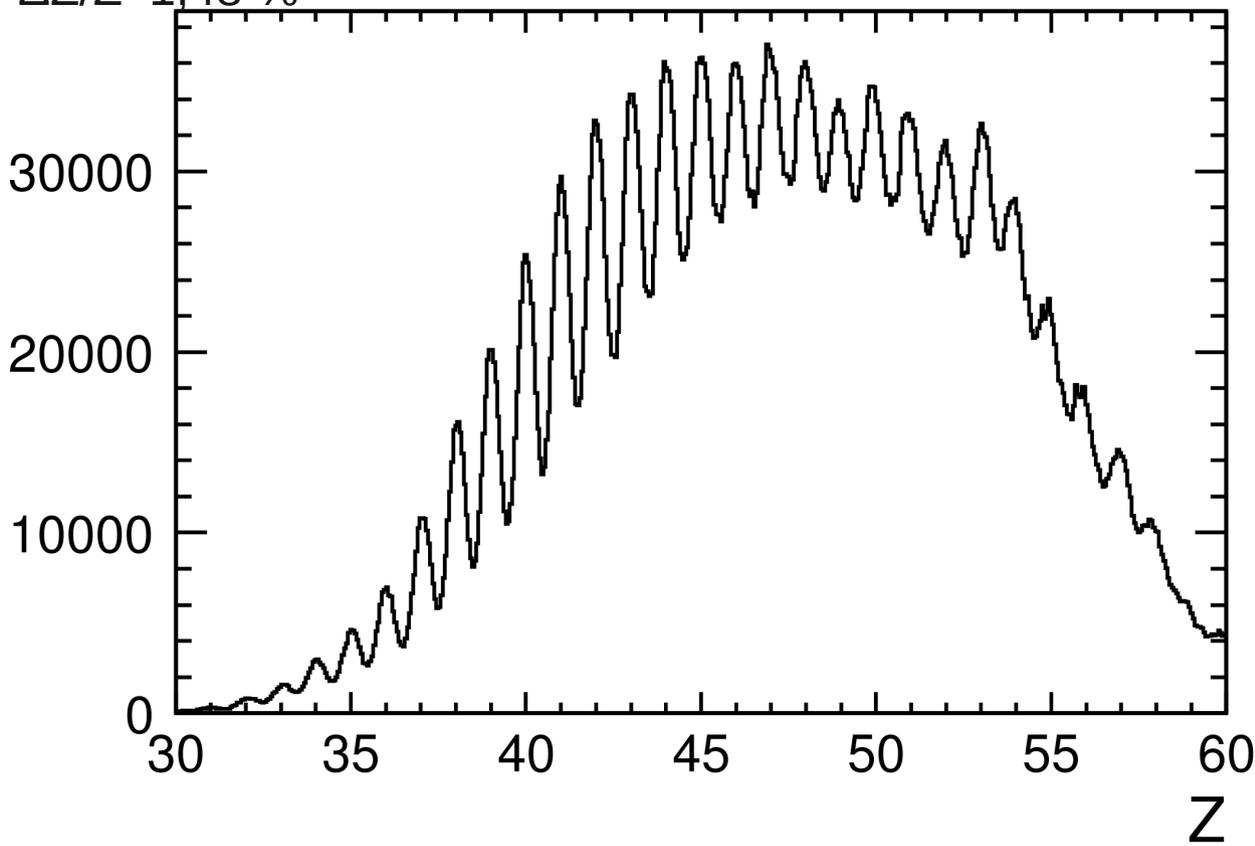
# VAMOS : identification

mur de  
silicium

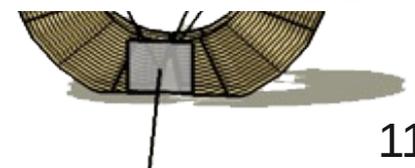
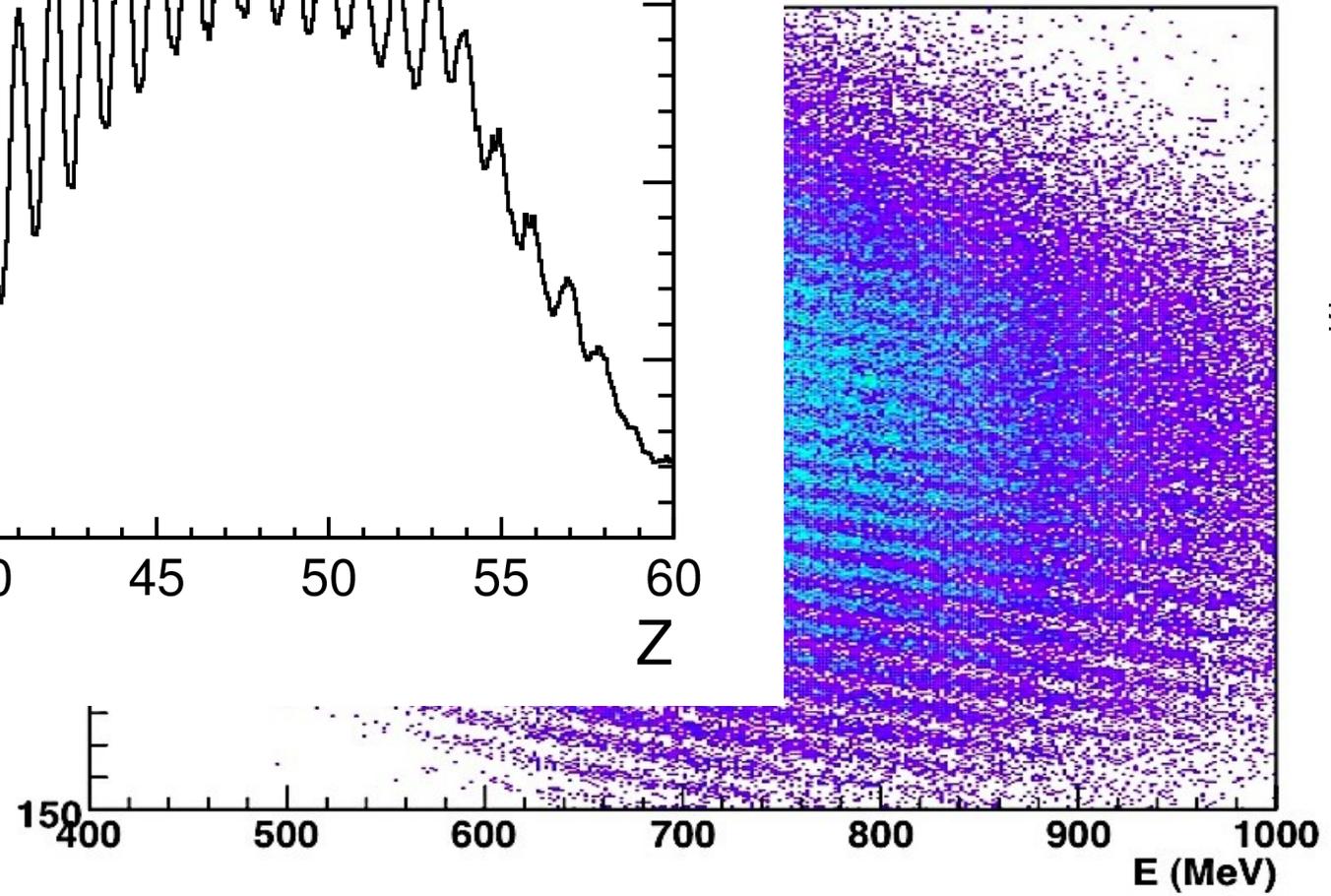


A=

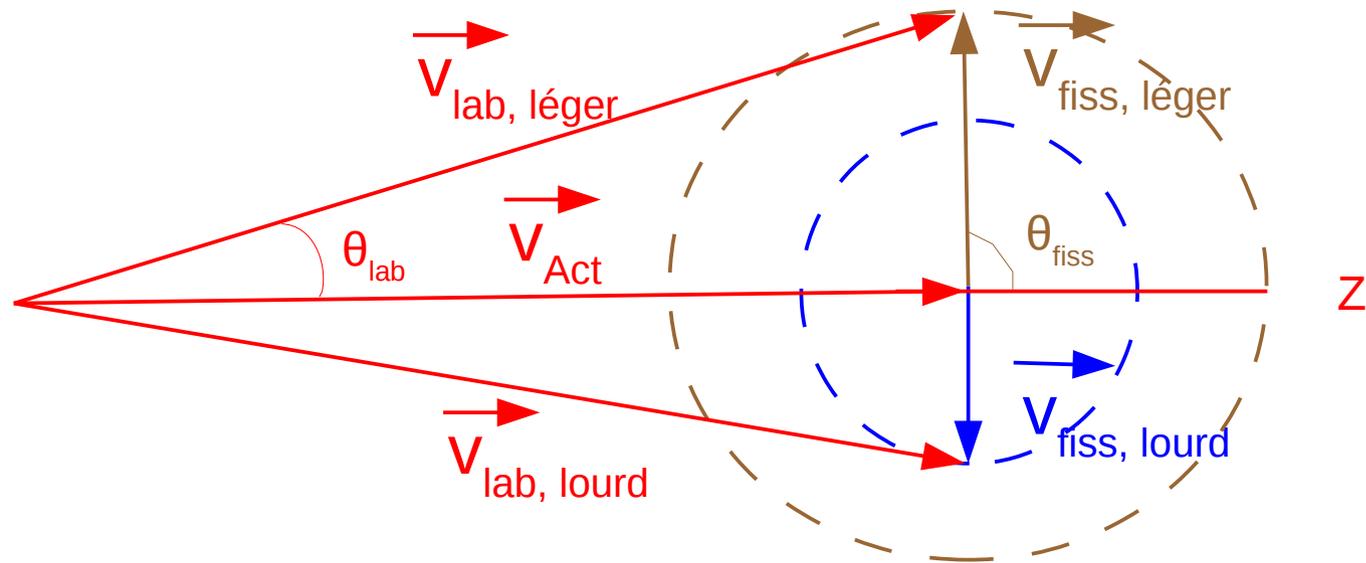
chambre à ionisation  
 $\Delta Z/Z \approx 1,48\%$



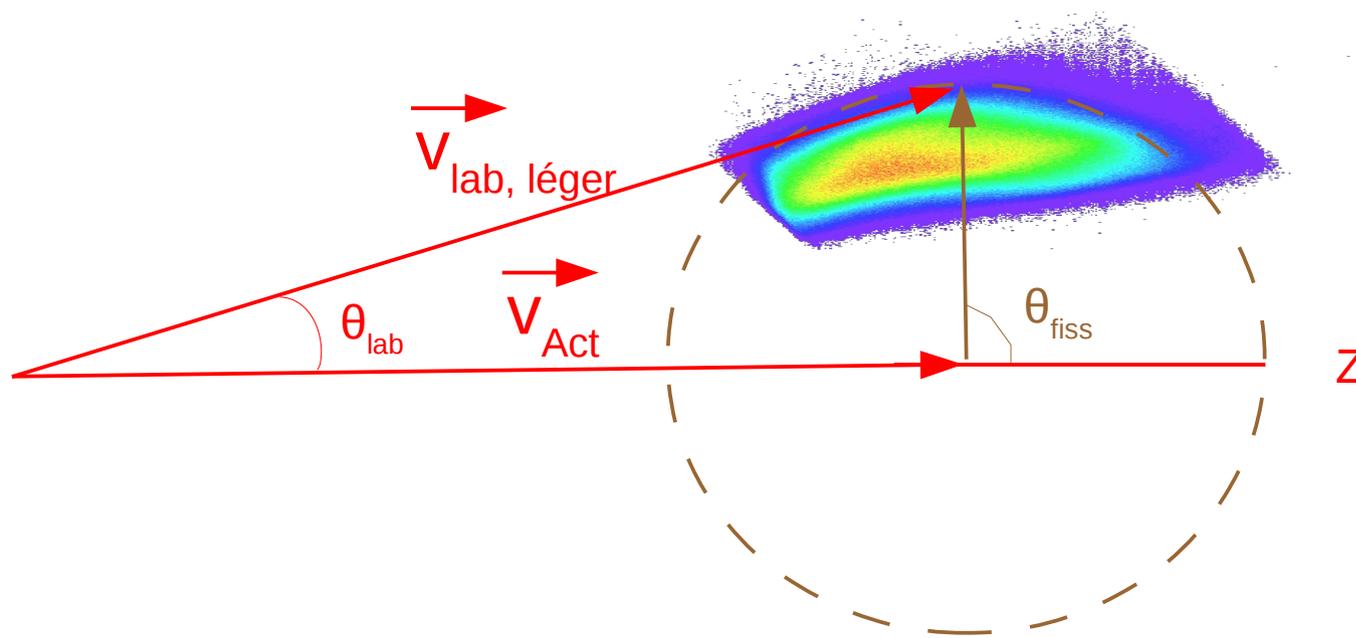
chambre à dérive



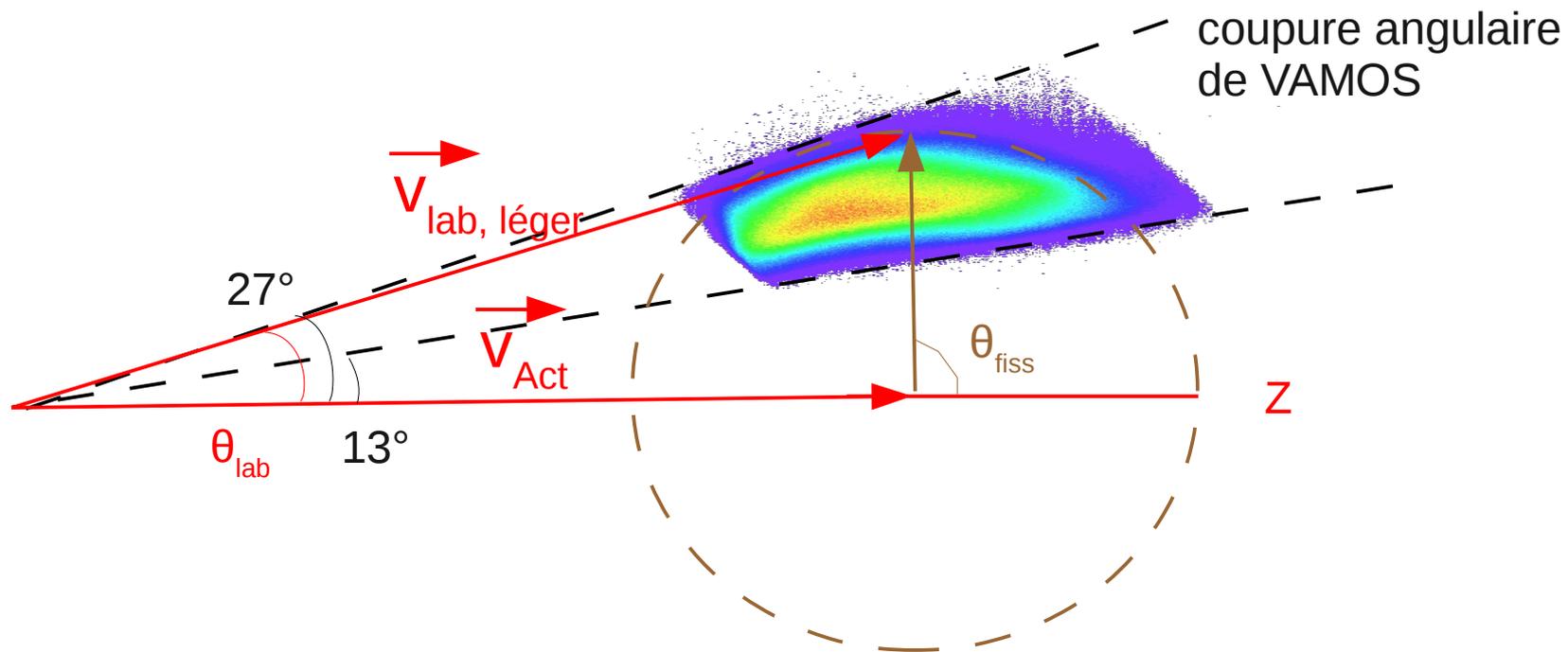
# Reconstruction de la cinématique



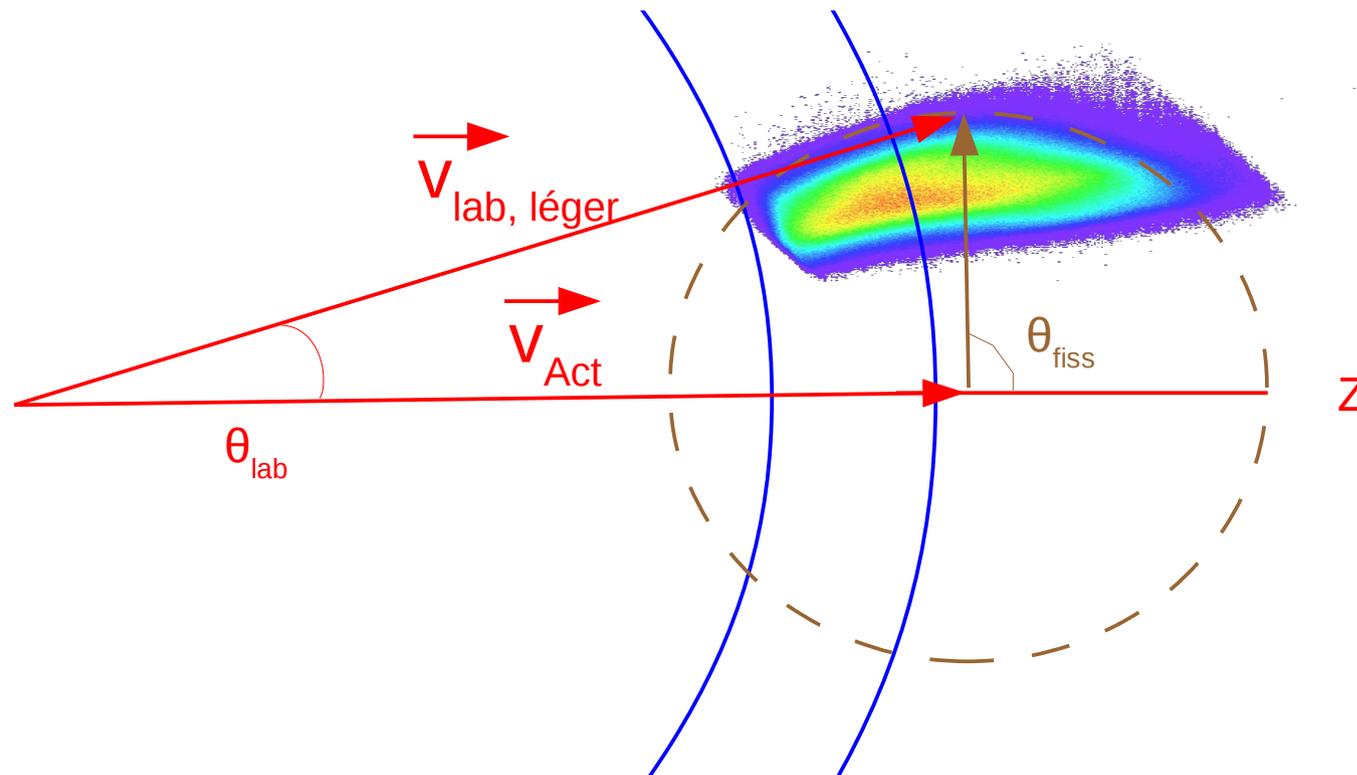
# Reconstruction de la cinématique



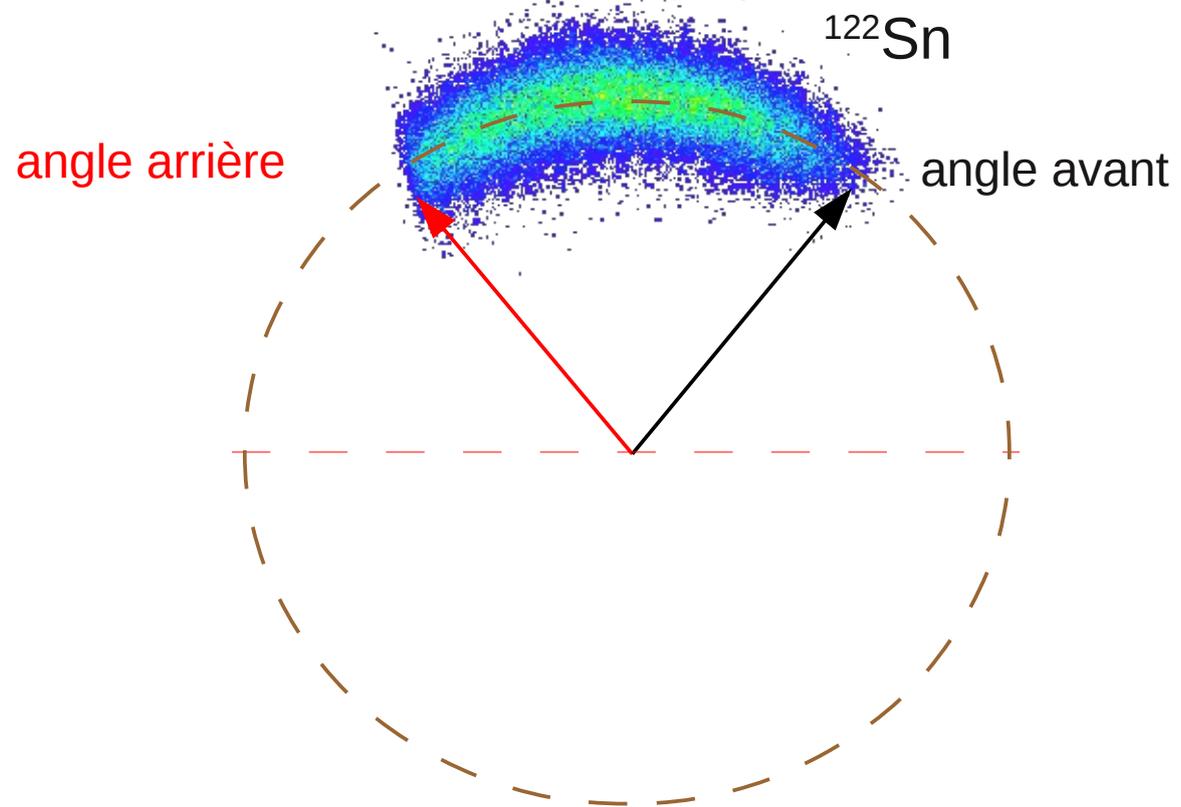
# Reconstruction de la cinématique



# Reconstruction de la cinématique



# Reconstruction de la cinématique

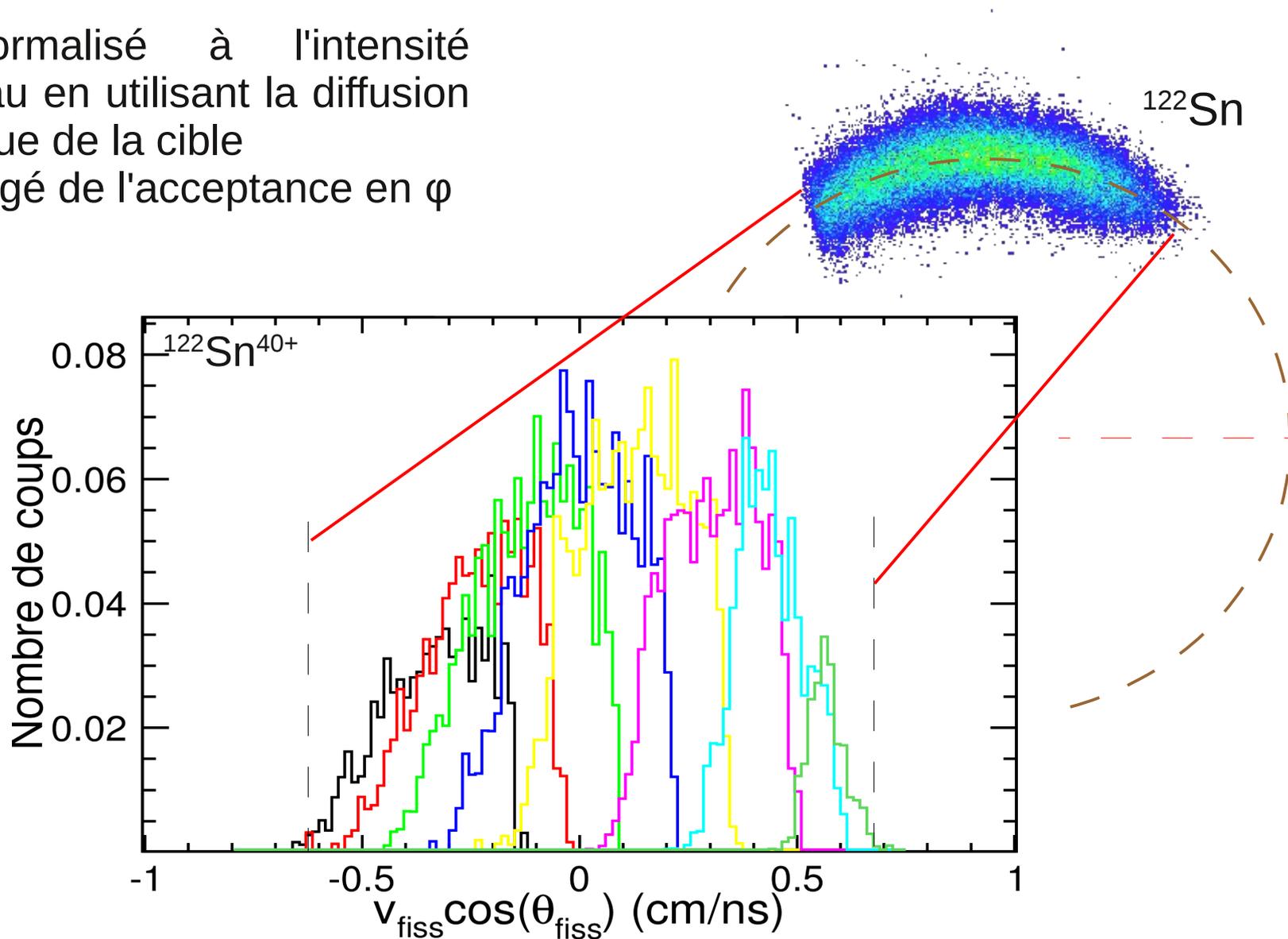


# Reconstruction de la distribution angulaire

8 valeurs de  $B\rho_0$  différentes

> Normalisé à l'intensité faisceau en utilisant la diffusion élastique de la cible

> Corrigé de l'acceptance en  $\varphi$

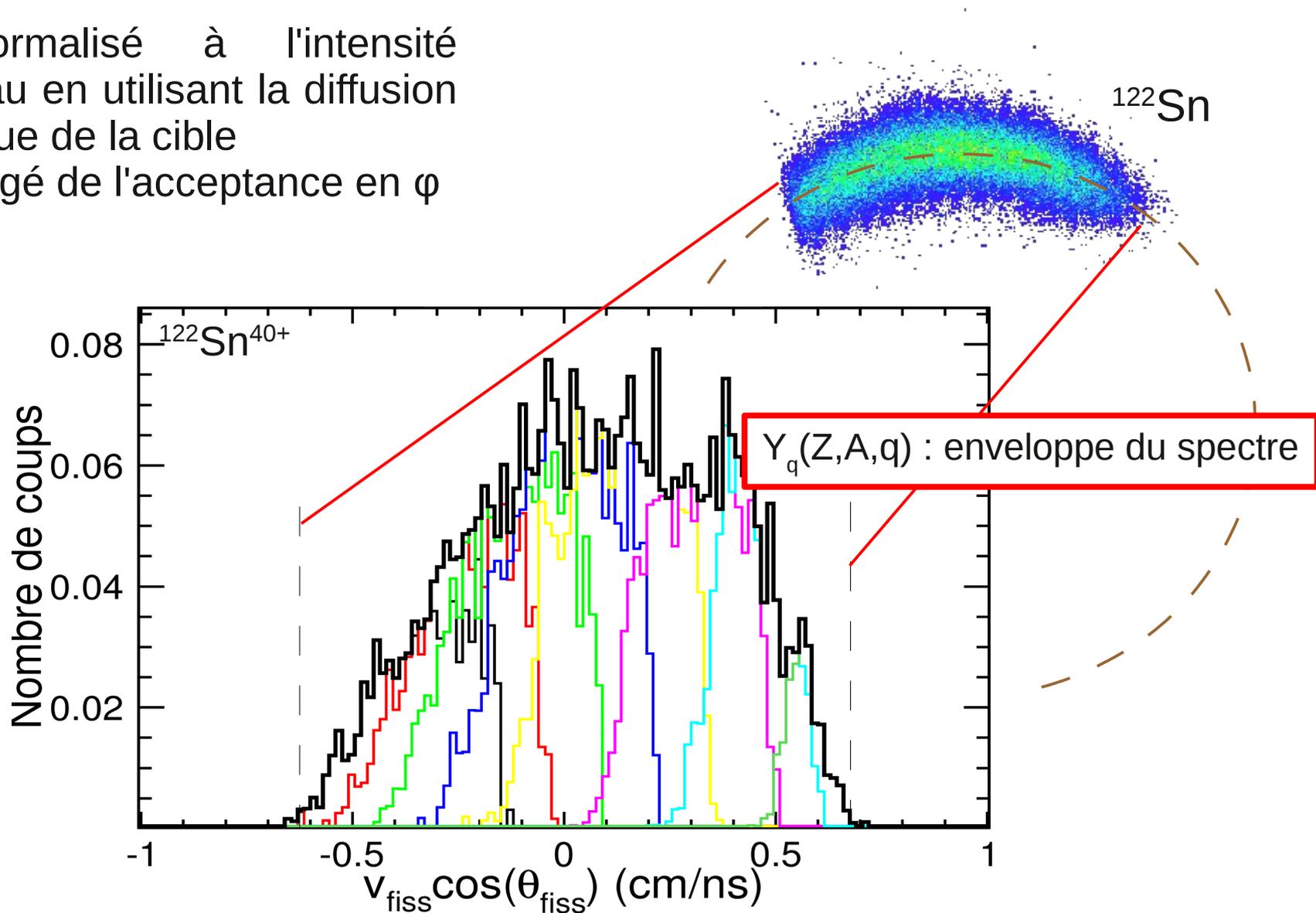


# Reconstruction de la distribution angulaire

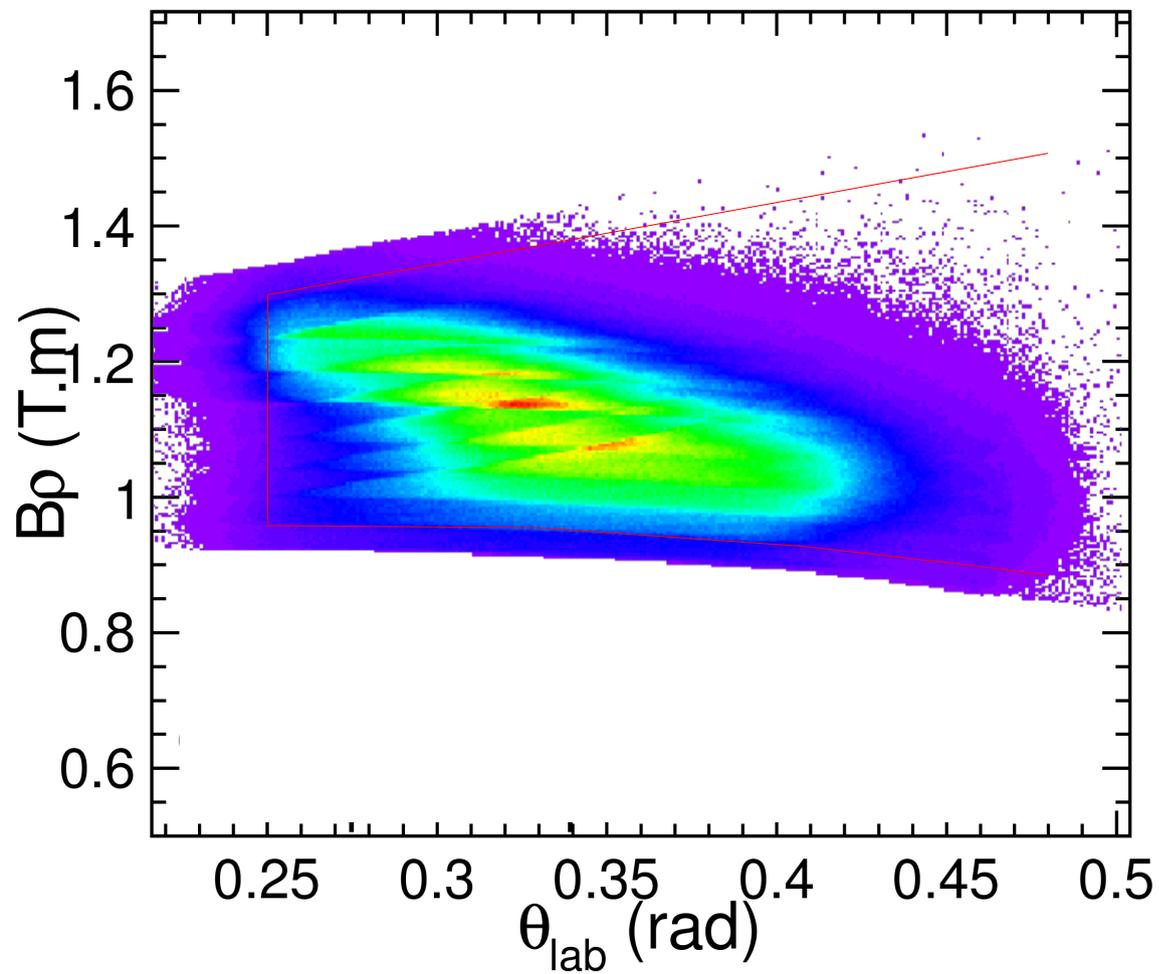
8 valeurs de  $B\rho_0$  différentes

> Normalisé à l'intensité faisceau en utilisant la diffusion élastique de la cible

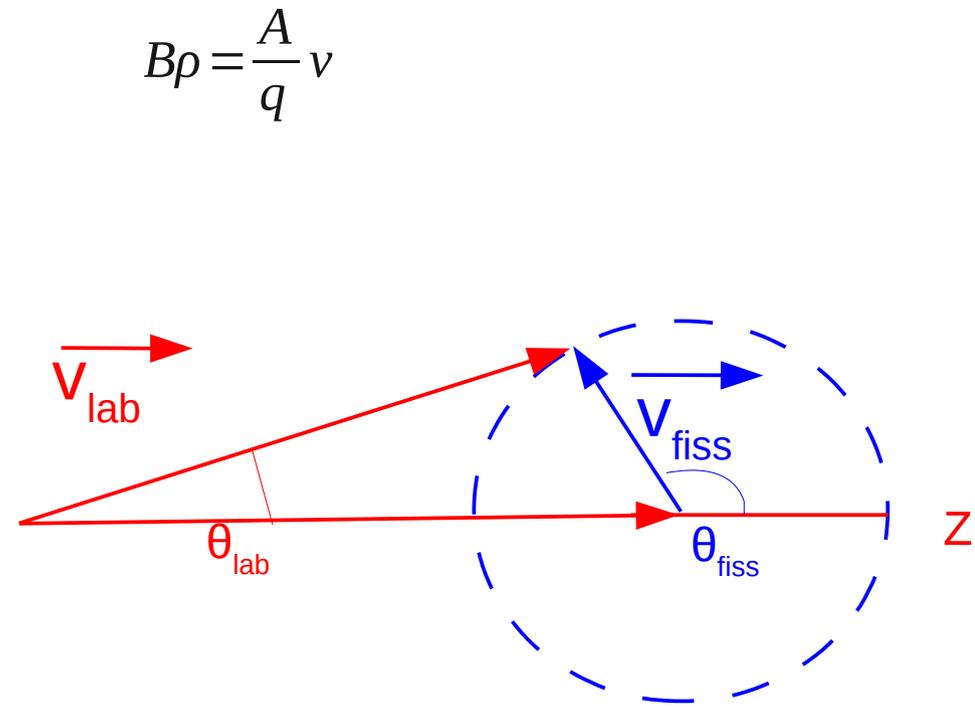
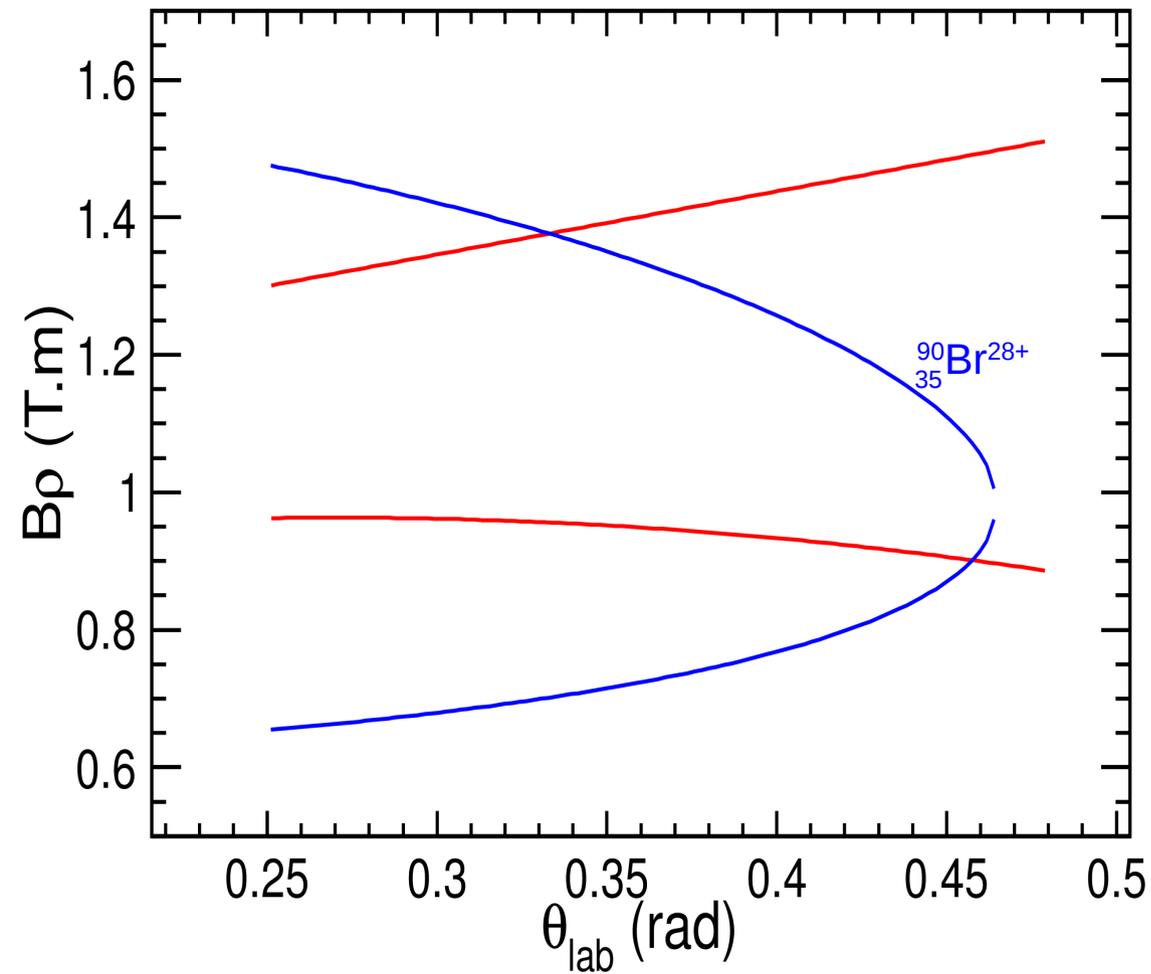
> Corrigé de l'acceptance en  $\varphi$



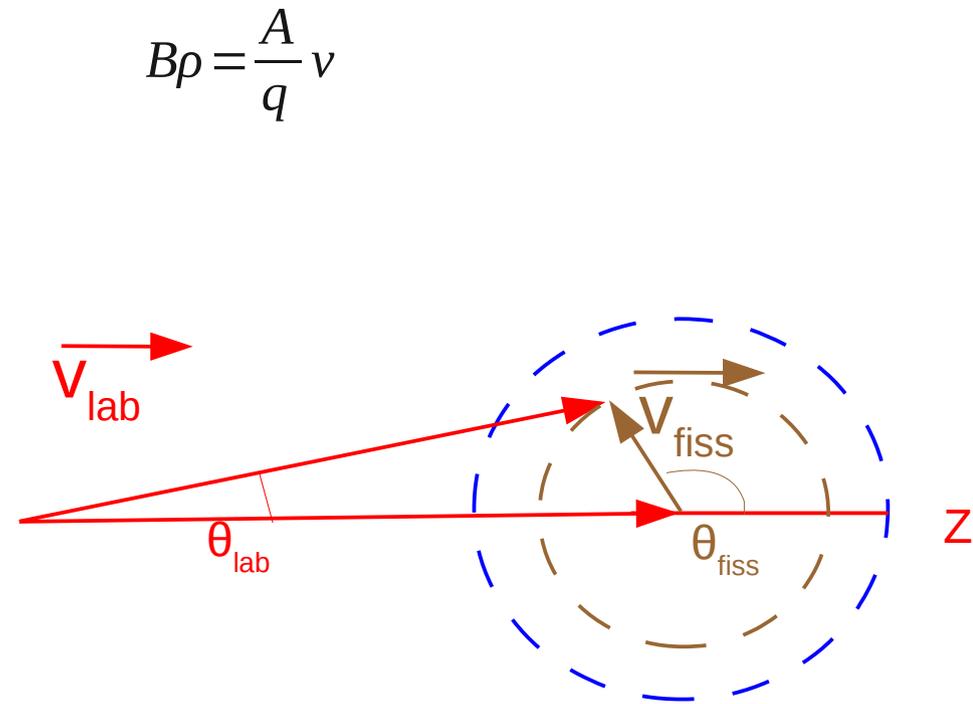
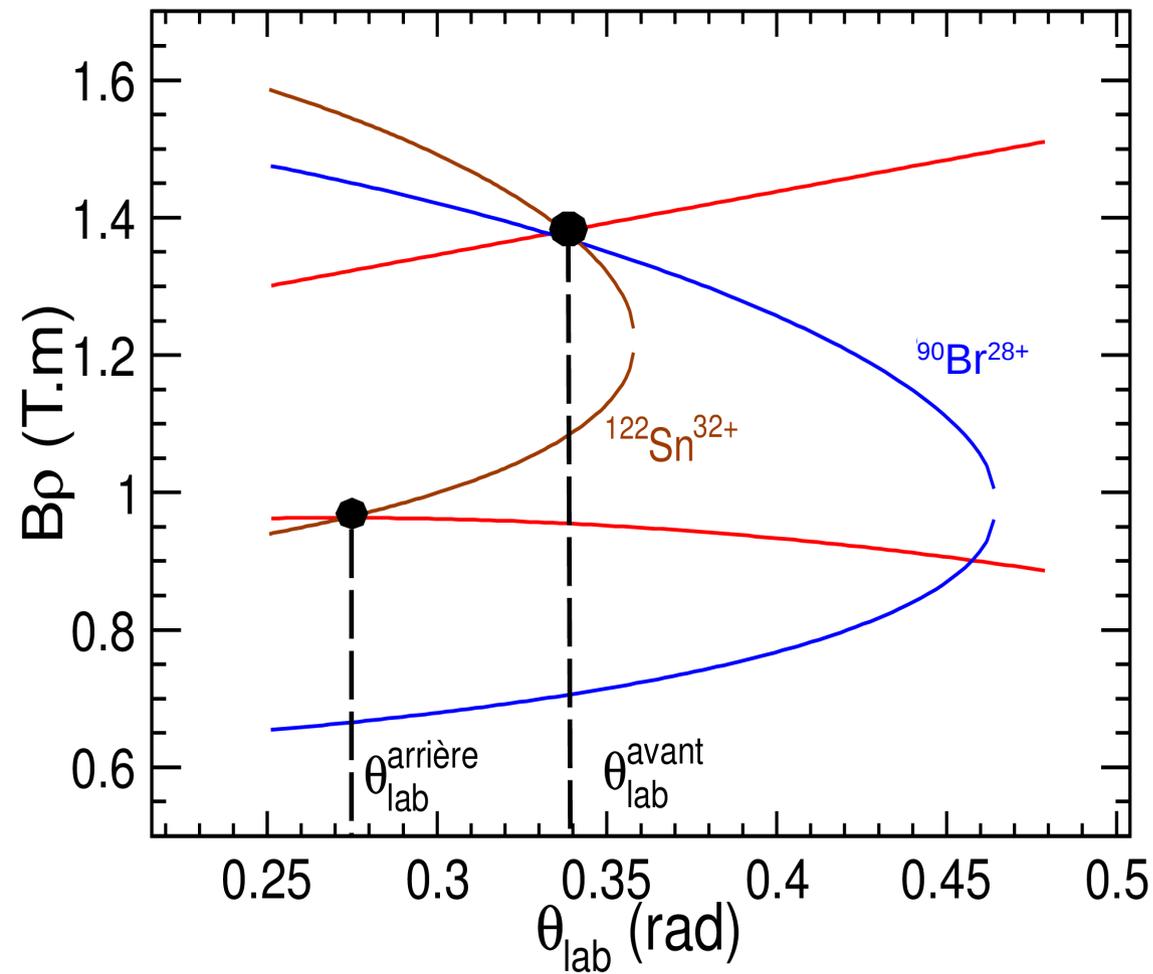
# Détermination de l'acceptance en $\theta$



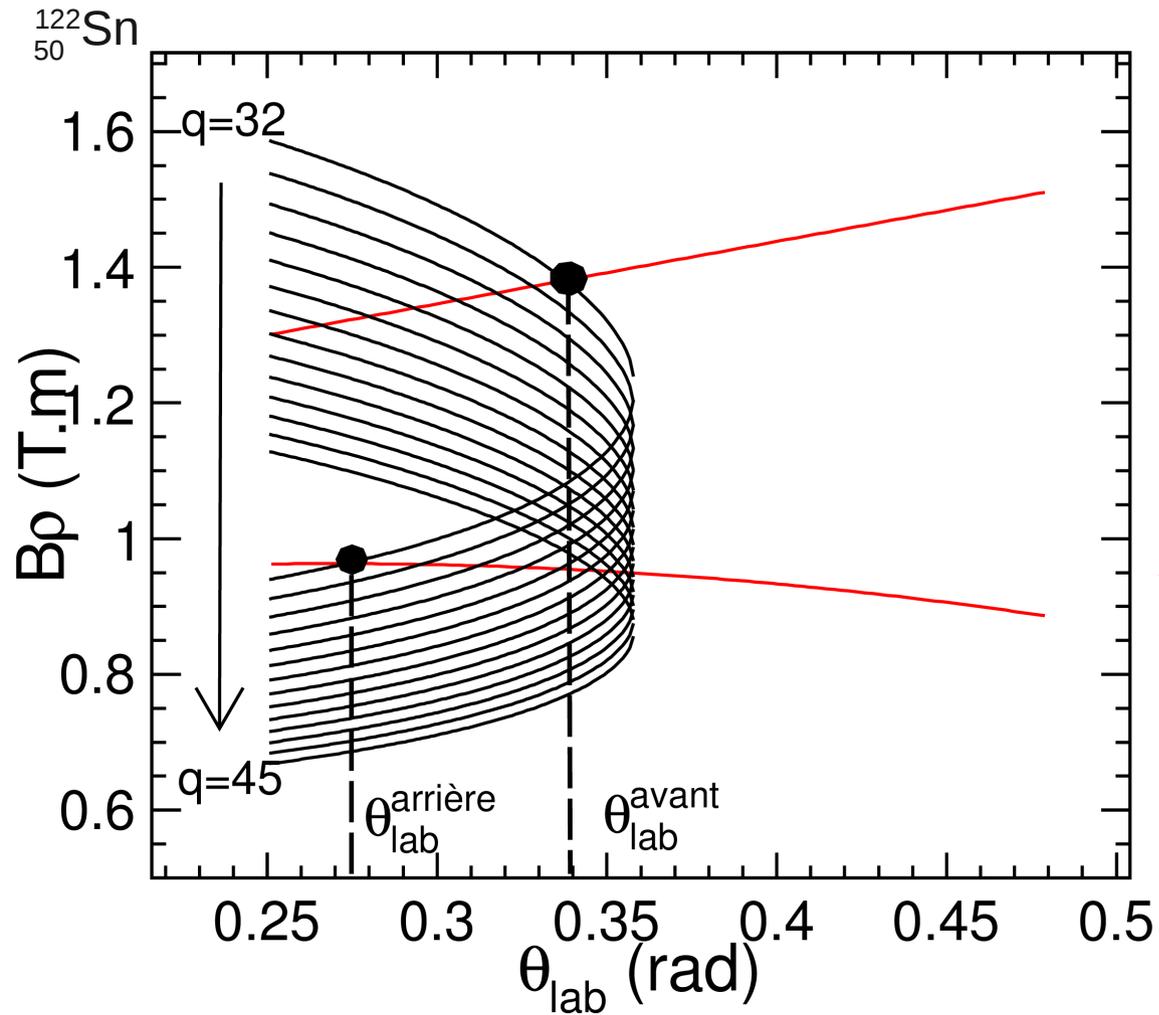
# Effet de l'acceptance en $\theta$



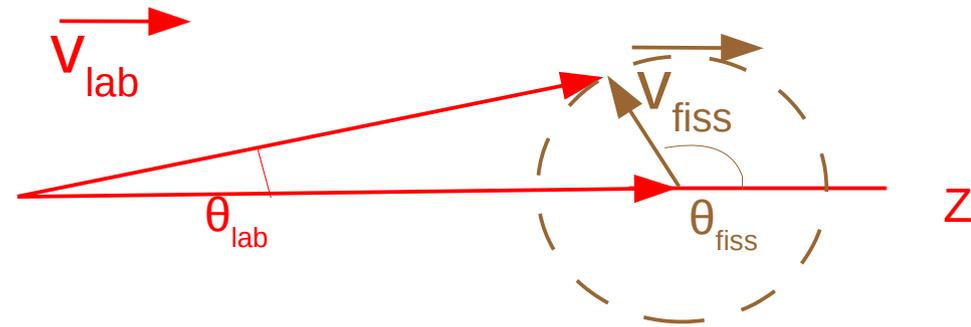
# Effet de l'acceptance en $\theta$



# Effet de l'acceptance en $\theta$

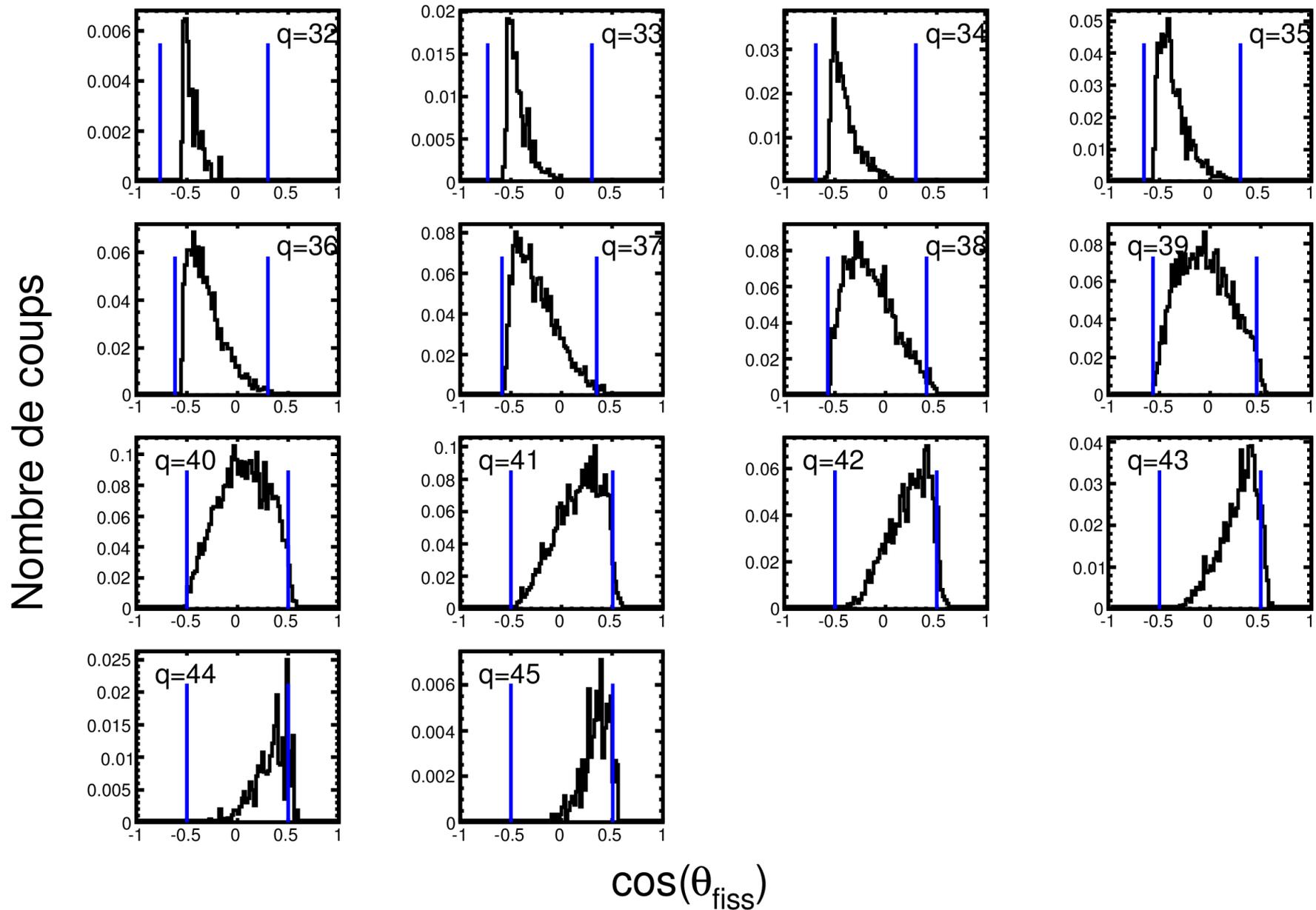


$$B\rho = \frac{A}{q} v$$



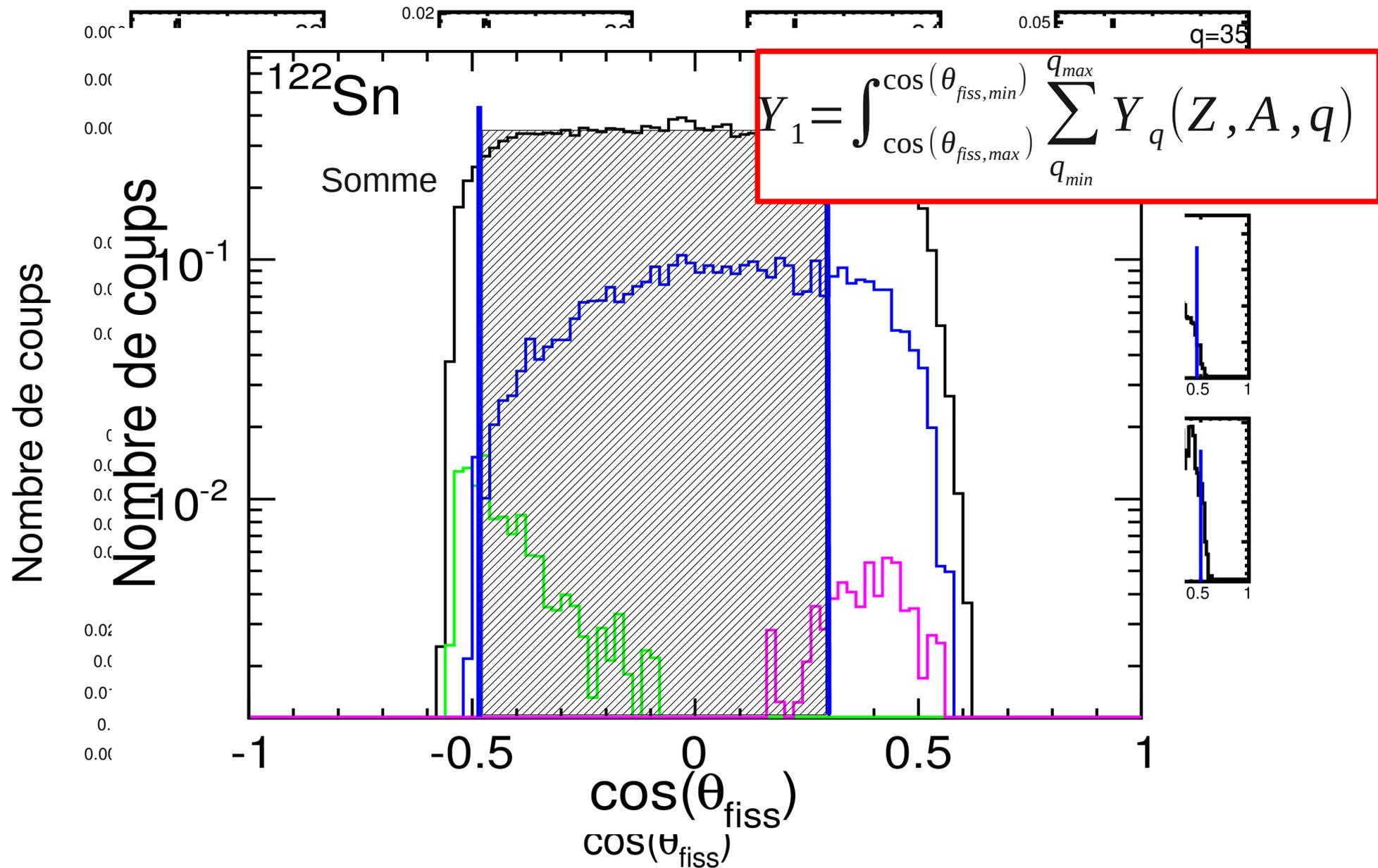
# Limites de la transmission dans le référentiel du système fissionnant

$^{122}\text{Sn}$

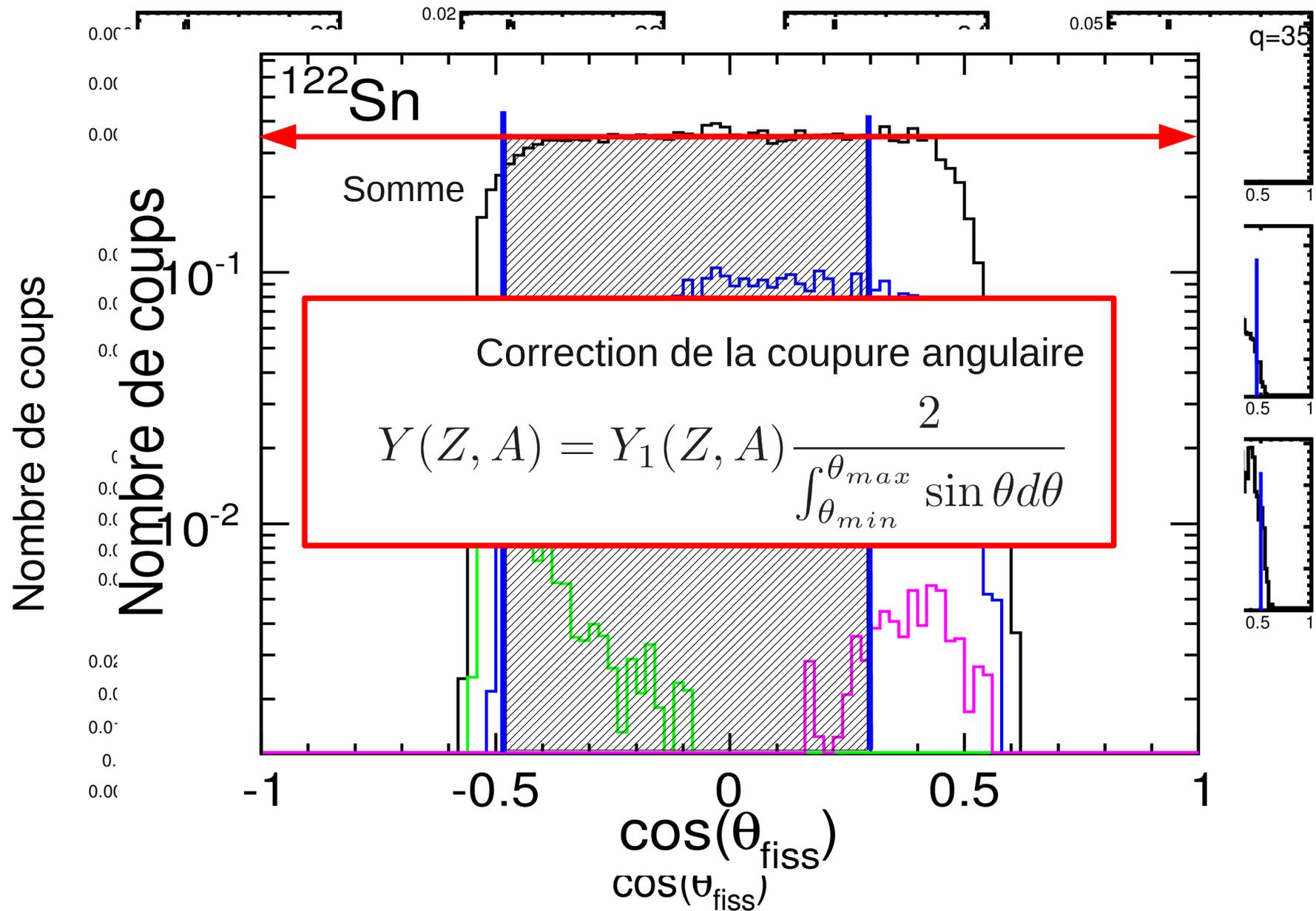




# Correction de l'acceptance en $\theta$

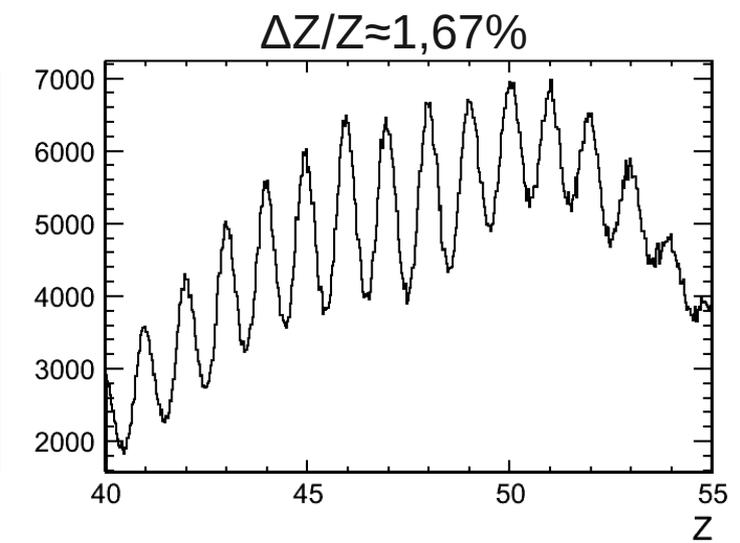
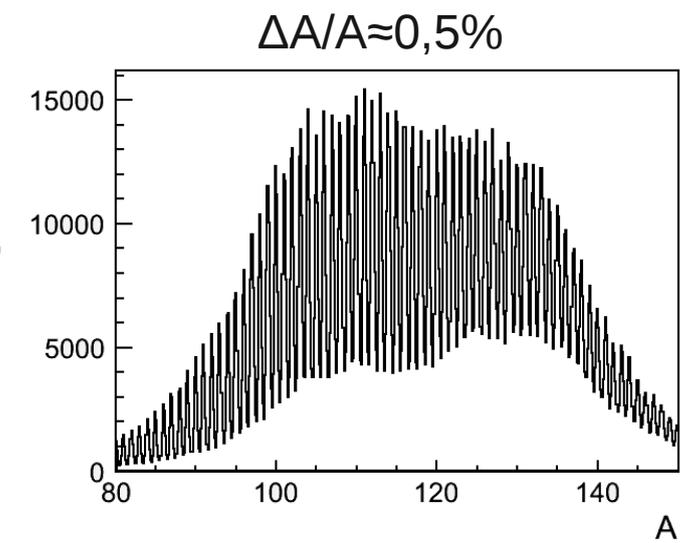
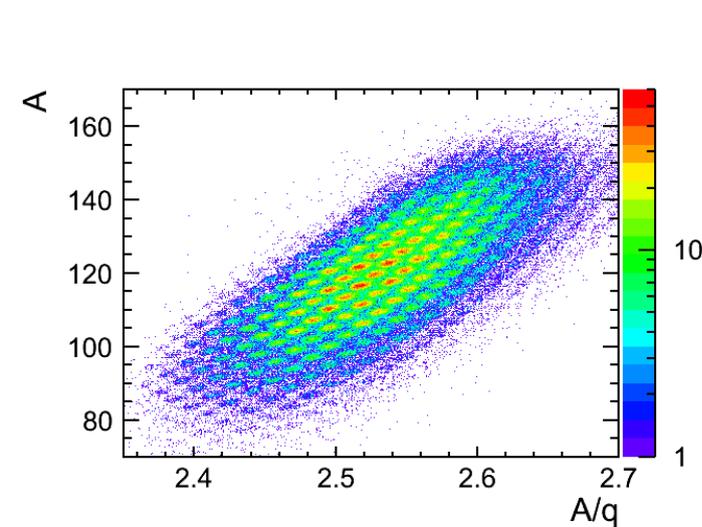
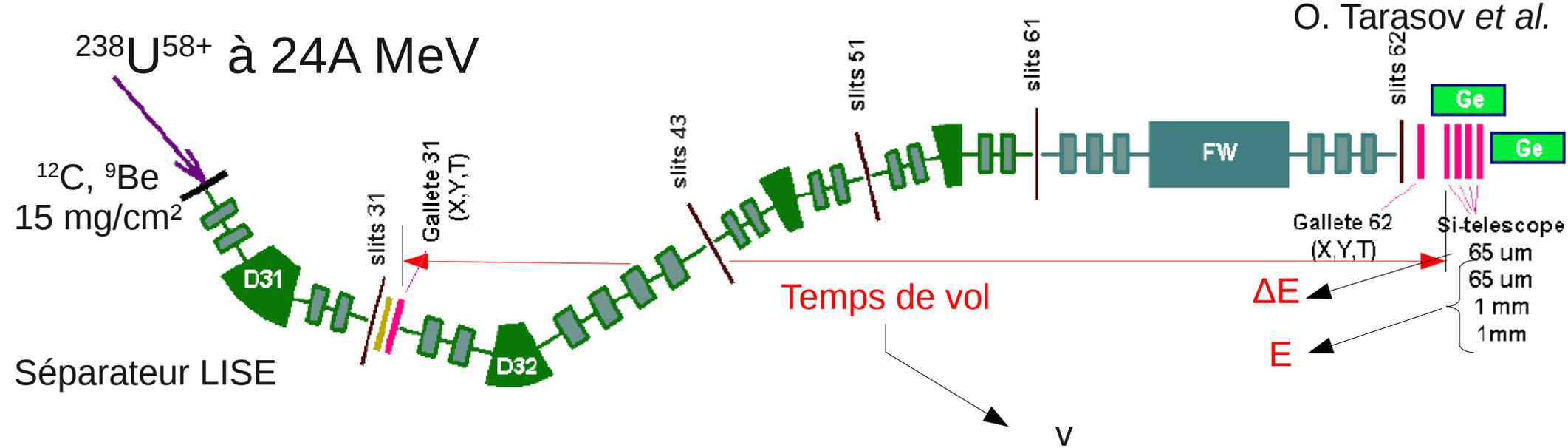


# Correction de l'acceptance en $\theta$



# Fusion-fission mesurée avec LISE

O. Tarasov et al.



# Fusion-fission avec LISE : rendements

Simulation de la cinématique

> cinématique proposée par Wilkins

$$\text{TKE} = 0,5A_1v_1^2 + 0,5A_2v_2^2 = Z_1Z_2e^2/D$$

B.D. Wilkins *et al.*, Phys. Rev. C 14 (1976)

Simulation de la distribution en état de charge

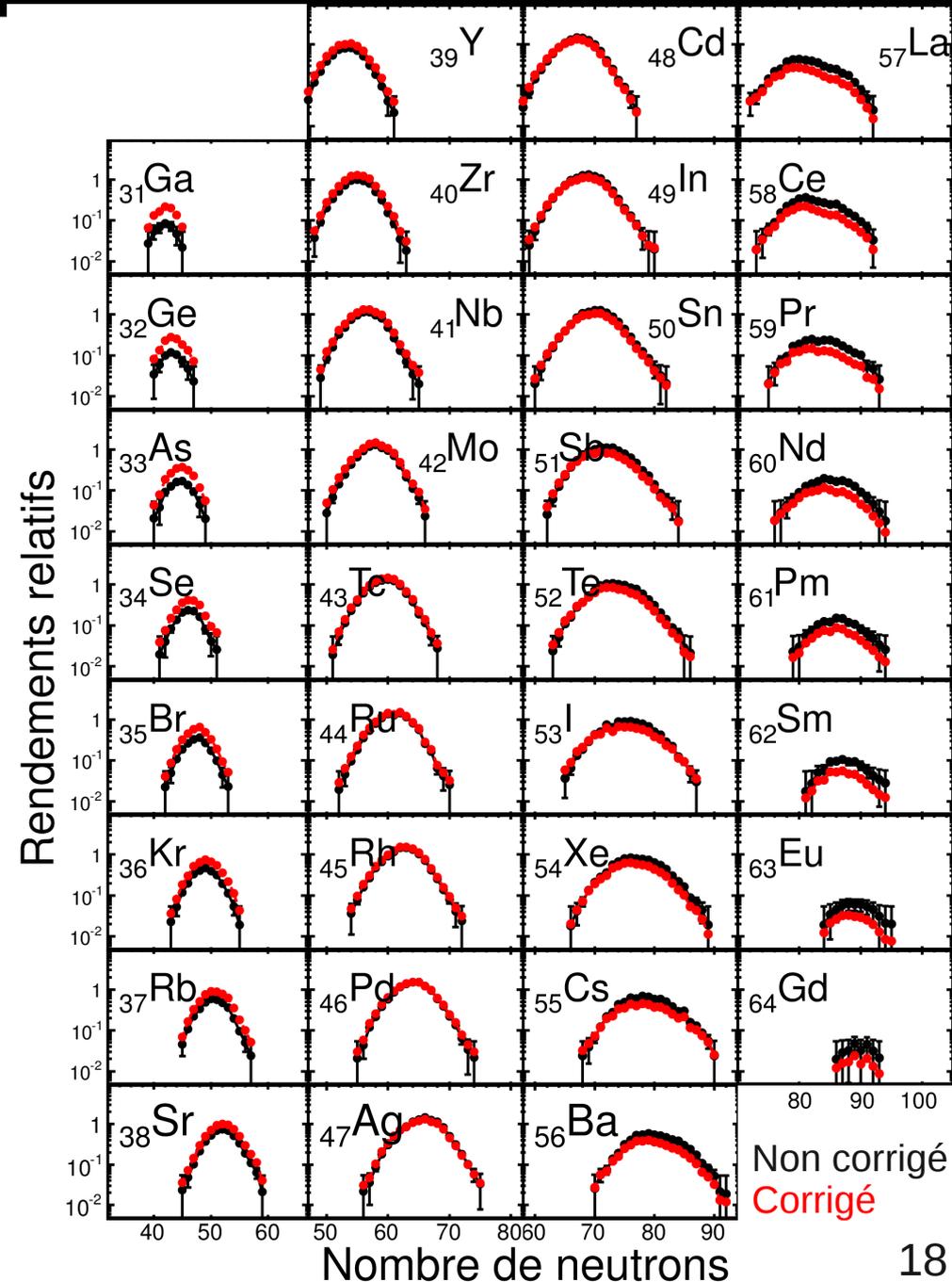
> modèle de Schiwietz

G. Schiwietz et P. Grande, NIM B 175 (2001)

Acceptance carrée de  $\pm 1^\circ$

Acceptance en Bp de 0,8 %

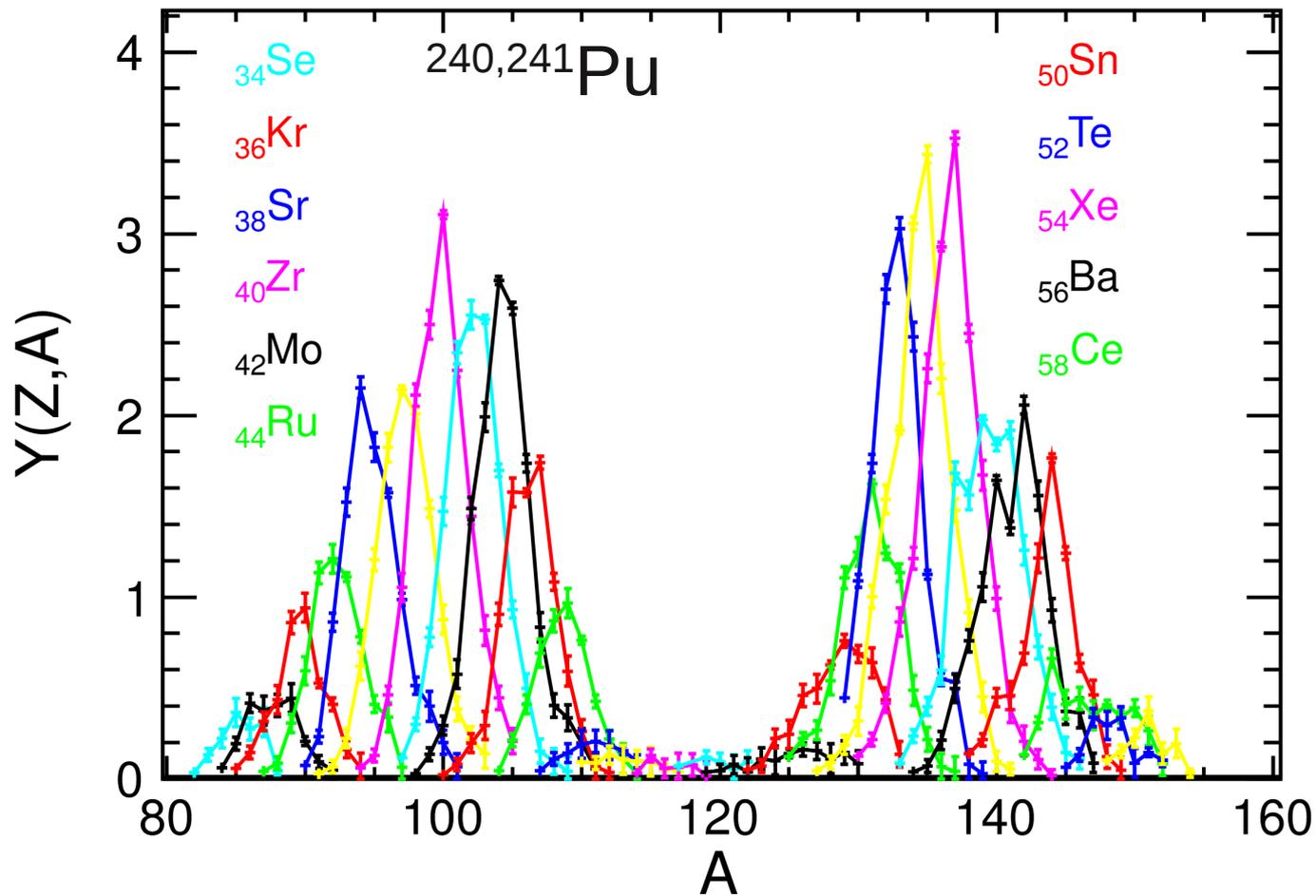
Facteur de correction :  $N_{\text{produit}}/N_{\text{transmis}}$



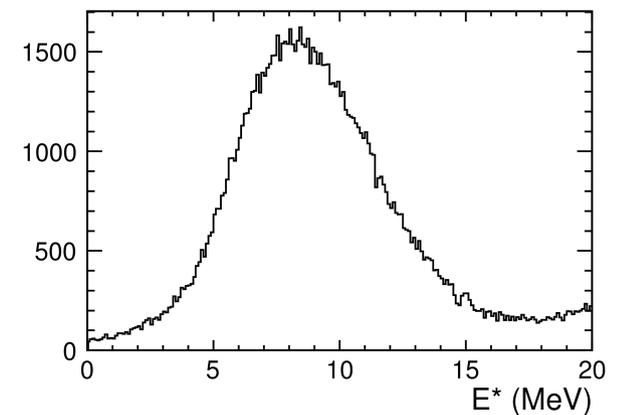
# Plan

- ♦ Pourquoi et comment étudier la fission ?
- ♦ Fission induite par transfert et fusion avec VAMOS
- ♦ Fusion-fission avec LISE
- ♦ **Résultats et discussion**
  - ♦ Rendements isotopiques du  $^{240,241}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{U}$
  - ♦ Vitesse des produits de fission du  $^{250}\text{Cf}$
  - ♦ Rendements isotopiques du  $^{250}\text{Cf}$
  - ♦ Excès de neutrons et largeur des distributions isotopiques des produits de fission

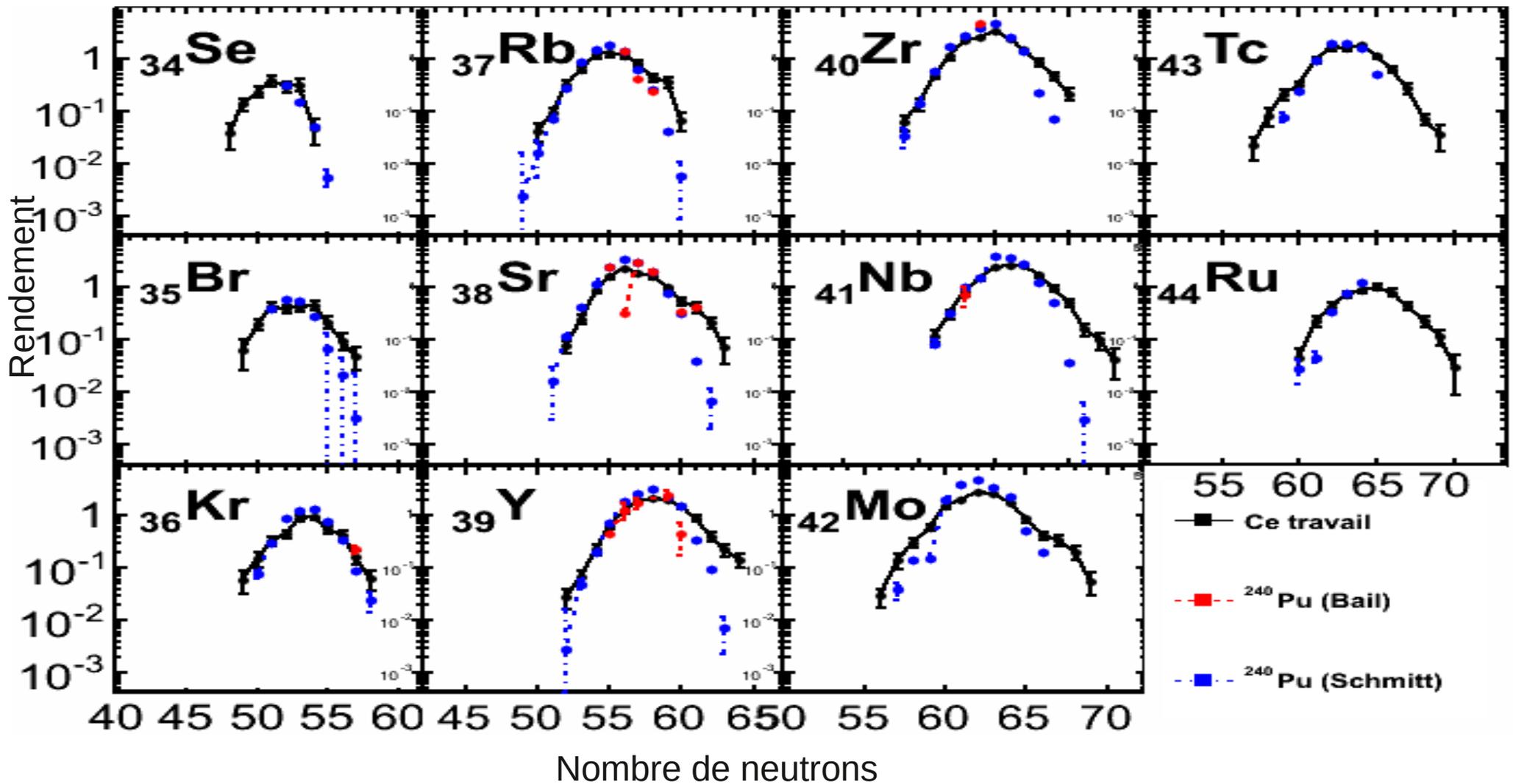
# Rendements isotopiques des produits de fission du $^{240,241}\text{Pu}$



Transfert – fission  
 $E^* \approx 9 \text{ MeV}$   
fission asymétrique



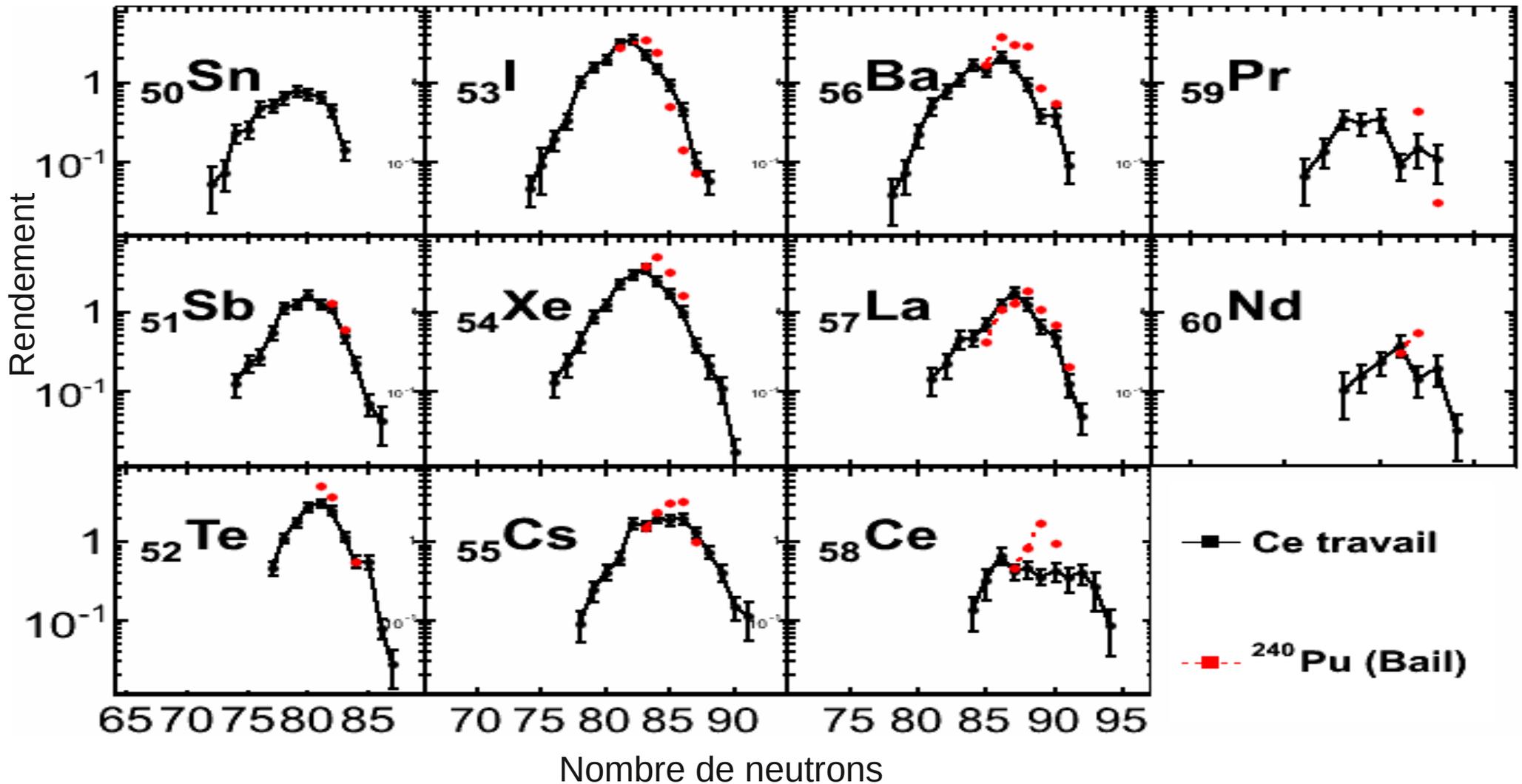
# Distributions isotopiques des fragments de fission du $^{240,241}\text{Pu}$ ( $E^* \approx 9 \text{ MeV}$ )



Données cohérentes avec les mesures précédentes

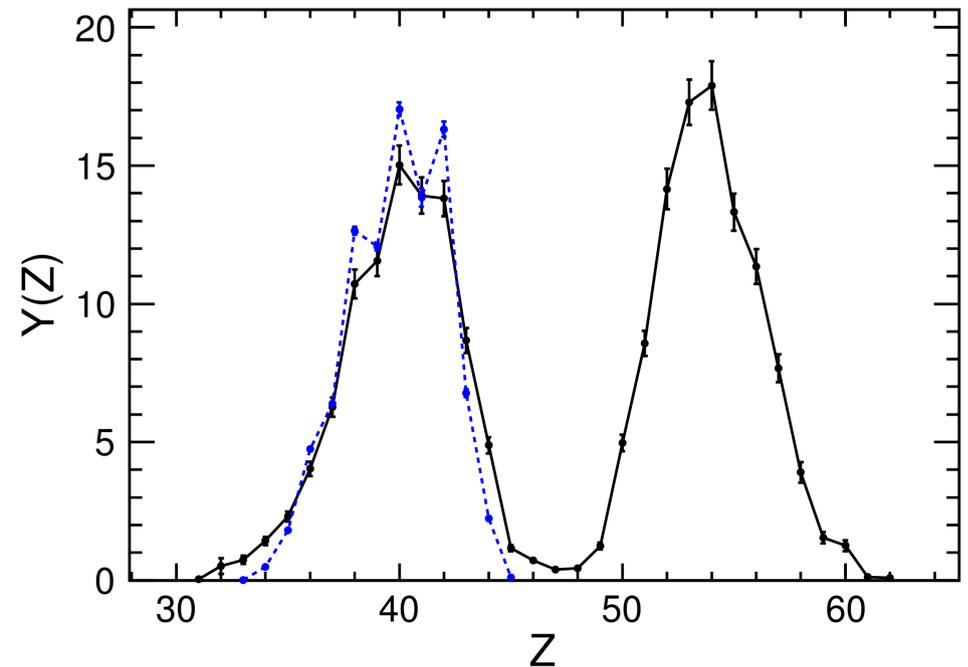
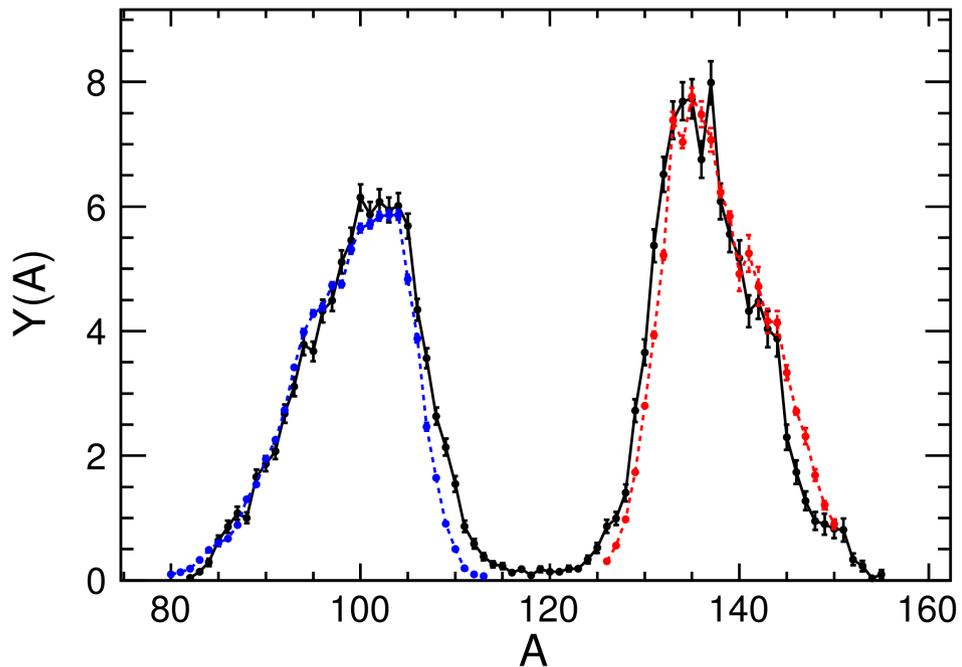
Largeur plus importante dans notre cas du fait de la contamination du  $^{241}\text{Pu}$  et de l'énergie d'excitation plus importante

# Distributions isotopiques des fragments de fission du $^{240,241}\text{Pu}$ ( $E^* \approx 9 \text{ MeV}$ )



Mesure complète des rendements des produits de fission lourds  
Bon accord avec les précédentes mesures

# Distributions en A et en Z des fragments de fission du $^{240,241}\text{Pu}$ ( $E^* \approx 9 \text{ MeV}$ )

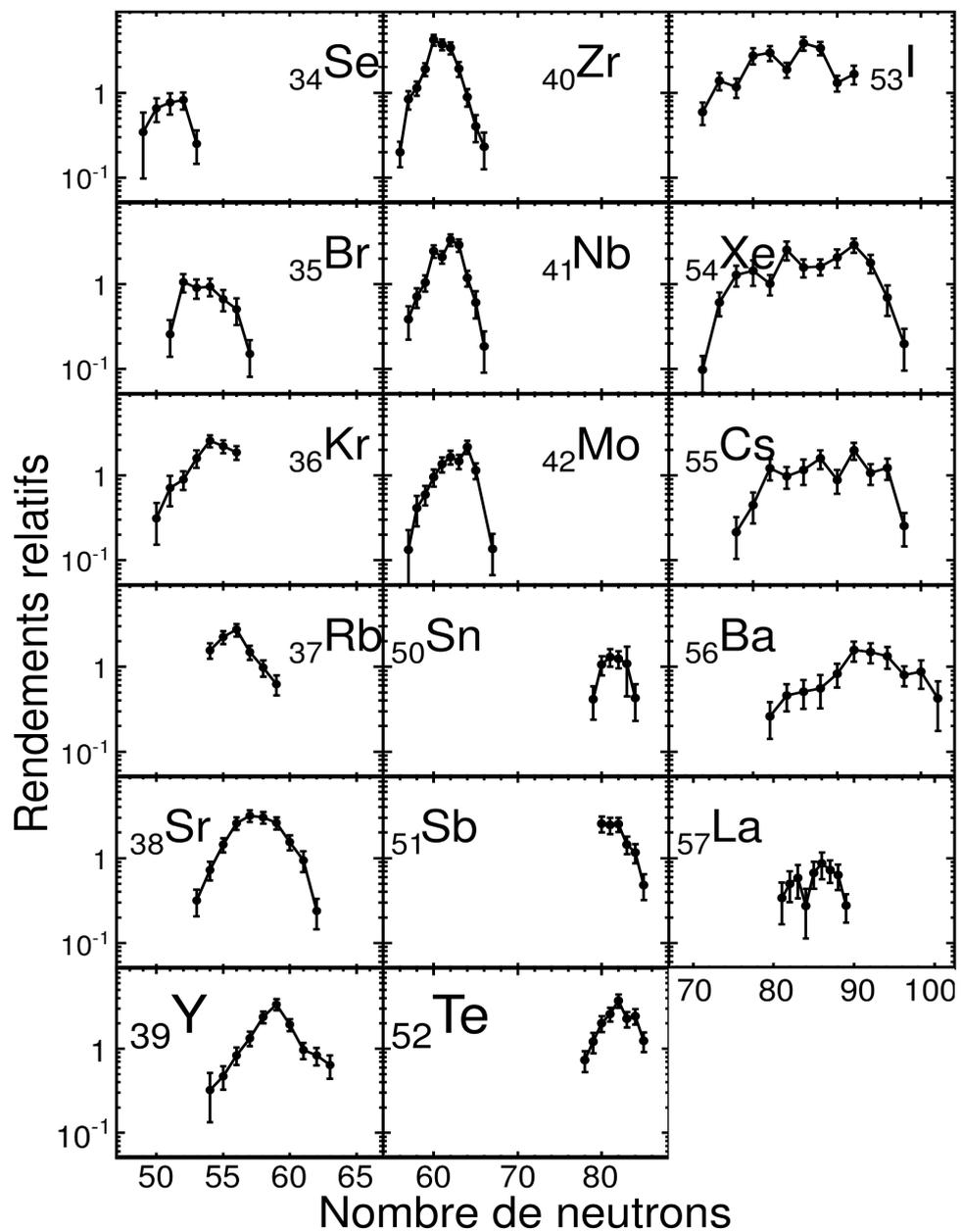


C. Schmitt *et al.* NPA 430(1) :21 – 60, 1984.  
A. Bail *et al.* PRC 84, 034605 (2011)

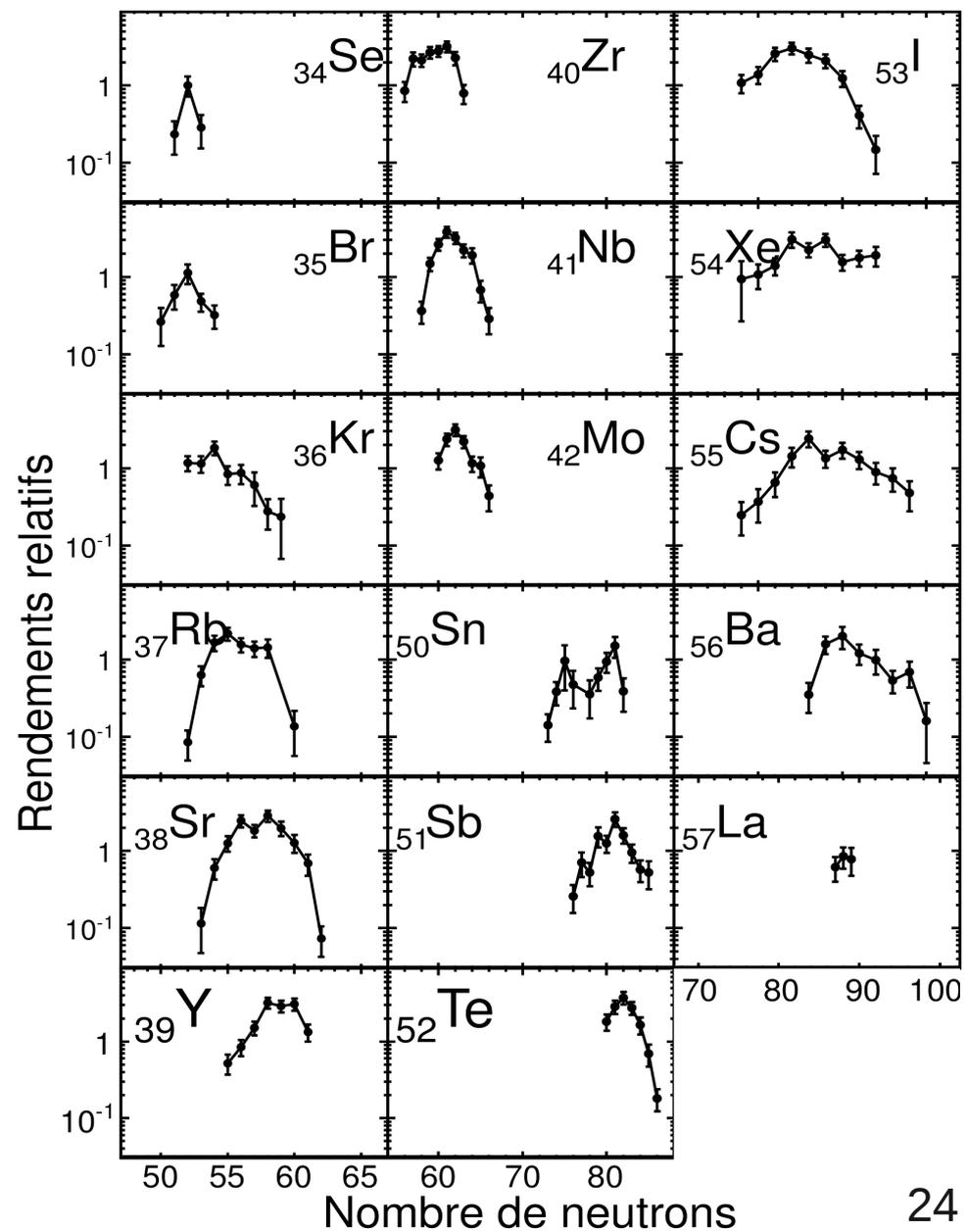
Validité de notre méthode de reconstruction  
des rendements isotopiques

# Distributions isotopiques des fragments de fission du $^{238}\text{U}$ et du $^{239}\text{Np}$

$^{238}\text{U}$  ( $E^* \approx 7$  MeV) (4700 événements)

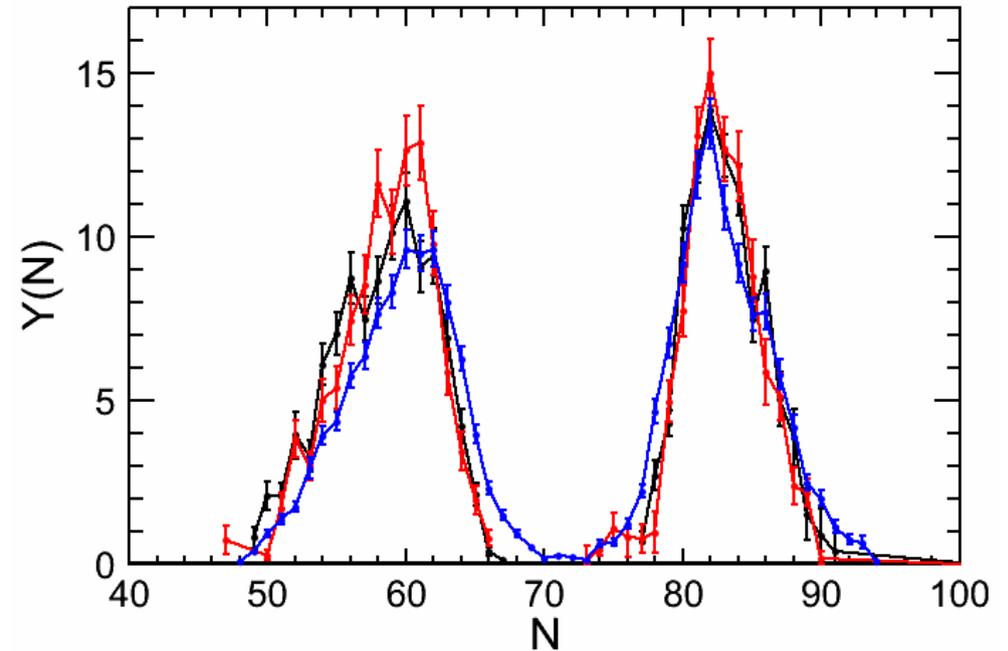
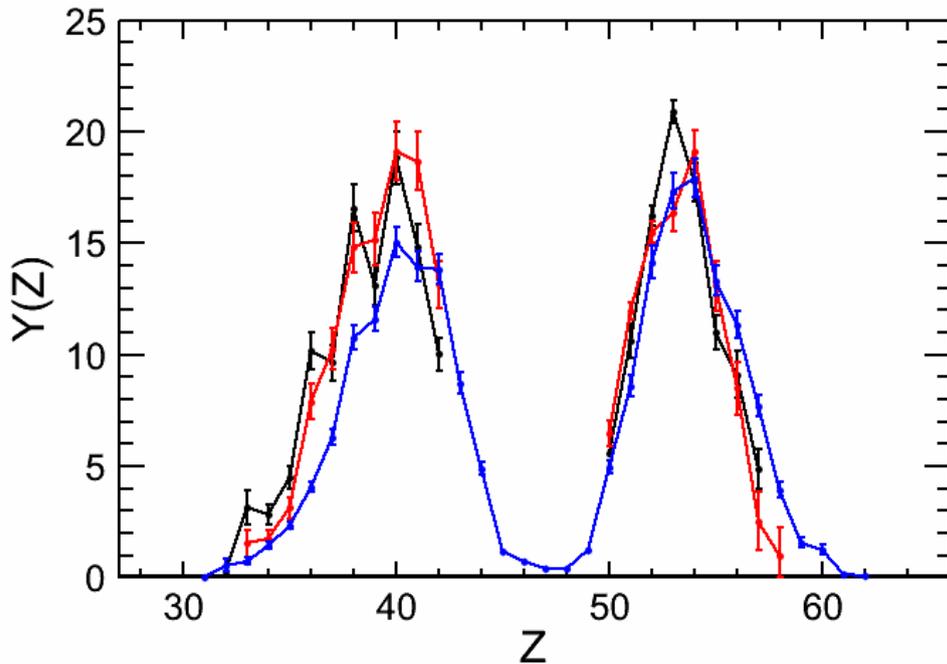


$^{239}\text{Np}$  ( $E^* \approx 6$  MeV) (3500 événements)



# Influence des effets de couches proton et neutron

$^{238}\text{U}$  ( $E^* \approx 7$  MeV)  
 $^{239}\text{Np}$  ( $E^* \approx 6$  MeV)  
 $^{240,241}\text{Pu}$  ( $E^* \approx 9$  MeV)



	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Np}$	$^{240,241}\text{Pu}$
$\langle Z \rangle_{\text{léger}}$	39,4	39,9	39,9
$\langle Z \rangle_{\text{lourd}}$	53,1	53,1	53,9
$\langle N \rangle_{\text{léger}}$	58,1	58,8	59,6
$\langle N \rangle_{\text{lourd}}$	82,7	82,8	83,0

Pour tous les systèmes :

- $\langle Z \rangle_{\text{lourd}} \approx 53-54$
- $\langle N \rangle_{\text{lourd}} \approx 83$

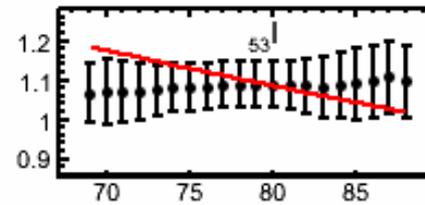
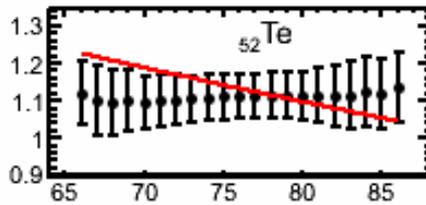
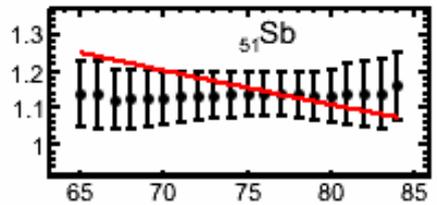
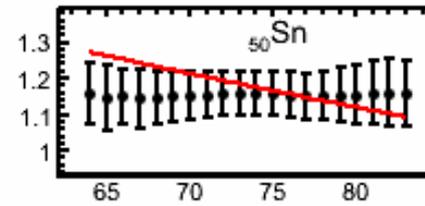
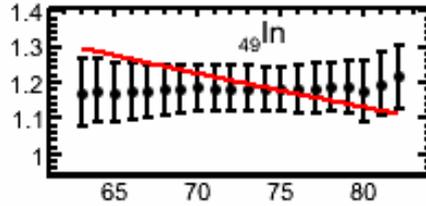
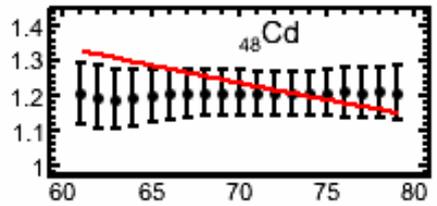
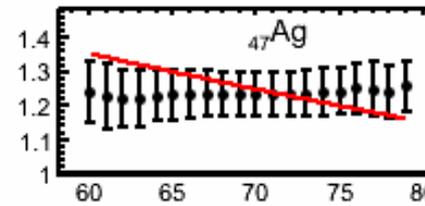
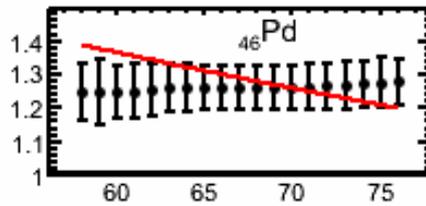
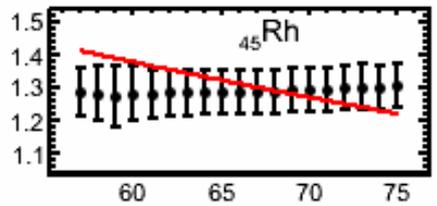
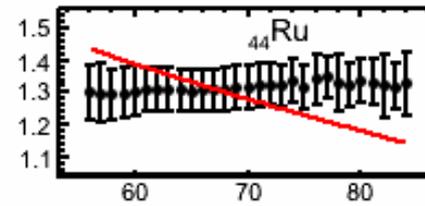
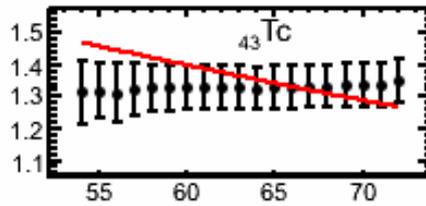
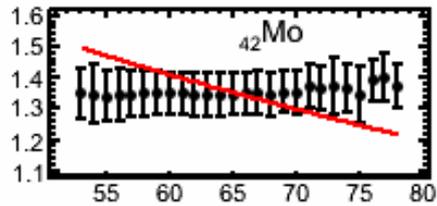
Rôle stabilisateur de  $Z \approx 54$  et  $N \approx 86$  ( $83+3$ )

# Vitesse des produits de fission du $^{250}\text{Cf}$

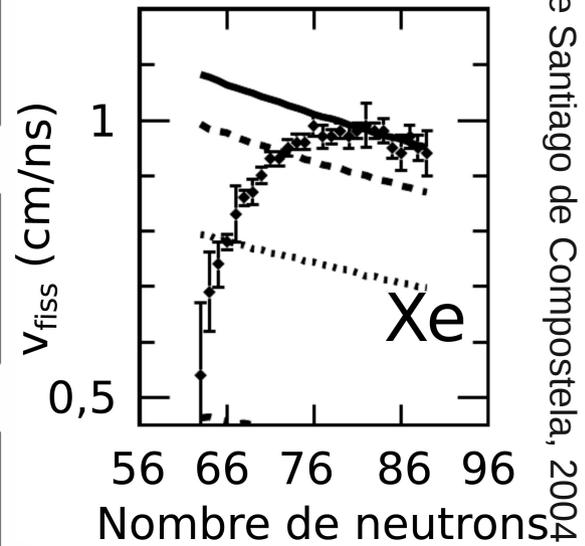
$$\text{TKE} \approx Z_1 Z_2 e^2 / D$$

$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$

$$v_{fiss} = \sqrt{\frac{2(A_{fiss} - A_1)Z_1(Z_{fiss} - Z_1)e^2}{A_1 m_0 A_{fiss} (r_0 A_1^{1/3} (1 + \frac{2}{3} \beta_1) + r_0 A_2^{1/3} (1 + \frac{2}{3} \beta_2) + d)}}$$



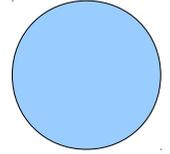
Nombre de neutrons



Vitesse constante

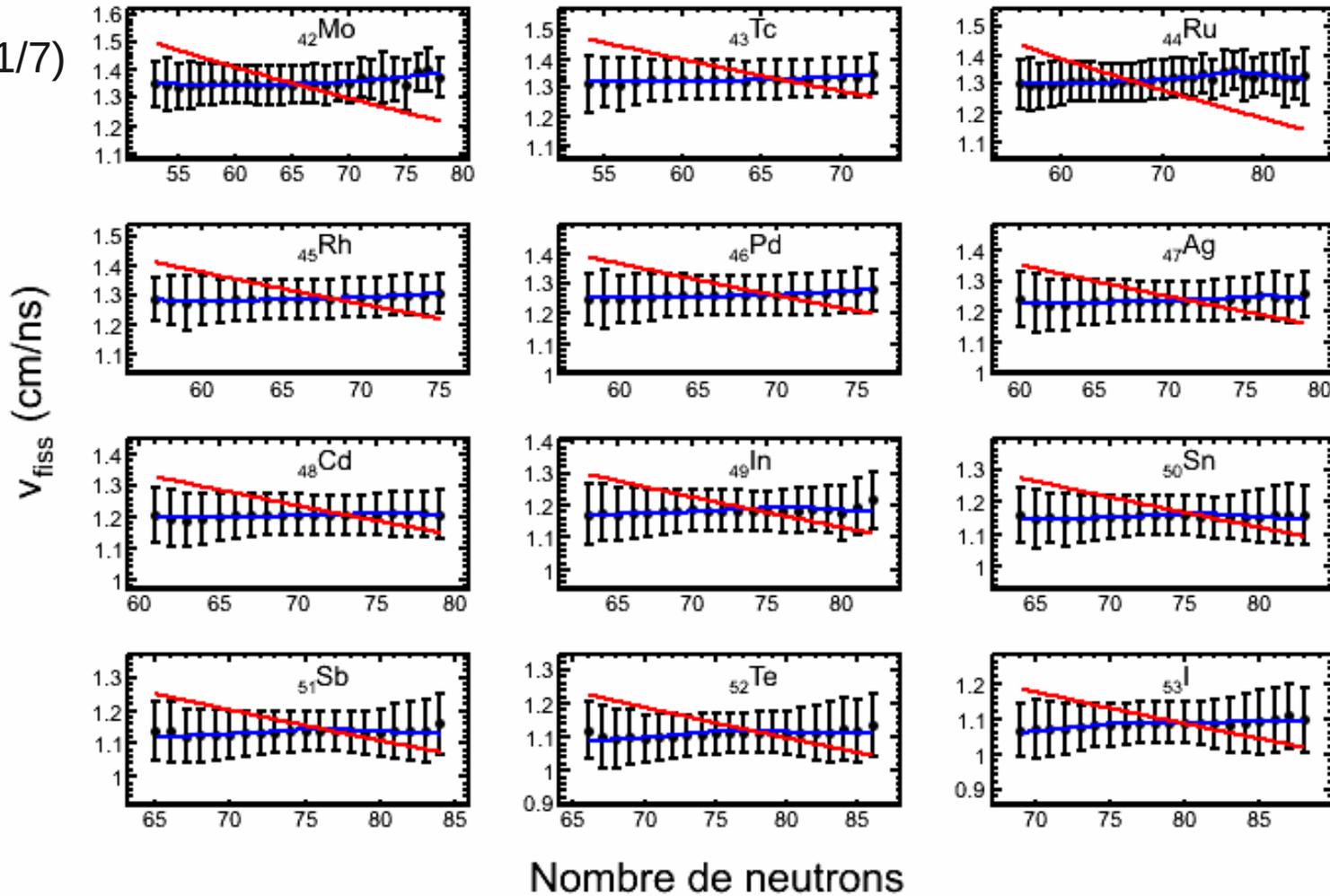
Contradiction avec la conservation de l'impulsion  $m_1 v_1 = m_2 v_2$

# Évolution de la déformation avec N



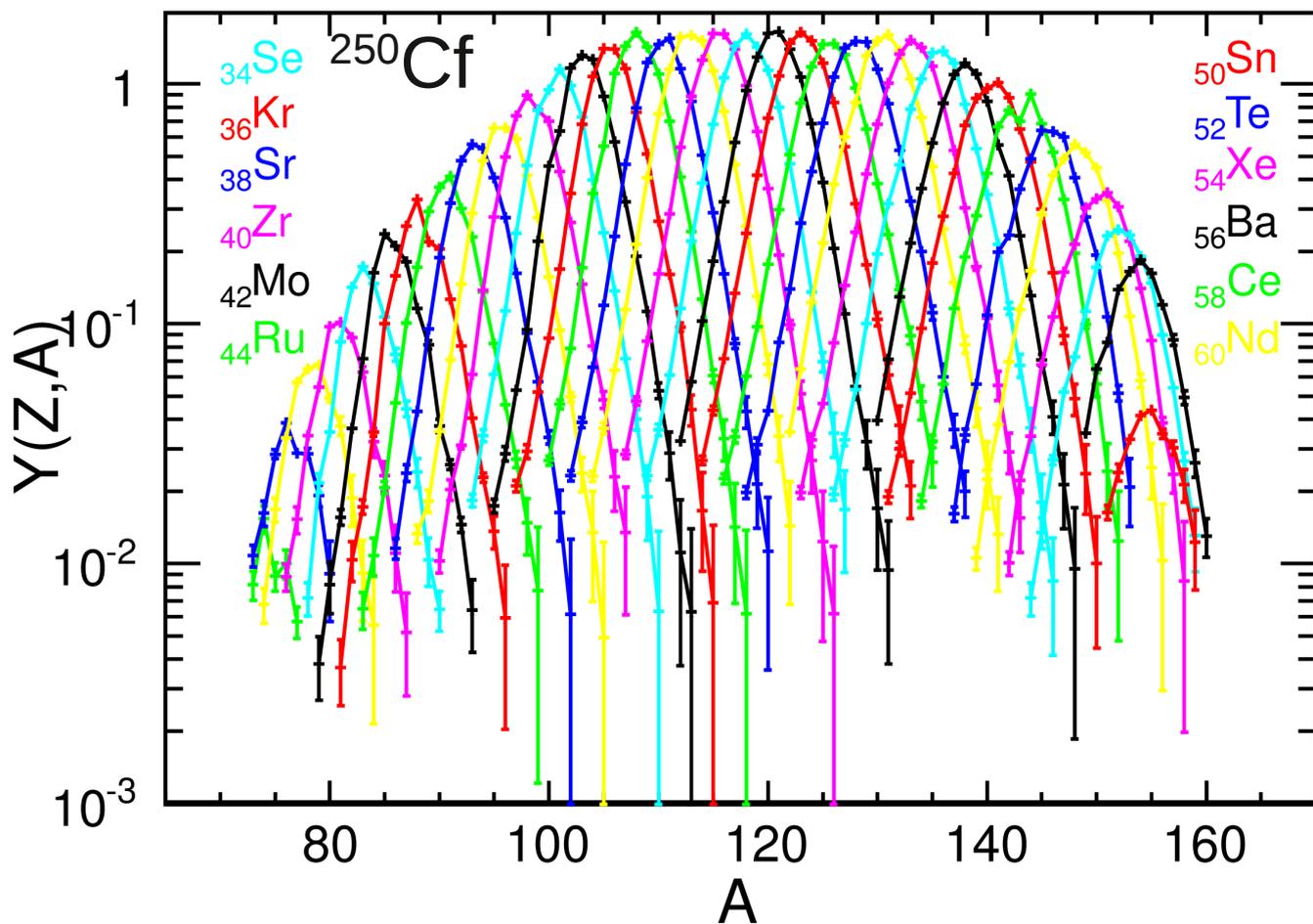
$\beta=1$  (rapport 1/7)

$\beta=0$



Déformation cohérente : les fragments les moins riches en neutrons étaient les plus déformés  
Pas visible dans les largeurs des distributions

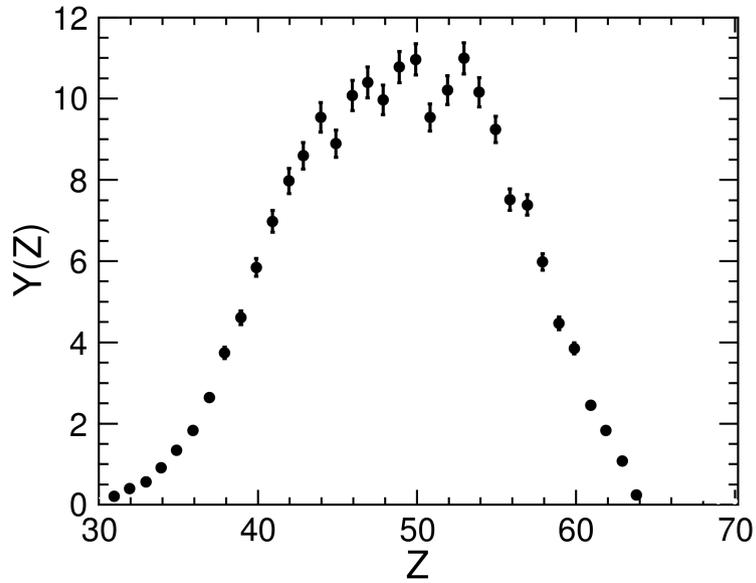
# Rendements isotopiques des produits de fission du $^{250}\text{Cf}$



Fusion – fission  
 $E^* = 45 \text{ MeV}$   
fission symétrique

- Distributions isotopiques sur deux ordres de grandeur (de  $_{30}\text{Zn}$  à  $_{64}\text{Gd}$ )
- Environ 600 isotopes identifiés

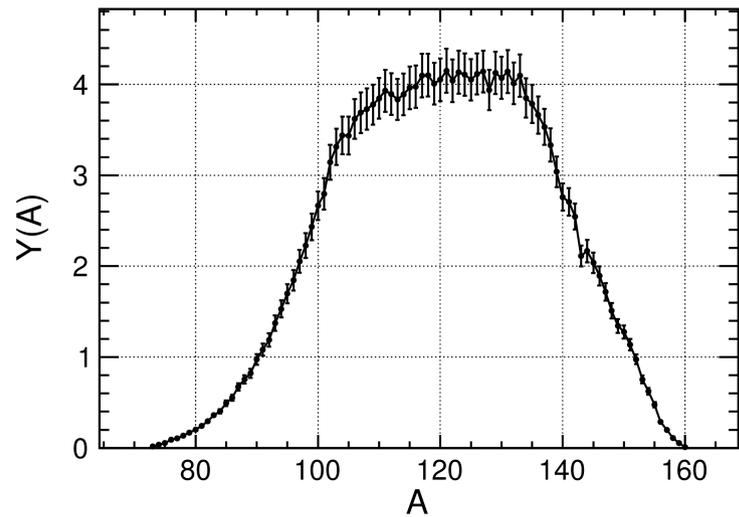
# Distributions en A et en Z des fragments de fission du $^{250}\text{Cf}$ ( $E^* = 45 \text{ MeV}$ )



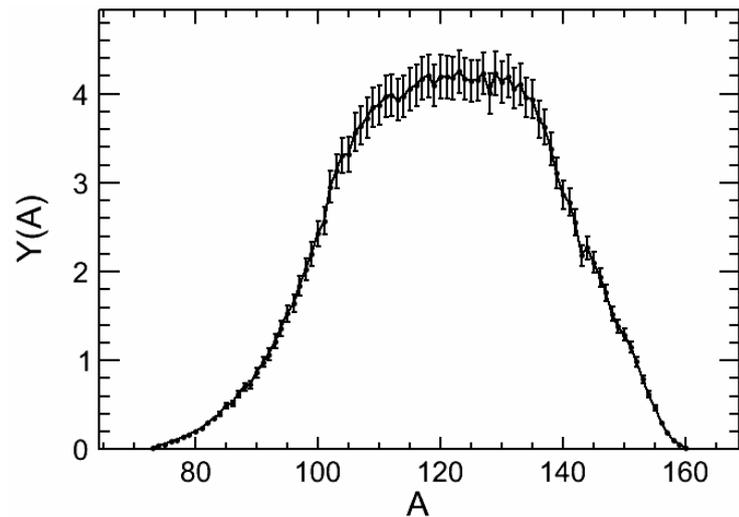
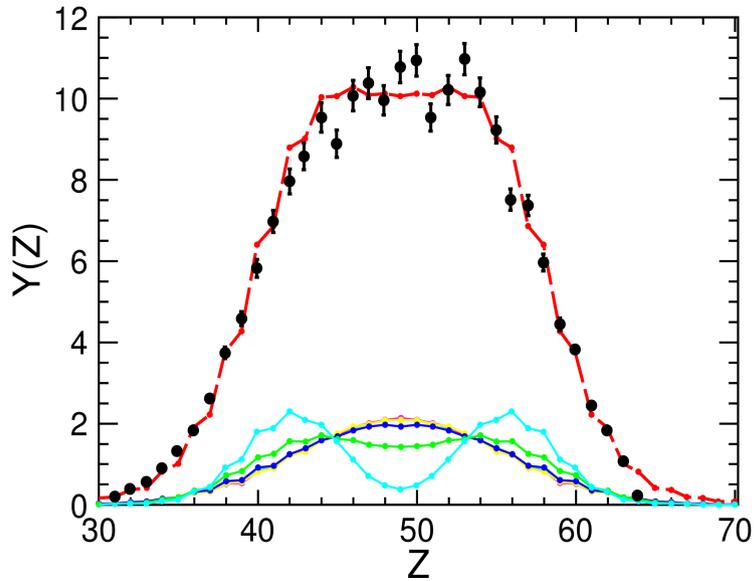
Pas d'évaporation de proton

Rendements identiques pour deux Z complémentaires

Présence d'un plateau



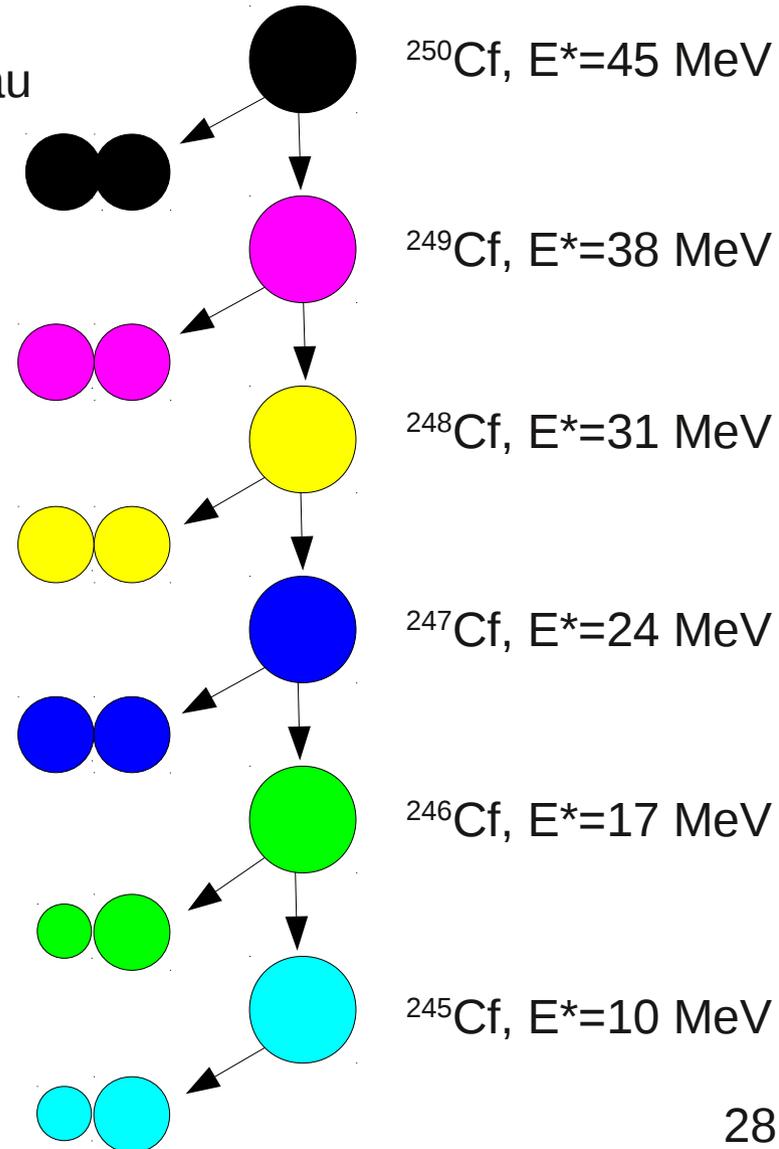
# Distributions en A et en Z des fragments de fission du $^{250}\text{Cf}$ ( $E^* = 45 \text{ MeV}$ )



Pas d'évaporation de proton

Rendements identiques pour deux Z complémentaires

Présence d'un plateau

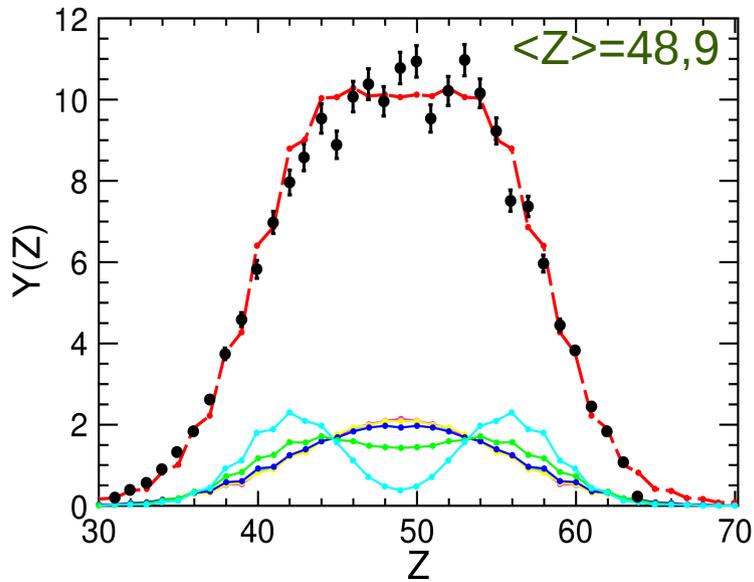


K.-H. Schmidt et B. Jurado. (2010)

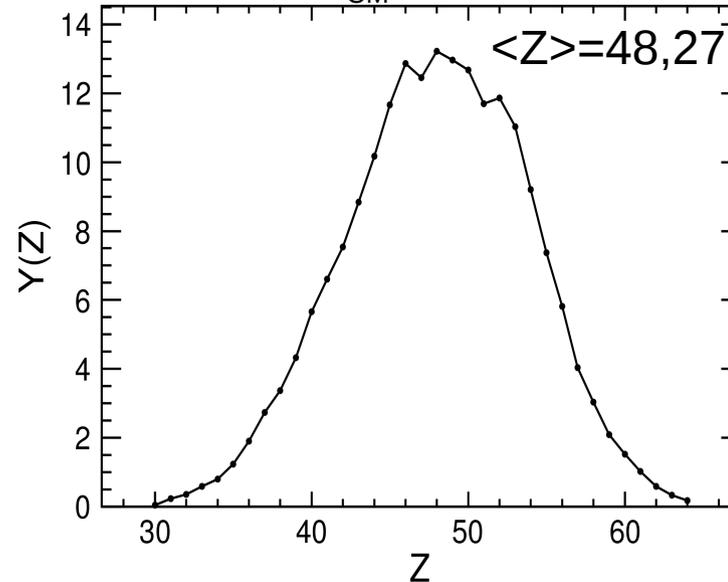
*General model description of fission observables.*

# Distributions en Z

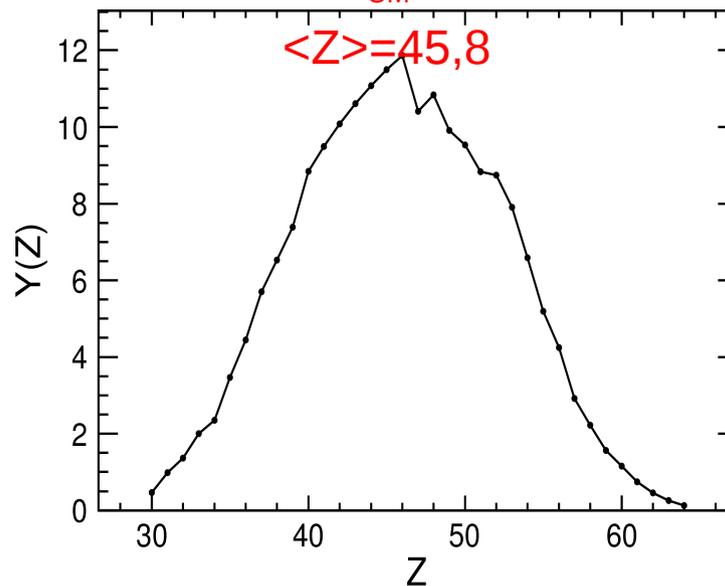
$^{250}\text{Cf}$  ( $E^*=45$  MeV)



$^{238}\text{U}+^9\text{Be}$  ( $E_{\text{CM}} \approx 185$  MeV)



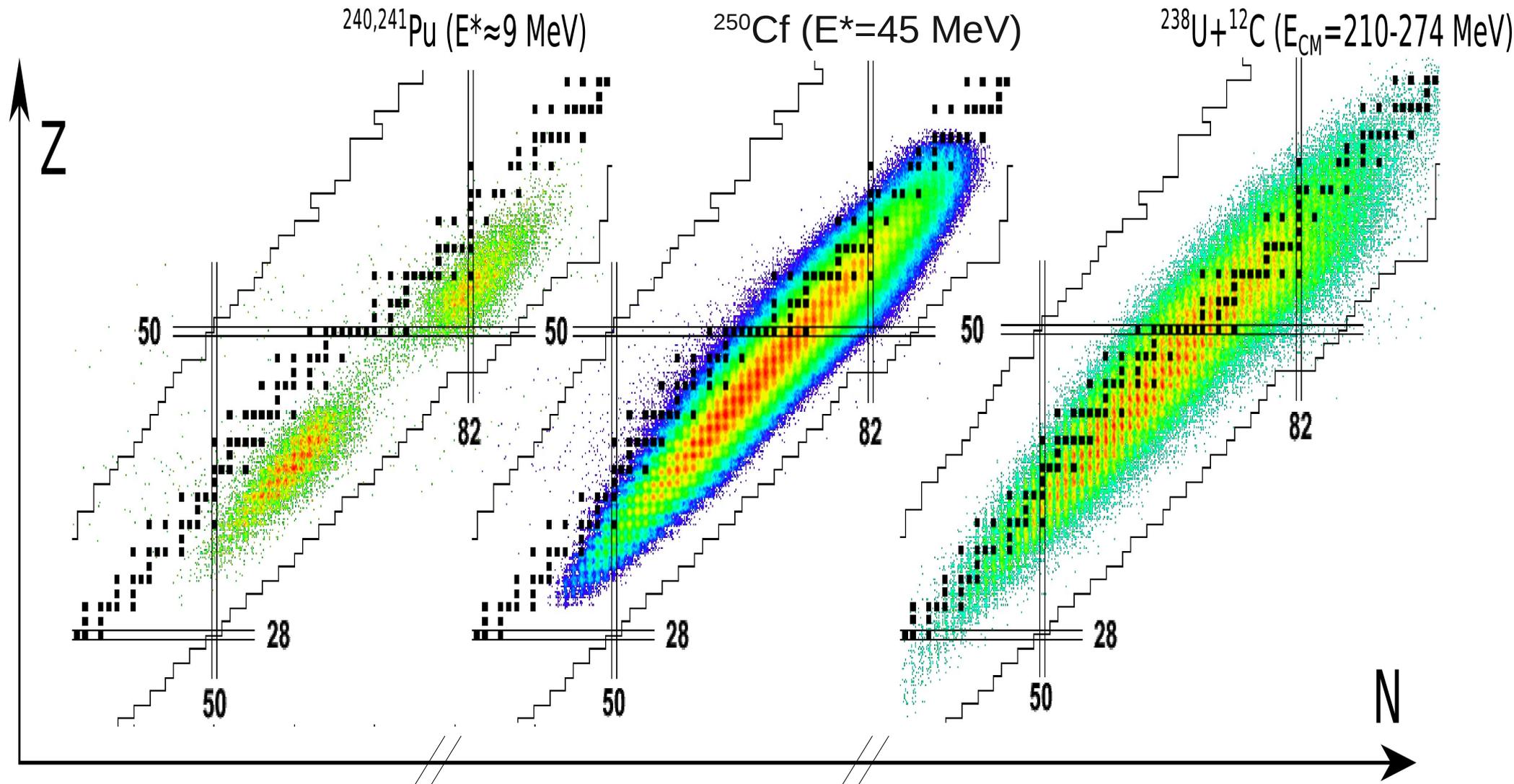
$^{238}\text{U}+^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{CM}} \approx 240$  MeV)



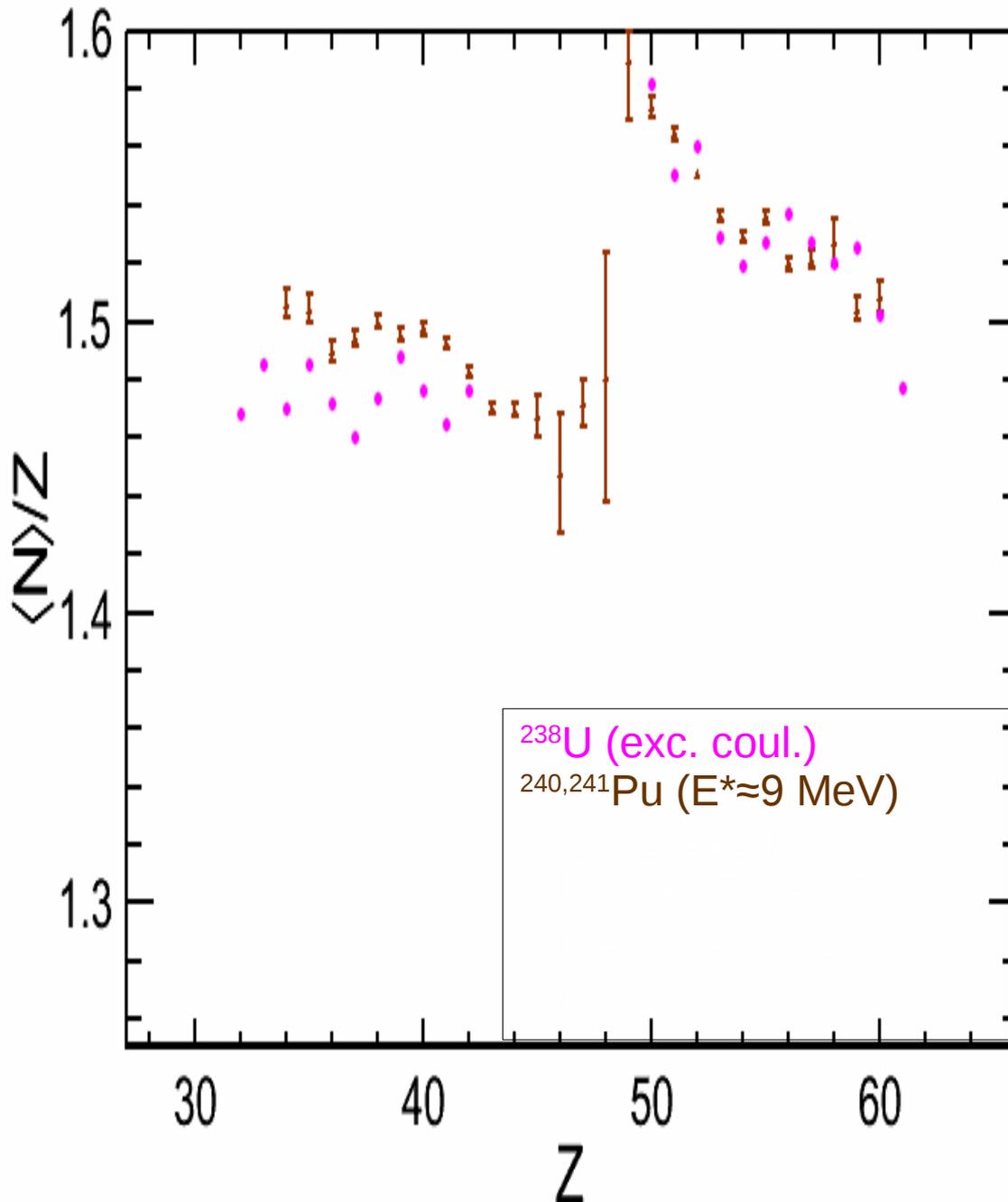
$\langle Z \rangle = Z_{\text{fiss}}/2 \rightarrow$  pas d'évaporation de p

$\langle Z \rangle < Z_{\text{fiss}}/2 \rightarrow$  évaporation de p

# Évolution des distributions isotopiques avec l'énergie dans le centre de masse



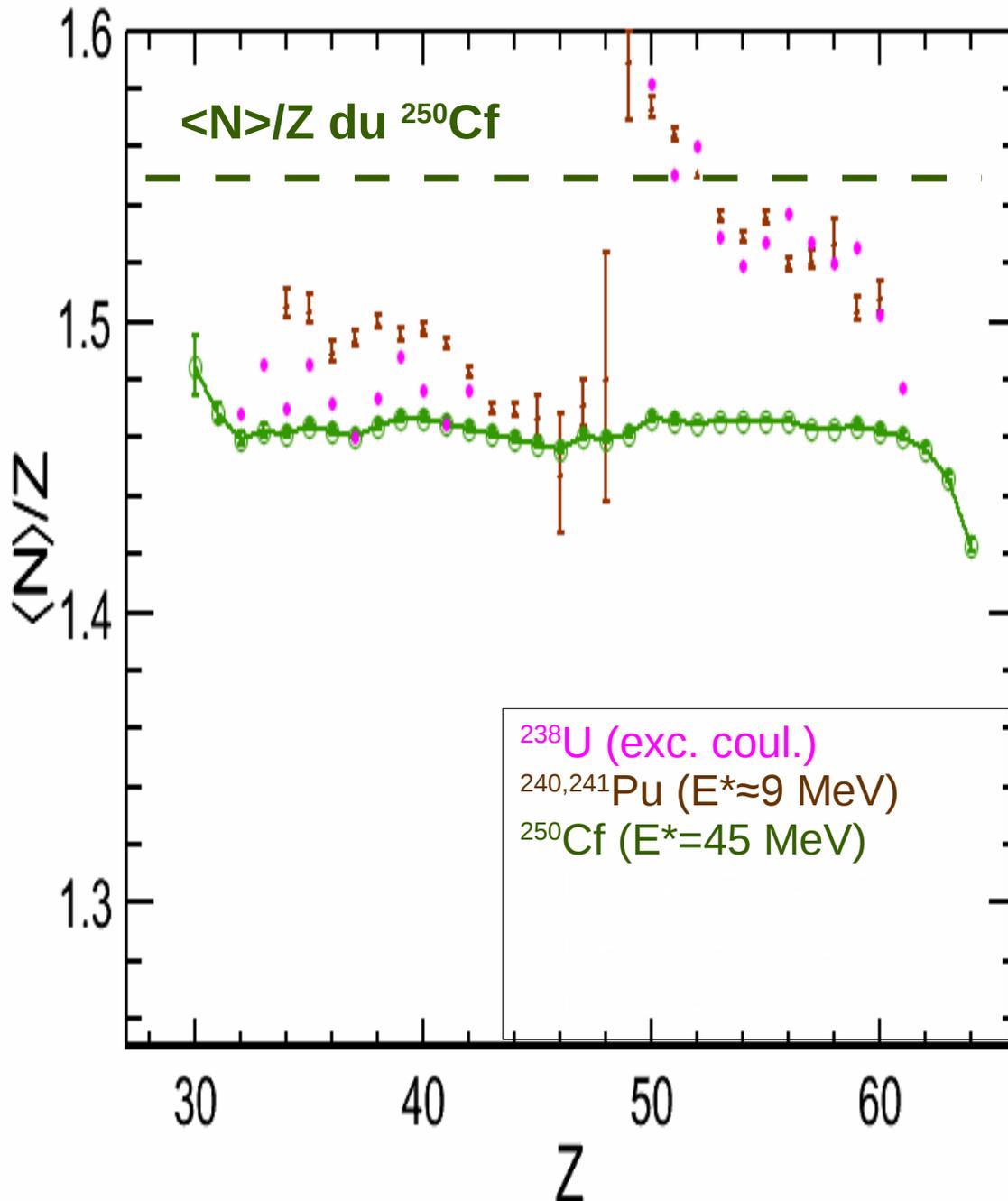
# Évolution de l'excès de neutrons des produits de fission



À basse énergie d'excitation :

- Polarisation de charge
- Augmentée par les effets de couches

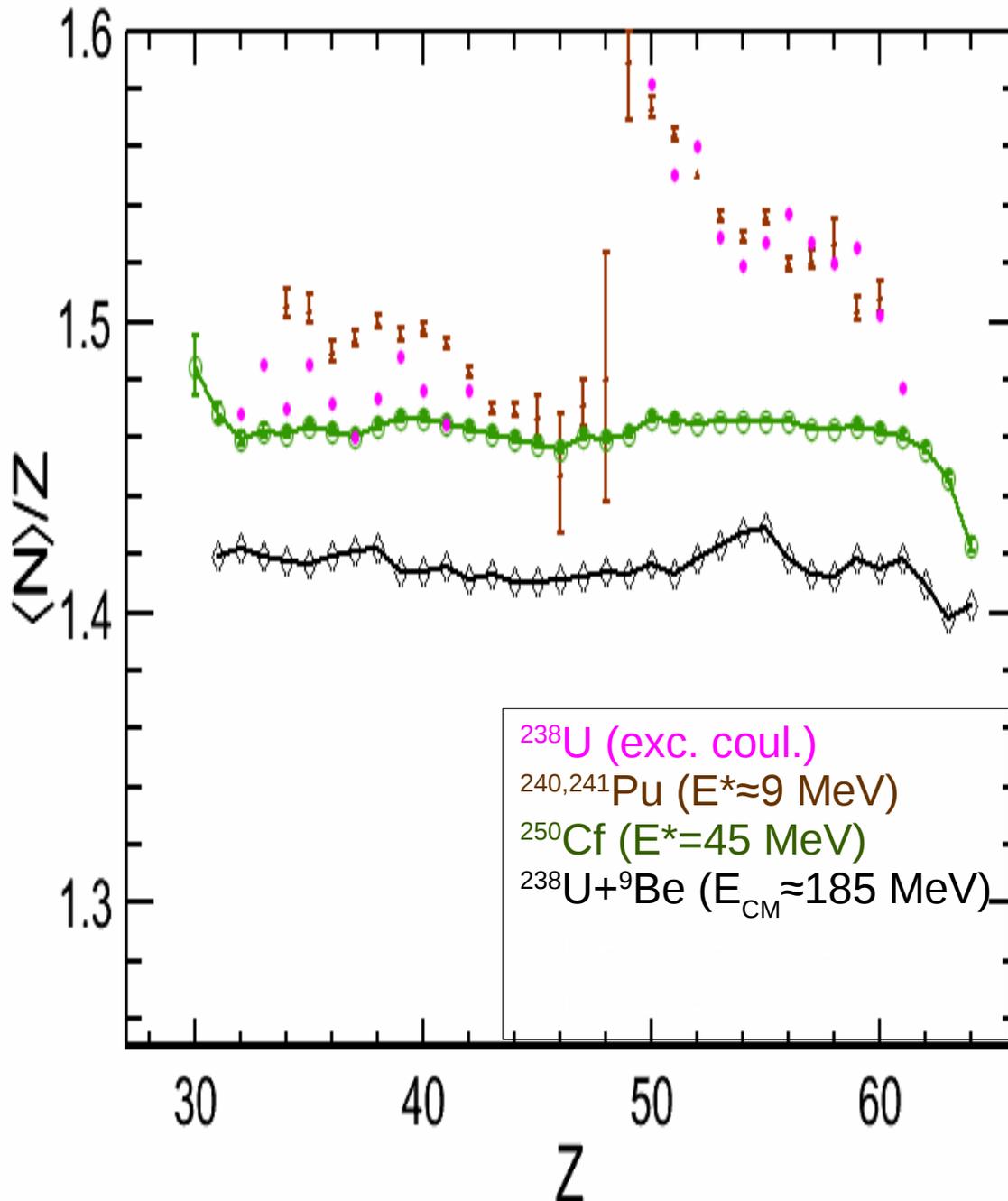
# Évolution de l'excès de neutrons des produits de fission



$E^* > 45 \text{ MeV}$  :

- $\langle N \rangle / \langle Z \rangle$  diminue (correspond à l'évaporation de 8 neutrons)
  - Disparition des effets de couches
  - Disparition de la polarisation de charge
- => évaporation de neutron post-scission

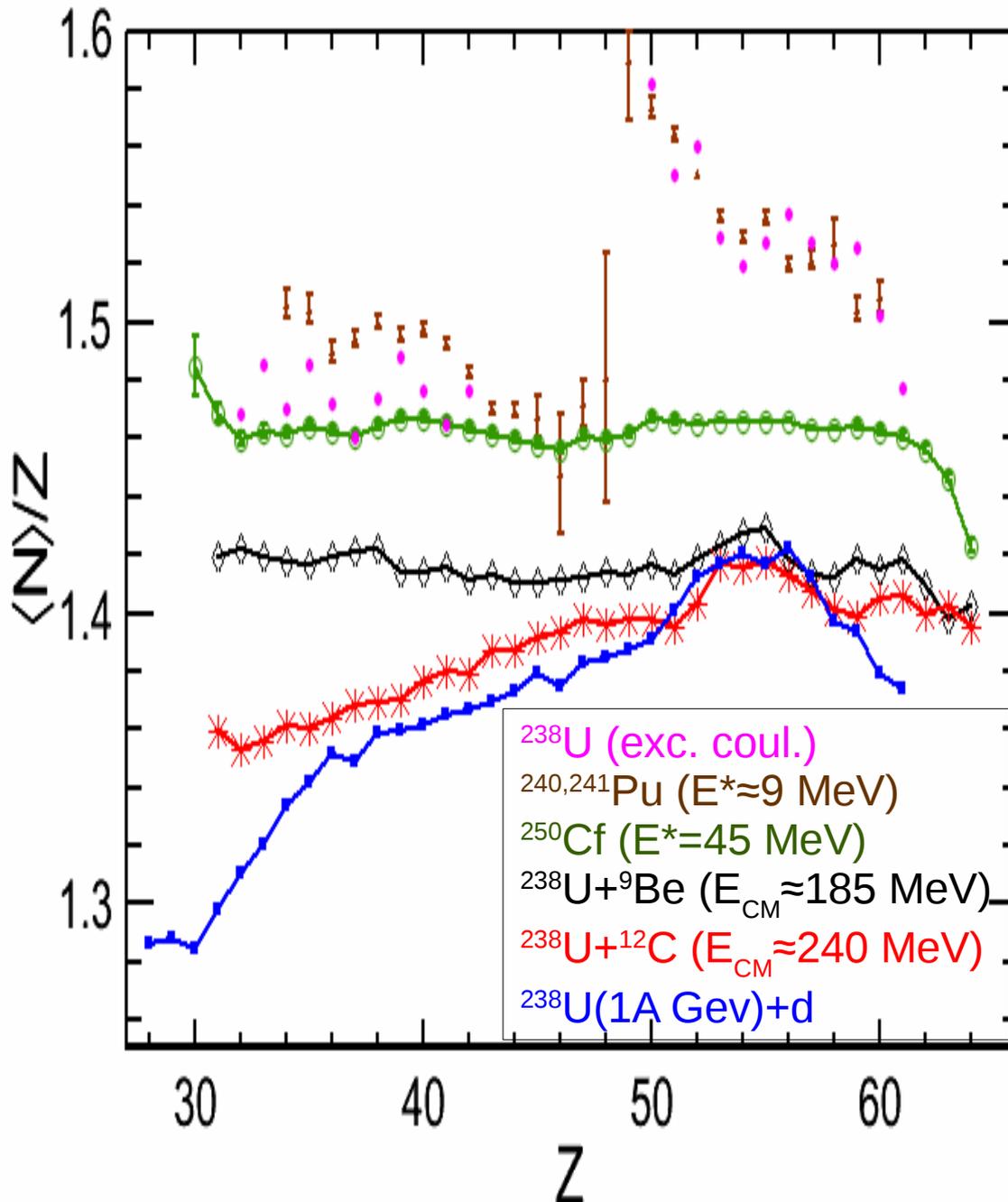
# Évolution de l'excès de neutrons des produits de fission



$E_{\text{CM}} \approx 185$  MeV :

- $\langle N \rangle / Z$  diminue (évaporation de 15 neutrons)
- Fission à basse énergie d'excitation

# Évolution de l'excès de neutrons des produits de fission



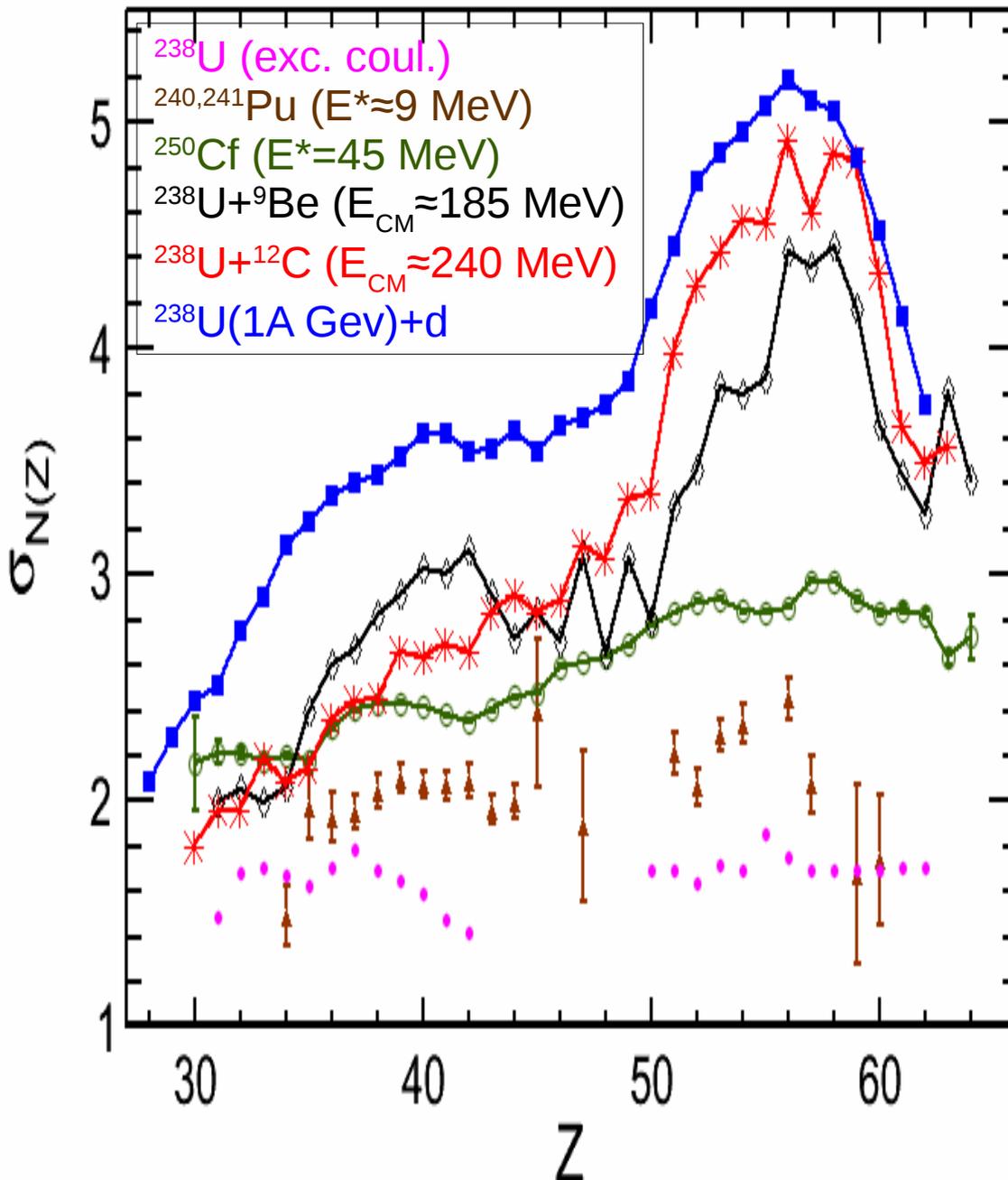
Pour les énergies de bombardement plus importantes :

- Différents noyaux fissionnant avec différents  $E^*$  :

- les émissions de pré-équilibre et/ou l'évaporation de particules réduisent l'énergie d'excitation disponible

- formation de noyaux fissionnants plus légers avec un  $\langle N \rangle / Z$  plus petit

# Évolution de la largeur des distributions isotopiques des produits de fission



Description statistique de la fission :

$\sigma_{N(Z)}$  augmente avec  $E^*$

$\sigma_{N(Z)}$  augmente avec A du fragment de fission

Augmentation de  $\sigma_{N(Z)}$  autour de  $Z=54$  pour  $E_{CM}$  importante

=> contribution de fission à faible  $E^*$

# Conclusion (I)

- Excès de neutrons : sonde pour les temps de fission → changement de régime observé
  - Fission très rapide à  $E^*=45$  MeV
  - Fission plus lente pour les énergies de bombardement plus importantes (émission de particules avant d'atteindre le point selle)
- Contradiction de notre interprétation entre le  $\langle N \rangle / Z$  et le  $\sigma_{N(Z)}$  constant du  $^{250}\text{Cf}$  à  $E^*=45$  MeV et le plateau de la distribution en  $Z$
- Position constante de la valeur moyenne des distributions en proton ET en neutron des fragments lourds → effet stabilisateur de  $Z=54$  et  $N=86$
- Vitesse de fission constante → informations sur les déformations à la scission
  - Fragments déficients en neutrons plus déformés
  - Effet non visible dans les largeurs de distribution

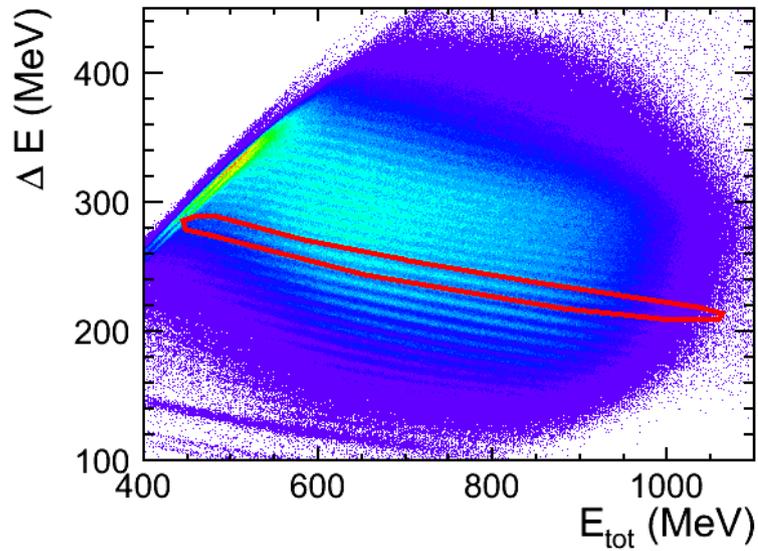
# Conclusion (II)

- Première utilisation de LISE et VAMOS pour mesurer des rendements de fission : nouvelle méthode d'analyse développée
- La cinématique inverse couplée à l'utilisation d'un spectromètre a permis la mesure complète de distributions isotopiques pour différents systèmes fissionnants
- Identification du système fissionnant avec le détecteur SPIDER dans les réactions de transfert ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{240,241}\text{Pu}$ ) ainsi qu'une estimation précise de l'énergie d'excitation du système fissionnant
- Bon accord entre nos données et de précédentes mesures

# Perspectives

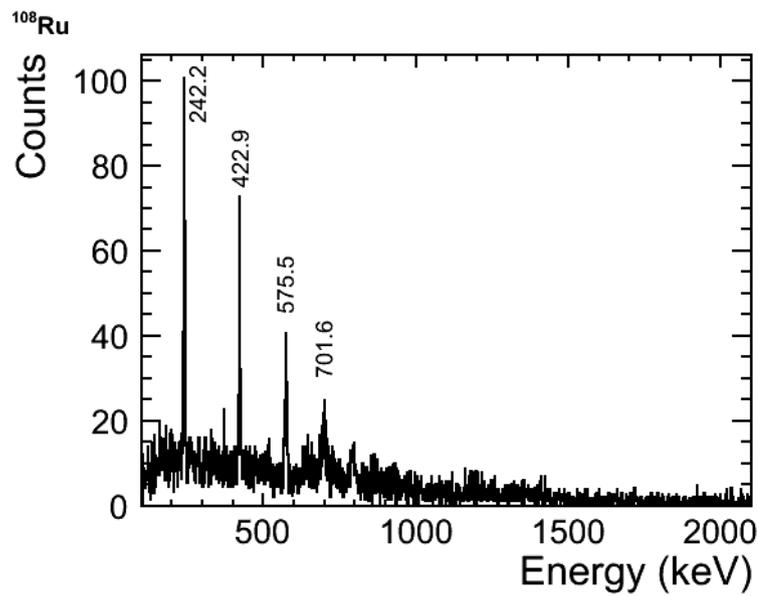
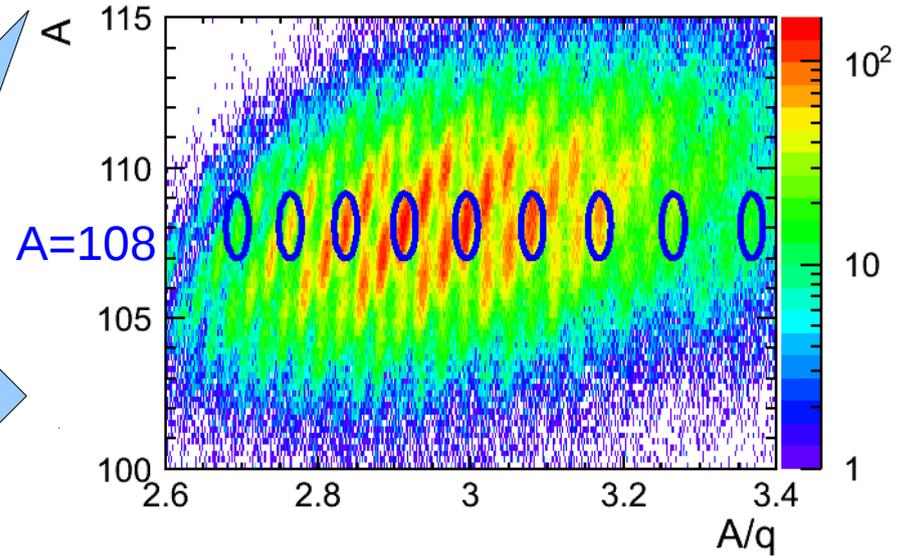
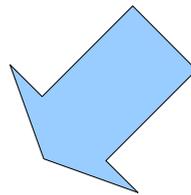
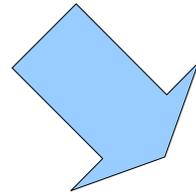
- Au GANIL
  - Expérience de juillet 2011
    - correction des problèmes de SPIDER : amélioration de la résolution et de la statistique
    - utilisation d'un autre bras en vis-à-vis de VAMOS pour mesurer le fragment complémentaire : mesure de l'évaporation de neutrons post-scission
  - Développement de faisceau de Th,  $^{235}\text{U}$
- Ailleurs
  - Expérience SOFIA à GSI : mesure simultanée de la masse et du numéro atomique des deux fragments de fission pour une quinzaine de pré-actinides
  - Faisceau de pré-actinides à HIE-ISOLDE
- Contraintes sur les modèles





Z=44

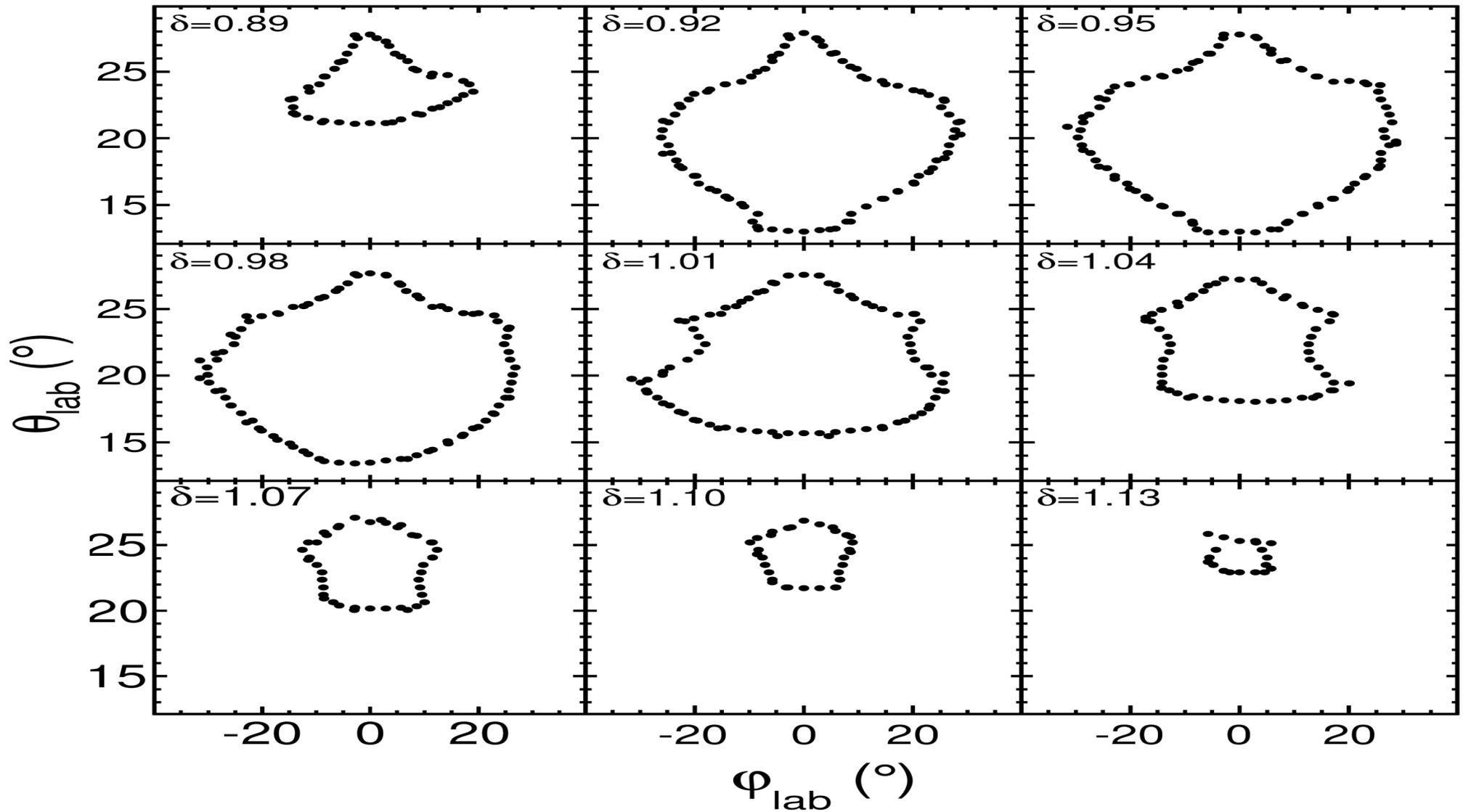
$^{108}\text{Ru}$



# Correction de l'acceptance en $\varphi$

$$\delta = B\rho/B\rho_0$$

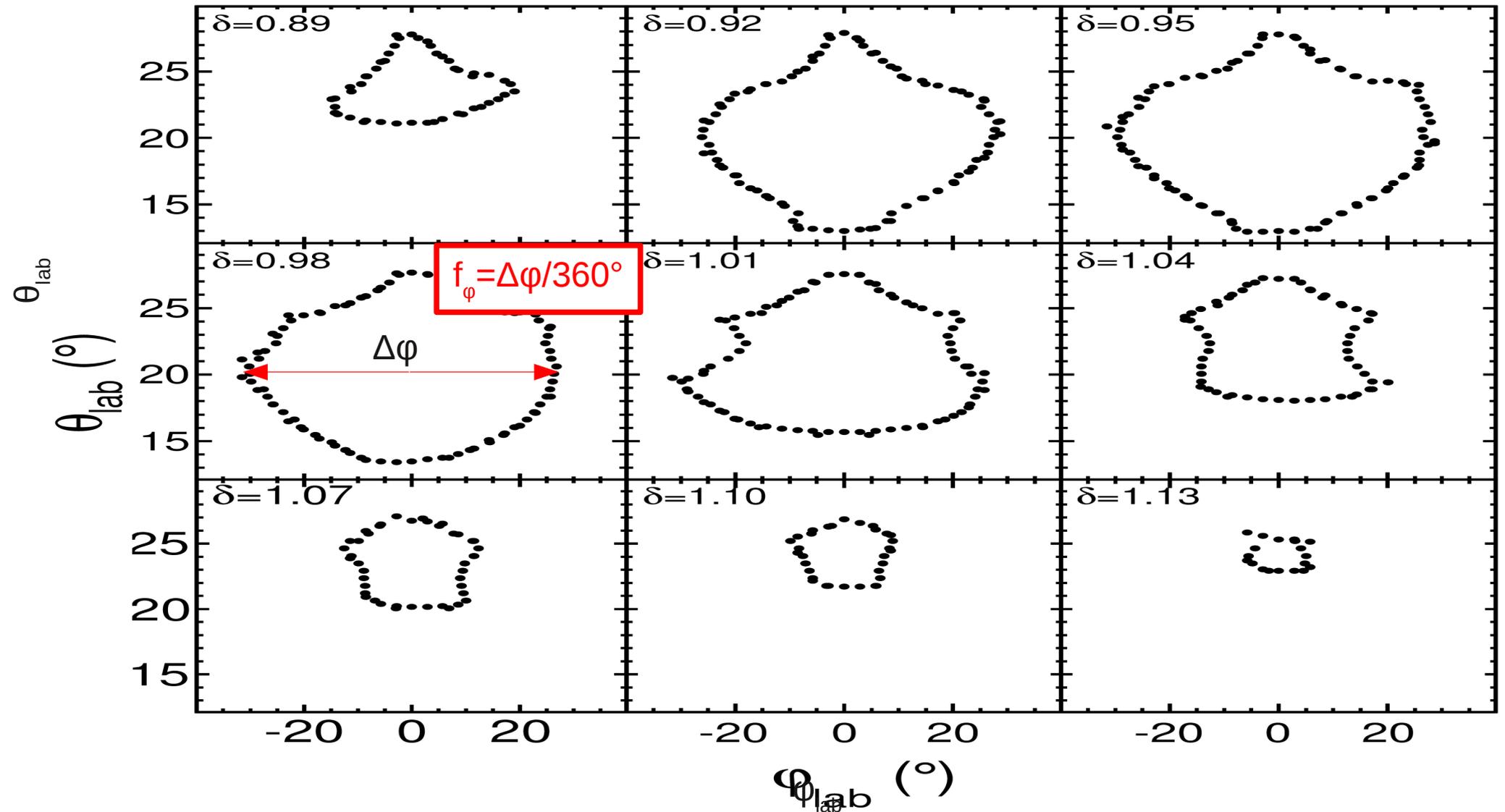
Très grande acceptance ( $B\rho \approx \pm 7\%$ ) : fortes aberrations  
Dépendance en  $\delta$  de la particule



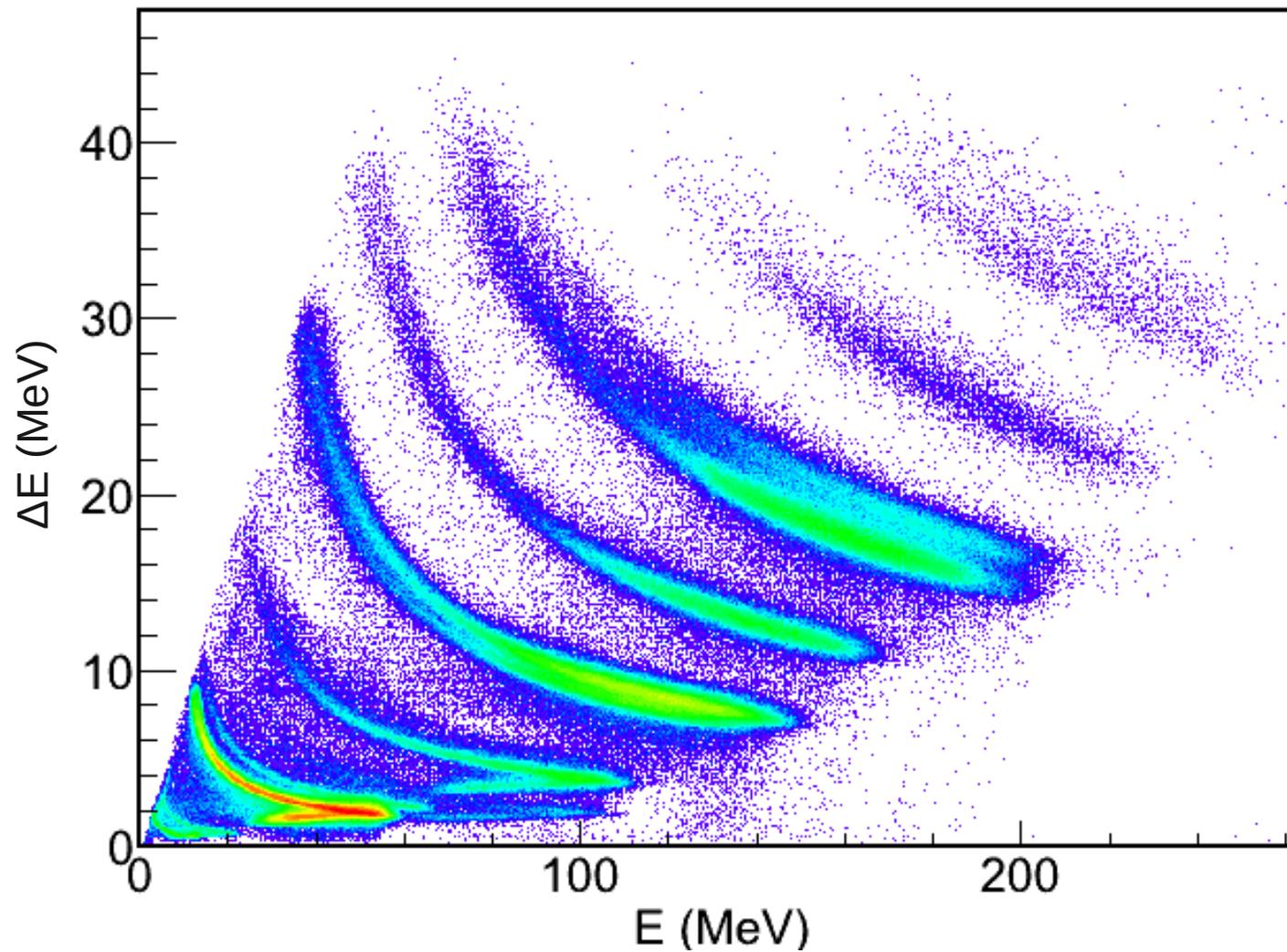
# Correction de l'acceptance en $\varphi$

$$\delta = B\rho/B\rho_0$$

Très grande acceptance ( $B\rho \approx \pm 7\%$ ) : fortes aberrations  
Dépendance en  $\delta$  de la particule

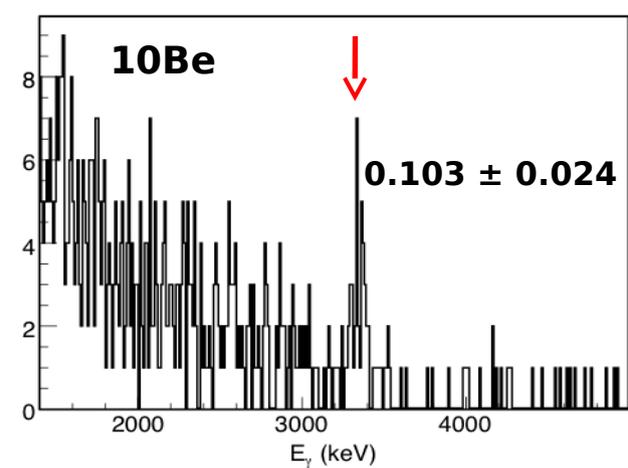
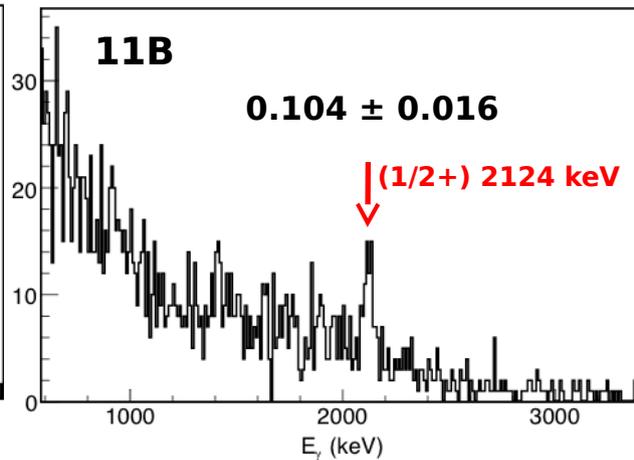
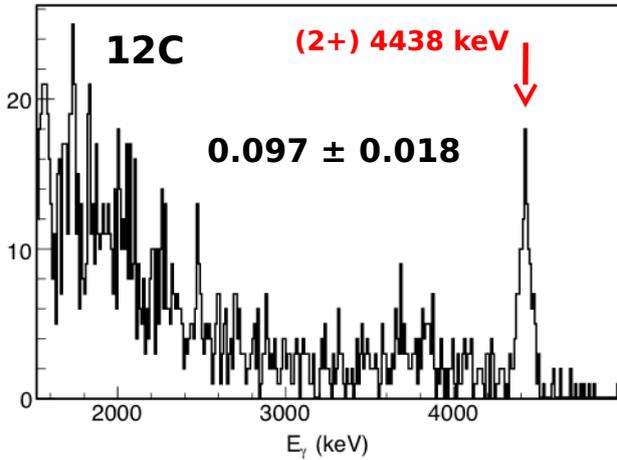


# SPIDER : nouvelle expérience

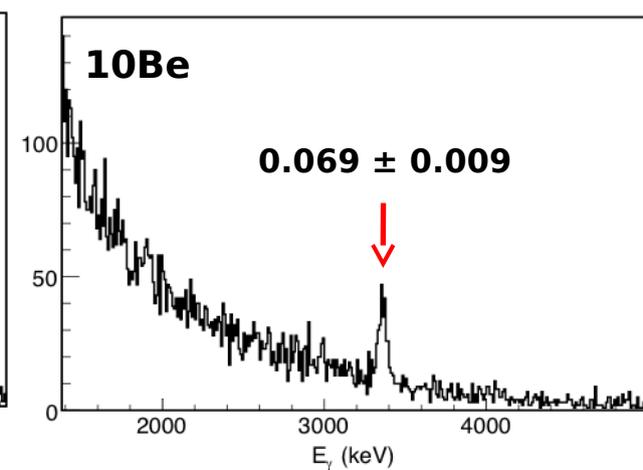
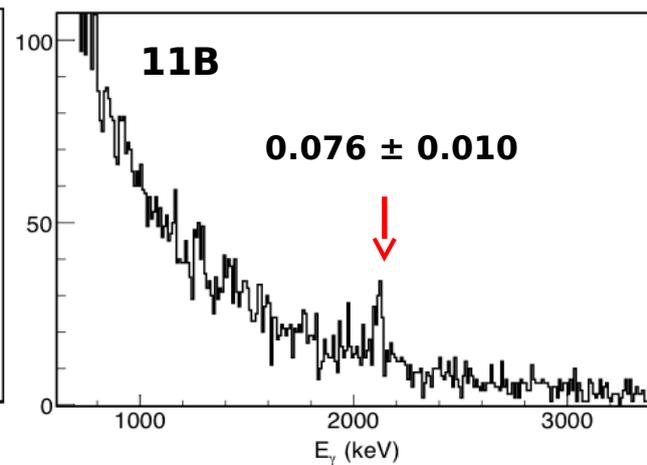
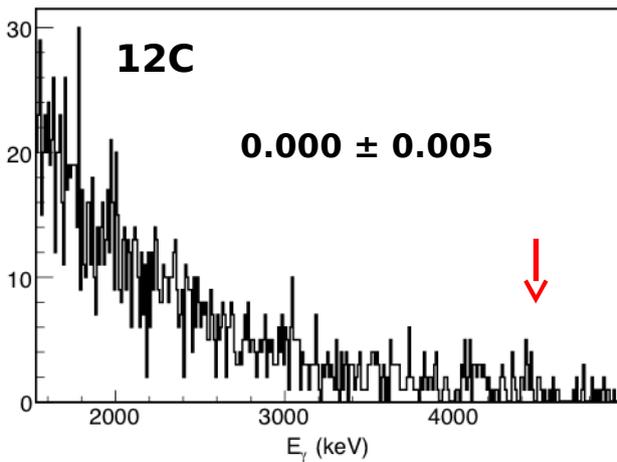


# Partage de l'énergie d'excitation (recul / actinide)

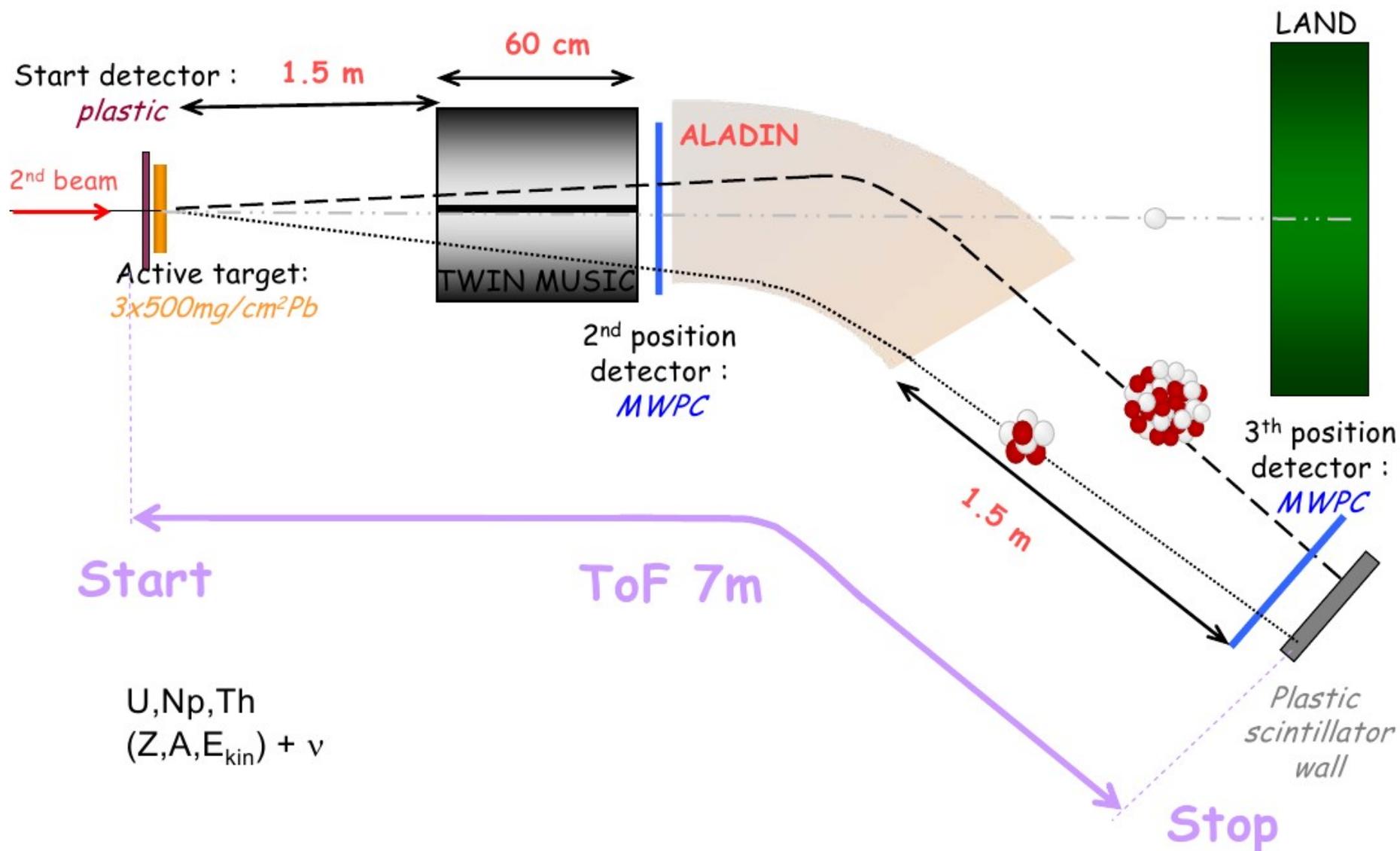
SPIDER seul:



SPIDER et VAMOS:

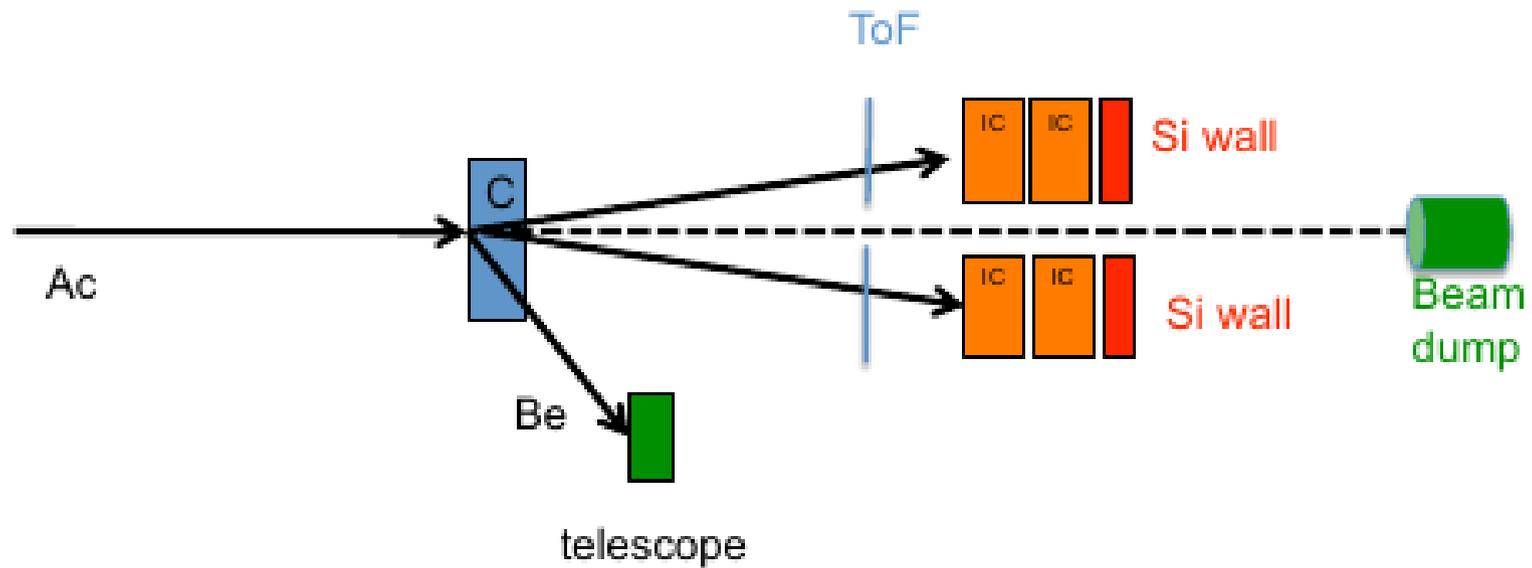


# Expérience SOFIA

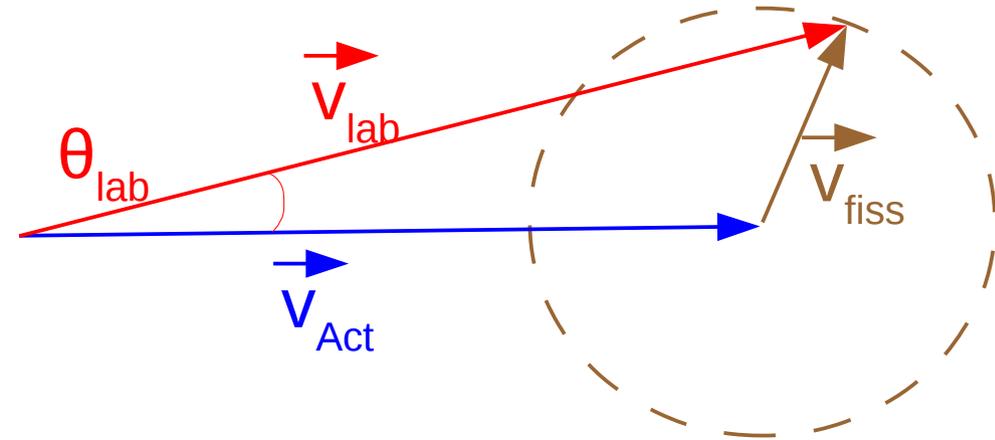


# HIE-ISOLDE

Faisceau pré-actinide 10 MeV/u,  $> 10^6$  pps :  $^{205-220}\text{Rn}$ ,  $^{205-227}\text{Fr}$ ,  $^{212-228}\text{Ra}$   
Autres faisceaux ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235,238}\text{U}$ , ...)



# Vitesse des produits de fission



$$v_{fiss}^2 = v_{lab}^2 + v_{Act}^2 - 2v_{lab} v_{Act} \cos(\theta_{lab})$$

- $v_{lab}$  et  $\theta_{lab}$  sont mesurés
- $v_{Act}$  est calculé à partir de la conservation de l'énergie

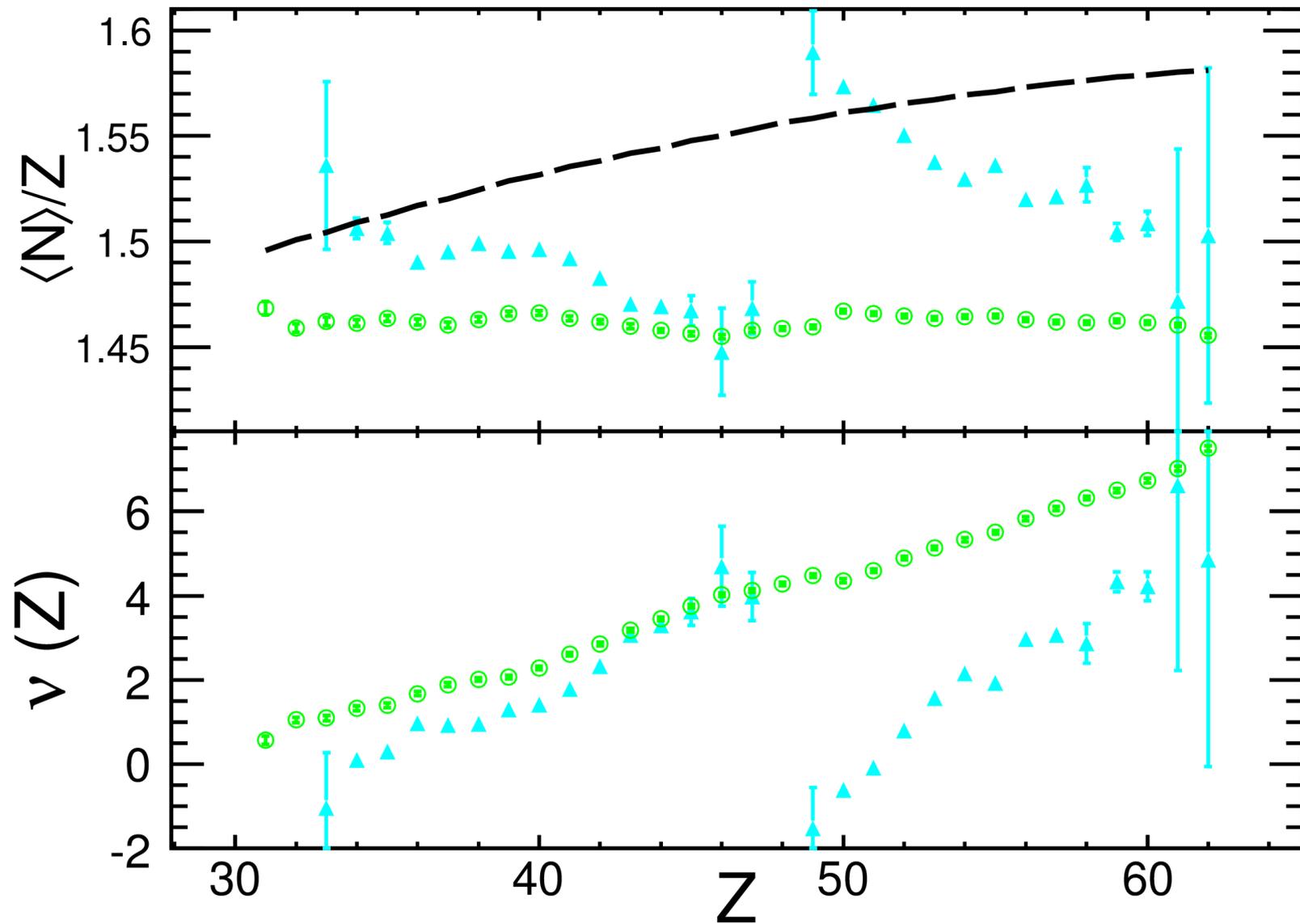
$$TKE \approx \frac{Z_1 Z_2 e^2}{D}$$

$$D = r_0 A_1^{1/3} \left(1 + \frac{2}{3} \beta_1\right) + r_0 A_2^{1/3} \left(1 + \frac{2}{3} \beta_2\right) + d$$

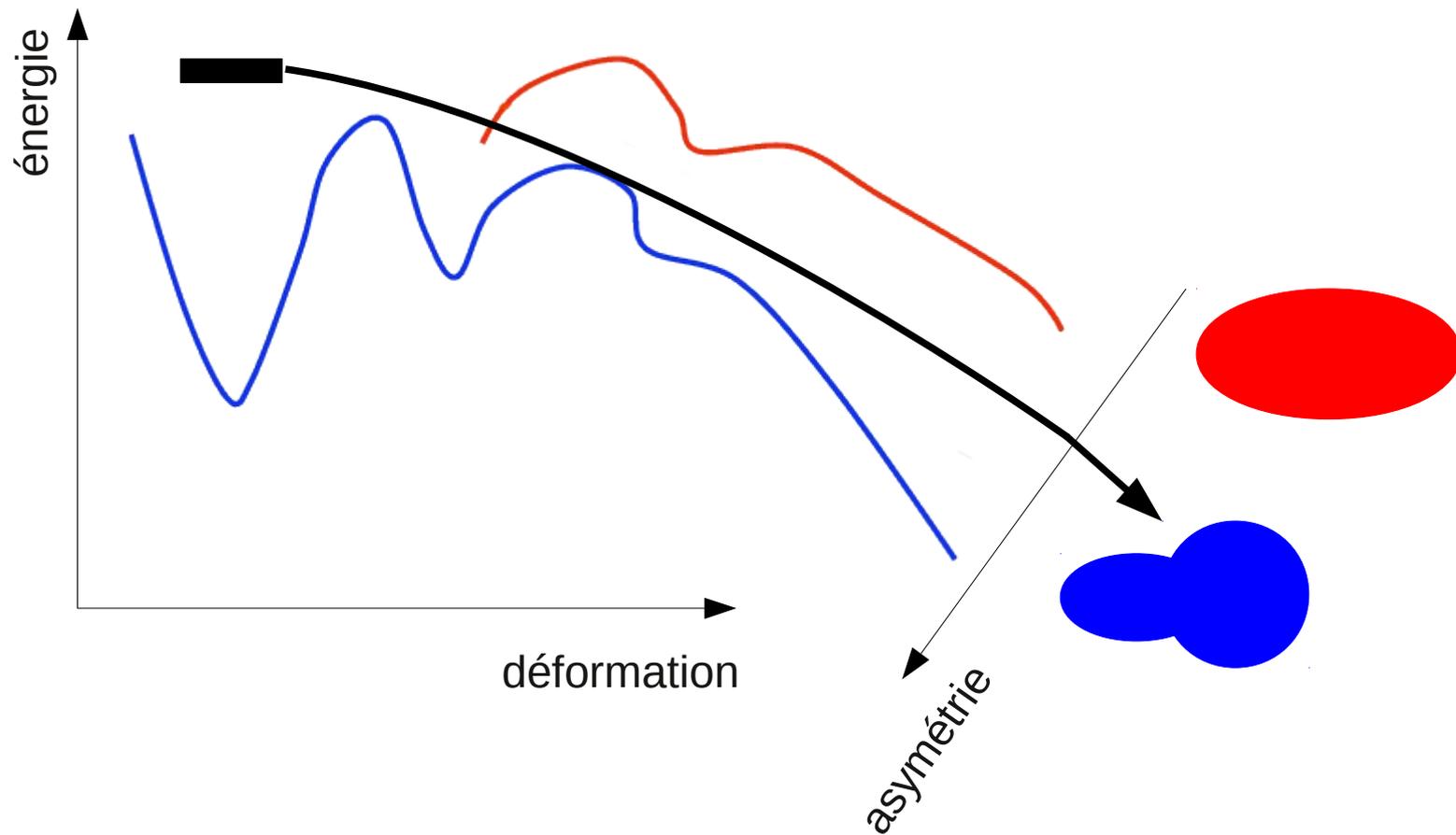
Avec  $Z_2 = Z_{fiss} - Z_1$  et  $A_2 = A_{fiss} - A_1$  avec prise en compte de l'évaporation de neutrons

$$v_{fiss} = \sqrt{\frac{2(A_{fiss} - A_1)Z_1(Z_{fiss} - Z_1)e^2}{A_1 m_0 A_{fiss} \left(r_0 A_1^{1/3} \left(1 + \frac{2}{3} \beta_1\right) + r_0 A_2^{1/3} \left(1 + \frac{2}{3} \beta_2\right) + d\right)}}$$

# Évaporation de neutrons post-scission

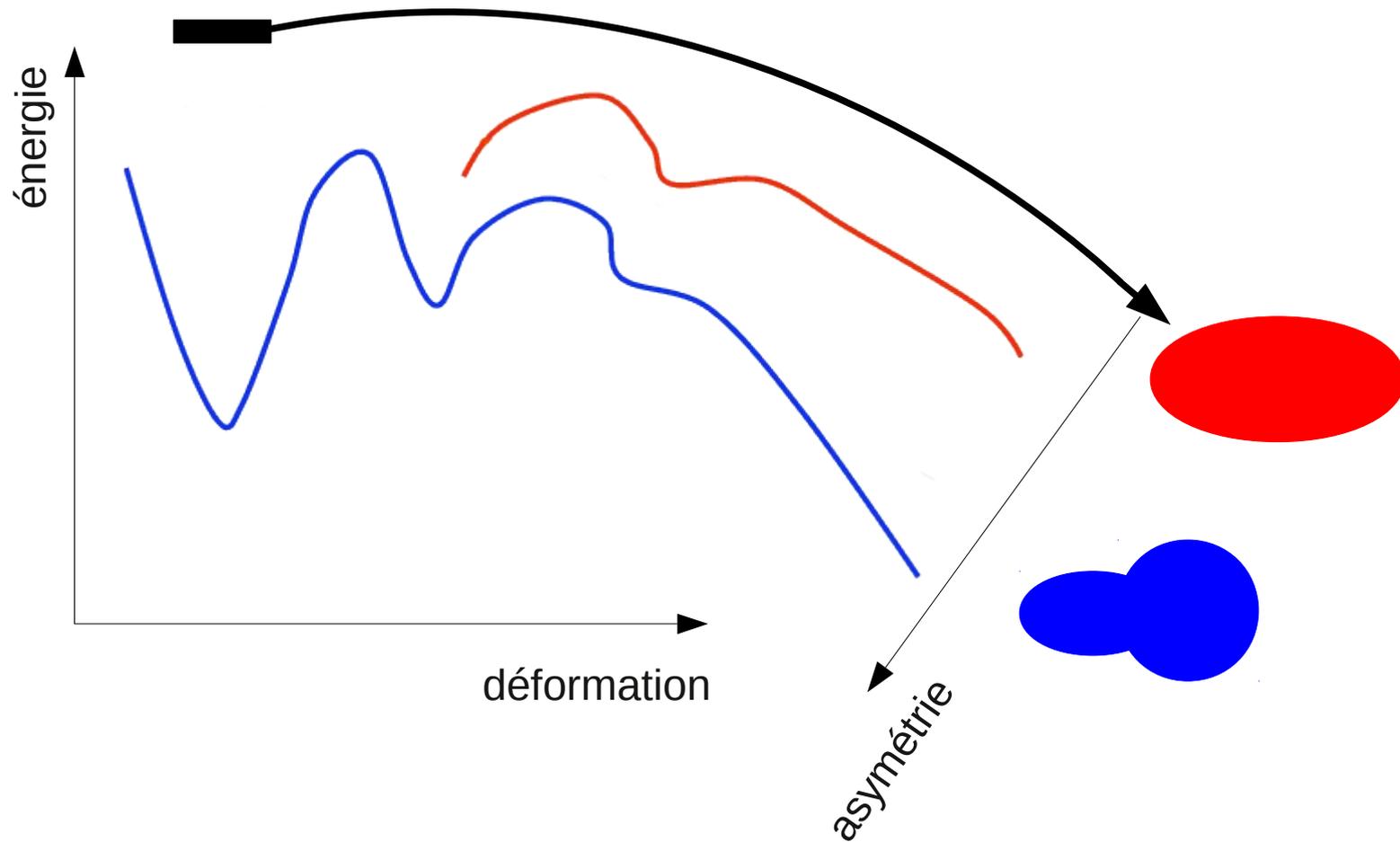


# Évolution du noyau composé dans la surface d'énergie potentielle



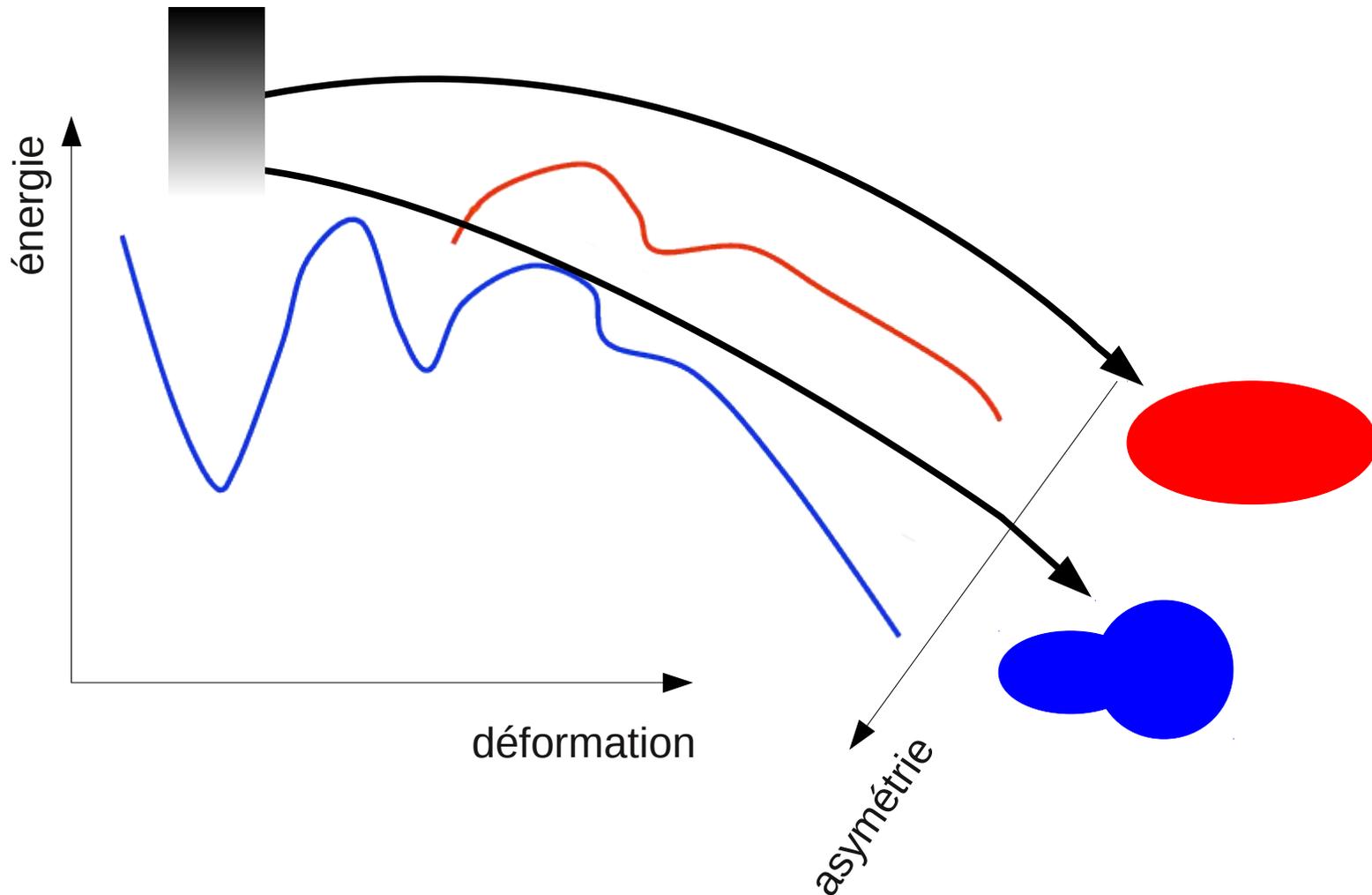
Noyau composé avec une faible énergie d'excitation fissionnent suivant la vallée asymétrique

# Évolution du noyau composé dans la surface d'énergie potentielle



Noyau composé avec une grande énergie d'excitation fissionnent suivant la vallée symétrique

# Évolution du noyau composé dans la surface d'énergie potentielle



Pour les grandes énergies de bombardements, une composante à basse énergie apparaît du fait que le système fissionnant est moins bien défini (en  $Z$ ,  $A$  et  $E^*$ ). Lorsque l'énergie de bombardement augmente, une partie de l'énergie cinétique est évacuée du système par des émissions de pré-équilibre.