

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



# MESURES DE RENDEMENTS ISOTOPIQUES DE FISSION DE L' $^{238}\text{U}$ ISSUS DE L'EXPÉRIENCE SOFIA AU GSI

Thèse présentée par Eric Pellereau

Directeur de thèse : Laurent Tassan-Got

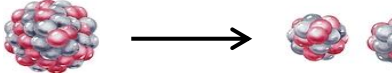
Encadrant : Julien Taieb

CEA – DAM – ILE DE FRANCE

ECOLE DOCTORALE MIPEGE U-PSUD

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

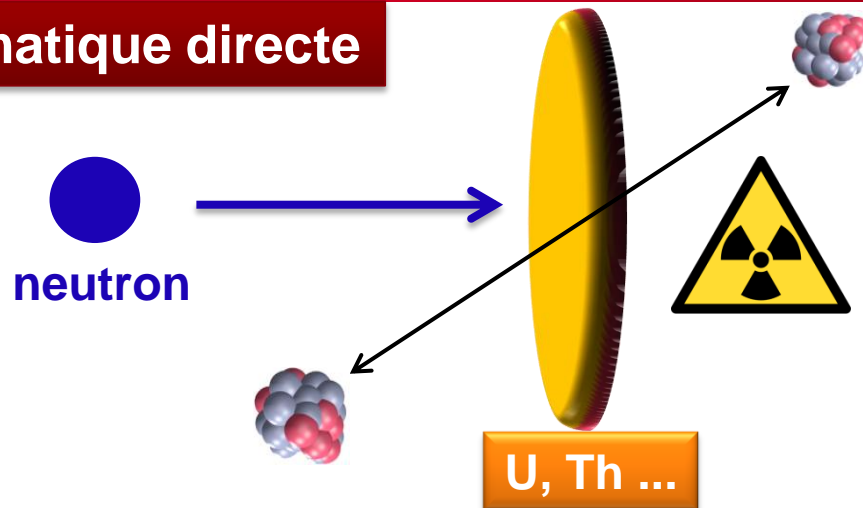
11/12/2013

- Division d'un noyau lourd en deux noyaux plus légers A diagram illustrating nuclear fission. On the left, a large, roughly spherical nucleus composed of red and blue spheres (protons and neutrons) is shown. An arrow points to the right, where two smaller, roughly spherical nuclei are shown, representing the products of the fission process.
- 1938 : Découverte - 75 ans
- 1939 : **Interprétation par Bohr et Wheeler basée sur le modèle goutte liquide** : fondements mais fission symétrique  $\neq$  premières expériences : asymétrique.
- 1967 : Strutinsky : **effets de couche dans les barrières de fission  $\rightarrow$  fission asymétrique.**
- Aujourd'hui: modèles microscopiques basés sur l'interaction nucléon-nucléon. Complexes et encore peu prédictifs aujourd'hui.
- Modèle de fission le plus prédictif aujourd'hui : code phénoménologique GEF

- Phénomène très riche de la physique nucléaire :
  - dynamique (mouvement collectif de grande amplitude)
  - effets de structure
  - réorganisation nucléonique : répartition des nucléons dans les 2 FF
  
- Très étudiée depuis sa découverte pour ses applications civiles et militaires ( $^{235}\text{U}$ ). Mais ....
  - Toujours beaucoup de zones d'ombres aujourd'hui
  - Prédications précises difficiles
  
- Enjeux applicatifs (GEN IV ) : améliorer la sûreté par la précision sur les rendements (aujourd'hui : 10 % d'incertitude sur l' $^{235}\text{U}$ )

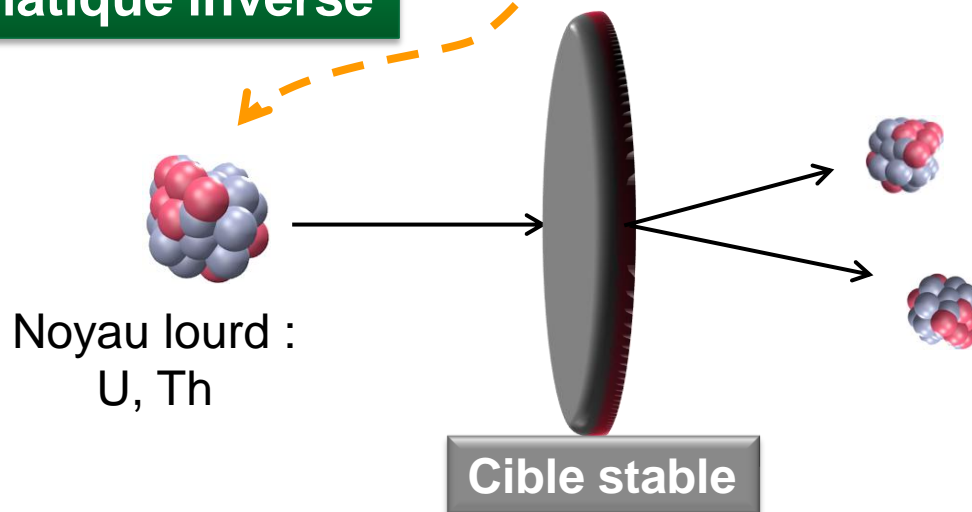
# LES 2 CONFIGURATIONS EXPÉRIMENTALES

## Cinématique directe



- Fluctuation sur  $Q$  : accès aux  $Z$  très difficile
- $\epsilon_{geom}$  faible (émission  $4\pi$ )

## Cinématique inverse



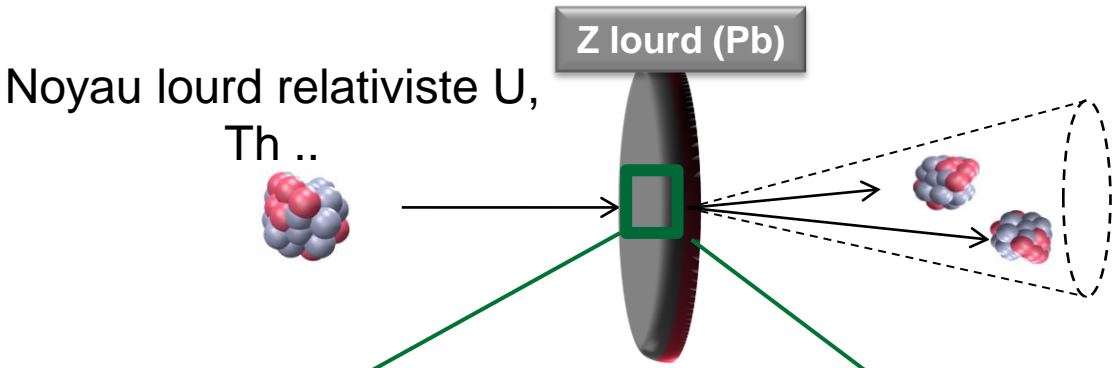
- Étude de noyaux radioactifs
- Deux FF du même côté :  $\epsilon_{geom}$  importante

## MESURES DE RENDEMENTS DE FISSION

Méthode	Mesure de rendement sur ...	Avantage(s)	Inconvénient(s)	
Radiochimiques	Z, A	Très précises	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quelques FF (rapports embranchements)</li> <li>▪ Normalisation</li> </ul>	Directe
2E / 2V / (2E,2V)	A	2 FF	Résolution (3-4 u/ <u>0.5 u</u> )	
Spectromètre recul (Lohengrin)	Z, A	A très précis	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\sigma(Z)</math> lourd</li> </ul>	
GSI (K.-H. Schmidt <i>et al.</i> 1996) $E_{kin} \sim 500 \text{ A.MeV}$	Z	70 systèmes fissionnant, 2 FF, $\sigma(Z)$ , $Z_{CN} < 92$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A ?</li> <li>▪ <math>E^* \pm 3 \text{ MeV}</math></li> </ul>	Inverse
GANIL (F. Farget <i>et al.</i> ) $E_{kin} \approx 10 \text{ A.MeV}$	Z, A	$E^*$ mesurée, $Z_{CN} > 92$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\sigma(Z)</math> lourd</li> <li>▪ Acceptance</li> </ul>	

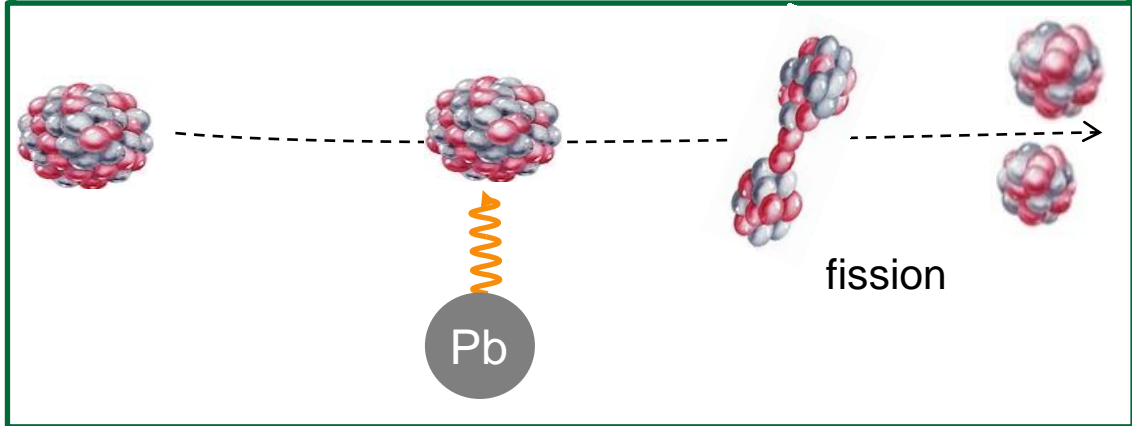
Jamais pu mesurer A et Z des deux FF sur toute la gamme

# FISSION EN CINÉMATIQUE INVERSE RELATIVISTE



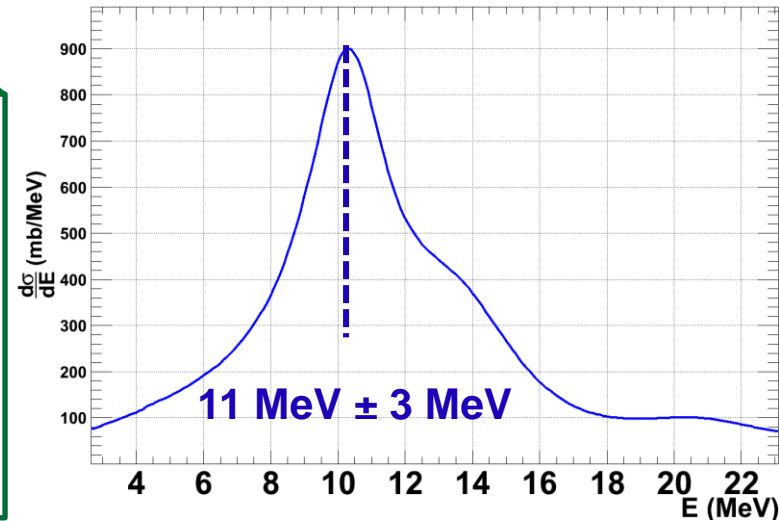
- Étude de noyaux radioactifs
- Accès aux charges Z
- $\epsilon_{geom}$  importante ( $\approx 100\%$ )

## Fission par excitation électromagnétique



Peuplement des résonances dipolaires géantes (GDR)

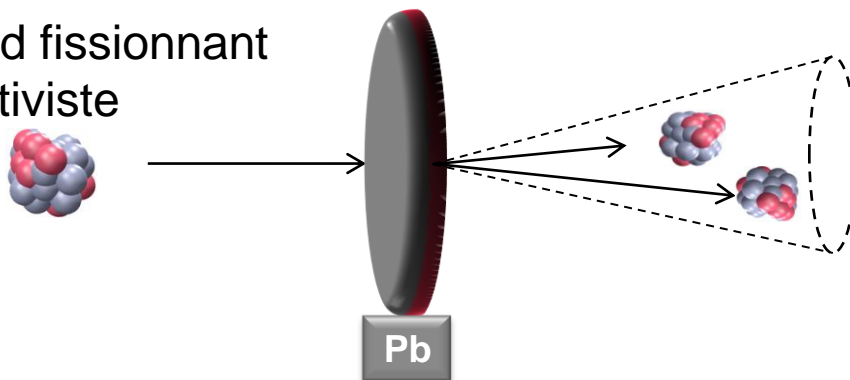
## Distribution en $E^*$ d'excitation



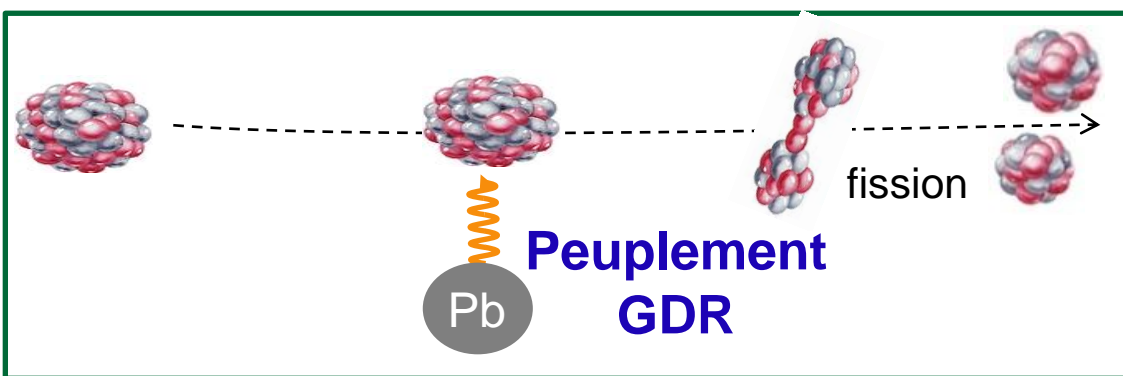
→ basse  $E^*$  (effets de structure)

# FISSION EN CINÉMATIQUE INVERSE RELATIVISTE

Noyau lourd fissionnant relativiste

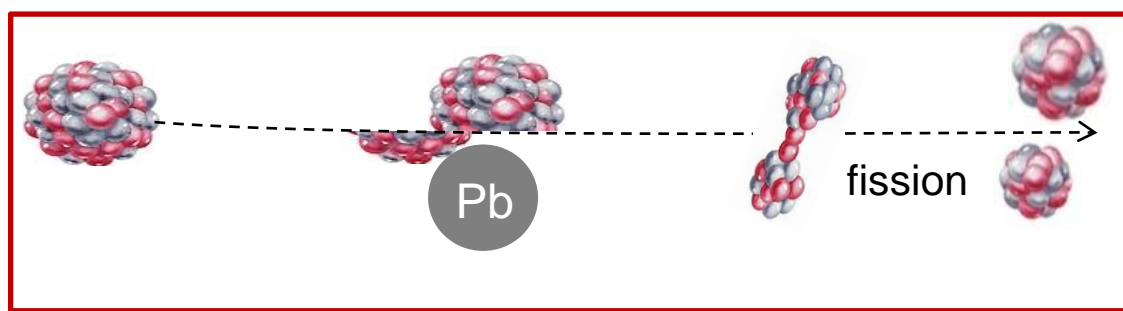


- Étude de noyaux radioactifs
- $Q = Z$
- $\epsilon_{geom}$  importante



Excitation électromagnétique  
 $E^* \approx 11 \text{ MeV}$

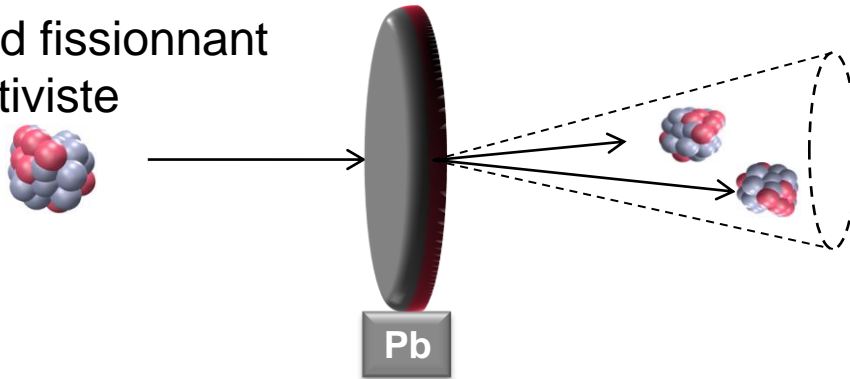
ou



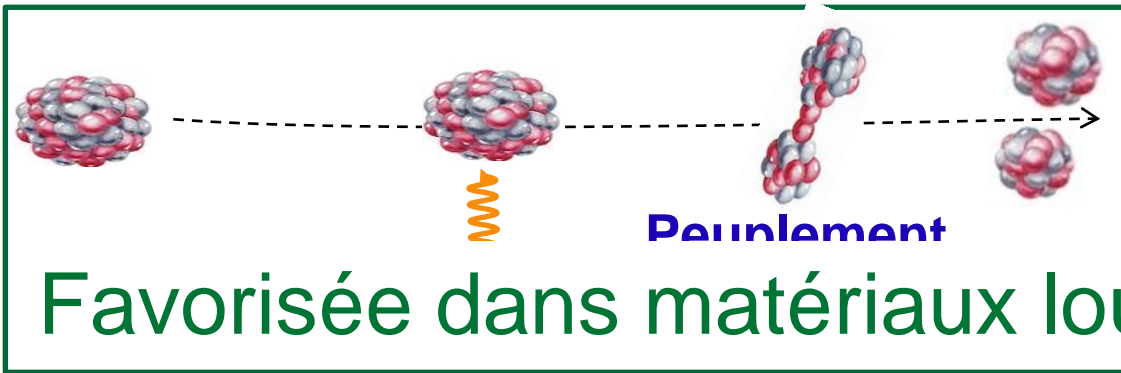
Interaction nucléaire  
 $E^* \sim 5 - 200 \text{ MeV}$

# FISSION EN CINÉMATIQUE INVERSE RELATIVISTE

Noyau lourd fissionnant relativiste



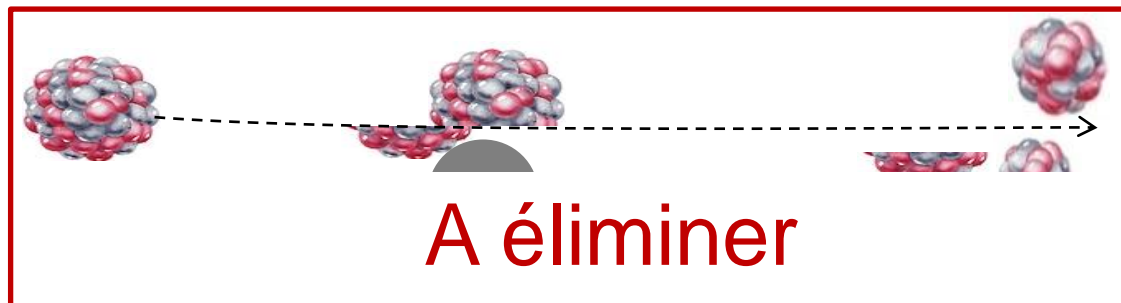
- Etude de noyaux radioactifs
- $Q = Z$
- $\epsilon_{geom}$  importante



Excitation électromagnétique  
 $E^* \approx 11 \text{ MeV}$

ou

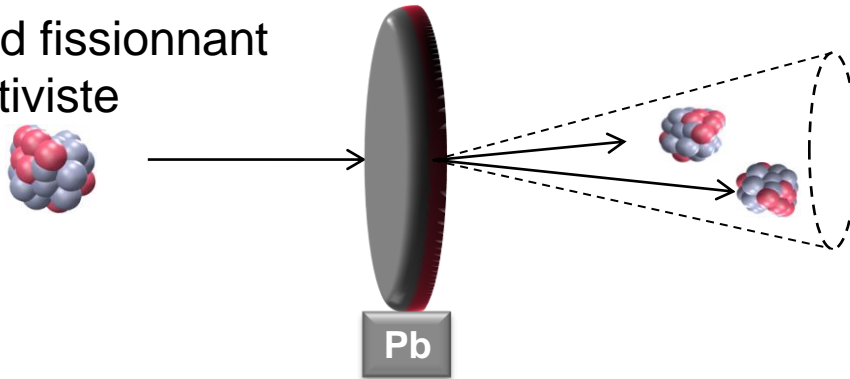
Interaction nucléaire  
 $E^* \sim 5 - 200 \text{ MeV}$



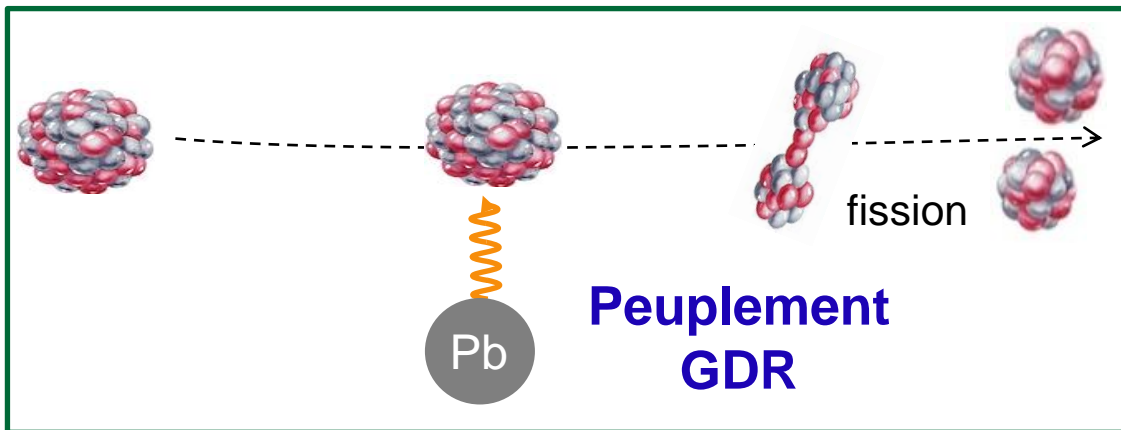


# FISSION EN CINÉMATIQUE INVERSE RELATIVISTE

Noyau lourd fissionnant  
relativiste



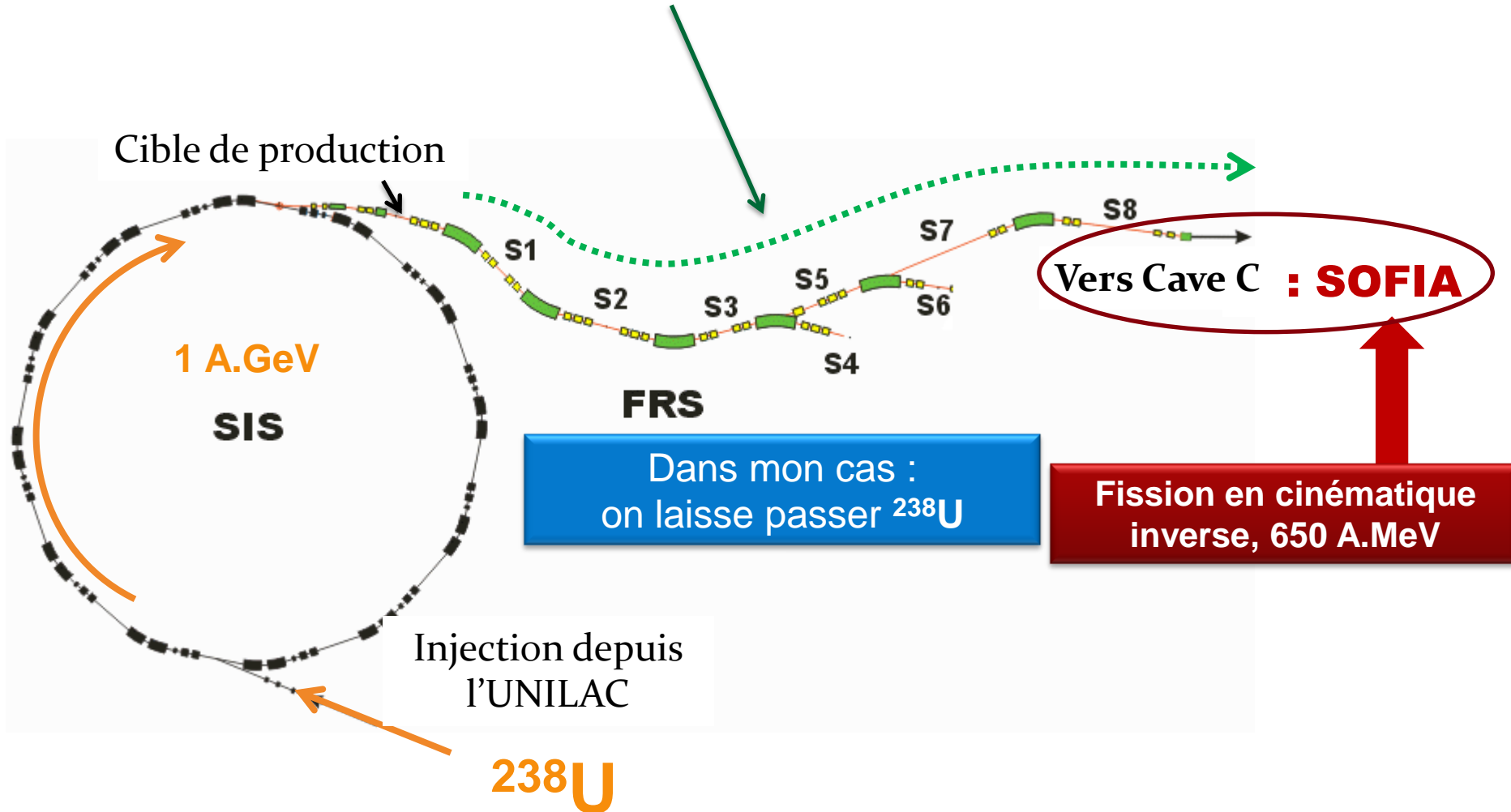
- Etude de noyaux radioactifs
- $Q = Z$
- $\epsilon_{geom}$  importante

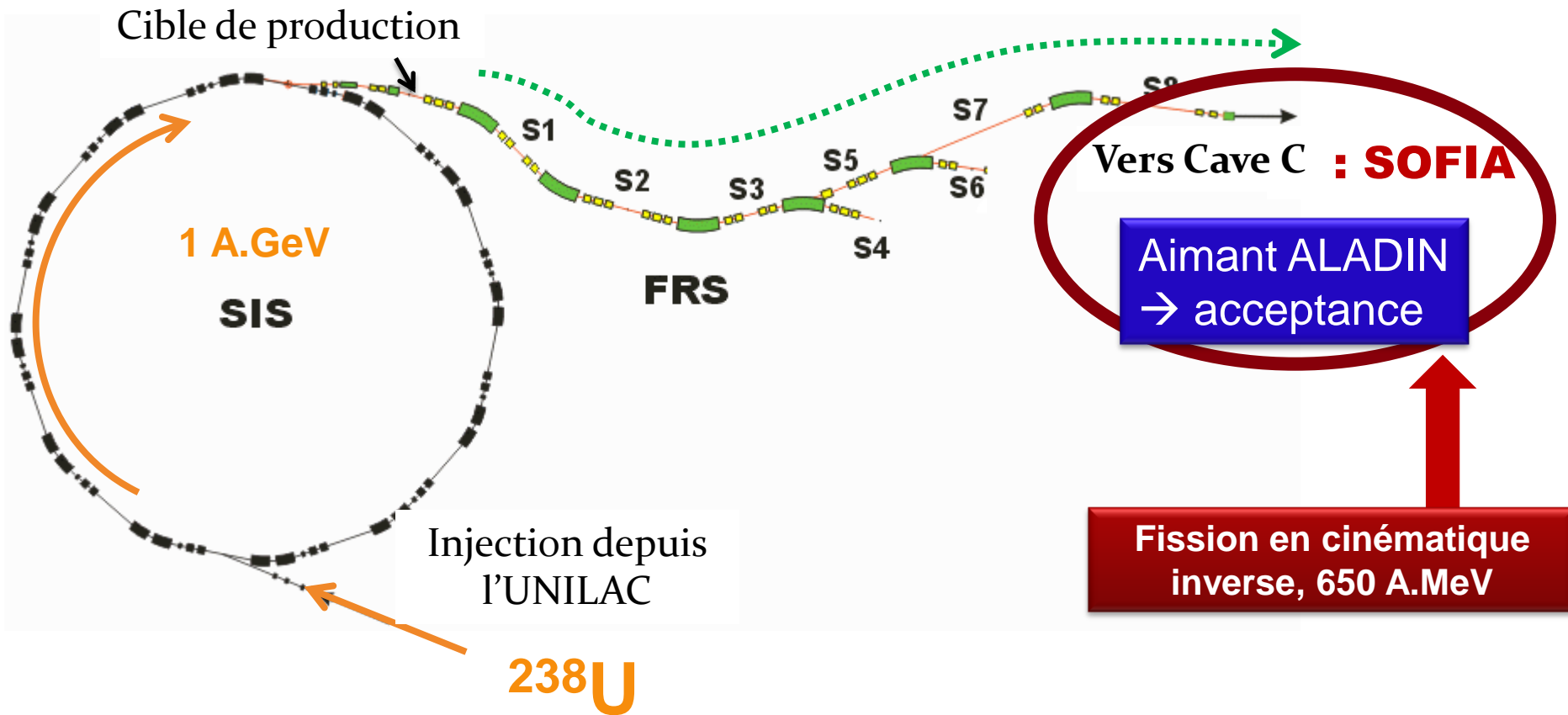


Excitation électromagnétique  
 $E^* \approx 11 \text{ MeV}$

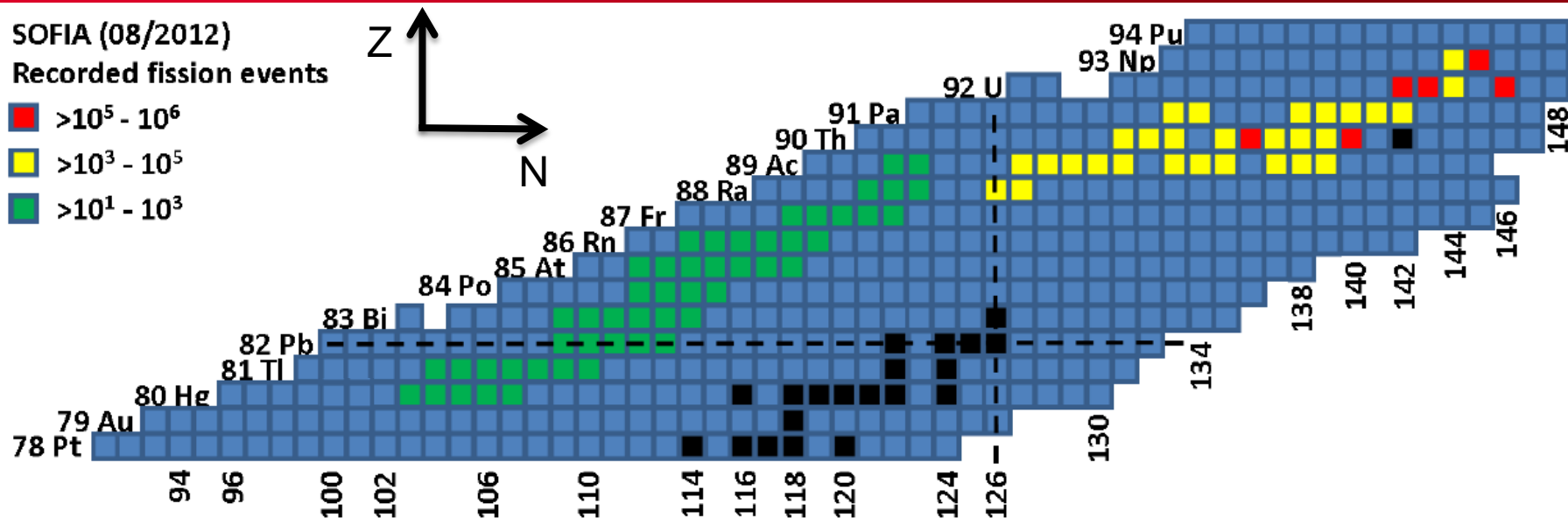
Fission de  $l^{238}\text{U}$  en cinématique inverse  $\Leftrightarrow n (\approx 6 \text{ MeV}) + {}^{237}\text{U}$

## Faisceaux secondaires par fragmentation d' $^{238}\text{U}$





# LES NOYAUX MESURES SUR SOFIA



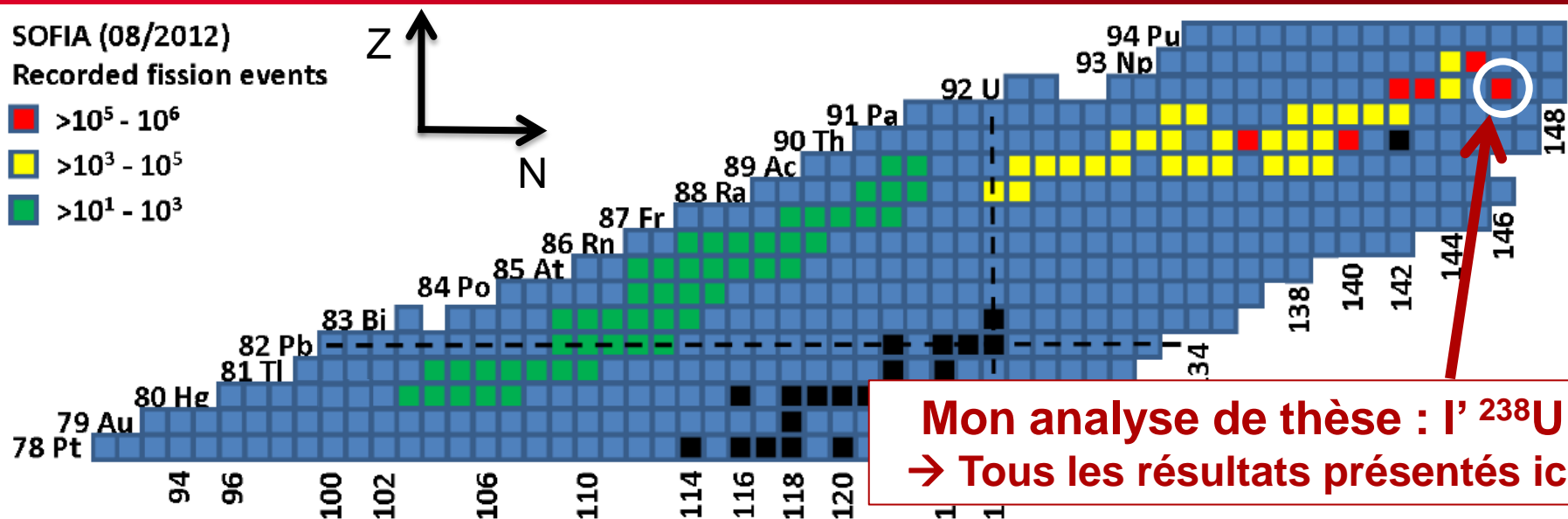
Pour les deux fragments, on mesure  
**Z et A**

Objectif résolution :  $< 1$  unité (FWHM) sur toute la gamme

Également :

- neutrons émis  $\bar{\nu} = 238 - (A1 + A2)$
- TKE

# LES NOYAUX MESURES SUR SOFIA



Pour les deux fragments, on mesure

**Z**

**A**

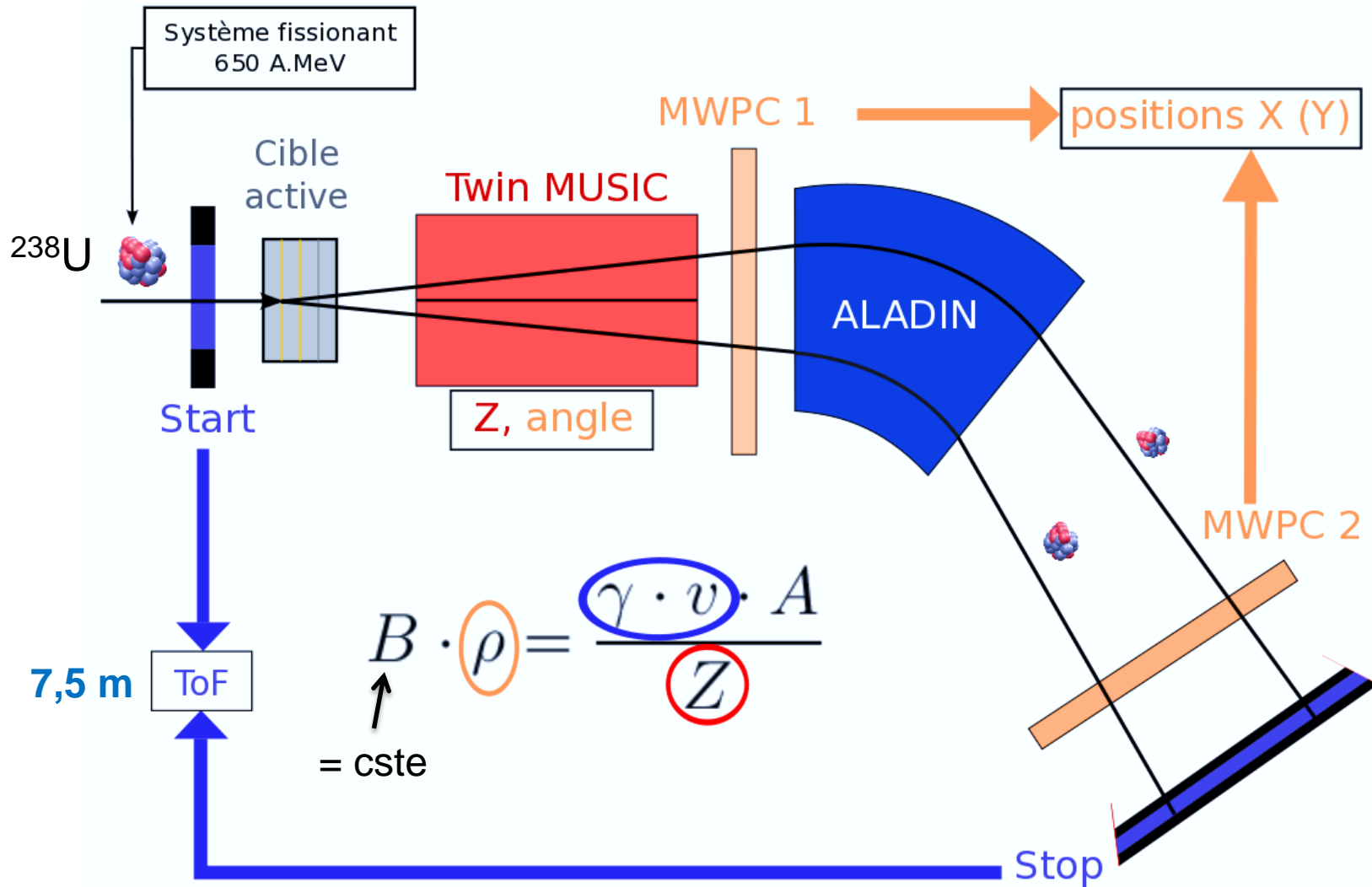
Objectif résolution :  $< 1$  unité (FWHM) sur toute la gamme

Également :

- neutrons émis  $\bar{\nu} = 238 - (A1 + A2)$
- TKE

# Le dispositif SOFIA

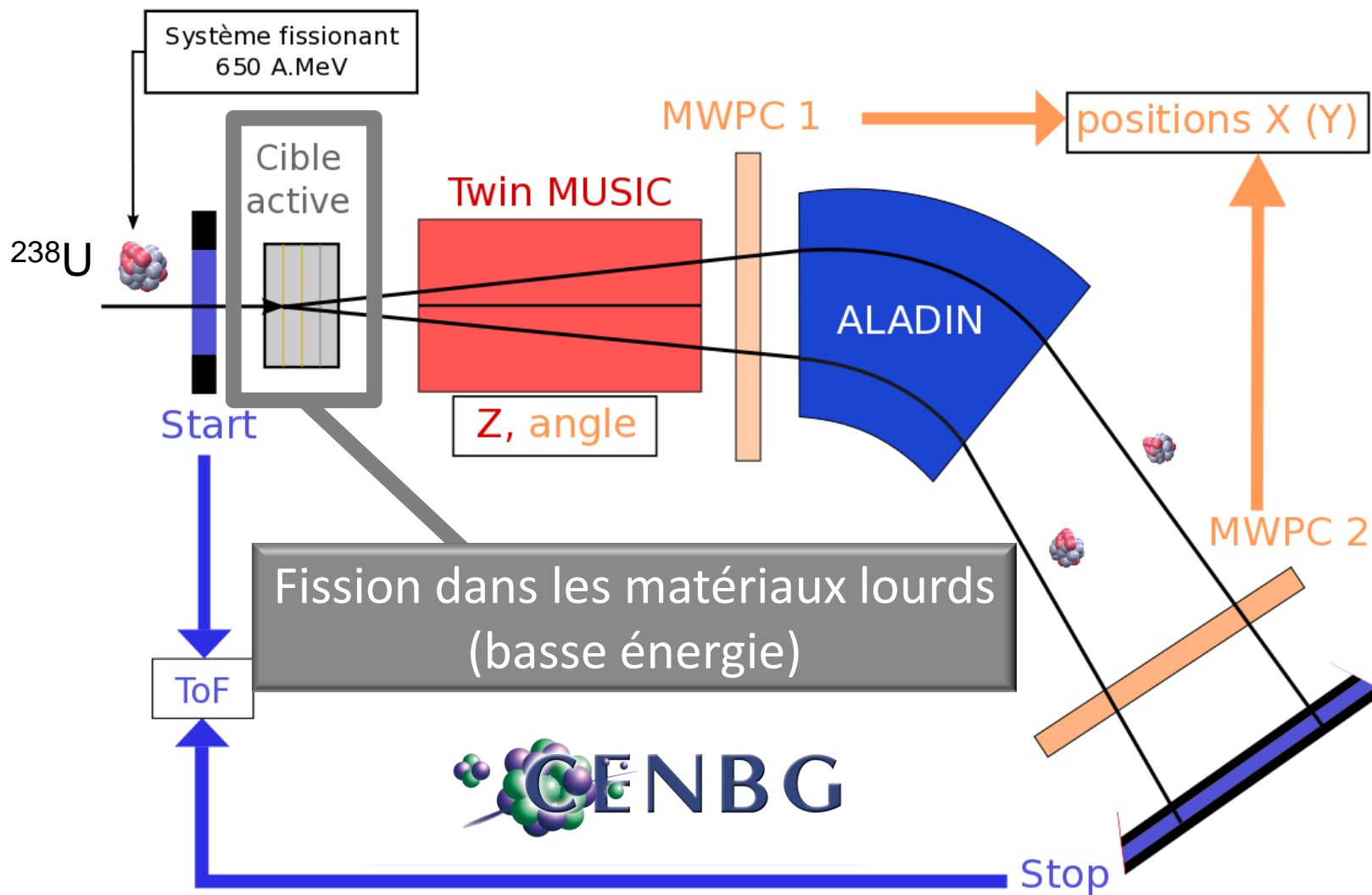
# DISPOSITIF SOFIA EN CAVE C



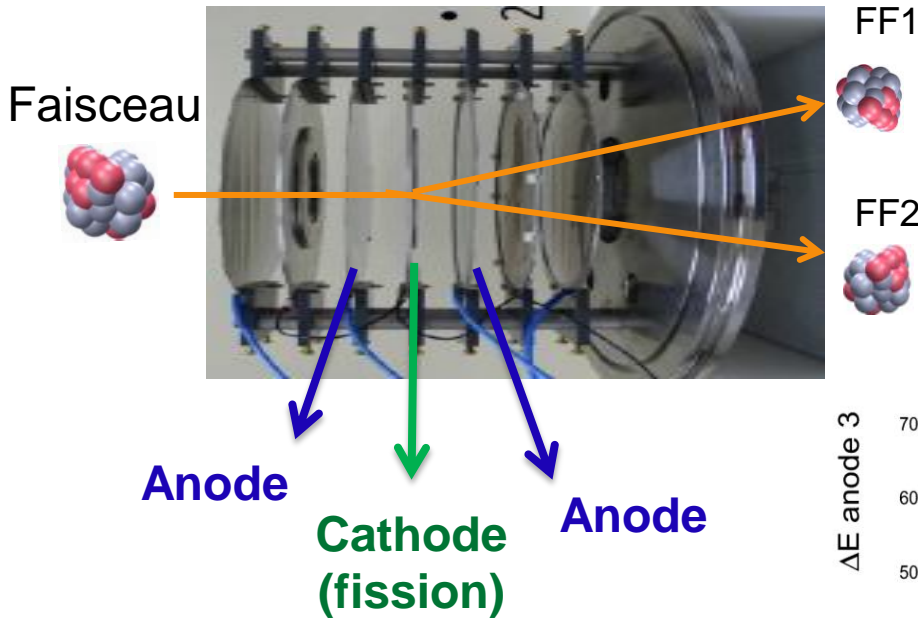
# Les détecteurs en détails



# CIBLE ACTIVE



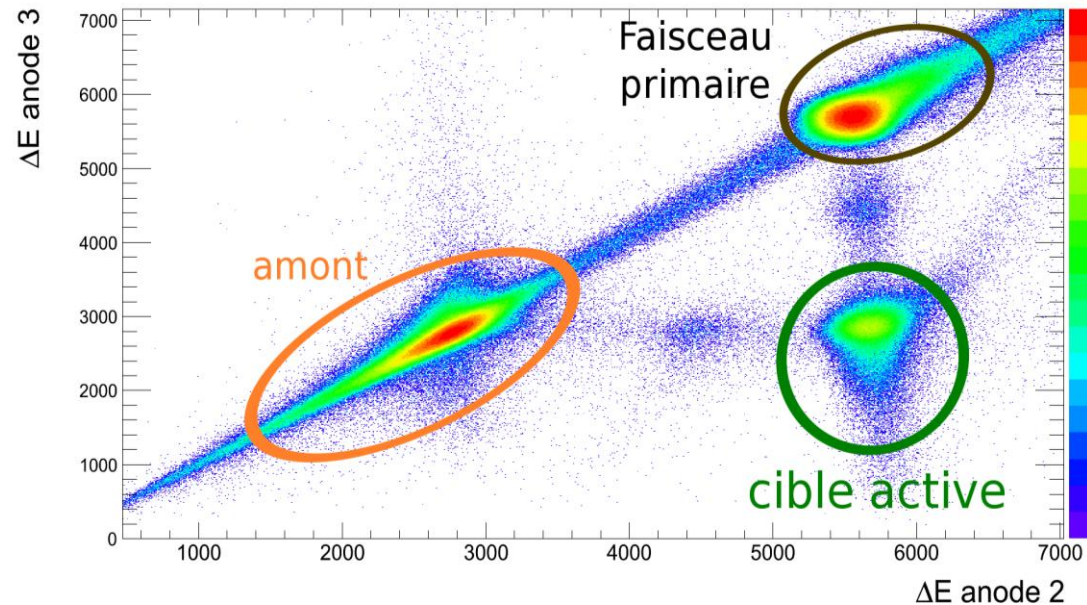
Suite de chambres d'ionisations



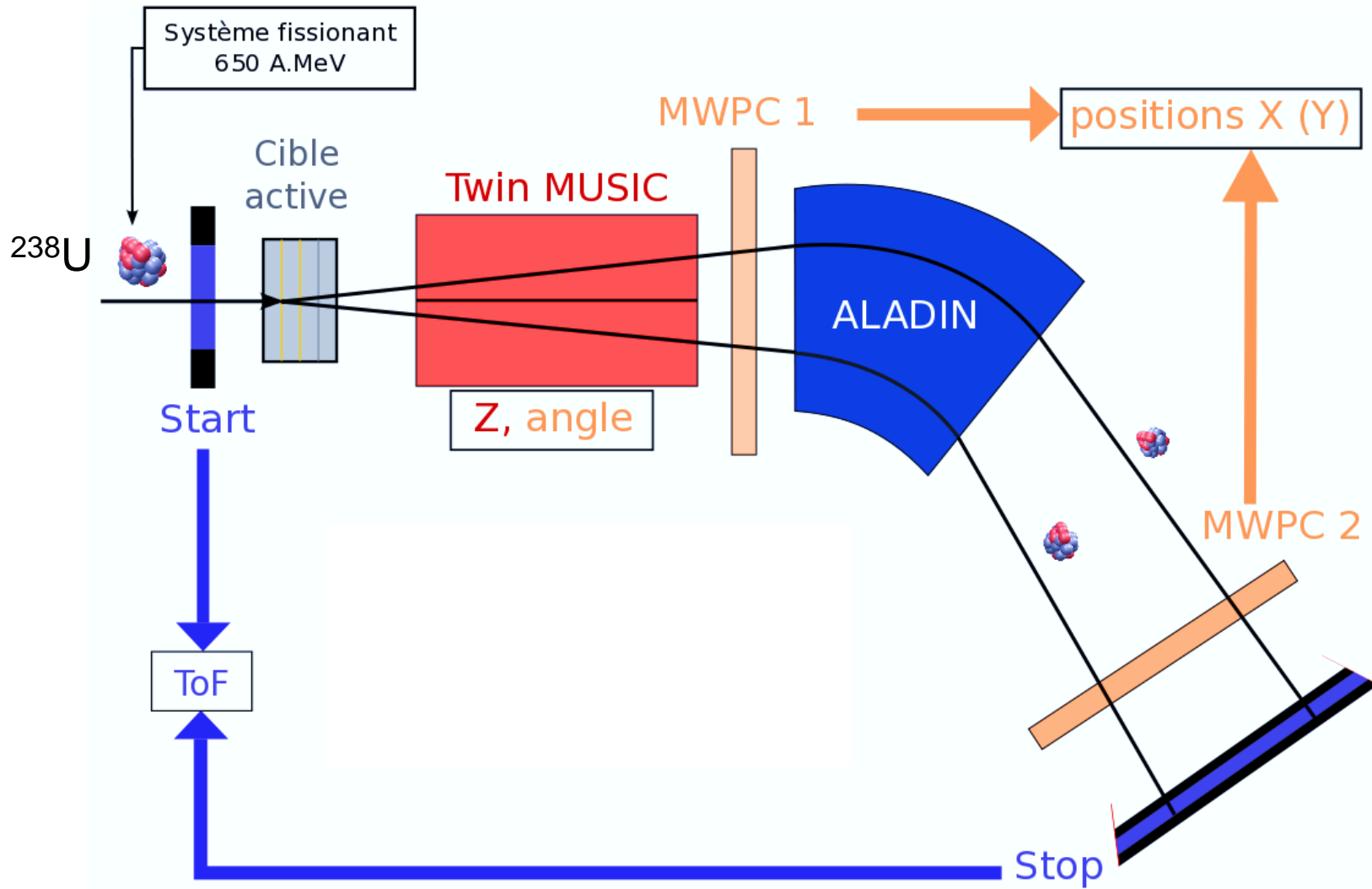
$$\Delta E(FF1) + \Delta E(FF2) \approx \frac{\Delta E(^{238}\text{U})}{2}$$

Fission dans les cathodes : matériaux lourds (U ou Pb)

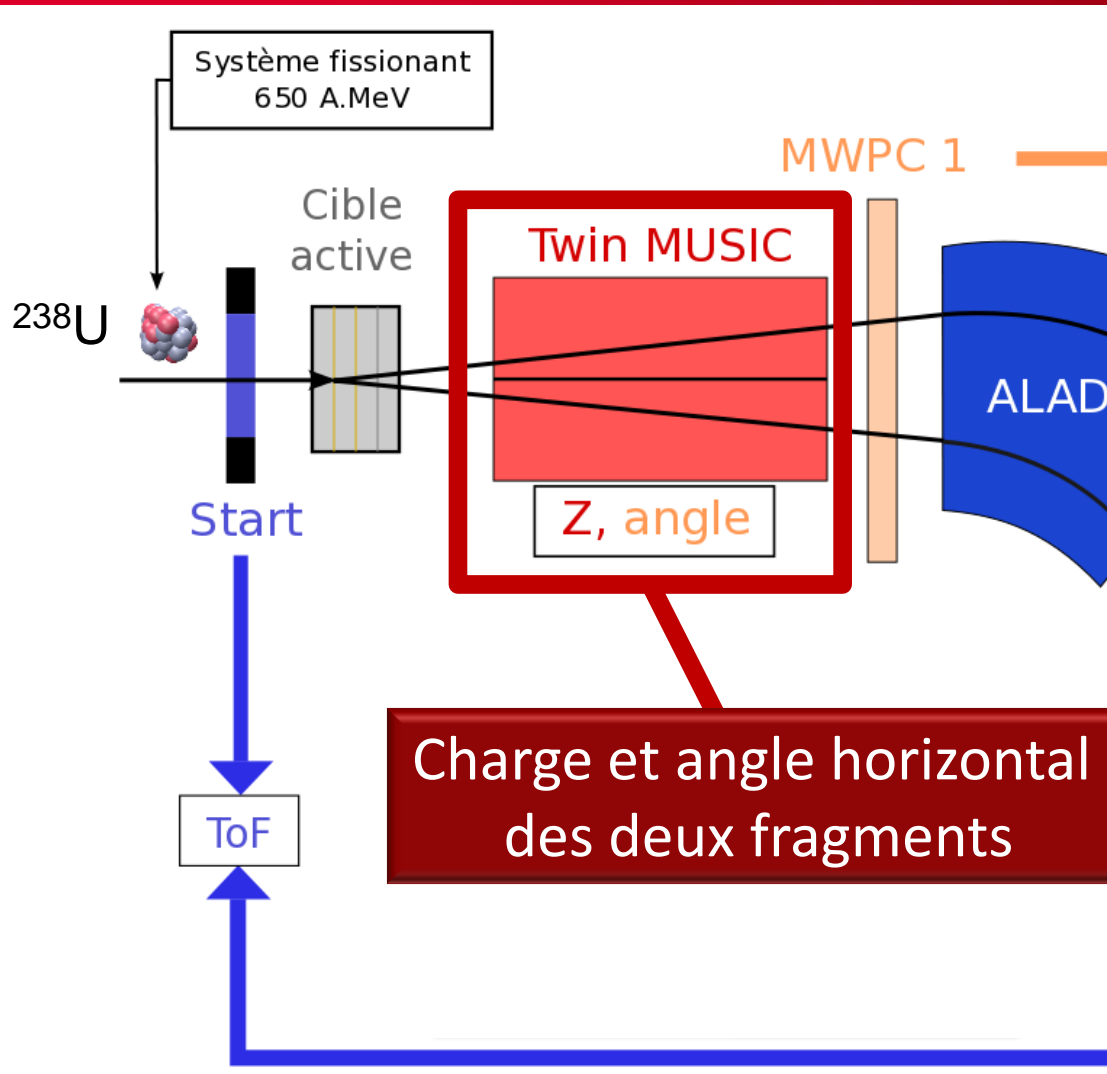
Anodes : donnent  $\Delta E$



# TWIN MUSIC



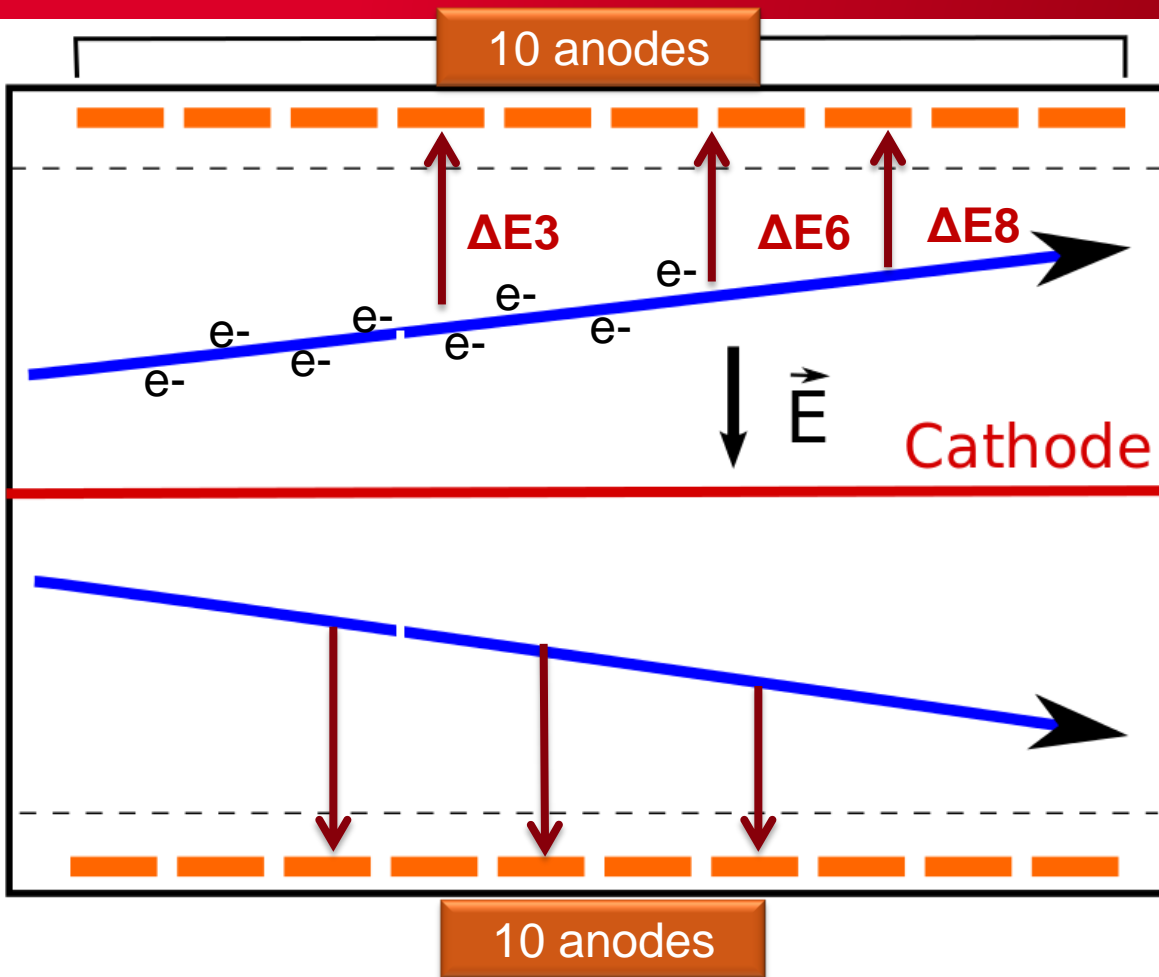
# TWIN MUSIC



# TWIN MUSIC : MULTI-SAMPLE IONISATION CHAMBER



$\Delta E_i$  : mesures des pertes d'énergies  $\rightarrow Z$



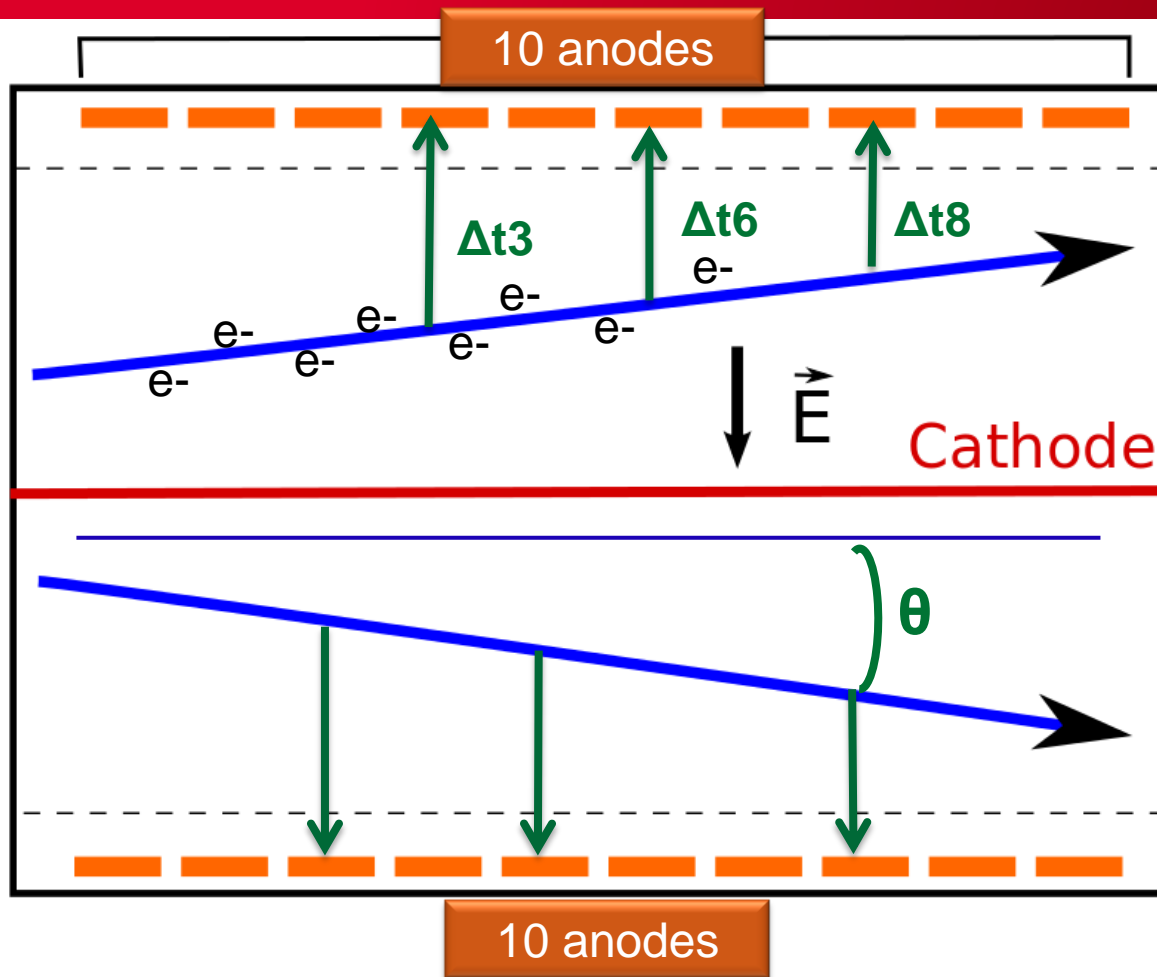
*Vue de dessus*

## TWIN MUSIC : MULTI-SAMPLE IONISATION CHAMBER



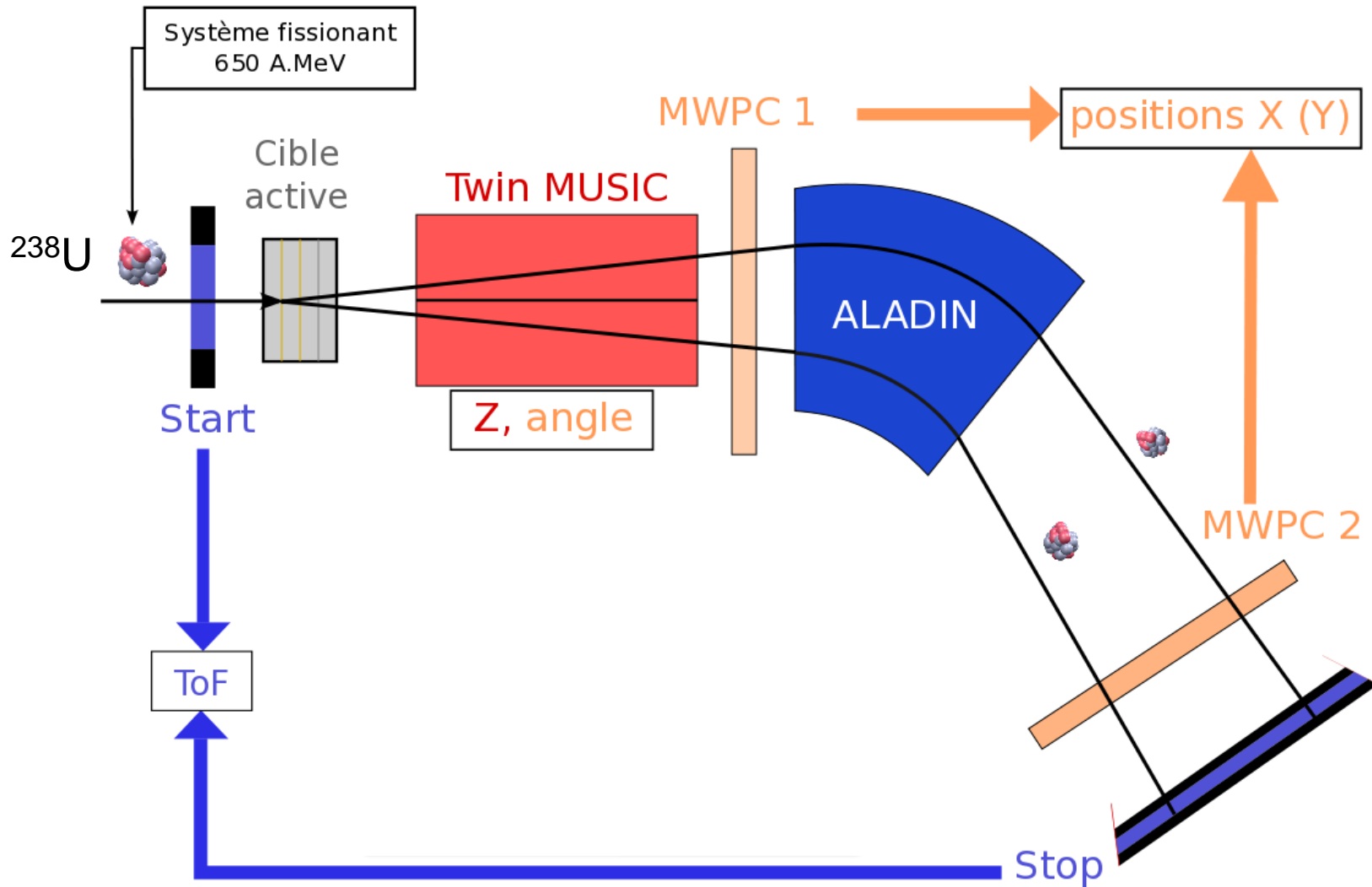
$\Delta E_i$  : mesures des pertes  
d'énergies  $\rightarrow Z$

$\Delta t_i$  : temps de dérive des  $e^-$   
 $\rightarrow$  10 positions  $\delta_x = 70 \mu\text{m}$   
FWHM  
 $\rightarrow$  Angle  $\delta_\theta = 0,2 \text{ mrad}$

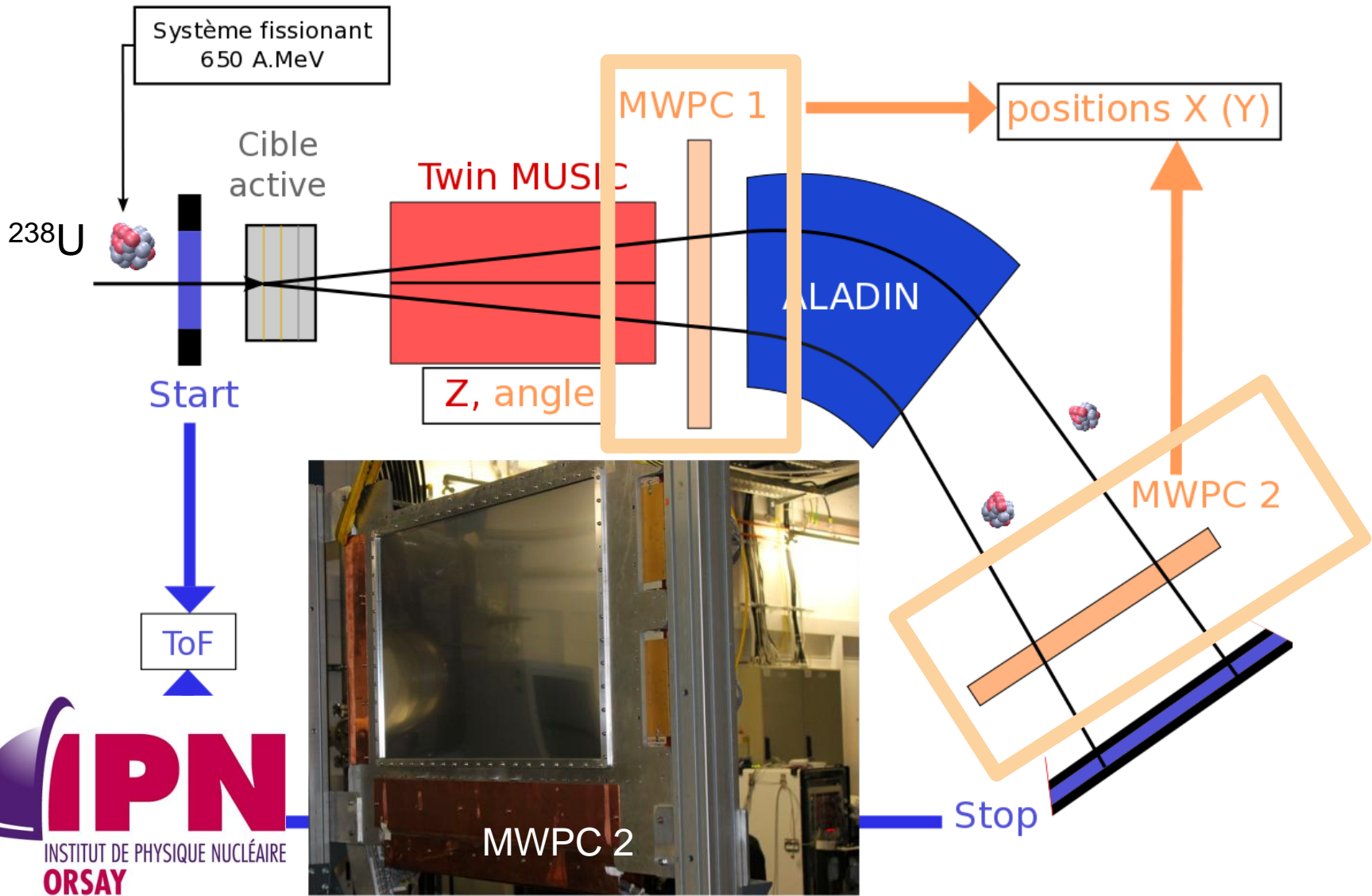


*Vue de dessus*

# MWPCS

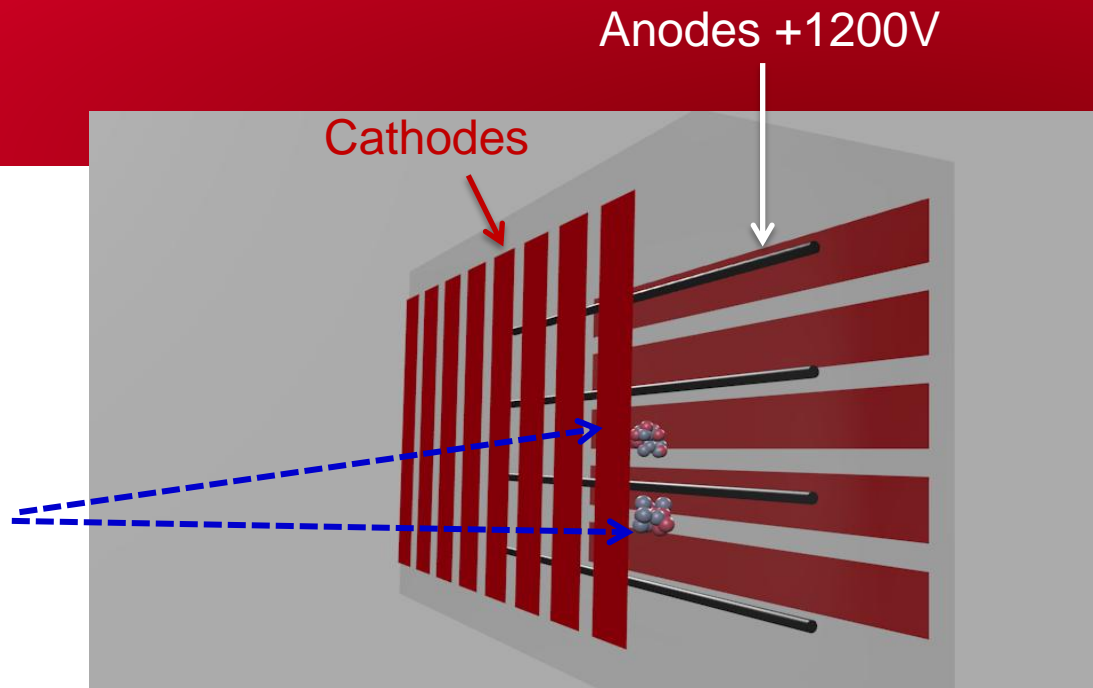


# MWPCS

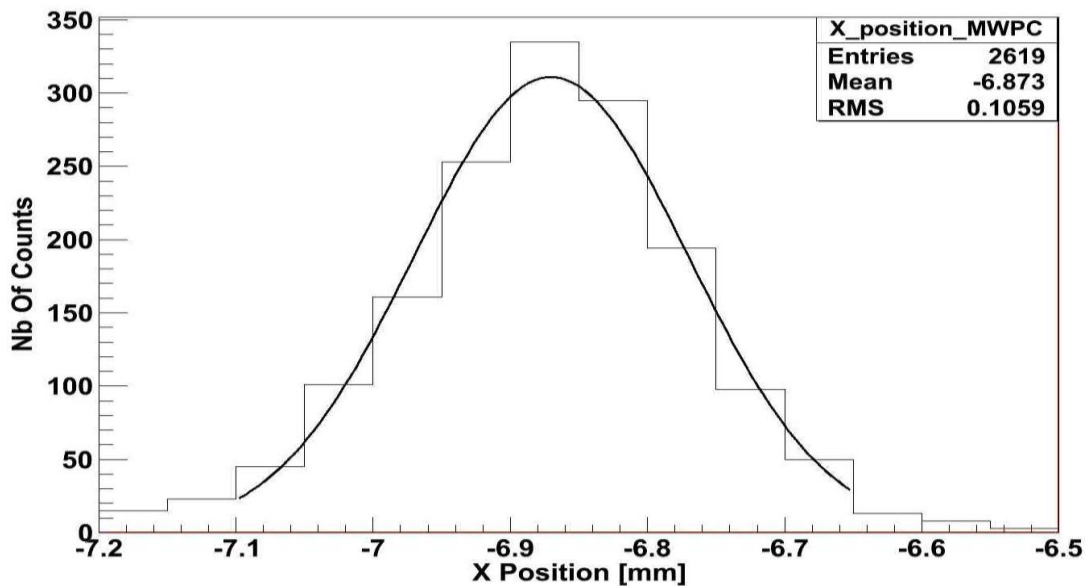




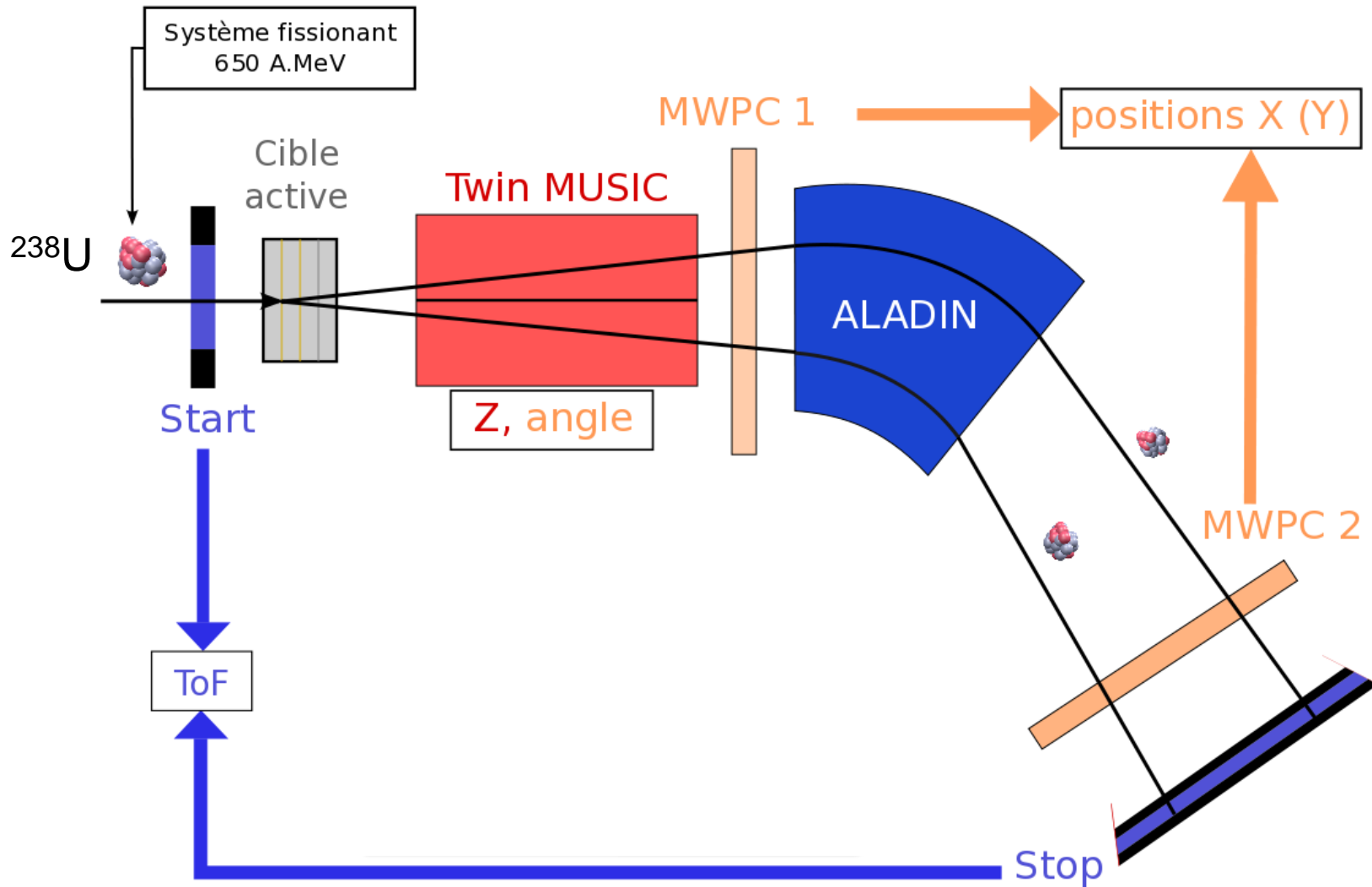
- 1) Création d'e- d'ionisation
- 2) Avalanche d'e- autour des fils d'anodes
- 3) Influence sur les pistes de cathode



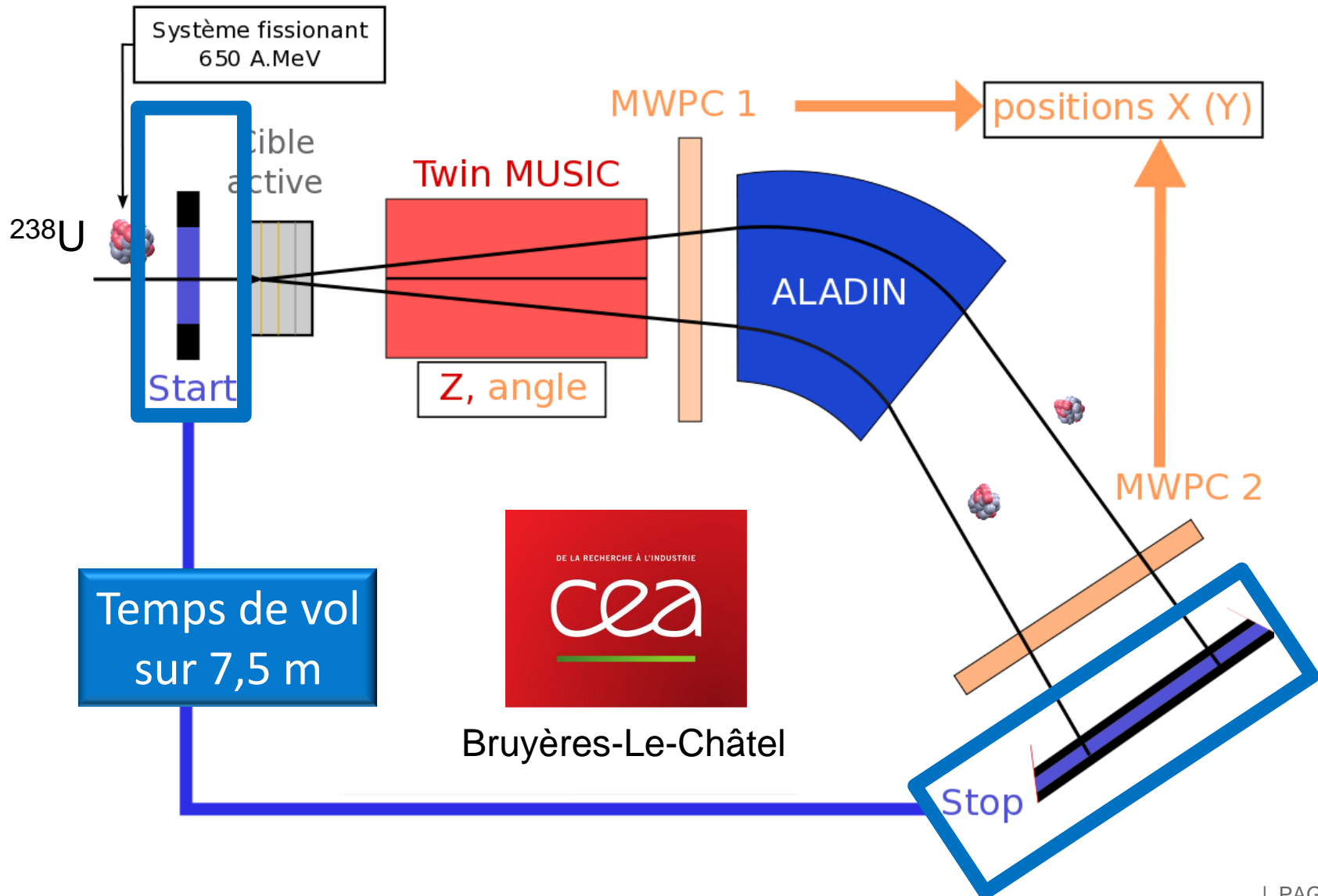
200  $\mu\text{m}$  requis en X  
135  $\mu\text{m}$  mesures FWHM



# DISPOSITIF TEMPS DE VOL



# DISPOSITIF TEMPS DE VOL

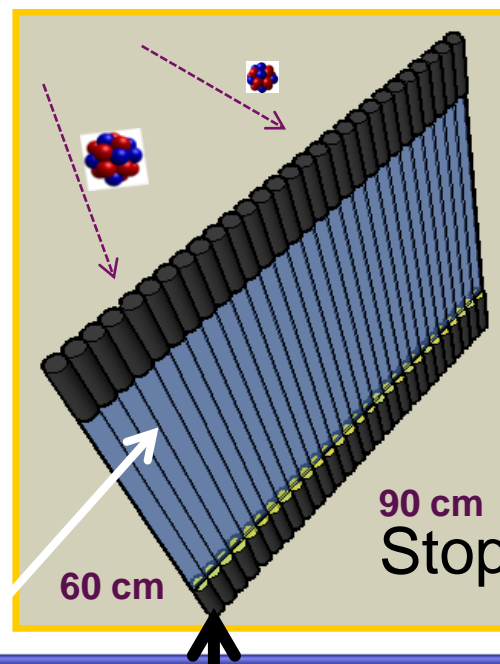
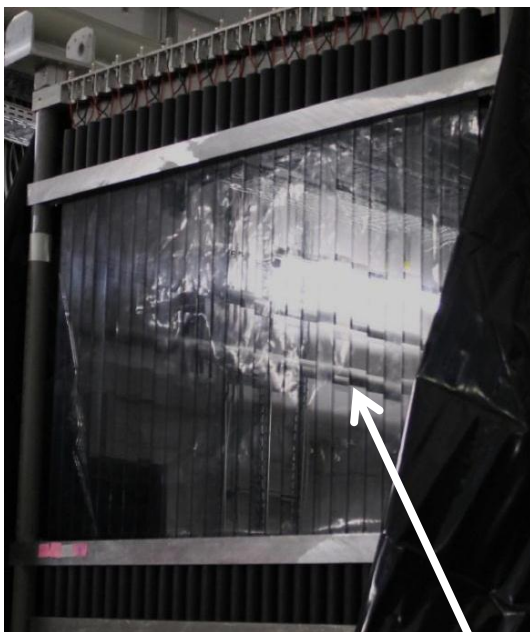


# DISPOSITIF TEMPS DE VOL

Haute énergie et base de vol courte (7.5 m) :  
Nécessaire pour séparer A lourds : **40 ps FWHM**  
Au GSI : 100 ps **FWHM** au mieux

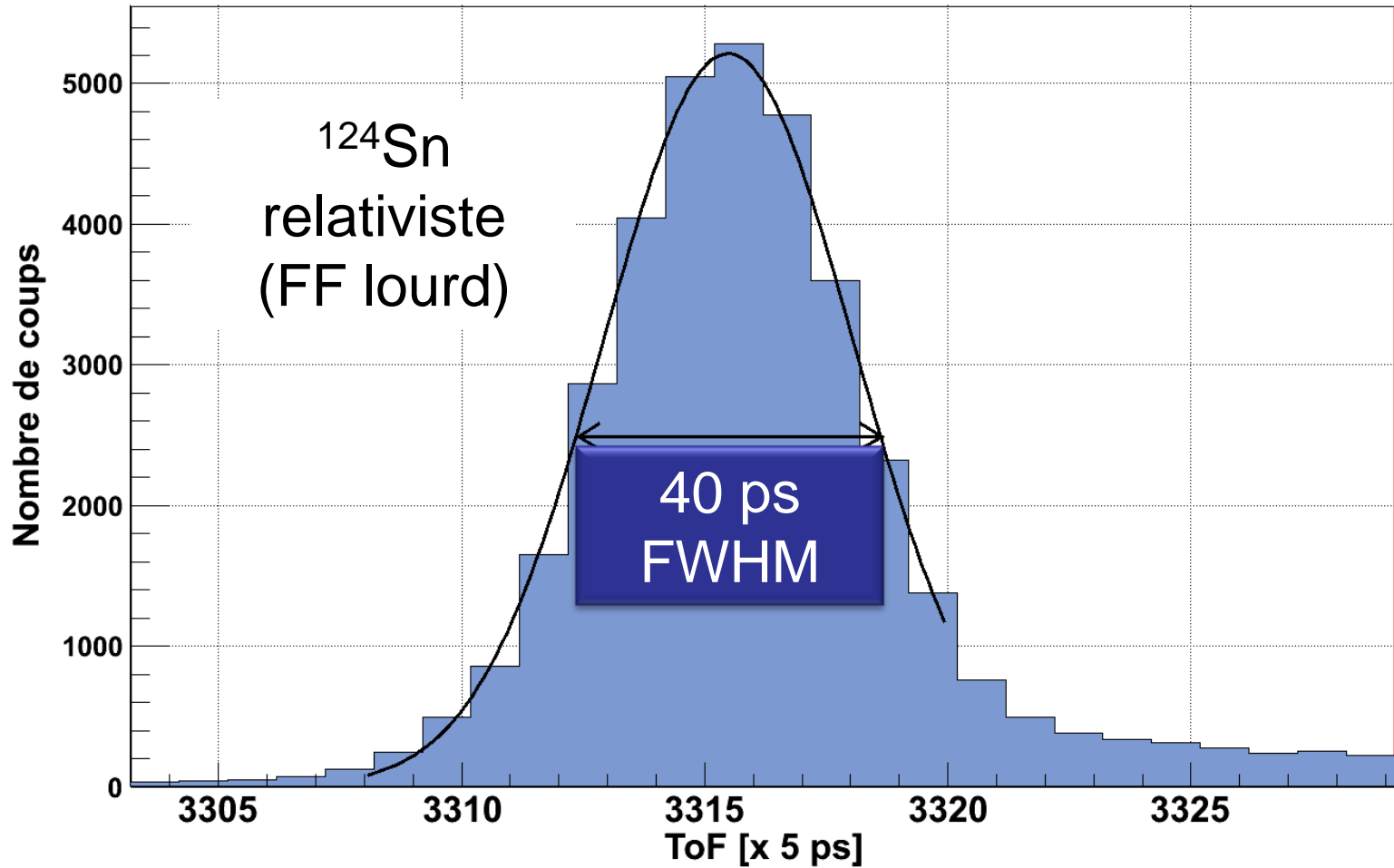
Stop : contrainte de taille :

- Dimensions : **90 \* 60 cm<sup>2</sup>** (dispersion du dipôle)



A. Ebran *et al.*,  
NIM A 728  
(2013) 40-46

28 scintillateurs ↔ 56 PMTs



## En résumé :

- SOFIA : conçu pour mesurer A et Z des deux fragments
- Validation des performances (FWHM) :
  - ✓ Positions (MWPCs) : 135  $\mu\text{m}$
  - ✓ Angle (Twin MUSIC) : 0,2 mrad
  
  - ✓ Temps de vol : 40 ps

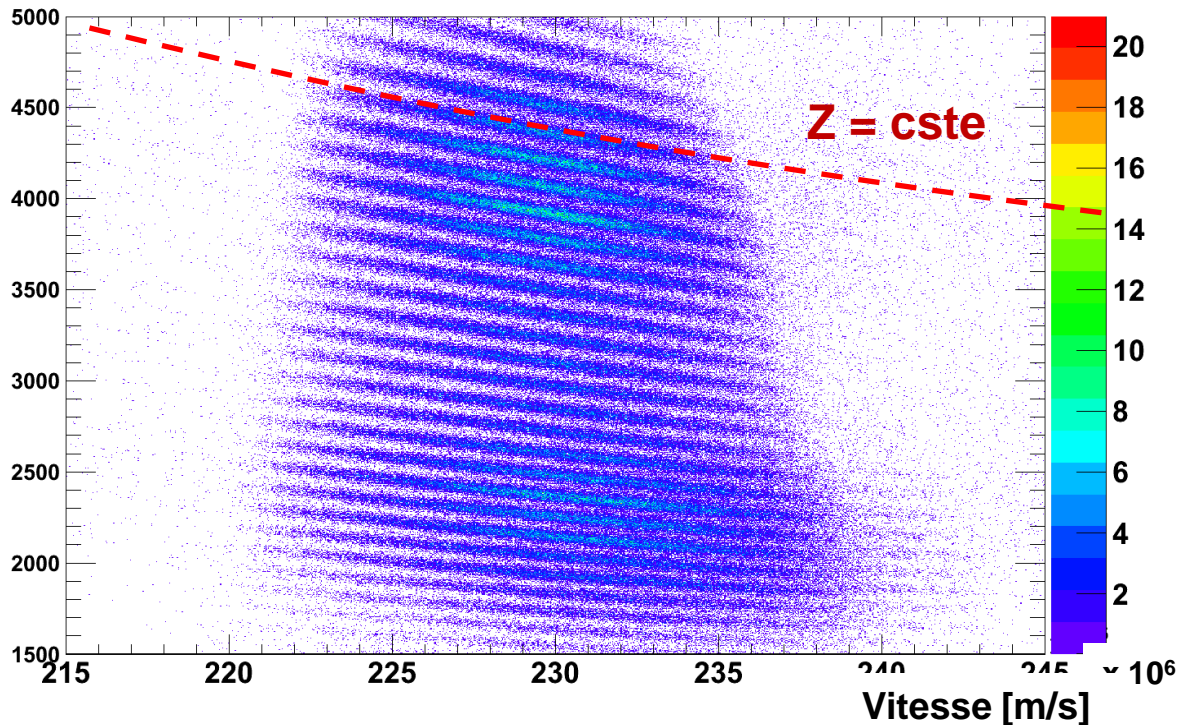
# Spectres

- 1) Charges
- 2) Masses

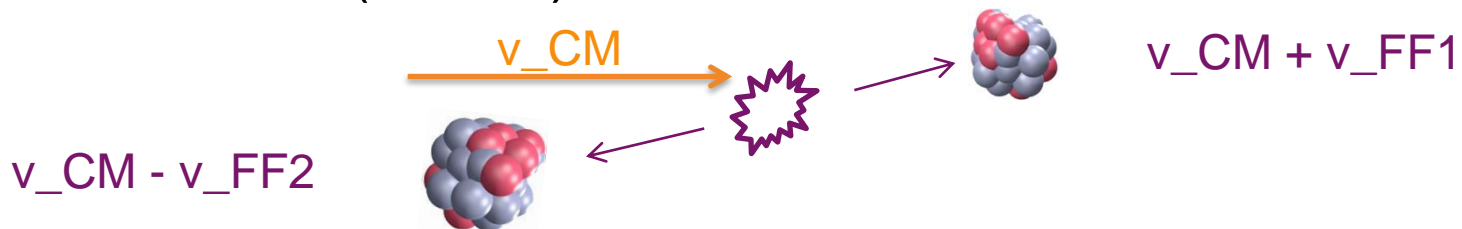
# OBTENTION DES CHARGES

→ Signaux énergie Twin MUSIC. Mais ...

Perte  
d'énergie  
Twin MUSIC



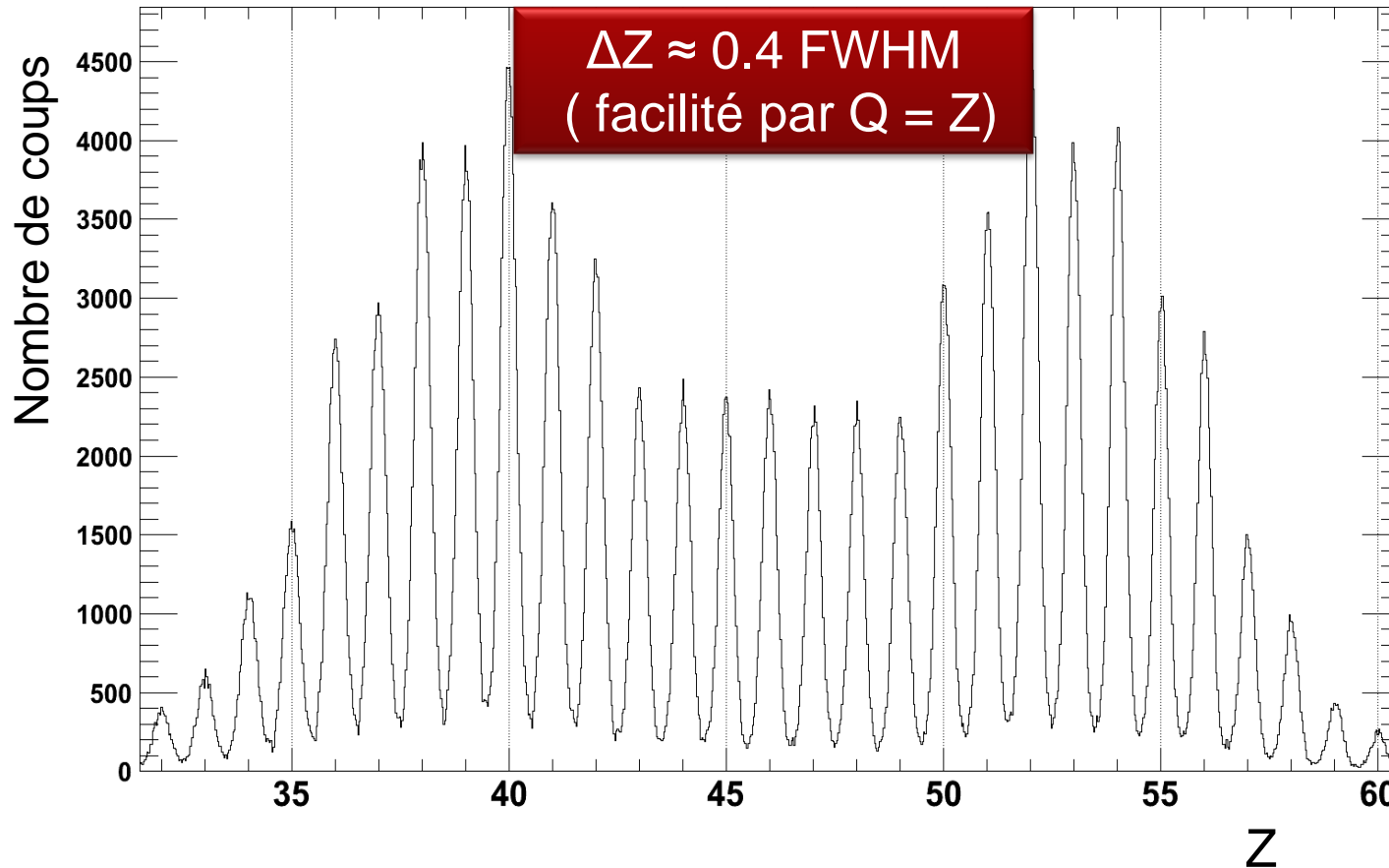
$\Delta E = f(Z^2, \mathbf{V})$ , notamment à cause de Coulomb





# SPECTRES DE CHARGES

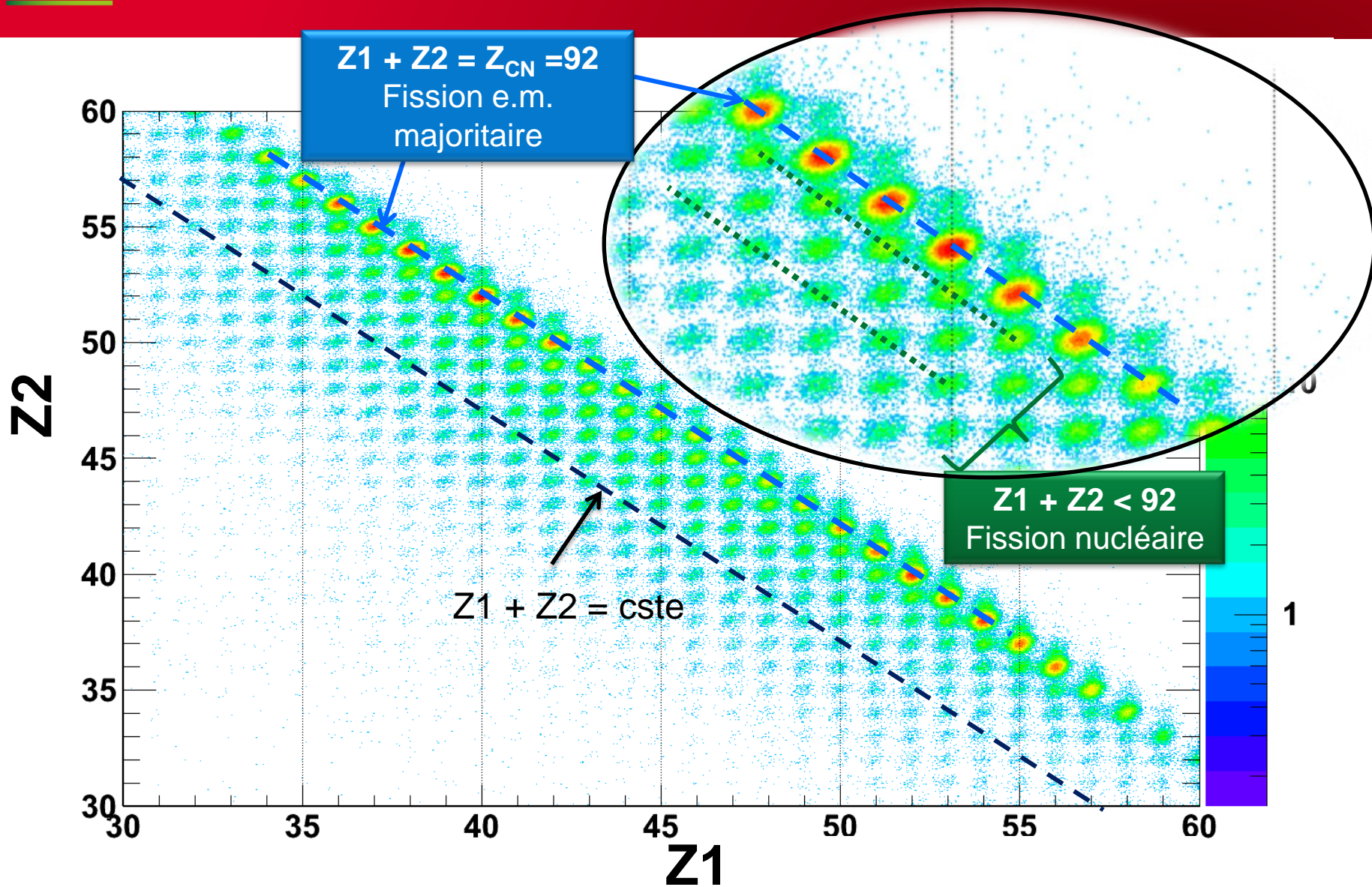
- Signaux énergies Twin-MUSIC corrigés de plusieurs dépendances



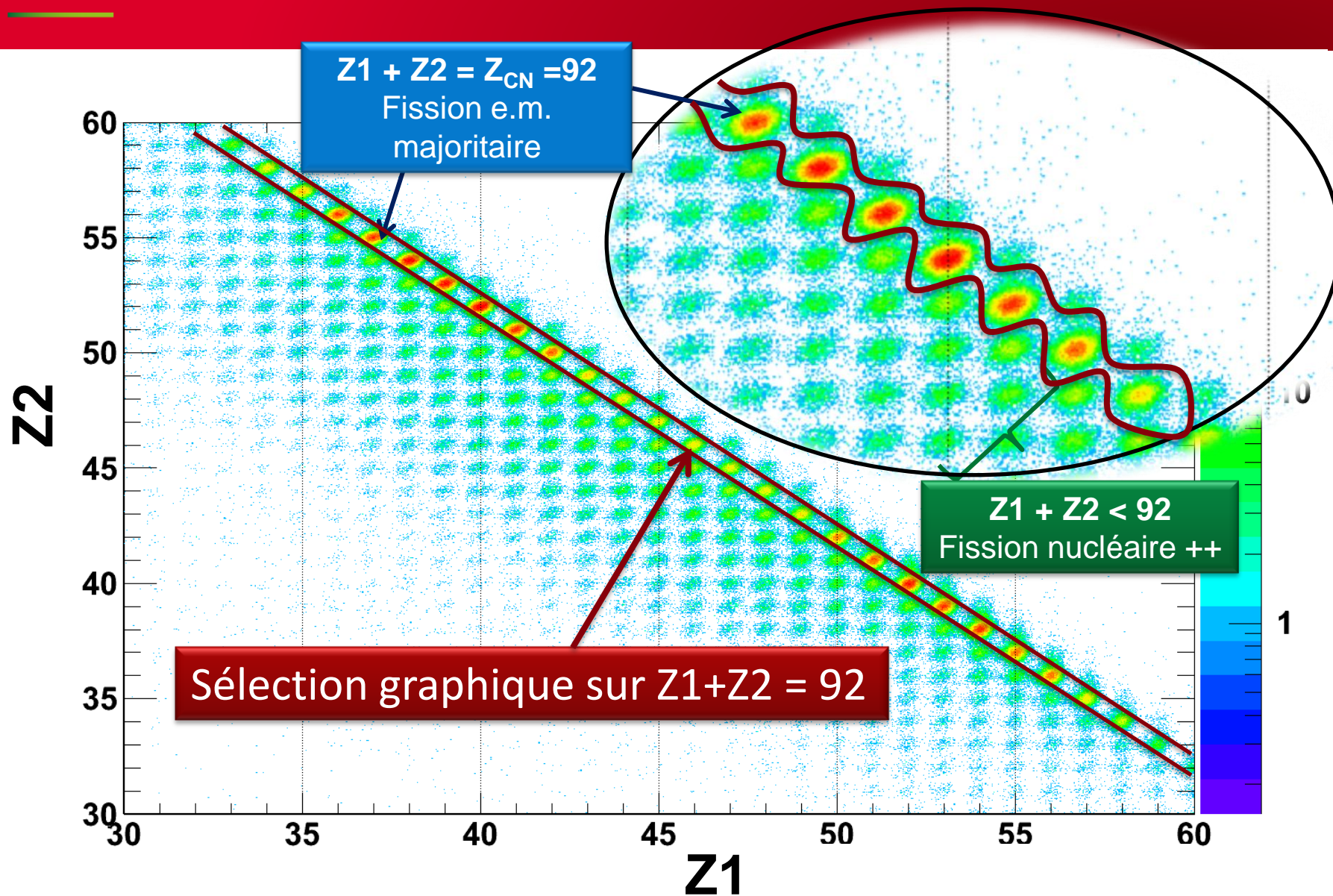
- Sélection des fissions électromagnétiques ?

~~nucléaires~~

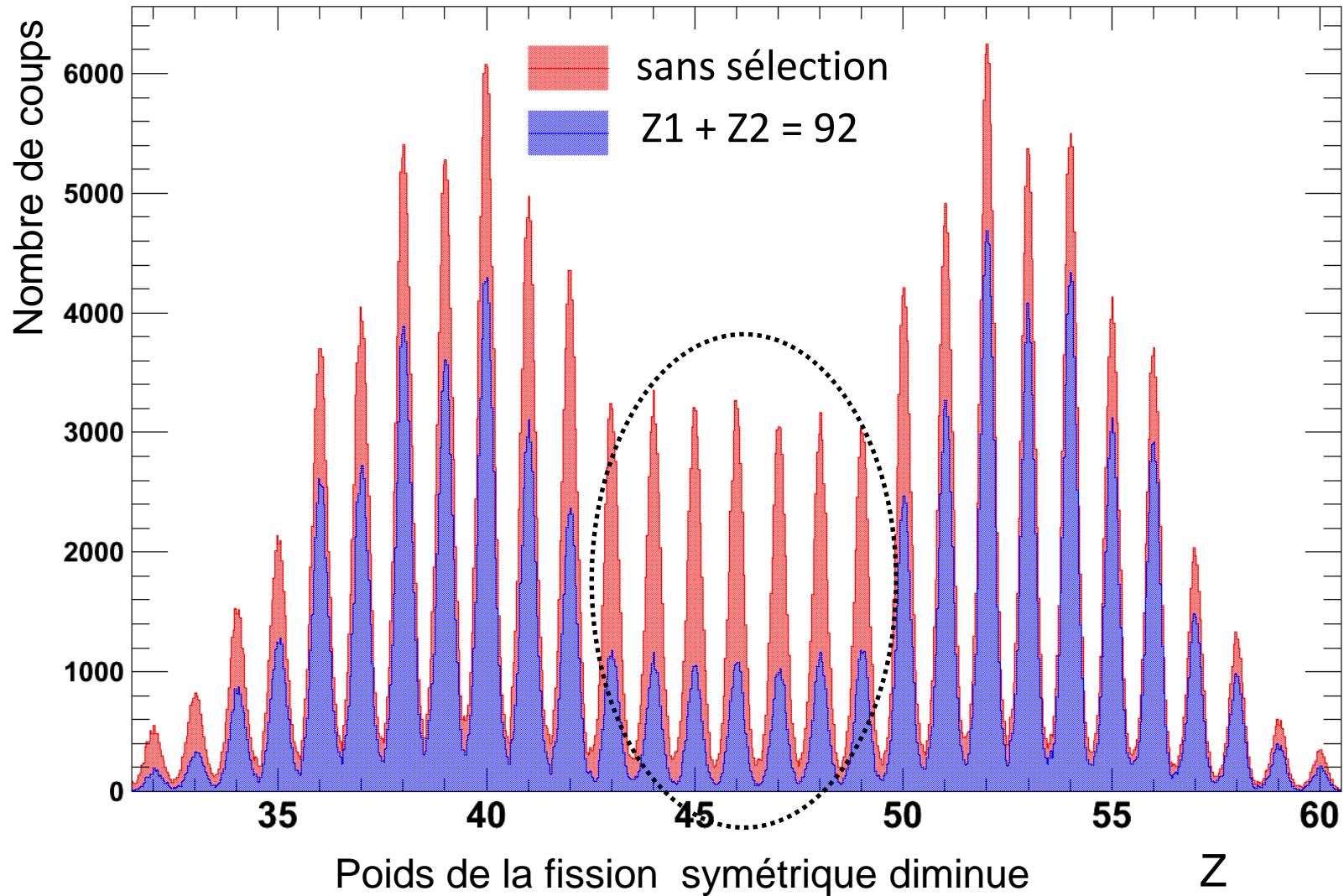
# Z2 VS Z1

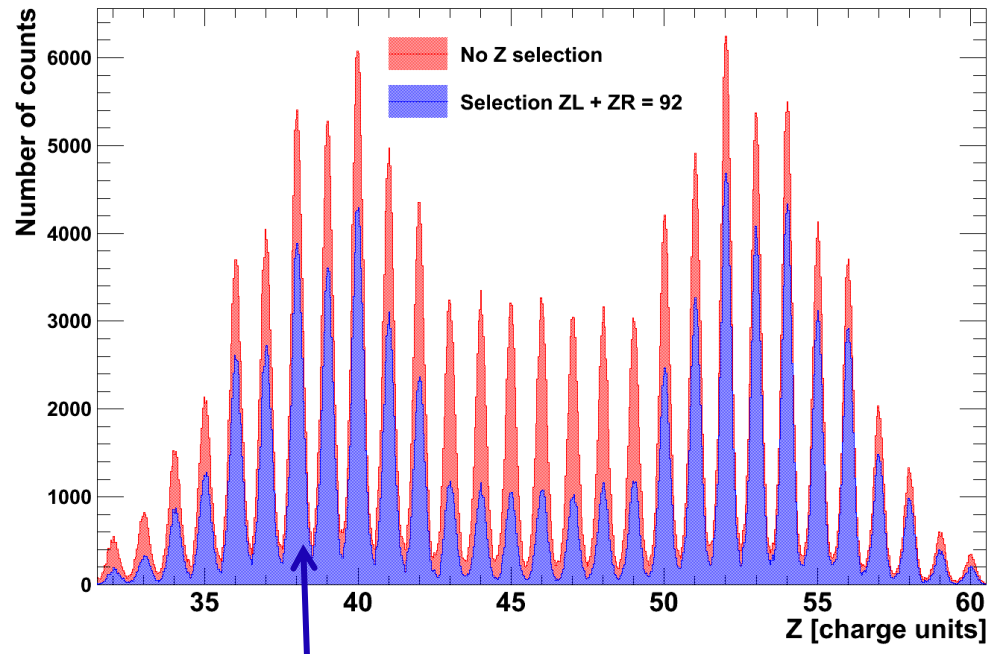


## Z2 VS Z1 : SÉLECTION BASSE E\*



# SÉLECTION $Z1 + Z2 = 92$



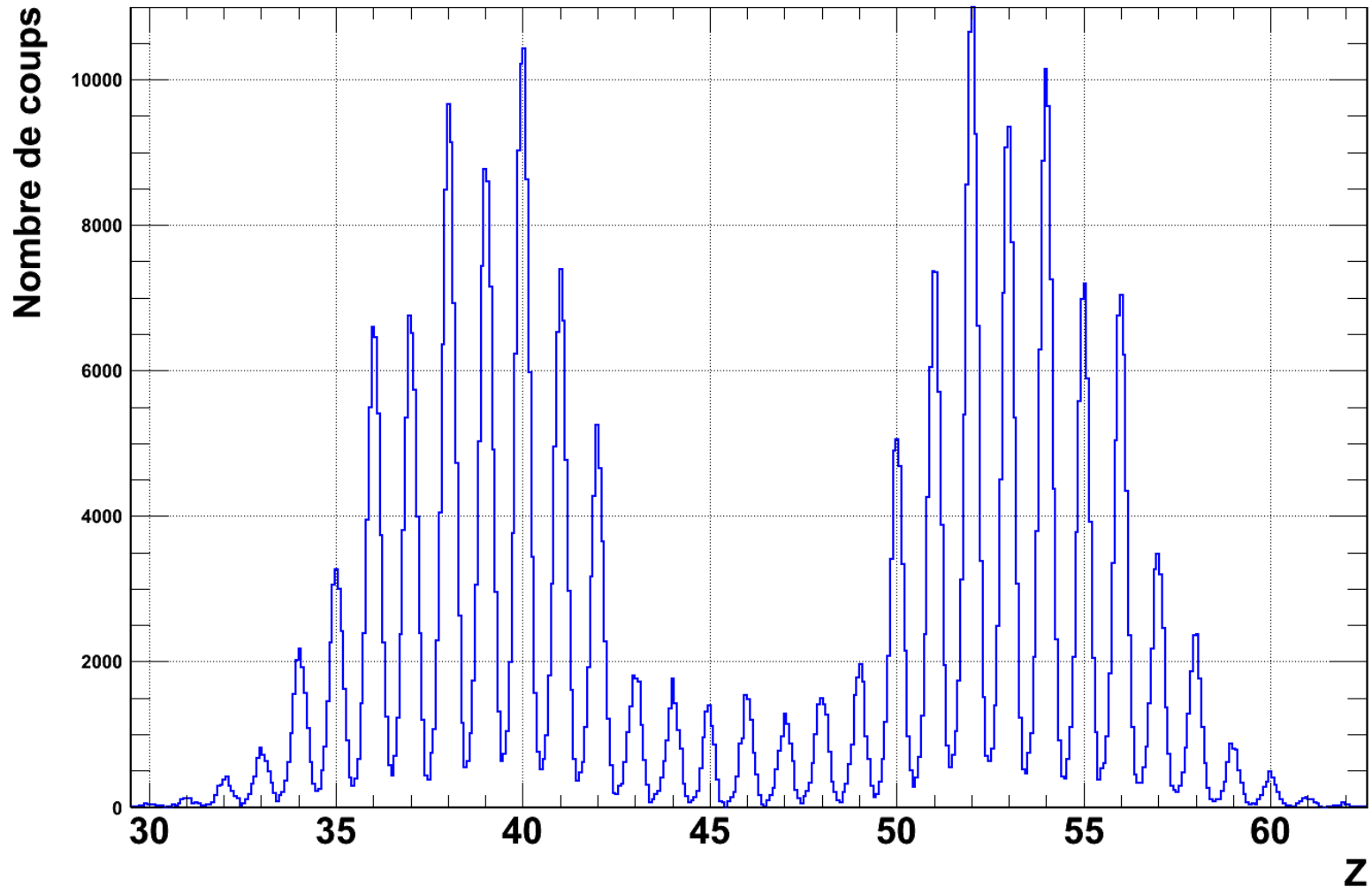


Dans le spectre précédent, pratiquement plus que des fissions électromagnétiques

mais ....

Il reste une part de fission nucléaire résiduelle  
→ que l'on peut toutefois soustraire

# SPECTRE DE CHARGES FISSIONS E.M.

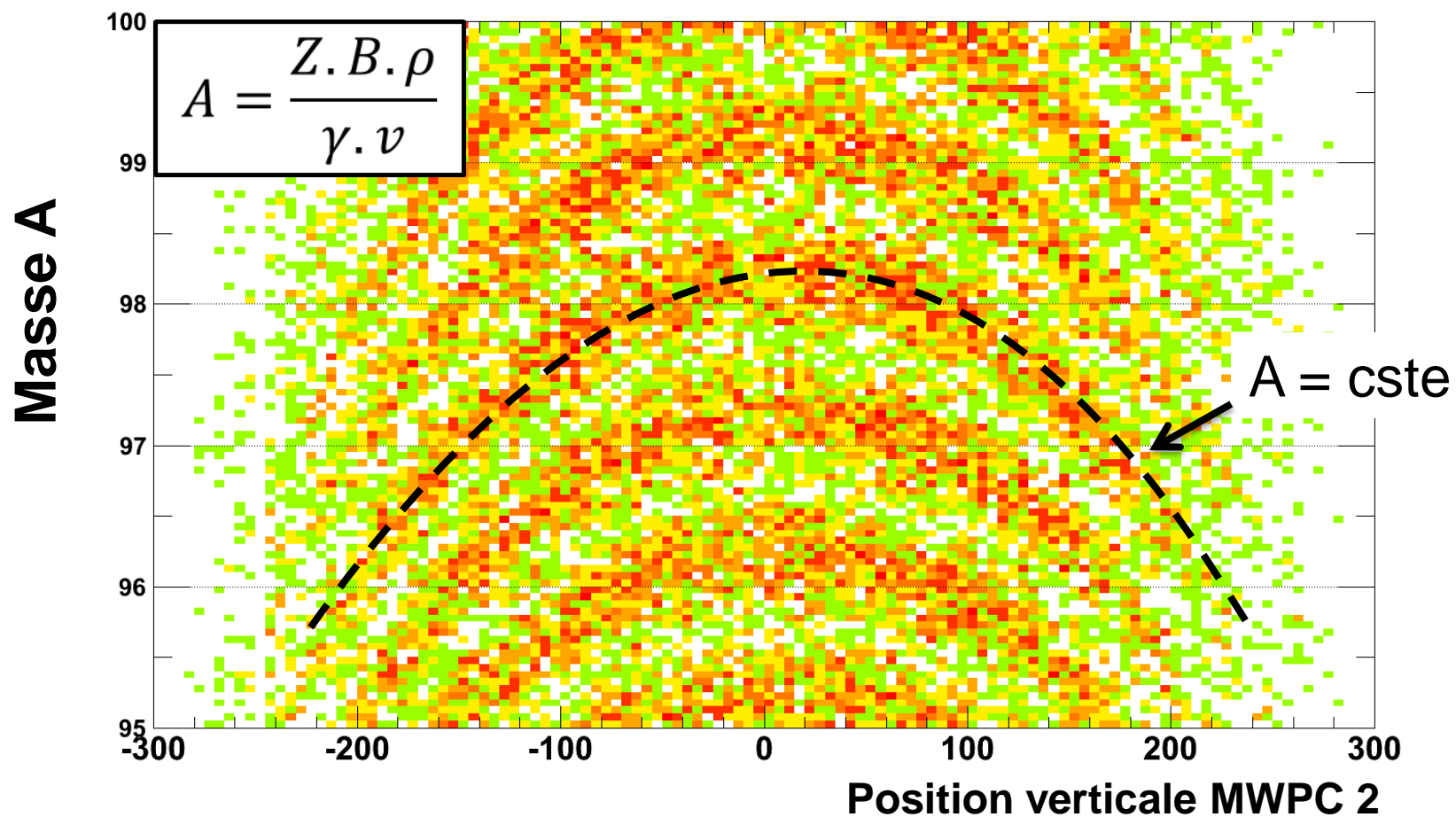


**Poids du symétrique diminue encore**

# Spectres

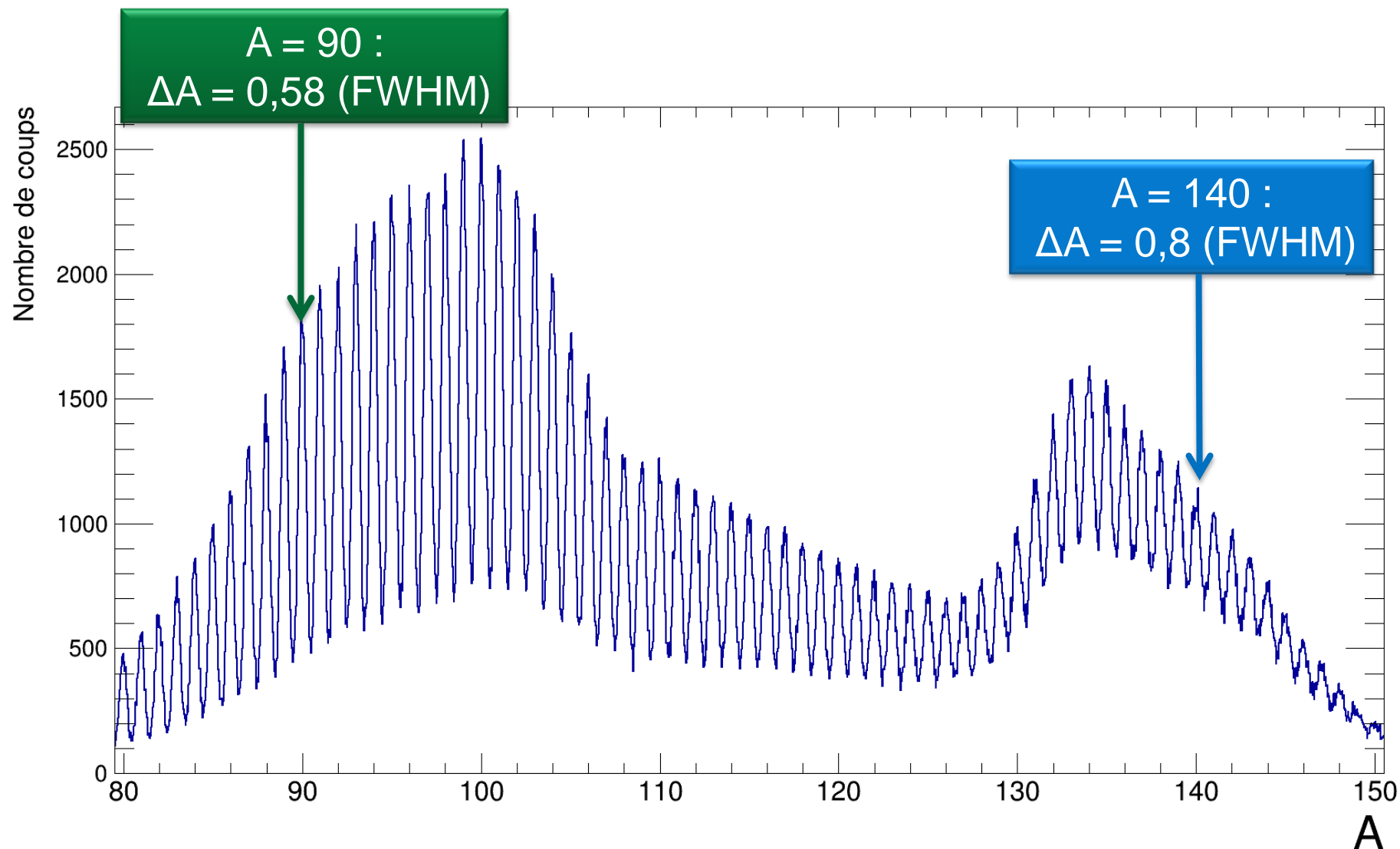
- 1) Charges
- 2) **Masses**

## MASSES VS Y

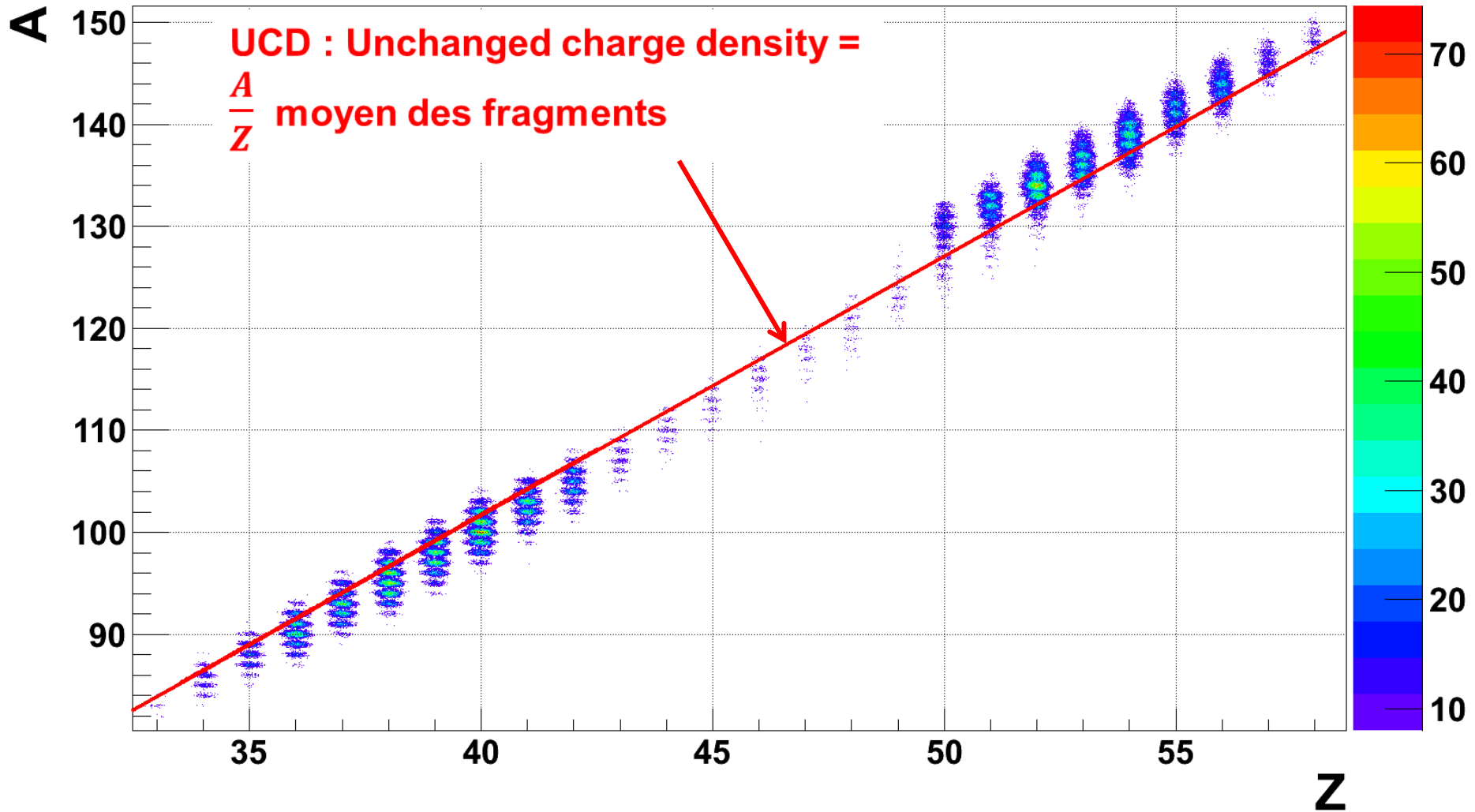




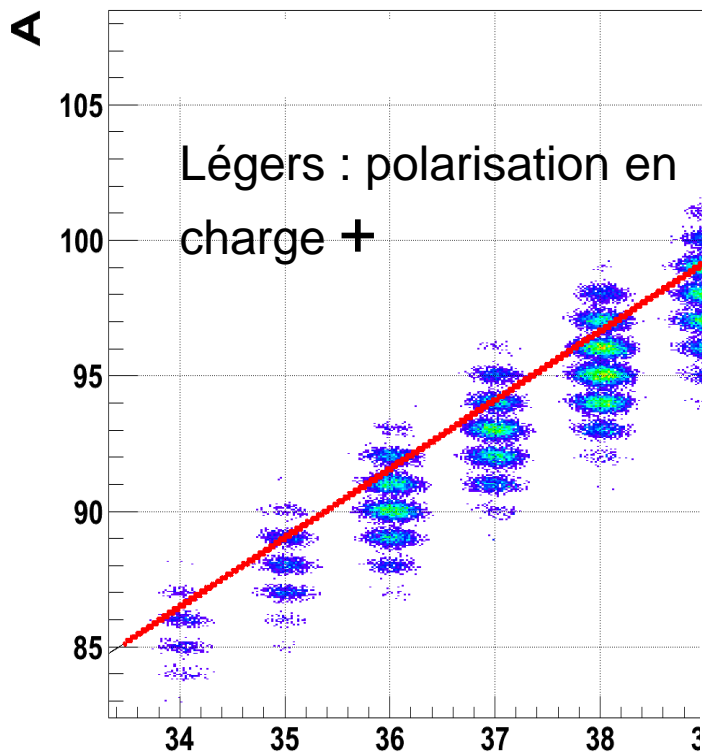
# SPECTRE DE MASSES



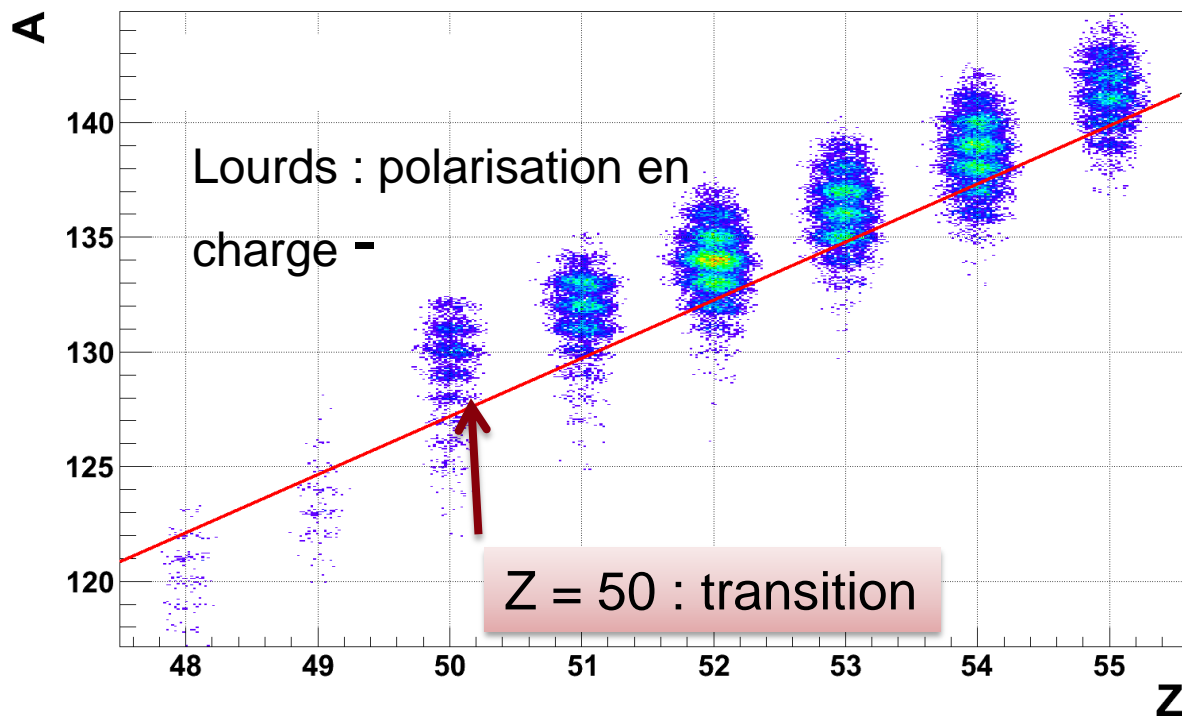
# SPECTRE ISOTOPIQUE



## SPECTRE ISOTOPIQUE - ZOOMS



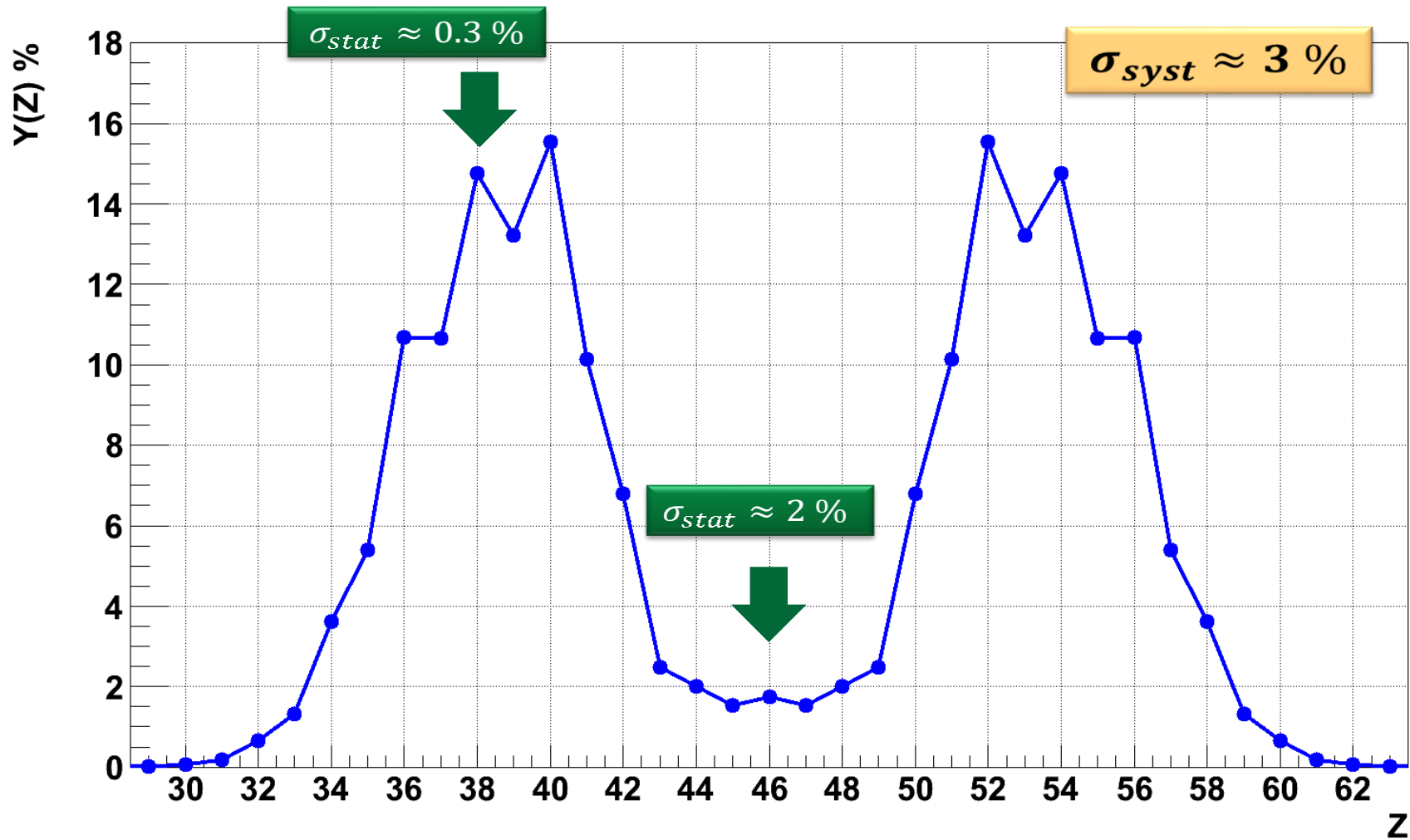
$$\text{UCD} = \frac{A}{Z} \text{ moyen des fragments}$$



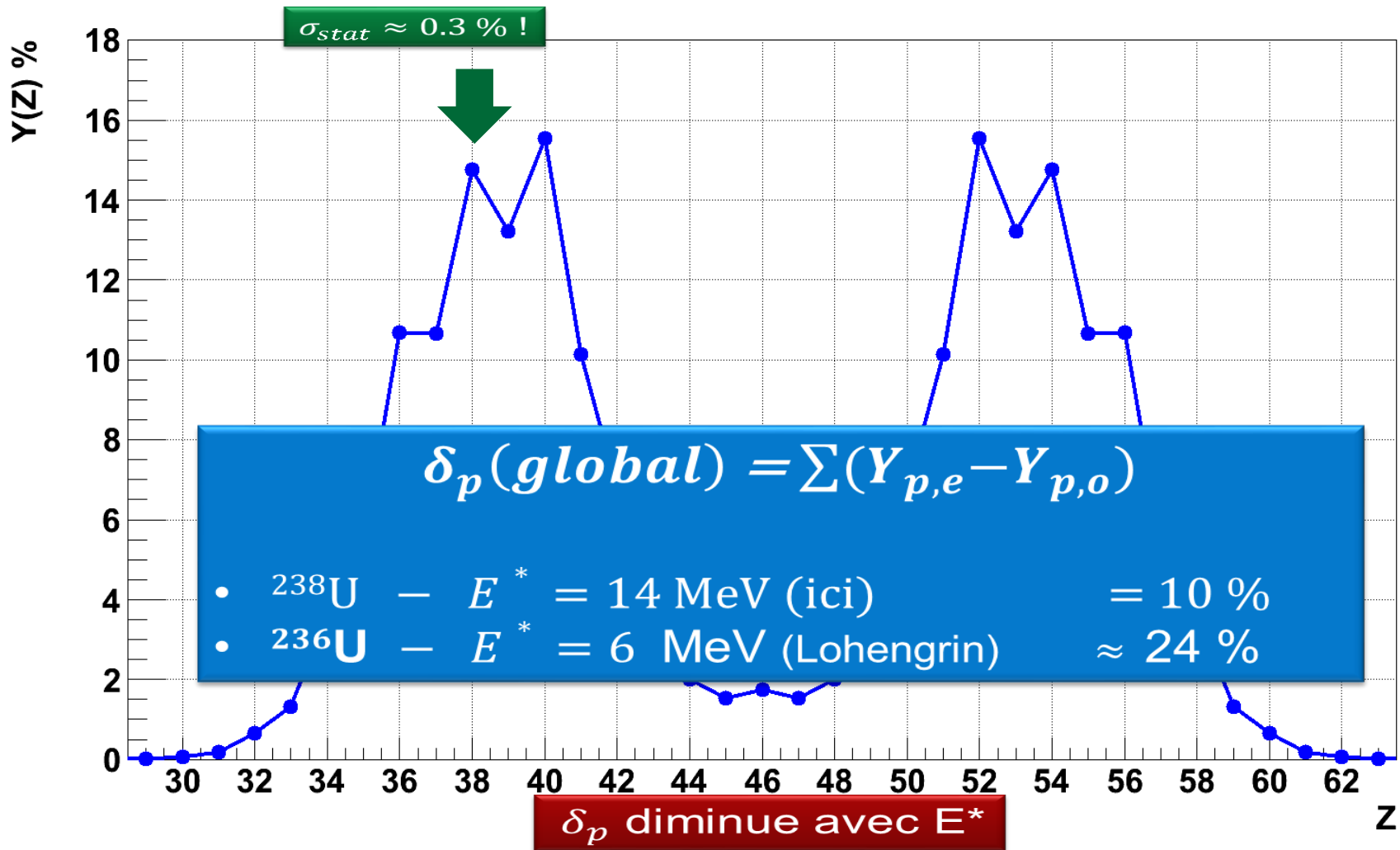
# Rendements

- 1) Charges
- 2) Isotoniques
- 3) Isotopiques
- 4) Masses
- 5) Neutrons prompts  $\bar{\nu}$

# RENDEMENTS EN CHARGE



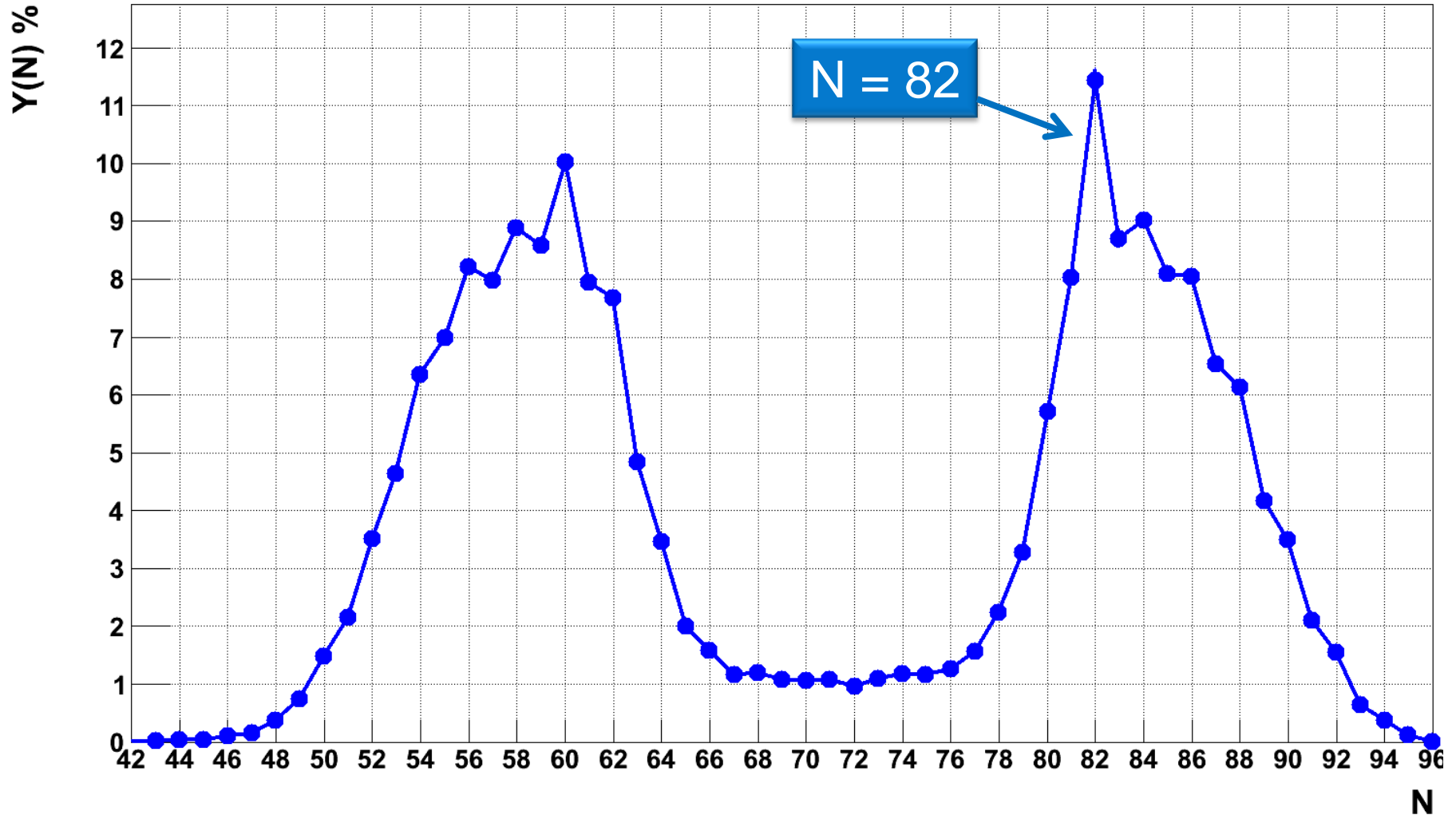
# RENDEMENTS EN CHARGE



# Rendements

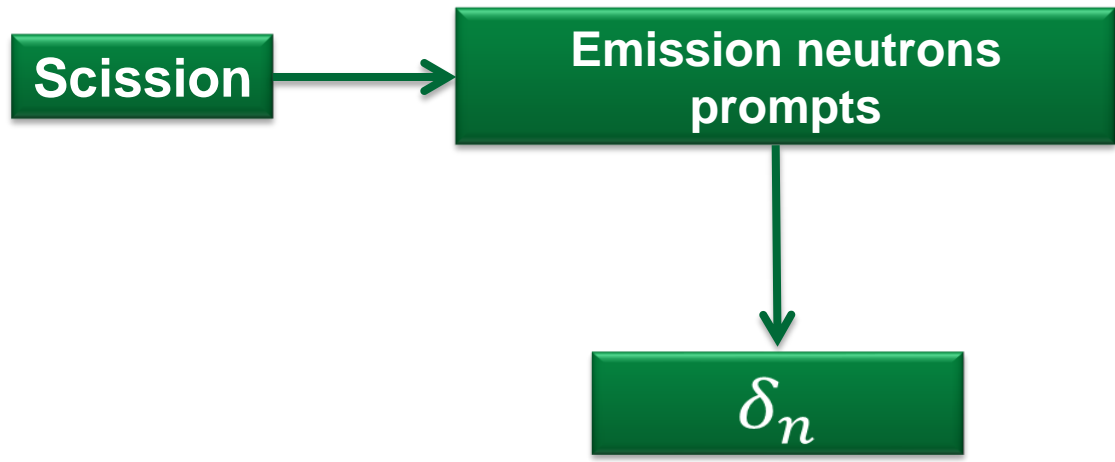
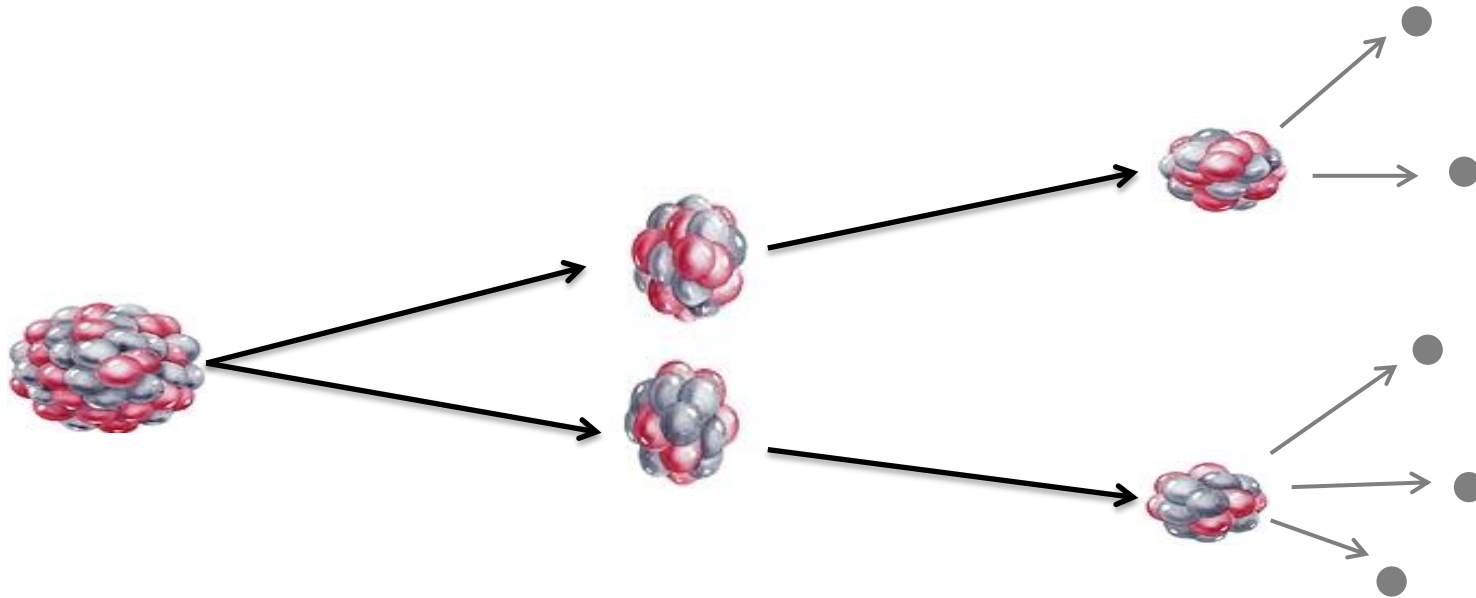
- 1) Charges
- 2) Isotoniques:  $Y(N)=Y(A-Z)$**
- 3) Isotopiques
- 4) Masses
- 5) Neutrons prompts  $\bar{\nu}$

# RENDEMENTS ISOTONIQUES : $N = A - Z$

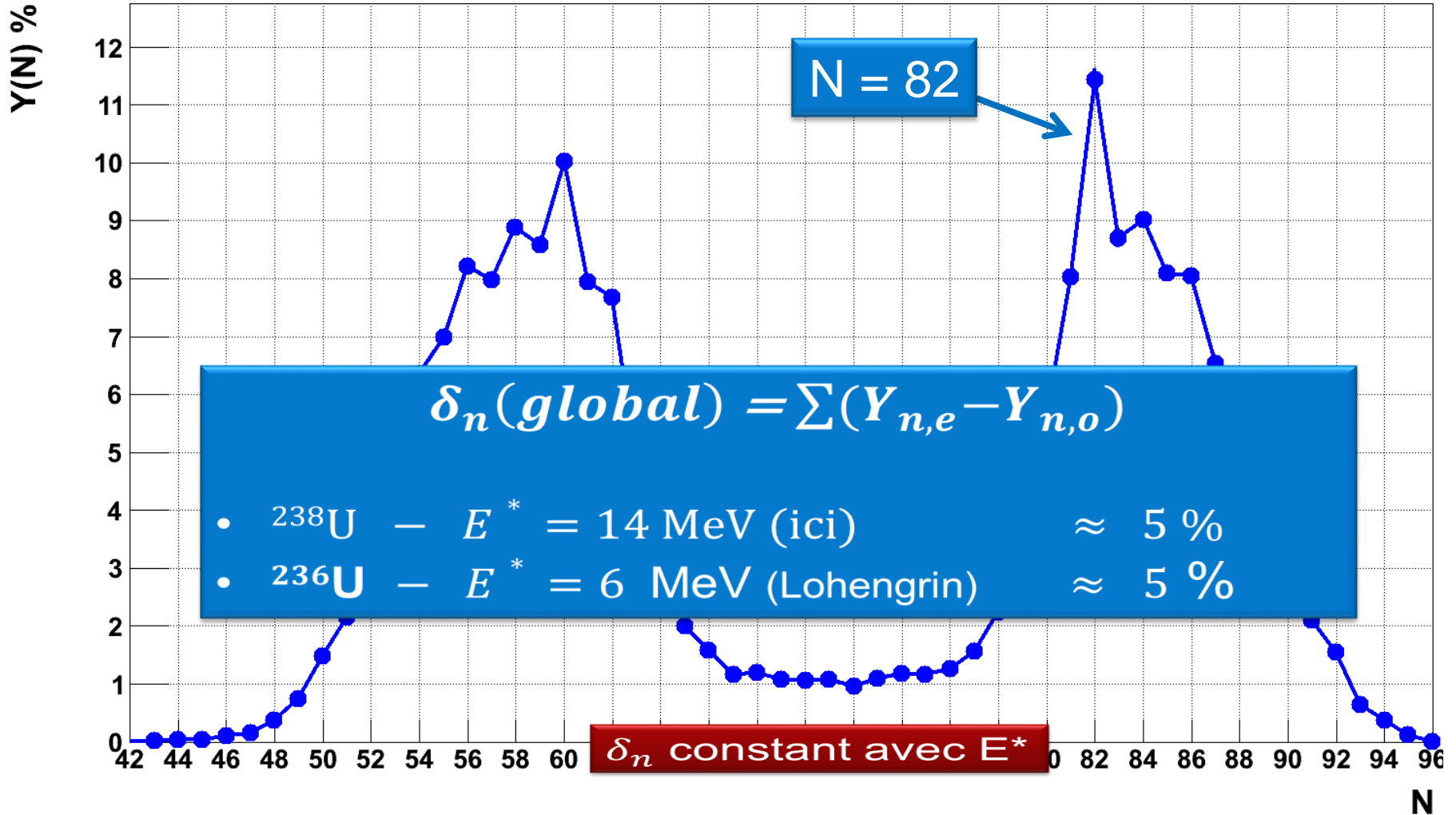




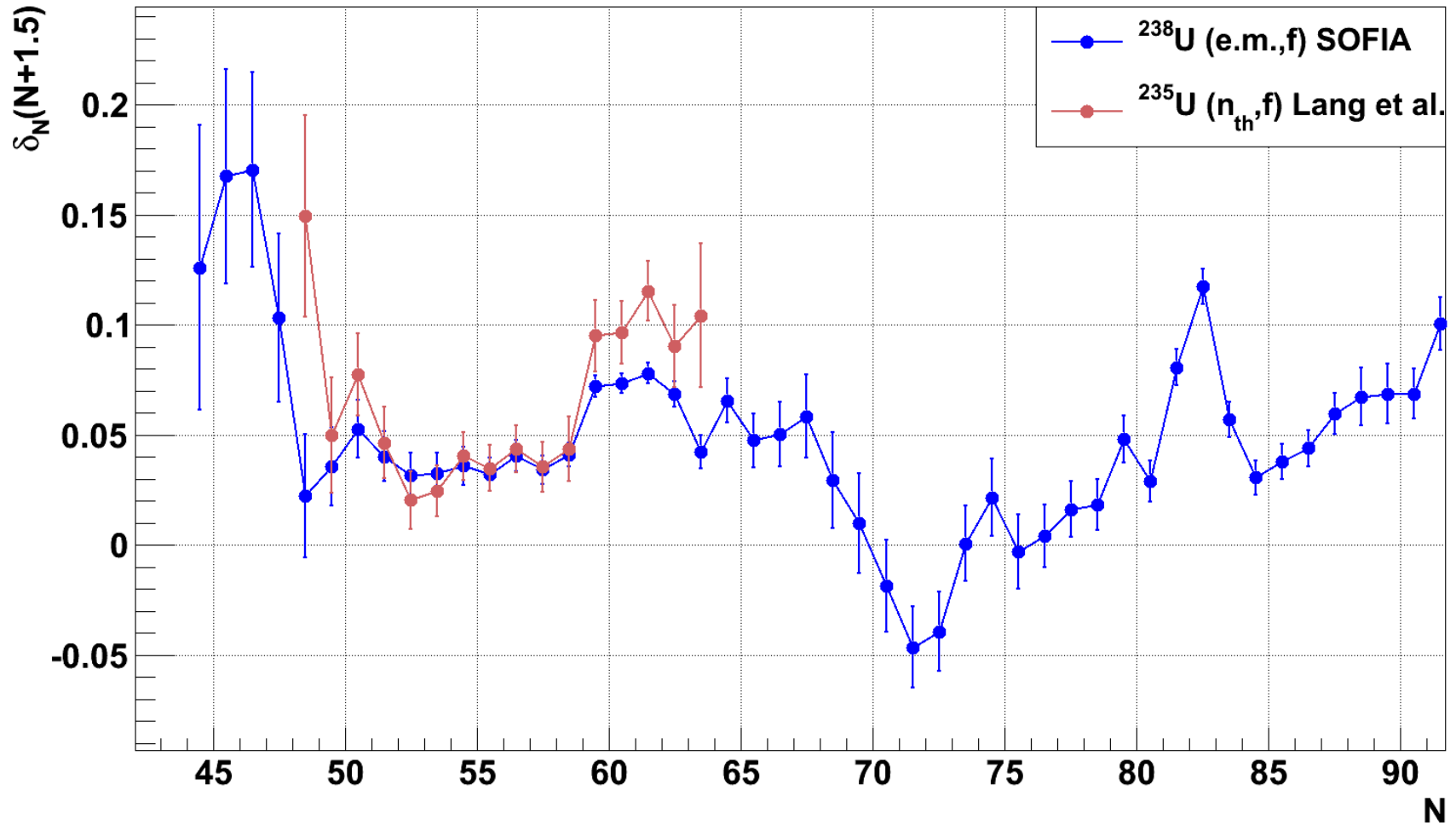
# EFFET PAIR-IMPAIR NEUTRONS



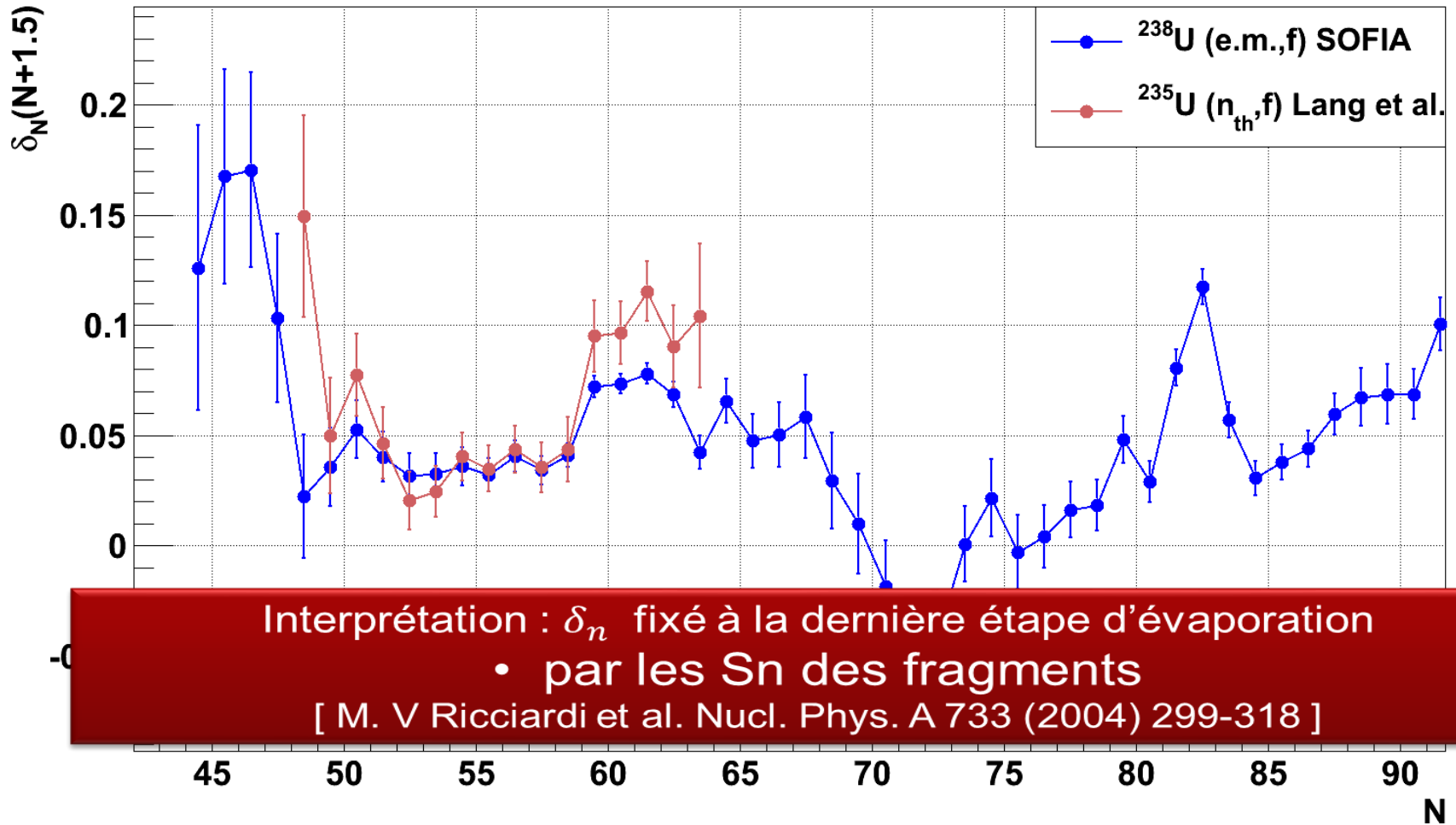
# RENDEMENTS ISOTONIQUES : $N = A - Z$



# EFFET PAIR-IMPAIR LOCAL NEUTRONS



# EFFET PAIR-IMPAIR LOCAL NEUTRONS



## Récapitulatif sur les effets pair-impairs :

$$\square \delta_p$$

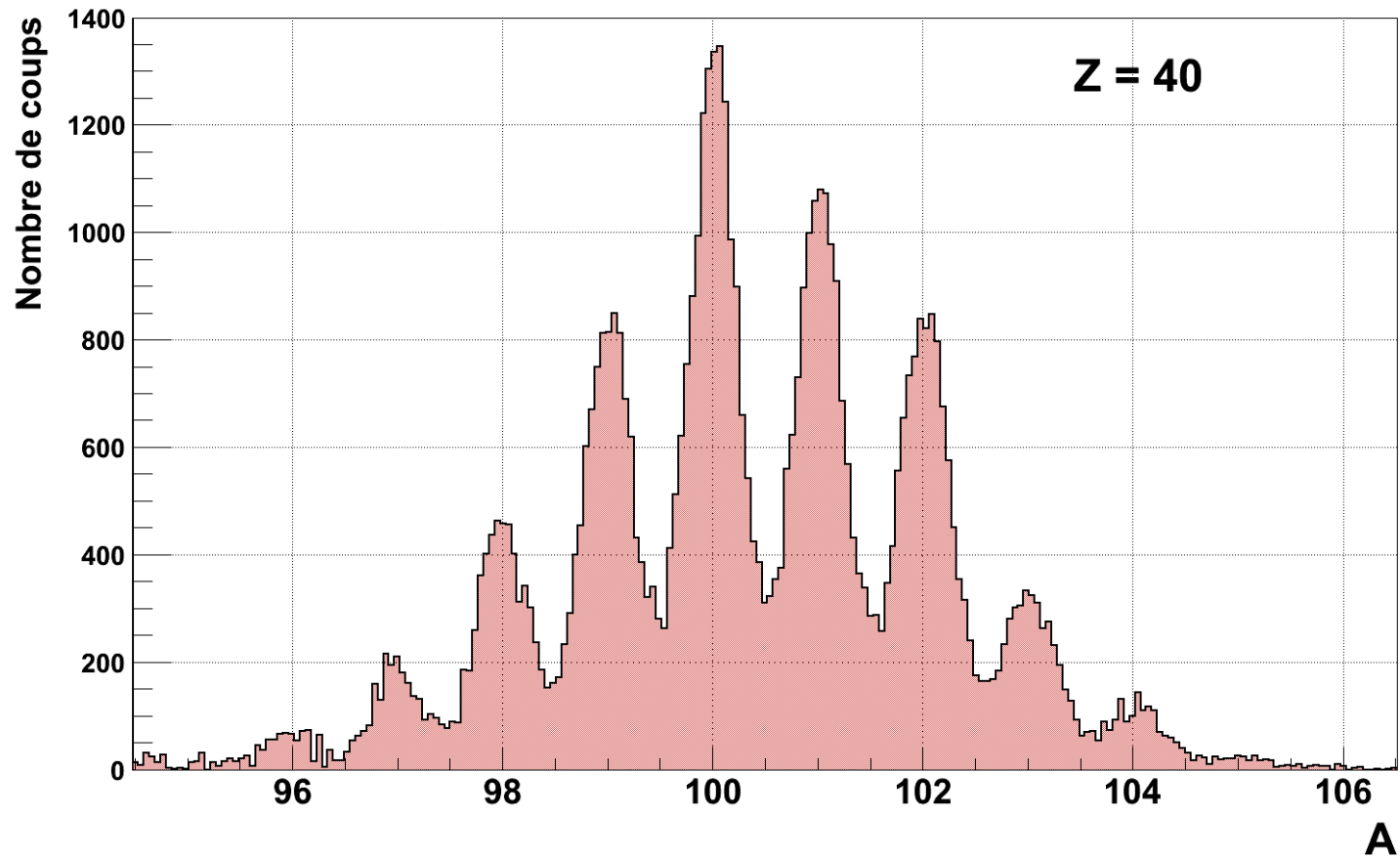
- Diminue avec  $E^*$
- Reflète la répartition des protons à la scission

$$\square \delta_n$$

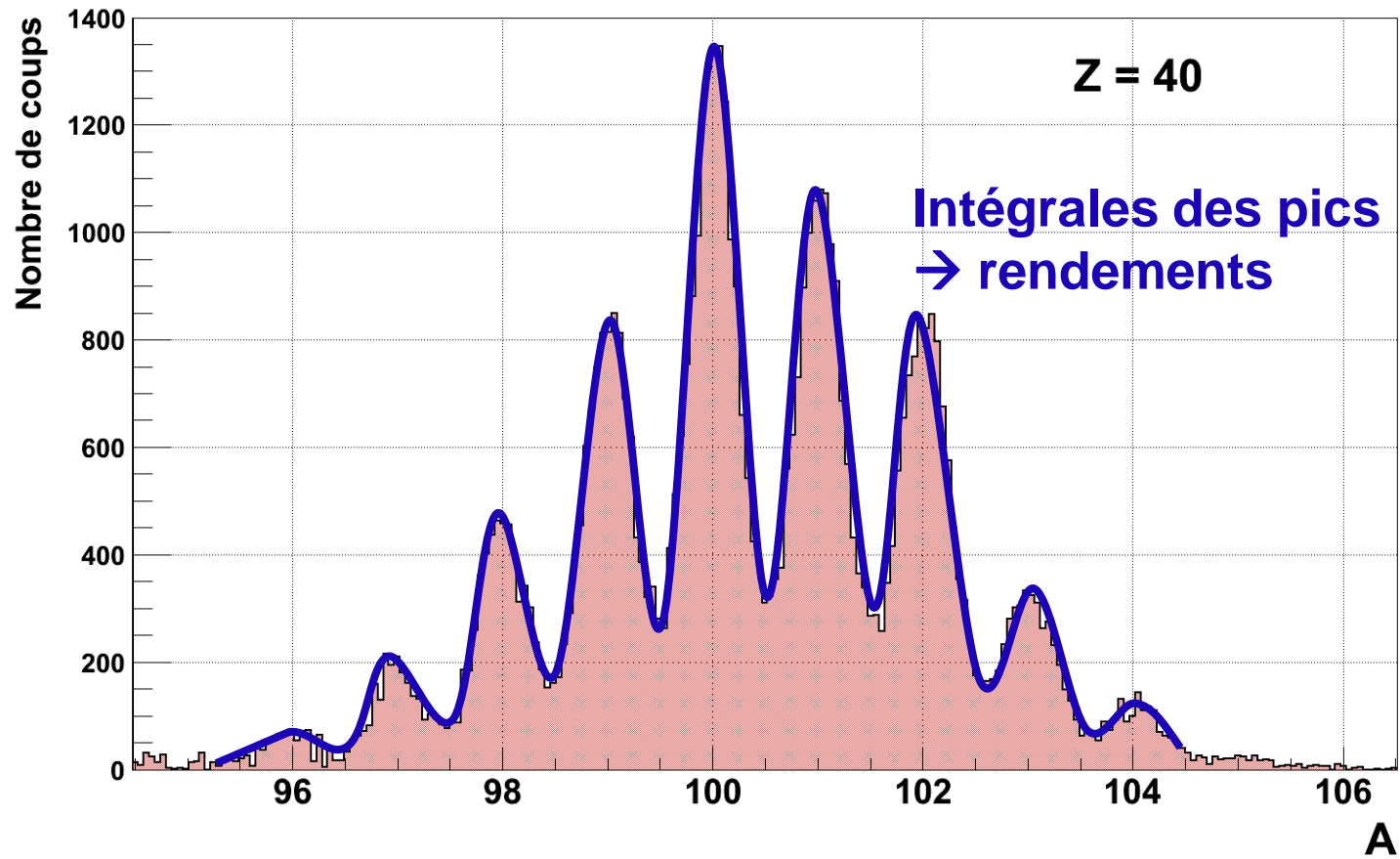
- Constant avec  $E^*$  (FF légers)
- (I) : Reflète les  $S_n$  des fragments

# Rendements

- 1) Charges
- 2) Isotoniques
- 3) Isotopiques**
- 4) Masses
- 5) Neutrons prompts  $\bar{\nu}$

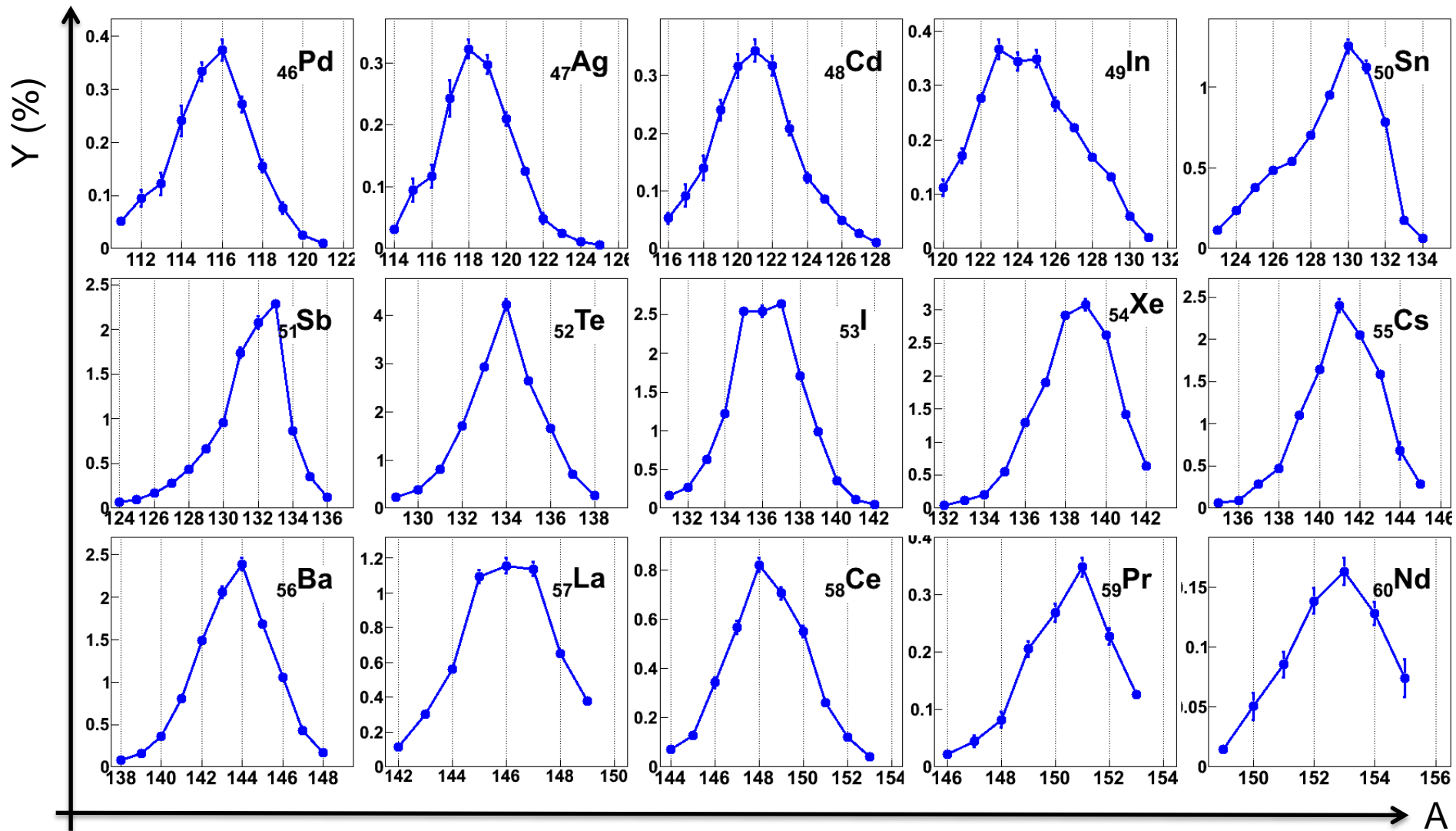


# RENDEMENTS ISOTOPIQUES

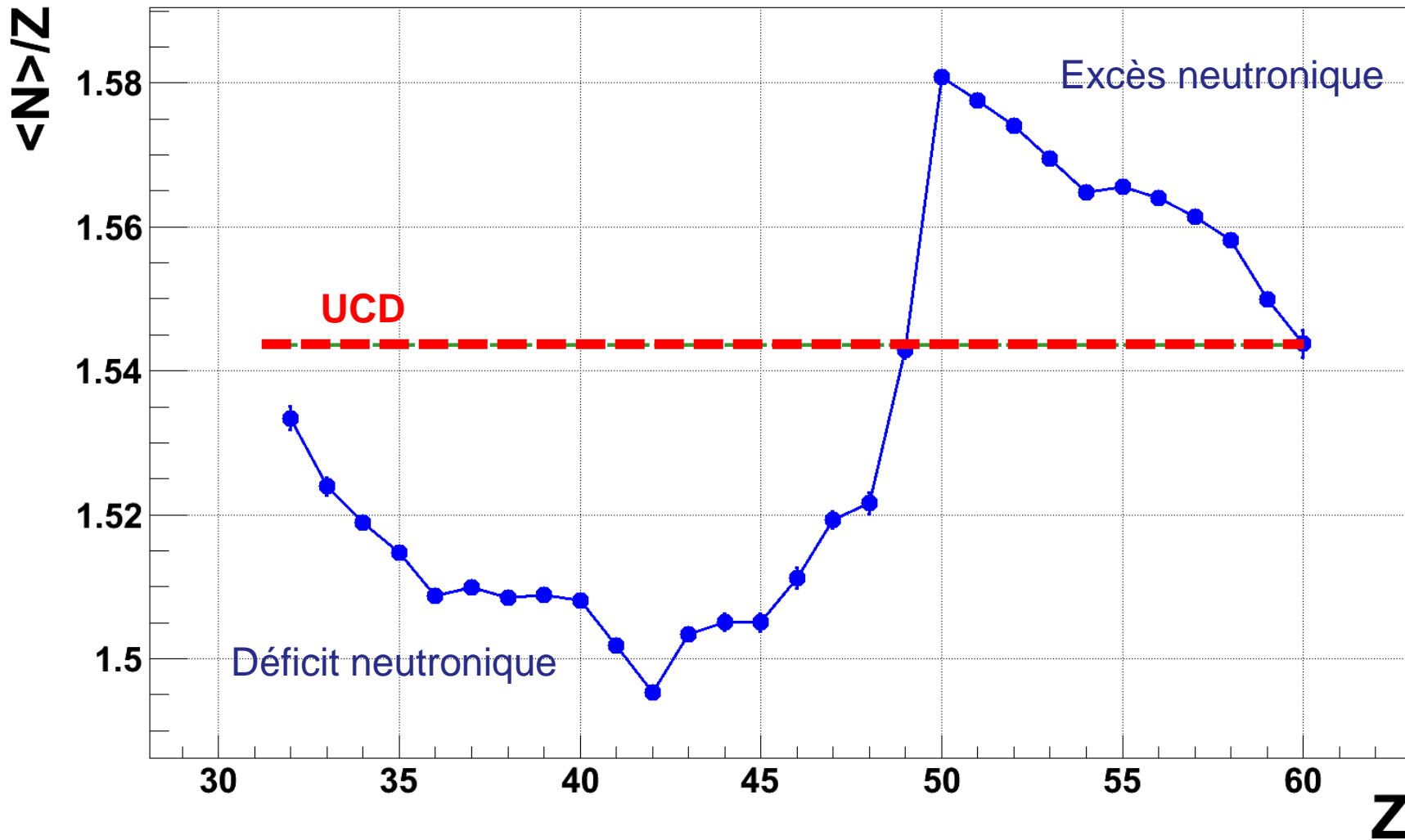




# RENDEMENTS ISOTOPIQUES (LOURDS)

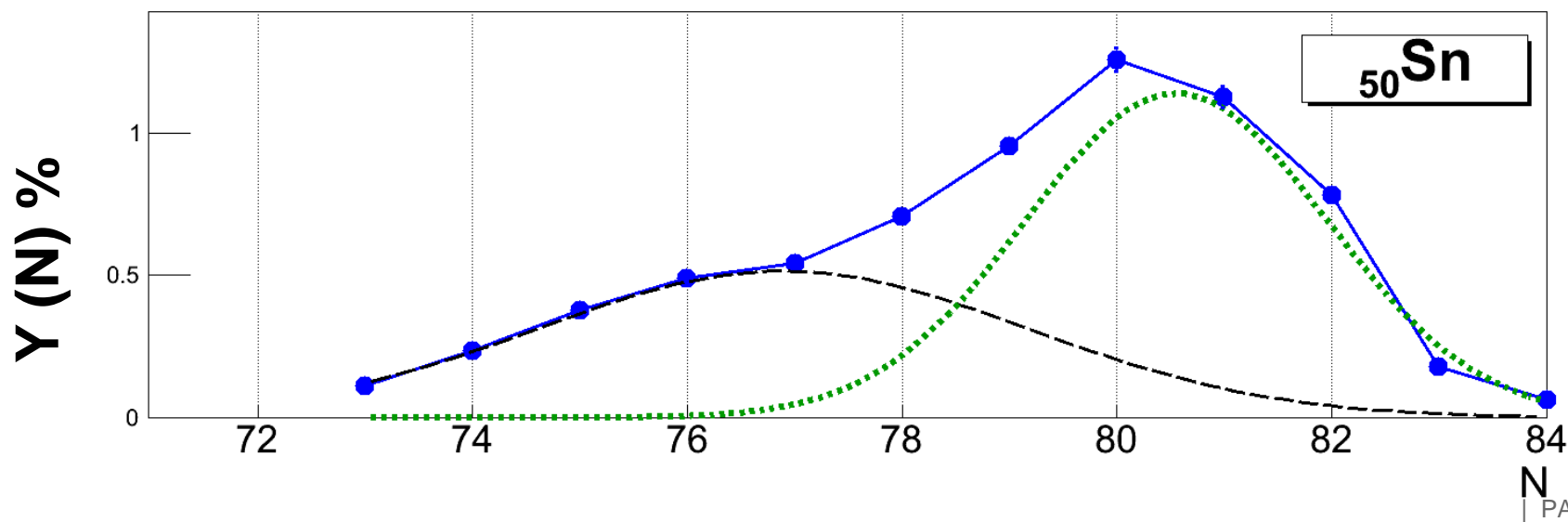
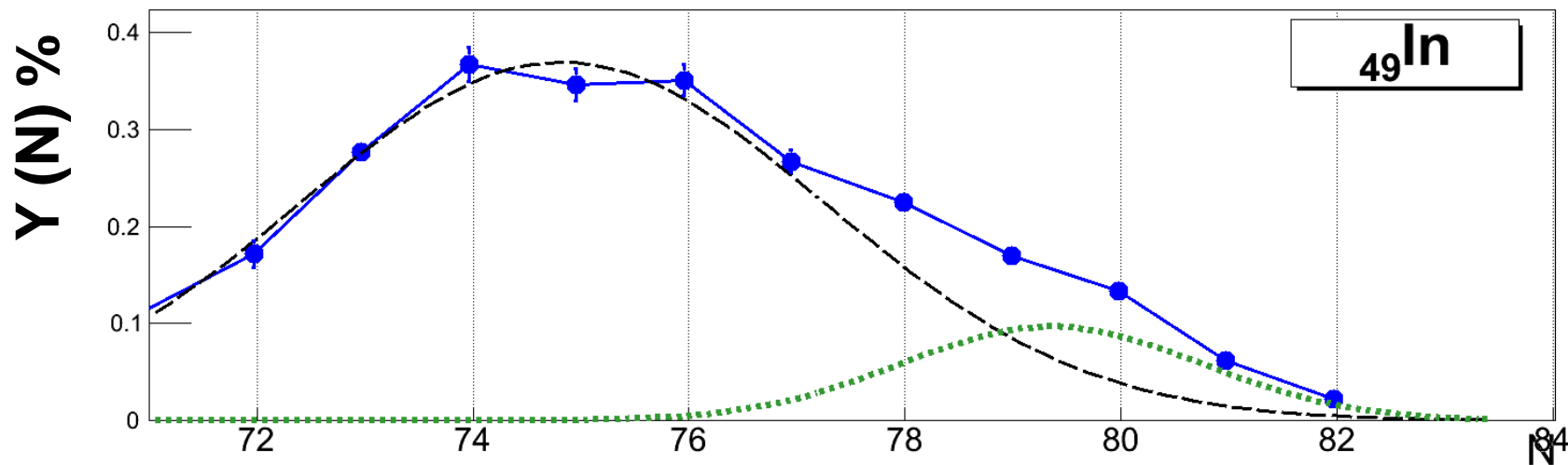


# POLARISATION EN CHARGE



# RENDEMENTS ISOTOPIQUES ; ZOOM Z = 49-50

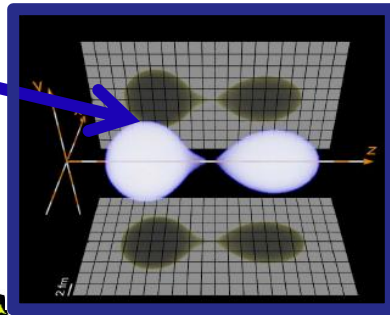
En fonction de N ici



# MODES DE FISSION (BROSA)

Plusieurs chemins vers la scission

$^{132}\text{Sn}$

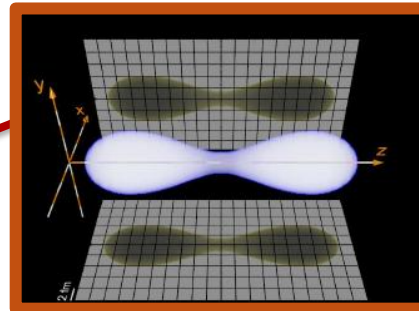


Standard 1

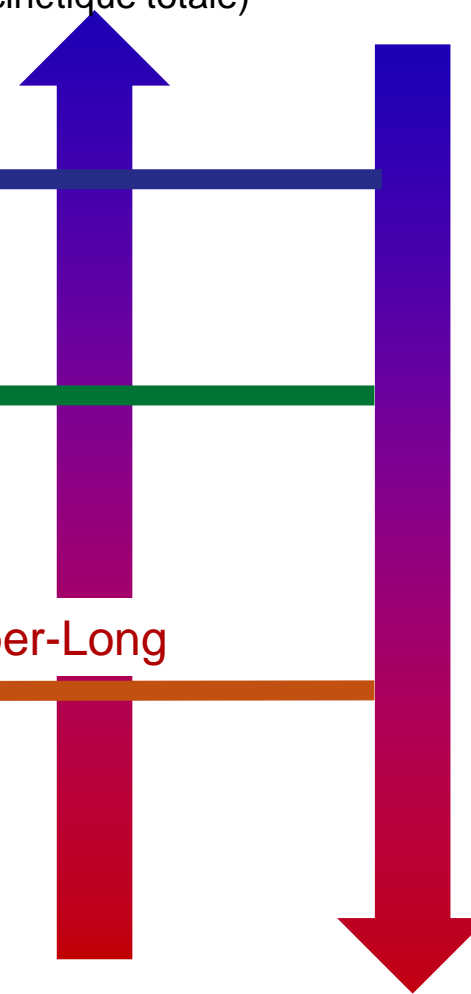
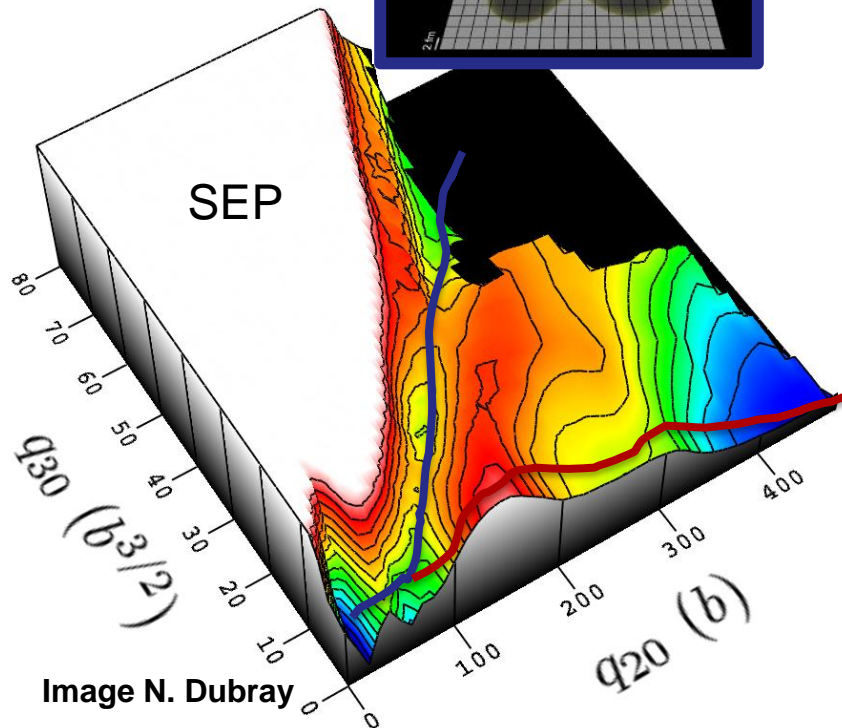
TKE  
(E cinétique totale)

Edef

Standard 2

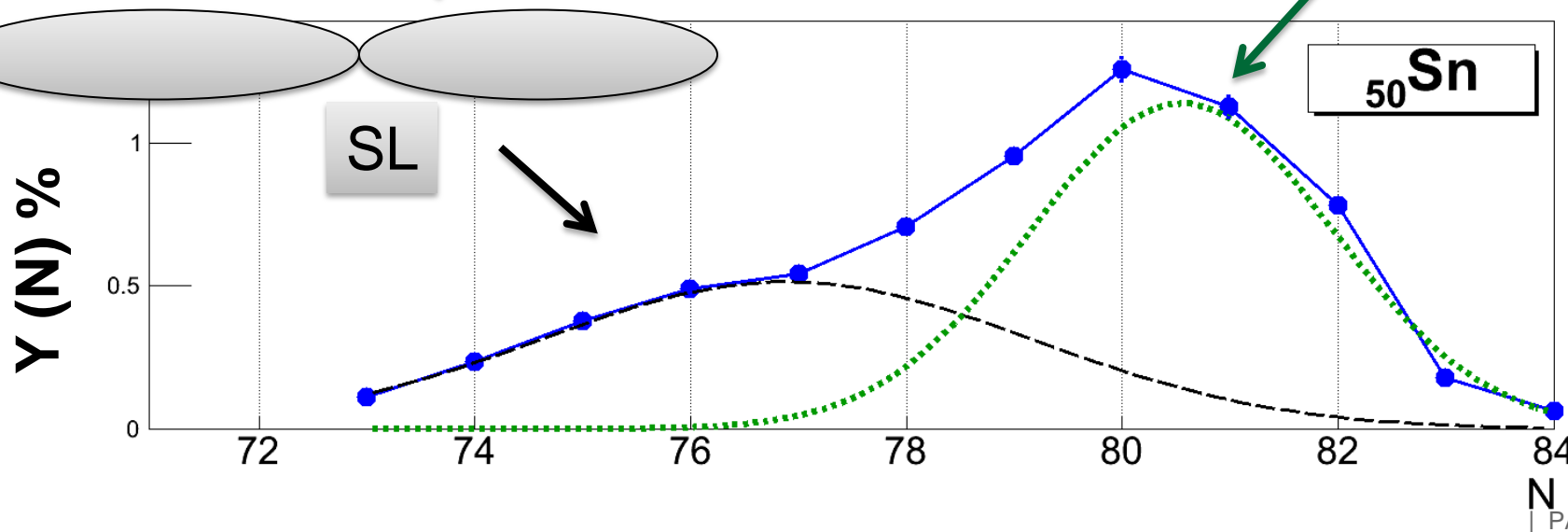
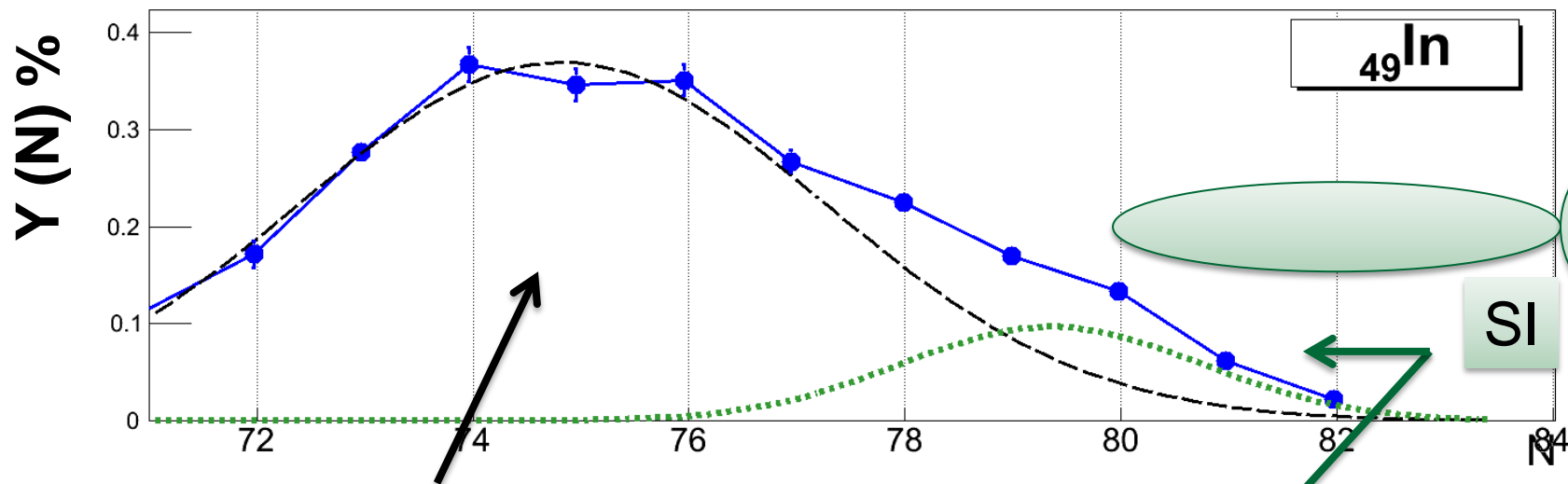


Super-Long



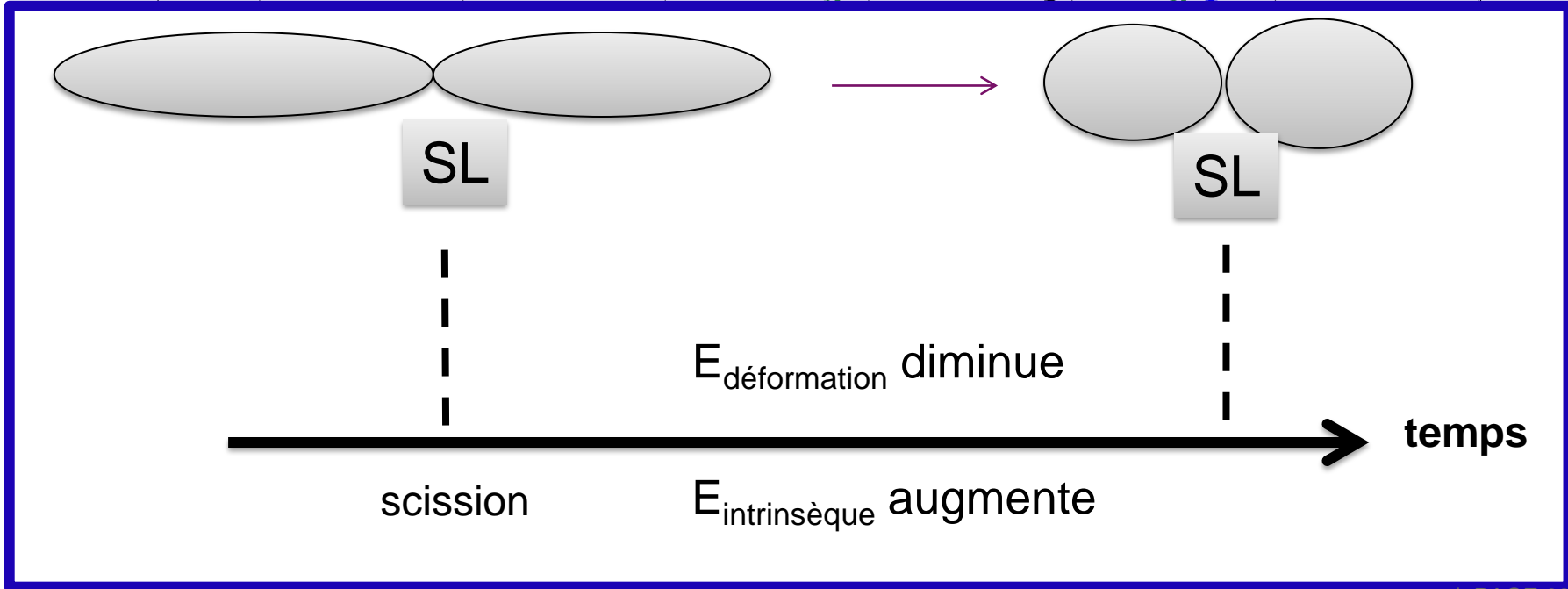
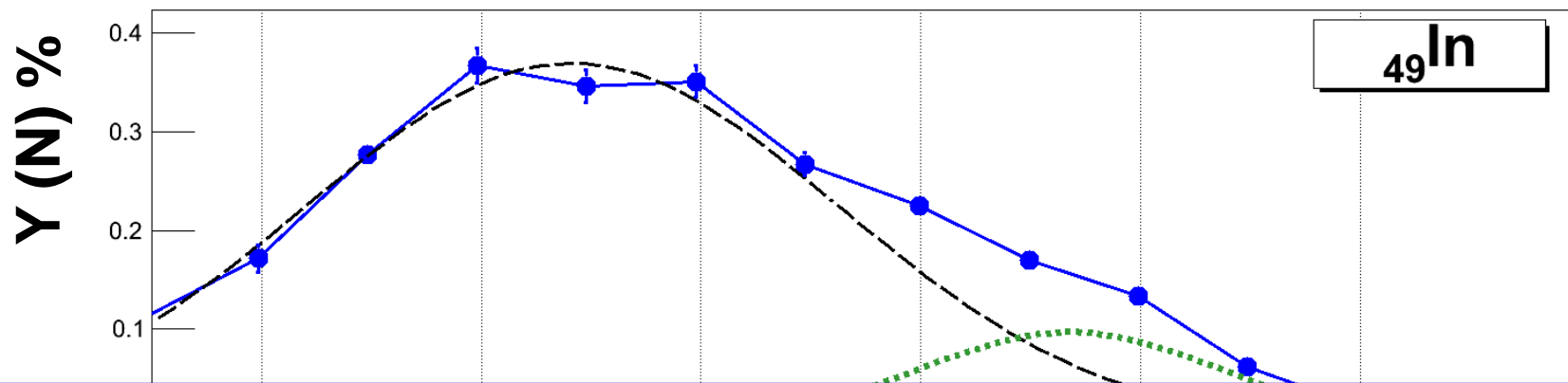
# RENDEMENTS ISOTOPIQUES ; Z = 49-50

En fonction de N ici



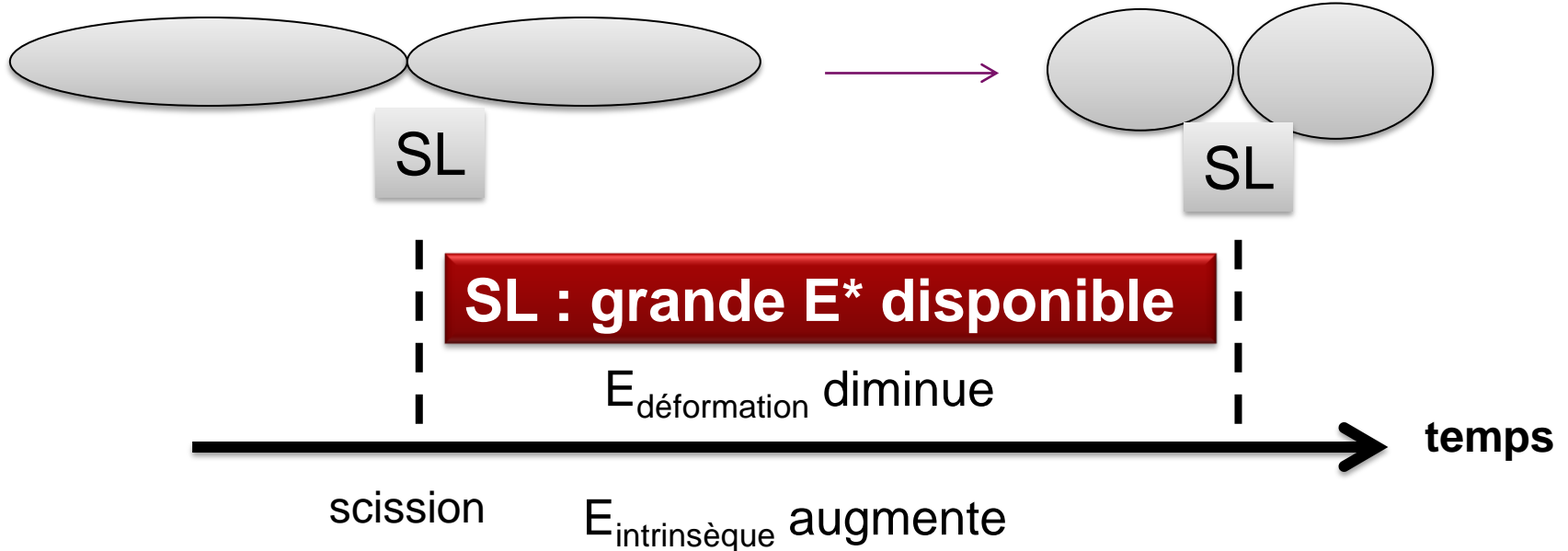
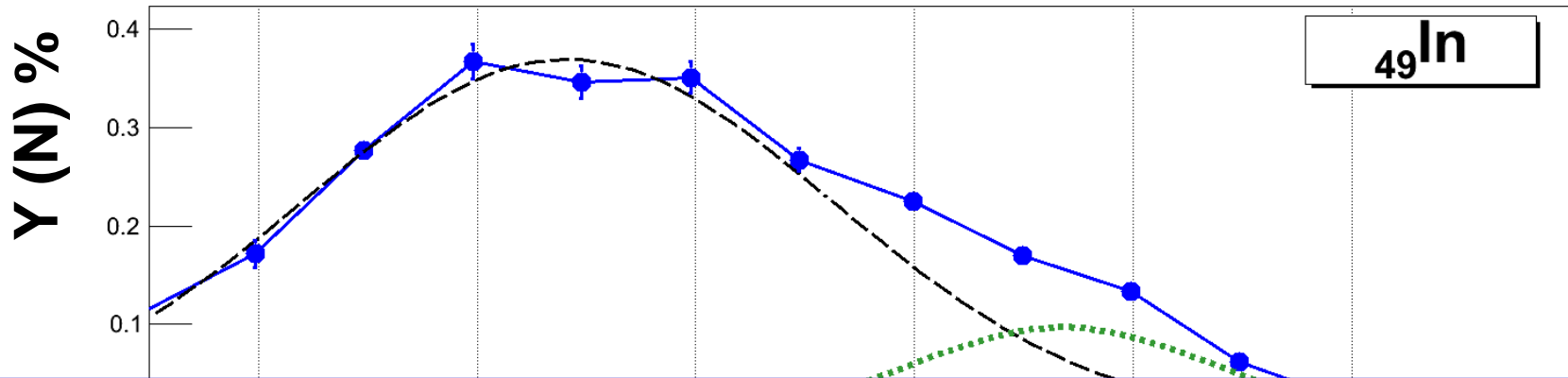
# RENDEMENTS ISOTOPIQUES ; Z = 49-50

En fonction de N ici



# RENDEMENTS ISOTOPIQUES ; Z = 49-50

En fonction de N ici

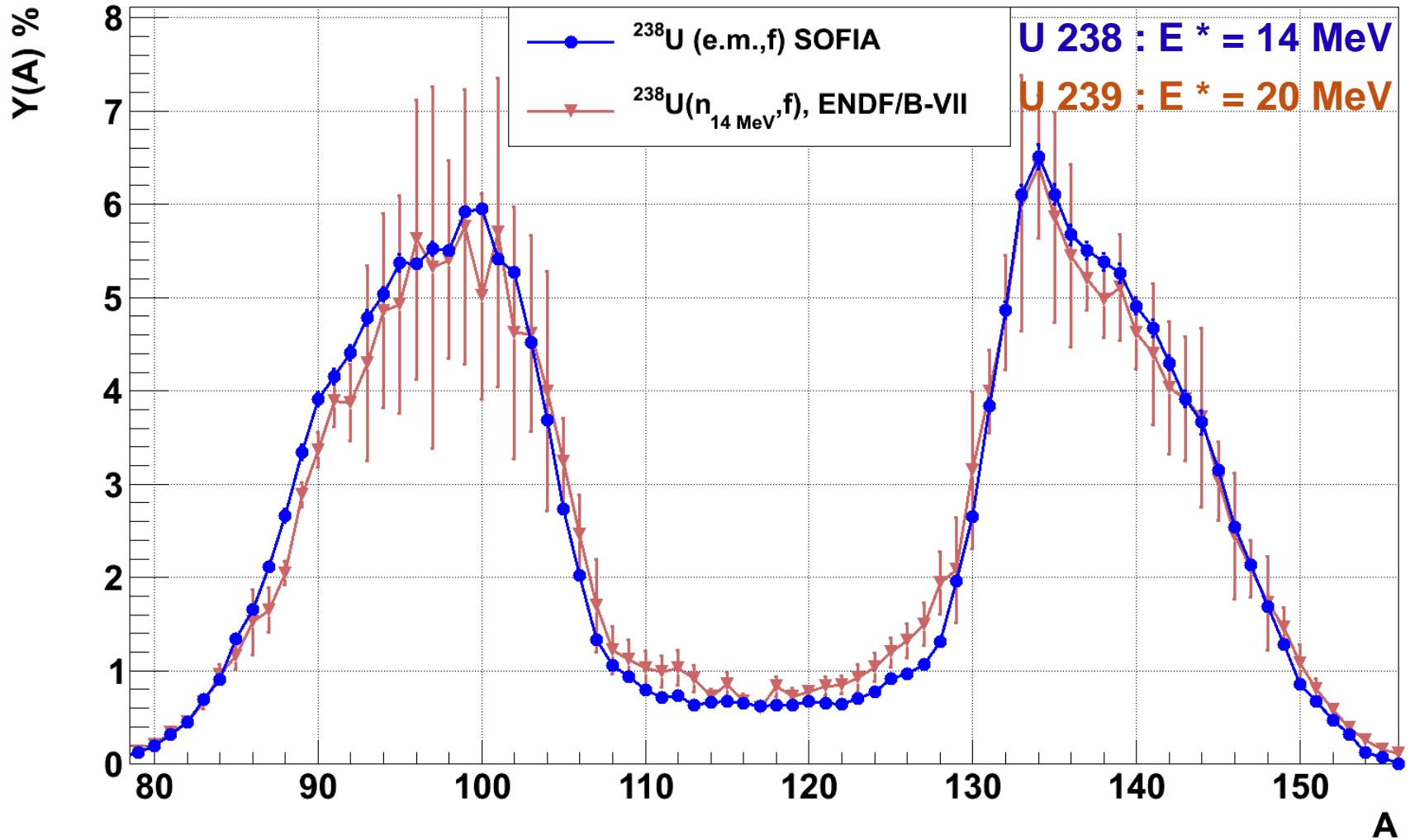


# Rendements

- 1) Charges
- 2) Isotoniques
- 3) Isotopiques
- 4) Masses**
- 5) Neutrons prompts  $\bar{\nu}$



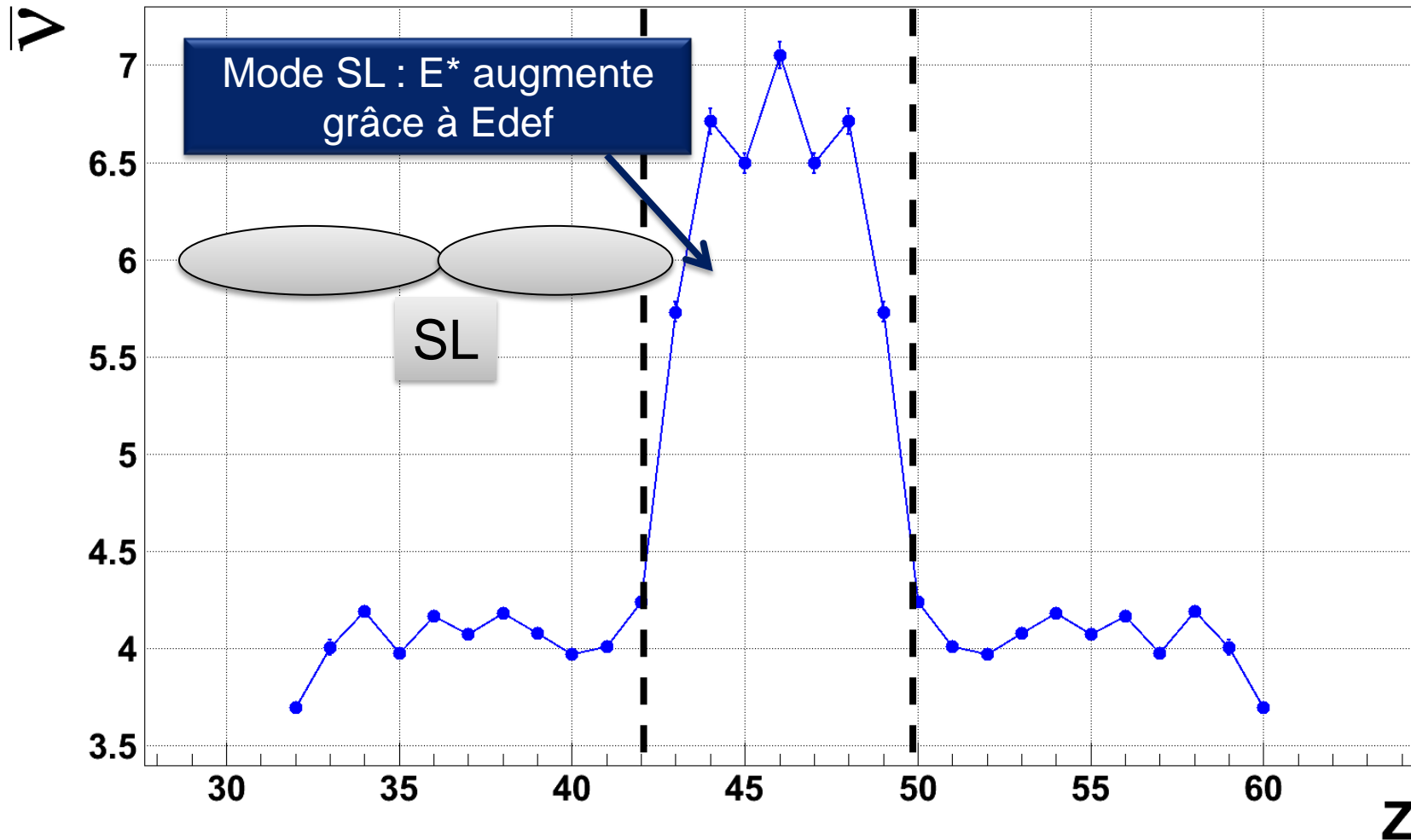
# RENDEMENTS EN MASSES



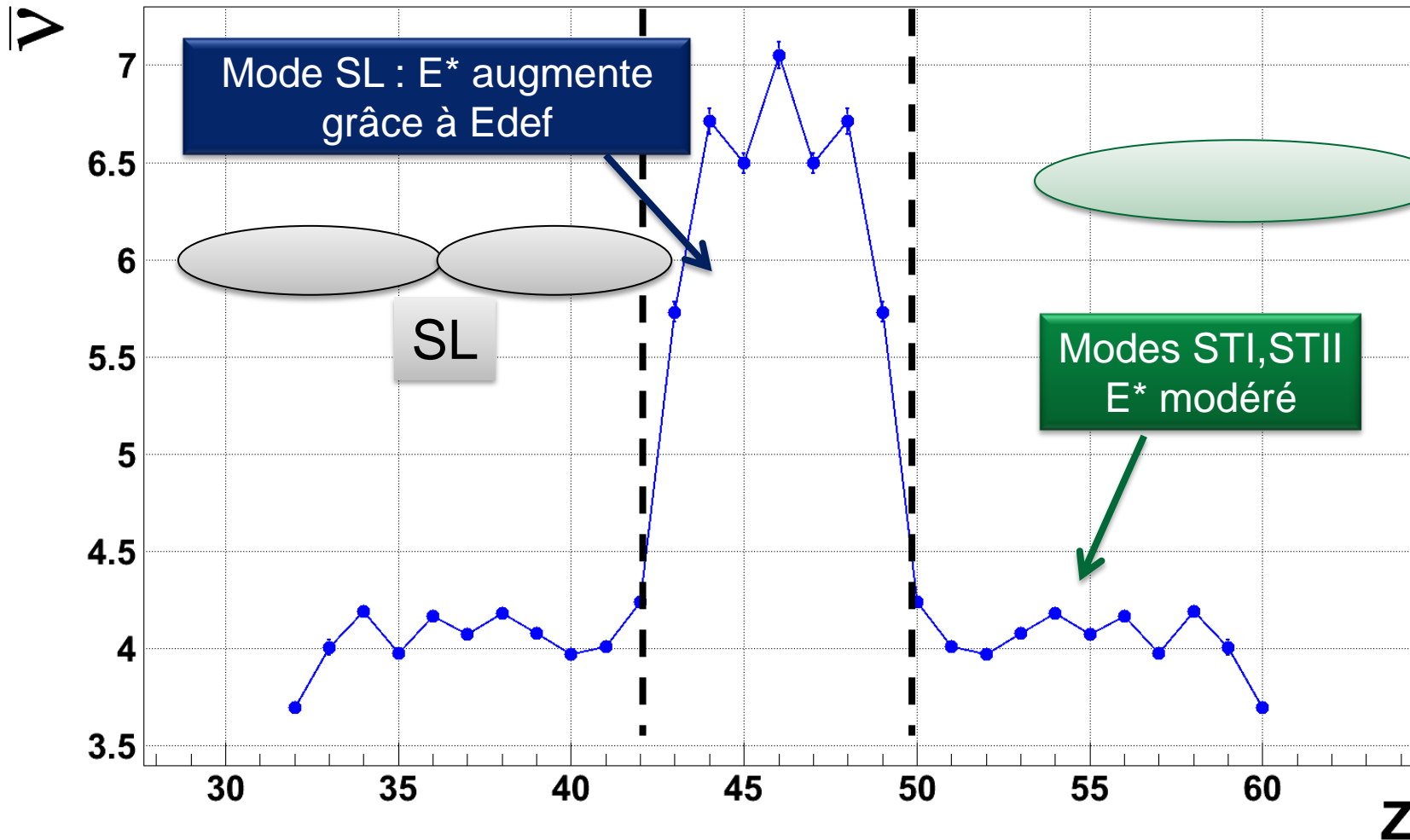
# Rendements

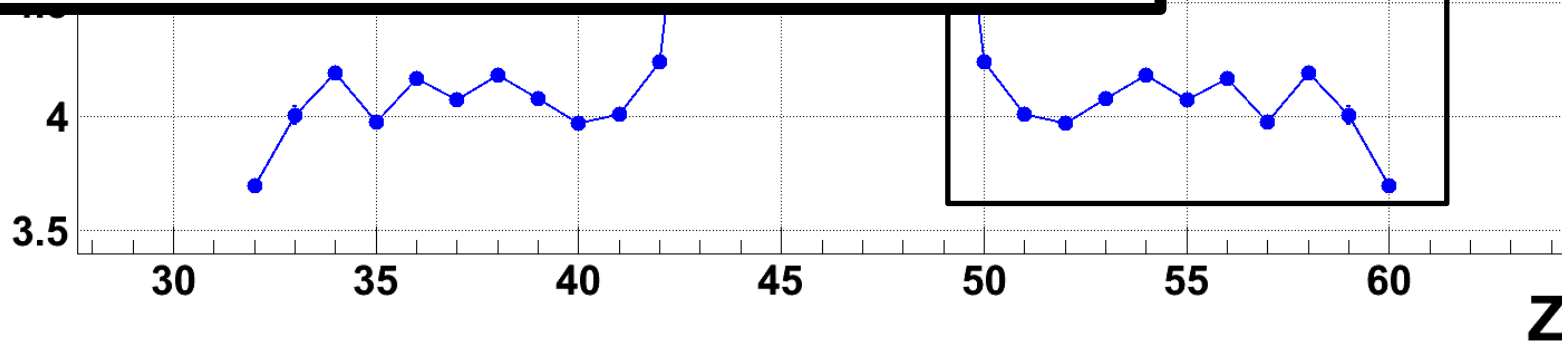
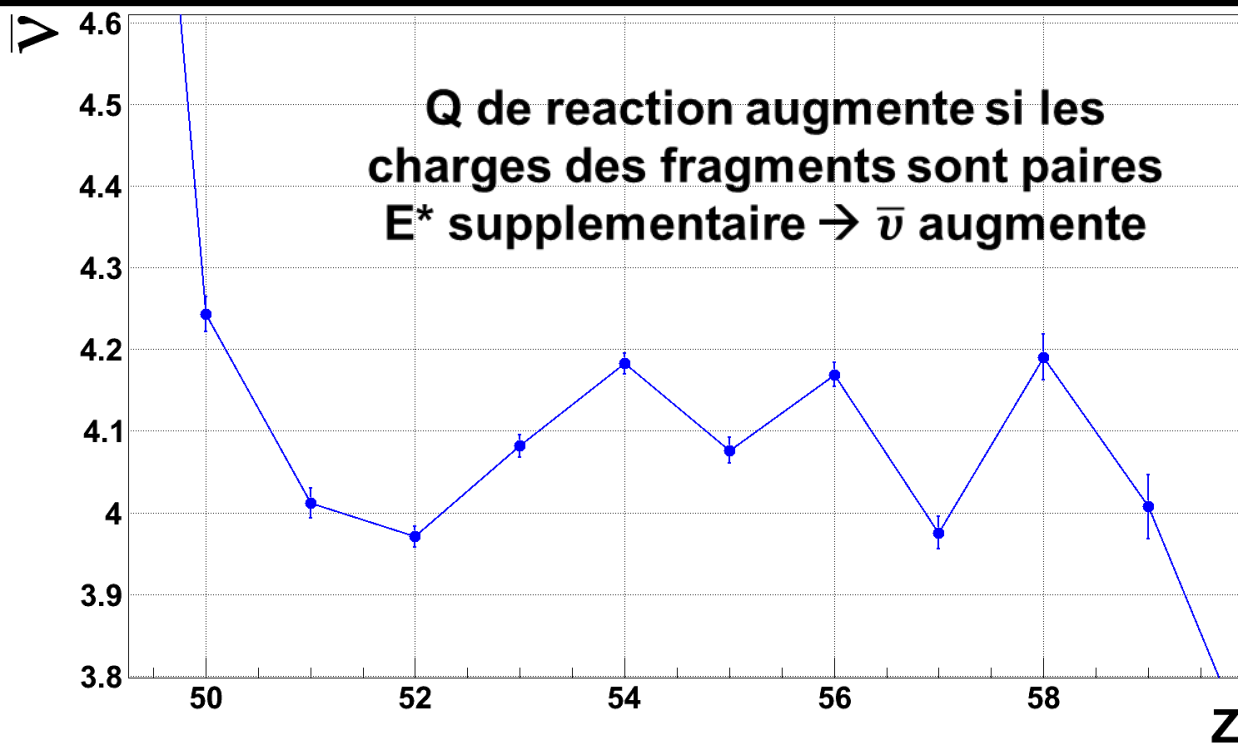
- 1) Charges
- 2) Isotoniques
- 3) Isotopiques
- 4) Masses
- 5) Neutrons prompts  $\bar{\nu}$

$$\bar{v} = 238 - (A1 + A2)$$



$$\bar{v} = 238 - (A1 + A2)$$



$\bar{\nu}$  VS Z (ZOOM)

## Objectifs de SOFIA atteints :

- Résolution en charge = 0,4 u FWHM
  - Résolution en masse = 0,8 u FWHM pour  $A = 140$
  - Incertitudes rendements isotopiques < 5 %
- 
- Permet de quantifier précisément plusieurs effets :
    - Effet pair-impair protons
    - Effet pair-impair sur le nombre de neutrons dans les FF semble constant avec  $E^*$  (dans les légers)
    - Polarisation en charge : compétition des modes SL et S1
    - Nombre de neutrons émis ( $\bar{\nu}$ ) en fonction de  $Z$
- 
- TKE reste à analyser

- $L^{238}\text{U}$  : 1 noyau sur les 80 mesurés → Intérêt aussi dans les systématiques
- SOFIA 2 en 2014

### Futur 1 : R3B

- Aimant GLAD : 4,8 T.m. (ALADIN 2,2 T.m.)
- CALIFA : Mesure des gammas
- NEULAND : Mesure des neutrons (par fragment ?)
- Répartition de l'énergie dans la fission

### Futur 2 : FELISE @ FAIR

- Fission at ELISE : excitation électromagnétique par des  $e^-$  :  $E^*$  mesurée



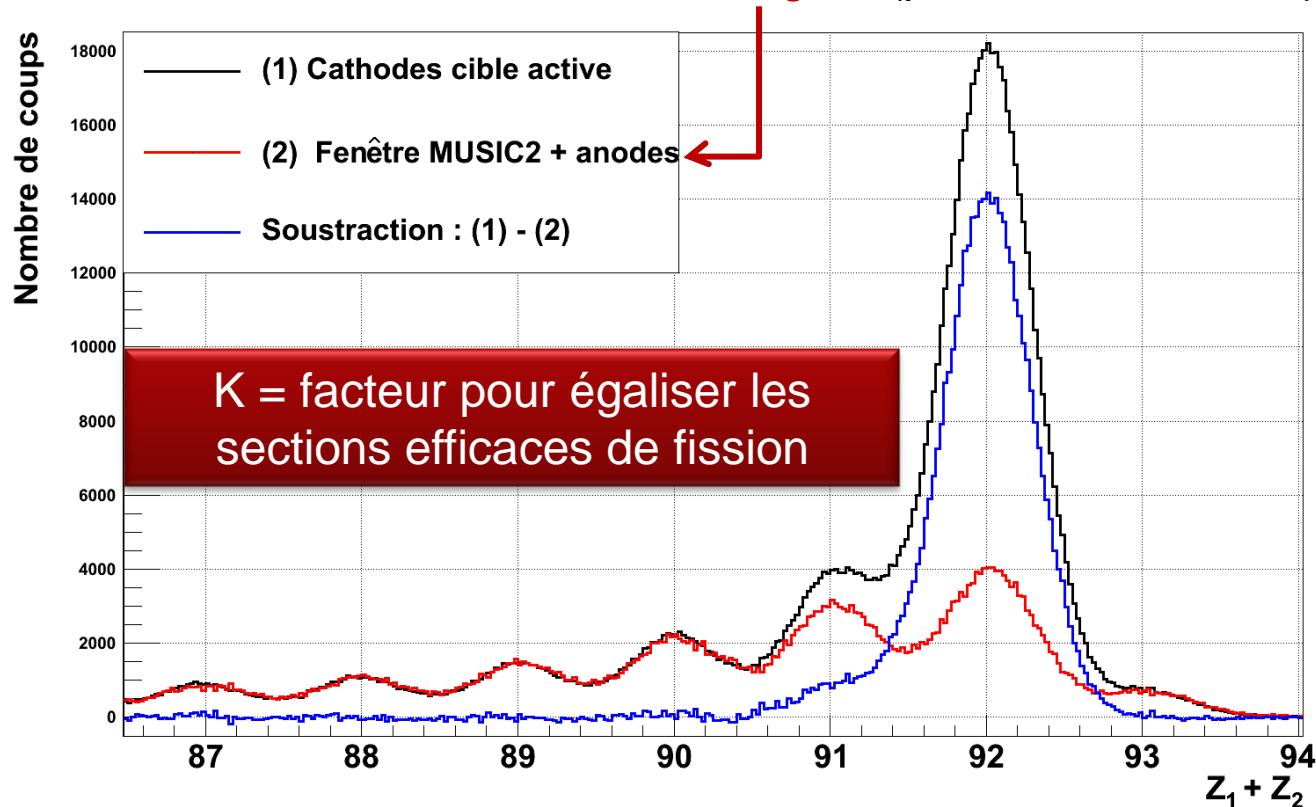


Merci de votre attention

# SOUSTRACTION DE LA COMPOSANTE RÉSIDUELLE

La Sélection  $Z_1+Z_2 = 92$  : n'élimine que les fissions de haute énergie ou des **PROTONS** sont enlevés

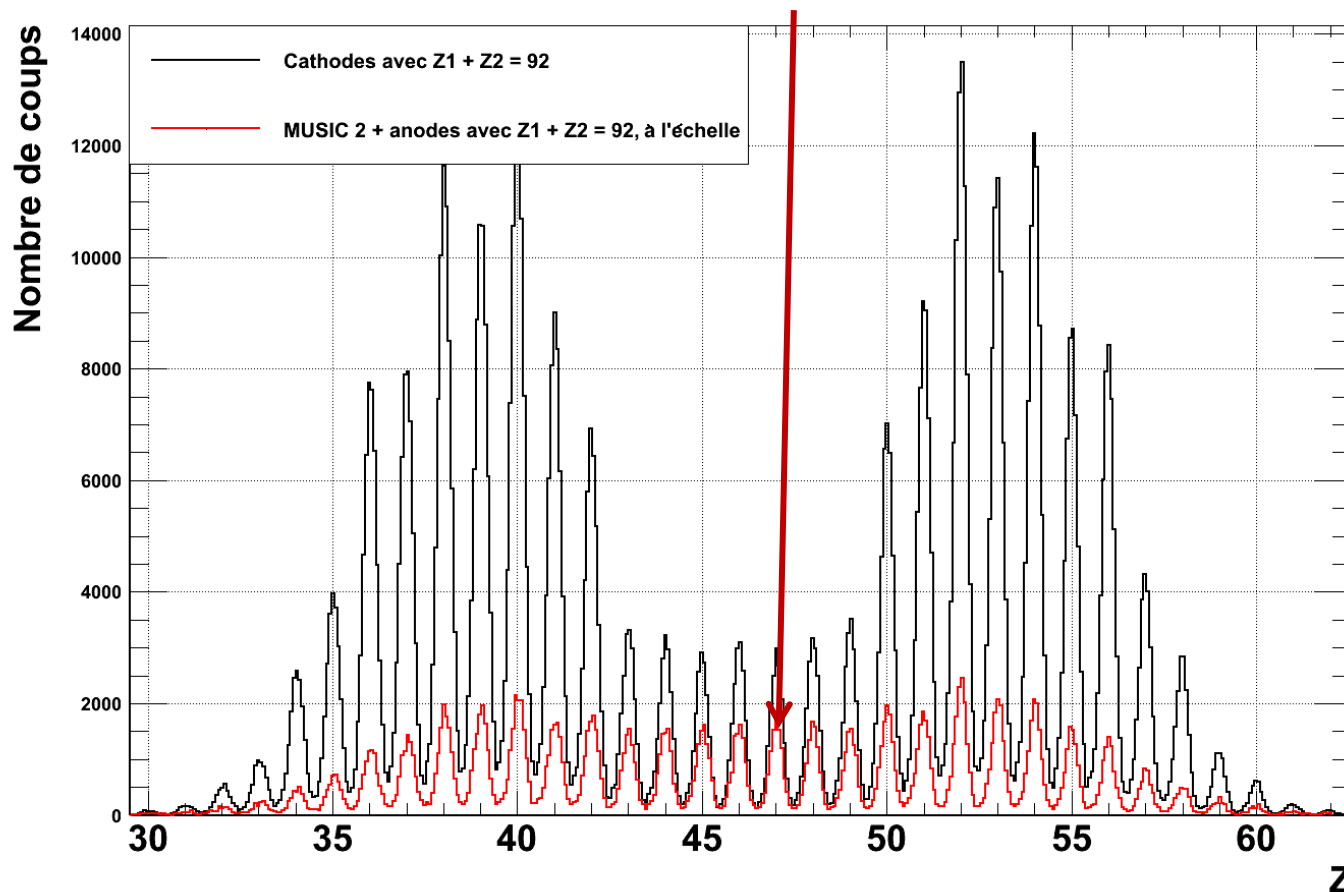
Suppression de la composante ou seuls des **NEUTRONS** sont enlevés ? →  
Utilisation des fissions dans les matériaux légers (pas de fission e.m.)



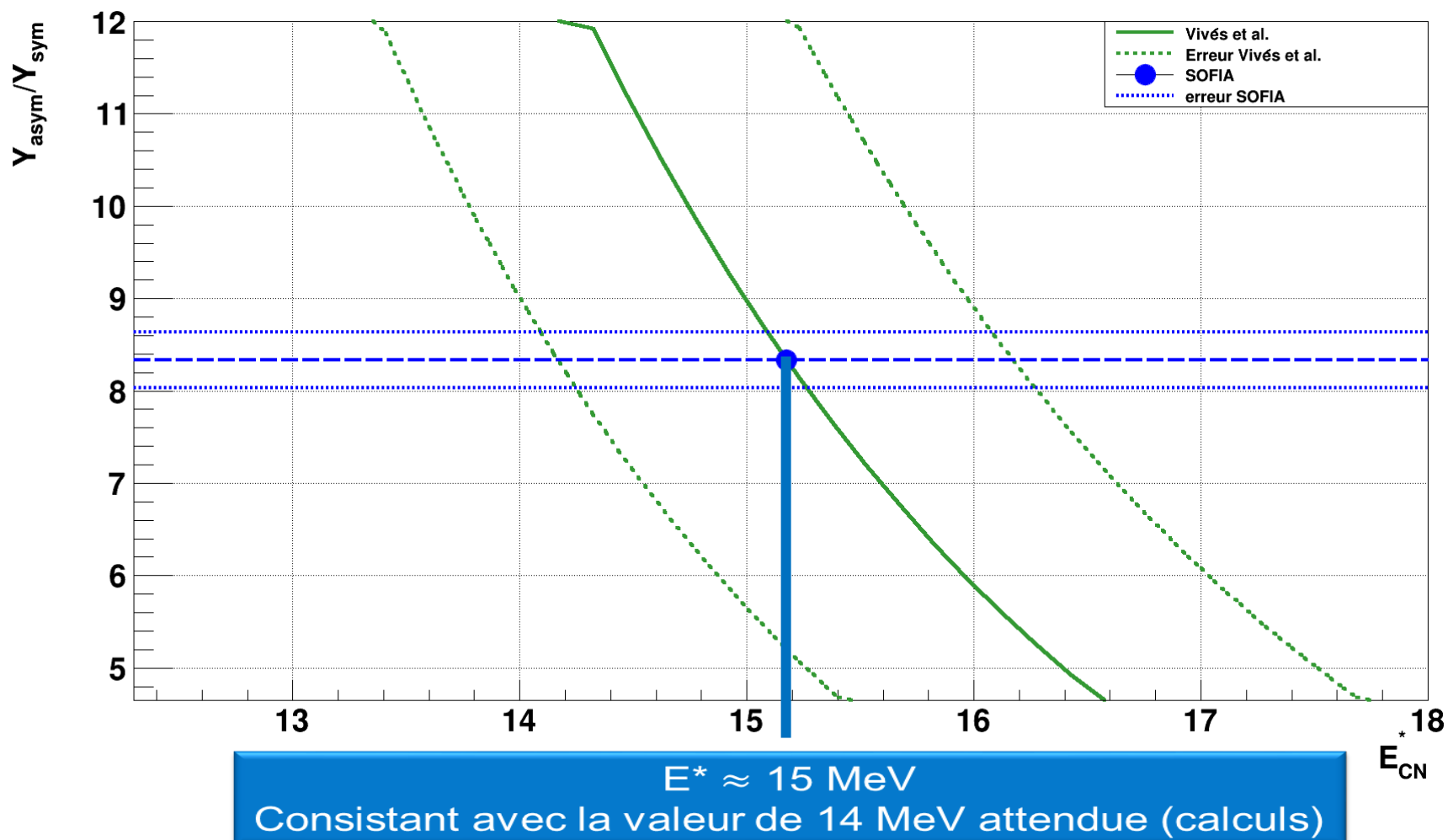
# SOUSTRACTION DE LA COMPOSANTE RÉSIDUELLE

La Sélection  $Z1+Z2 = 92$  : n'élimine que les fissions de haute énergie où des **PROTONS** sont enlevés

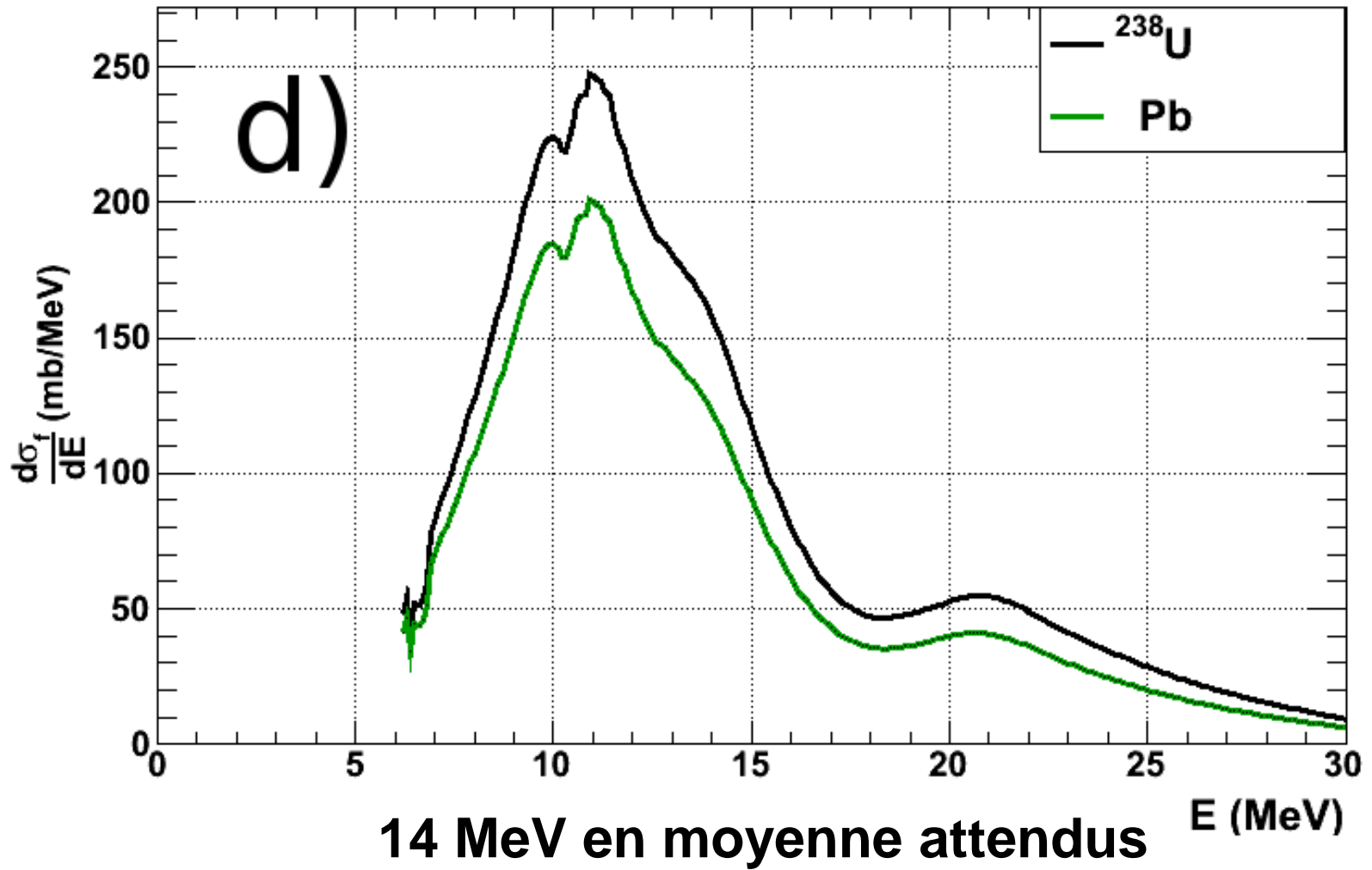
Suppression de la composante où seuls des **NEUTRONS** sont enlevés ? → Utilisation des fissions dans les matériaux légers (fissions nucléaires uniquement)

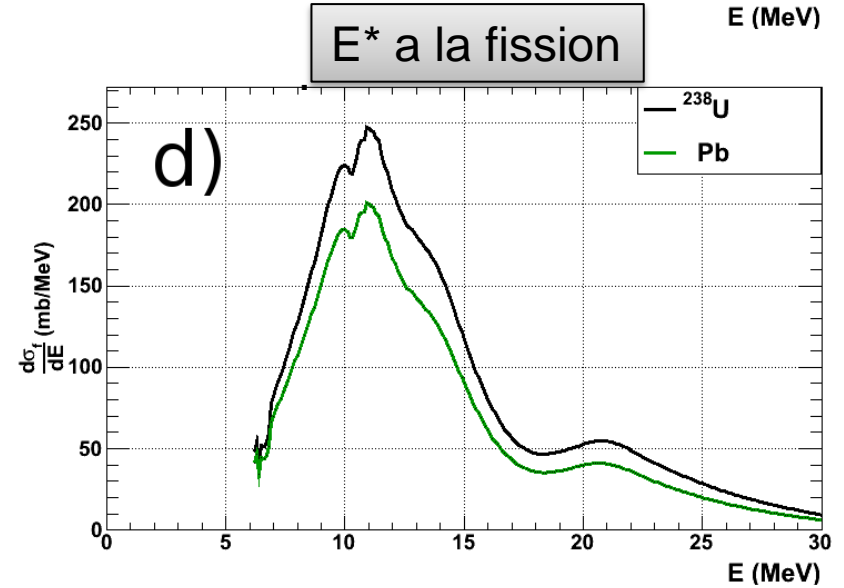
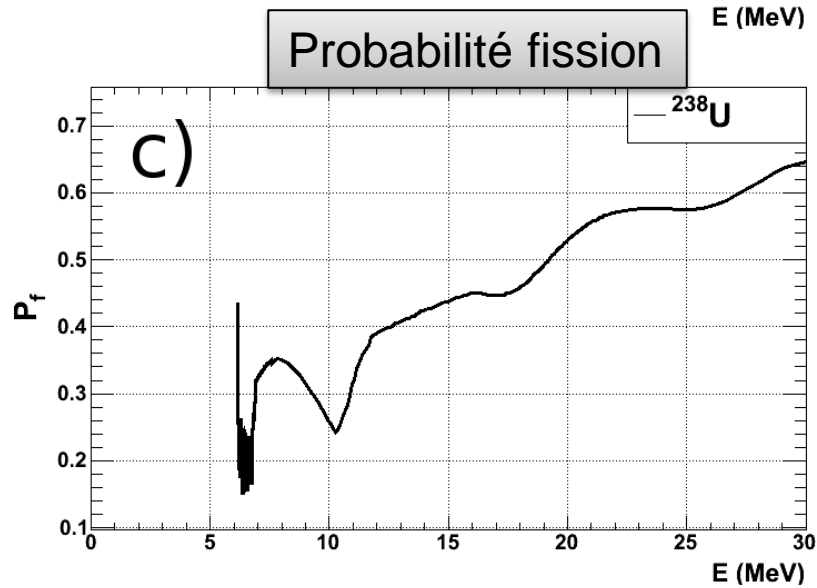
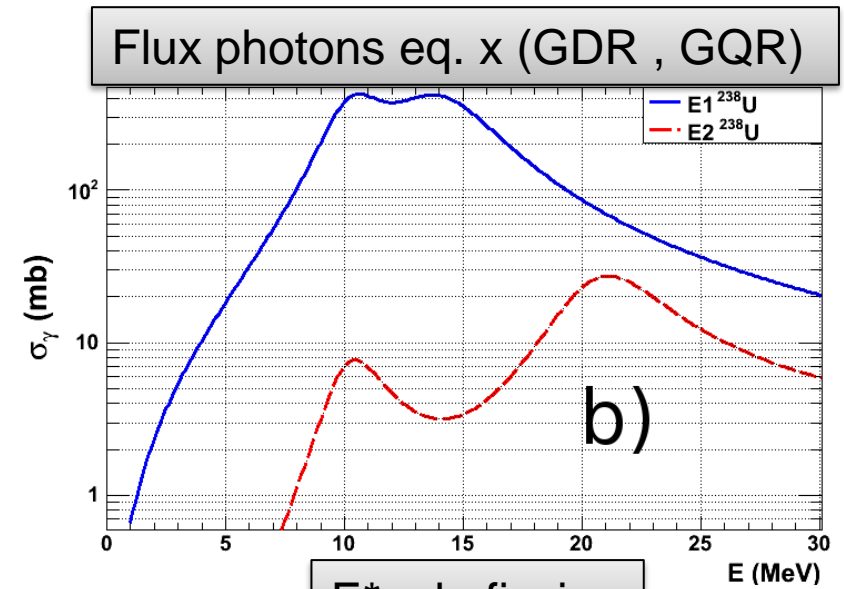
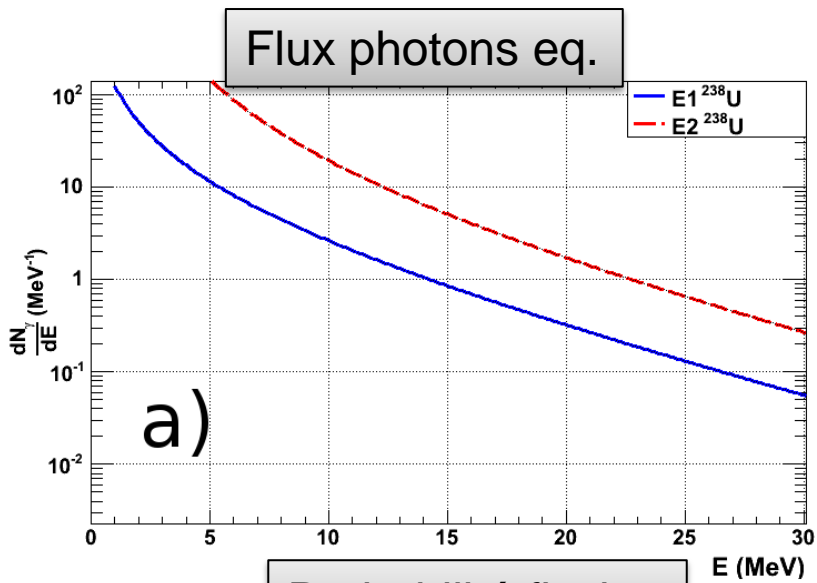


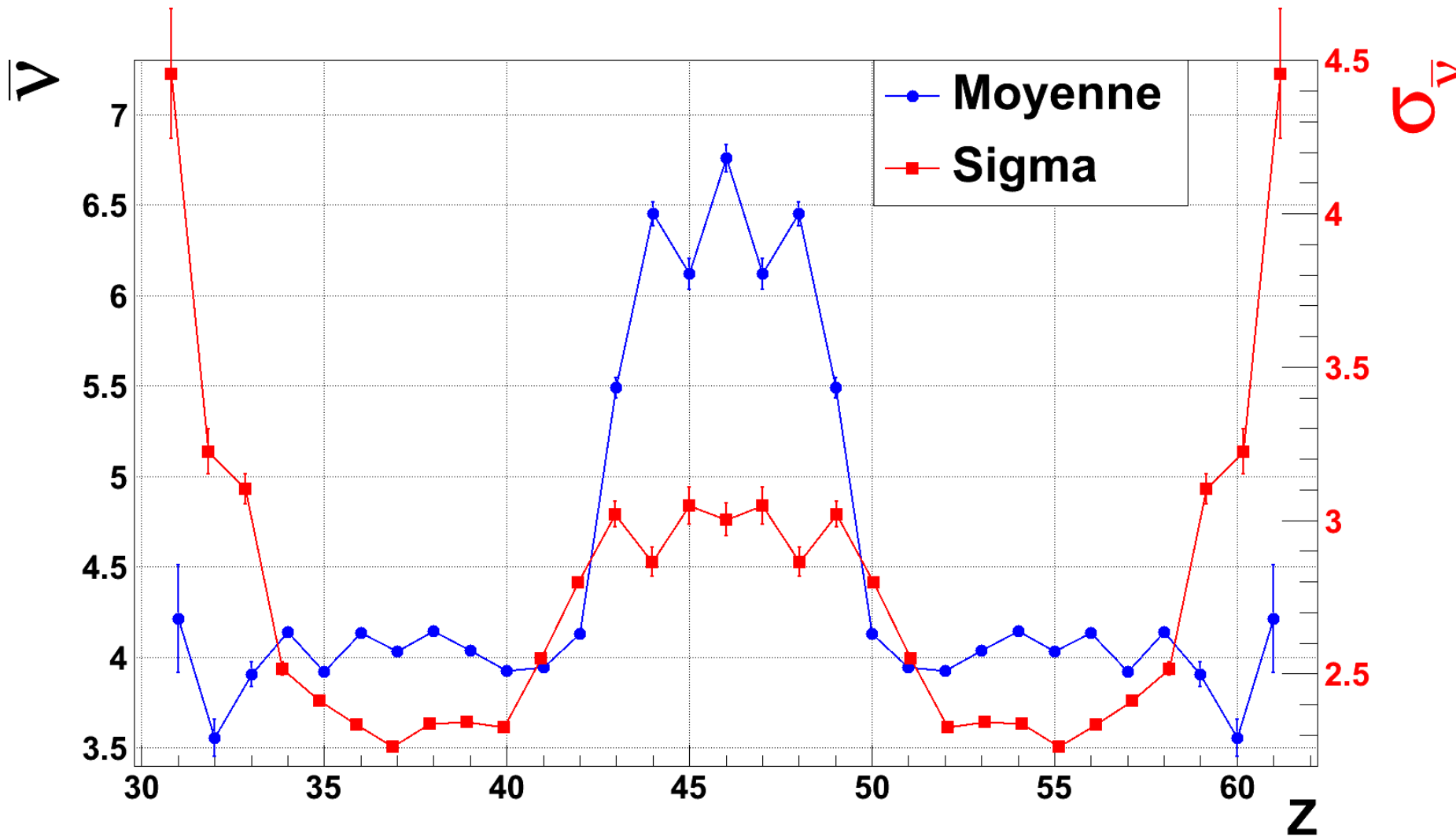
# MASSES - PIC/VALLÉE VS $E^*$



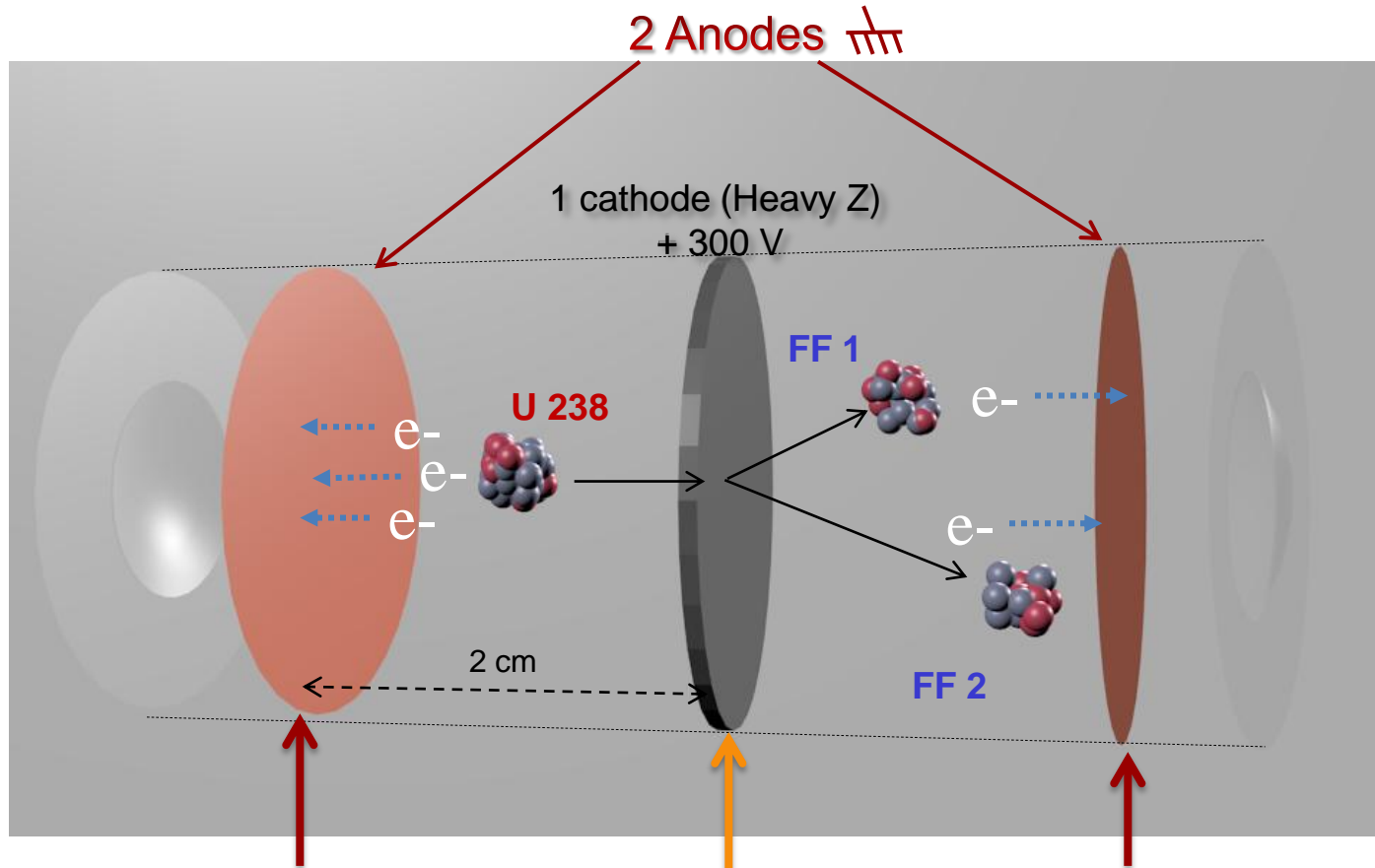
# SPECTRE D'EXCITATION À LA FISSION







# ACTIVE TARGET



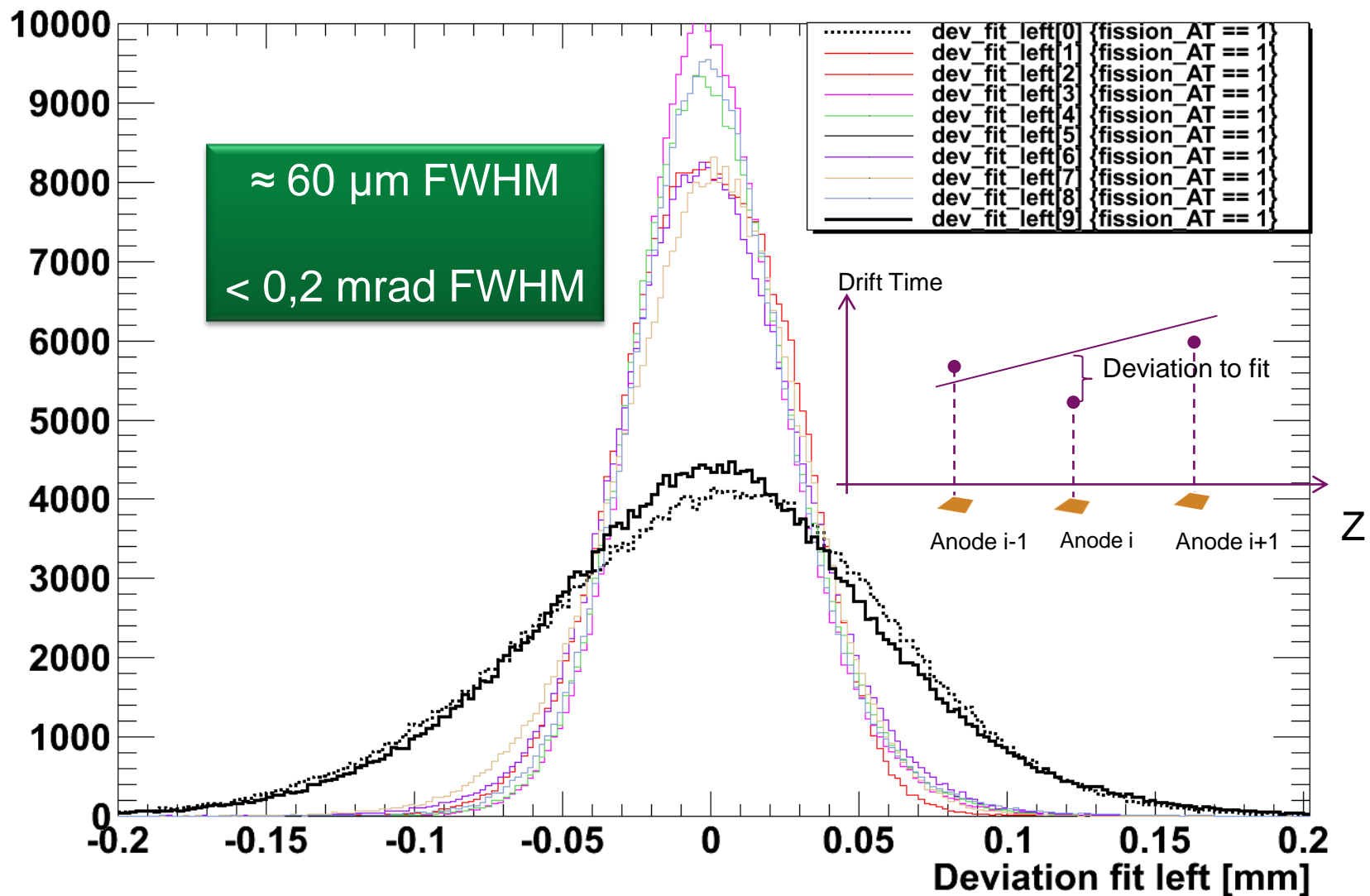
$$A1 \propto Z^2$$

Coulomb excitation  
(photon exchange)

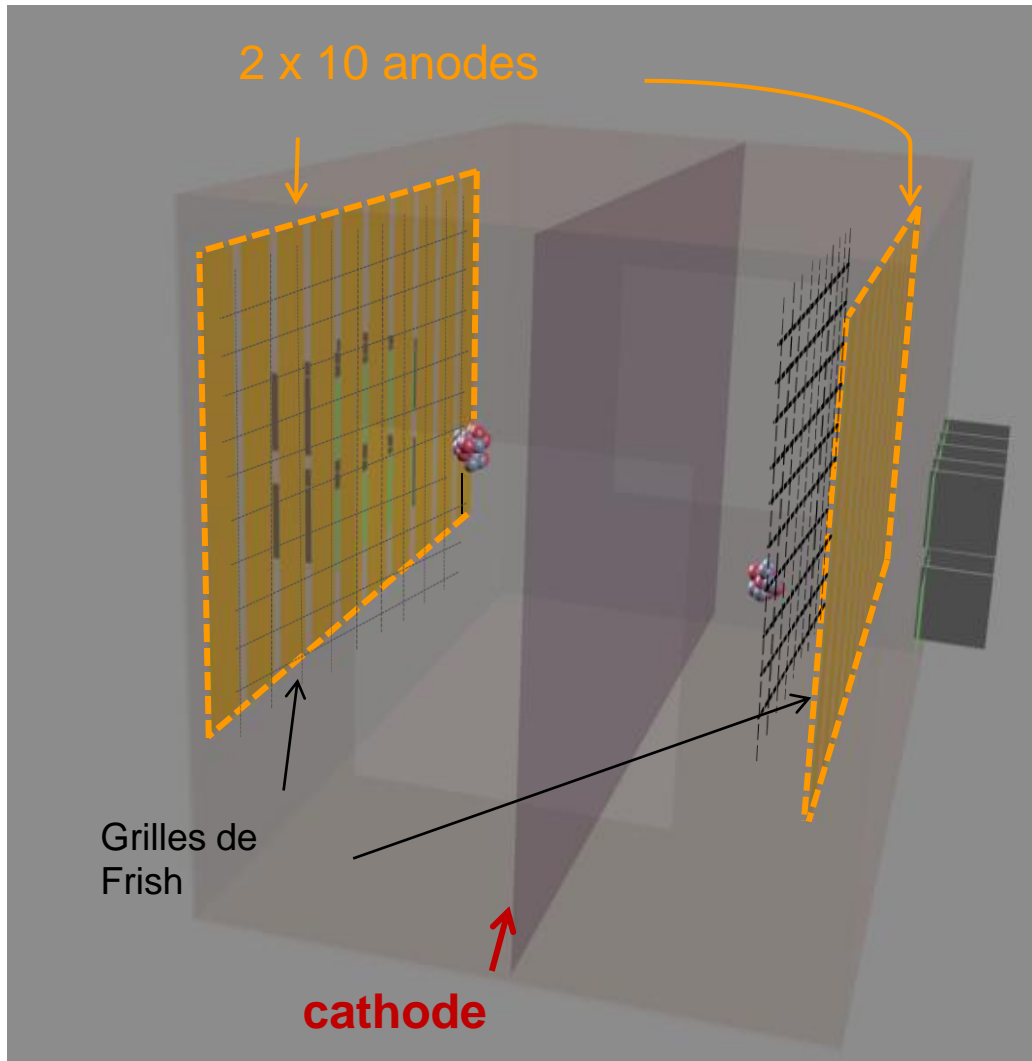
$$A2 \propto 2 * \left(\frac{Z}{2}\right)^2 = \frac{Z^2}{2}$$



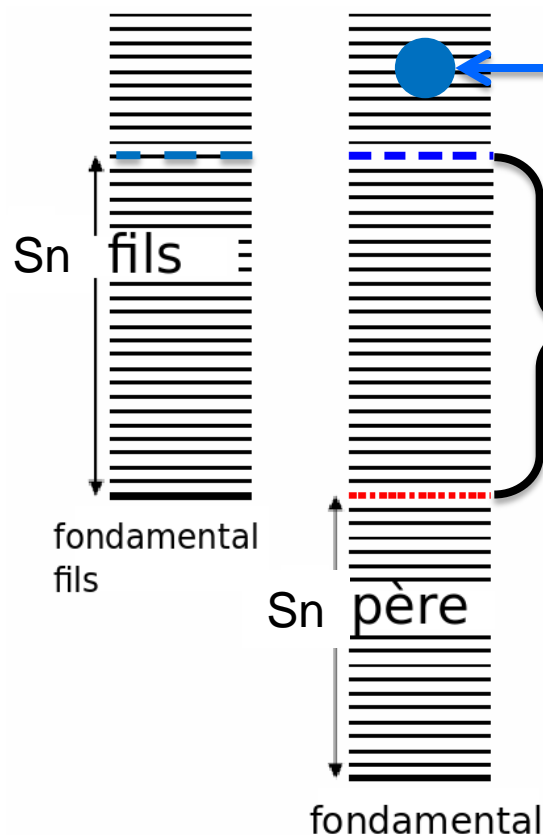
# MUSIC : ANGLE RESOLUTION



# MUSIC : MULTI-SAMPLE IONISATION CHAMBER



**Appariement neutron indep. de  $E^*$  dans les légers**



Amplitude  $S_n$  fils détermine s'il s'agit de la dernière étape d'évaporation

$S_n$  (pair) >  $S_n$  (impair) → N pair privilégiés. Ne dépend pas de  $E^*_{CN}$

*Complex nuclear-structure phenomena revealed from the nuclide production in fragmentation reactions M. V Ricciardi et al. Nucl. Phys. A 733 (2004) 299-318*

$$\nu = 238 - (A1 + A2)$$

