



# Suivi du pic de Bragg par détection des particules secondaires émises par la fragmentation du $^{12}\text{C}$

---

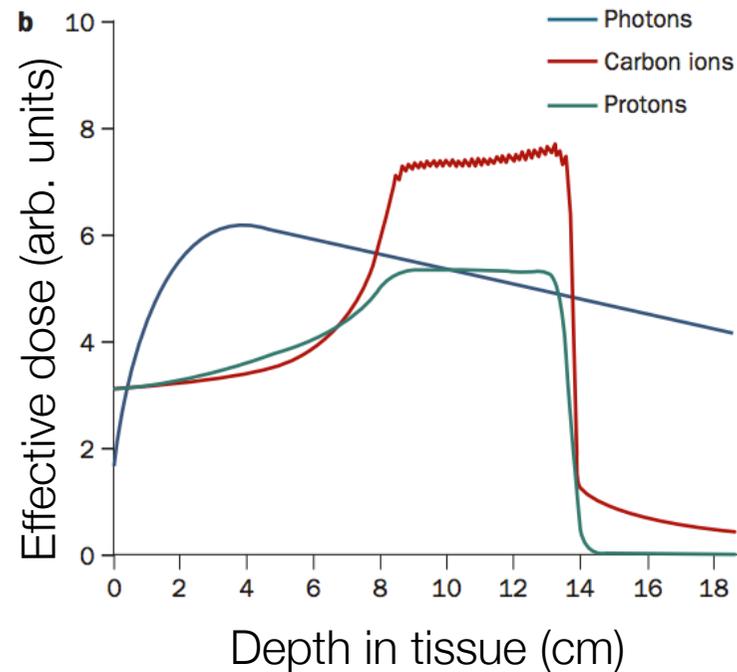
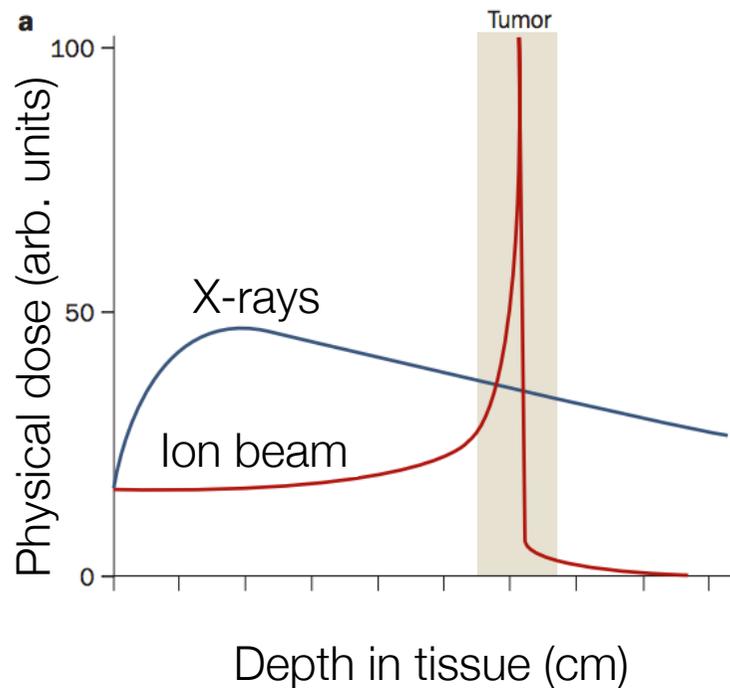
Marie VANSTALLE

*GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, DARMSTADT  
Biophysics department*

# Plan de présentation

1. Contexte - la thérapie par ions légers
2. Dispositif expérimental
3. Simulations Monte Carlo
4. Etalonnage en énergie du BaF<sub>2</sub> ( $\gamma$ )
5. Résultats préliminaires pour les  $\gamma$  prompts
6. Conclusion/Perspectives

# La hadronthérapie



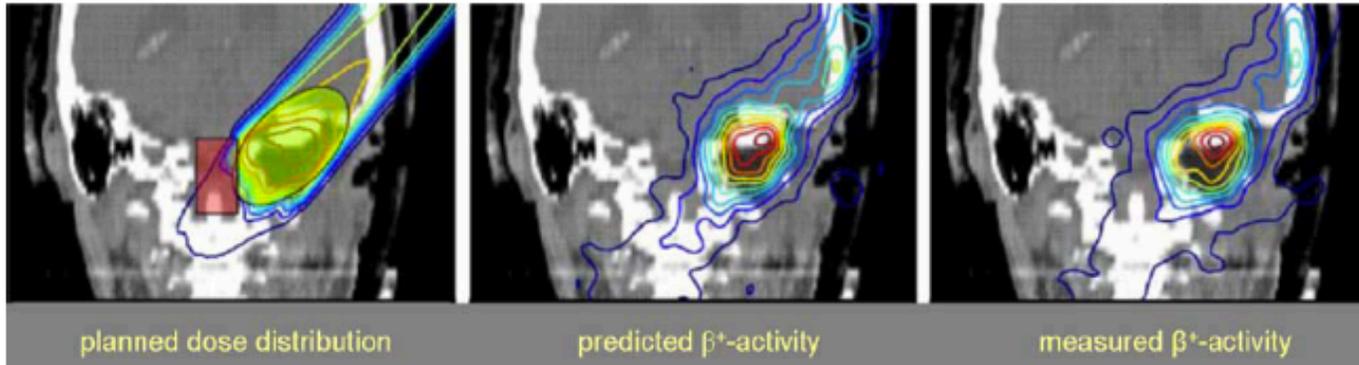
[1] **Durante et al.**, *Charged particles in radiation oncology*  
Nature reviews - clinical oncology, 2010

## Hadronthérapie :

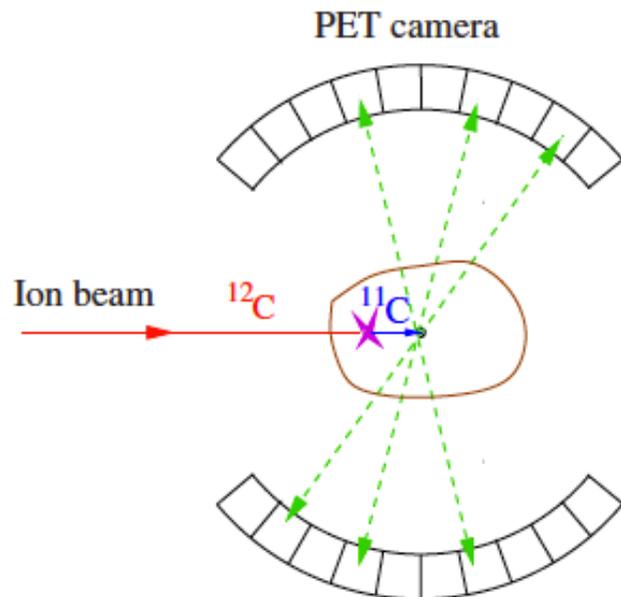
- protonthérapie
- thérapie par ions légers type  $^{12}\text{C}$

Avantage : profil du dépôt d'énergie (**pic de Bragg PB**)

# Suivi du volume irradié



[2] **Schardt et al.**, *Heavy-ion tumor therapy: Physical and radiobiological benefits*  
Review of Modern Physics, 2010

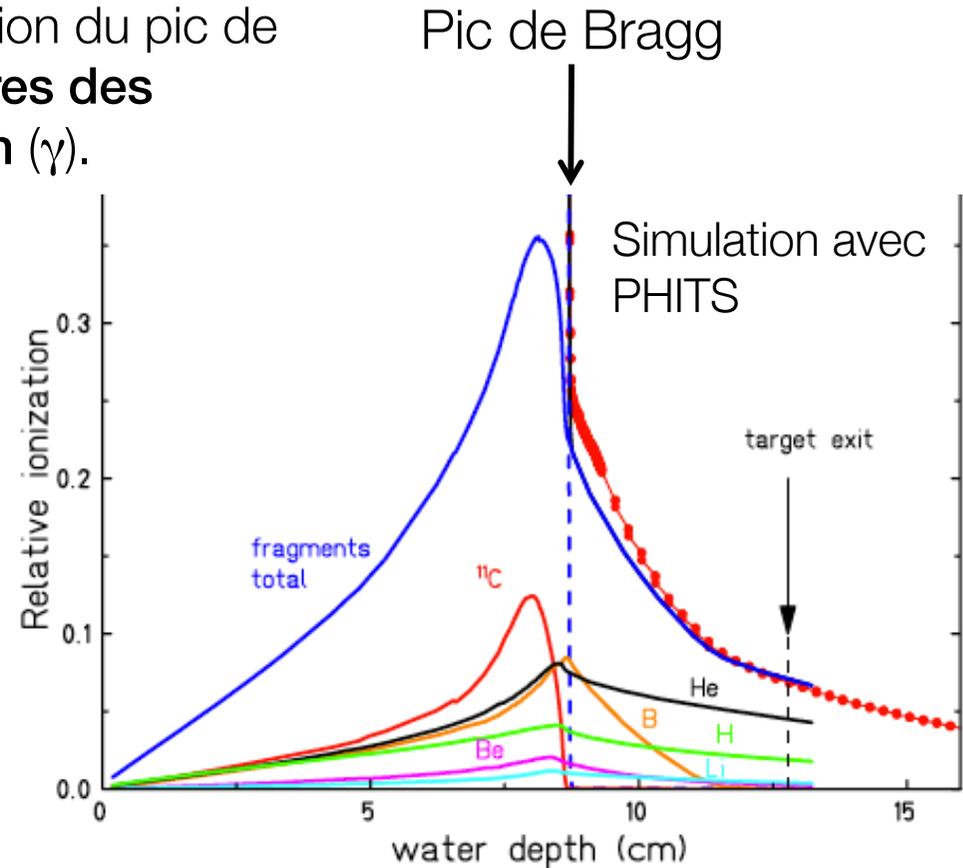
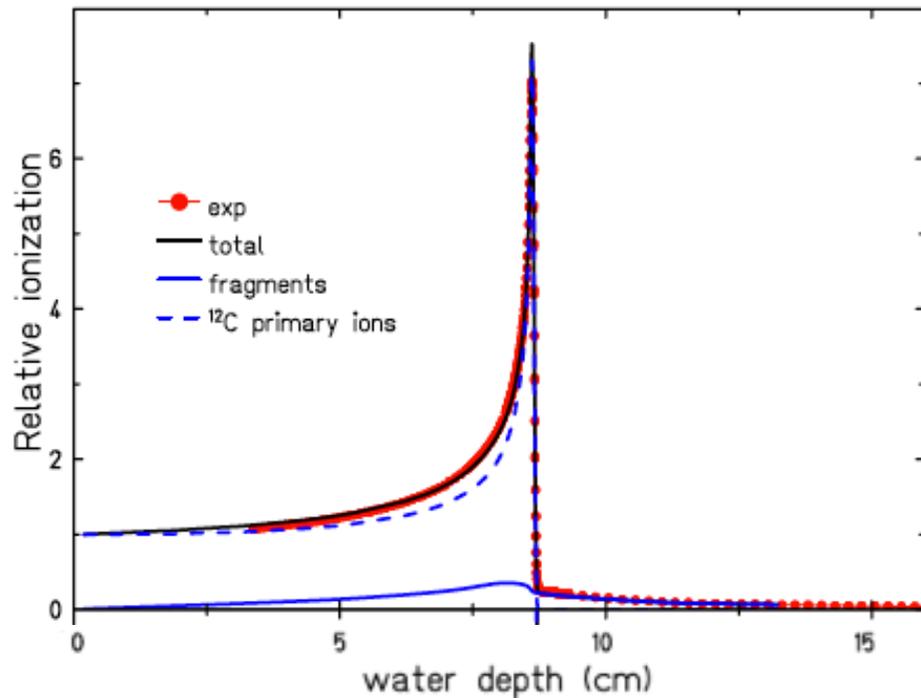


Actuellement : suivi du PB par méthode TEP (Tomographie à Emission de Positrons), par décroissance du  $^{11}\text{C}$  produit.

Inconvénient :  $\neq$  méthode en temps réel (*online*)

# La fragmentation, une alternative ?

Alternative à la méthode TEP => localisation du pic de Bragg **par reconstruction des trajectoires des fragments** (protons) ou **profil d'émission ( $\gamma$ )**.



[3] **Gunzert-Marx et al.**, *Secondary beam fragments produced by 200 MeV/u  $^{12}\text{C}$  ions in water and their dose contributions in carbon ion radiotherapy*  
New Journal of Physics, 2008

# Plan de présentation

1. Contexte - la thérapie par ions légers
2. Dispositif expérimental
3. Simulations Monte Carlo
4. Etalonnage en énergie du BaF<sub>2</sub> ( $\gamma$ )
5. Résultats préliminaires pour les  $\gamma$  prompts
6. Conclusion/Perspectives

# Dispositif expérimental

Faisceau :  $^{12}\text{C}$ , 220 MeV/u  
Cible : PMMA,  $5 \times 5 \times 20 \text{ cm}^3$

Beam

Collaboration entre 3 instituts :  
- GSI  
- IPHC, Strasbourg  
- Université «La Sapienza», Rome

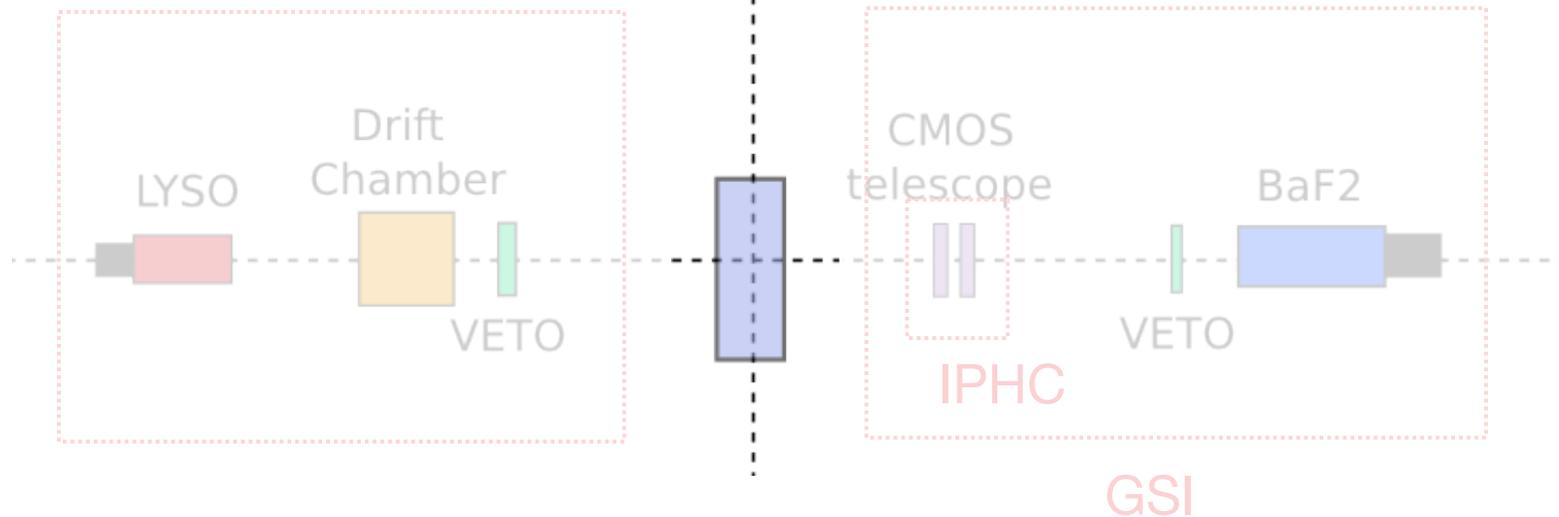


Start 1



Start 2

Université «La Sapienza»  
(Rome)

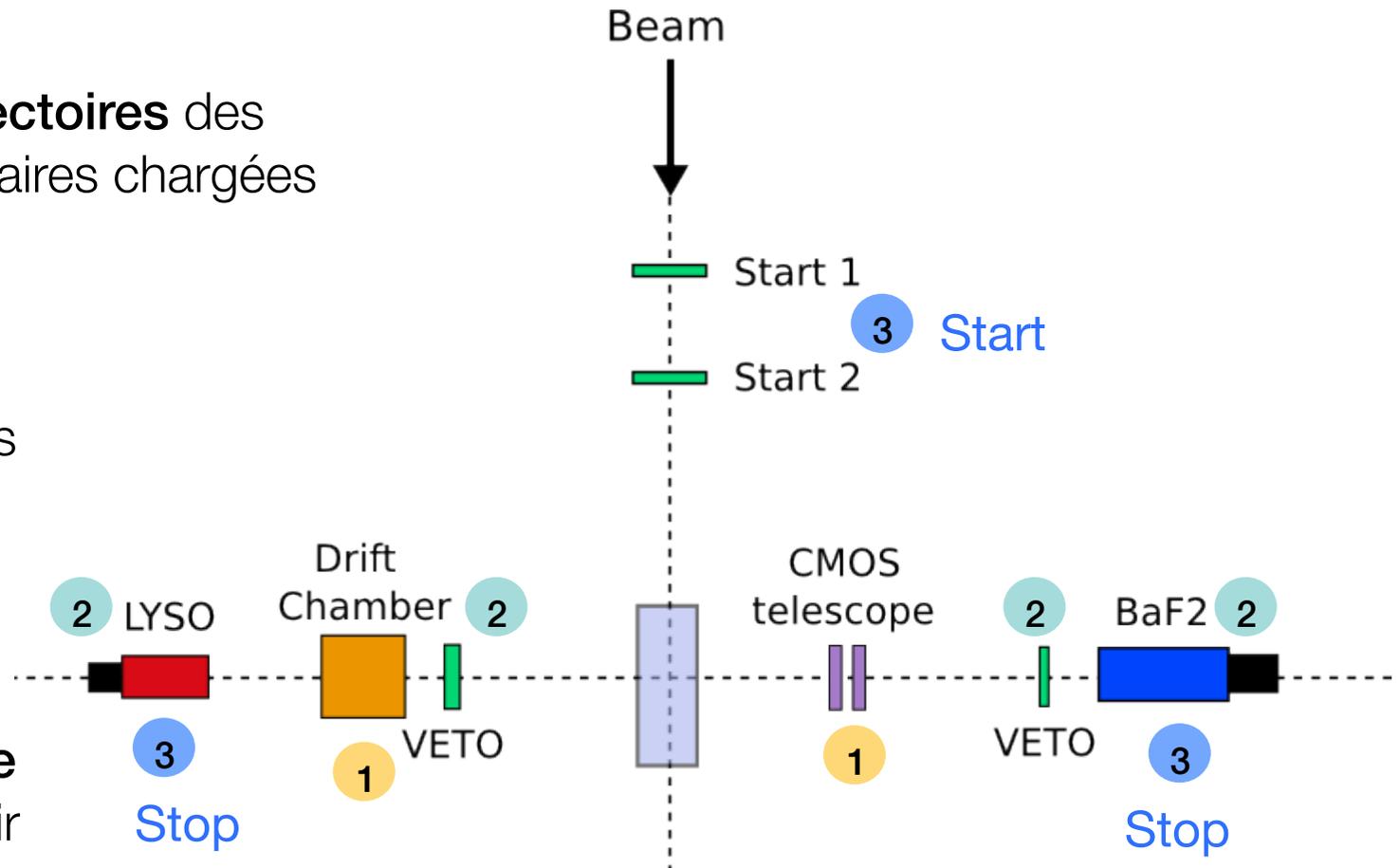


# Mesures effectuées

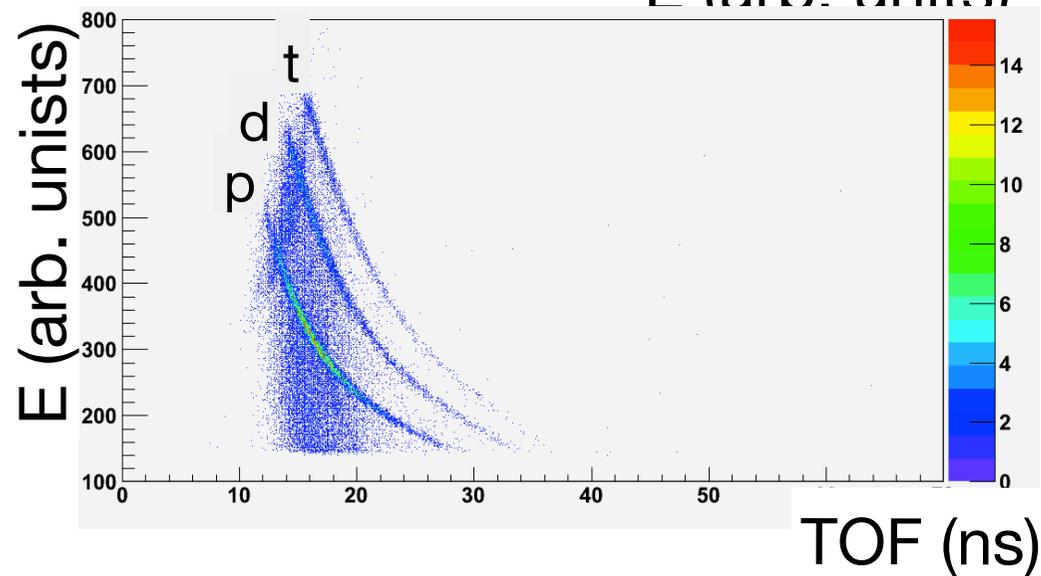
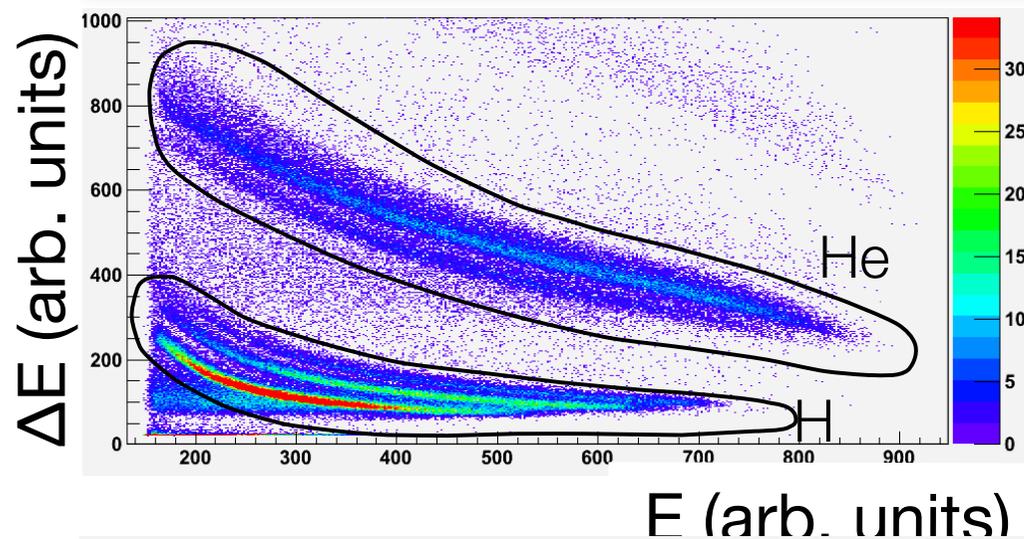
1 Mesures des **trajectoires** des particules secondaires chargées (protons,...)

2 **Identification** des particules par télescopes  $\Delta E$ -E

3 **Energie cinétique** déterminée à partir du temps de vol



# Un exemple



Courtesy of M. Rovituso

$\Delta E$ - $E$  et temps de vol  
(Time-Of-Flight=TOF)

→ 1 bande

=

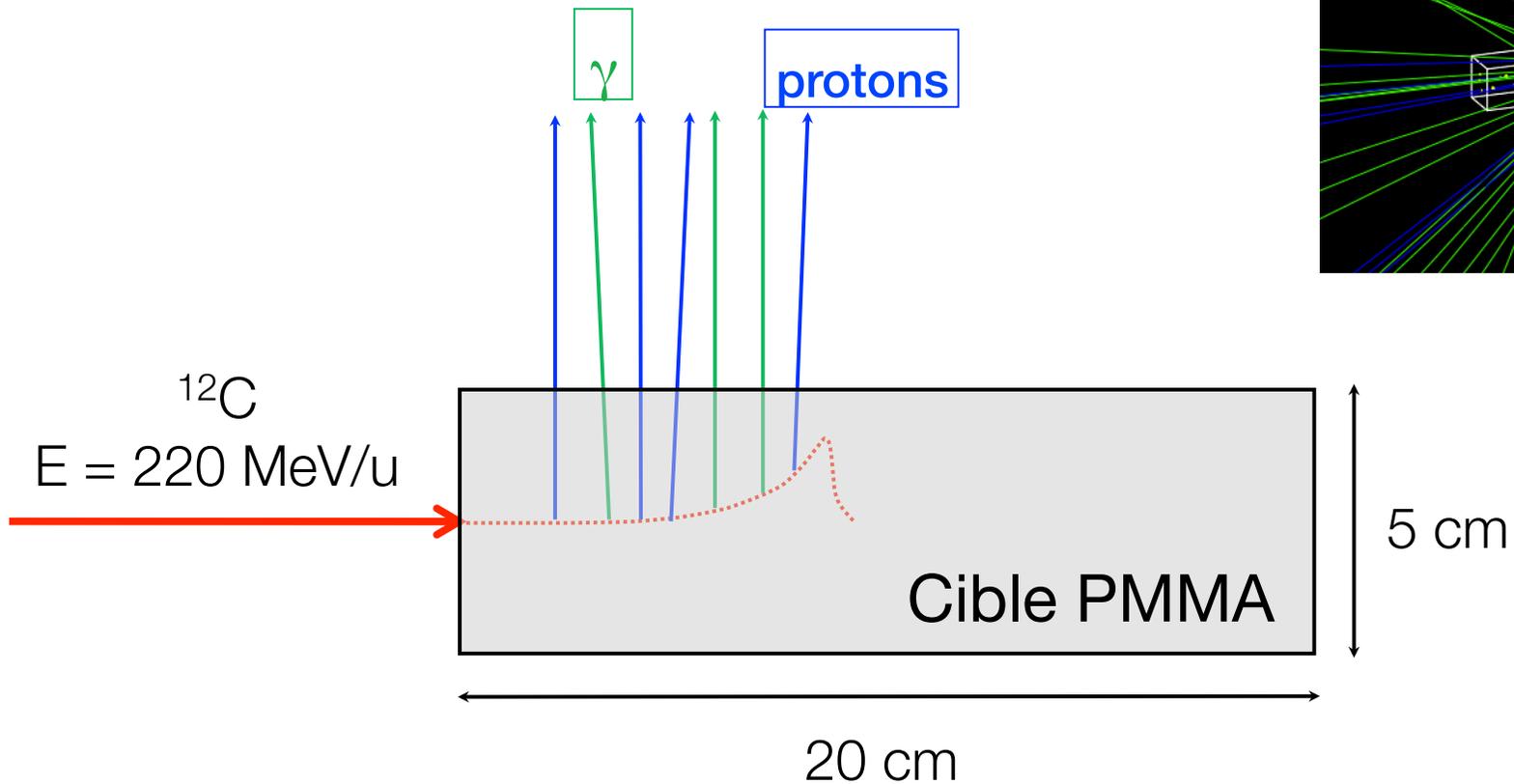
1 type de particule

# Plan de présentation

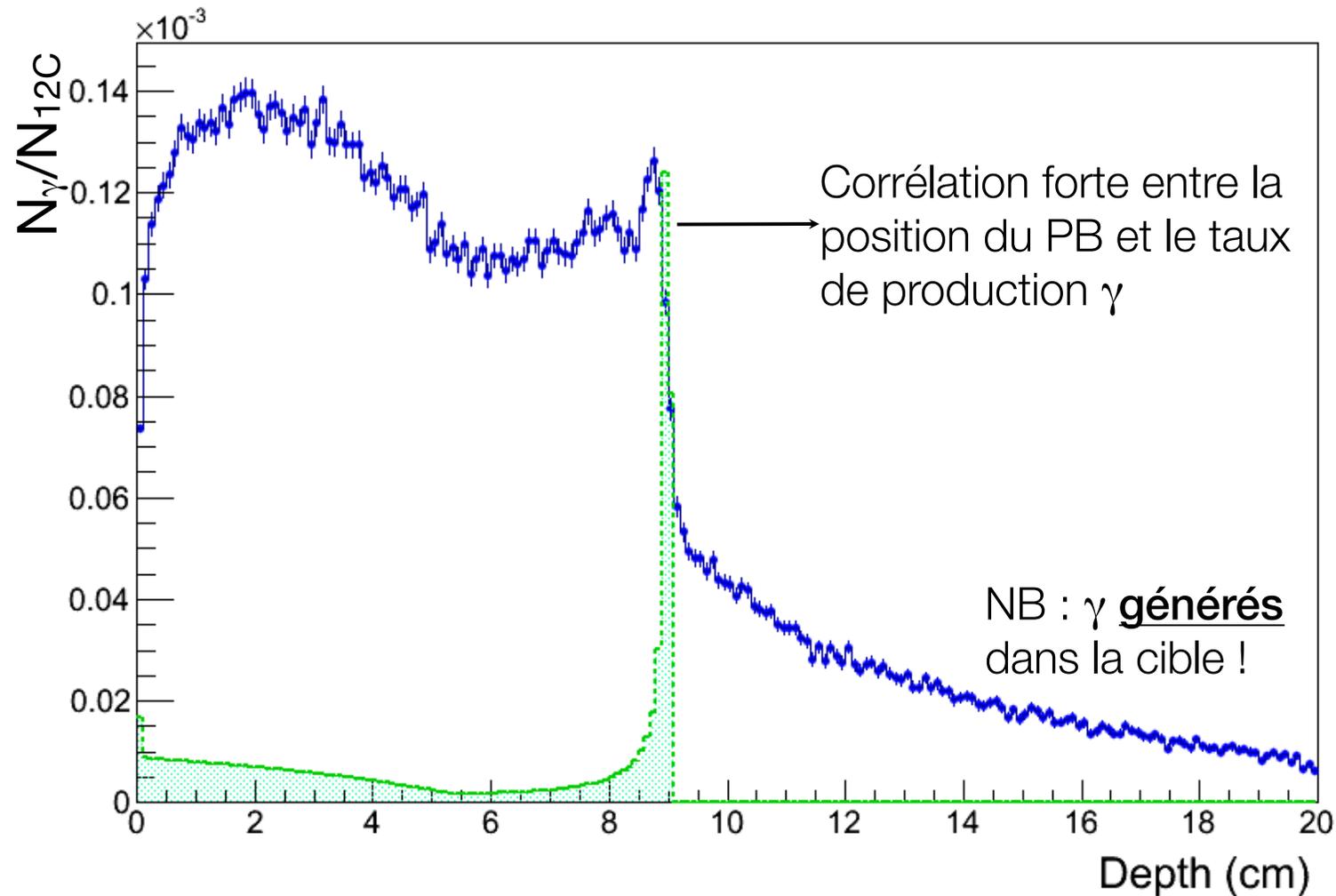
1. Contexte - la thérapie par ions légers
2. Dispositif expérimental
3. Simulations Monte Carlo
4. Etalonnage en énergie du BaF<sub>2</sub> ( $\gamma$ )
5. Résultats préliminaires pour les  $\gamma$  prompts
6. Conclusion/Perspectives

# Simulations Monte Carlo avec Geant4

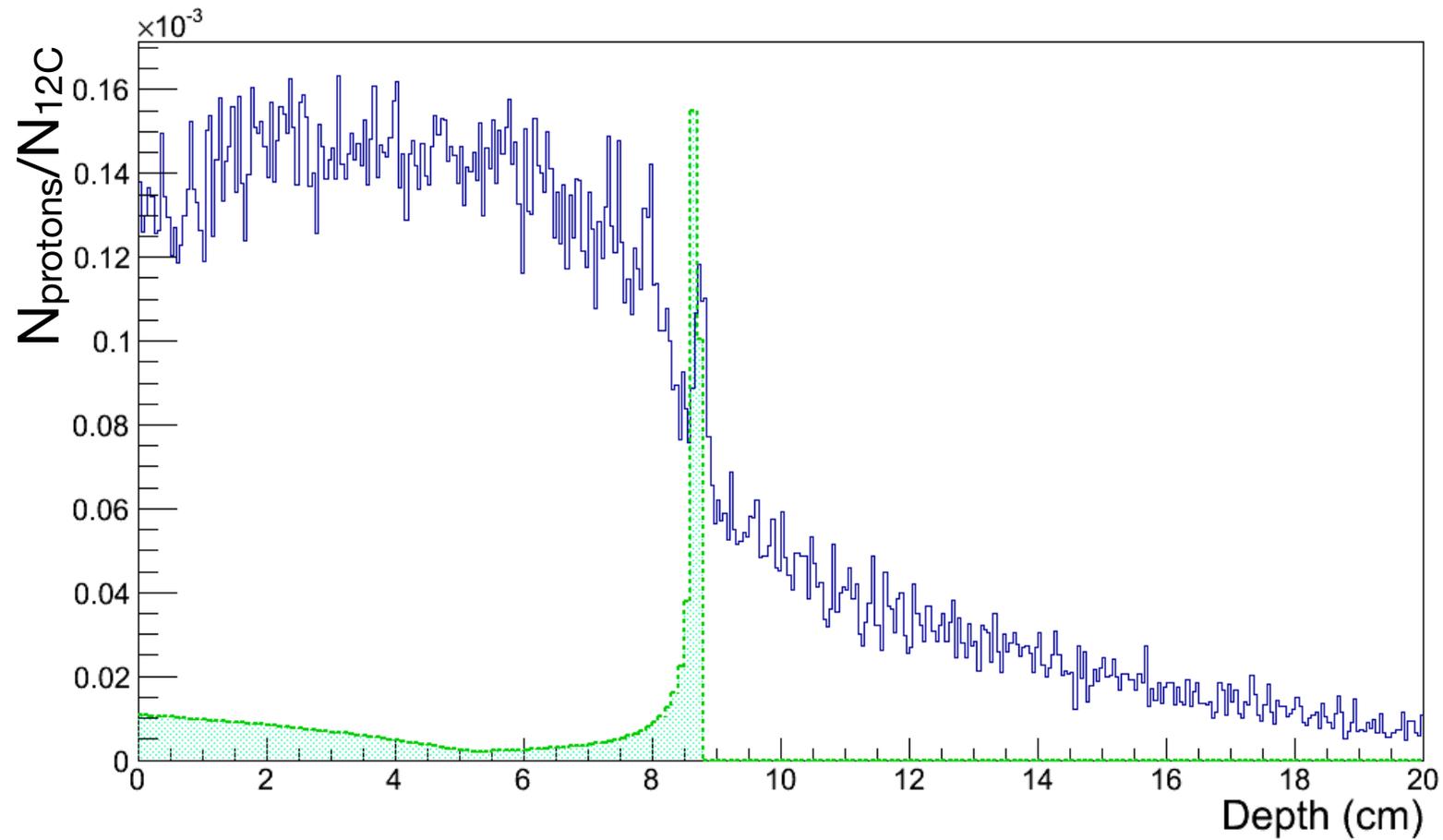
Protons (et  $\gamma$ ) émis à  $\sim 90^\circ$  par rapport à la direction du faisceau



# MC : localisation du PB avec $\gamma$ prompts



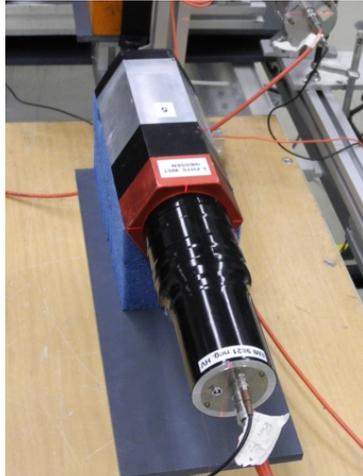
# MC : localisation du PB avec protons



# Plan de présentation

1. Contexte - la thérapie par ions légers
2. Dispositif expérimental
3. Simulations Monte Carlo
4. Etalonnage en énergie du BaF<sub>2</sub> ( $\gamma$ )
5. Résultats préliminaires pour les  $\gamma$  prompts
6. Conclusion/Perspectives

# Le fluorure de baryum ( $\text{BaF}_2$ )



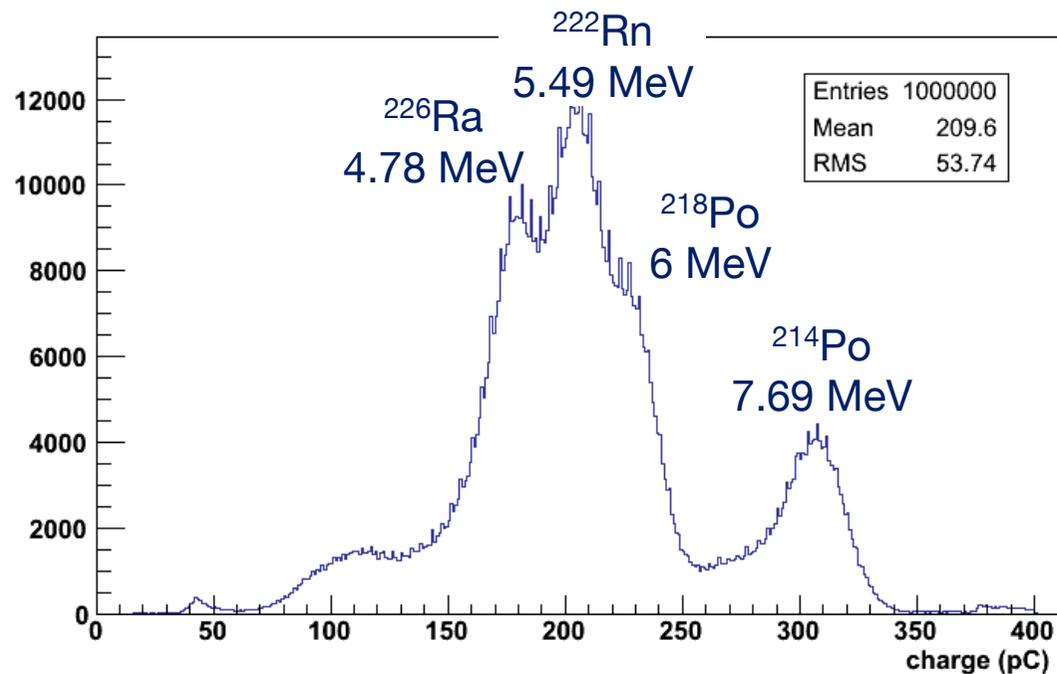
Scintillateur inorganique

Numéro atomique ( $Z=56$ ) et densité ( $4.88 \text{ g/cm}^3$ ) élevés

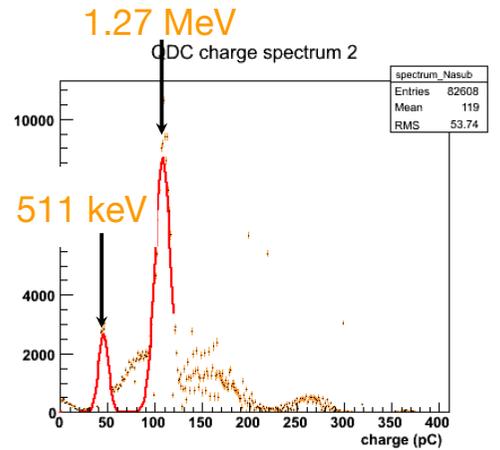
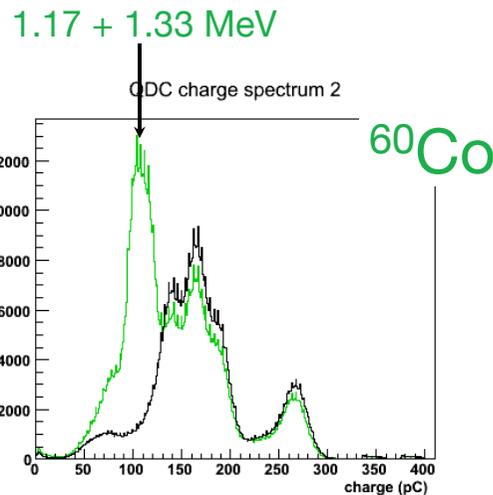
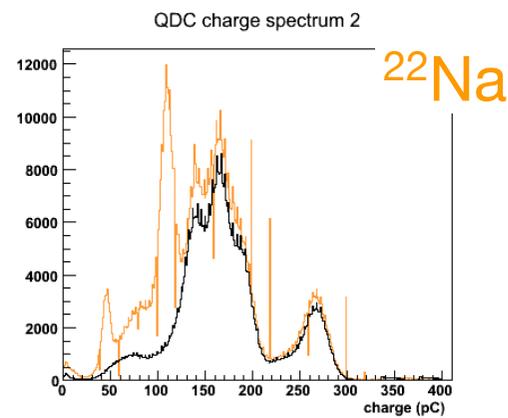
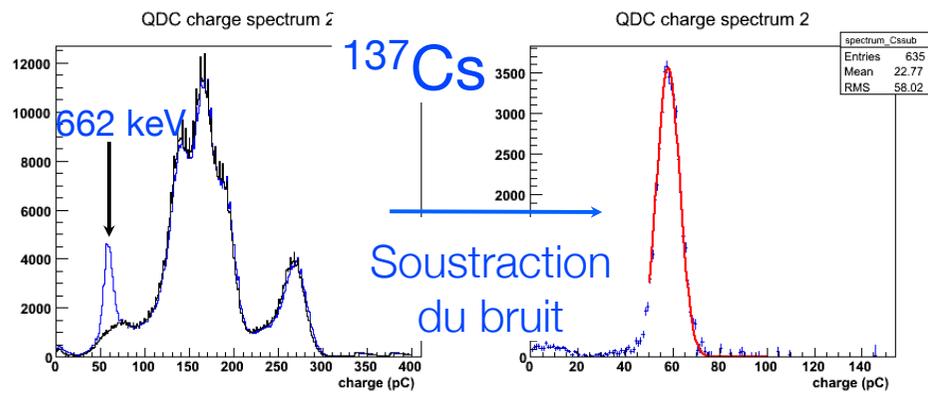
▶ ~100% d'efficacité aux ions et photons

▶ Jusqu'à 20% d'efficacité aux neutrons

Impuretés dans le  $\text{BaF}_2$   
⇒ source interne ( $\alpha$ ) :

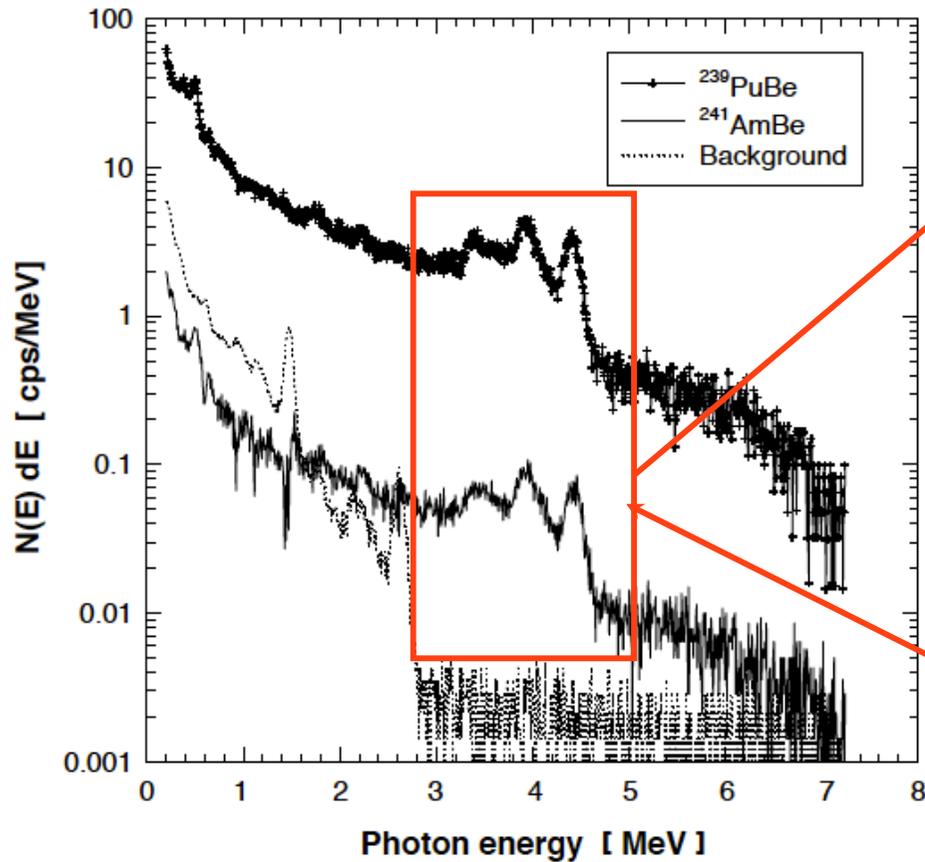


# Etalonnage du BaF<sub>2</sub> ( $\gamma$ )

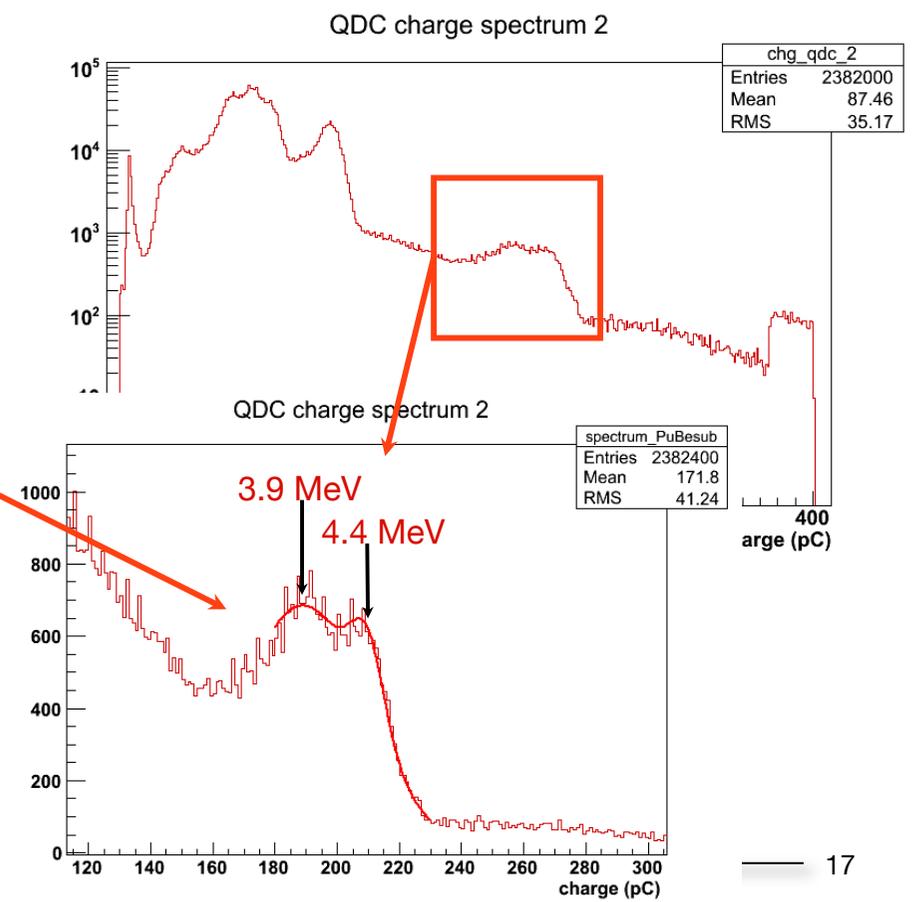


En noir : source interne du BaF<sub>2</sub> (bruit)

# Etalonnage du BaF<sub>2</sub> (γ) - exposition au <sup>239</sup>PuBe

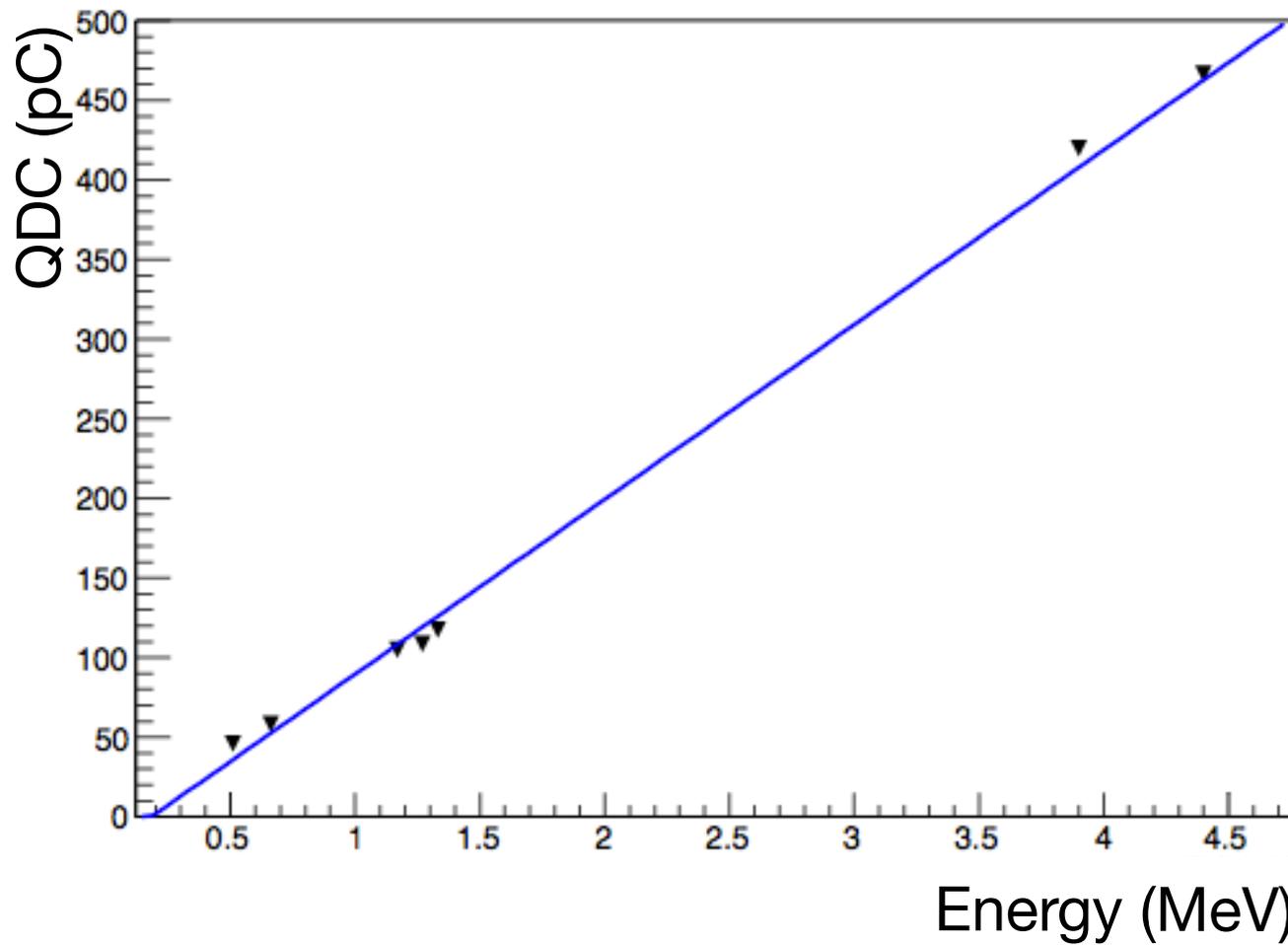


Zone d'intérêt:  
pic à **4.4 MeV** (3.9 et 3.4 = simple et double échappement)



[4] Vega-Carrillo et al., Neutron and gamma-ray spectra of <sup>239</sup>PuBe and <sup>241</sup>AmBe Applied Radiation and Isotopes, 2002, 57

# Etalonnage BaF<sub>2</sub> ( $\gamma$ )

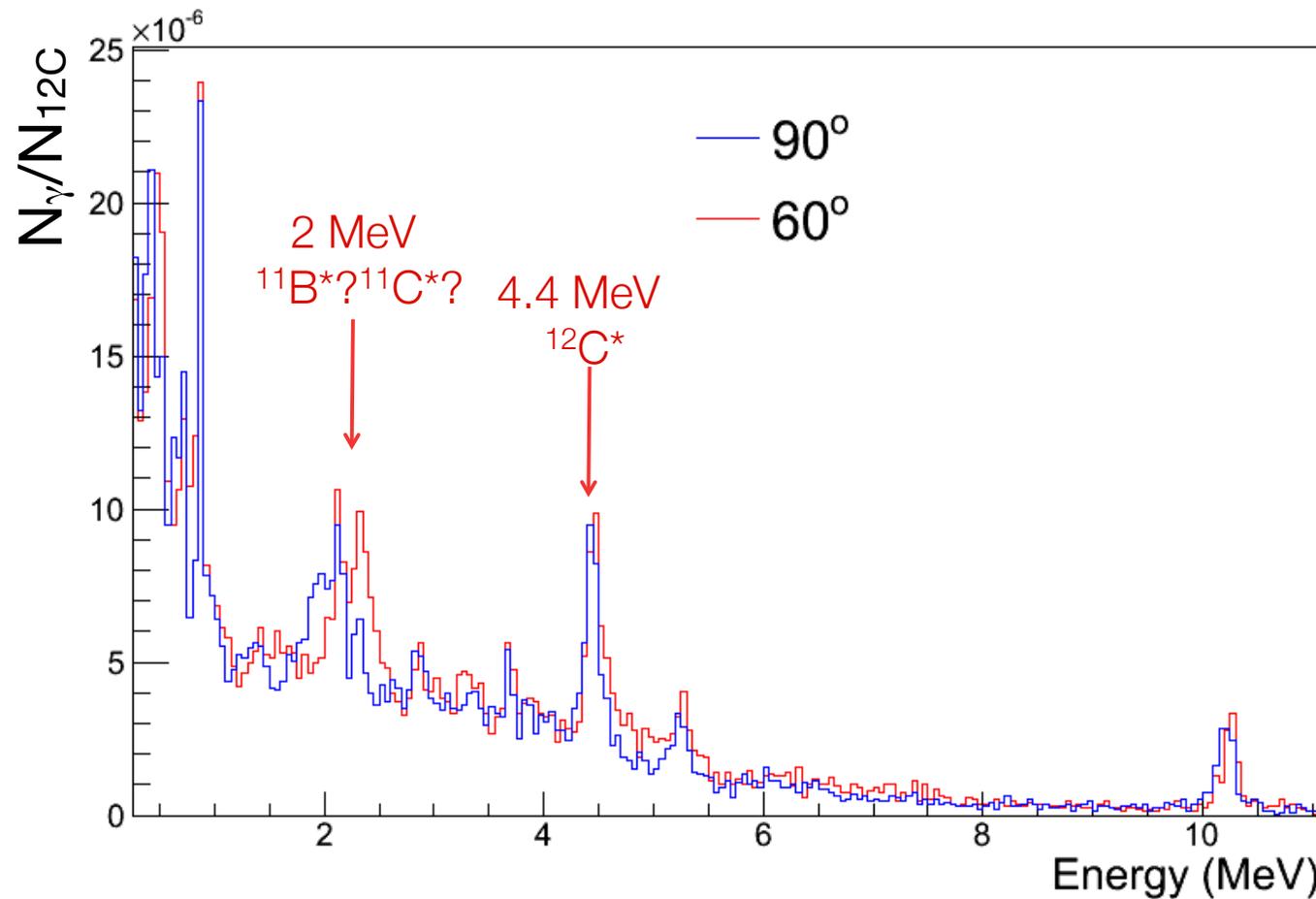


# Plan de présentation

1. Contexte - la thérapie par ions légers
2. Dispositif expérimental
3. Simulations Monte Carlo
4. Etalonnage en énergie du BaF<sub>2</sub> ( $\gamma$ )
5. Résultats préliminaires pour les  $\gamma$  prompts
6. Conclusion/Perspectives

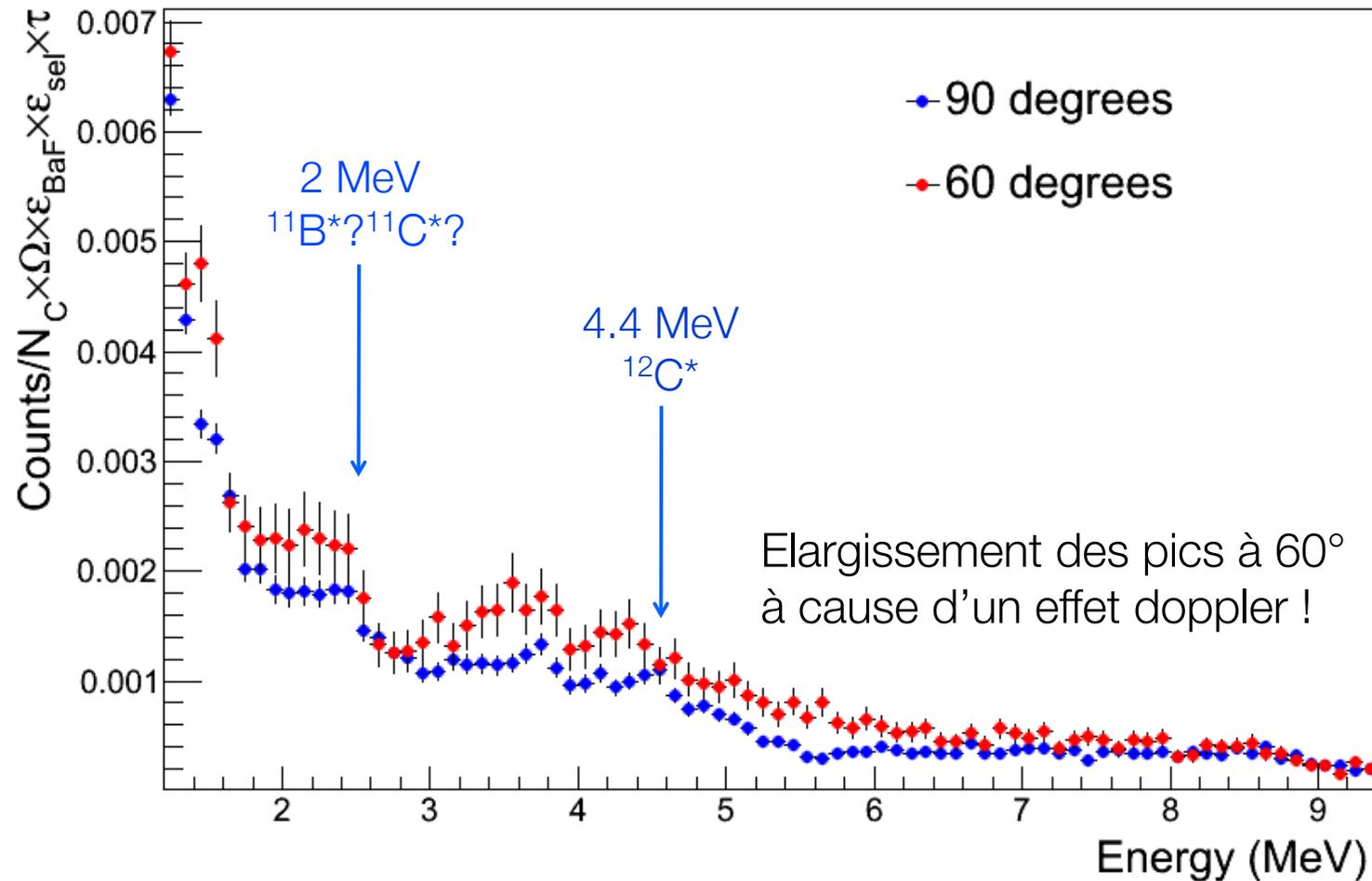
# Spectres $\gamma$ attendus - Monte Carlo

$\gamma$  prompts arrivant sur le BaF<sub>2</sub> (pas de réponse du détecteur)



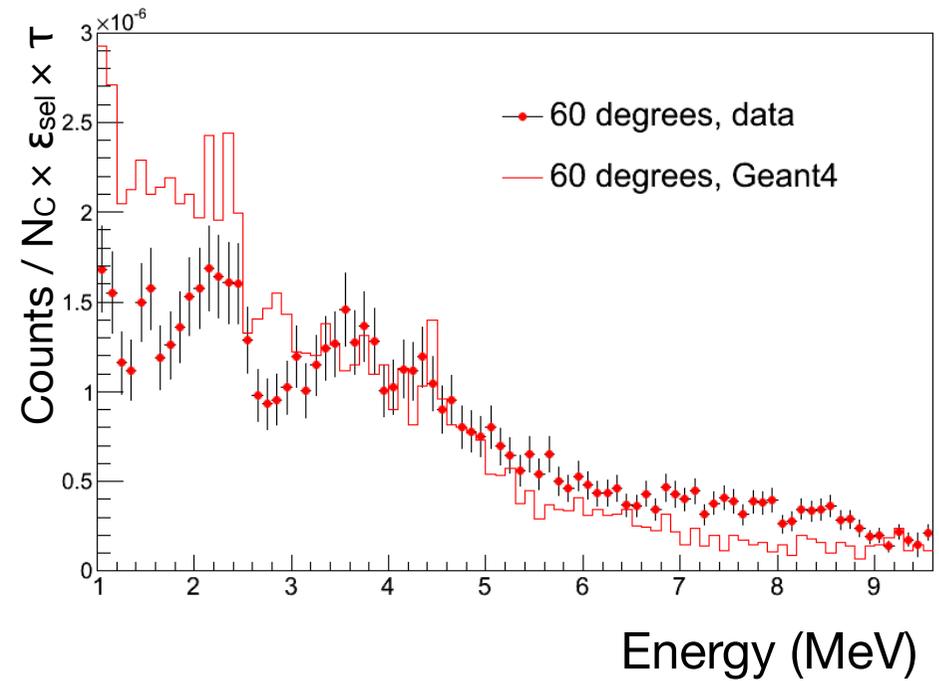
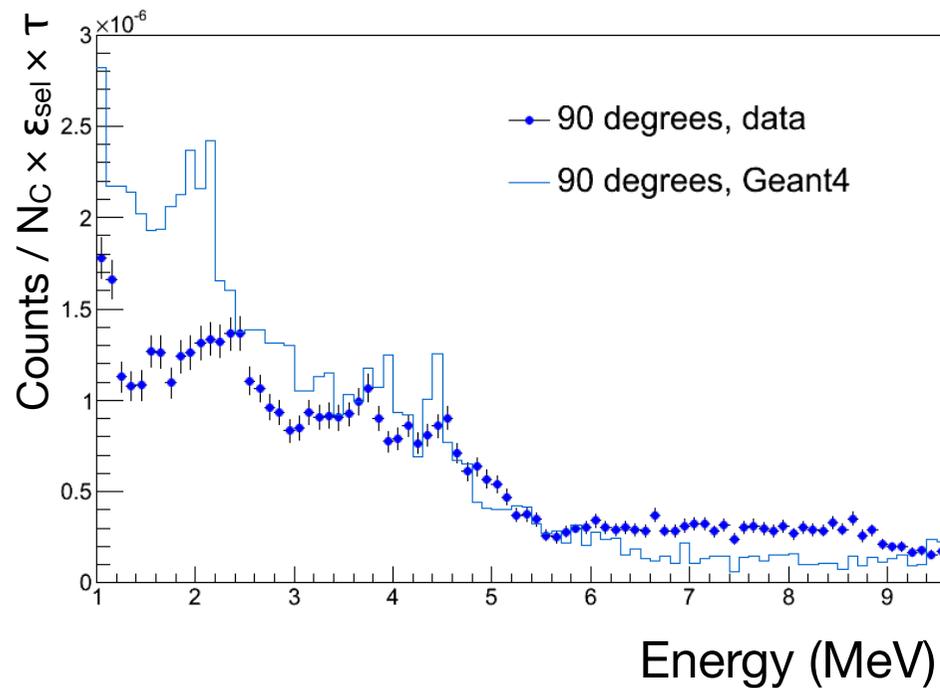
# Spectres $\gamma$ corrigés - données

Résolution en énergie BaF<sub>2</sub> ~ 15% (de l'étalonnage)



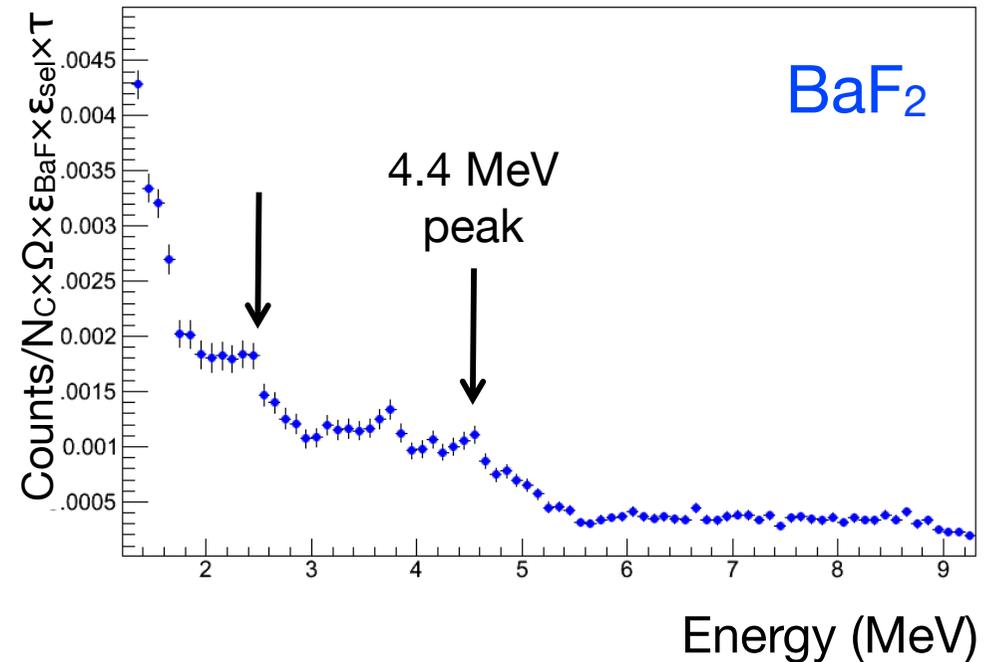
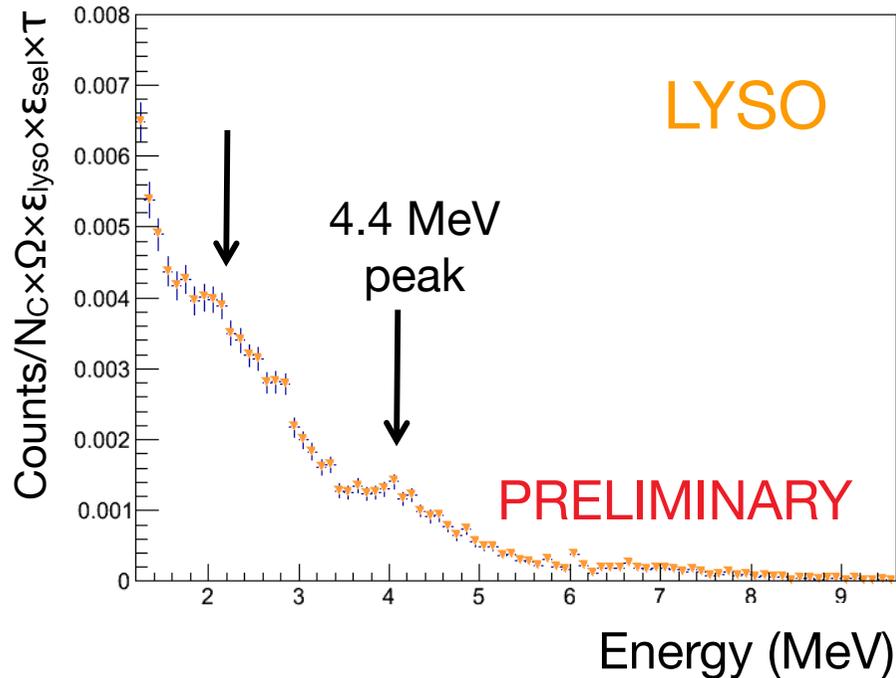
# Comparaison avec la simulation

NB : ici spectres mesurés (pas de correction d'angle solide)  
+ facteur multiplicatif de 1/5 pour Geant4



# Comparaison avec le LYSO (90°)

**LYSO** = aussi scintillateur inorganique, haute densité ( $7.3 \text{ g/cm}^3$ )  
mais plus petit que  $\text{BaF}_2$

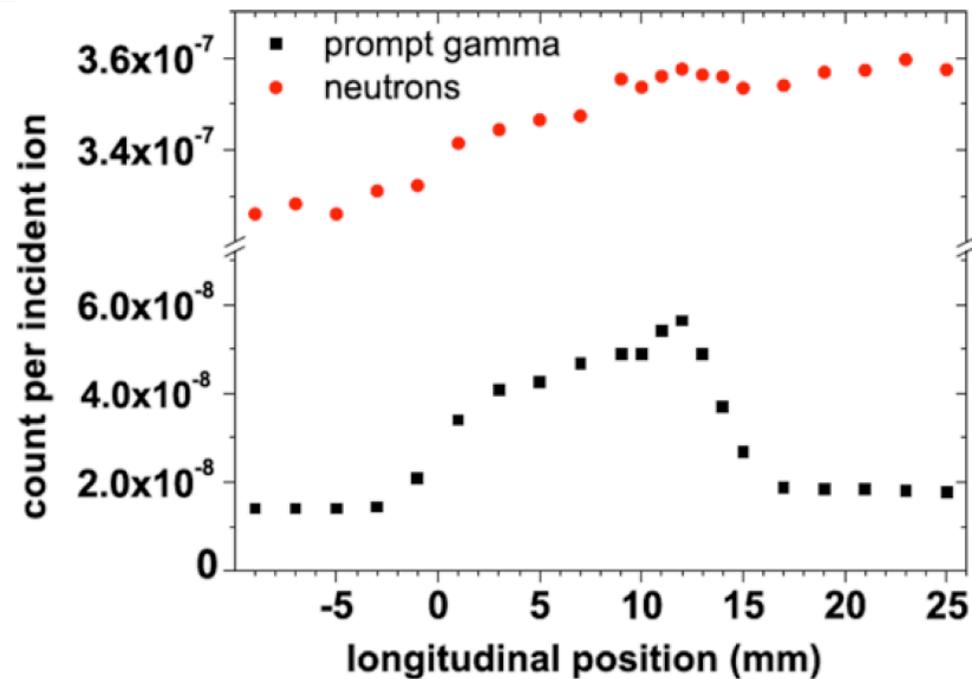


Courtesy of M. Marafini

# Mesures avec collimateur

Collimateur  $\Rightarrow$  sélection d'une profondeur donnée pour **suivre la position du pic de Bragg** avec le taux de production des  $\gamma$

Exemple :

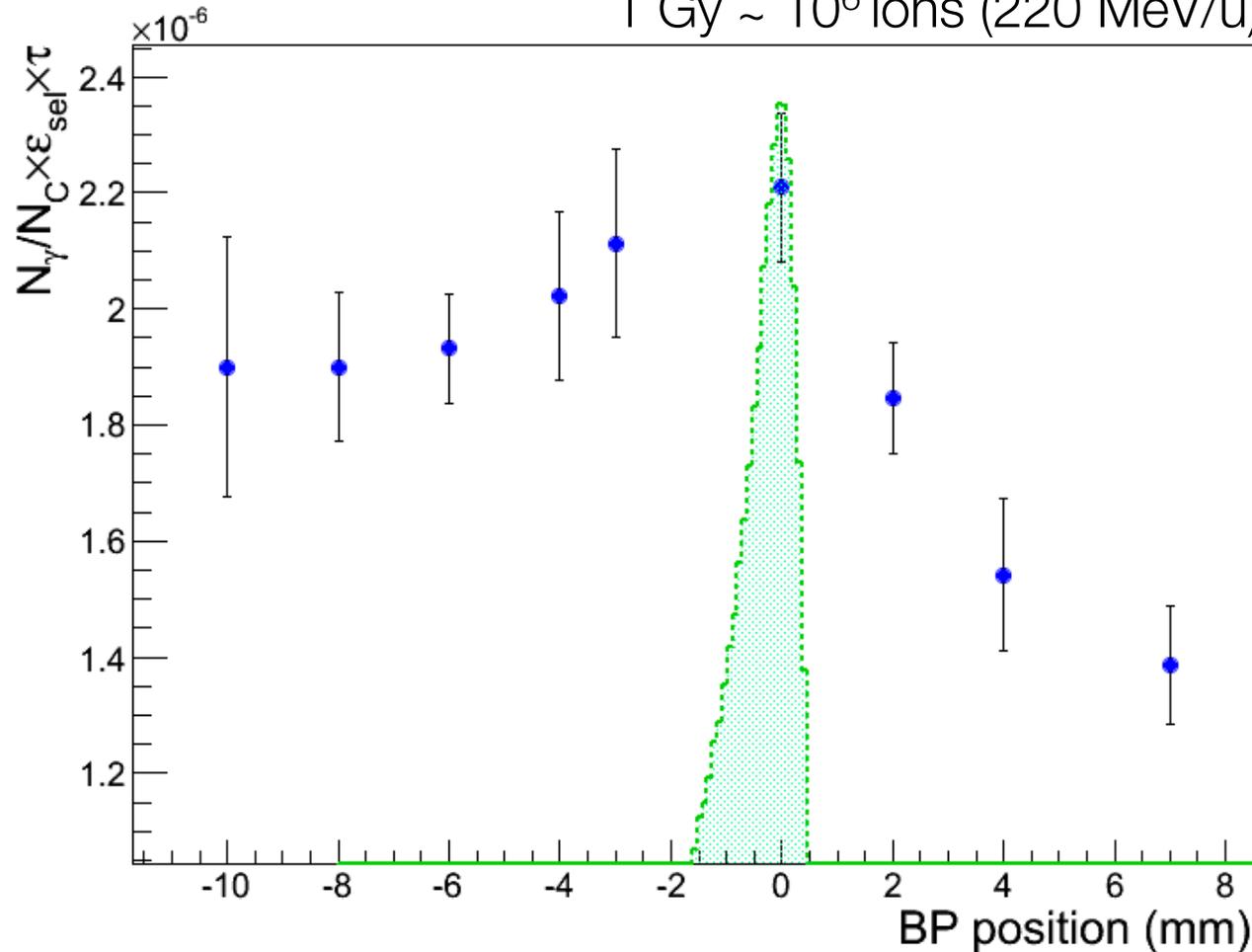


$^{12}\text{C}$  : 73 MeV/u

[5] **Testa et al.**, *Dose profile monitoring with carbon ions by mean of prompt-gamma measurements*  
Nuclear Instruments and Methods B, 2009

# Taux de production vs profondeur de la cible

Dose typique pour un traitement ~ 60 Gy  
1 Gy ~  $10^6$  ions (220 MeV/u)



Corrélation entre le taux de production des  $\gamma$  et position du pic de Bragg



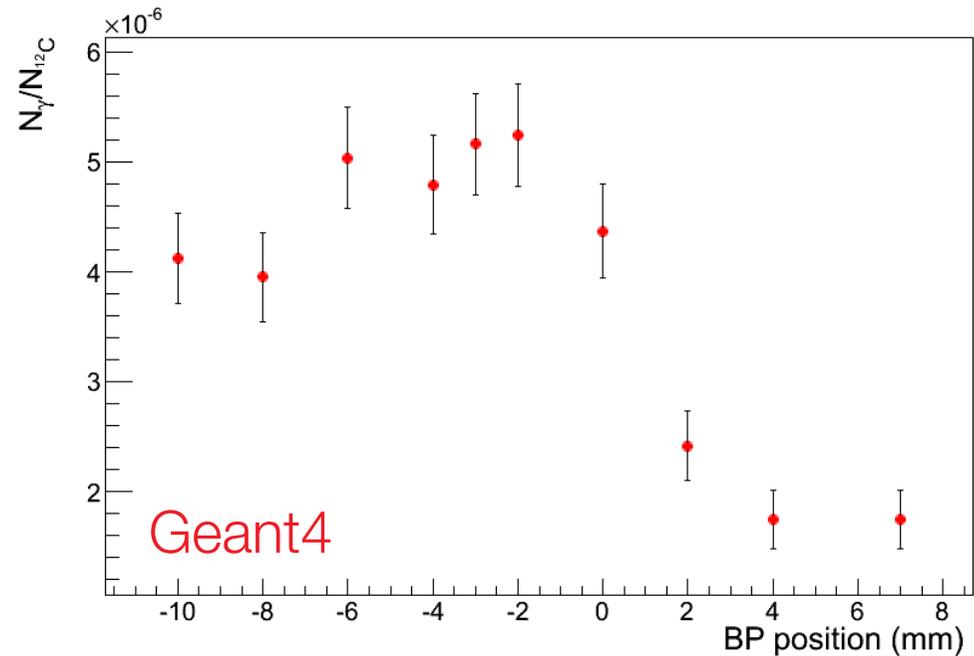
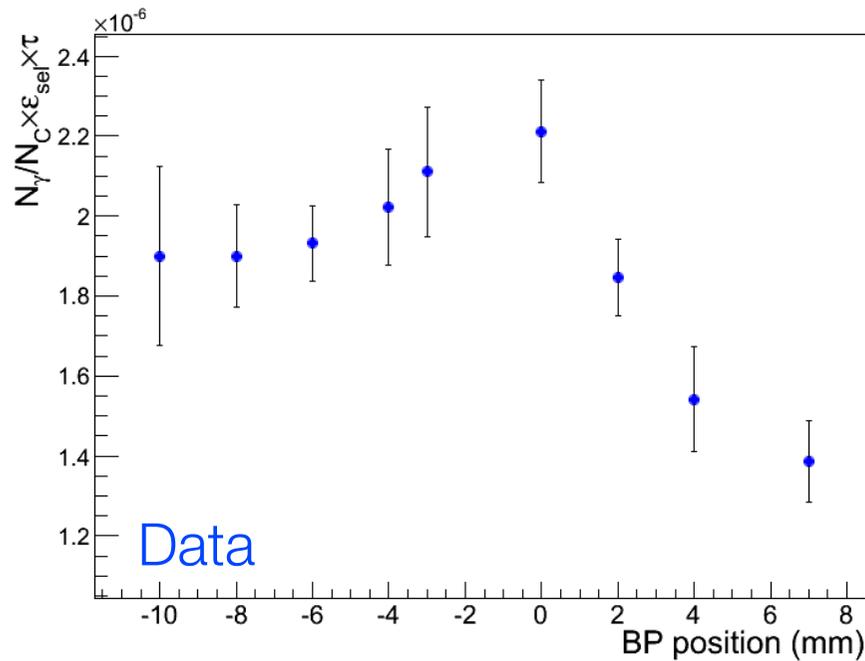
**MAIS**

Statistique trop faible pour suivi en ligne !



Position du collimateur par rapport au pic de Bragg

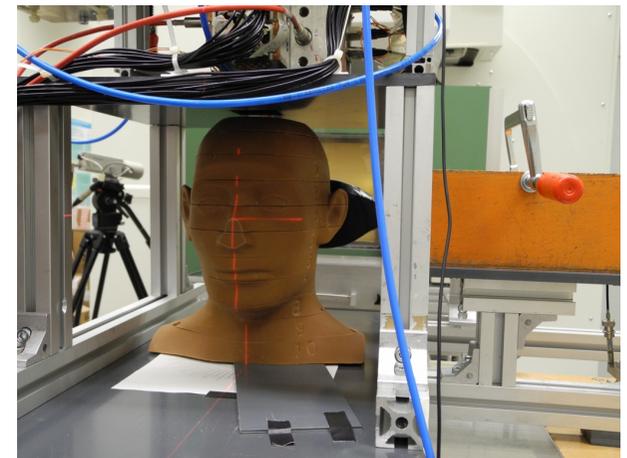
# Comparaison avec la simulation



Geant4 => surestimation du taux de production des  $\gamma$  (connu)  
MAIS forme similaire !

# Conclusion et perspectives

- ▶ Bilan :
  - Spectres en énergie et profil d'émission ( $\gamma$ ) en accord qualitatif avec le Monte Carlo
  - Profil d'émission des  $\gamma$  permet la localisation du pic de Bragg mais difficilement utilisable à cause de la stat.
- ▶ Perspectives :
  - Etude des protons avec tracker CMOS (corrélation avec données du BaF<sub>2</sub>)
  - Nouvelles expériences avec SOBP et fantôme anthropomorphique



# Remerciements



C. La Tessa, M. Rovituso,  
C. Schuy



J. Baudot, C. Finck,  
M. Goffe, M. Winter

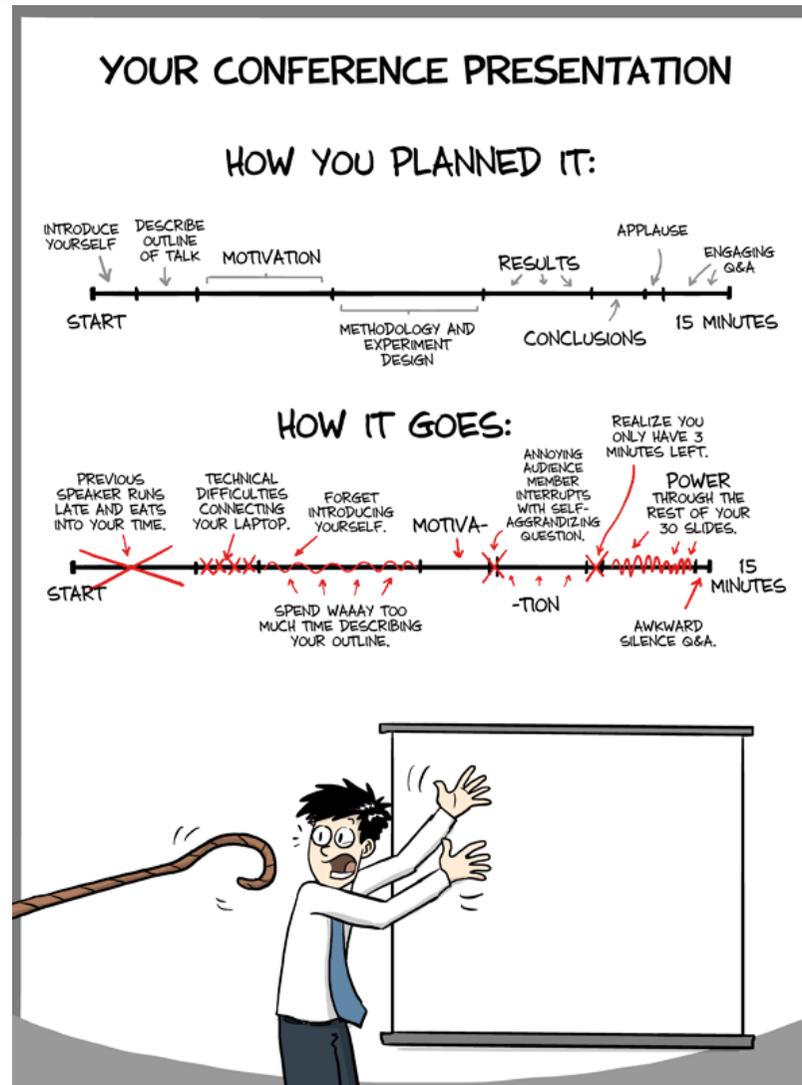


**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

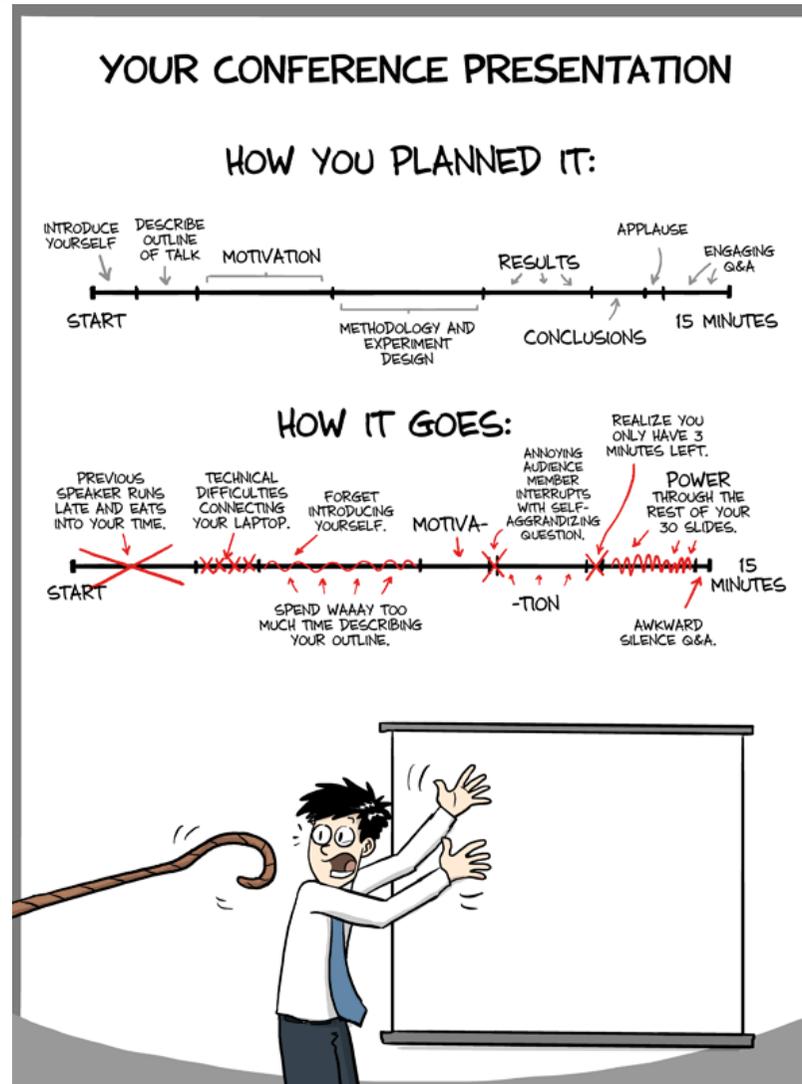
M. Marafini, I. Mattei,  
V. Patera, L. Piersanti,  
A. Sarti, A. Sciubba

and...P. Ortega  
from CERN !

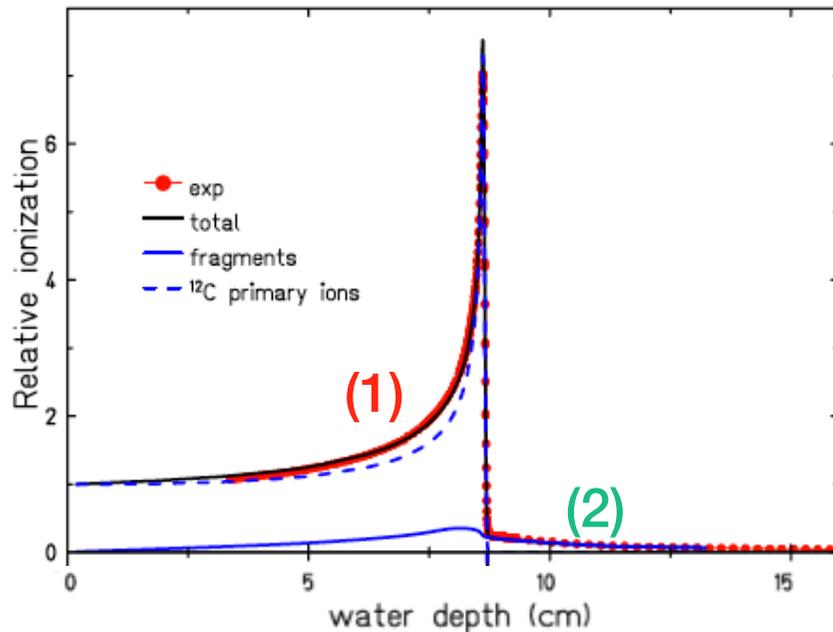
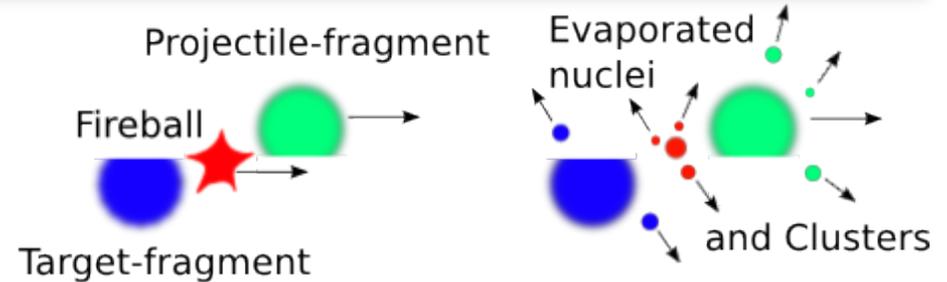
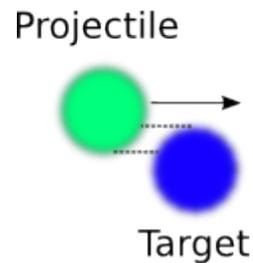
# Merci pour votre attention !



# Annexes



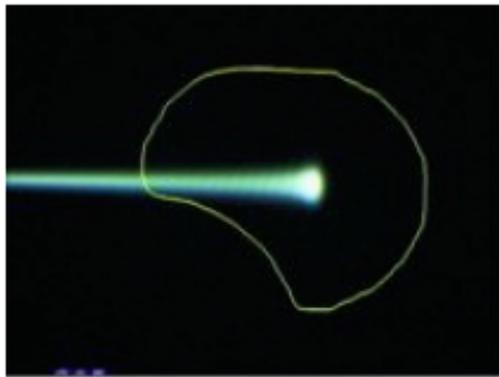
# La fragmentation



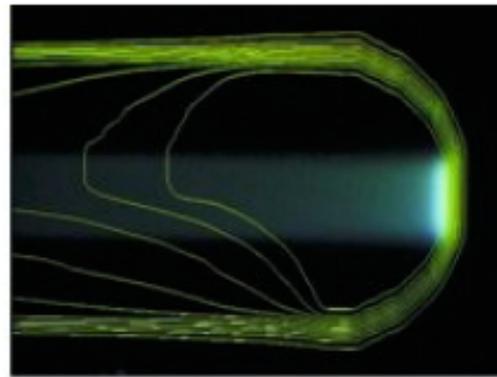
Emission de fragments légers responsables d'**élargissement**<sup>(1)</sup> du pic de Bragg et d'apparition d'une **queue de distribution**<sup>(2)</sup>

[1] **Gunzert-Marx et al.**, *Secondary beam fragments produced by 200MeV/u  $^{12}\text{C}$  ions in water and their dose contributions in carbon ion radiotherapy* New Journal of Physics, 2008, 10

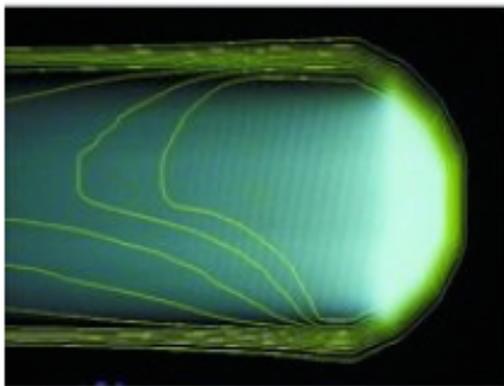
# Spread-Out-Bragg-Peak



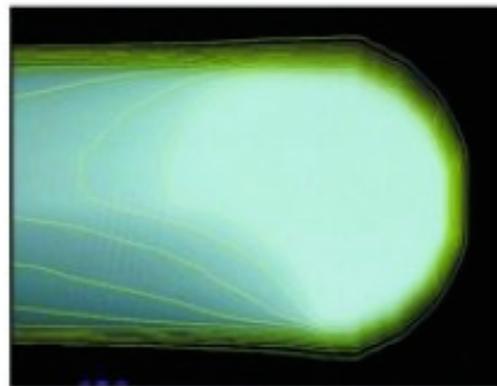
Single beam



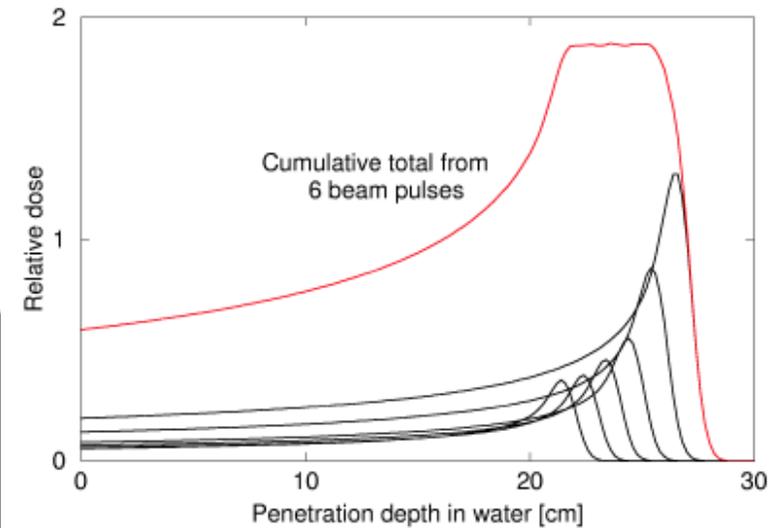
Lateral scanning



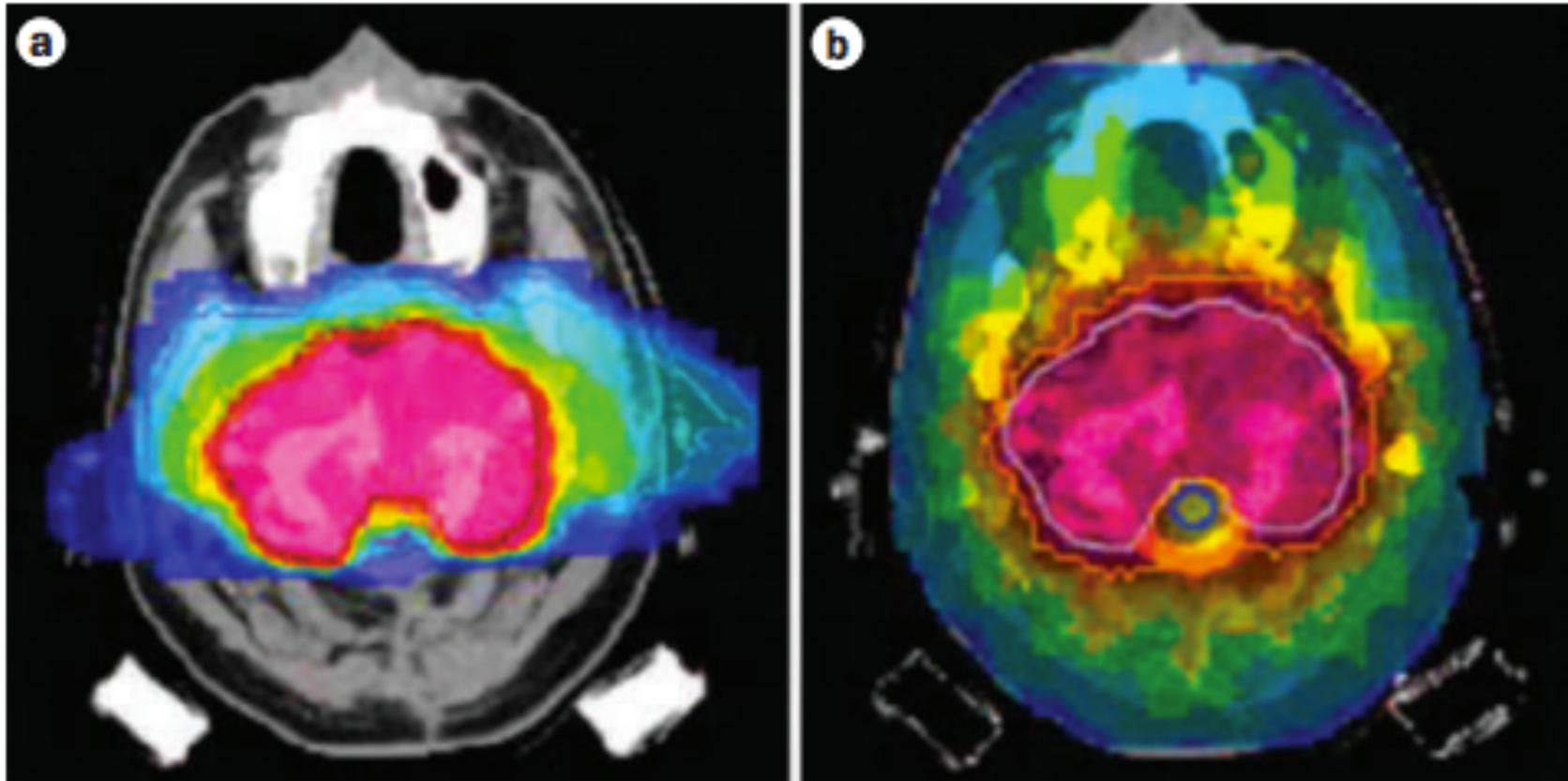
+ scanning in depth



3D conformed dose



# $^{12}\text{C}$ vs IMRT



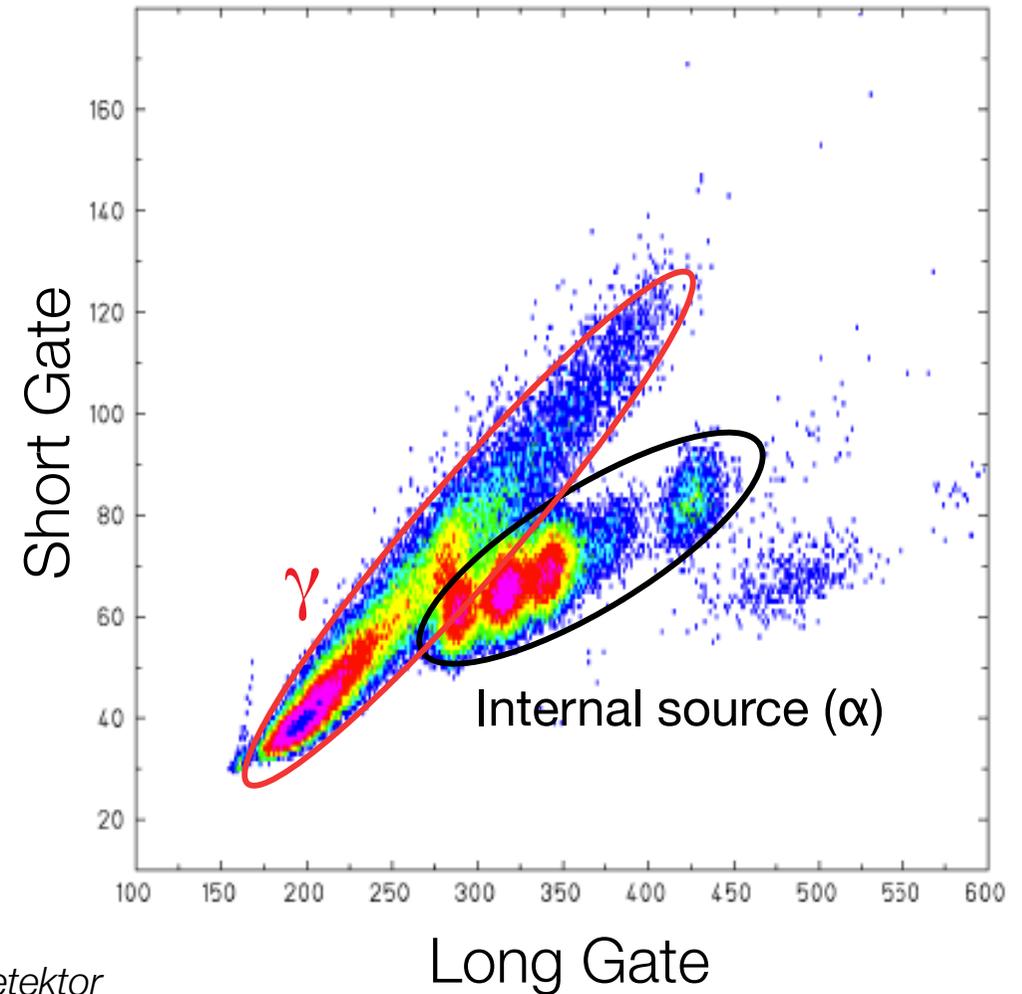
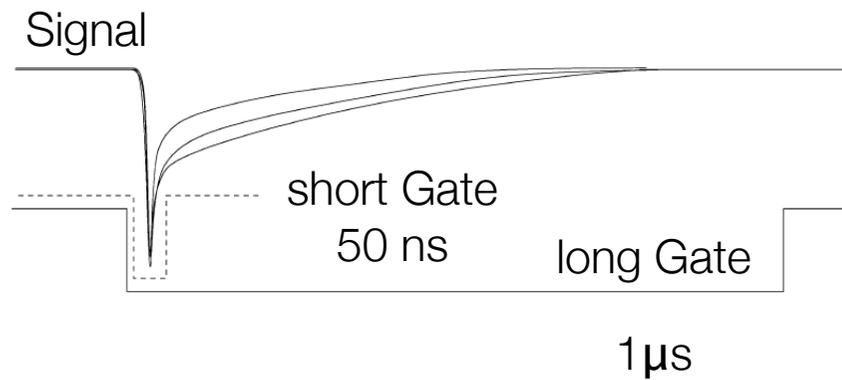
# Le LYSO

Scintillateur inorganique  
 $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5(\text{Ce})$

Numéro atomique ( $Z=56$ ) et  
densité ( $7.3 \text{ g/cm}^3$ ) élevés

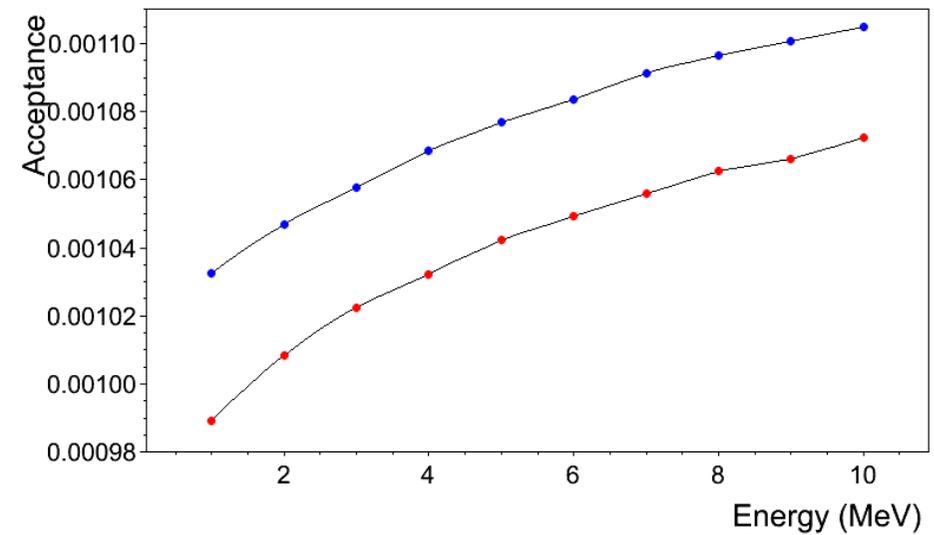
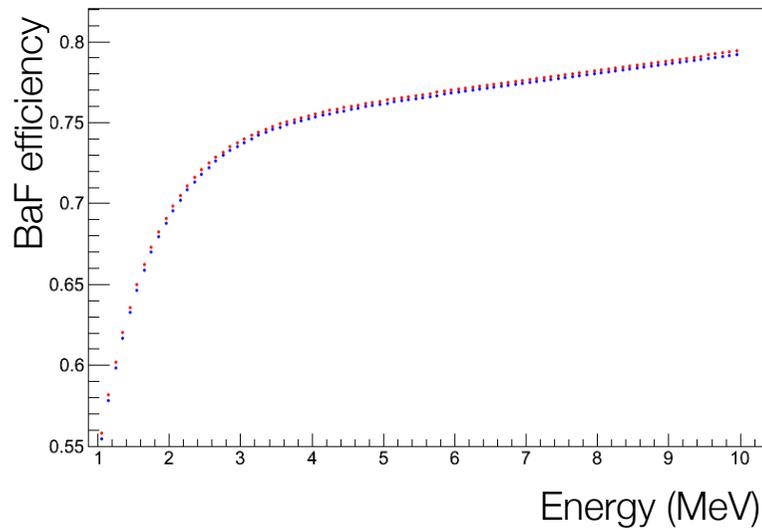


# Pulse shaping



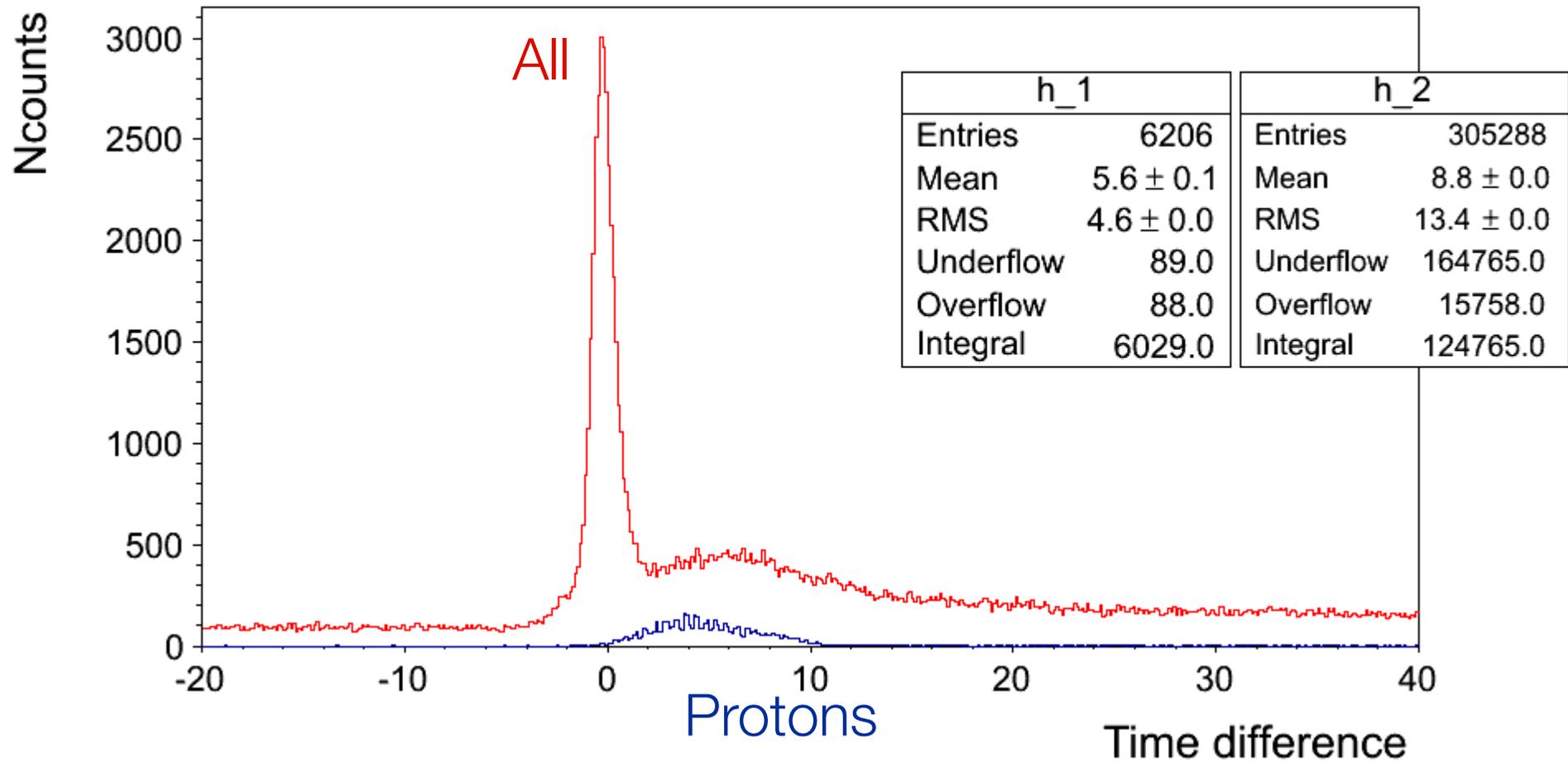
[1] **Gunzert-Marx**, *Nachweis leichter Fragmente aus Schwerionenreaktionen mit einem BaF<sub>2</sub>-Teleskop-Detektor* 2003

# Corrections des spectres $\gamma$



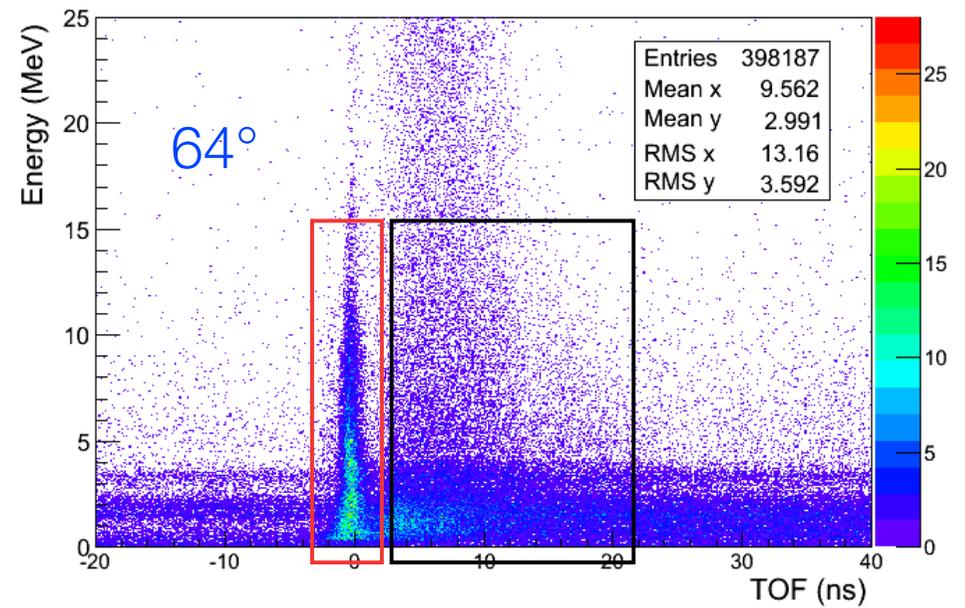
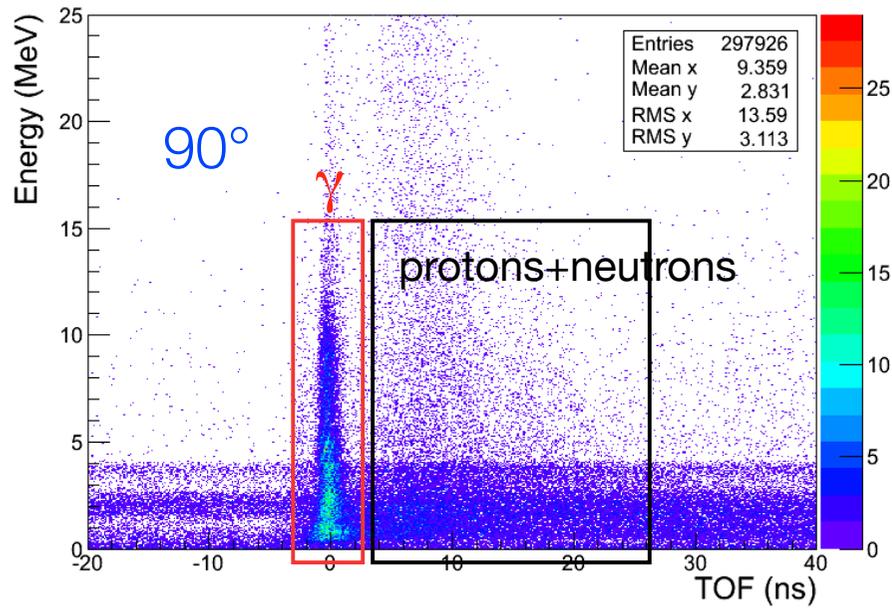
Acceptance et efficacité du BaF<sub>2</sub> par simulation Monte Carlo (FLUKA) par P. Ortega (CERN).

# Time-Of-Flight

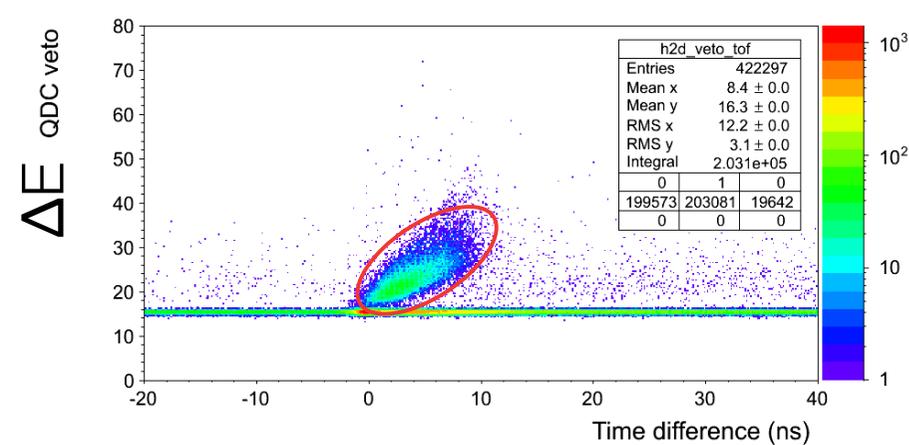
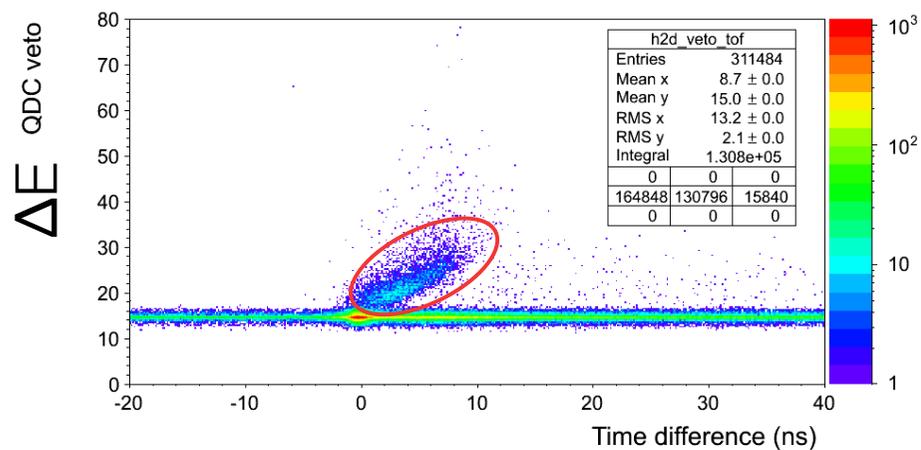
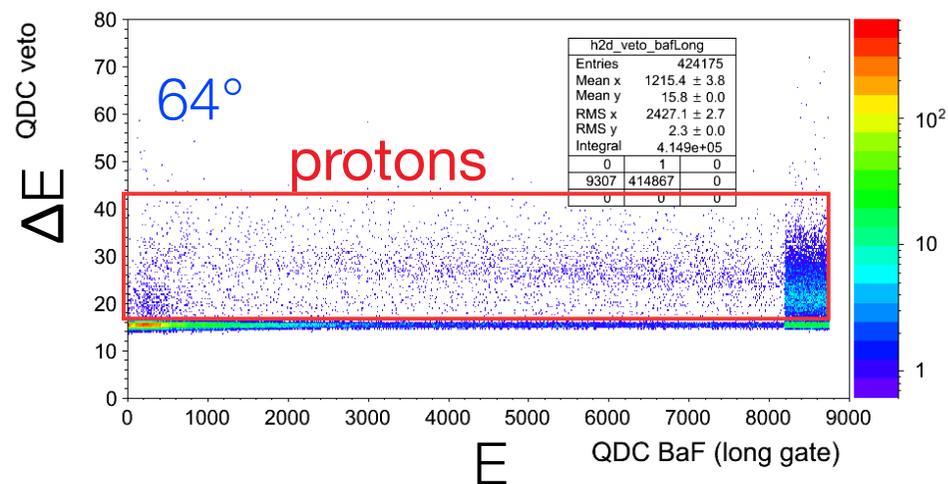
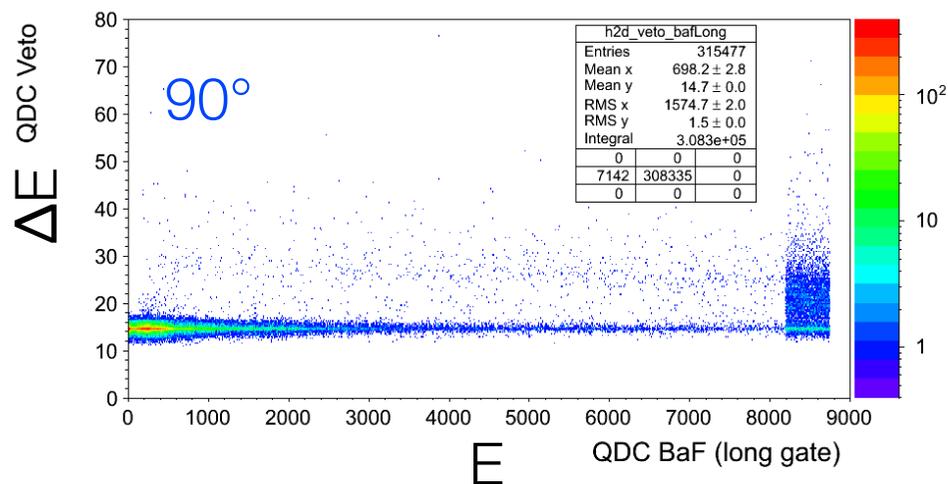


# Sélection des $\gamma$

⇒ E-ToF



# A propos des protons



# Spectres en énergie (ultra preliminary)

