

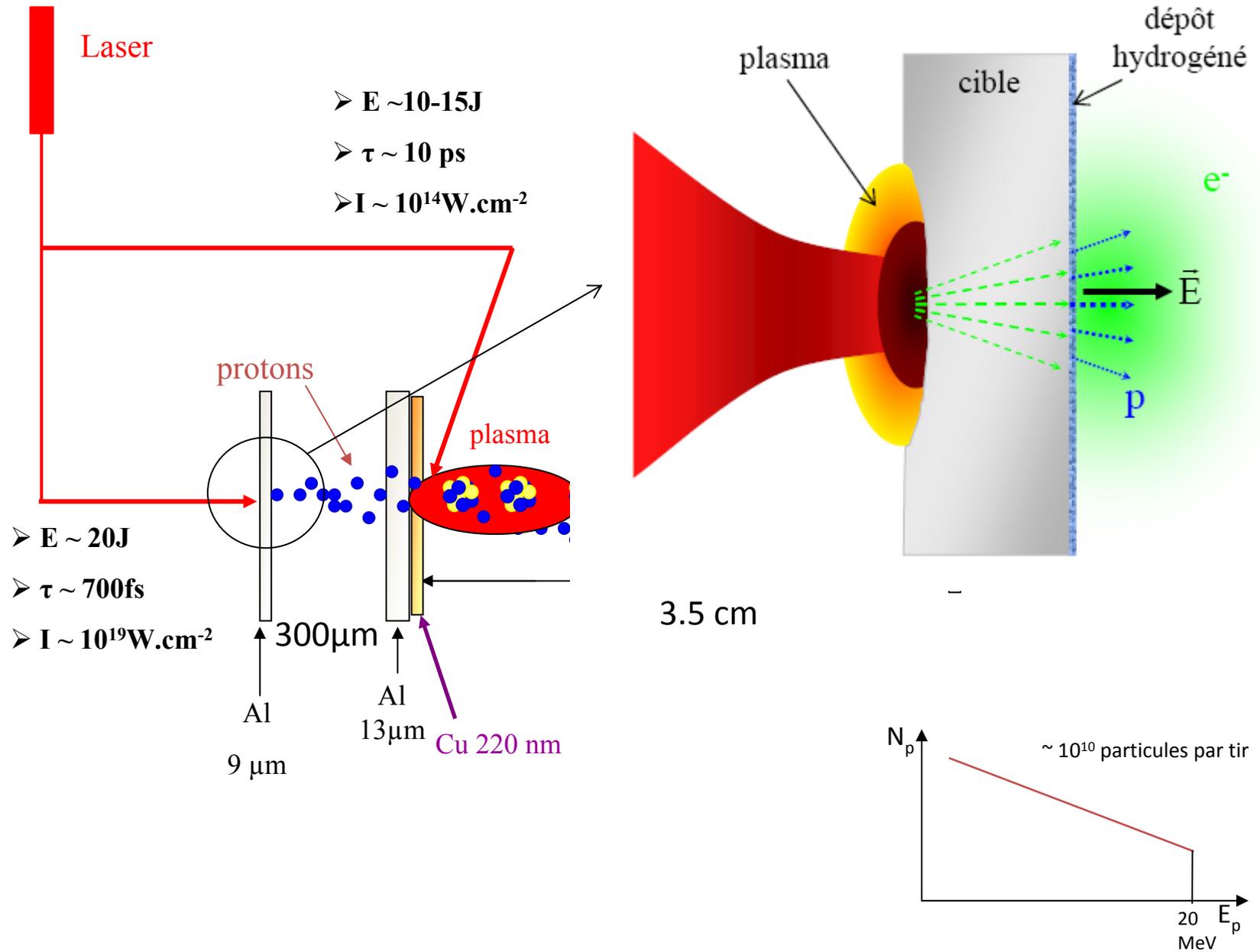
Caractérisation de faisceaux de protons, générés par laser intense, à l'aide de méthodes de densitométrie optique et d'activation nucléaire.

Cyril Plaisir

F. Hannachi, M.M. Aléonard, F. Gobet, J.N. Scheurer, M. Tarisien,

Groupe ENL, Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan, Université Bordeaux 1

Expérience LULI 100TW

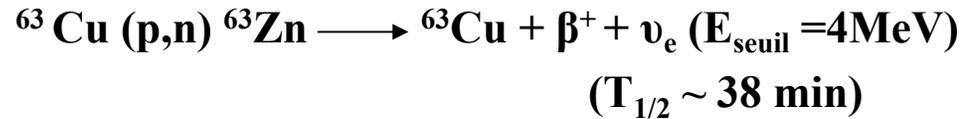


Les détecteurs de protons faciles à utiliser en milieu laser

- Densitométrie optique:
- Technique qui ne présente aucun seuil de détection pour les protons.
- Analyse qualitative rapide (à l'œil!).
- Saturation possible de la réponse des films.
- Pas de distinction des particules (électrons, protons, γ)

- Activation nucléaire :

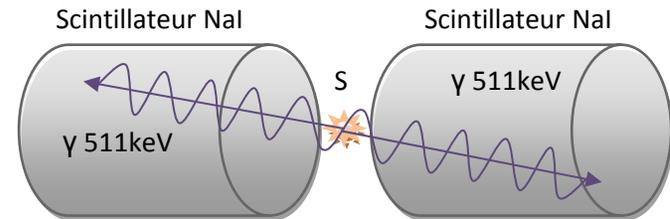
- Utilisation d'un empilement de feuilles de Cu.



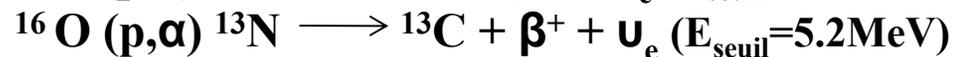
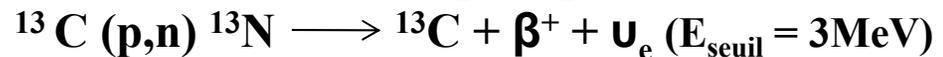
Mesure en coïncidence de l'activité β^+

→ Technique fiable et précise.

→ Mesure longue du fait de la période du ${}^{63}\text{Zn}$



Activation des RCF (film plastique)



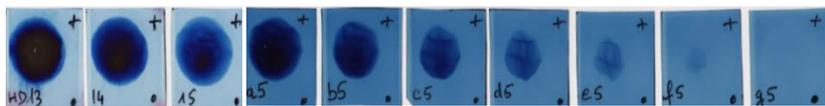
$$(T_{1/2} \sim 10 \text{ min})$$

→ Période courte: nécessité d'une mesure moins longue

→ Pas de saturation et des seuils assez bas

→ Couplage possible avec la densitométrie

2 Al 13 μm pour protéger de la lumière laser



Plan

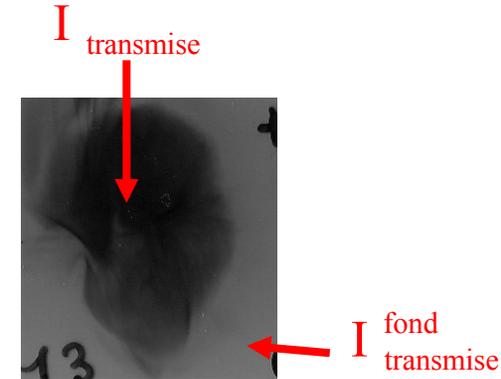
- Caractérisation des faisceaux de protons par densitométrie optique.
- Distributions mesurées par l'analyse optique.
- Mesures d'activations : Vérification des distributions obtenues par densitométrie optique.
- Conclusions et perspectives.

Mesure par densitométrie optique

Mesure de la dose déposée dans le RCF

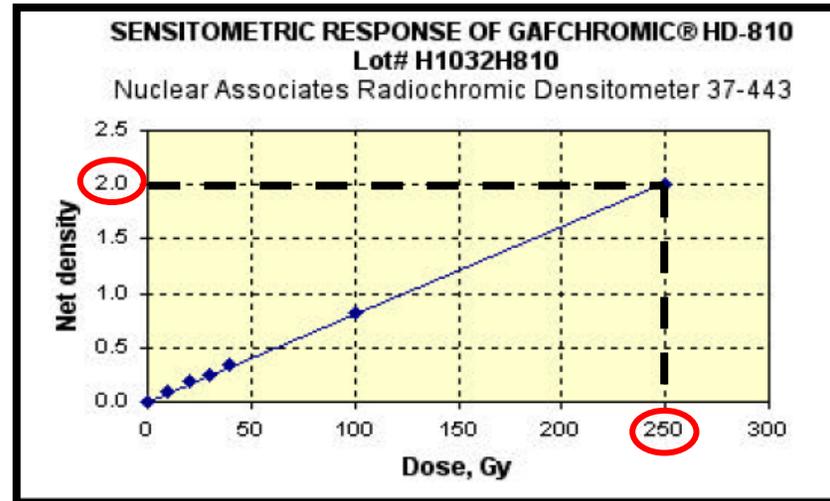
Densitométrie optique \equiv Mesure de variation de densité optique des RCF à partir d'une image numérisée, cette variation est directement proportionnelle à la dose déposée.

$$\text{densité optique} = -\log_{10} \frac{I_{\text{transmise}}}{I_{\text{fond transmise}}}$$



- Densité optique :
 I_{trans} = Intensité (en pixel) transmise dans un zone irradiée par des protons.

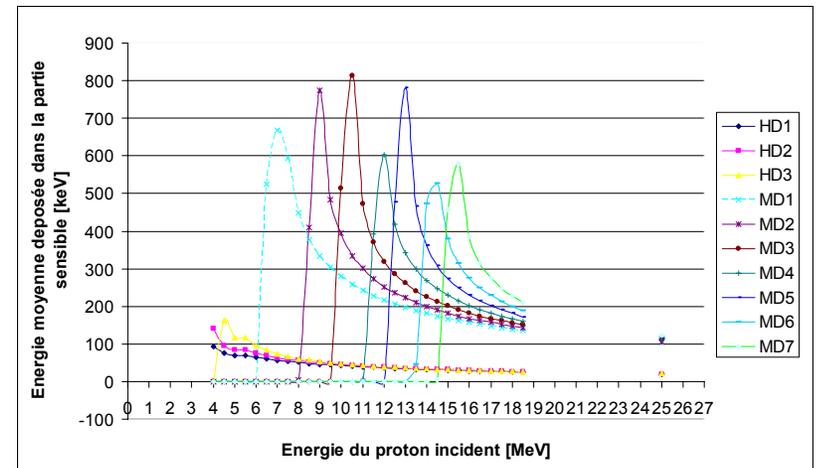
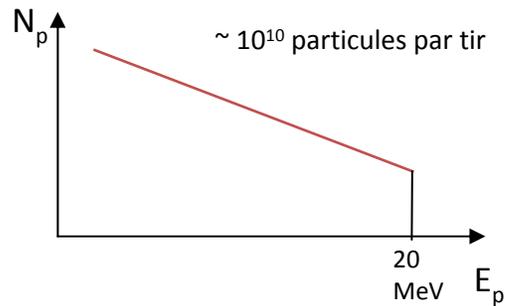
I_{fond_t} = Intensité (en pixel) zone de fond, typiquement les bords du film. Le fond est considéré comme uniforme sur le film.



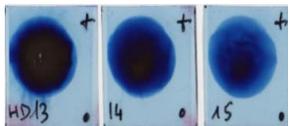
- L'étude de l'activation nucléaire permet d'éliminer la contribution des électrons. Ainsi, on pourra vérifier que l'hypothèse d'un fond uniforme d'électrons est plausible.

Fonction de réponse du détecteur.

- L'énergie déposée dans la i -ème feuille de l'empilement de RCF résulte de la convolution de deux paramètres:

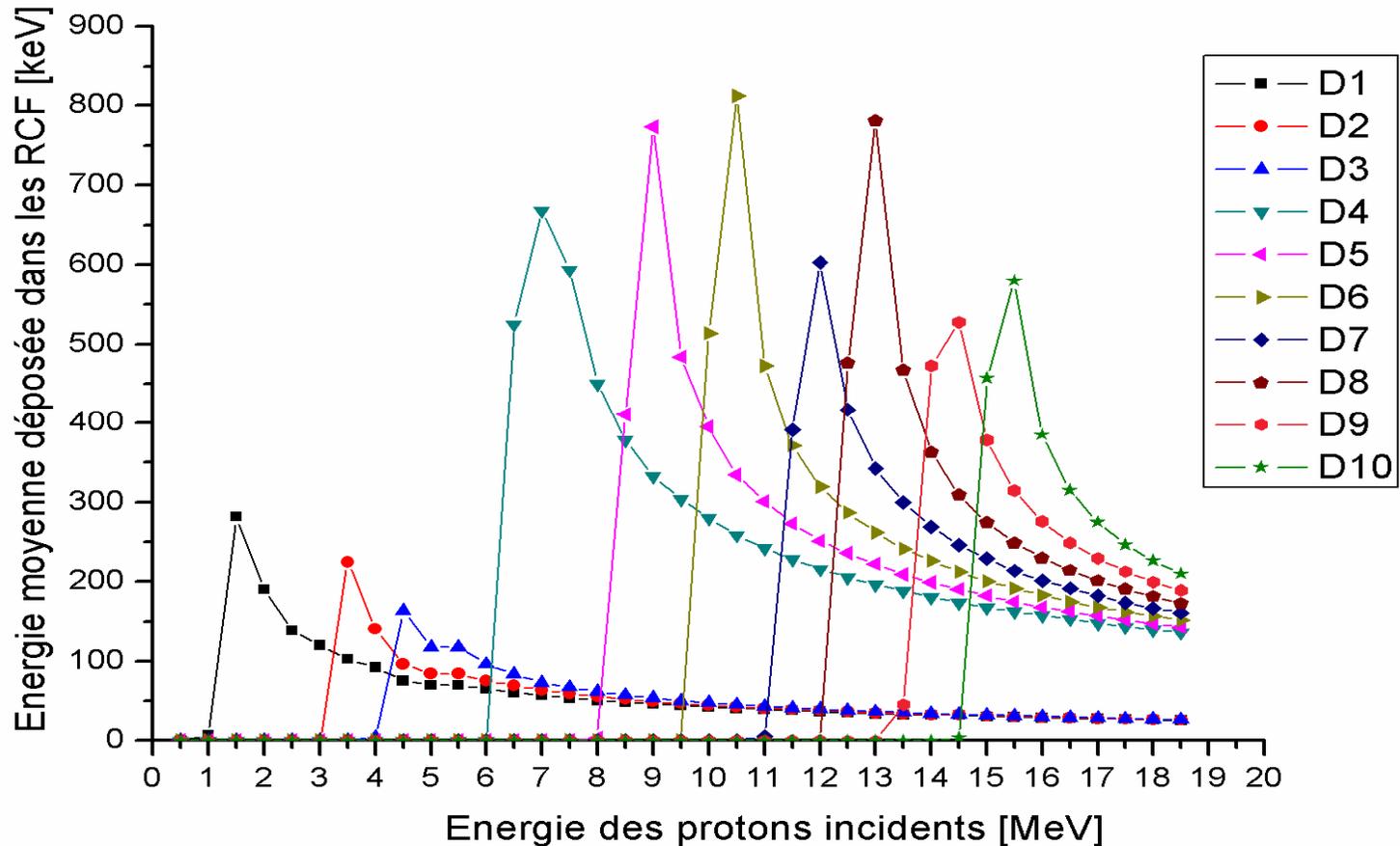


Fonction de réponse simulée avec Geant4.



$$E_{dep}^i = \int \frac{dN_p}{dE_p}(E_p) f_i(E_p) dE_p$$

Fonction de réponse du détecteur.



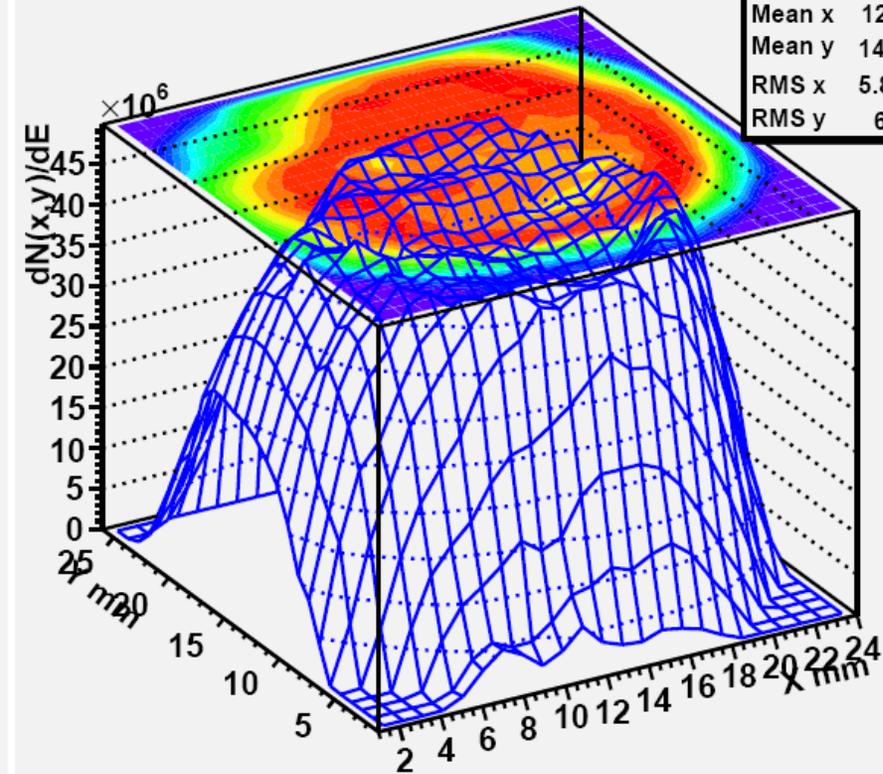
- **Fonction de réponse** \equiv **Energie moyenne perdue par un proton dans chaque zone sensible de l'empilement de RCF en fonction de l'énergie incidente des protons.**
- **Discrétisation des énergies incidentes. Détecteur : 10 RCF \longrightarrow 10 gammes en énergies.**
- **La fonction de réponse du détecteur et l'énergie déposée dans chaque film permet de déconvoluer les images et de remonter aux distributions.**

Distribution spatiale d'un faisceau de protons généré avec un laser intense

Distribution spatiale de la gamme [3,4]MeV

N2(E)

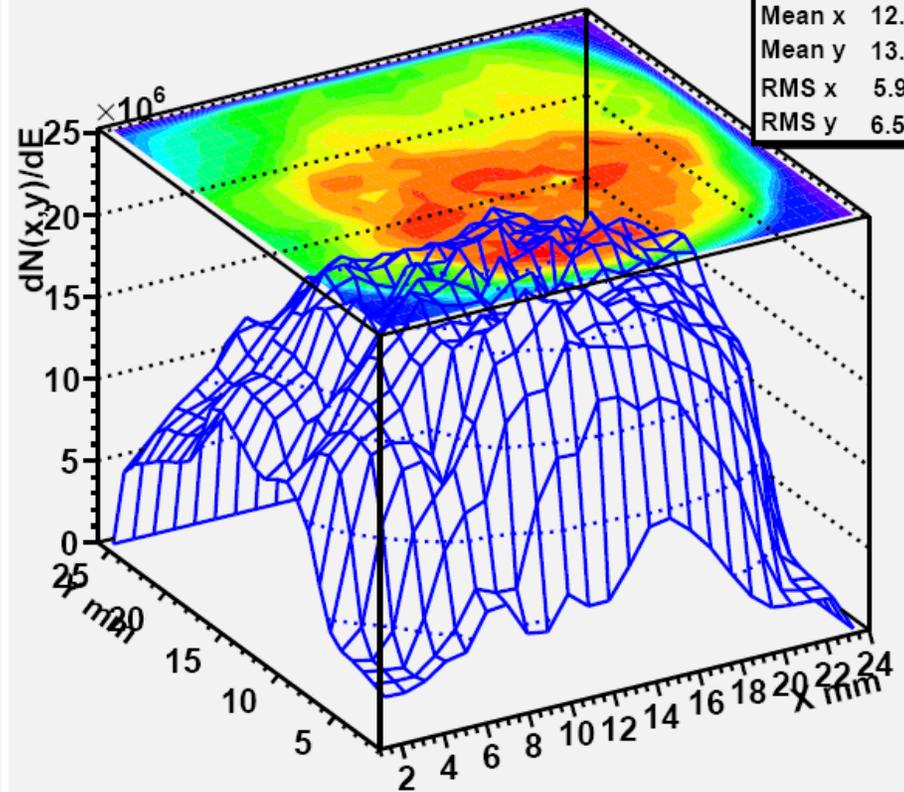
Entries	624
Mean x	12.41
Mean y	14.18
RMS x	5.863
RMS y	6.03



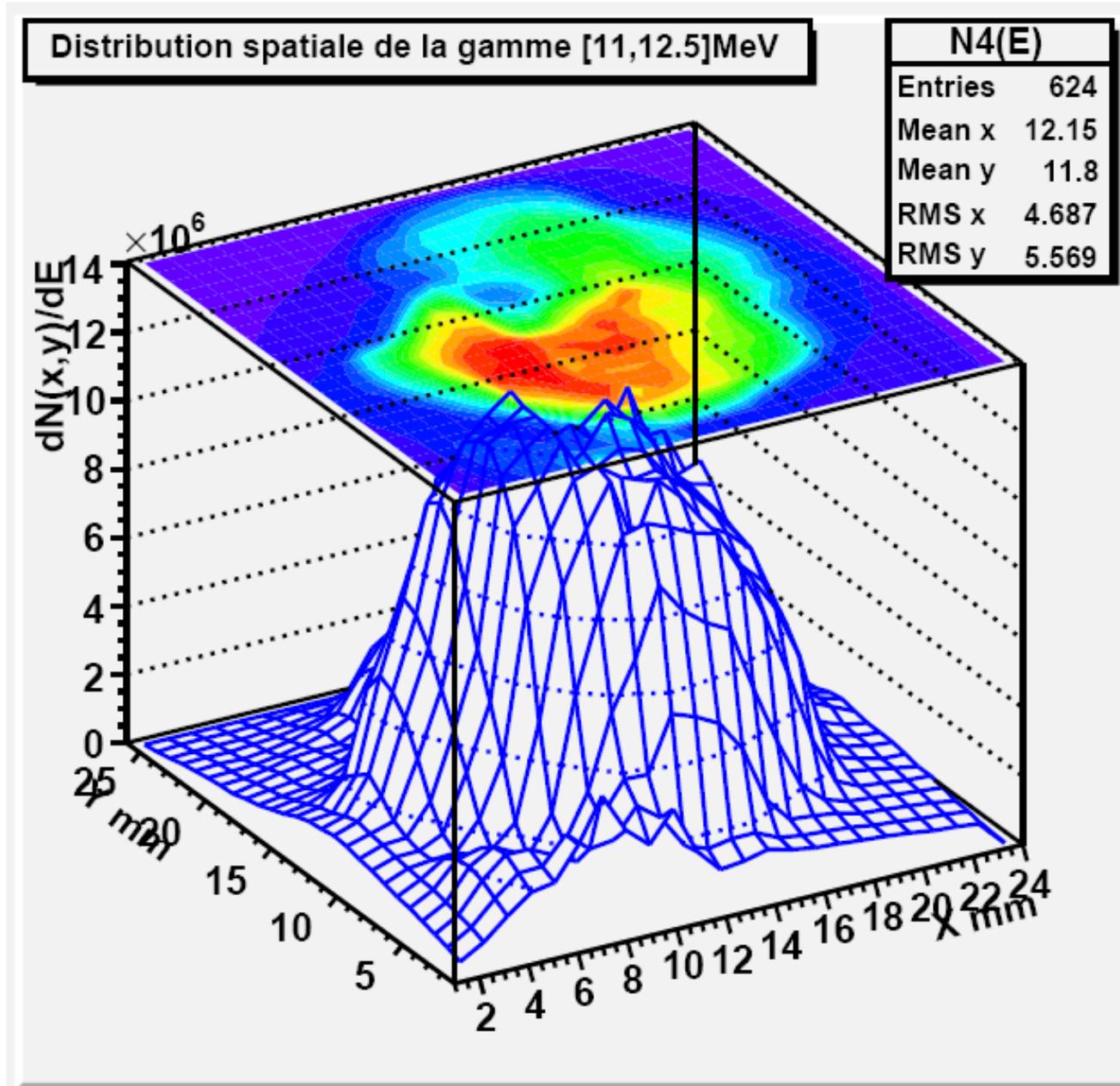
Distribution spatiale de la gamme [6,8]MeV

N(E)

Entries	624
Mean x	12.33
Mean y	13.09
RMS x	5.981
RMS y	6.516

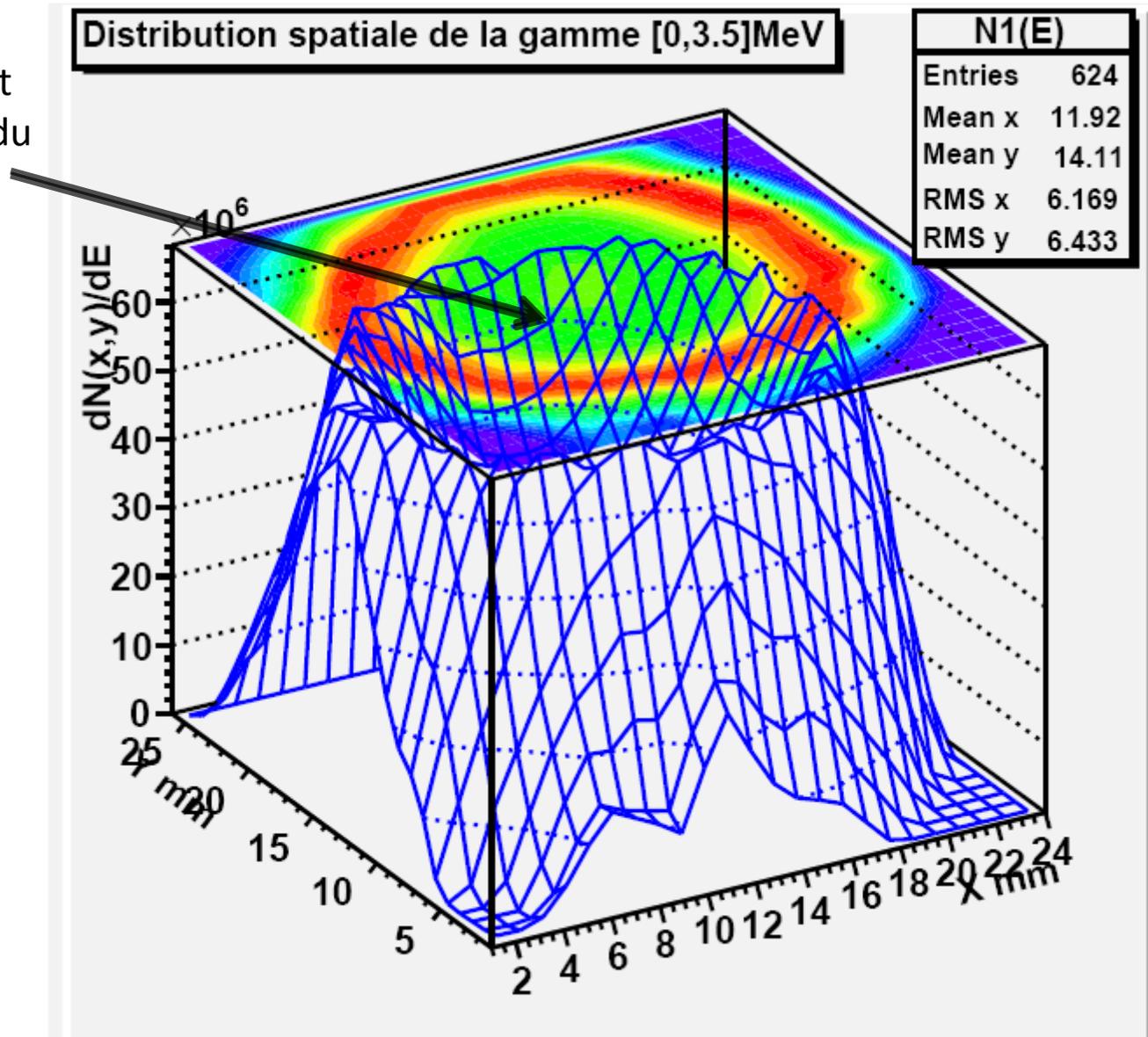


Distribution spatiale pour les énergies de protons les plus élevées



Distribution spatiale des protons peu énergétiques: effet de saturation.

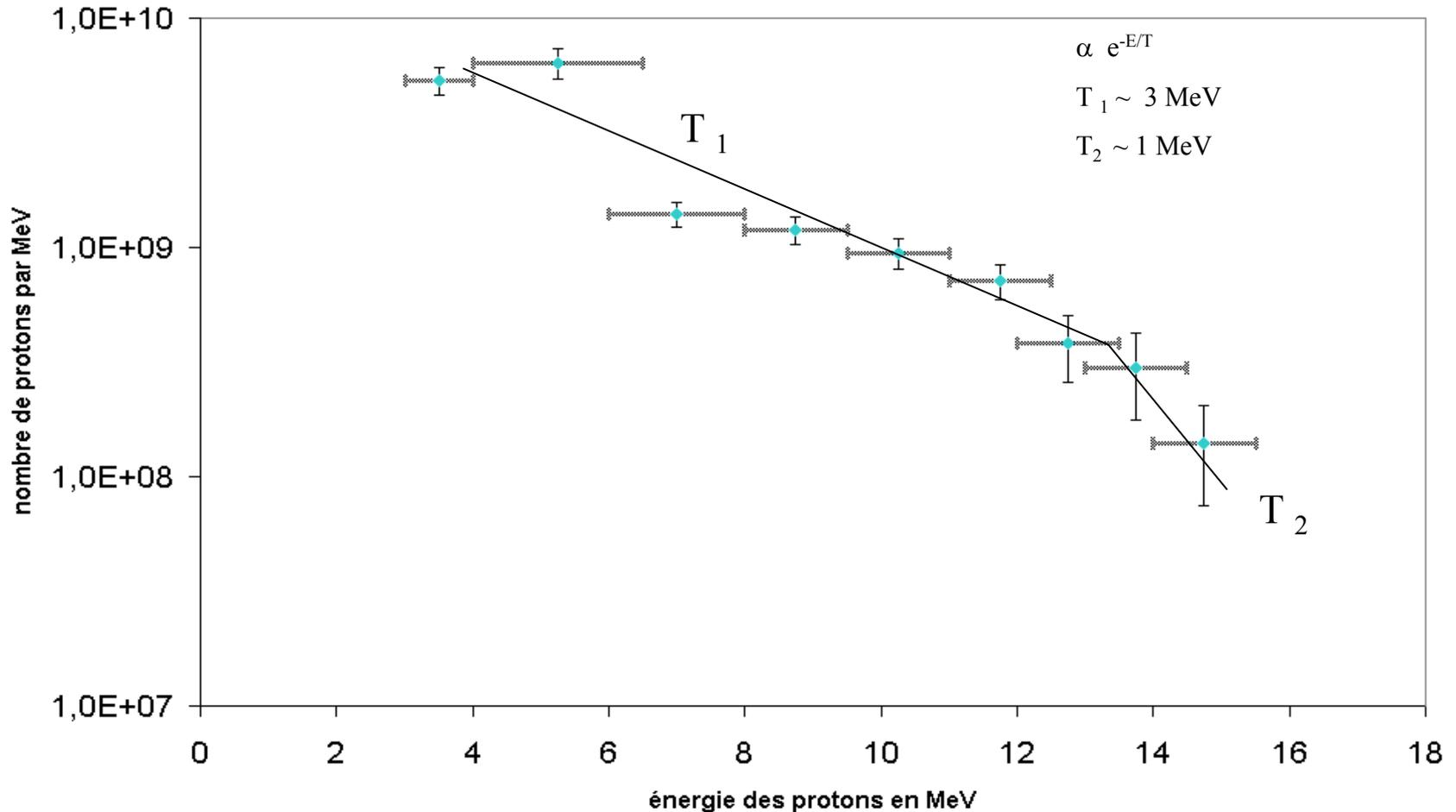
Trou dans la distribution: effet de la saturation du film



Mesure par densitométrie optique

Exemple de distribution en énergie.

Distribution en énergie des protons calculée à partir de l'énergie totale déposée dans chaque film.

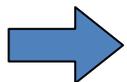


Pourquoi utiliser l'activation nucléaire ?

- L'analyse optique permet d'avoir une image du faisceau de protons avec une bonne résolution spatiale, mais il existe de nombreux doutes sur la fiabilité des résultats quantitatifs obtenus à partir des mesures optiques (fonctions de réponses du constructeur).
- Pas de différentiation possible entre la contribution des protons ou des électrons.
- Les protons produisent des émetteur β^+ dans les films RCF. En mesurant l'activité β^+ on peut isoler la contribution des protons.
- Simulation de l'activation des RCF:

Input: Distribution mesurée par densitométrie.

Comparaison entre l'activité initiale mesurée et simulée dans chaque feuille.



Simulation de l'activation des RCF directement dans le code Geant4.

Activation nucléaire dans Geant4.

- Activation nucléaire

➡ Protons avec une énergie inférieure à 20MeV

- Les sections efficaces des réactions (p,X)

➡ La plupart sont mesurées dans cette gamme d'énergie sauf les (p, γ) mais leurs contributions sont très faibles.

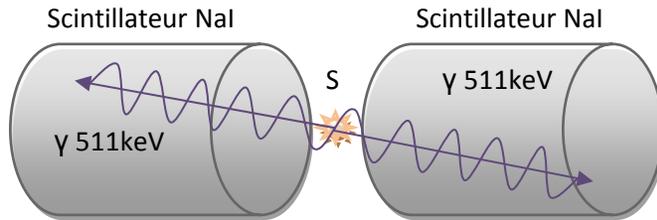
- Les modèles hadroniques de Geant4

➡ Aucun modèle physique ne permet de correctement décrire les sections efficaces de toutes les réactions impliquées (pn), (p, γ), (p, α) pour des protons d'énergie inférieure à 20MeV.

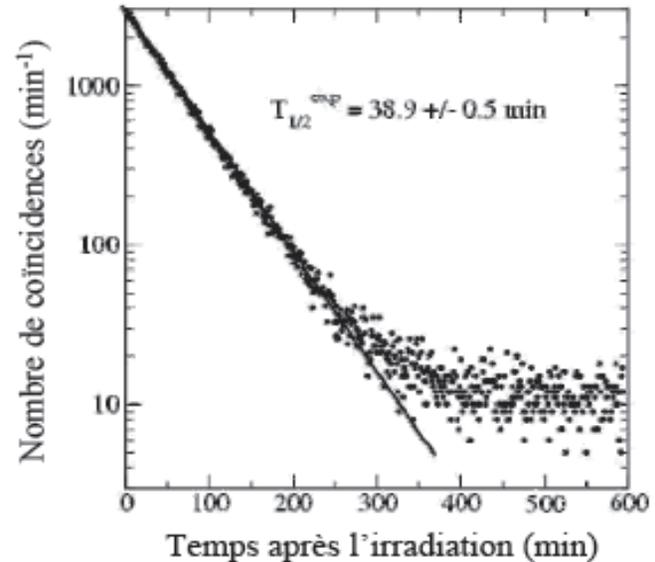
- Introduction de processus physiques dans Geant4 spécifiques à chaque réaction.

Mesures des activités après le tir laser.

- Les mesures d'activités : scintillateurs NaI en coïncidences.



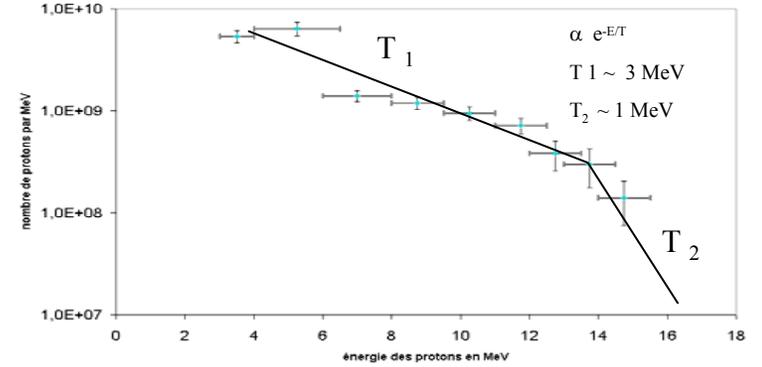
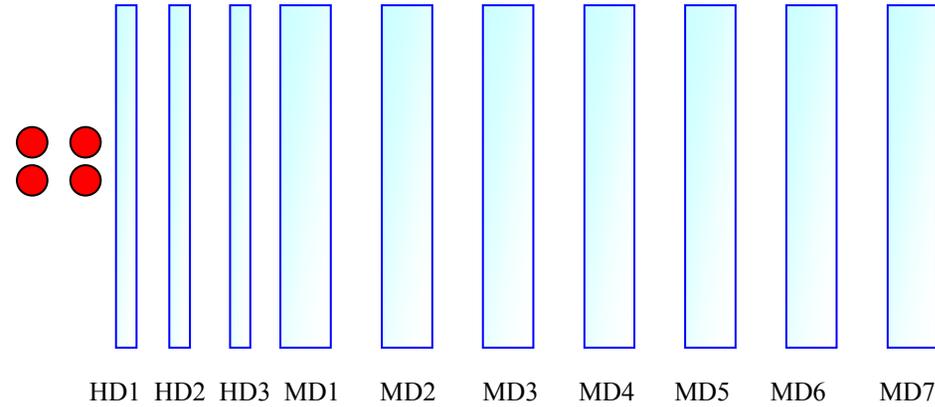
- Pour déterminer le nombre de noyaux produit après le tir les mesures sont corrigées de plusieurs paramètres:
 - Temps entre le tir laser et le début du comptage.
 - Efficacité de détection en coïncidence pour les sources et les géométries utilisées.
 - Temps mort de l'acquisition.



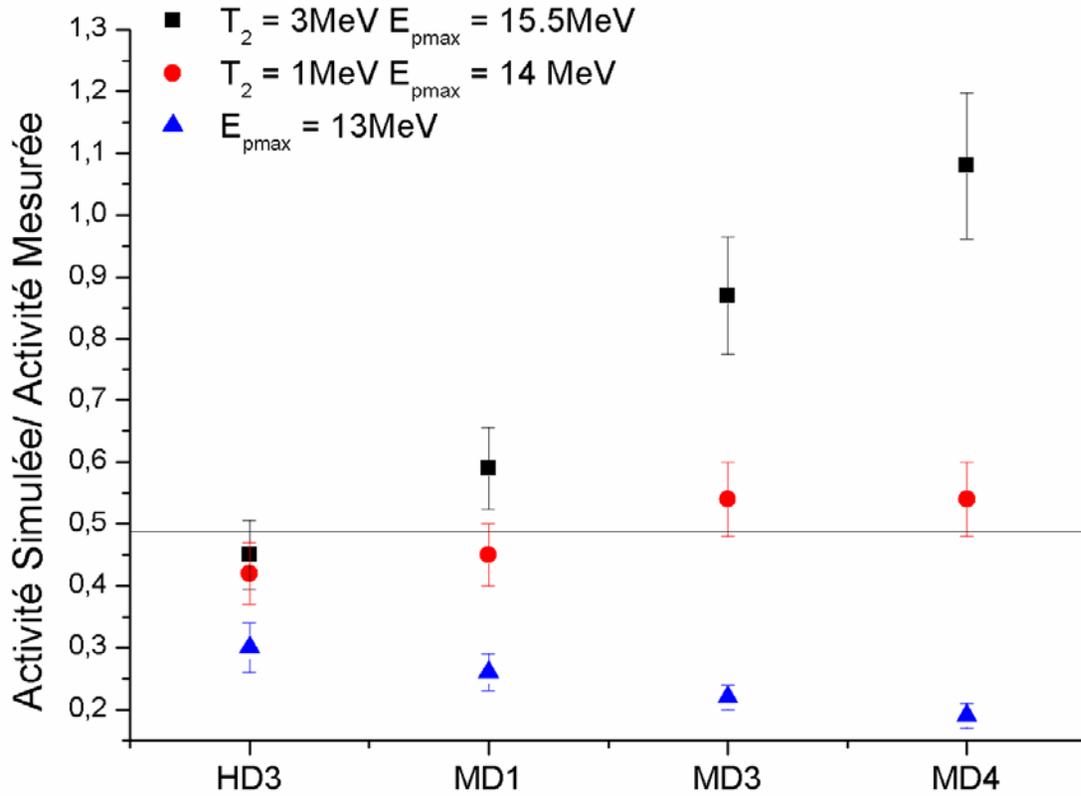
- L'efficacité de détection en coïncidence est déterminée pour chaque sources (^{11}C , ^{63}Zn , ^{13}N) par des simulations Geant4.

Détecteur: empilement RCF

Protons



$T_1 = 3\text{MeV}$ pour $E = [3;13]\text{ MeV}$



$$\frac{dN}{dE}(0\text{MeV}) = (5,0 \pm 0,6)10^{10} \text{ protons.MeV}^{-1}$$

Conclusions et perspectives

- Les films RCF permettent de visualiser rapidement au cours d'une expérience si il y a production de protons lors du tir.
- L'analyse optique permet d'obtenir les paramètres de la distribution en énergie du faisceau de protons, elle donne aussi accès à sa distribution spatiale.

Bémol: Saturation des films à haut flux ($> 10^{10}$ particules)

- La mesure de leur activité β^+ permet de mesurer de façon indépendante la même distribution en énergie au dessus d'un seuil (2 en 1).

Avantage : Pas de saturation.

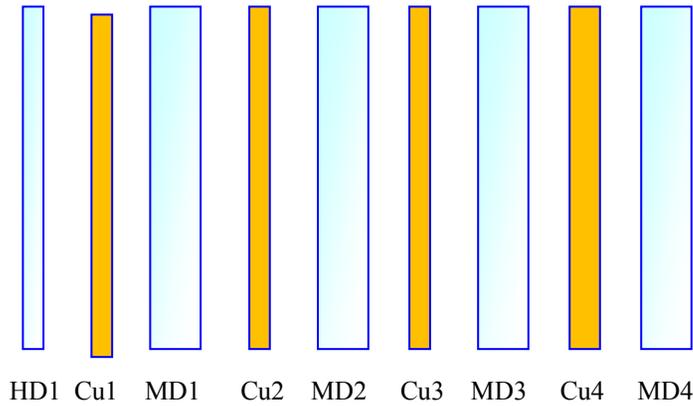
Perspectives :

- Des mesures avec un plus grand nombre d'échantillons permettront de mieux caractériser les distributions de protons. Un projet ANR est actuellement en cours pour mettre en place d'un ensemble de détecteurs qui permettront de compter 16 échantillons simultanément au lieu de 6 actuellement.

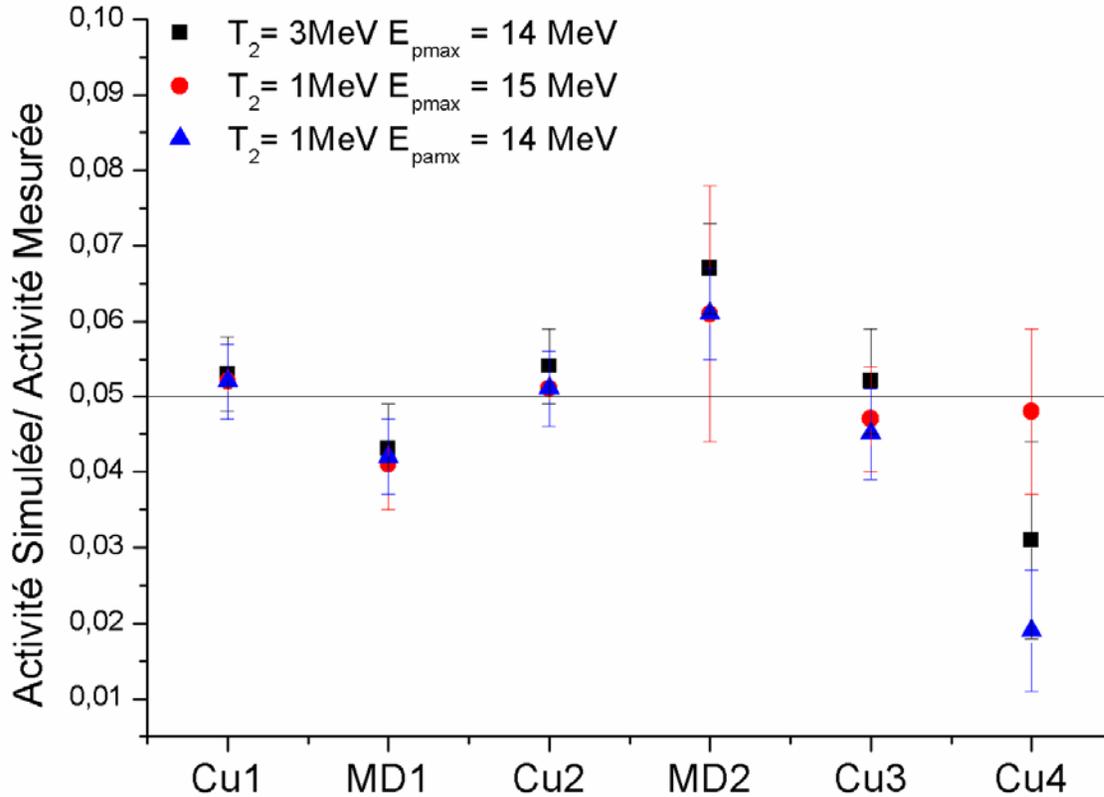
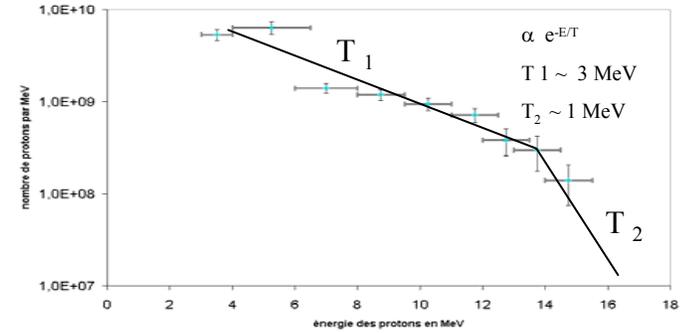
Merci de votre attention!

Détecteur: empilement mixte RCF+ cuivre

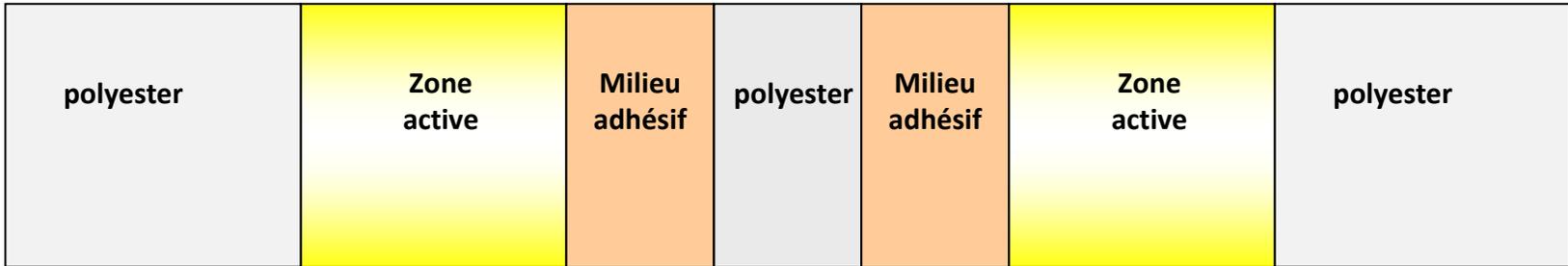
Protons



$T_1 = 3\text{MeV}$ pour $E = [3;13]$ MeV



$$\frac{dN}{dE}(0\text{MeV}) = (5,1 \pm 0,7)10^{10} \text{ protons.MeV}^{-1}$$

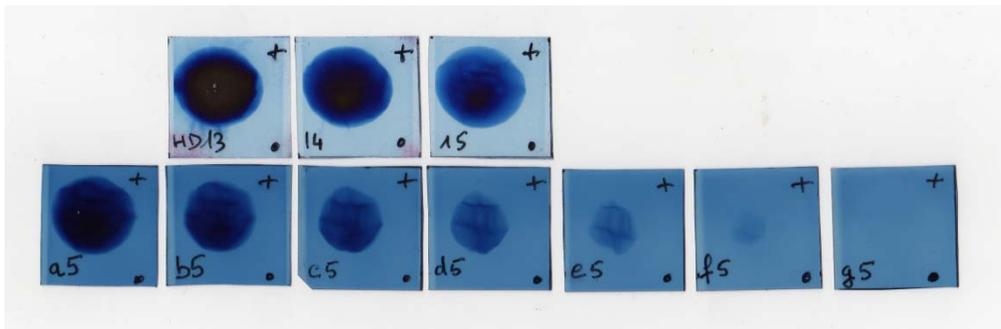
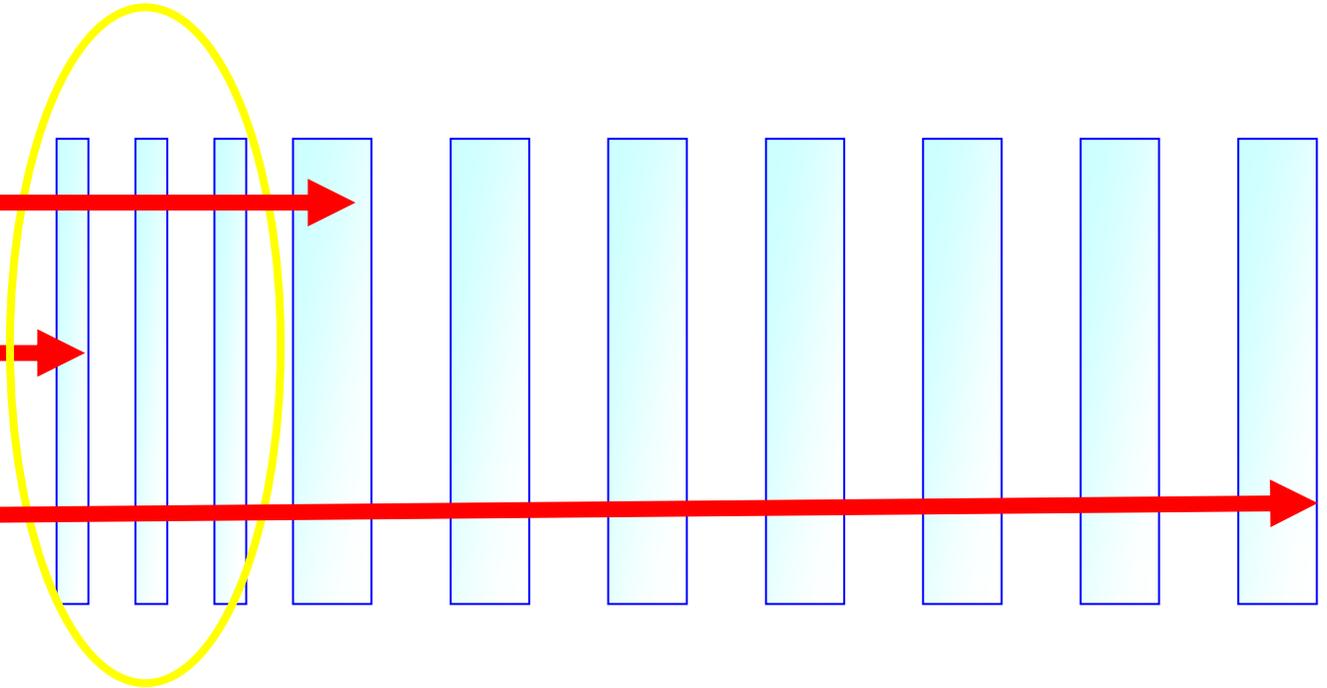


Protons

8 MeV

3 MeV

15 MeV

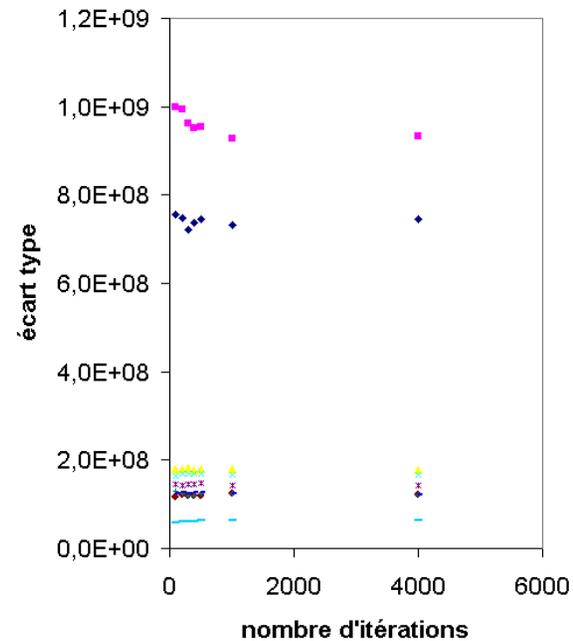
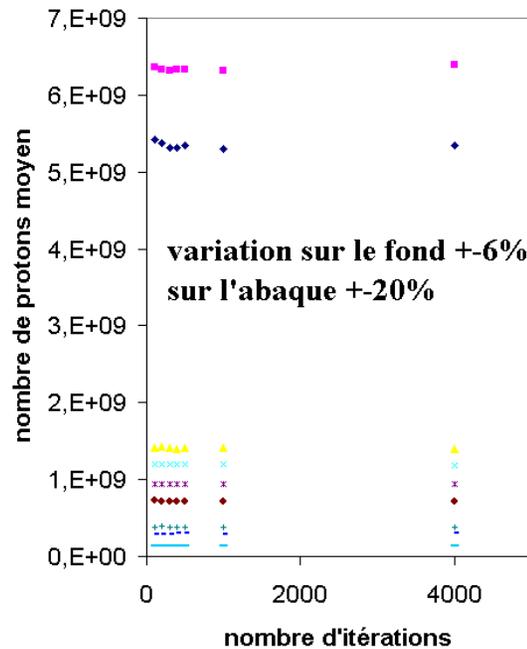


Incertitudes sur le nombre de protons

Incertitudes sur l'abaque ($\pm 20\%$) et l'intensité de fond ($\pm 6\%$)

Programme choisi aléatoirement des valeurs dans ces encadrements

Etude de la convergence du nombre moyen de protons et de son écart type



Mesure par densitométrie optique

ETAPE 3: Déconvolution.

- A partir de la dose déposée $D(x,y)$ il est possible de remonter à la fonction de l'énergie déposée $E(x,y)$ pour chaque films.
- La matrice de fonction de réponse doit être triangulaire. On associe l'arrêt des protons d'une gamme donnée dans un film donné.
- Exemple simplifié de déconvolution sur 4 films. Soit N_1, N_2, N_3, N_4 les quatre gammes en énergies considérées.
- En partant du dernier film irradié:

$$\begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 & 0 \\ M_{12} & M_{22} & 0 & 0 \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} & 0 \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & E_{44} \end{pmatrix}$$

$$N_4(x, y) = \frac{E_{film4}(x, y)}{M_{44}}$$

L'énergie déposée dans le film 3 est la somme de l'énergie déposée par les protons N_3 et de l'énergie déposée par le passage des protons de N_4 .

Où M_{ij} Energie déposée par les protons de la gammes j dans la feuille i

$$N_3(x, y) = \frac{E_{film3}(x, y) - N_4(x, y) * M_{34}}{M_{33}}$$

- Dans le cas de notre détecteur il faut répéter cette opération sur les 10 films.
- A partir de ces mesures, il est possible d'estimer la température moyenne d'une distribution ou bien de regarder la répartition spatiale des protons de différentes gammes en énergie ou encore de regarder localement l'évolution de la température des protons.

Mesure par densitométrie optique

ETAPE 4: Distribution spatiale et angulaire.

