

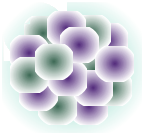
# Produire des radioisotopes dans l'interaction laser-plasma et les utiliser

Medhi Tarisien & Fazia Hannachi

CENBG IN2P3-CNRS Université de Bordeaux

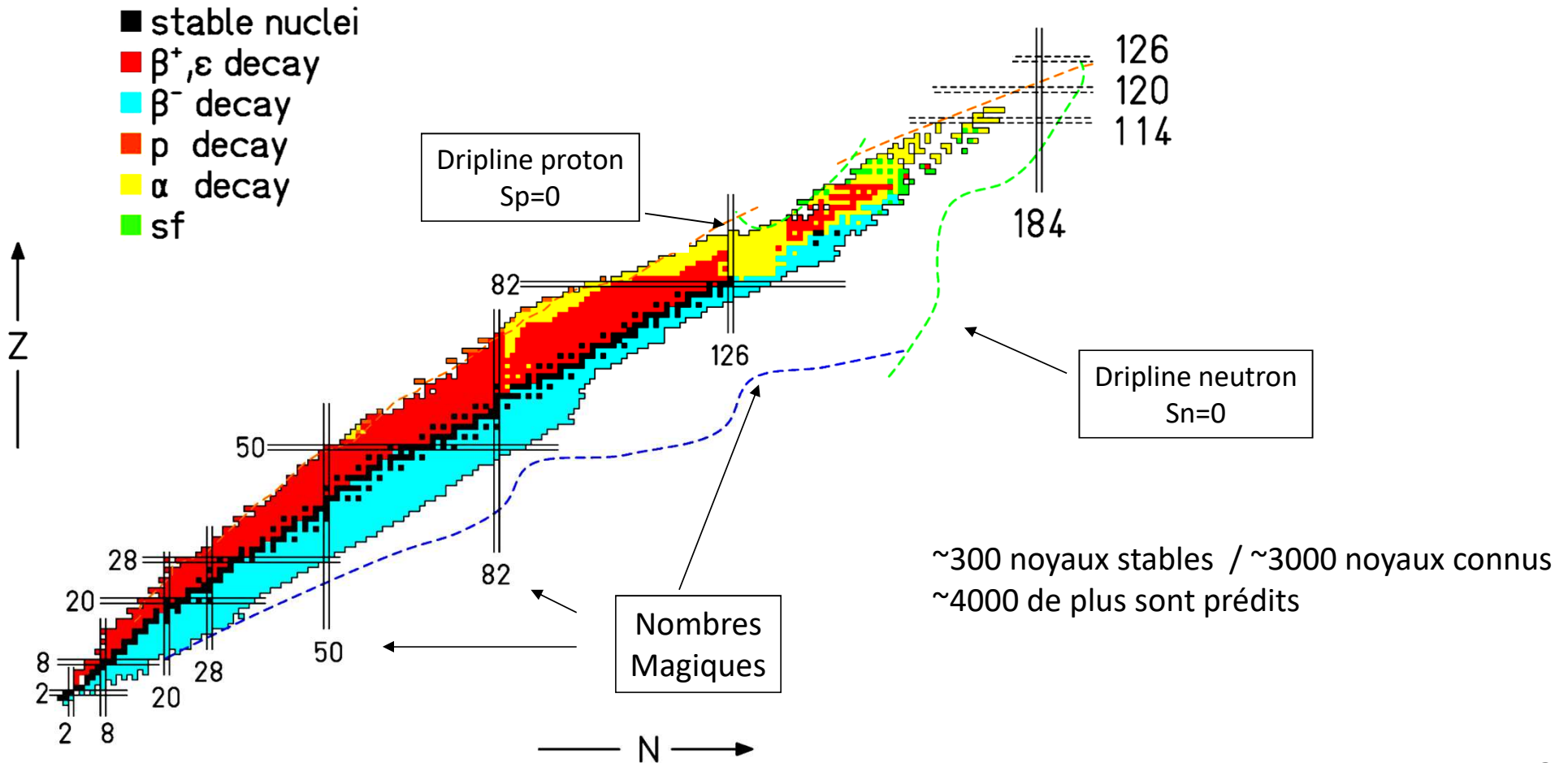
Plan

- 1) Généralités
- 2) Production
- 3) Mesures d'activités
- 4) Utilisation auprès des lasers
- 5) Conclusion



Z protons, N neutrons  
Nombre de Masse  $A = Z+N$

# Carte des Noyaux

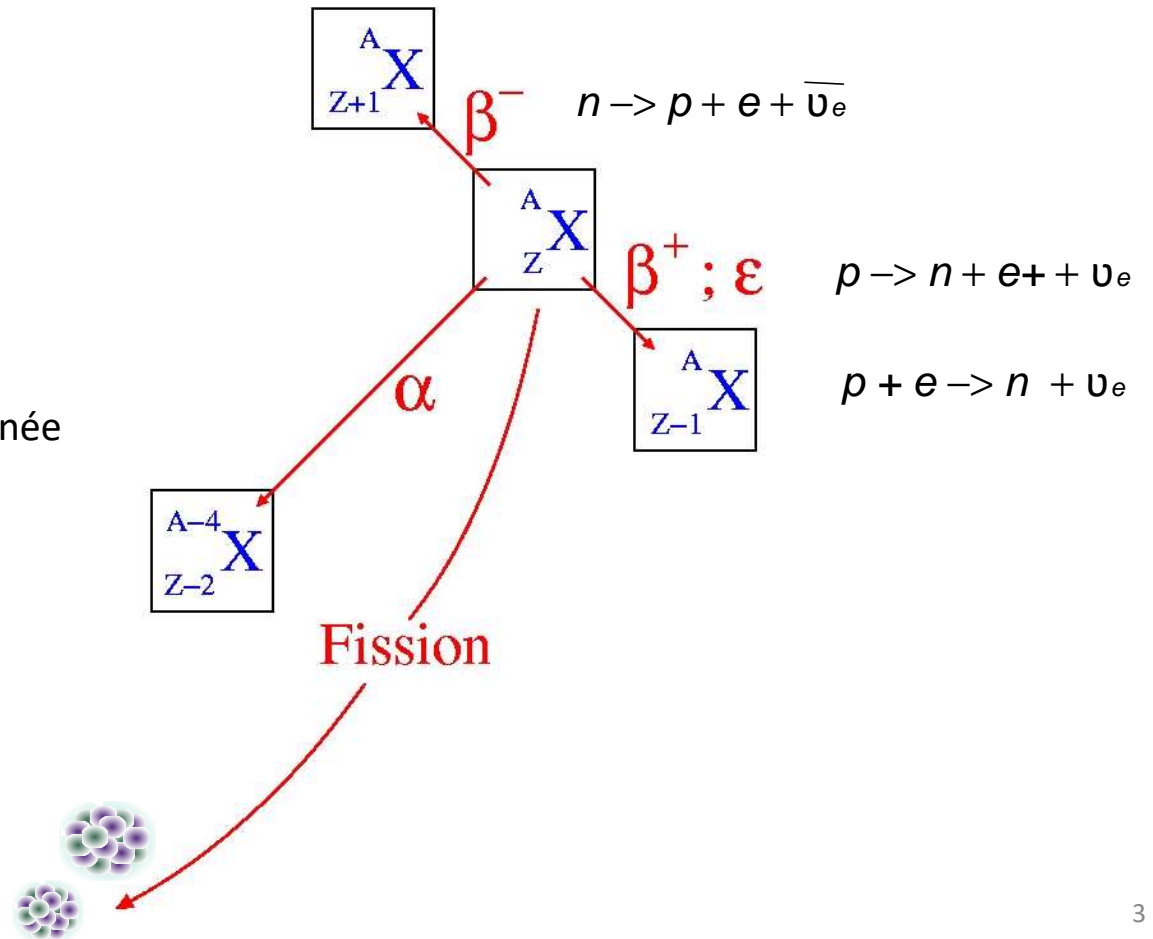


# Le noyau atomique

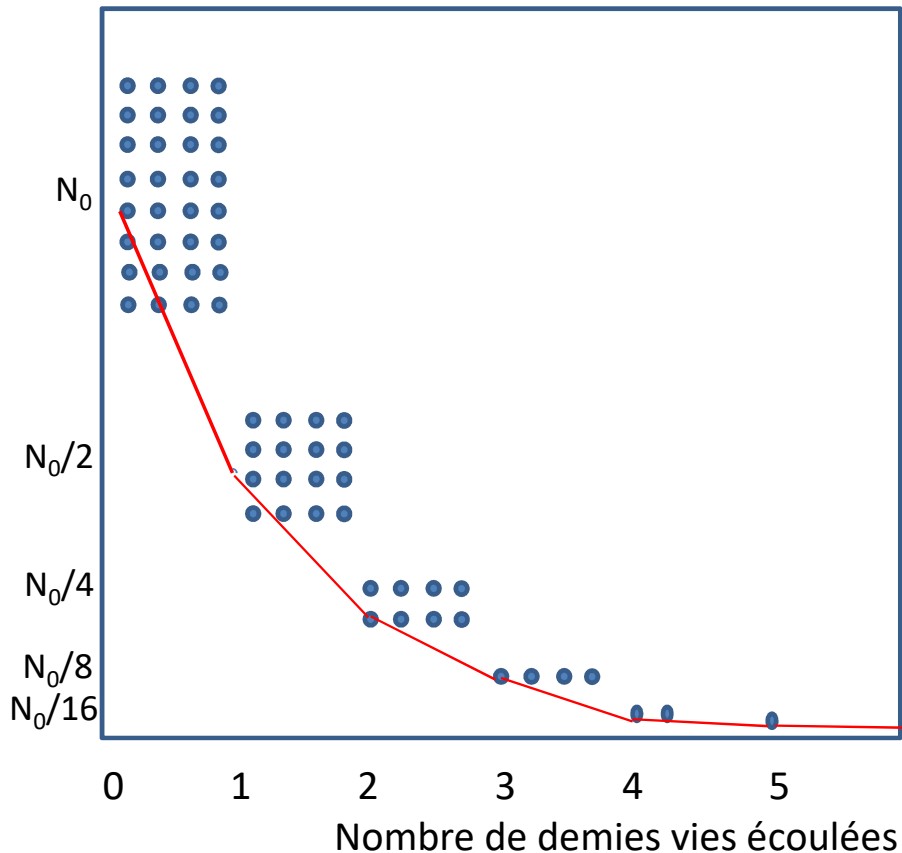
Modes de décroissance vers des états excités et/ou état fondamental

- Emission  $\gamma$
- Conversion interne

- Radioactivité  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ , CE
- Radioactivité  $\alpha$ , Fission spontanée
- Radioactivité p, 2p ....



# Décroissance radioactive



$\tau = 1/\lambda$  vie moyenne     $T_{1/2} = \ln 2/\lambda$  demie vie

$\lambda$  : constante de désintégration radioactive en  $s^{-1}$

**Activité** à l'instant  $t$  :  $dN/dt = -\lambda N(t)$  en becquerel

*1 curie (Cu) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq : activité de 1 g de radium*

$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t)$  Nombre de noyaux restants à l'instant  $t$

Au bout de 6 demies vies:  $N(t=6 T_{1/2}) = N_0 / 2^6 = 1,5\% N_0$

Au bout de 10 demies vies:  $N(t=10 T_{1/2}) = N_0 / 2^{10} \sim 0,1\% N_0$



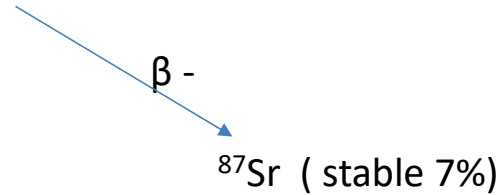
**saturation de la production de radio isotopes**

# Utilisation des radioisotopes naturels

## DATATION:

Age du système solaire à partir de la teneur relative de roches terrestres et des météorites en isotopes de  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  et

$^{87}\text{Rb}$  ( $T_{1/2} = 6,8 \cdot 10^{10}$  ans,  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ )

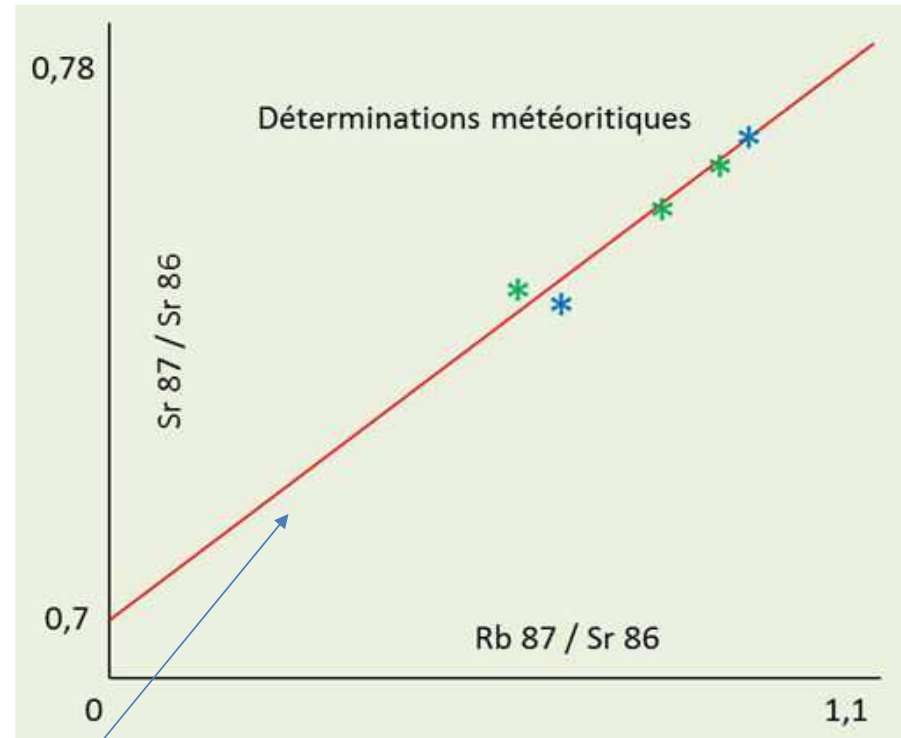


$^{86}\text{Sr}$  (stable, 9,86%)

$T_s$  : âge du système solaire

Pente de la courbe =  $\exp[(\lambda \cdot t_s) - 1]$

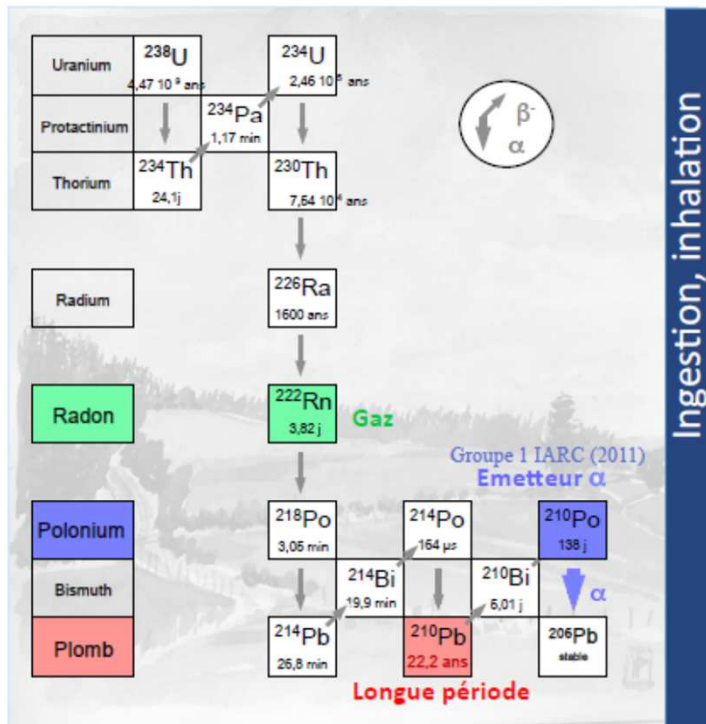
**$T_s = 4,54 \cdot 10^9$  ans**



Cours de Claude Gimenez

**EN RECHERCHE MEDICALE: mesure de très faibles activités naturelles (Ch Marquet, CENBG)**

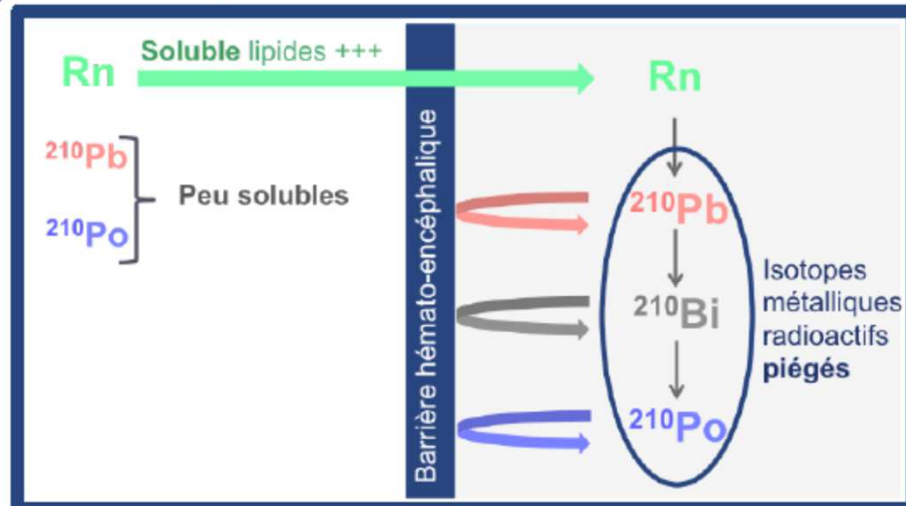
**Radioactivité naturelle**



... et encéphale...



Echantillons cerveaux humains



Momčilovic et al, 2001 C.J. Groves-Kirkby et al, 2006

**Recherche du  $^{210}\text{Pb}$  dans des échantillons de cerveaux (Alzheimer, glioblastomes, témoins)**

# Utilisation des radio isotopes artificiels

## 1) Généralités

**Industrie:** sources radioactives très intenses:  $^{60}\text{Co}$  produites par  $^{59}\text{Co}$  (n,g) auprès de réacteurs pour la stérilisation de légumes...

**Médecine:** radioisotopes pour l'imagerie/diagnostics et les soins (radiothérapie vectorisée, curiethérapie): Production auprès de cyclotrons, accélérateurs linéaires et réacteurs...

**Recherche fondamentale:** physique nucléaire auprès d'accélérateurs conventionnels et auprès d'A.L.P (cibles plasmas), physique des plasmas (diagnostics des faisceaux d'ions)

$^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  
 $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  
 $^{64}\text{Cu}$



11 MeV

$^{67}\text{Ga}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  
 $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{68}\text{Ge}$



30 MeV

$^{82}\text{Sr}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,...



70 MeV

$^{82}\text{Sr}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ...

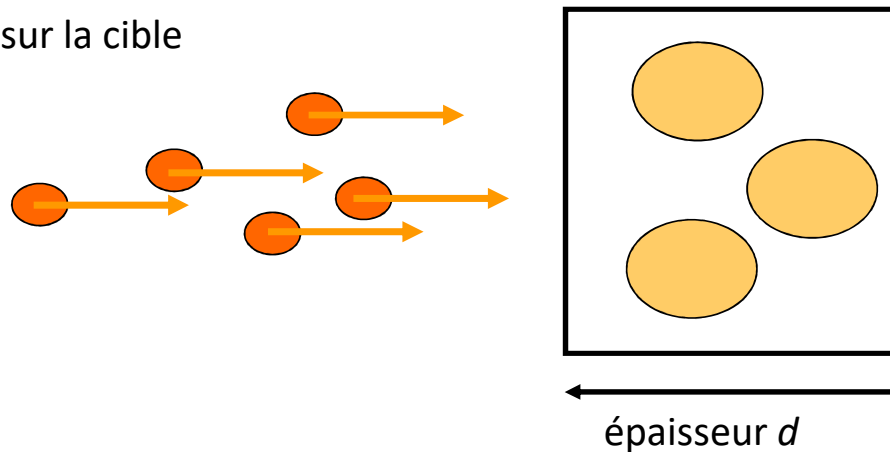


INR-RAS

Linear accelerator  
160 MeV

# Taux de production

$I$  = nb de projectiles incidents sur la cible



$d\rho$  = nb de noyaux cibles/cm<sup>2</sup>

$$= \rho \cdot d \cdot N_{\text{Avogadro}} / A$$

si le faisceau de particules est monoénergétique:  $R = \text{nombre de réactions} = \sigma I d\rho$

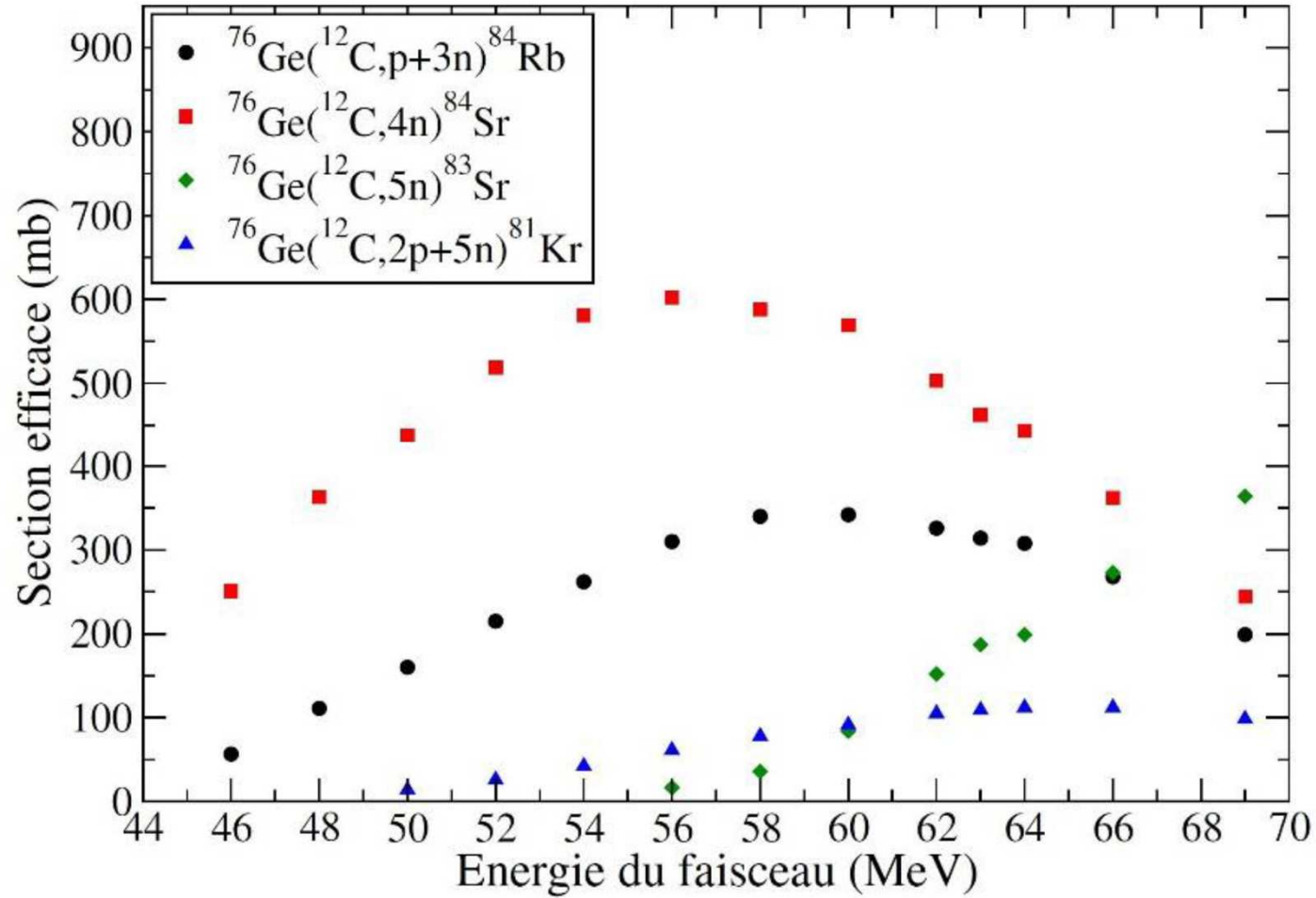
Section efficace:  $\sigma$  “portion d’un noyau cible effectivement vue par un projectile”

Unités: 1 barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup> ( =  $10^6$  fm<sup>2</sup> ) ~ Section d’un noyau d’Uranium ~ 100 fm<sup>2</sup>

Rayon nucléaire:  $\sim 1.3 A^{1/3}$  [fm] ~ 6 fm pour l’uranium, 3 fm pour l’aluminium



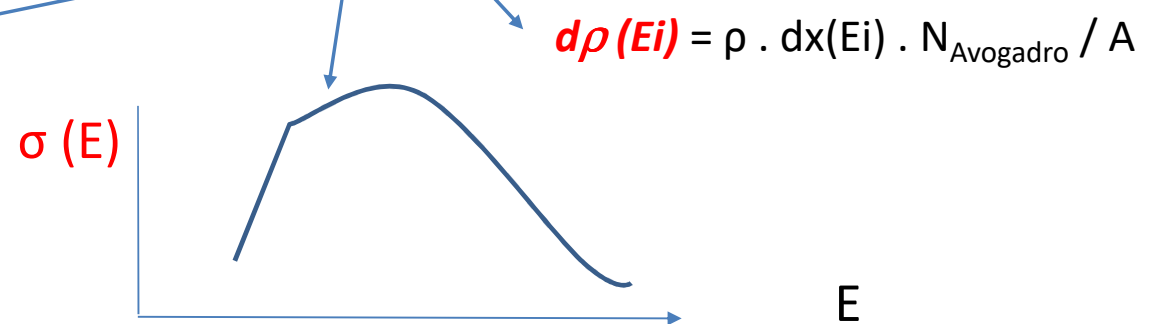
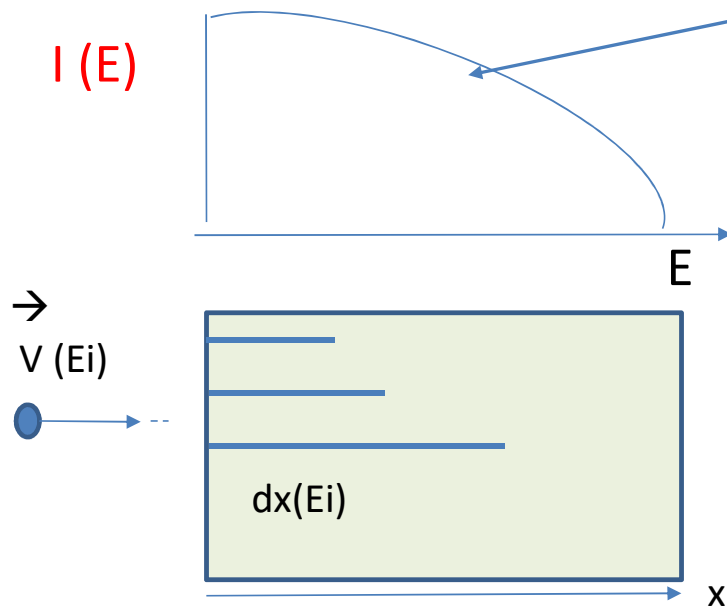
Cas 1 : cibles monoisotopiques : plusieurs isotopes formés



# Production pendant 1 tir laser

2) Production

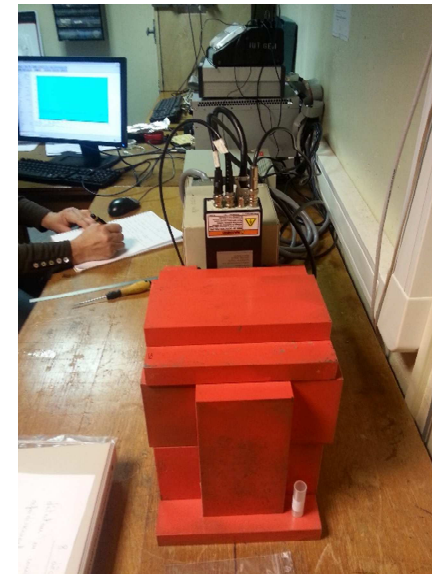
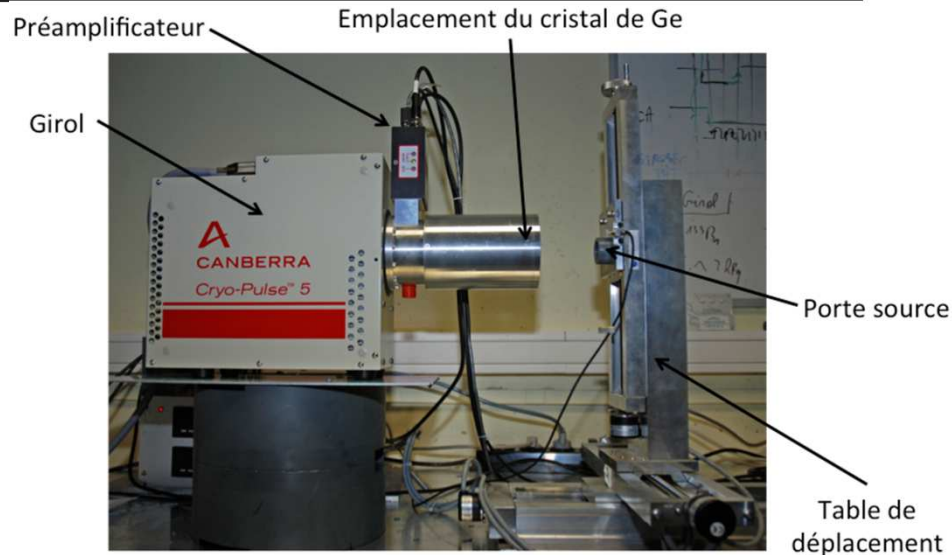
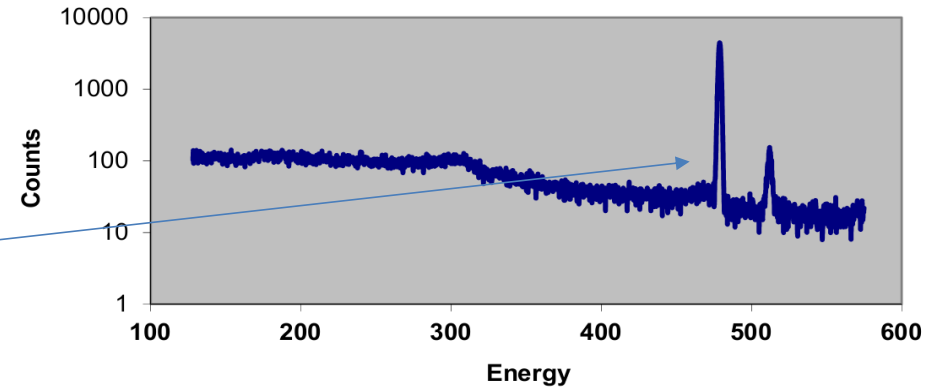
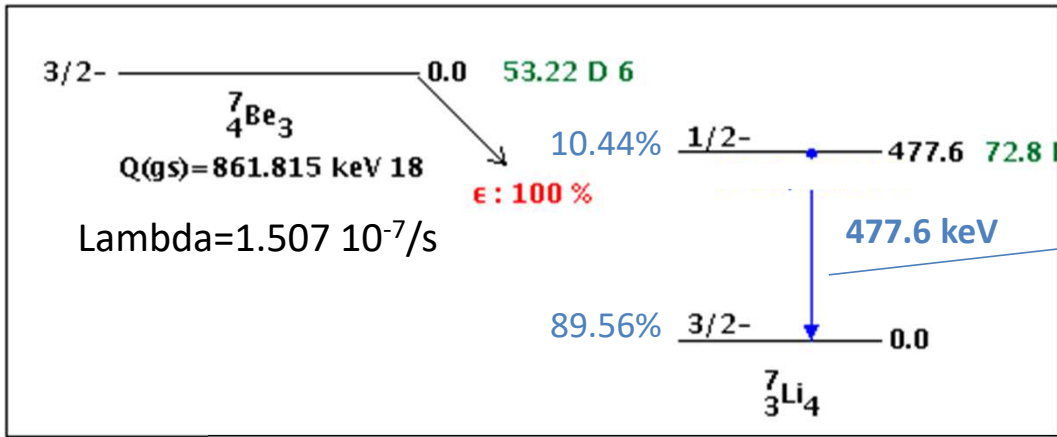
faisceau de particules monoénergétique: nombre de réactions /tir =  $I \sigma d\rho$



➔ Evaluation numérique du nombre d'isotopes produits FLUKA, GEANT4...

# Mesure activité $\gamma$

## 3) Mesures d'activités



# Mesure d'activité $\gamma$ in-situ

ELFIE experiment 2016

0,1 PW ;  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>

acceleration  
laser

Target  
13  $\mu$ m Al

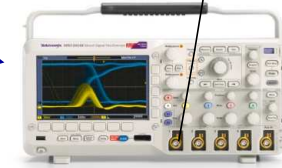
protons

$^{90}\text{Zr}(p,n)^{90}\text{Nb}$

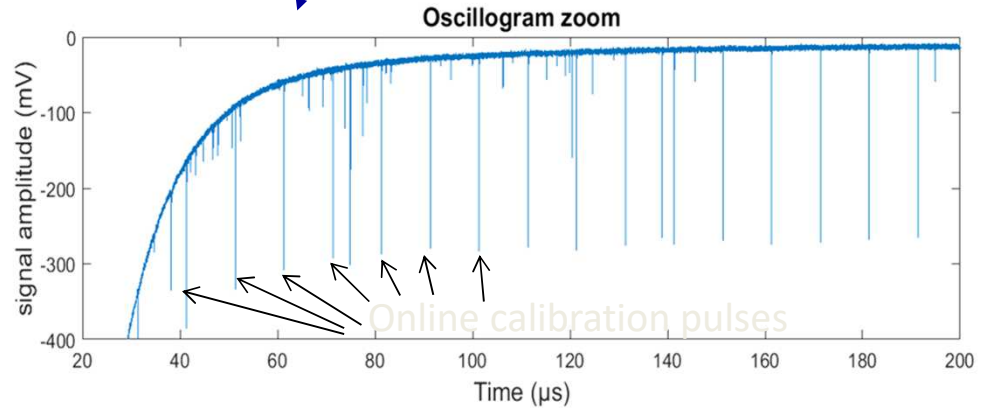
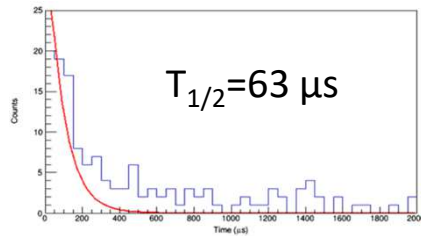
$^{90}\text{Zr}$

$^{90m}\text{Nb}$

LaBr<sub>3</sub>+HPD

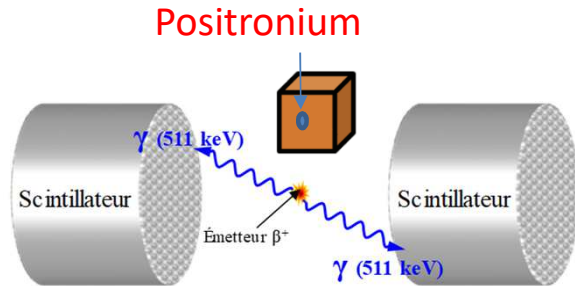


Isomeric state Energy and spin	Half life	Emitted gamma ray energy
122 keV	63 $\mu$ s	122 keV
382 keV ; 1+	6.19 ms	257 keV



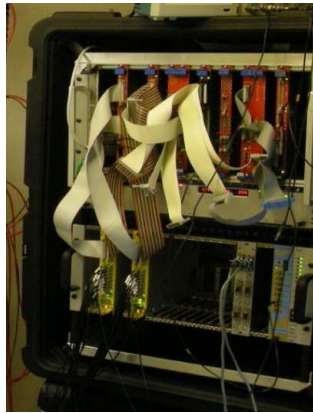
M.Tarisien, et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 65, issue 8, p.2216-2219 (2018)

# Mesure activité $\beta^+$



Mesure de l'énergie déposée [511 keV]  
 Mesure en coïncidence ( $>1b+.s^{-1}$ )  
 Grande gamme d'activité + mesure de période  
 Mesure du temps mort instantané

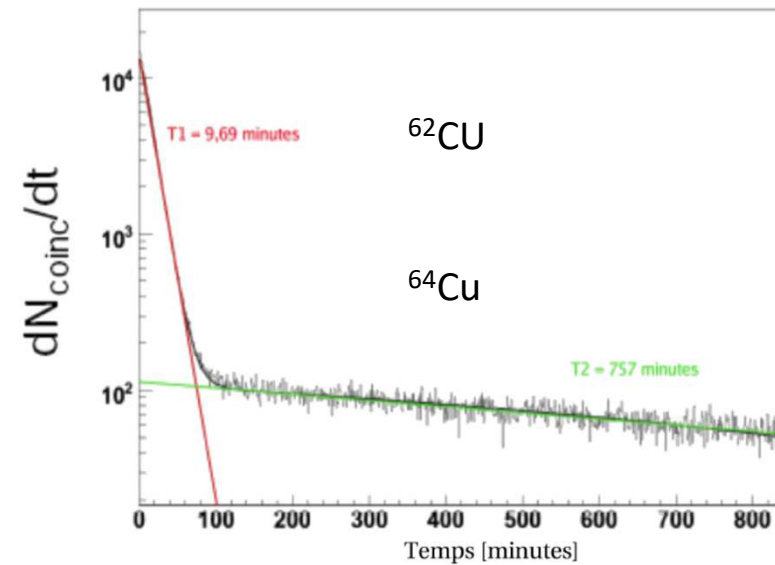
Système électronique compact \*



*M.Tarisien, et al., Rev.Sci.Instr. 82, 023302 (2011)*

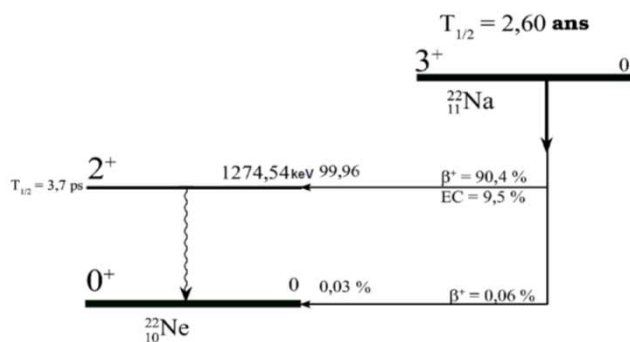
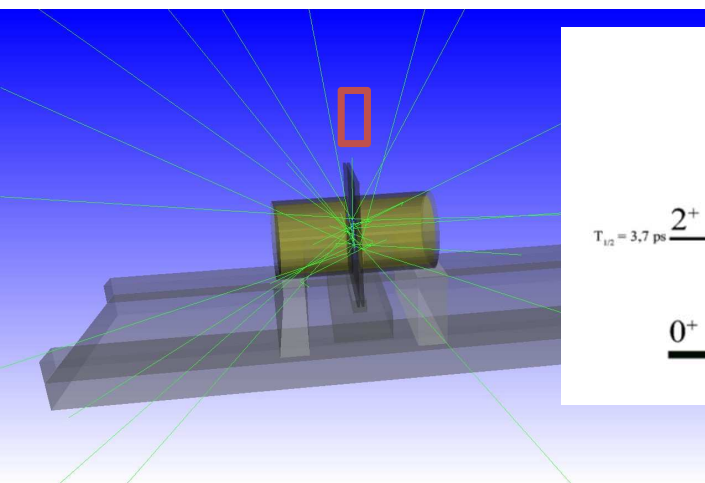
- Financé par l' ANR N° ANR-07-JCJC-0158 M. le contrat IN2P3/ Région Aquitaine/Université Bordeaux 1 n° 20071304005

Institut Laser Plasma – Belgodère - septembre 2021

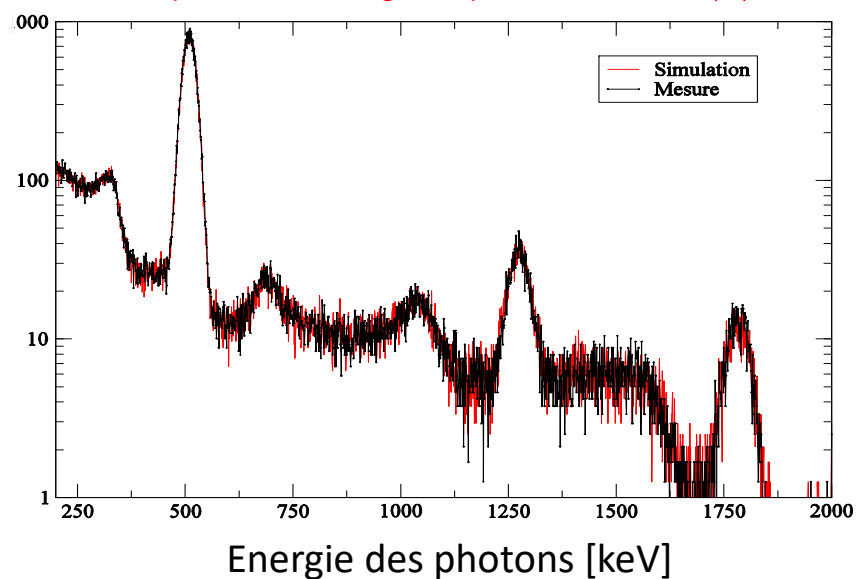


## Simulation des efficacités de détection de sources étendues

- Efficacité de détection non mesurable : sources de dimensions (de qq mm à qq cm) et de natures non standards



$^{22}\text{Na}$ : Spectres des énergies déposées dans le NaI(Tl)



Les efficacités de détection  $\beta^+$  sont :

- **Simulées et mesurées** pour la **source quasi-punctuelle**

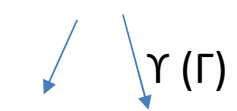
Commerciale de  $^{22}\text{Na}$  afin de valider la simulation

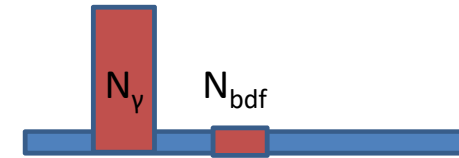
- **Simulées** pour toutes les autres sources radioactives **non ponctuelles**.

Efficacité $\beta^+$	Mesurée	Simulée
$^{22}\text{Na}$	$(4.9 \pm 0.1)\%$	$(4.8 \pm 0.2)\%$

# Mesure du taux de production: $\gamma$

à **taux constant** par unité de charge du faisceau incident (Q) et par seconde

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$




$$N_{\text{tir}} = e^{\lambda(t_{0\text{acq}} - t_{f\text{irr}})} \frac{N_{\gamma} - N_{\text{bdf}}}{\Gamma \epsilon (1 - e^{-\lambda \Delta t_{\text{mes}}})}$$

$\Gamma$ : Rapport d'embranchement du photon détecté

$\epsilon$ : efficacité de détection

## Mesure du nombre d'isotopes produits

- Pendant  $n$  tirs laser: on mesure le nombre de radioisotopes présents à la fin du tir ( $T_n$ )
- Cas  $n=3$

The diagram shows a horizontal timeline with an arrow pointing to the right. Three vertical tick marks are labeled  $T_0$ ,  $T_1$ , and  $T_2$  from left to right. Two more vertical tick marks are labeled  $t_{0acq}$  and  $t_{facq}$  from left to right. A blue bracket is drawn below the timeline, starting at  $T_0$  and ending at  $T_2$ , with the label  $N(T_2)$  above it. A black bracket is drawn above the timeline, starting at  $t_{0acq}$  and ending at  $t_{facq}$ , with the label  $\Delta t_{mes}$  above it.

$$N_{tir} \cdot [\exp -\lambda.(T_2 - T_0) + \exp -\lambda.(T_2 - T_1) + 1] = \exp \lambda.(t_{0acq} - T_2) \cdot (N_\gamma - N_{bdf}) / \varepsilon \cdot \Gamma \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot \Delta t_{mes}))$$



Manip elfie 2015 (C Baccou):  $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$

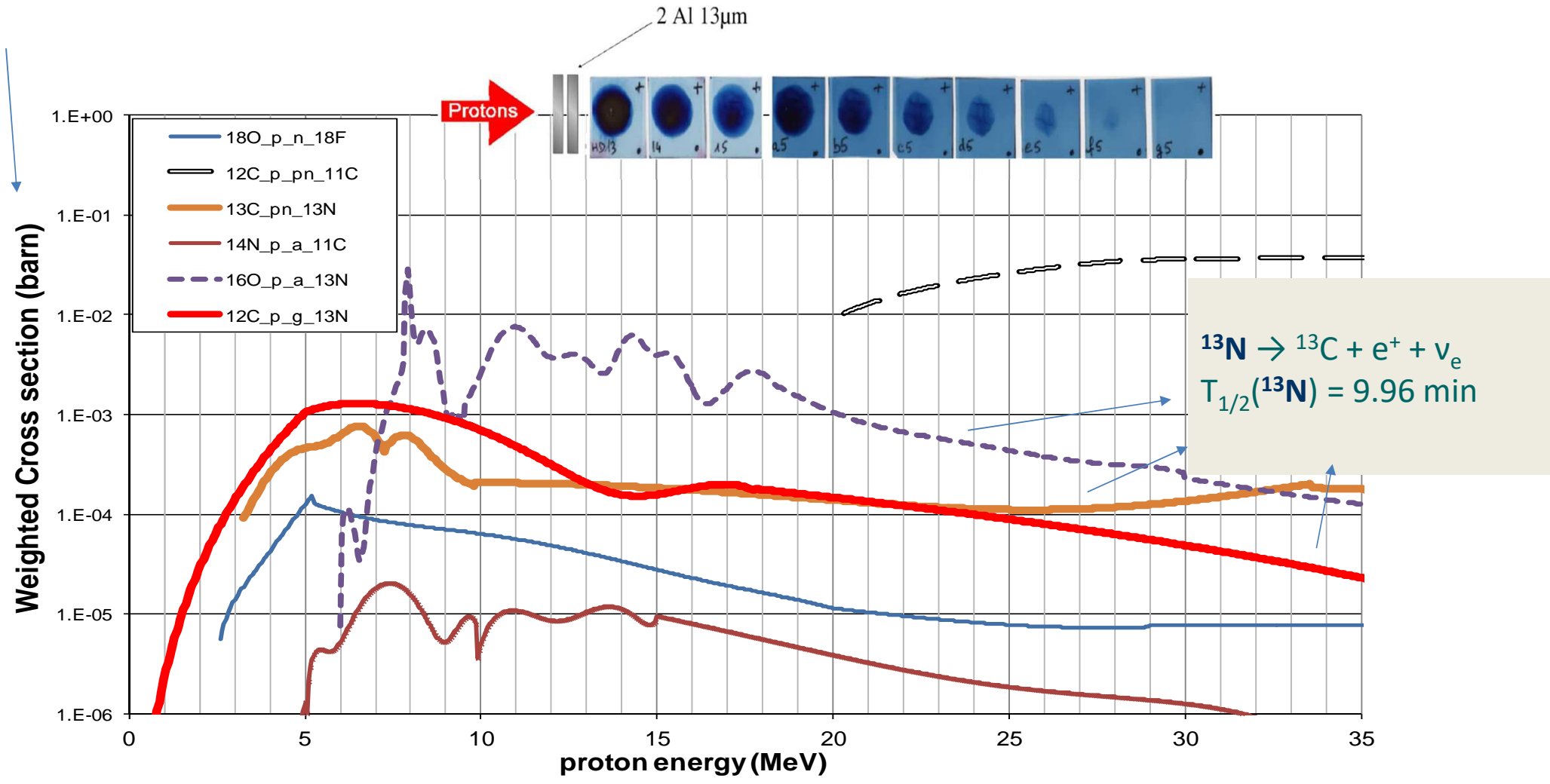
Production de $^7\text{Be}$								
	tir	date tir	date compt	t start sec	tmes sec	ncounts	efficacités	N(t=0)
<b>10B</b>	60	27-oct	29 dec	5443200	595988	6411	0,0835	1,94E+07
<b>10B</b>	122	04-nov	15 dec	3542400	58907	1076	0,0835	2,38E+07
<b>nat B</b>	124	04-nov	24 dec	4320000	433114	2991	0,0771	1,13E+07
<b>nat B</b>	128	04-nov	22 dec	4147200	161514	767	0,0782	7,30E+06
<b>10B</b>	131	06-nov	21 dec	3888000	101787	709	0,0839	9,55E+06
<b>10B plasma</b>	132	06-nov	16 dec	3456000	83666	0	0,0839	0,00E+00
<b>10B</b>	138	06-nov	18 dec	3628800	256312	2677	0,0835	1,40E+07

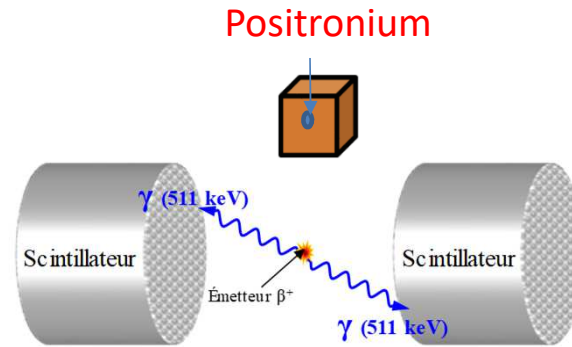
Mesurer le  $^7\text{Be}$  == Mesurer le nombre de particules  $\alpha$  produites

Mesure de neutrons avec  $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$

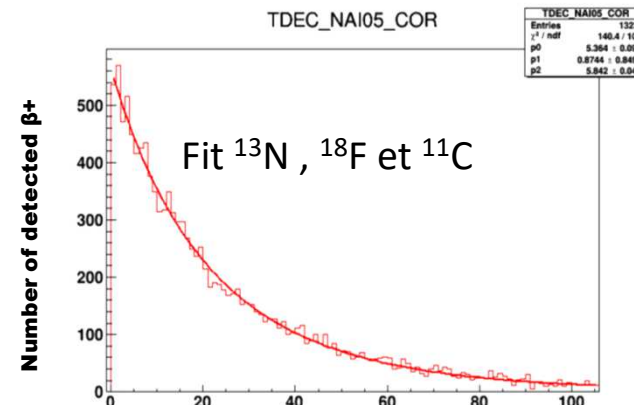
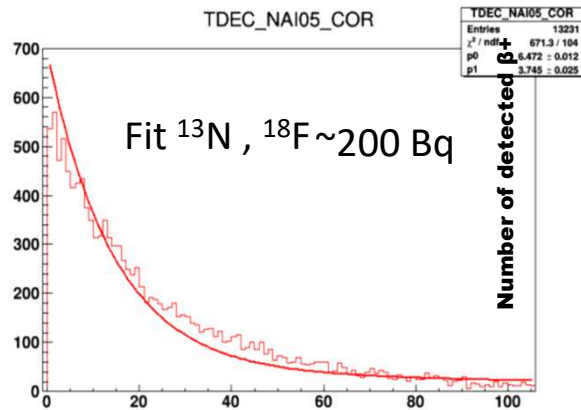
# Diagnostic de faisceaux de protons

3) Utilisation





Nombre de  
coincidences  
511 keV-511 keV  
en fonction du  
temps de mesure



Temps (min)

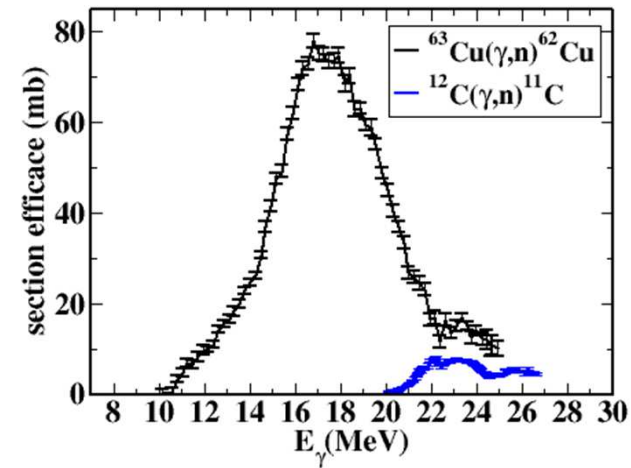
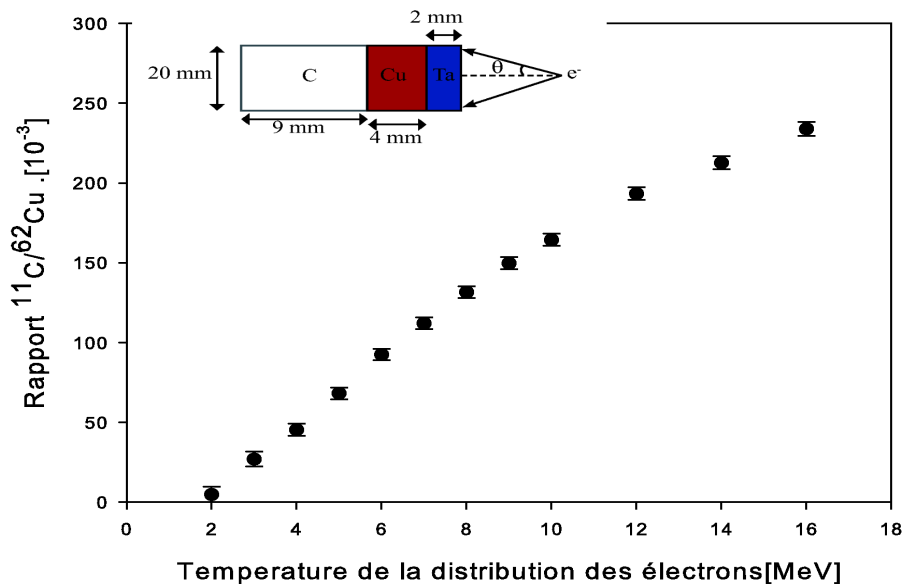
Aucune ambiguïté sur la nature des radioisotopes détectés et donc sur les particules incidentes sur les RCF

# Diagnostic de faisceaux d'électrons

Faisceaux d'électrons convertis en photons par Bremsstrahlung:

Les réactions possibles :

- $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$   $E_{\text{seuil}} = 10,8 \text{ MeV}$
- $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$   $E_{\text{seuil}} = 18,8 \text{ MeV}$

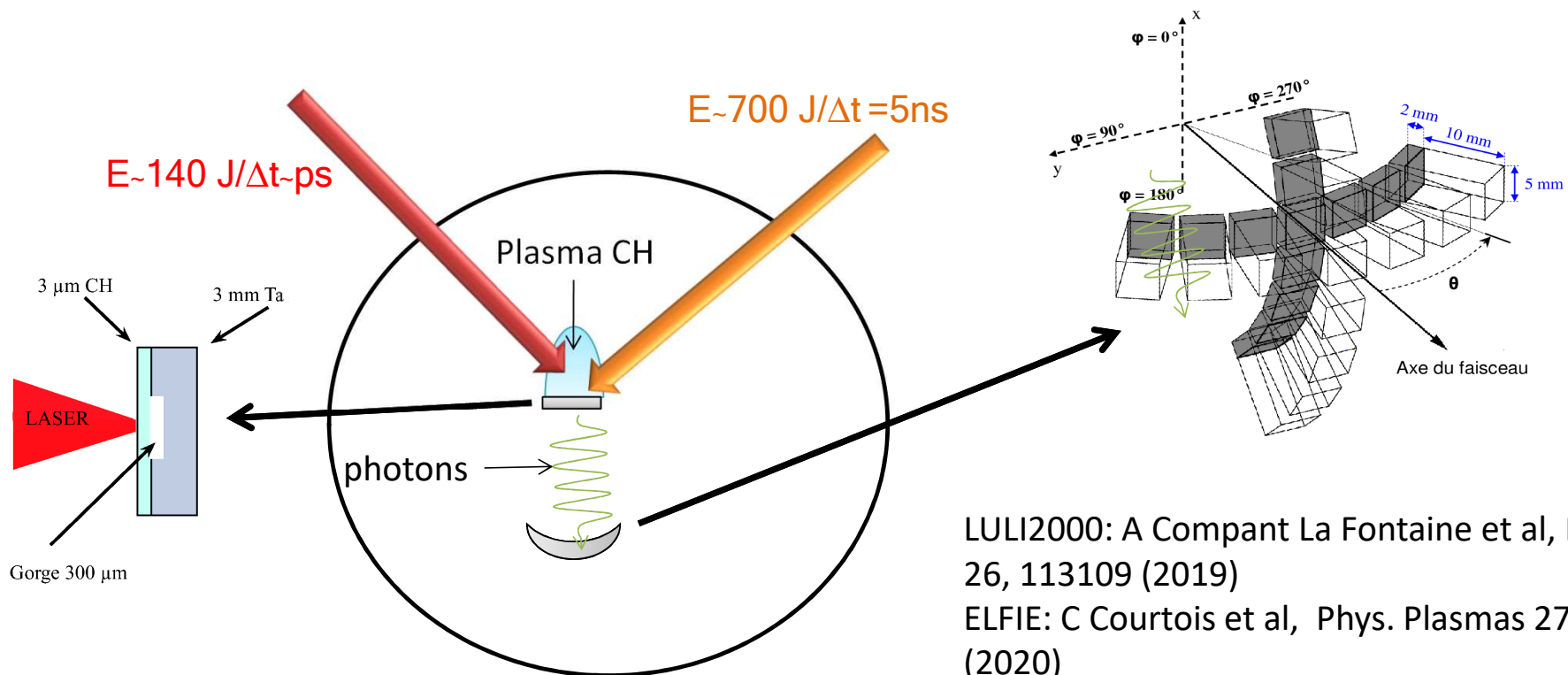


La différence des seuils de réactions permet d'avoir une relation bijective entre le rapport  $^{11}\text{C}/^{62}\text{Cu}$  et la température  $T$  de la distribution

$$\frac{dN}{dE}(\theta, E) = 2\pi \sin(\theta) K e^{-\frac{E}{T}} e^{-\frac{(\theta - \bar{\theta})^2}{2\sigma_\theta^2}}$$

**Programme RX2** : Produire et caractériser des sources brillantes de photons de haute énergie obtenues par conversion de faisceaux d'électrons en fonction du profil de densité de la cible.

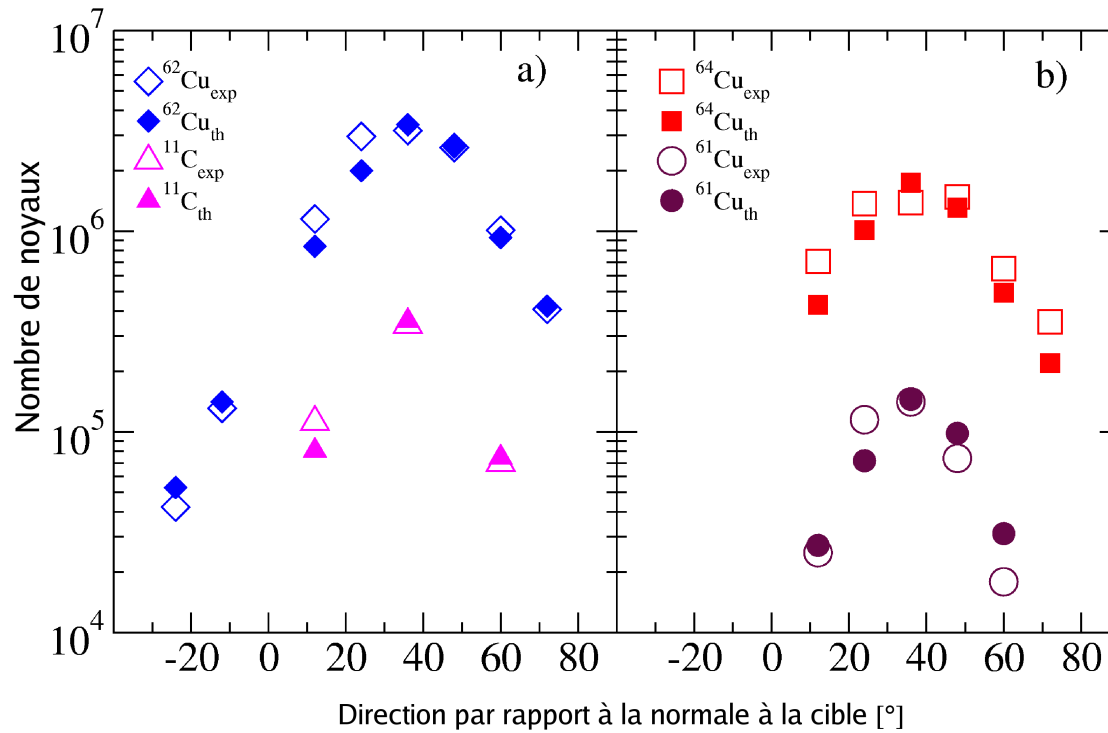
Délai entre les faisceaux ns(1) et ps(2)  
jusqu'à 12 ns pour changer le profil de densité de la cible



LULI2000: A Compant La Fontaine et al, Phys. Plasmas 26, 113109 (2019)  
ELFIE: C Courtois et al, Phys. Plasmas 27, 113108 (2020)

Comparaison entre les nombres d'isotopes radioactifs mesurés et simulés pour une distribution en énergie donnée:

Lasers Pico2000 116 J et Nano2000 726 J, délai entre les faisceaux de 4 ns



$$\frac{dN}{dE}(\theta, E) = 2\pi \sin(\theta) K e^{-\frac{E}{T}} e^{-\frac{(\theta - \bar{\theta})^2}{2\sigma_\theta^2}}$$

Bonne reproduction dans la simulation des nombres d'isotopes radioactifs produits dans les échantillons de carbone et de cuivre lors de ce tir laser

$$K = (9,1 \pm 0,7) \cdot 10^{11} e^- \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$$

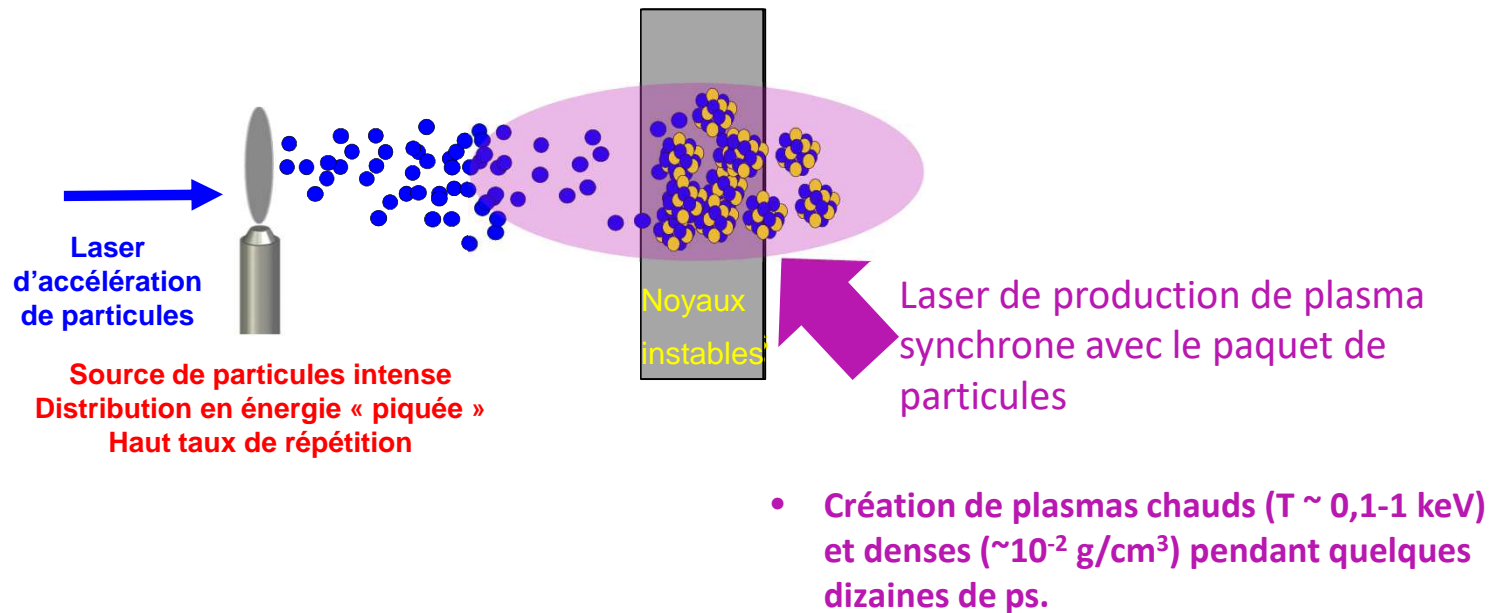
$$T = (6,5 \pm 0,3) \text{MeV}$$

$$\bar{\theta} = (37 \pm 3)^\circ$$

$$\sigma_\theta = (20 \pm 3)^\circ$$

# Physique nucléaire dans les plasmas

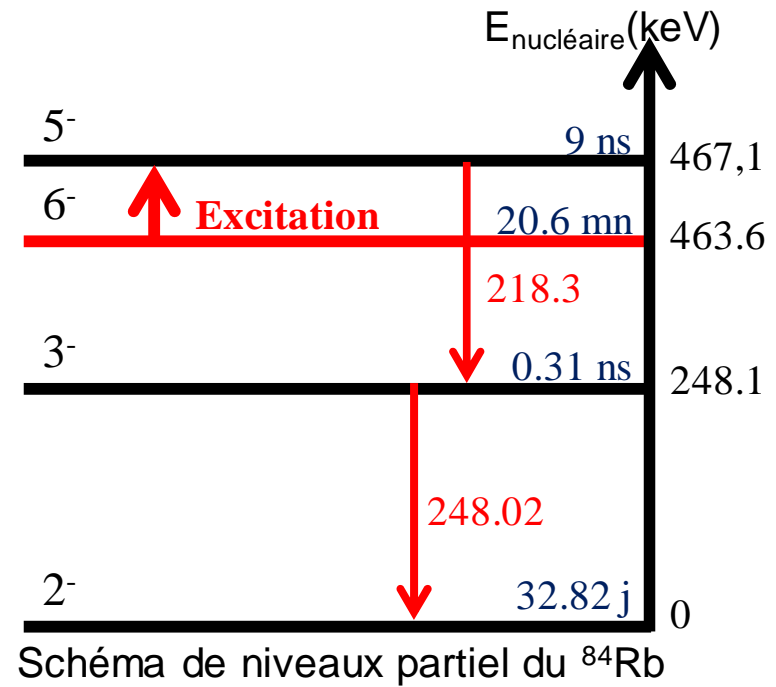
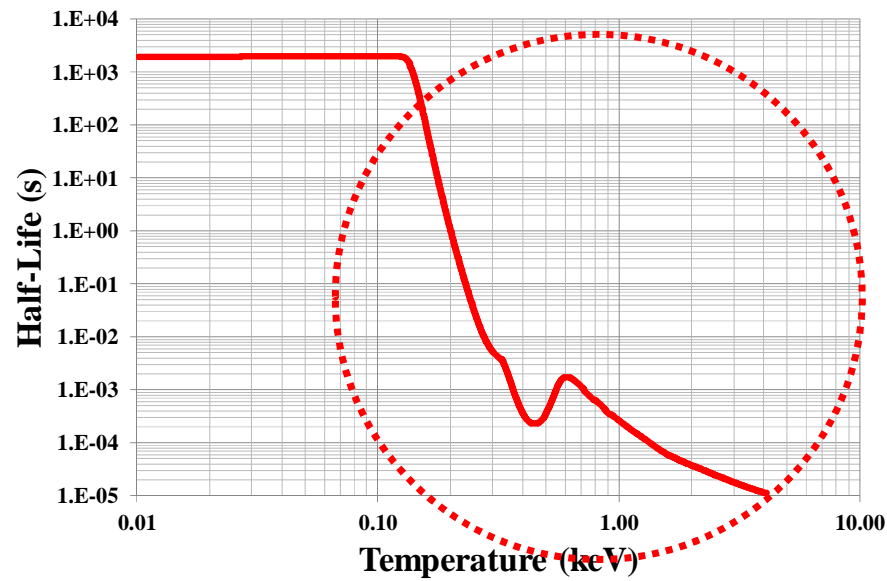
Les RI produits par les faisceaux obtenus par Accélération Laser Plasma sont intéressants pour la physique fondamentale :



→ Modifications de propriétés nucléaires dans un plasma

# Modification des $T_{1/2}$ en milieu plasma

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda_\gamma + \lambda_{\text{excit}}}$$



- Demi-vies apparentes modifiées en milieu plasma
  - **astrophysique: désexcitations rapides des états isomériques**



## Conclusion

- On produit des radio-isotopes avec les faisceaux de particules accélérées par laser  
Ils sont déjà utilisés pour diagnostiquer de façon quantitative ces faisceaux
- Leurs applications dépendent des quantités produites (cadence de tir) et de la pureté isotopique requise (dépend de la capacité de sélection de la réaction nucléaire de production et de la distribution en énergie des particules accélérées utilisées)