



# Résultats $^{155}\text{Gd}(p,n)^{155}\text{Tb}$ – thèse de Morgane Boutecculet

Projet TTRIP (ANR-21-CE19-0037) : WP3 : étudier et optimiser la production et la vectorisation du  $^{155}\text{Tb}$

Les contraintes imposées  
Les cibles produites/utilisées  
Les expériences réalisées  
Résultats

traitement des isomères

Mesures du  $^{155}\text{Tb}$  et comparaisons avec la biblio

Mesures des  $^{153}, ^{154}, ^{156}\text{Tb}$

Optimisation de la production du  $^{155}\text{Tb}$

Conclusions/perspectives

thèse de Morgane Boutecculet

+ partie de thèse de Mohammed Hussein  
*grant agreement No 101008571 (H2020-PRISMAP)*



# Introduction – Critères pour une nouvelle méthode de production

## Accessibilité du $^{155}\text{Tb}$ produit :

Cyclotron médical	⇒ Protons < 20 MeV	→ p + Gd
Haut taux de production	⇒ Clinique	→ Imagerie: ~ 100 MBq/dose Thérapie: ~ 1000 MBq - 10 000 MBq /dose

## Bonne pureté radionucléique

Eviter les contaminants	⇒ Isotopes du Tb	
	Pas de $T_{1/2} > T_{1/2} (^{155}\text{Tb})$	→ $^{157}, ^{158}, ^{160}\text{Tb}$ , attention au $^{156}\text{Tb}$

## Ne pas dégrader l'imagerie TEMP – Eviter les doses inutiles

⚠ Emissions $\gamma > 400 \text{ keV}$	⇒ Eviter $^{154}, ^{156}\text{Tb}$
--	------------------------------------

Réactions possibles:  $^{154}\text{Gd}(p,\gamma)$  ou  $^{155}\text{Gd}(p,n)$



# Introduction – Le $^{155}\text{Tb}$ pour la TEMP

$^{155}\text{Tb}$ ( $T_{1/2} = 5,32 \text{ j}$ )	Energie (keV)	Intensité (%) ( $I > 5\%$ )
	86,6	32,0
	105,3	25,1
	180,1	7,5
	262	5,3

Energies des raies  $\gamma$  adaptées  
à la plupart des caméras  
utilisées en clinique

$^{154\text{g}}\text{Tb}$ ( $T_{1/2} = 21,5 \text{ h}$ )	Energie (keV)	Intensité (%) ( $I > 5\%$ )
	86,6	32,0
	105,3	25,1
	180,1	7,5
	1291,3	6,9
	1996,6	7,5
	2064,1	7,1
	2187,1	9,9

dose ajoutée  
et  
dégradation des images  
à vérifier



$^{156}\text{Tb}$ ( $T_{1/2} = 5,35 \text{ j}$ )	Energie (keV)	Intensité (%) ( $I > 5\%$ )
	88	18
	199,2	41
	356,3	16,6
	534.3	(67%)
	1065.1	(10.8%)
	1154.1	(10.4%)
	1222.4	(31%)
	1421.7	(12%)



## Méthodes – Composition isotopique des dix cibles utilisées

Retour

Nom de la cible	$^{152}\text{Gd}$ ( % )	$^{154}\text{Gd}$ ( % )	$^{155}\text{Gd}$ ( % )	$^{156}\text{Gd}$ ( % )	$^{157}\text{Gd}$ ( % )	$^{158}\text{Gd}$ ( % )	$^{160}\text{Gd}$ ( % )
Gd3	$(4,3 \pm 2,6) 10^{-4}$	$(1,3 \pm 0,4) 10^{-3}$	$99,981 \pm 0,001$	$(5,7 \pm 0,1) 10^{-3}$	$(5,3 \pm 0,6) 10^{-3}$	$(4,0 \pm 0,6) 10^{-3}$	$(1,6 \pm 0,2) 10^{-3}$
ECH3	$(5,5 \pm 2,2) 10^{-4}$	$(4,3 \pm 0,2) 10^{-3}$	$99,820 \pm 0,001$	$(1,07 \pm 0,01) 10^{-1}$	$(2,00 \pm 0,08) 10^{-2}$	$(2,70 \pm 0,07) 10^{-2}$	$(2,22 \pm 0,06) 10^{-2}$
C4-2023	Non détecté	$(1,4 \pm 0,1) 10^{-3}$	$99,975 \pm 0,001$	$(2,1 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(8,1 \pm 1,6) 10^{-4}$	$(9,8 \pm 1,5) 10^{-4}$	$(3,8 \pm 0,8) 10^{-4}$
C5-2023	Non détecté	$(5,3 \pm 0,3) 10^{-3}$	$99,898 \pm 0,001$	$(8,4 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(6,1 \pm 0,5) 10^{-3}$	$(4,9 \pm 0,2) 10^{-3}$	$(1,7 \pm 0,1) 10^{-3}$
C6-2023	Non détecté	$(9,8 \pm 0,4) 10^{-3}$	$99,911 \pm 0,001$	$(7,2 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(7,2 \pm 0,3) 10^{-3}$	$(2,2 \pm 0,3) 10^{-3}$	$(1,0 \pm 0,1) 10^{-3}$
C1-2024	$(4,0 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(3,7 \pm 0,1) 10^{-2}$	$99,861 \pm 0,002$	$(8,2 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(8,5 \pm 0,9) 10^{-3}$	$(7,2 \pm 1,3) 10^{-3}$	$(4,3 \pm 0,3) 10^{-3}$
C2-2024	$(5,4 \pm 0,6) 10^{-3}$	$(6,0 \pm 0,5) 10^{-3}$	$99,904 \pm 0,002$	$(7,6 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(5,4 \pm 0,6) 10^{-3}$	$(2,6 \pm 0,3) 10^{-3}$	$(9,6 \pm 0,9) 10^{-4}$
C3-2024	$(8,5 \pm 1,0) 10^{-3}$	$(1,5 \pm 0,1) 10^{-2}$	$99,669 \pm 0,020$	$(1,22 \pm 0,01) 10^{-1}$	$(5,0 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(7,2 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(6,1 \pm 0,1) 10^{-2}$
C4-2024	$(9,0 \pm 0,7) 10^{-3}$	$(1,6 \pm 0,1) 10^{-2}$	$99,660 \pm 0,030$	$(1,04 \pm 0,02) 10^{-1}$	$(5,5 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(8,4 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(7,2 \pm 0,2) 10^{-2}$
C5-2024	$(4,4 \pm 0,1) 10^{-1}$	$(3,89 \pm 0,04) 10^{-1}$	$99,091 \pm 0,006$	$(4,5 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(8,3 \pm 0,7) 10^{-3}$	$(1,1 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(9,2 \pm 0,3) 10^{-3}$





## Méthodes – Composition isotopique des dix cibles utilisées

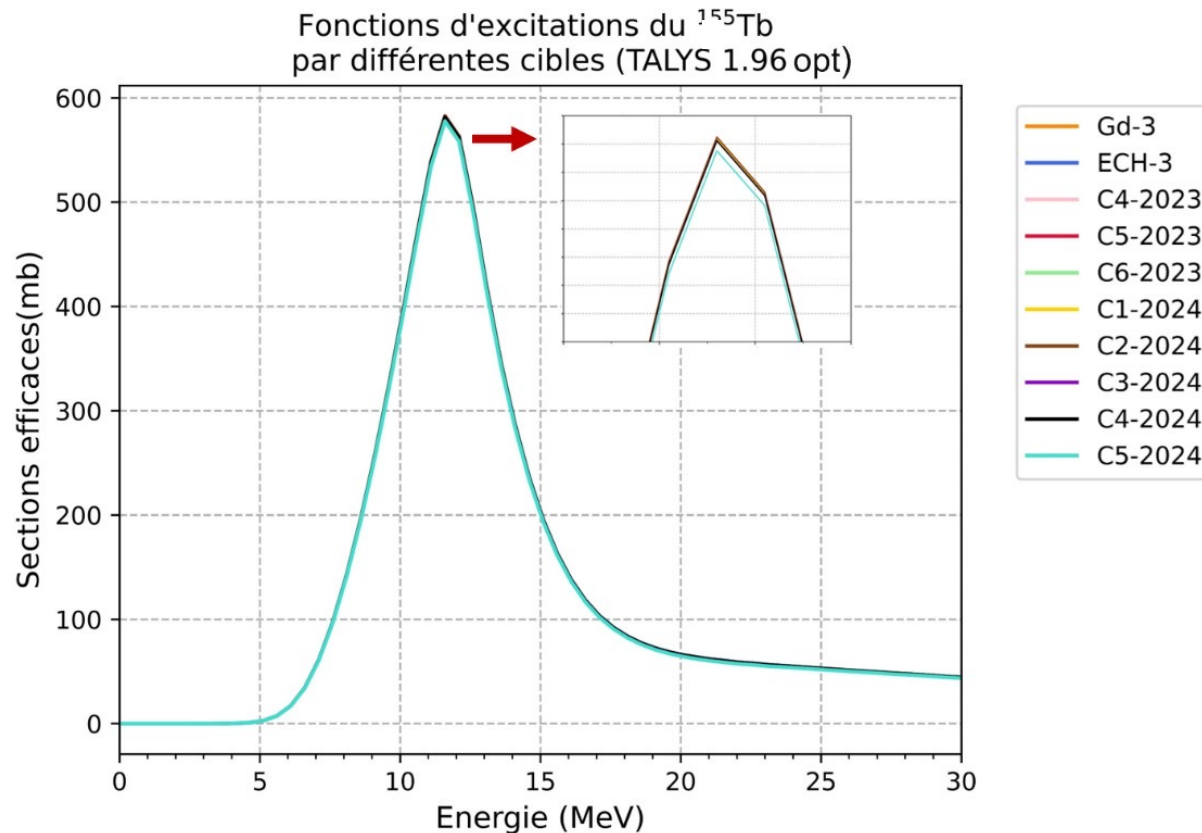
Retour

Nom de la cible	$^{152}\text{Gd}$ ( % )	$^{154}\text{Gd}$ ( % )	$^{155}\text{Gd}$ ( % )	$^{156}\text{Gd}$ ( % )	$^{157}\text{Gd}$ ( % )	$^{158}\text{Gd}$ ( % )	$^{160}\text{Gd}$ ( % )
Gd3	$(4,3 \pm 2,6) 10^{-4}$	$(1,3 \pm 0,4) 10^{-3}$	$99,981 \pm 0,001$	$(5,7 \pm 0,1) 10^{-3}$	$(5,3 \pm 0,6) 10^{-3}$	$(4,0 \pm 0,6) 10^{-3}$	$(1,6 \pm 0,2) 10^{-3}$
ECH3	$(5,5 \pm 2,2) 10^{-4}$	$(4,3 \pm 0,2) 10^{-3}$	$99,820 \pm 0,001$	$(1,07 \pm 0,01) 10^{-1}$	$(2,00 \pm 0,08) 10^{-2}$	$(2,70 \pm 0,07) 10^{-2}$	$(2,22 \pm 0,06) 10^{-2}$
C4-2023	Non détecté	$(1,4 \pm 0,1) 10^{-3}$	$99,975 \pm 0,001$	$(2,1 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(8,1 \pm 1,6) 10^{-4}$	$(9,8 \pm 1,5) 10^{-4}$	$(3,8 \pm 0,8) 10^{-4}$
C5-2023	Non détecté	$(5,3 \pm 0,3) 10^{-3}$	$99,898 \pm 0,001$	$(8,4 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(6,1 \pm 0,5) 10^{-3}$	$(4,9 \pm 0,2) 10^{-3}$	$(1,7 \pm 0,1) 10^{-3}$
C6-2023	Non détecté	$(9,8 \pm 0,4) 10^{-3}$	$99,911 \pm 0,001$	$(7,2 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(7,2 \pm 0,3) 10^{-3}$	$(2,2 \pm 0,3) 10^{-3}$	$(1,0 \pm 0,1) 10^{-3}$
C1-2024	$(4,0 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(3,7 \pm 0,1) 10^{-2}$	$99,861 \pm 0,002$	$(8,2 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(8,5 \pm 0,9) 10^{-3}$	$(7,2 \pm 1,3) 10^{-3}$	$(4,3 \pm 0,3) 10^{-3}$
C2-2024	$(5,4 \pm 0,6) 10^{-3}$	$(6,0 \pm 0,5) 10^{-3}$	$99,904 \pm 0,002$	$(7,6 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(5,4 \pm 0,6) 10^{-3}$	$(2,6 \pm 0,3) 10^{-3}$	$(9,6 \pm 0,9) 10^{-4}$
C3-2024	$(8,5 \pm 1,0) 10^{-3}$	$(1,5 \pm 0,1) 10^{-2}$	$99,669 \pm 0,020$	$(1,22 \pm 0,01) 10^{-1}$	$(5,0 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(7,2 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(6,1 \pm 0,1) 10^{-2}$
C4-2024	$(9,0 \pm 0,7) 10^{-3}$	$(1,6 \pm 0,1) 10^{-2}$	$99,660 \pm 0,030$	$(1,04 \pm 0,02) 10^{-1}$	$(5,5 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(8,4 \pm 0,2) 10^{-2}$	$(7,2 \pm 0,2) 10^{-2}$
C5-2024	$(4,4 \pm 0,1) 10^{-1}$	$(3,89 \pm 0,04) 10^{-1}$	$99,091 \pm 0,006$	$(4,5 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(8,3 \pm 0,7) 10^{-3}$	$(1,1 \pm 0,1) 10^{-2}$	$(9,2 \pm 0,3) 10^{-3}$



# Méthodes – Composition isotopique des cibles

- La comparaison de la production de  $^{155}\text{Tb}$  par chaque cible a-t-elle un sens ?



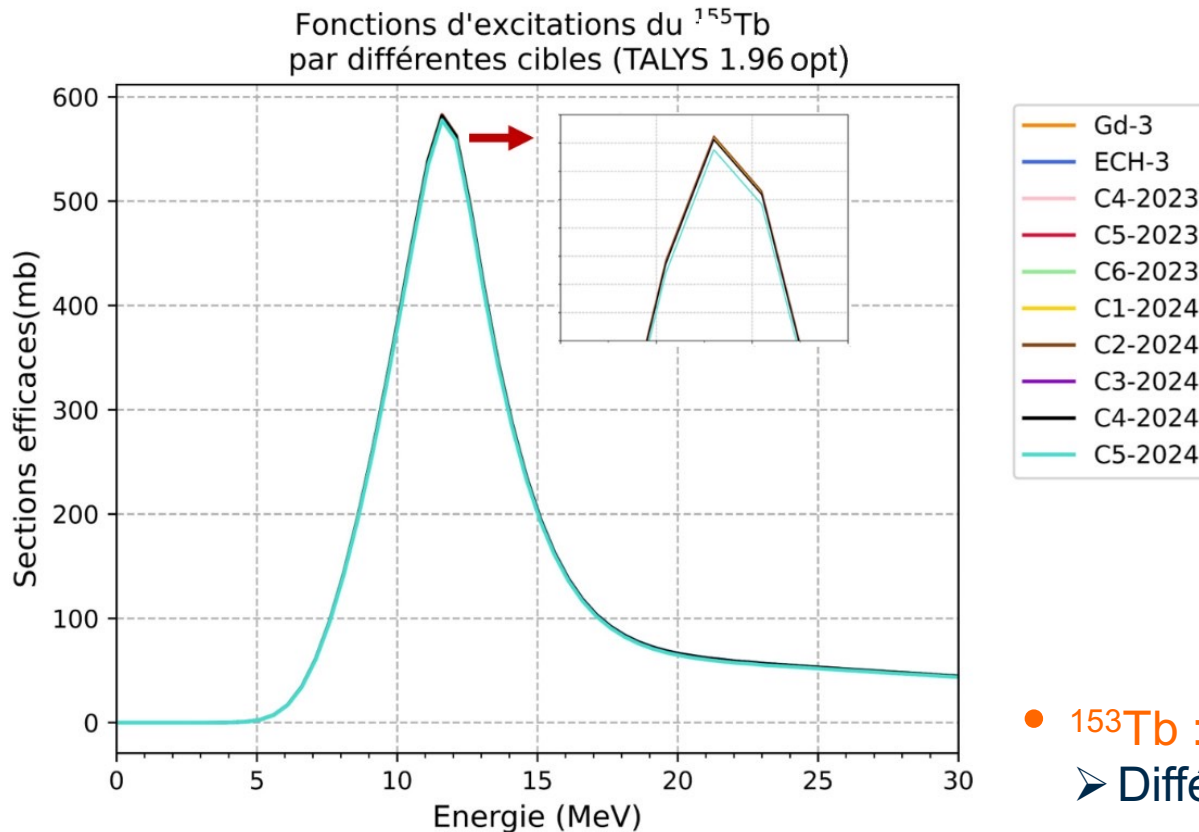
➤ Différences de production : entre 0,2% et 0,9%  
→ négligeables

Oui



# Méthodes – Composition isotopique des cibles

- La comparaison de la production de  $^{155}\text{Tb}$  par chaque cible a-t-elle un sens ?



➤ Différences de production : entre 0,2% et 0,9%  
→ négligeables

Oui

- $^{153}\text{Tb}$  :

Oui

➤ Différences de production entre 0,1% et 1,1% → négligeables

- $^{154}\text{g, m1, m2, cum Tb}$  :

Oui

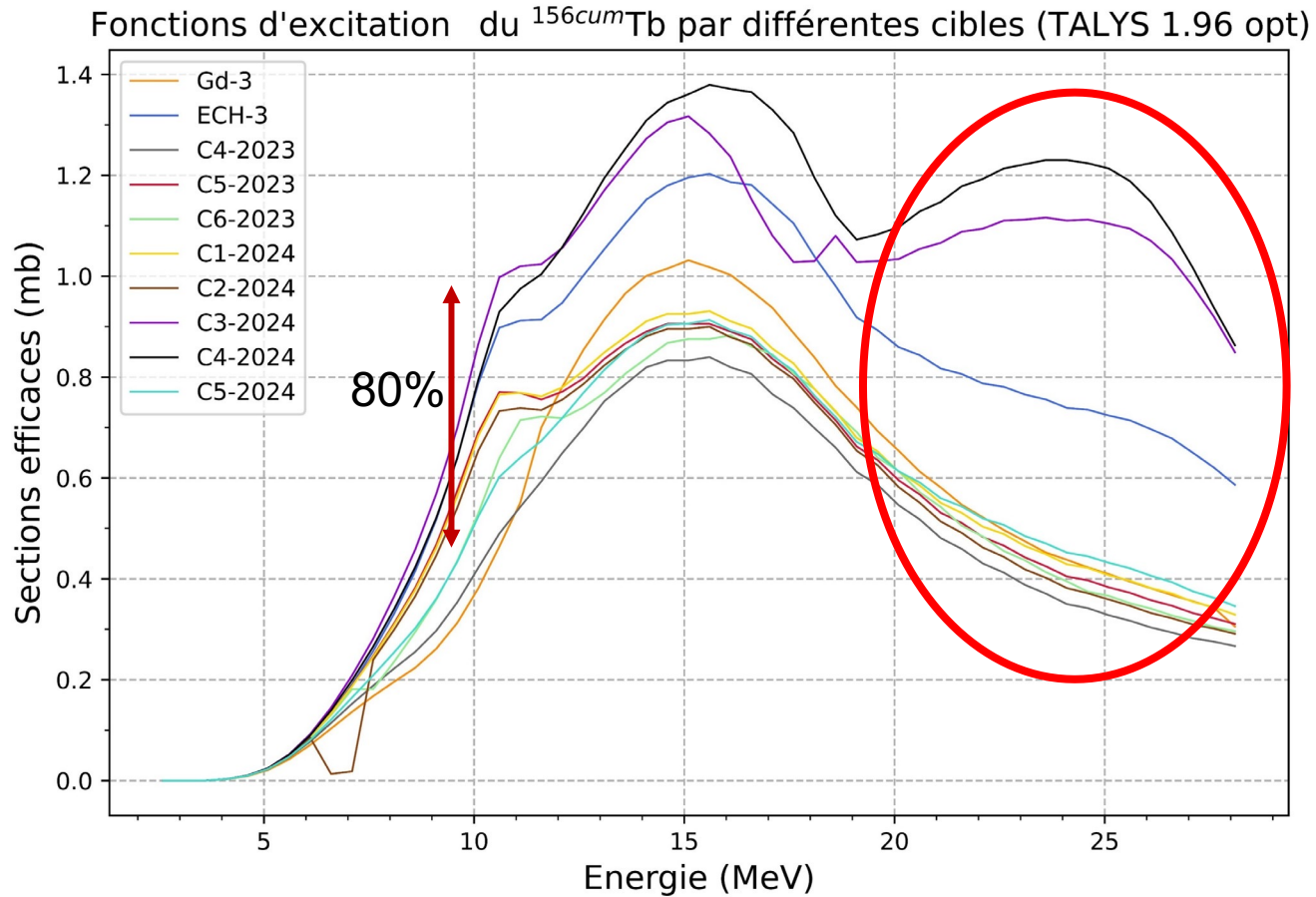
➤ Différences de production jusqu'à 1,8% → négligeables



# Méthodes – Composition isotopique des cibles

• Et le  $^{156}\text{Tb}$  ?

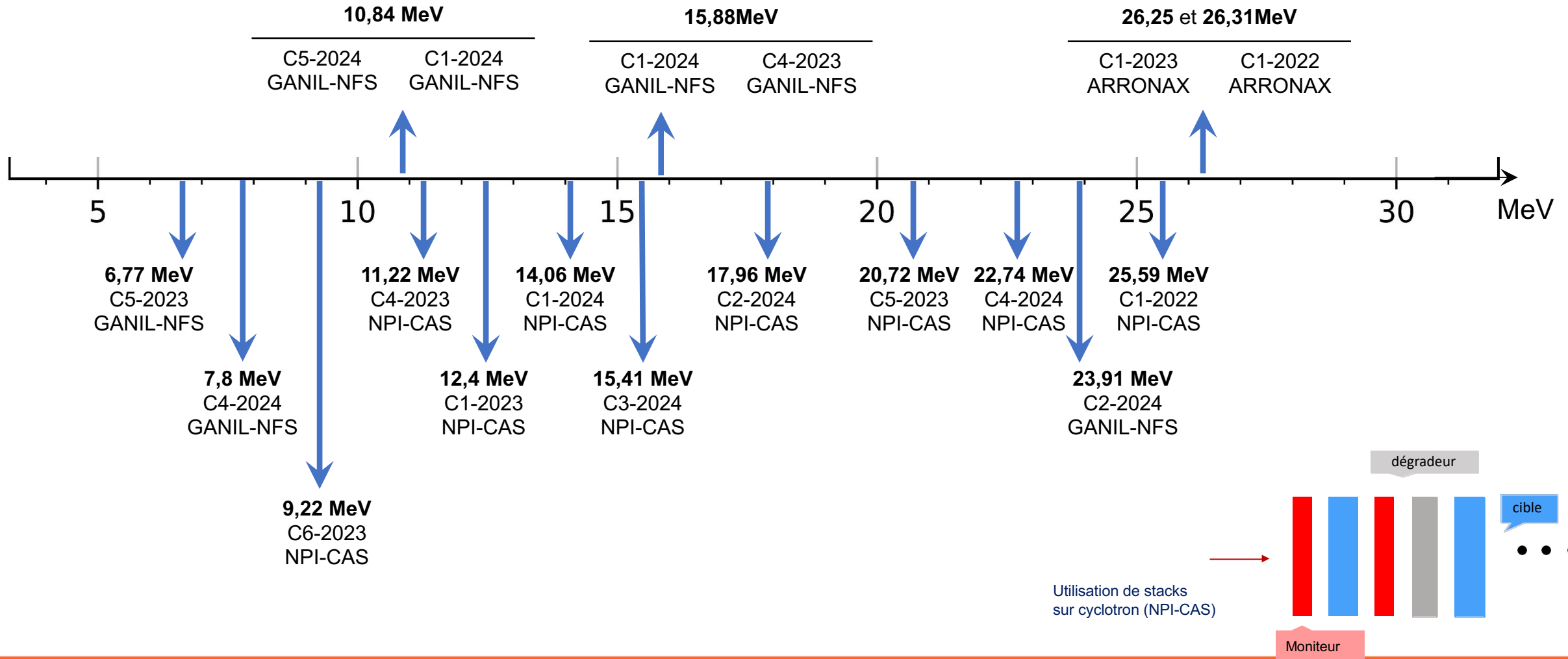
Non



➤ Différences de production par les différentes cibles : **jusqu'à 280 %** à 25 MeV



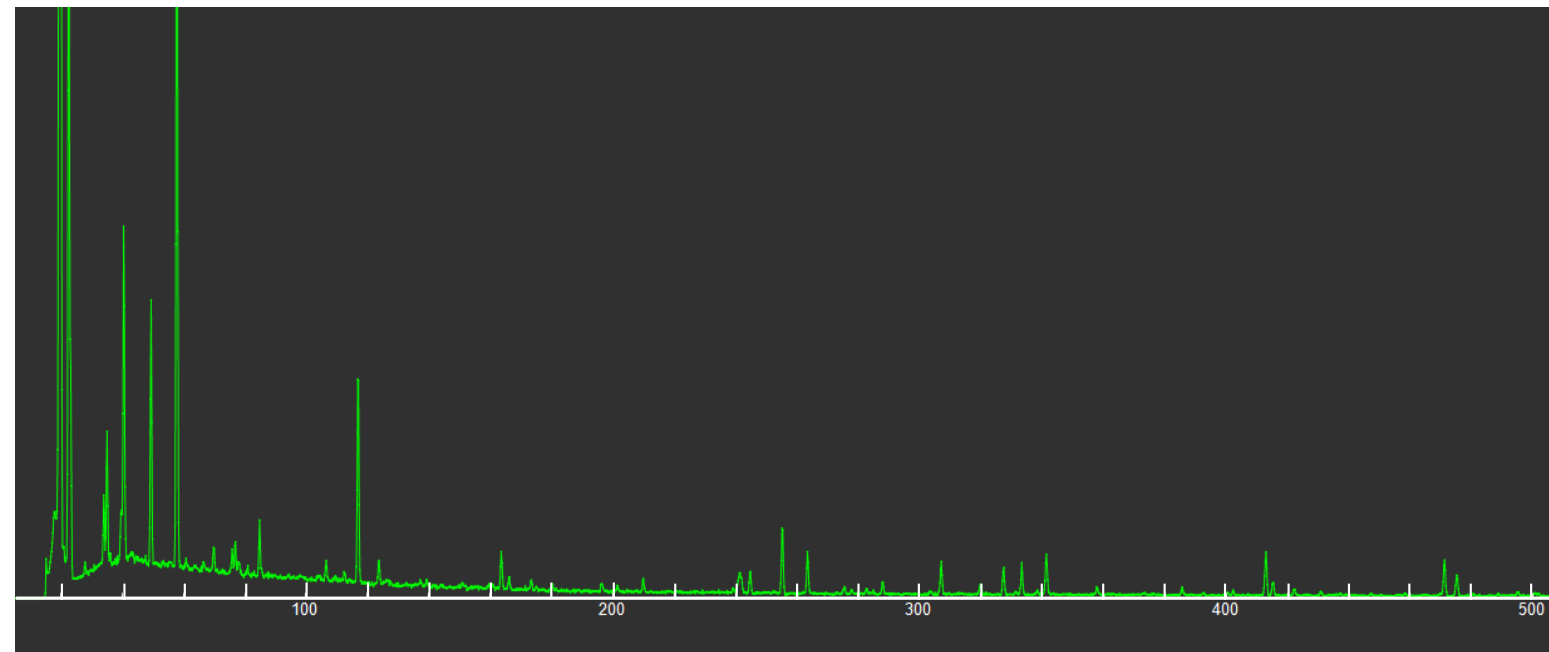
# Les expériences réalisées





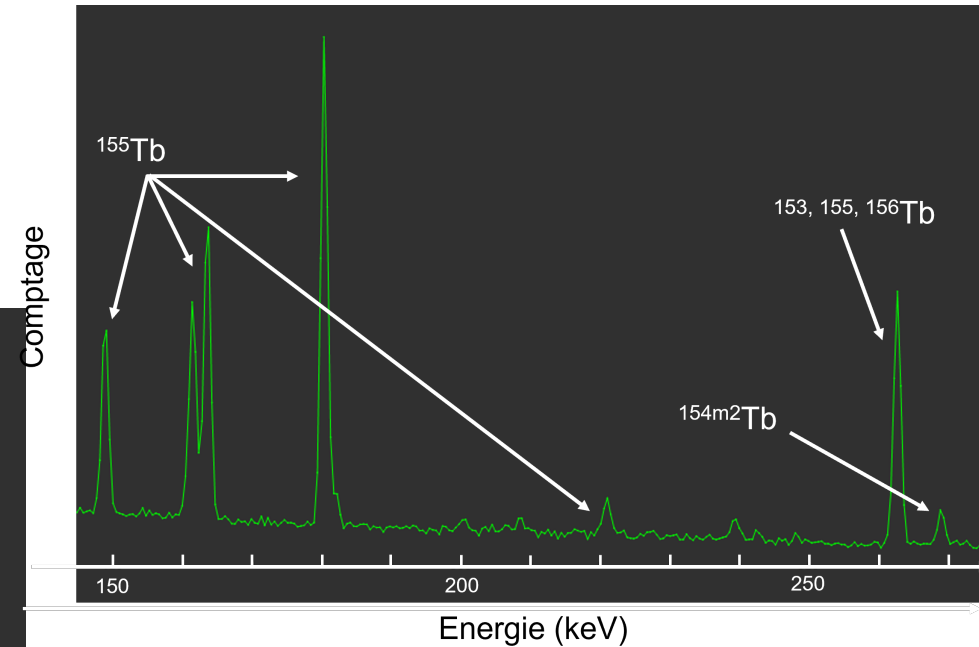
- Mesures par spectrométrie  $\gamma$

- Détection des  $\gamma$  émis par les produits de la réaction
- Utilisation de dix détecteurs germanium HPGe et LEGe



Energie (keV)

Extrait d'un spectre  $\gamma$  analysé avec le logiciel Fitzpeaks



Vérification de la cohérence des différents  
pics d'un même isotope



# Méthodes d'analyse – les isomères

- $^{154}\text{Tb}$ ,  $^{156}\text{Tb}$  : deux états isomériques en plus de l'état fondamental

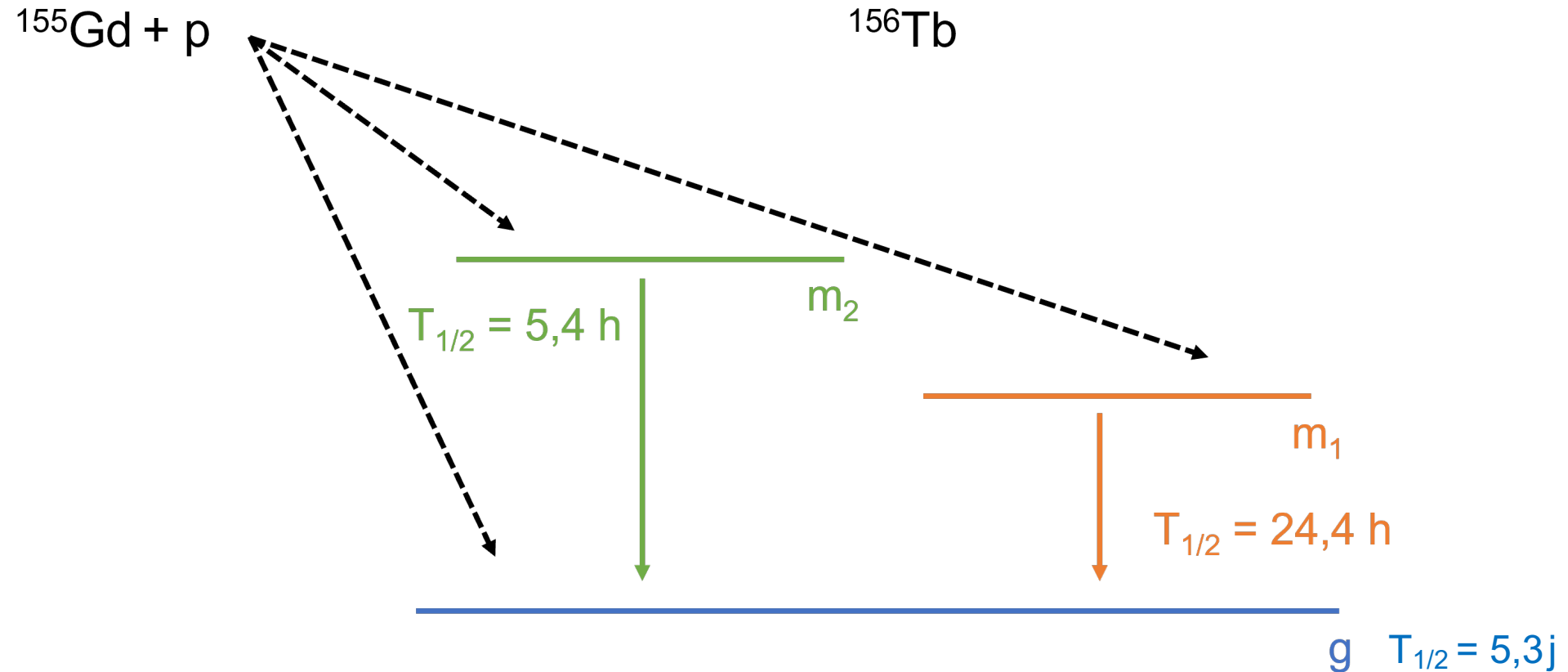
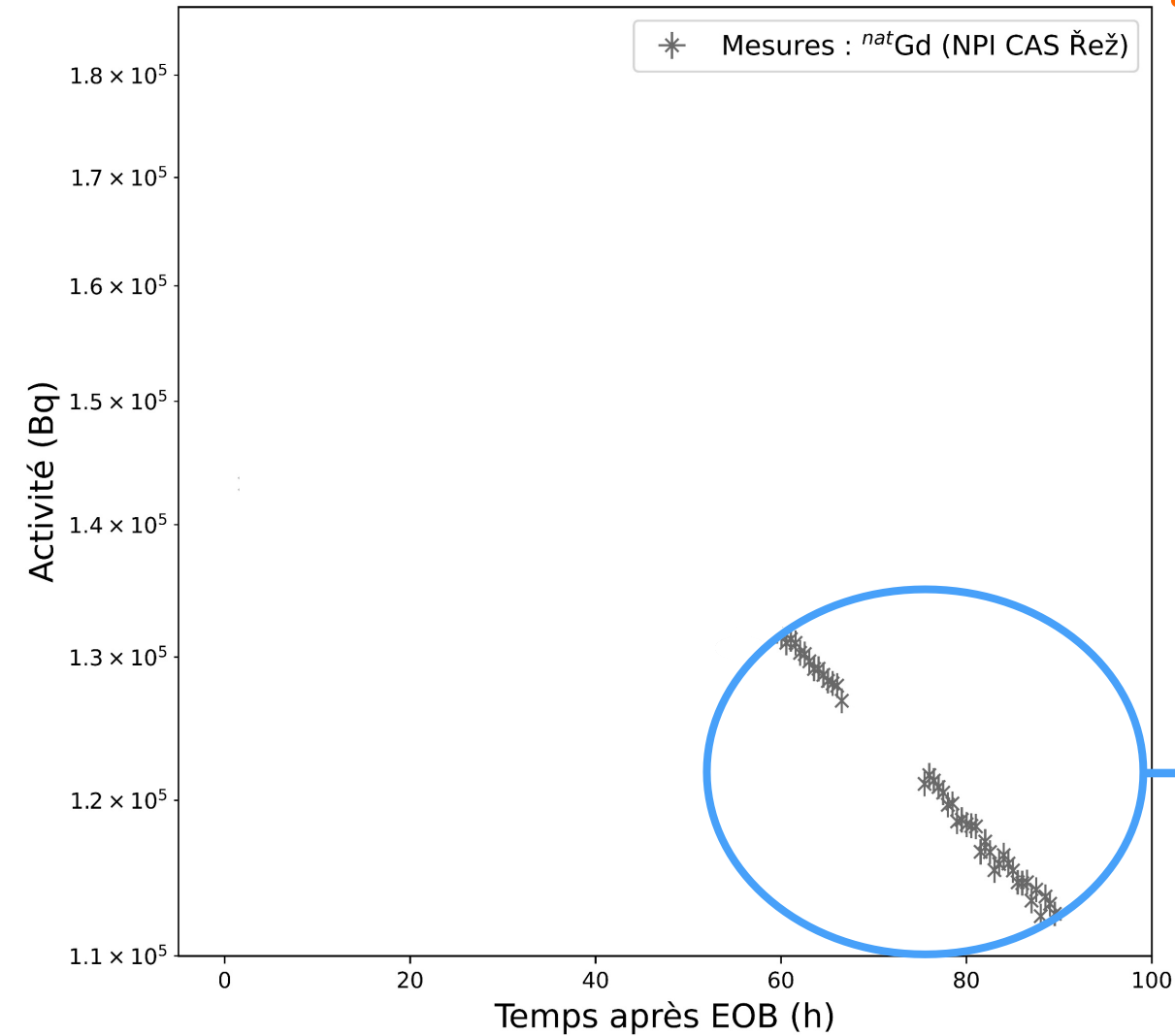


Schéma des états du  $^{156}\text{Tb}$  produits lors de l'irradiation de  $^{155}\text{Gd}$  avec des protons



Mesures d'activité du  $^{156}\text{Tb}$



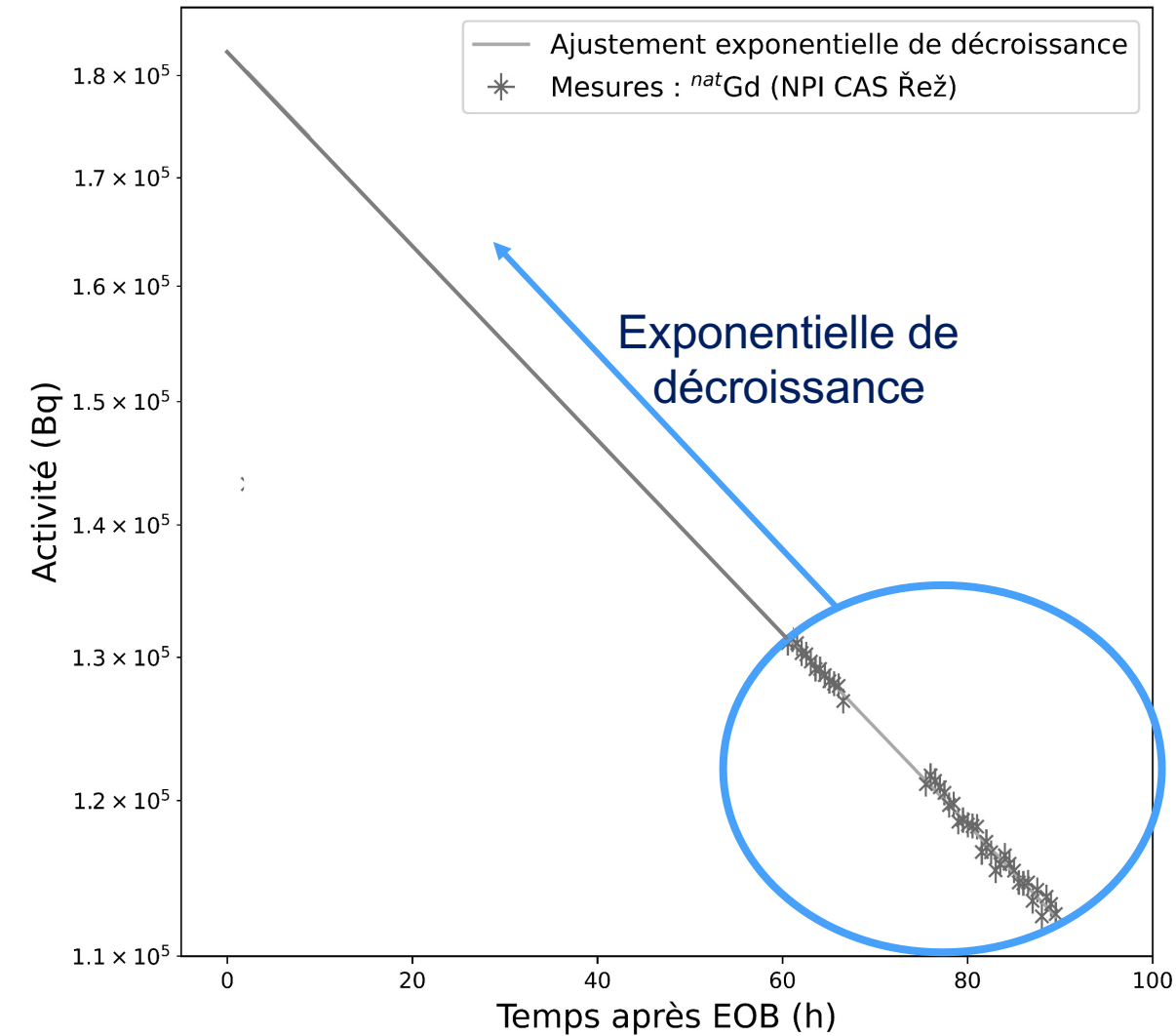
- Protocole pour les sections efficaces de production cumulée

➤ Mesures faites après décroissance complète des isomères (à  $t = \text{EOB} + 60\text{h}$ )





Mesures d'activité du  $^{156}\text{Tb}$

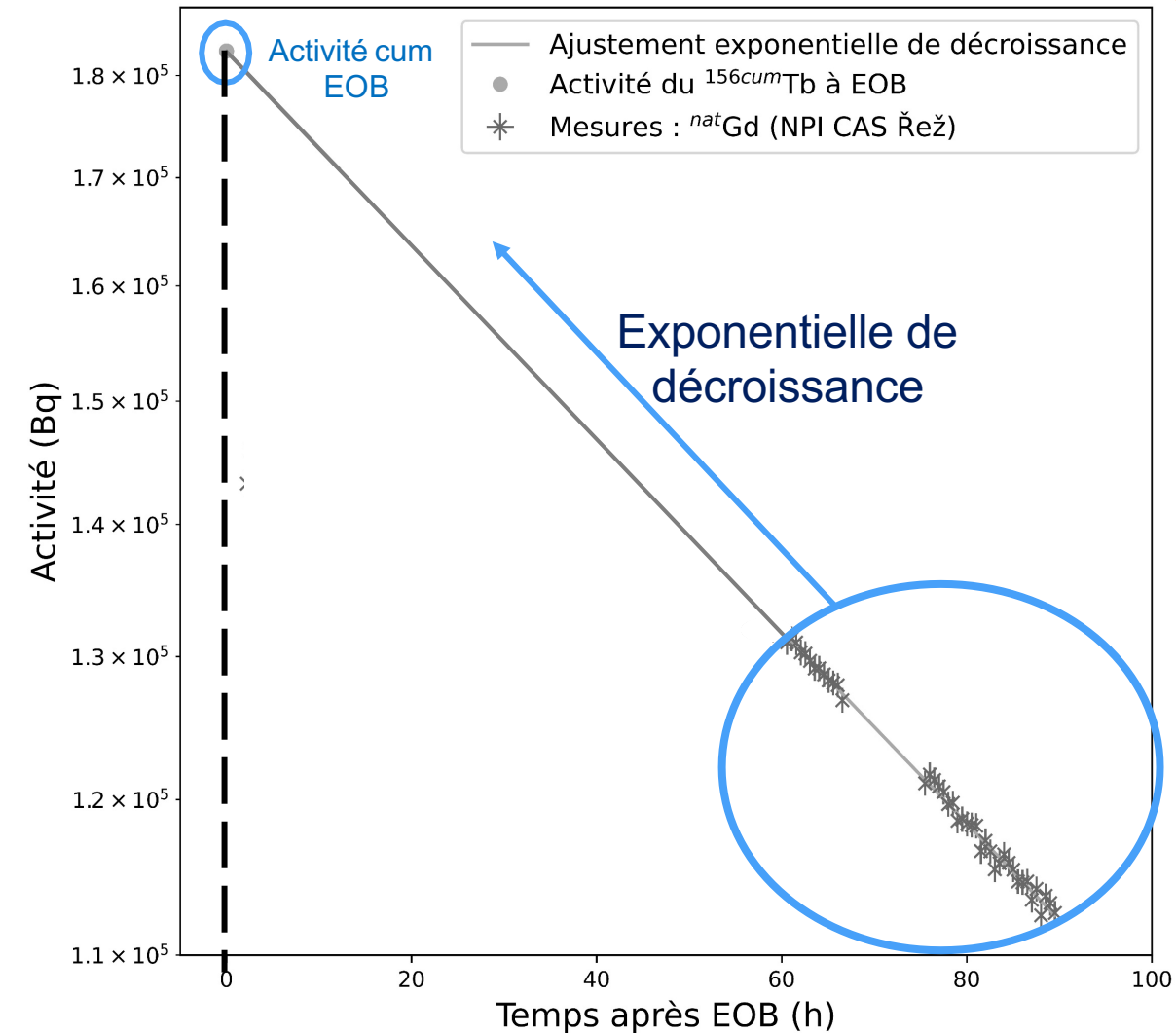


- Protocole pour les sections efficaces de production cumulées
  - Mesures faites après décroissance complète des isomères (à  $t = \text{EOB} + 60\text{h}$ )



# Méthodes d'analyse – les isomères

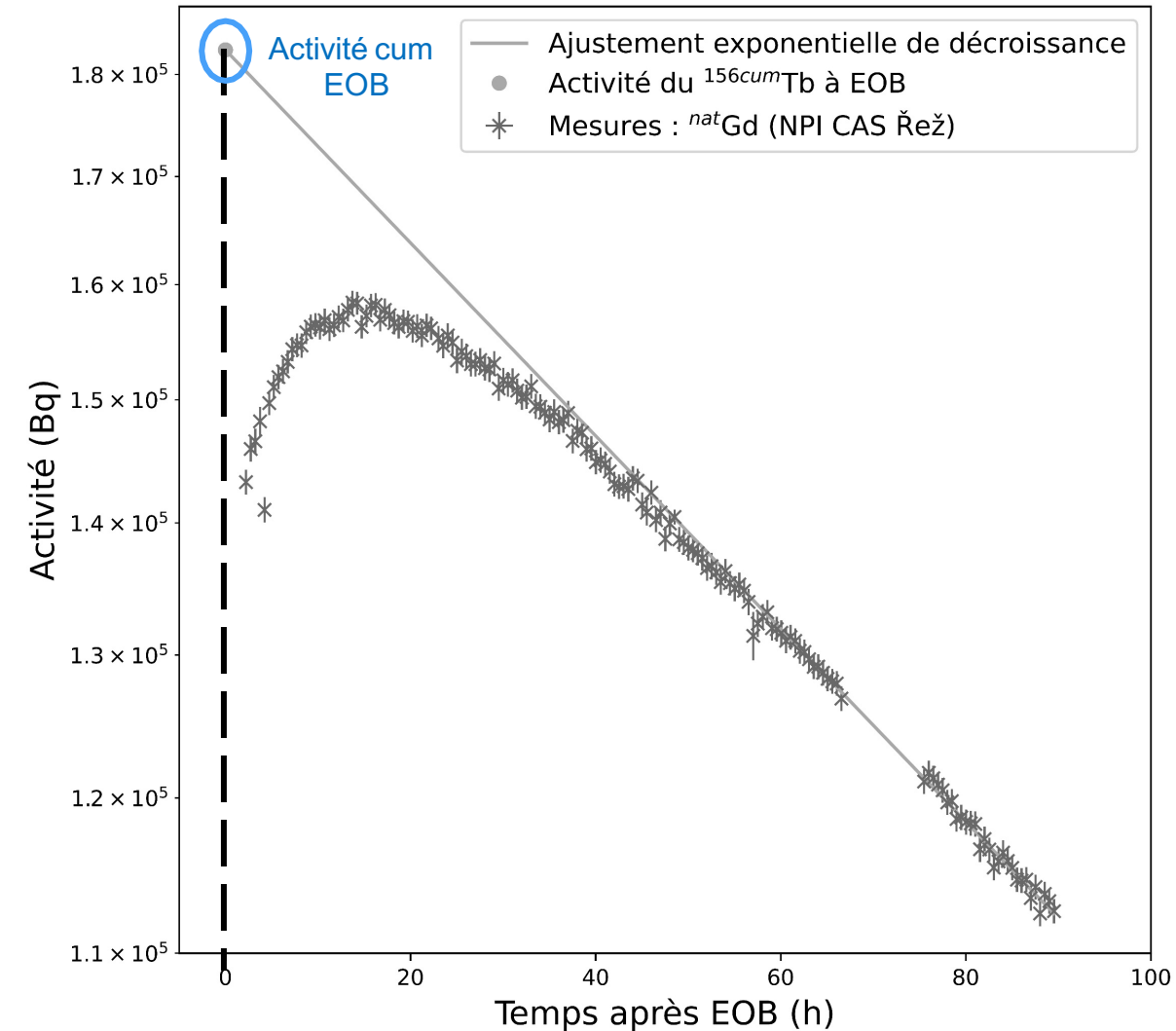
Mesures d'activité du  $^{156}\text{gTb}$



- Protocole pour les sections efficaces de production cumulées
  - Mesures faites après décroissance complète des isomères (à  $t = \text{EOB} + 60\text{h}$ )
  - Obtention de l'activité cumulée à EOB



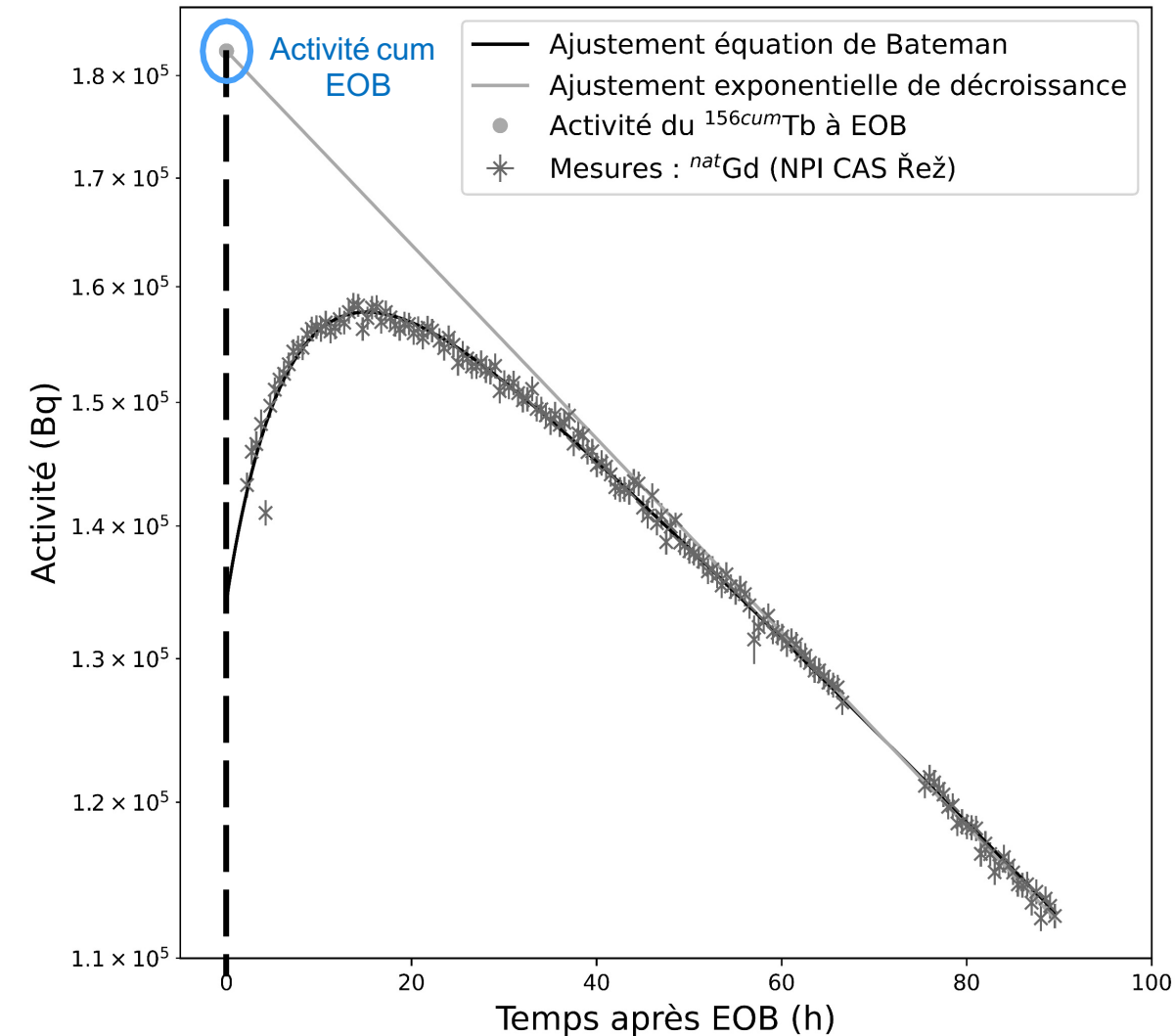
Mesures d'activité du  $^{156}\text{gTb}$



- Protocole pour les sections efficaces de production individuelles
  - Suivi de la désintégration du  $^{156}\text{gTb}$



Mesures d'activité du  $^{156g}\text{Tb}$



- Protocole pour les sections efficaces de production individuelles

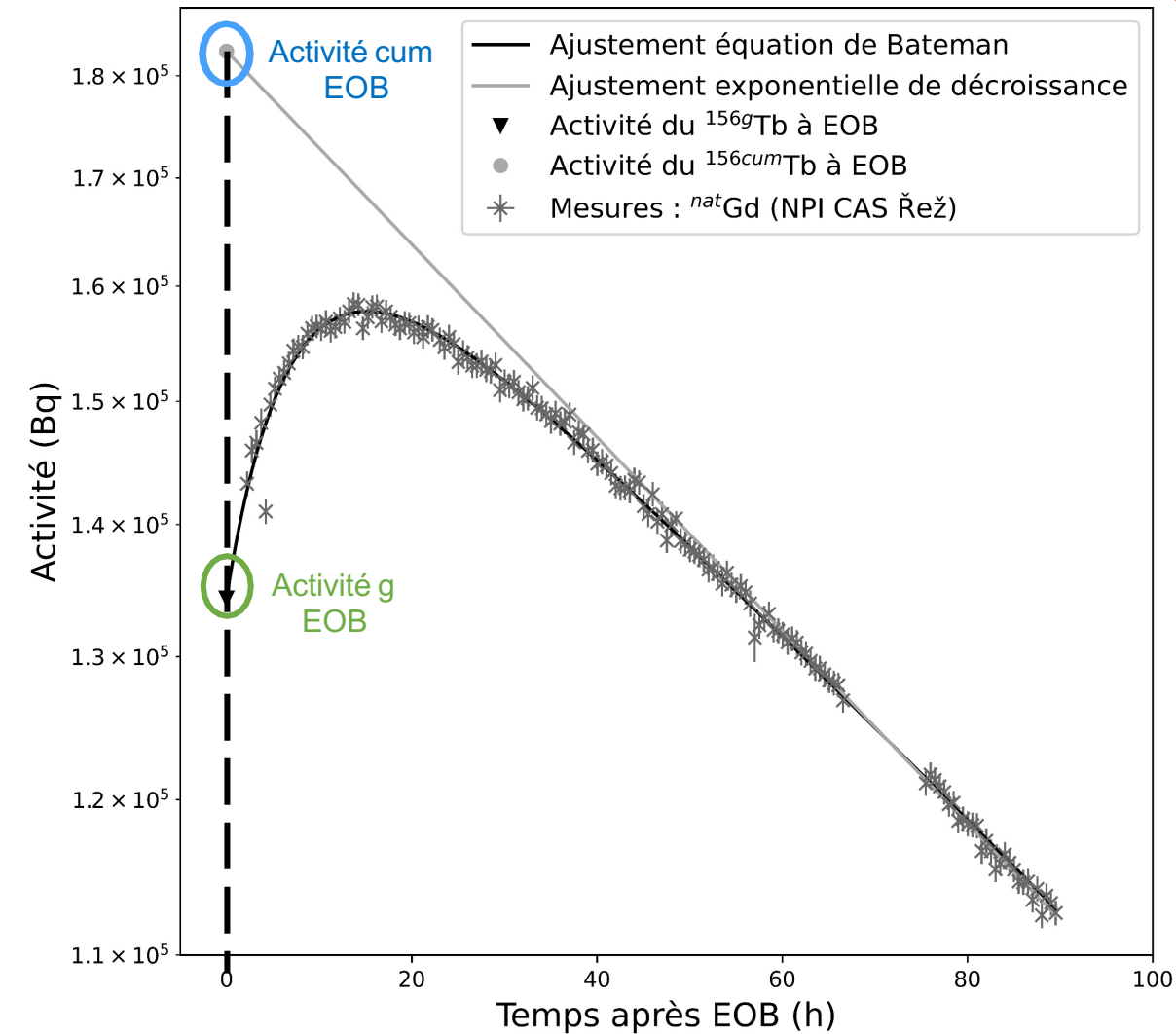
➤ Suivi de la désintégration du  $^{156g}\text{Tb}$

➤ Fit par l'équation de Bateman

$$A_g(t) = A_g(0)e^{-\lambda_g t} + \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_{m1}} A_{m1}(0)[e^{-\lambda_{m1}t} - e^{-\lambda_g t}] + \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_{m2}} A_{m2}(0)[e^{-\lambda_{m2}t} - e^{-\lambda_g t}]$$



## Mesures d'activité du $^{156}\text{gTb}$



## • Protocole pour les sections efficaces de production individuelles

➤ Suivi de la désintégration du  $^{156}\text{gTb}$

➤ Fit par l'équation de Bateman

➤ Obtention des activités initiales des isomères

$$A_g(t) = A_g(0) e^{-\lambda_g t} + \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_{m1}} A_{m1}(0) [e^{-\lambda_{m1} t} - e^{-\lambda_g t}] + \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_{m2}} A_{m2}(0) [e^{-\lambda_{m2} t} - e^{-\lambda_g t}]$$

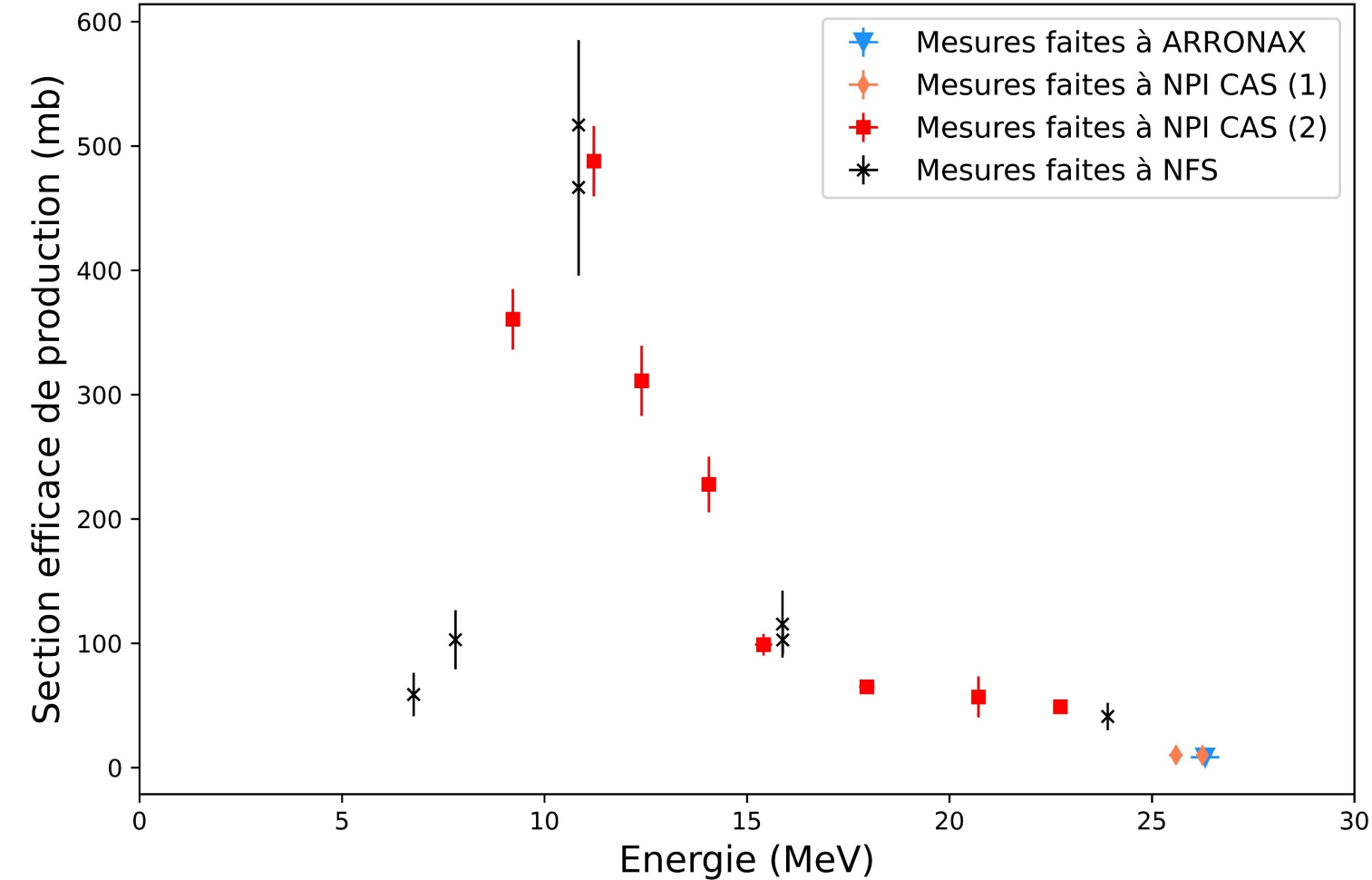
➤ Calcul des sections efficaces de production

### Section efficace de production à partir de $^{nat}\text{Gd}$ (mb)

Déduite de l'exp. de décroissance	Déduites du fit de l'équation de Bateman		
$^{156}\text{cumTb}$	$^{156}\text{gTb}$	$^{156}\text{m1Tb}$	$^{156}\text{m2Tb}$
$337. \pm 18.$	$220. \pm 12.$	$15.7 \pm 0.9$	$112. \pm 6.$



Fonction d'excitation de  $^{155}\text{Gd}(p,n)^{155}\text{Tb}$



- Cohérences des points issus des différentes installations

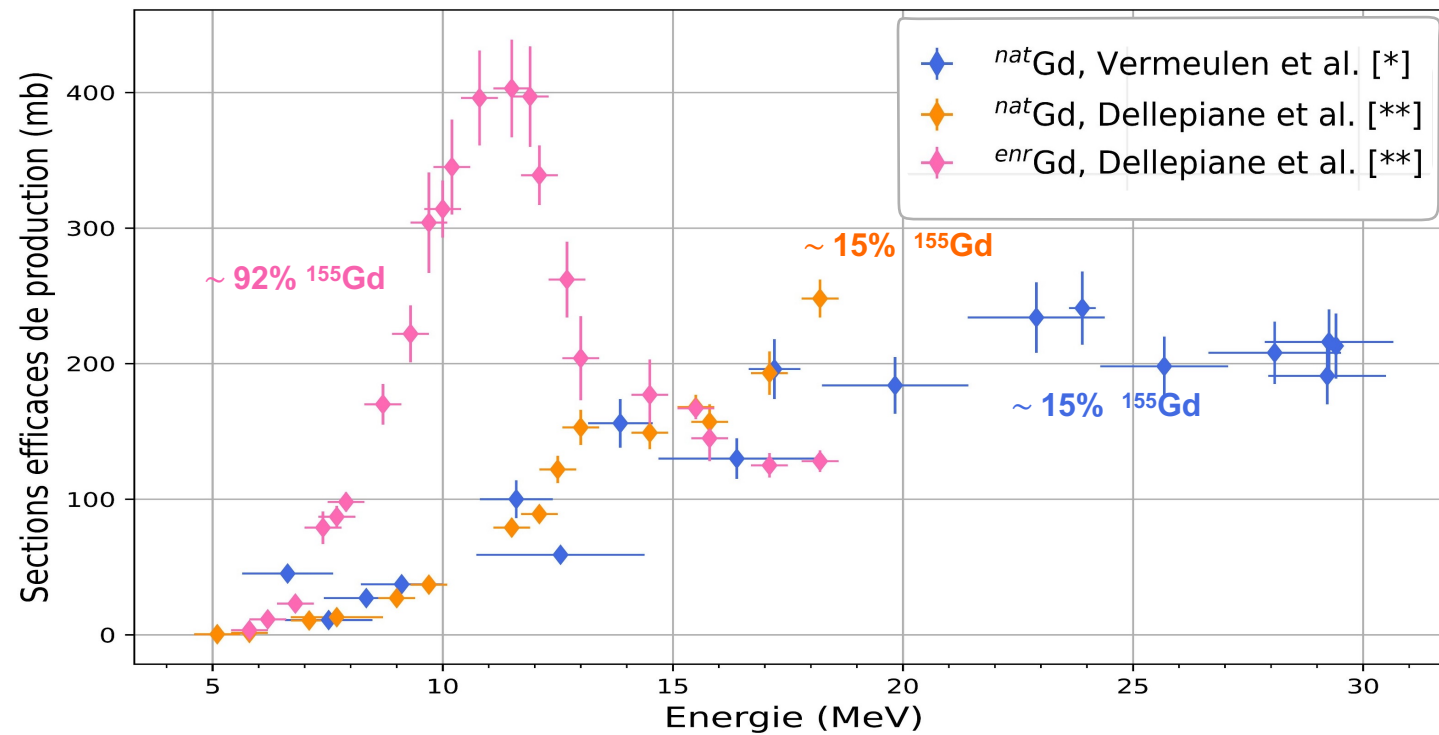


# Introduction – La réaction $^{155}\text{Gd}(p,n)^{155}\text{Tb}$ dans la bibliographie

\* : C. Vermeulen et al., *Cross sections of proton-induced reactions on  $^{nat}\text{Gd}$  with special emphasis on the production possibilities of  $^{152}\text{Tb}$  and  $^{155}\text{Tb}$* , Nucl. Instr. Meth. Res. B 275 (2012) 2012, 24-32, doi :10.1016/j.nimb.2011.12.064

\*\* : G. Dellepiane et al., *Cross sections measurement of terbium radioisotopes for an optimized  $^{155}\text{Tb}$  production with an 18 MeV medical PET cyclotron*, Applied Radiation and Isotopes 184 (2022), doi: 10.1016/j.apradiso.2022.110175

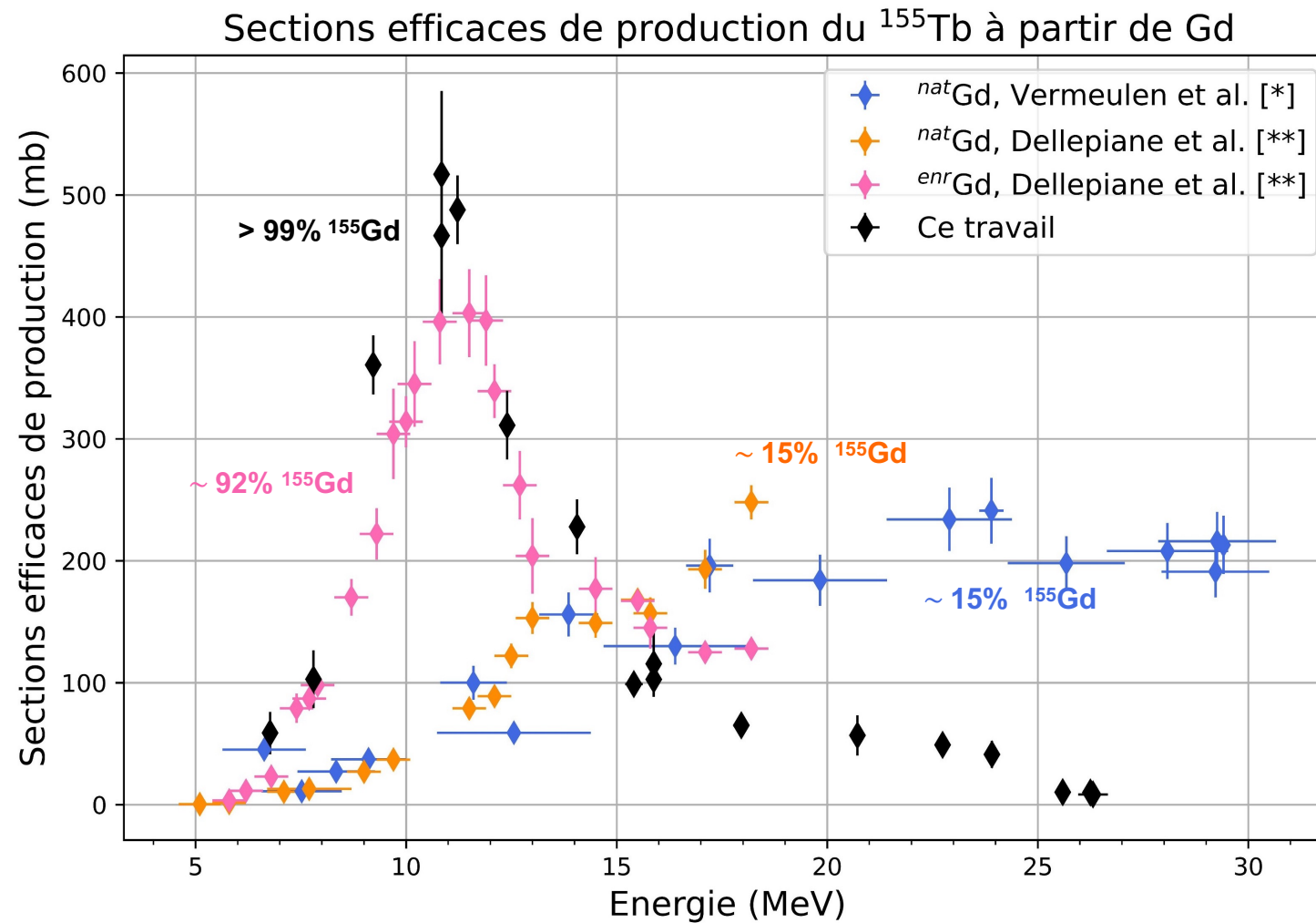
## Sections efficaces de production du $^{155}\text{Tb}$ à partir de Gd





# Nos résultats : $^{155}\text{Tb}$

\* : C. Vermeulen et al., *Cross sections of proton-induced reactions on  $^{nat}\text{Gd}$  with special emphasis on the production possibilities of  $^{152}\text{Tb}$  and  $^{155}\text{Tb}$* , Nucl. Instr. Meth. Res. B 275 (2012) 2012, 24-32, doi :10.1016/j.nimb.2011.12.064  
\*\* : G. Dellepiane et al., *Cross sections measurement of terbium radioisotopes for an optimized  $^{155}\text{Tb}$  production with an 18 MeV medical PET cyclotron*, Applied Radiation and Isotopes 184 (2022), doi: 10.1016/j.apradiso.2022.110175

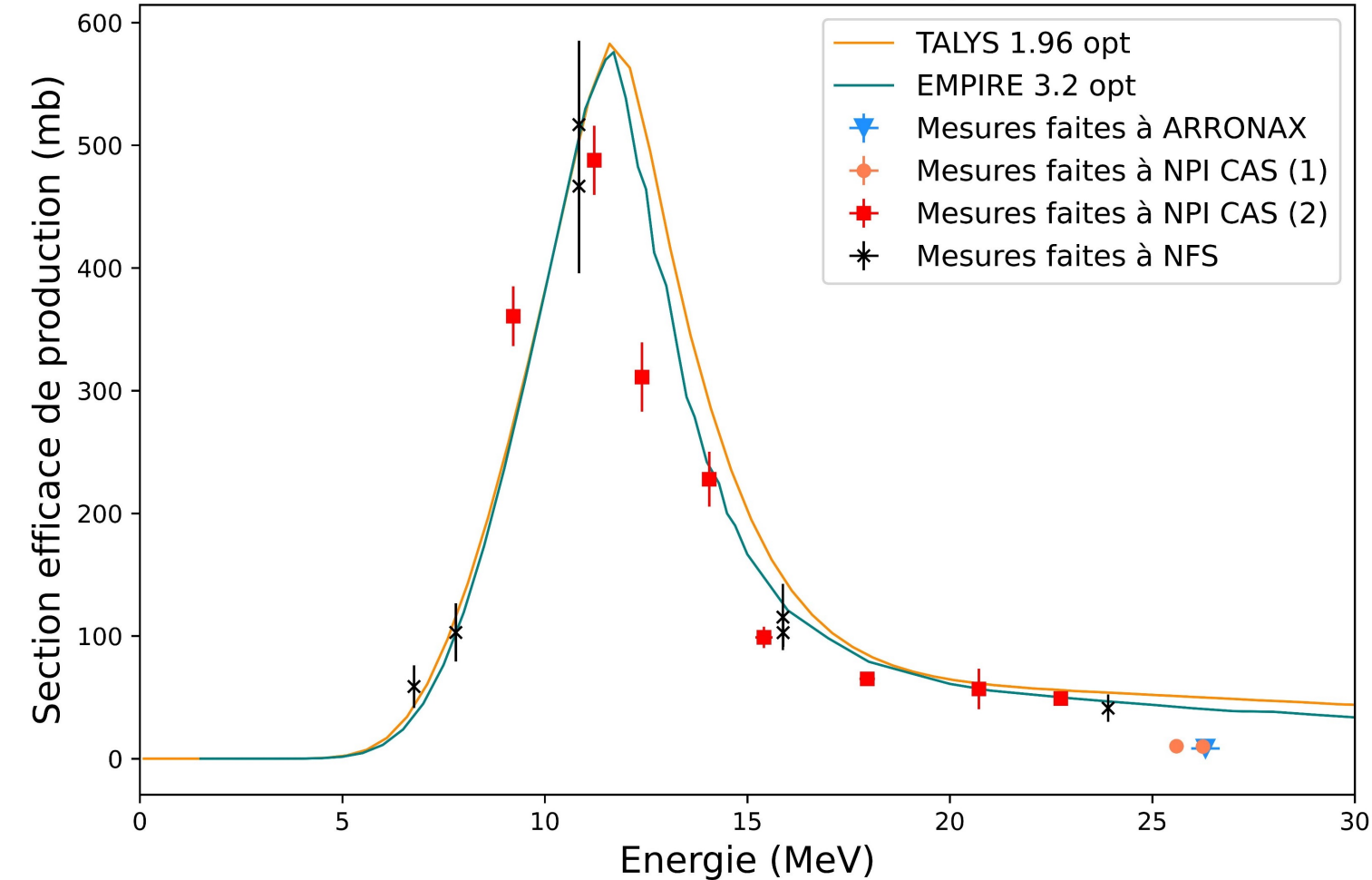






# Résultats : $^{155}\text{Tb}$

Fonction d'excitation de  $^{155}\text{Gd}(p,n)^{155}\text{Tb}$

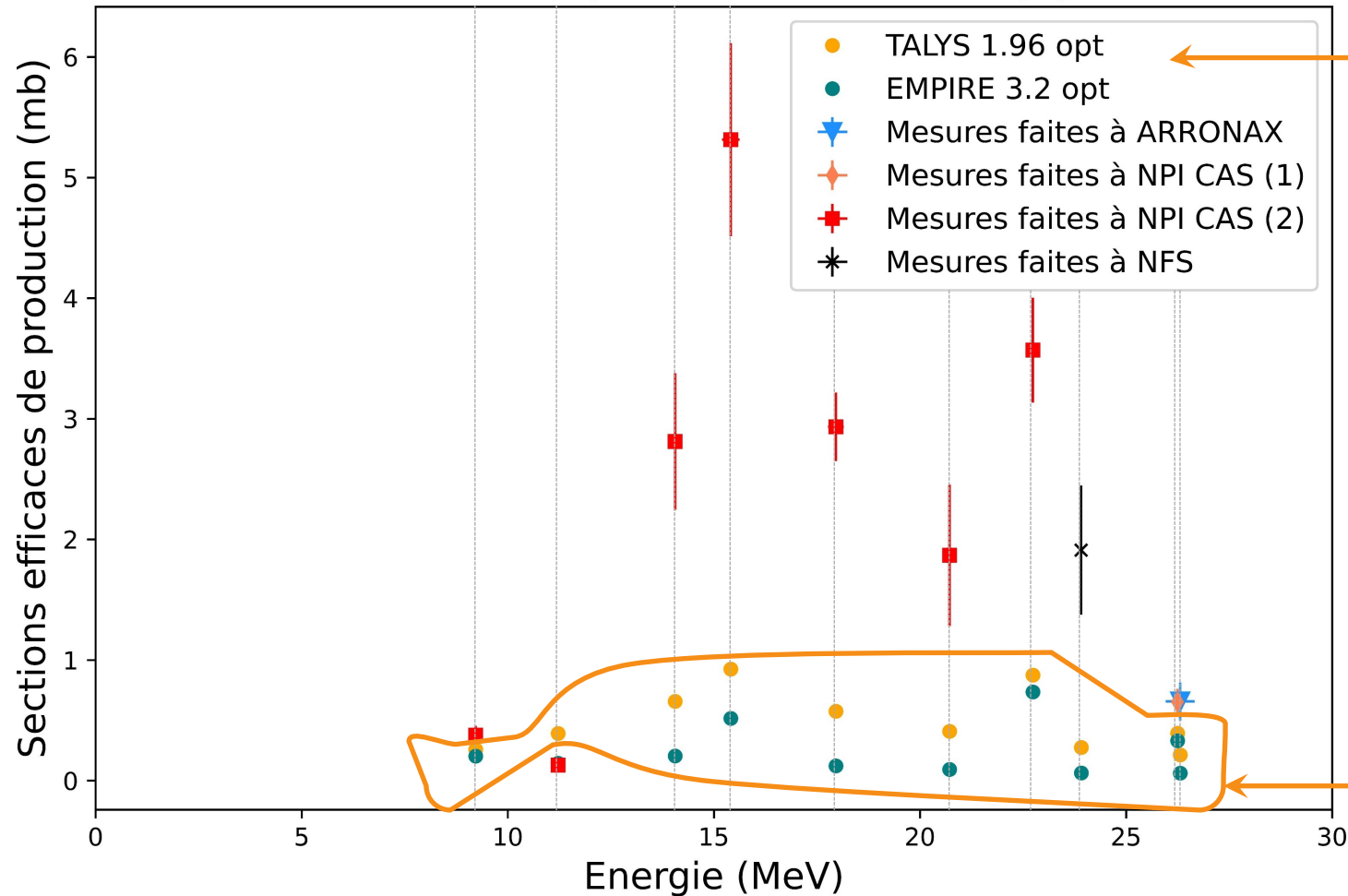


- Cohérences des points issus des différentes installations
- Courbe plus large décrite par les codes de réaction nucléaire : besoin de plus de mesures
- Maximum de la section efficace de production entre 7 et 27 MeV :  $\sim 11$  MeV



# Résultats : $^{156}\text{Gd}(p,\gamma)^{156}\text{Tb}$

Sections efficaces de production de  $h\text{-enr } ^{156}\text{Gd}(p,\gamma)^{156}\text{Tb}$



• Chaque point provenant d'un code a été calculé avec une composition isotopique identique à celle de la cible associée

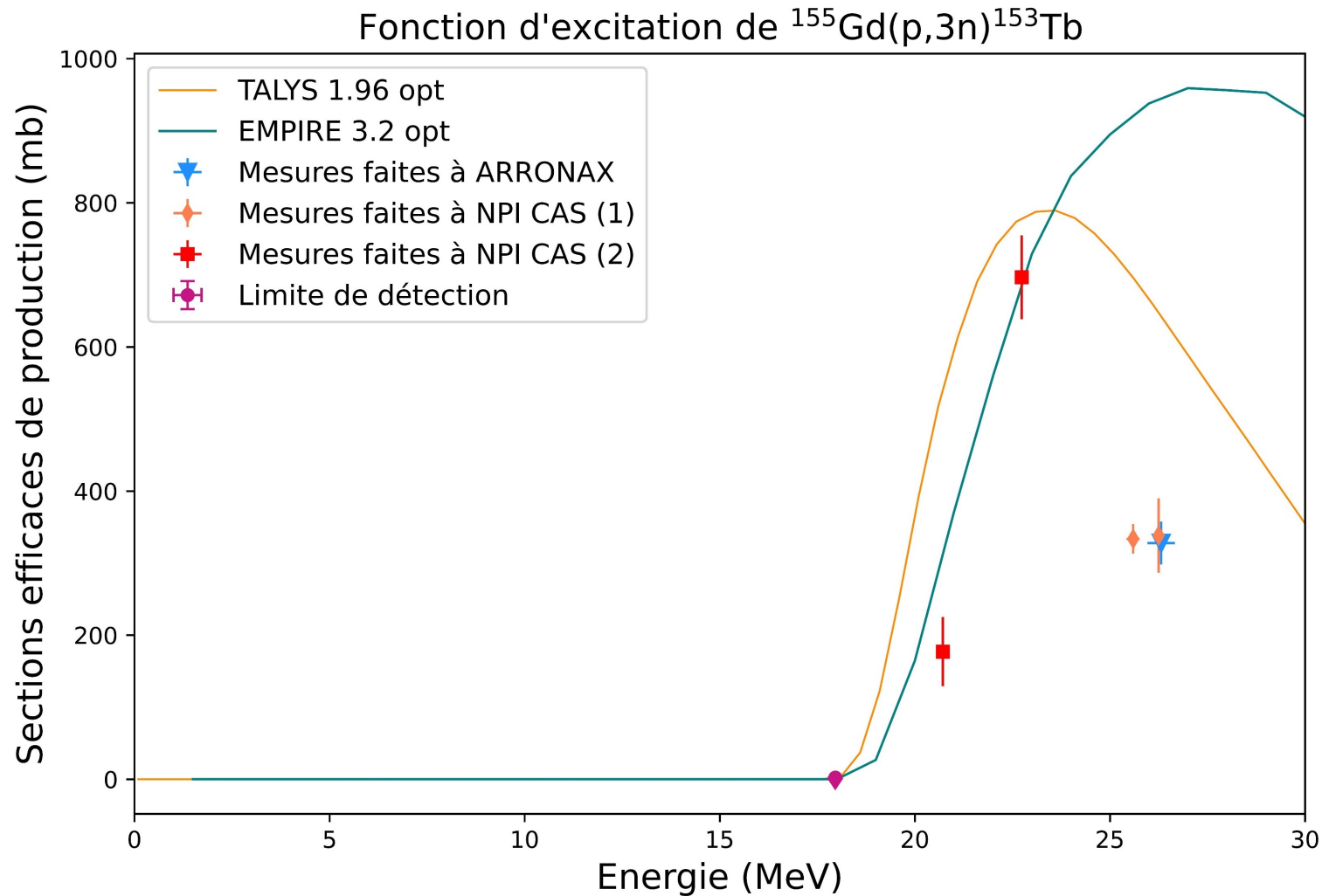
→ Points expérimentaux non compatibles avec leur équivalent TALYS/EMPIRE :

- Mauvaise estimation des isomères ?
- Mais même ordre de grandeur à 11 MeV

→ ~ 11 MeV : plus petite section efficace de production mesurée sur la gamme



# Résultats : $^{153}\text{Tb}$

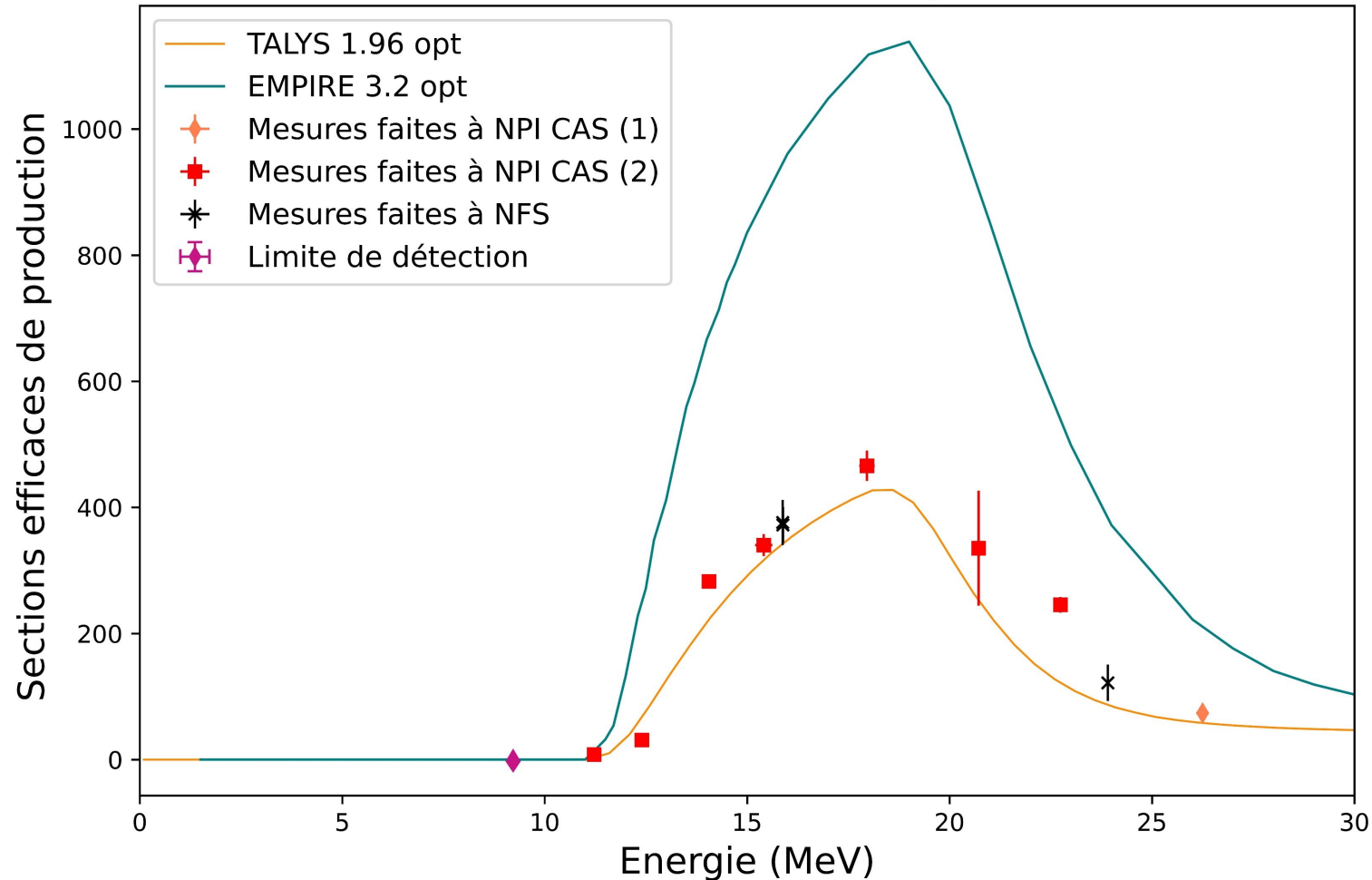


- Allure approchée par TALYS 1.96 opt → utile pour des estimations
- Maximum de la section efficace de production entre 7 et 27 MeV :  $\sim 23$  MeV
- Possible d'éviter le  $^{153}\text{Tb}$  :  $E_{\text{protons}} < 18$  MeV



# Résultats : $^{154}\text{gTb}$

Fonction d'excitation de  $^{155}\text{Gd}(p,2n)^{154}\text{gTb}$

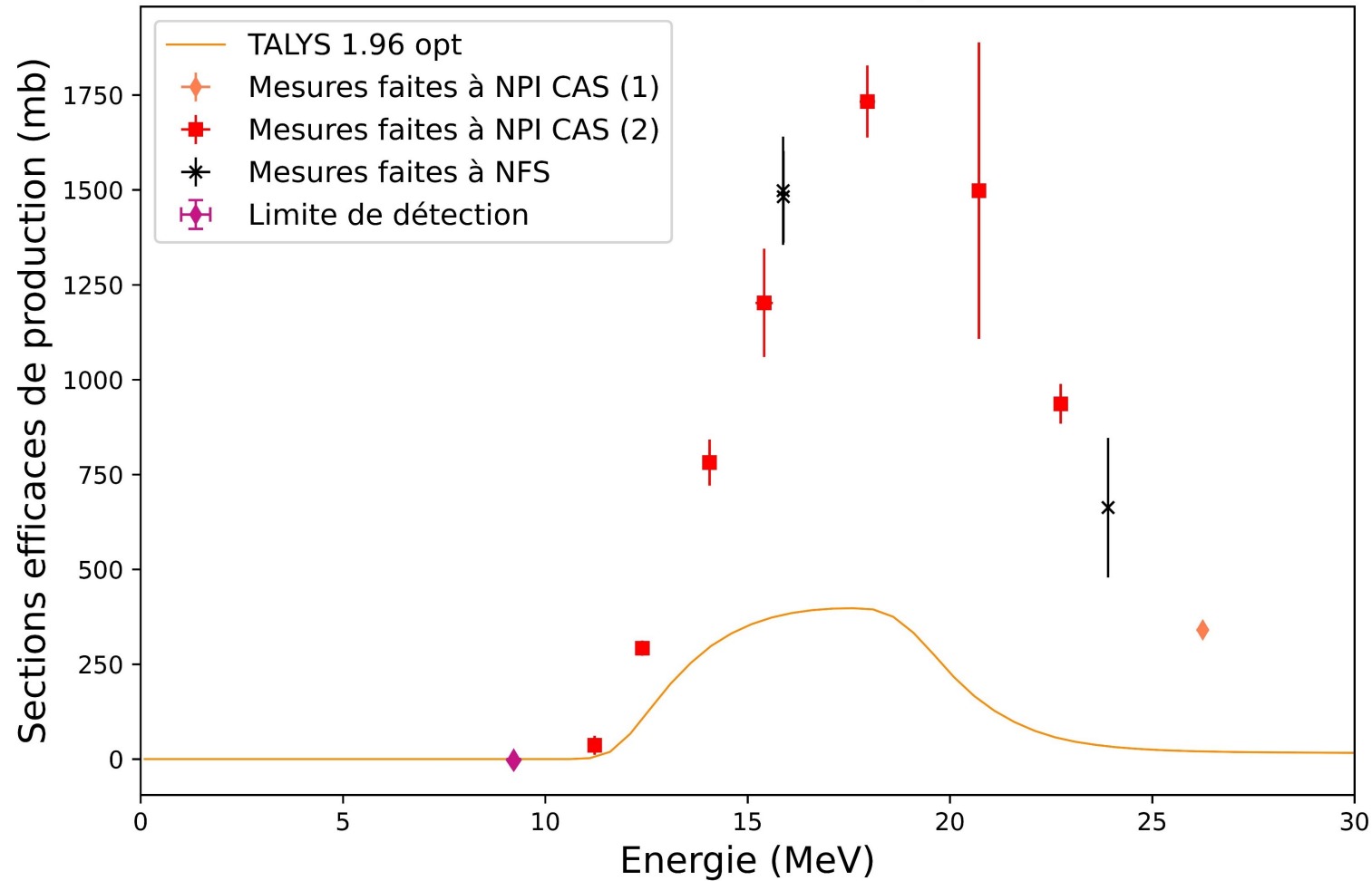


- Allure approchée par TALYS 1.96 opt → utile pour des estimations
- EMPIRE 3.2 opt → pas de considération des états isomériques
- Maximum de la section efficace de production entre 7 et 27 MeV : ~ 18 MeV



# Résultats : $^{154m1}\text{Tb}$

Fonction d'excitation de  $^{155}\text{Gd}(p,2n)^{154m1}\text{Tb}$

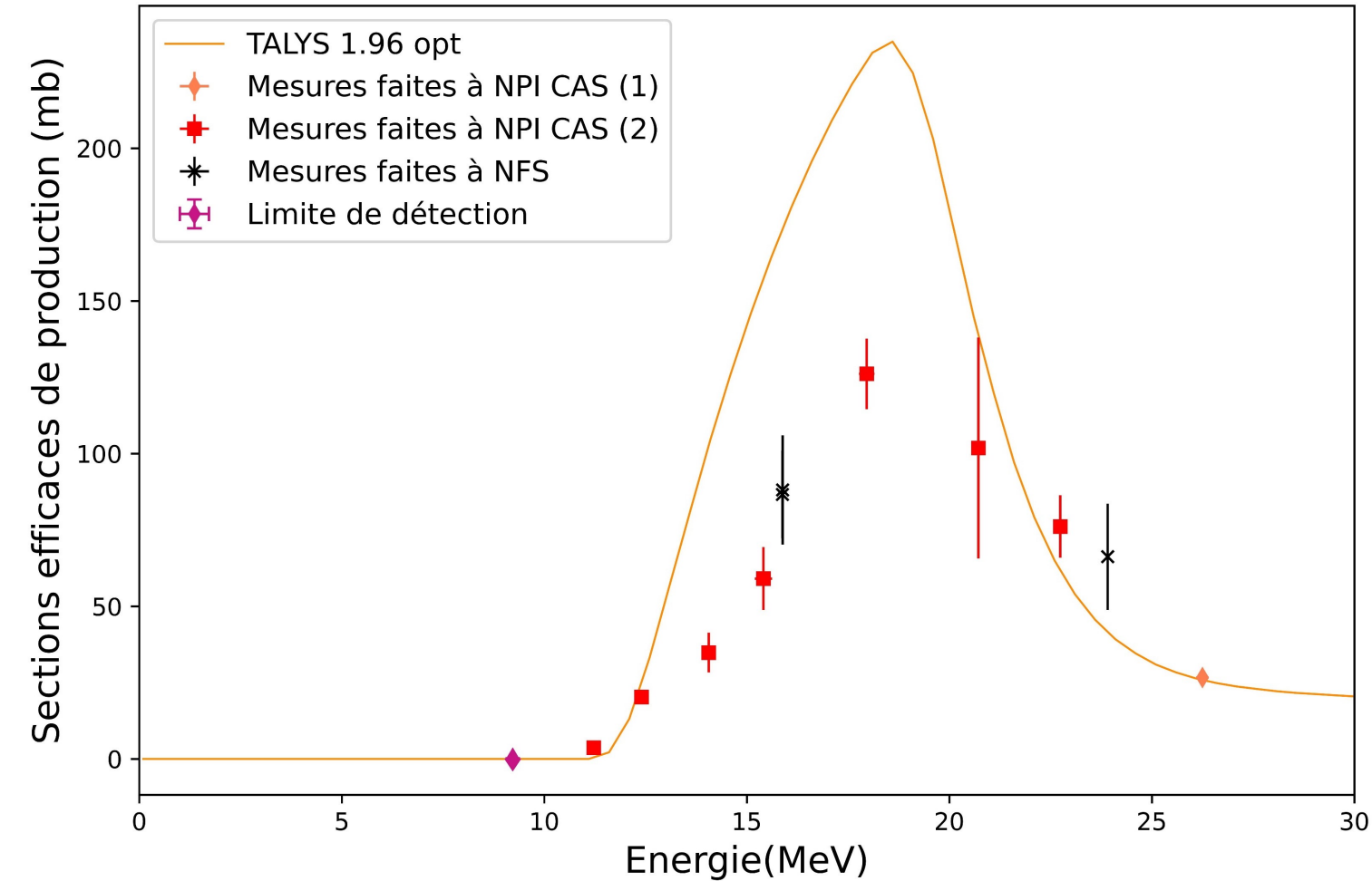


- Prédictions non compatibles avec les données expérimentales
- Maximum de la production entre 7 et 27 MeV :  $\sim 18$  MeV



# Résultats : $^{154m2}\text{Tb}$

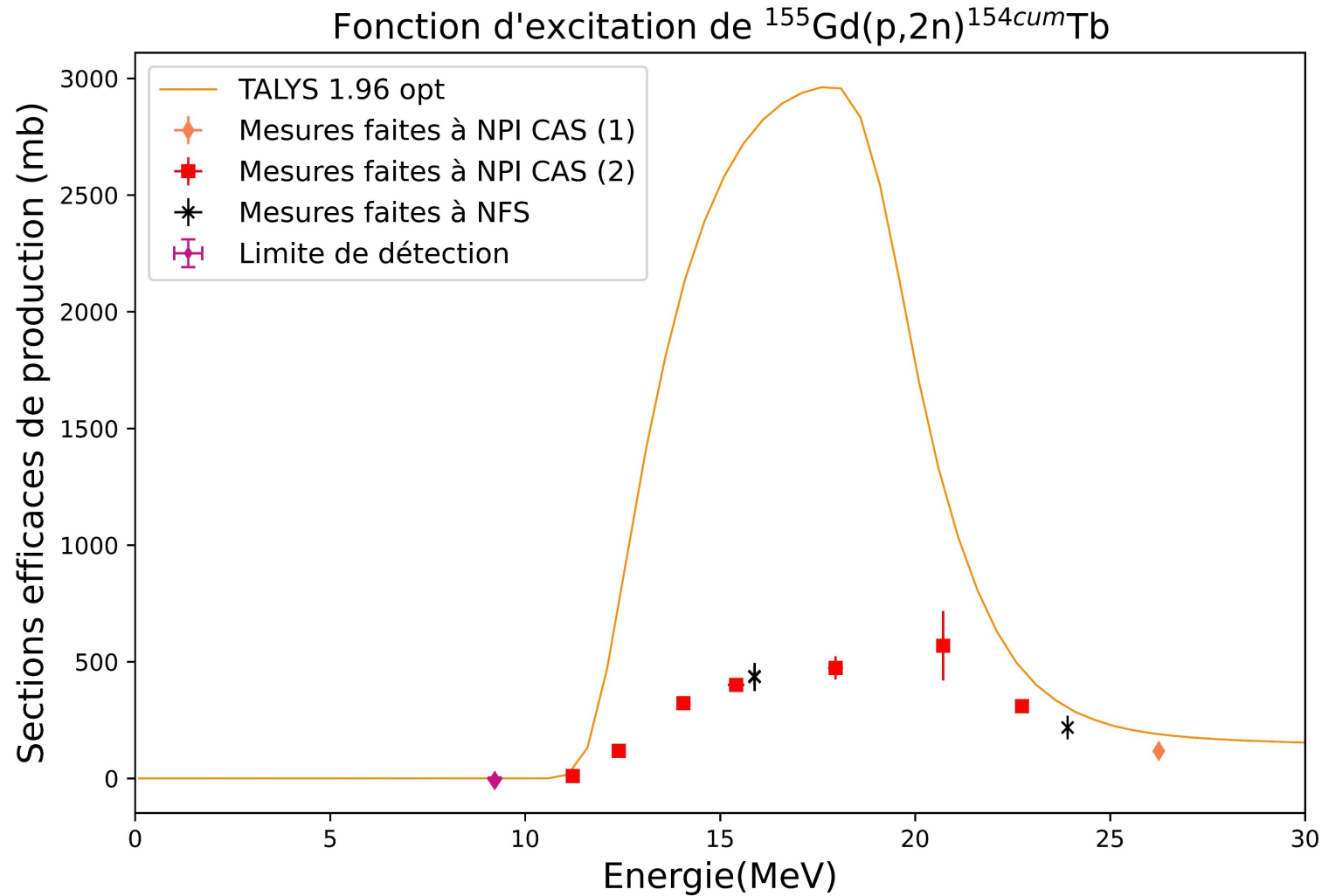
Fonction d'excitation de  $^{155}\text{Gd}(p,2n)^{154m2}\text{Tb}$



- Prédictions non compatibles avec les données expérimentales
- Maximum de la production entre 7 et 27 MeV :  $\sim 18$  MeV



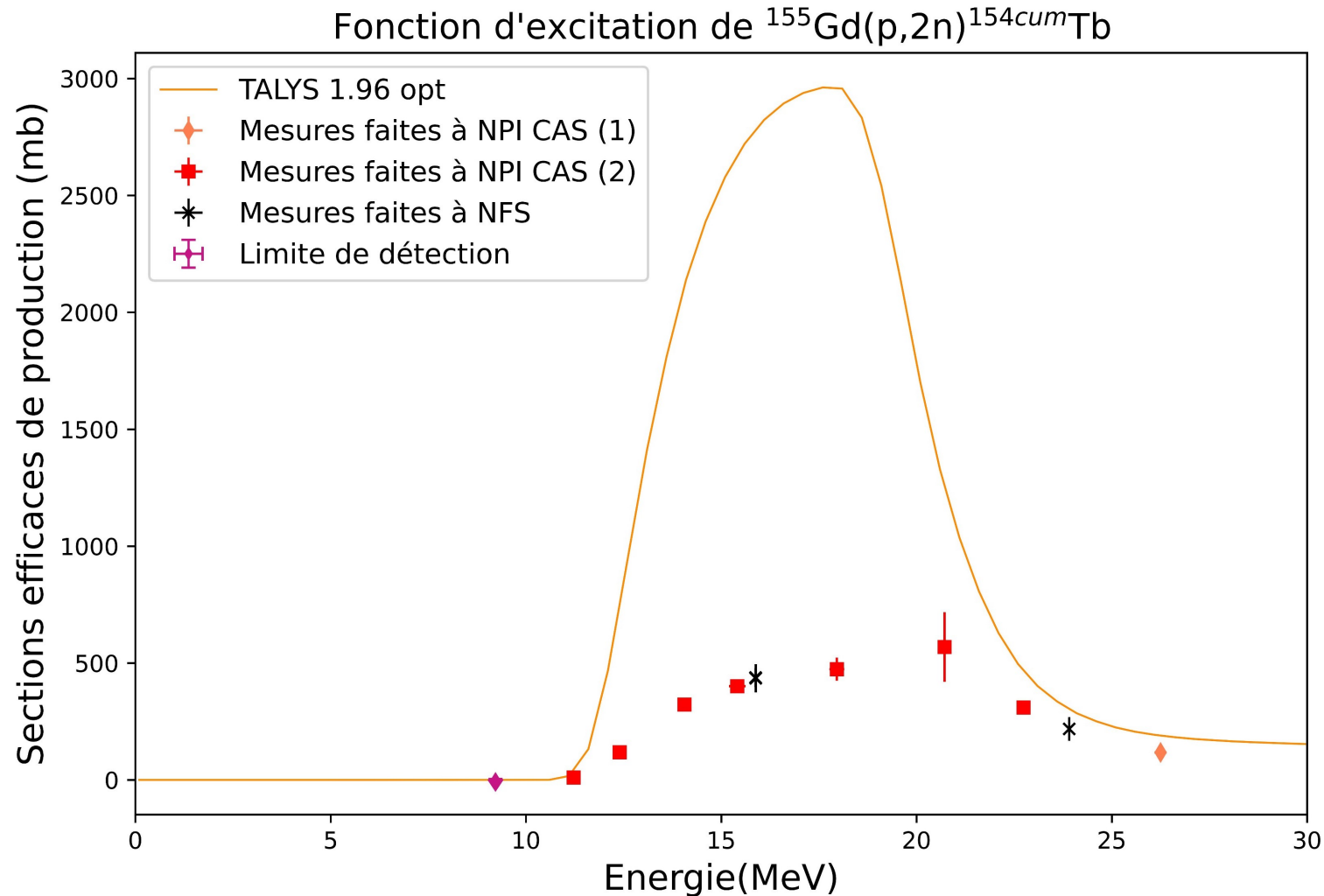
# Résultats : $^{154}\text{cumTb}$



- TALYS 1.96 opt : prédictions non compatibles avec les données expérimentales
  - Probablement du fait de la non-reproductibilité des sections efficaces de production des  $^{154m1, m2}\text{Tb}$
  - Utilisation de TALYS pour des estimations : renormalisation obligatoire



# Résultats : $^{154}\text{cumTb}$



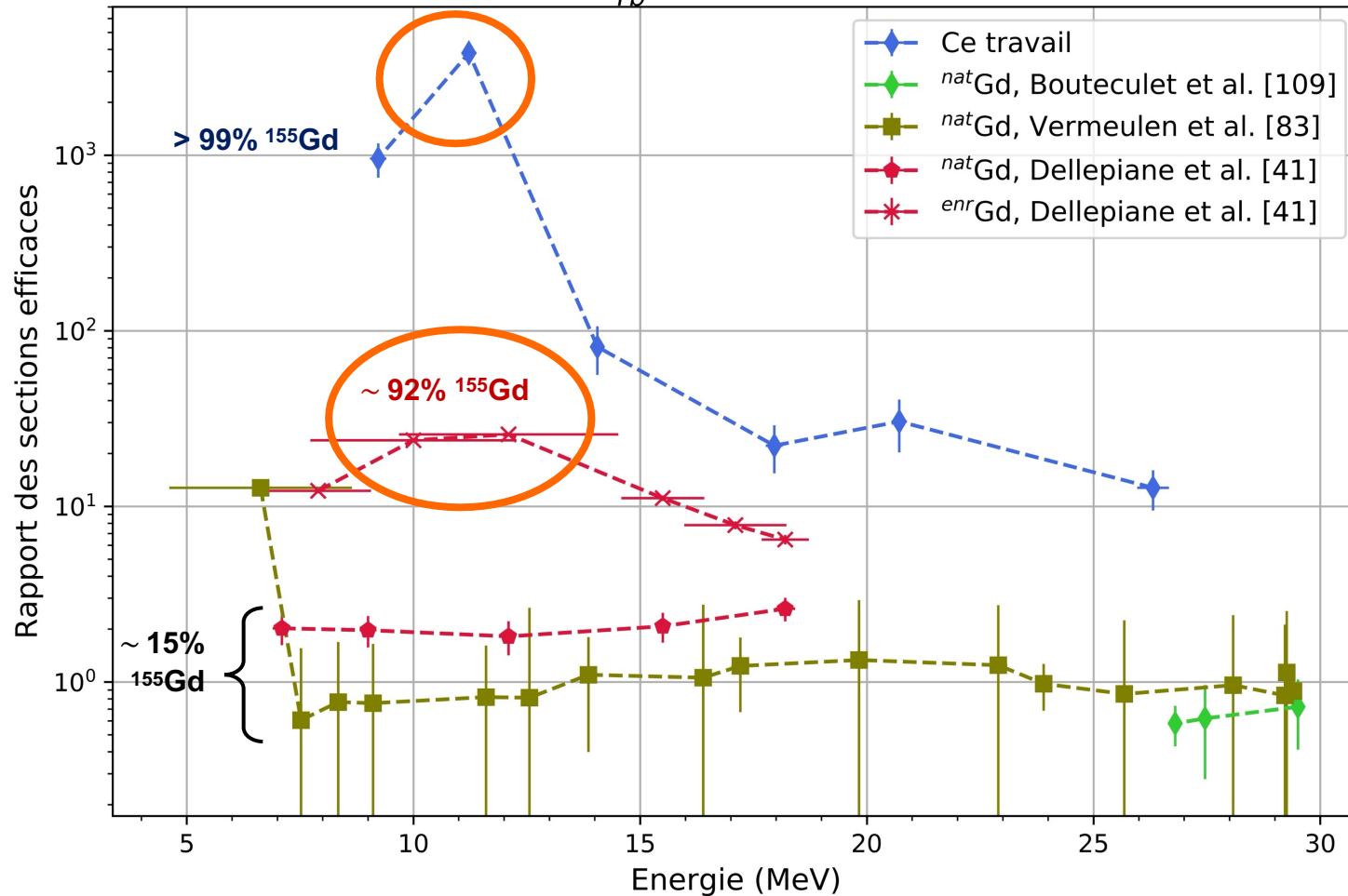
- **TALYS 1.96 opt** : prédictions non compatibles avec les données expérimentales
  - Probablement du fait de la non-reproductibilité des sections efficaces de production des  $^{154}\text{m1}, \text{m2Tb}$
  - Utilisation de TALYS pour des estimations : renormalisation obligatoire
- **Maximum de la production entre 7 et 27 MeV :  $\sim 18$  MeV**





# Optimisation de la production du $^{155}\text{Tb}$ : rapport $^{155}\text{Tb} / ^{156\text{cum}}\text{Tb}$

Rapport des sections efficaces  $\frac{^{155}\text{Tb}}{^{156\text{cum}}\text{Tb}}$  en fonction de l'énergie des protons incidents



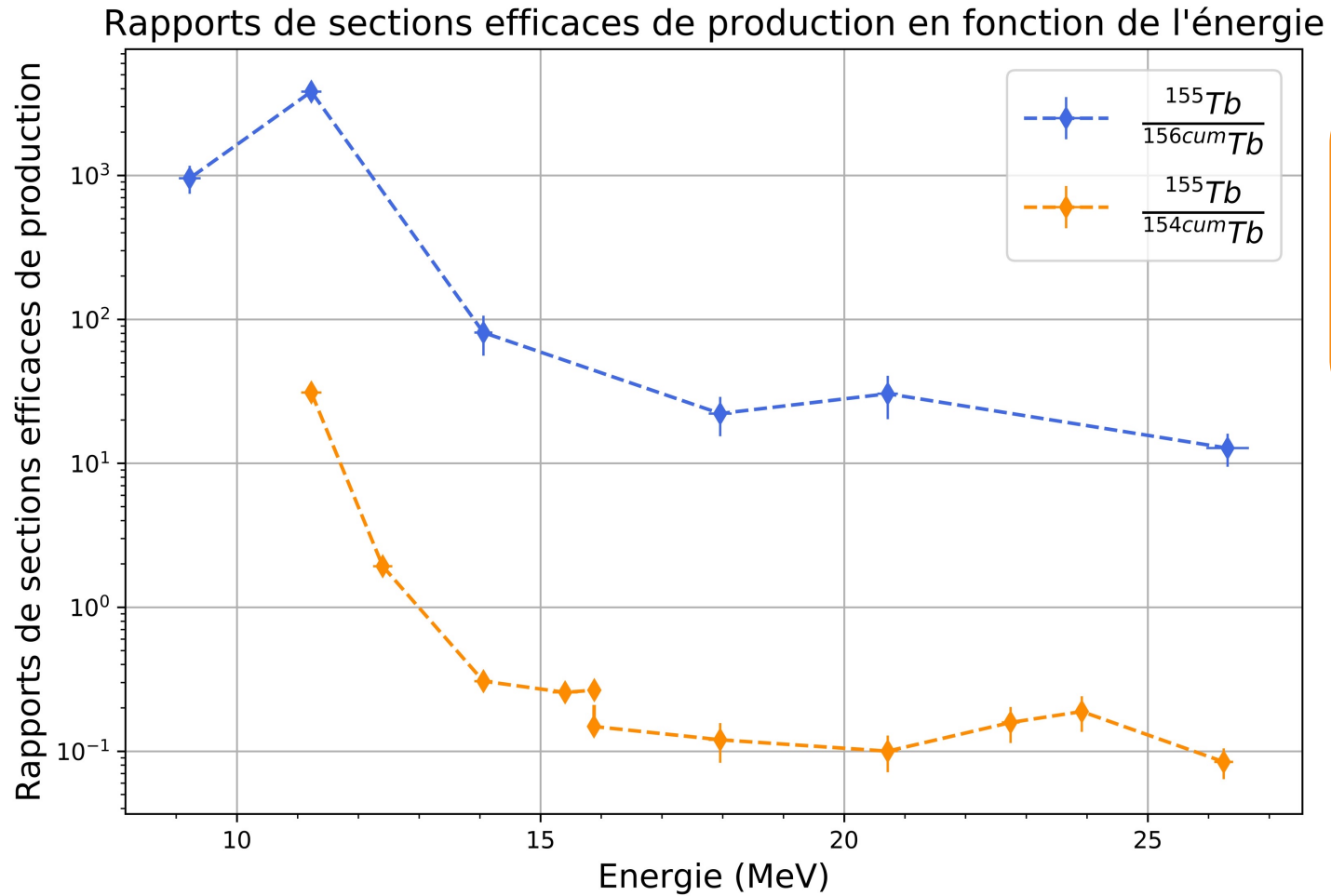
Minimiser la production du  $^{156\text{cum}}\text{Tb}$

➤  $^{155}\text{Tb}/^{156\text{cum}}\text{Tb}$  maximisé pour ~ 11 MeV

dès un enrichissement en  $^{155}\text{Gd} = 91,9\%$



# Optimisation de la production du $^{155}\text{Tb}$ : rapport $^{155}\text{Tb} / ^{154\text{cum}}\text{Tb}$



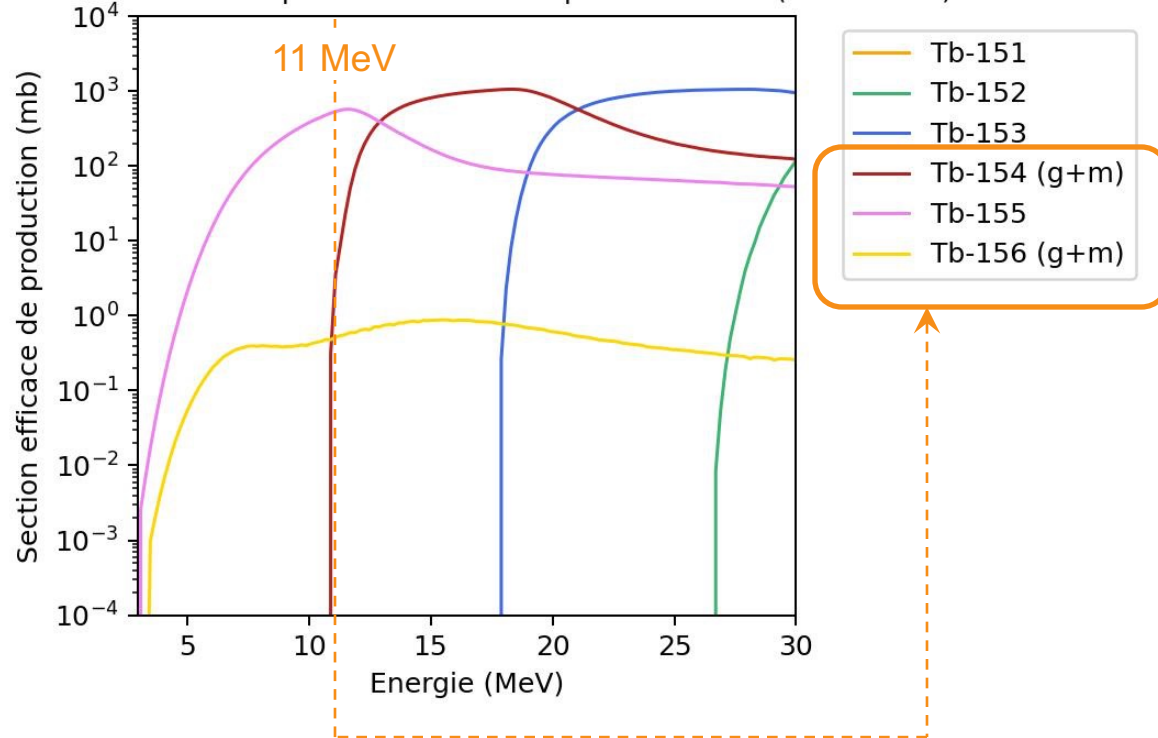
Maximiser le  $^{155}\text{Tb}$   
Minimiser les  $^{156\text{cum}}\text{Tb}$  et  $^{154\text{m}}\text{Tb}$

➤ Optimisation pour  $\sim 11$  MeV dès un enrichissement en  $^{155}\text{Gd} = 91,9\%$



# Résultats : choix de la pureté optimale d'une cible

Sections efficaces de production des Tb à partir de  $^{155}\text{Gd}$  (TALYS 1.96)

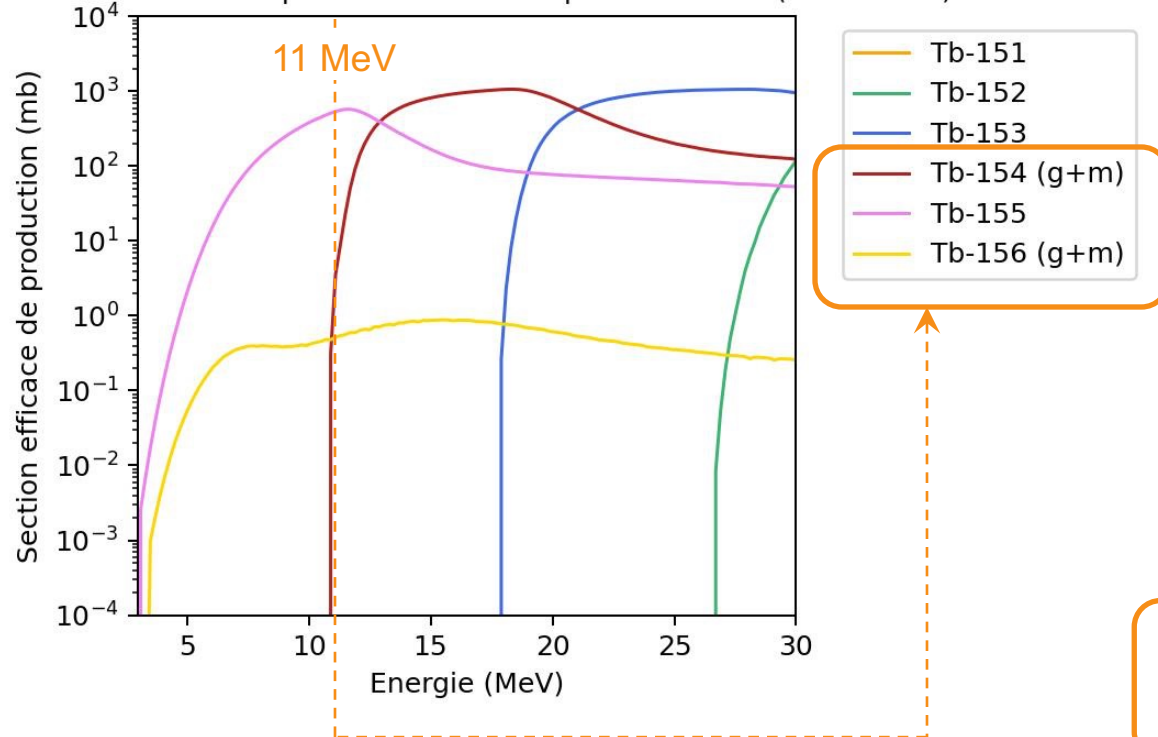


Contaminants produits par le  $^{155}\text{Gd}$  à 11 MeV :  $^{154}\text{Tb}$  et  $^{156}\text{Tb}$



# Résultats : choix de la pureté optimale d'une cible

Sections efficaces de production des Tb à partir de  $^{155}\text{Gd}$  (TALYS 1.96)



Contaminants produits par le  $^{155}\text{Gd}$  à 11 MeV :  $^{154}\text{Tb}$  et  $^{156}\text{Tb}$

produits aussi à 11 MeV  
par les  $^{154}\text{Gd}$  et  $^{156}\text{Gd}$  et  $^{157}\text{Gd}$

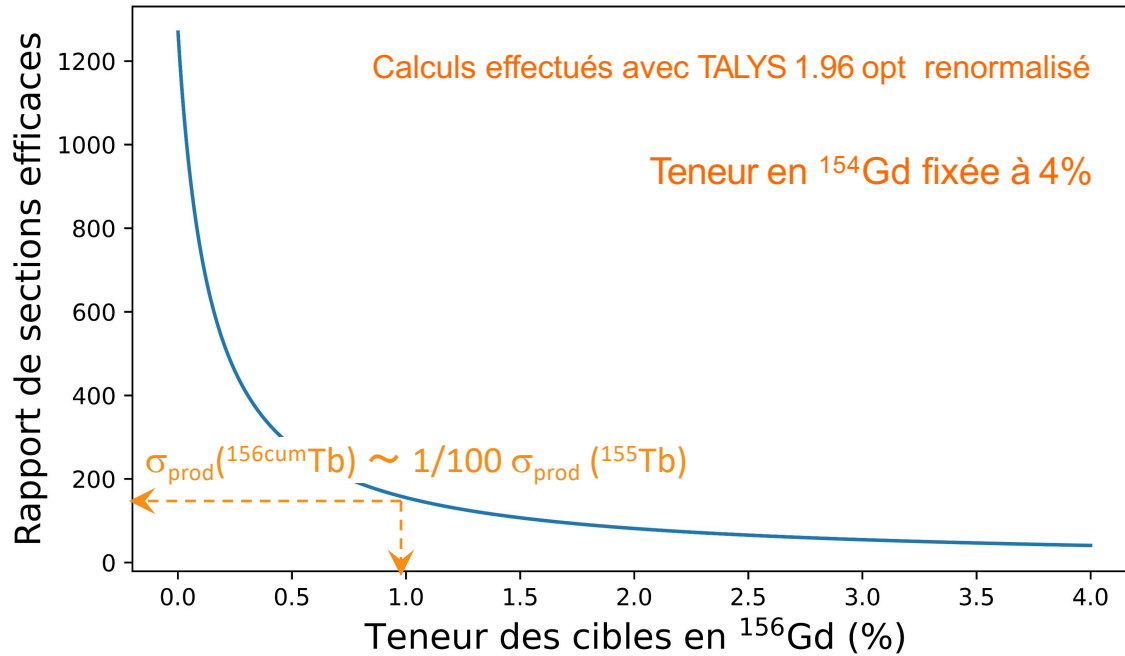
Isotopes pour une cible « optimale » :  $^{155}\text{Gd}$

+ contaminants « autorisés » :  $^{154}\text{Gd}$  +  $^{156}\text{Gd}$



# Résultats : choix de la pureté optimale d'une cible

Rapport de sections efficaces  $\frac{\sigma_{\text{prod}}(^{155}\text{Tb})}{\sigma_{\text{prod}}(^{156}\text{cumTb})}$  à 11 MeV  
en fonction de la teneur en  $^{156}\text{Gd}$  dans la cible

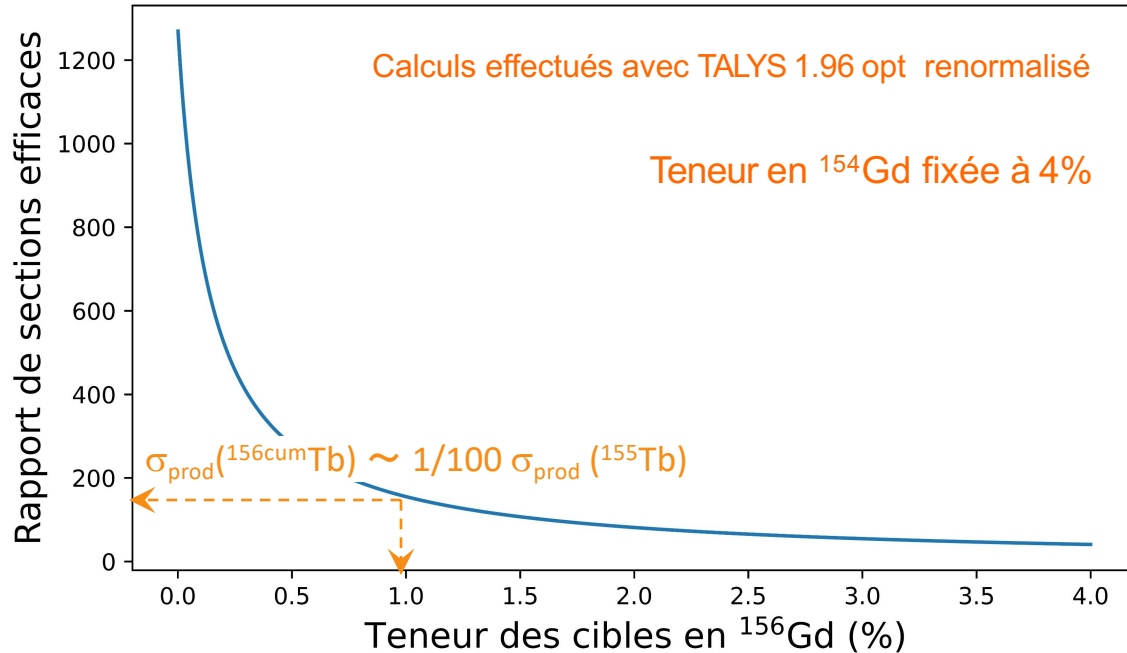


- Sensibilité élevée à la teneur en  $^{156}\text{Gd}$
- Minimisation du  $^{156}\text{Gd}$  autant que possible



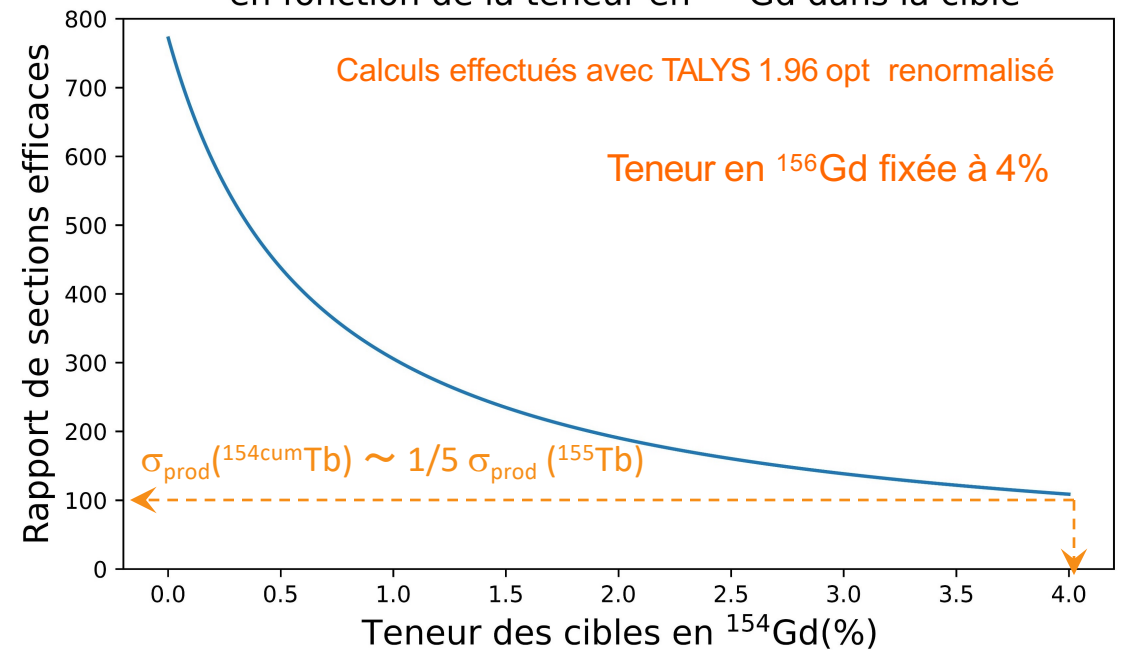
# Résultats : choix de la pureté optimale d'une cible

Rapport de sections efficaces  $\frac{\sigma_{\text{prod}}(^{155}\text{Tb})}{\sigma_{\text{prod}}(^{156}\text{Gd})}$  à 11 MeV  
en fonction de la teneur en  $^{156}\text{Gd}$  dans la cible



- Sensibilité élevée à la teneur en  $^{156}\text{Gd}$
- Minimisation du  $^{156}\text{Gd}$  autant que possible

Rapport de sections efficaces  $\frac{\sigma_{\text{prod}}(^{155}\text{Tb})}{\sigma_{\text{prod}}(^{154}\text{Gd})}$  à 11 MeV  
en fonction de la teneur en  $^{154}\text{Gd}$  dans la cible

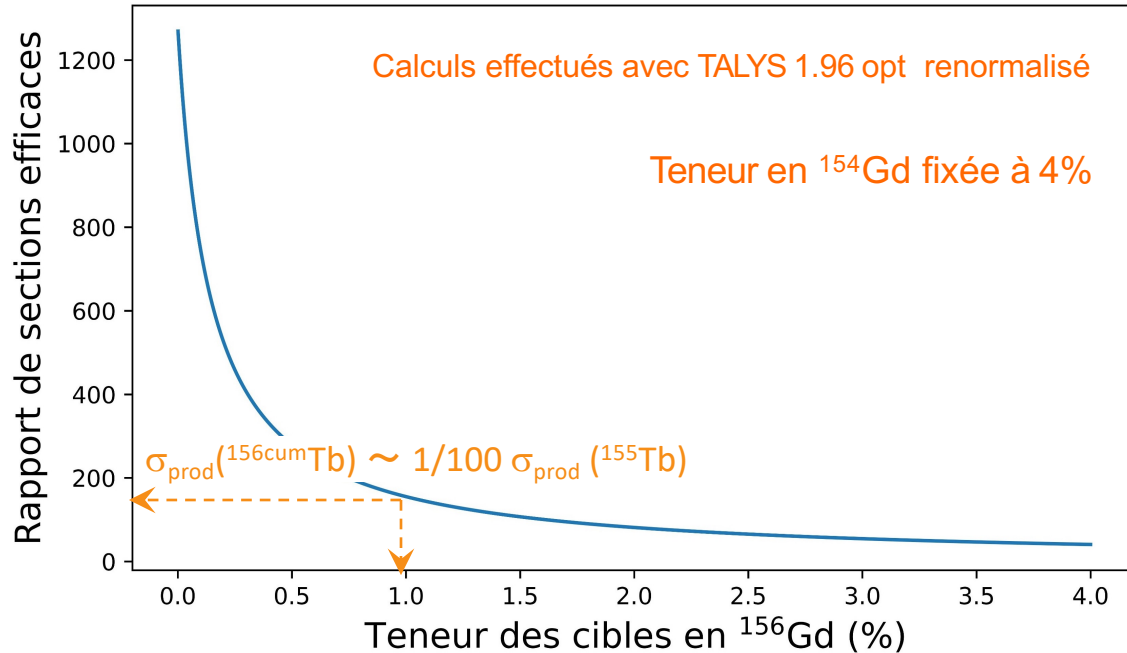


- $T_{1/2} (^{154}\text{Tb}) = T_{1/2} (^{155}\text{Tb})/5,6$
- Contamination plus simple à éliminer



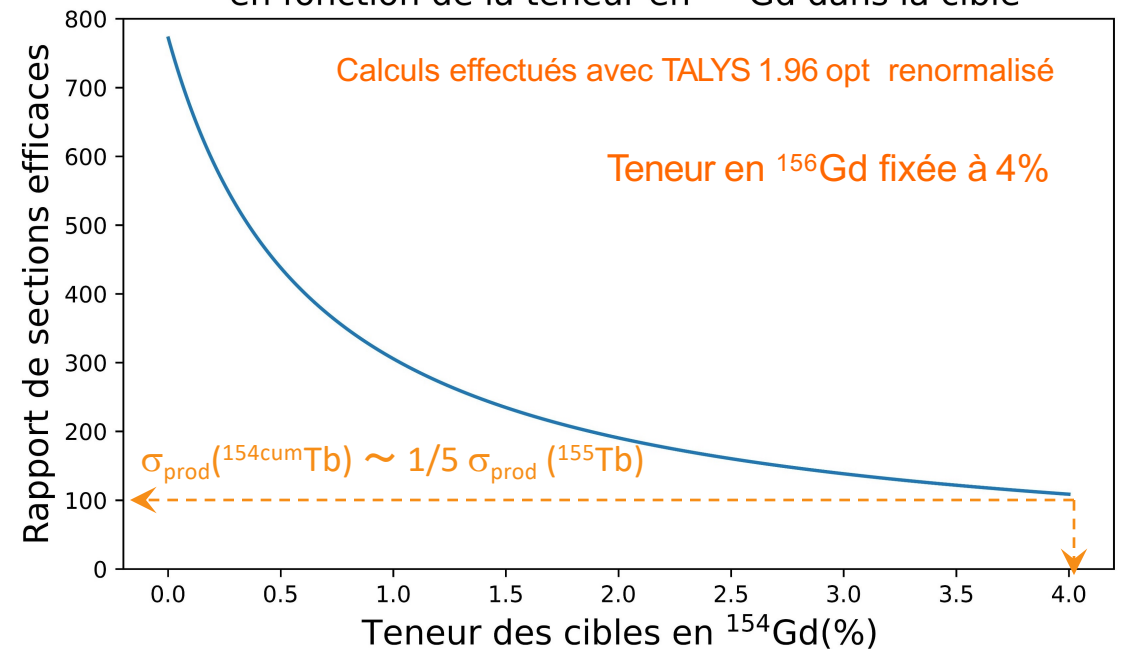
# Résultats : choix de la pureté optimale d'une cible

Rapport de sections efficaces  $\frac{\sigma_{\text{prod}}(^{155}\text{Tb})}{\sigma_{\text{prod}}(^{156}\text{Gd})}$  à 11 MeV  
en fonction de la teneur en  $^{156}\text{Gd}$  dans la cible



- Sensibilité élevée à la teneur en  $^{156}\text{Gd}$
- Minimisation du  $^{156}\text{Gd}$  autant que possible

Rapport de sections efficaces  $\frac{\sigma_{\text{prod}}(^{155}\text{Tb})}{\sigma_{\text{prod}}(^{154}\text{Gd})}$  à 11 MeV  
en fonction de la teneur en  $^{154}\text{Gd}$  dans la cible



- $T_{1/2} (^{154}\text{Tb}) = T_{1/2} (^{155}\text{Tb})/5,6$
- Contamination plus simple à éliminer

Composition d'une cible « optimale » : 96% de  $^{155}\text{Gd}$

+ contaminants « autorisés » :  $^{154}\text{Gd} < 4\%$  +  $^{156}\text{Gd} < 10^{-3} \%$



# Conclusions

- ✓ **fonction d'excitation de la réaction  $^{155}\text{Gd}(p,n)^{155}\text{Tb}$  mesurée**
- quelques points pour la production des  $^{153}, ^{154}, ^{156}\text{Tb}$  mesurés
  - mal reproduits par TENDL et EMIPRE
  - mauvaise prise en compte des isomères du  $^{154}\text{Tb}$
- ✓ **cible « optimale » :  $96\% ^{155}\text{Gd} + ^{154}\text{Gd} < 4\% + ^{156}\text{Gd} < 10^{-3} \%$**





# Conclusions

✓ **fonction d'excitation de la réaction  $^{155}\text{Gd}(p,n)^{155}\text{Tb}$  mesurée**

- quelques points pour la production des  $^{153}, ^{154}, ^{156}\text{Tb}$  mesurés  
→ mal reproduits par TENDL et EMIPRE  
mauvaise prise en compte des isomères du  $^{154}\text{Tb}$

✓ **cible « optimale » :  $96\% ^{155}\text{Gd} + ^{154}\text{Gd} < 4\% + ^{156}\text{Gd} < 10^{-3} \%$**

Imagerie avec un microPET clinique (CHUV – Lausanne; fantôme NEMA-NU4):

(M.Hussein, M.A.Verdier)

activité mesurée dans la fenêtre [60-125 keV] :  **$79,8\% ^{156}\text{Tb}$  pour une contamination de 8%**



## Perspectives: estimations de taux de production à 11 MeV

- **Activité moyenne produite à EOB en  $^{155}\text{Tb}$  :**
    - Pour  $1,53 \cdot 10^{18}$  atomes irradiés en moyenne
    - Un courant de 197 nA en moyenne
    - Pendant 10 838 s (3h) en moyenne
    - **$1,5 \cdot 10^4$  Bq à EOB en moyenne**
  - **Dose imagerie  $\sim 100$  MBq**
    - Nombre d'atomes x 100 ( $\sim 100 \mu\text{m}$ )
    - Courant d'irradiation x 5 ( $1 \mu\text{A}$ )
    - Temps irradiation x 3 (9h)
    - **$\sim 220$  MBq EOB**
- } semble faisable ...



# Remerciements

- **IJCLab :**

- Charles-Olivier Bacri (directeur de thèse),
- Equipe MOSAIC, Hervé Lefort,
- Marie-Alix Duval, Marc-Antoine Verdier
- Brigitte Roussière, Julien Guillot
- Marc Ernoult

- **ASNR :** Alkiviadis Gourgiotis

- **NPI CAS :**

- Jaromir Mrázek,
- Ondřej Lebeda,
- Eva Šimečková,
- Anastasia Cassisa

- **Subatech, GIP ARRONAX :**

- Arnaud Guertin,
- Etienne Nigron

- **GANIL :**

- Xavier Ledoux,
- Jean-Charles Thomas



- Ce projet est partiellement financé par :

- Le contrat ANR-21-CE19-0037
- La MITI



- Ce projet est soutenu par :

- L'infrastructure CANAM, le projet franco-tchèque SPIRAL2-CZ EF16\_013/0001679 et l'accord entre NPI et le GANIL/SPIRAL2
- La plateforme de spectrométrie de masse de l'ASNR : Paterson