



Calcul benchmark avec les codes MCNP6 et PHITS pour les applications de blindage des accélérateurs de protons

Yurdunaz Çelik
Alexey Stankovskiy
Gert Van den Eynde



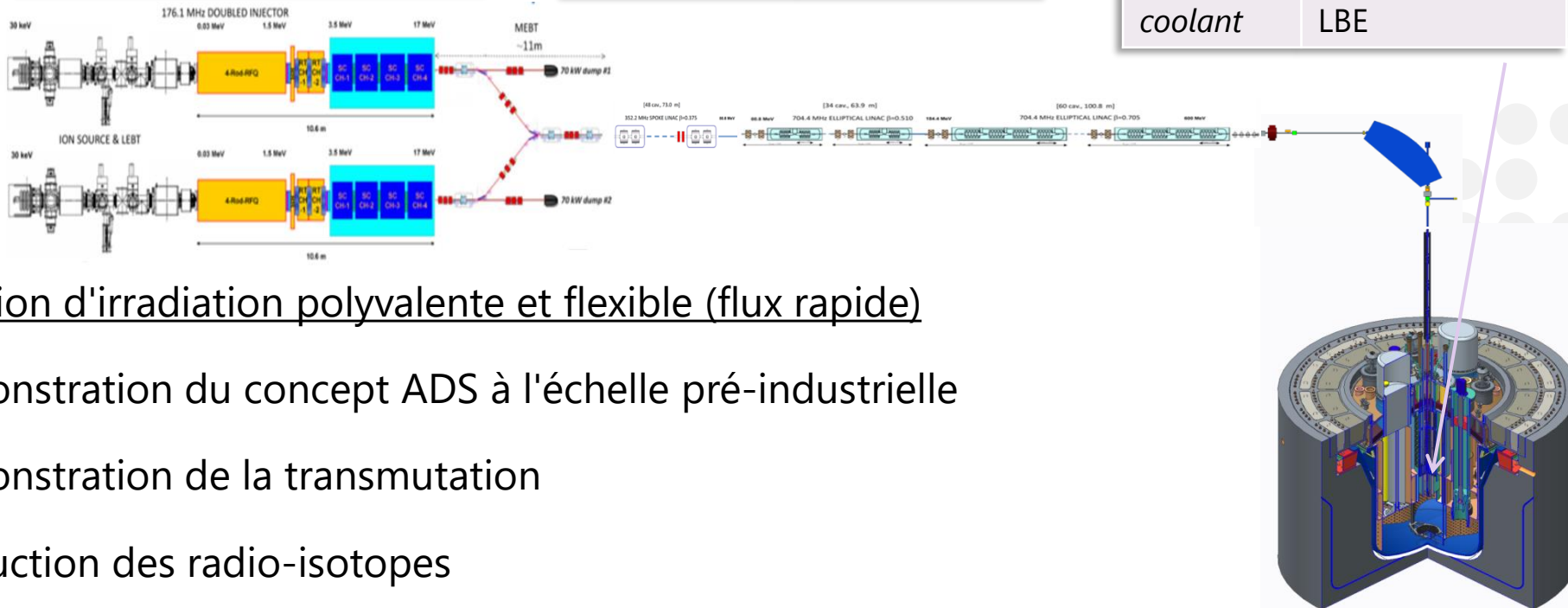
- ❑ Le projet MYRRHA et sa 1ère phase MINERVA
- ❑ Codes de transport des rayonnements utilisés pour la conception, la sûreté et la radioprotection
- ❑ Leur validation en utilisant les résultats d'expériences appropriées
- ❑ Benchmark avec 2 expériences de rendement des neutrons

MYRRHA: an accelerator-driven system

Accelerator	
<i>particles</i>	protons
<i>beam energy</i>	600 MeV
<i>beam current</i>	2 - 4 mA

Target	
<i>main reaction</i>	spallation
<i>output</i>	$2 \cdot 10^{17}$ n/s
<i>material</i>	LBE (coolant)

Reactor	
<i>power</i>	70 MW _{th}
<i>k_{eff}</i>	0.95
<i>spectrum</i>	fast
<i>coolant</i>	LBE



Installation d'irradiation polyvalente et flexible (flux rapide)

- Démonstration du concept ADS à l'échelle pré-industrielle
- Démonstration de la transmutation
- Production des radio-isotopes
- Recherche sur les matériaux nucléaires pour la fission et la fusion
- Recherche dans le domaine de la physique fondamentale

MYRRHA PHASE 1 (MINERVA): 2026

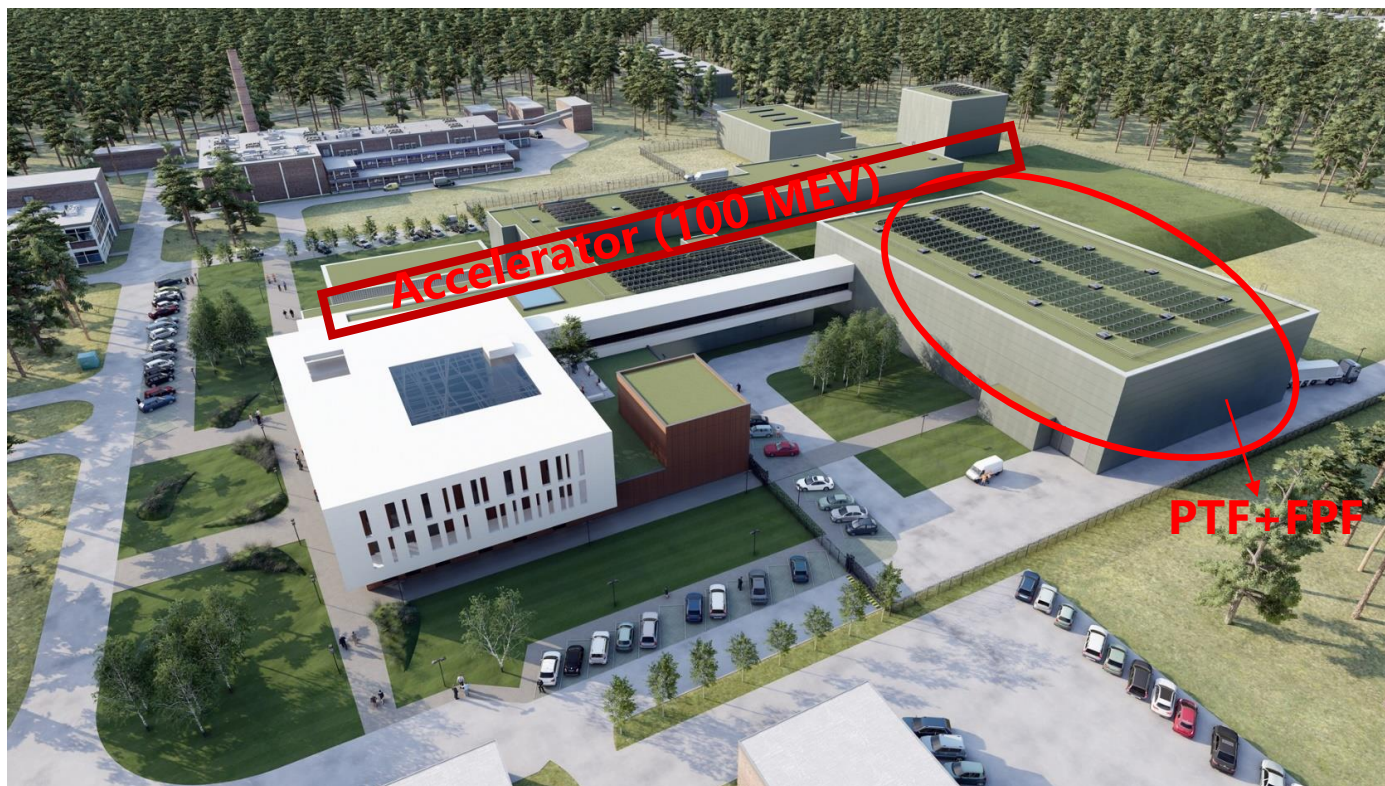
MINERVA (MYRRHA Isotopes production coupling the linear accelerator to the Versatile proton target facility)



MYRRHA PHASE 1 (MINERVA): 2026

MINERVA (MYRRHA Isotopes production coupling the linear accelerator to the Versatile proton target Facility)

MINERVA = LINAC 100 MEV + Proton Target Facility (PTF) + Full Power Facility (FPF)



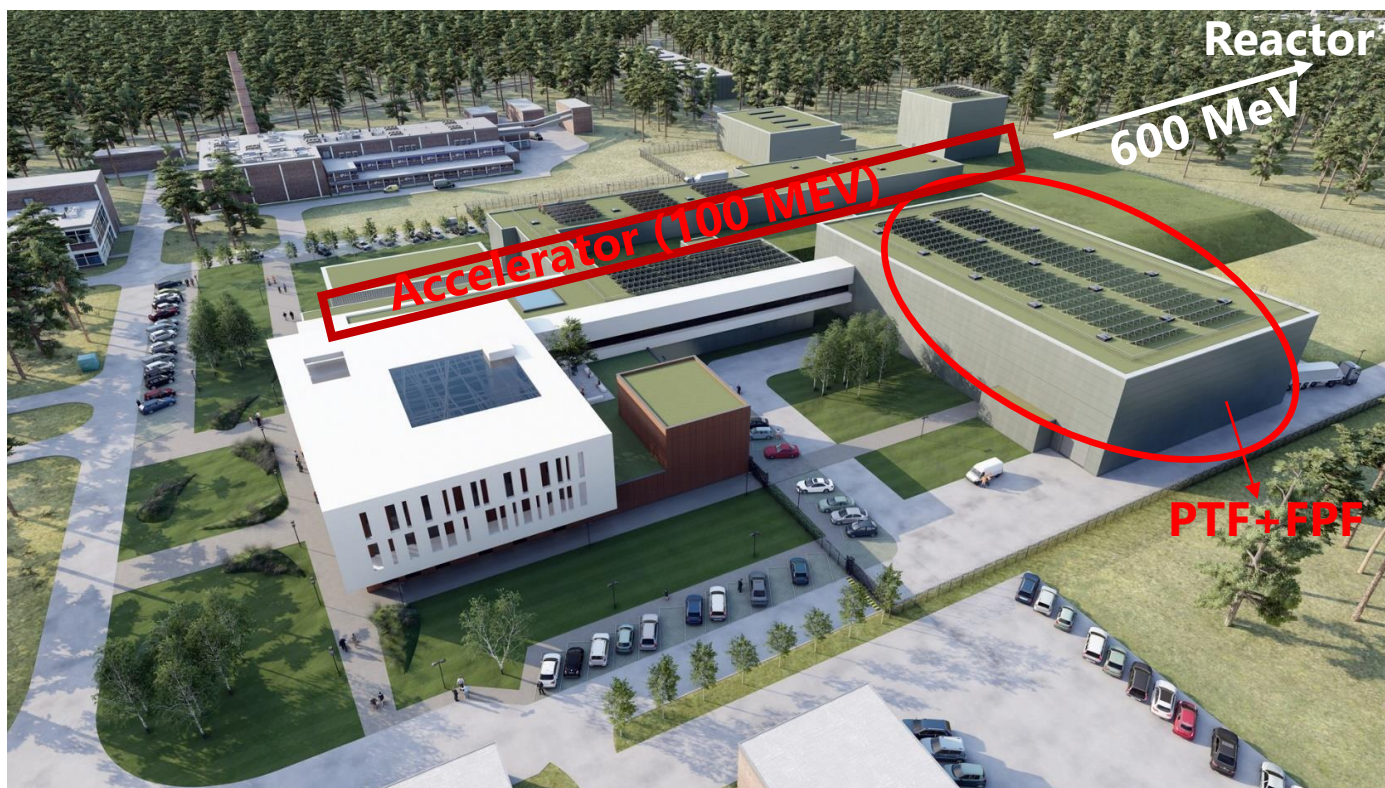
OBJECTIVES

- ✓ FIABILITE DE L'ACCELERATEUR
- ✓ RADIO-ISOTOPES
- ✓ LA PHYSIQUE D'ISOL
- ✓ R&D: MATERIAUX POUR LA FUSION

MYRRHA PHASE 1 (MINERVA): 2026

MINERVA (MYRRHA Isotopes production coupling the linear accelerator to the Versatile proton target Facility)

MINERVA = LINAC 100 MEV + Proton Target Facility (PTF)+ Full Power Facility (FPF)

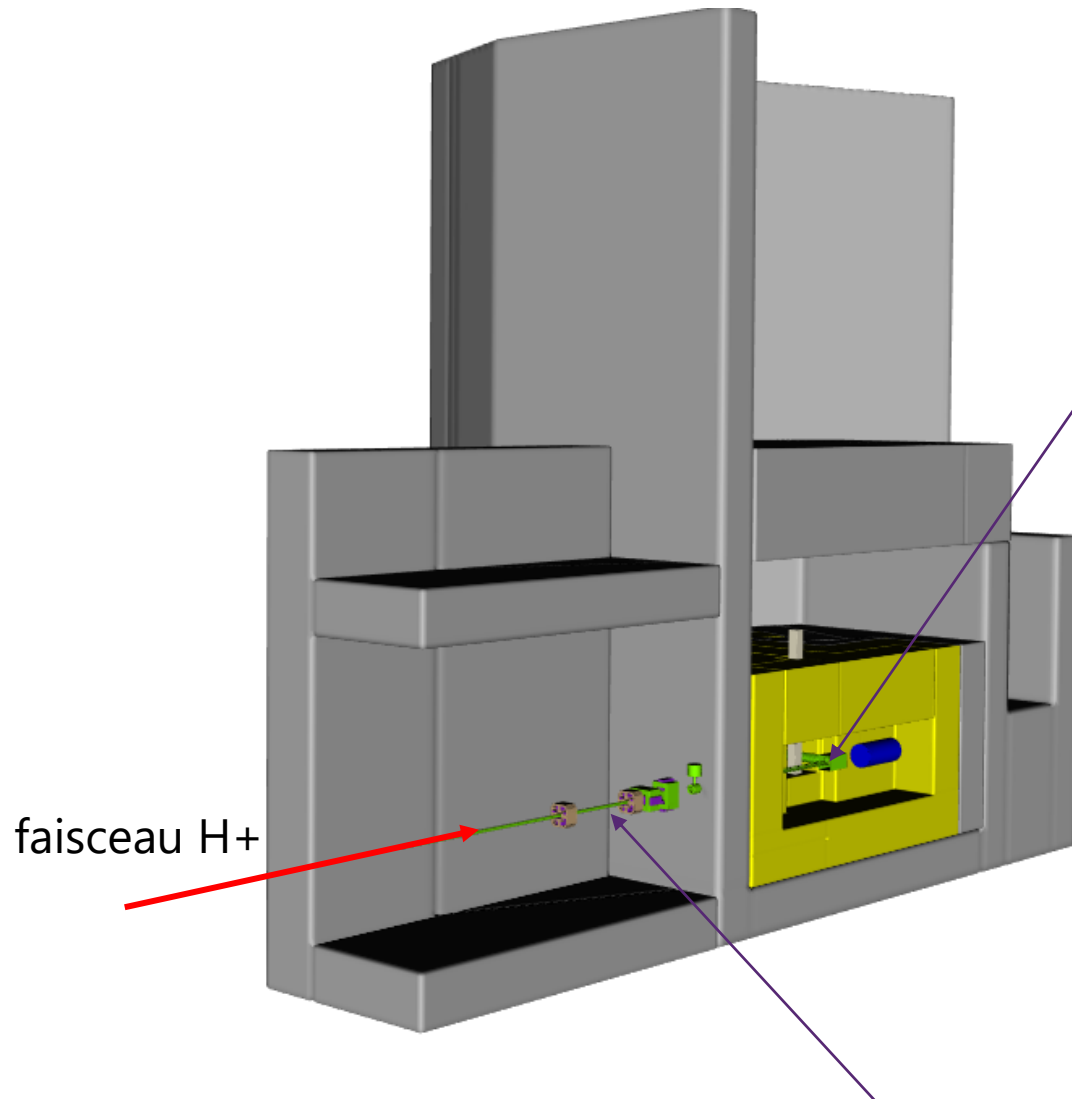


OBJECTIVES

- ✓ FIABILITE DE L'ACCELERATEUR
- ✓ RADIO-ISOTOPES
- ✓ LA PHYSIQUE D'ISOL
- ✓ R&D: MATERIAUX POUR LA FUSION

La conception du réacteur MYRRHA et les développements sont en cours en parallèle

Calculs de blindage pour MINERVA



Cible de spallation

Précision est nécessaire:

- Production de neutrons et de photons dans la cible de spallation
- Leurs spectres énergétiques
- Leurs distributions angulaires

La validation des codes de transport de rayonnement est obligatoire → l'exigence de l'AFCN

Le facteur de sûreté (incertitude) **2** a été établi et inclut toutes les sources d'incertitudes dans les calculs. Par exemple, la limite de dose annuelle du SCK CEN pour le travailleur exposé est de **10 mSv** → la limite de conception MINERVA pour la zone contrôlée est de **5 mSv**.

Rétrodiffusion : toujours difficile !

Étapes du calcul du transport des protons avec MCNP6.2&PHITS

	MCNP6.2				PHITS-3.24			
Perte d'énergie continue	➤ Continuous slowing down approximation (CSDA) (défaut)				➤ ATIMA (défaut) ➤ SPAR			
Energy straggling	➤ Répartition de Vavilov (défaut)				➤ Pas de energy straggling (défaut)			
	➤ Continuous slowing-down approximation (CSDA)				➤ Landau Vavilov (recommandée)			
Diffusion coulombienne multiple	➤ FNAL1 ➤ FNAL2 (défaut) ➤ Gaussian				➤ Approximation de Lynch			
Diffusion élastique nucléaire	➤ Modèle de Prael-Liu-Striganov				➤ Modèle de Pearlstein-Niita			
Interactions nucléaires non élastiques	<u>INC</u>	<u>Pre-eq.</u>	<u>Evap.</u>	<u>Fis.</u>	<u>INC</u>	<u>Pre-eq.</u>	<u>Evap.</u>	<u>Fis.</u>
	➤ CEM03.03 (défaut)	➤ MEM	➤ GEM		➤ INCL4.6 (défaut)	x	➤ GEM	
	➤ Bertini	➤ MPM (def. pas req.)	➤ EVAP(Dresner) ➤ ABLA	➤ RAL ➤ ORNL				
	➤ ISABEL				➤ Bertini			
➤ INCL4	x			➤ PROFI				

Méthodes de calcul de la section efficace doublement différentielle

MCNP-6.2

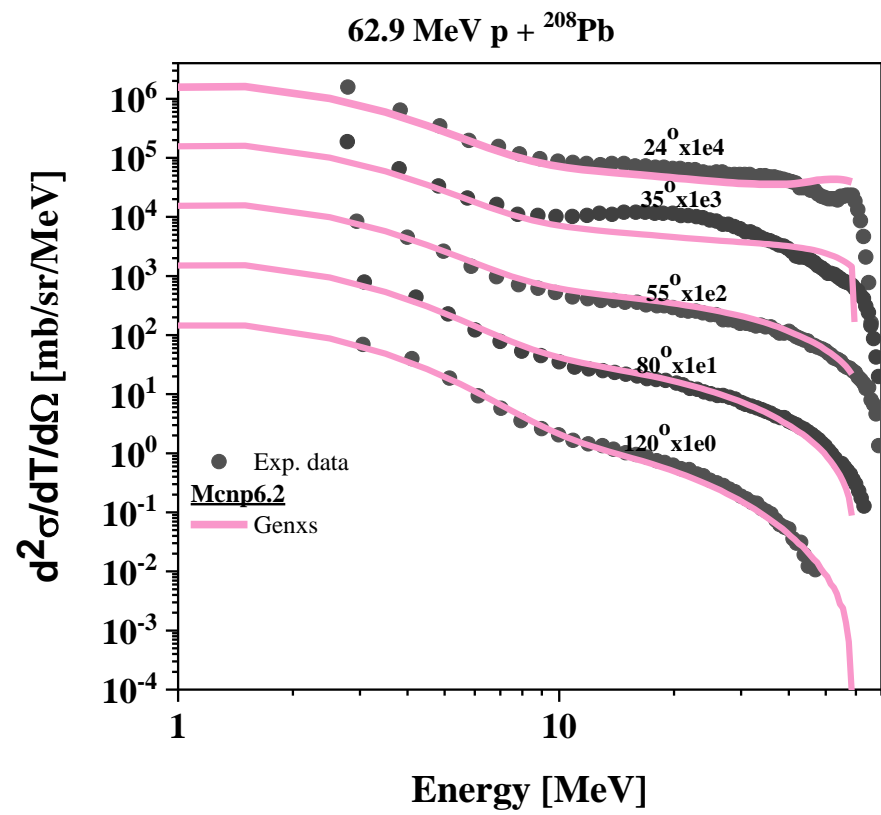
1. NOACT=1 est une option pour le transport normal et conversion des multiplicités de particules produites en sections efficaces de production des particules secondaires avec des facteurs de multiplication.
2. NOACT=-2 provoque la collision immédiate des particules source dans le matériau cible. Toutes les particules émises sont transportées sans collisions, comme dans le vide.
3. FM -3 convertit les multiplicités en sections efficaces de production de particules secondaires. Les données des sections efficaces tabulaire seront utilisées des que possible pour obtenir les données différentielles.
4. GENXS: application de modèles des interactions nucléaires à haute énergie dans un mode de génération de section efficace sans transport de particules. Chaque histoire consistera uniquement en l'interaction de la particule source à l'énergie source avec les composants de la cible

PHITS-3.24

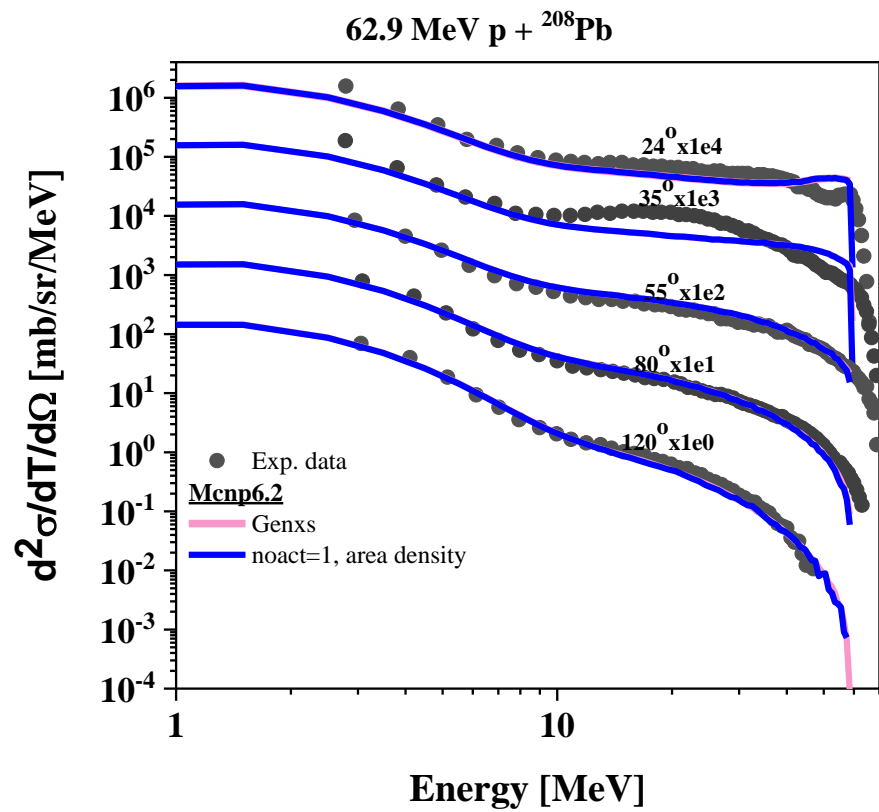
1- INUCR=1 (ou icntl=1) est une option pour le calcul de la section efficace doublement différentielle.

Cette option est encore en développement

Par conséquent, une approche similaire est utilisée comme option noact=1 de MCNP-6.2

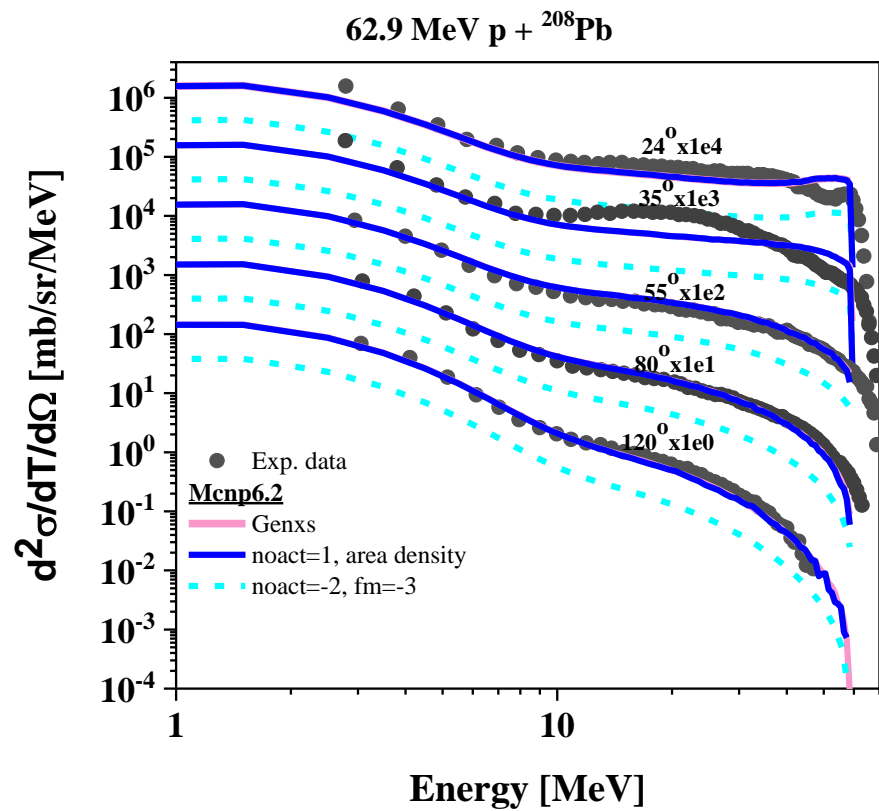


Ref. for exp.: A. Guertin, et. al., "Neutron and light-charged-particle productions in proton-induced reactions on 208Pb at 62.9 MeV," Eur. Phys. J. A 23 (2005) 49–60.



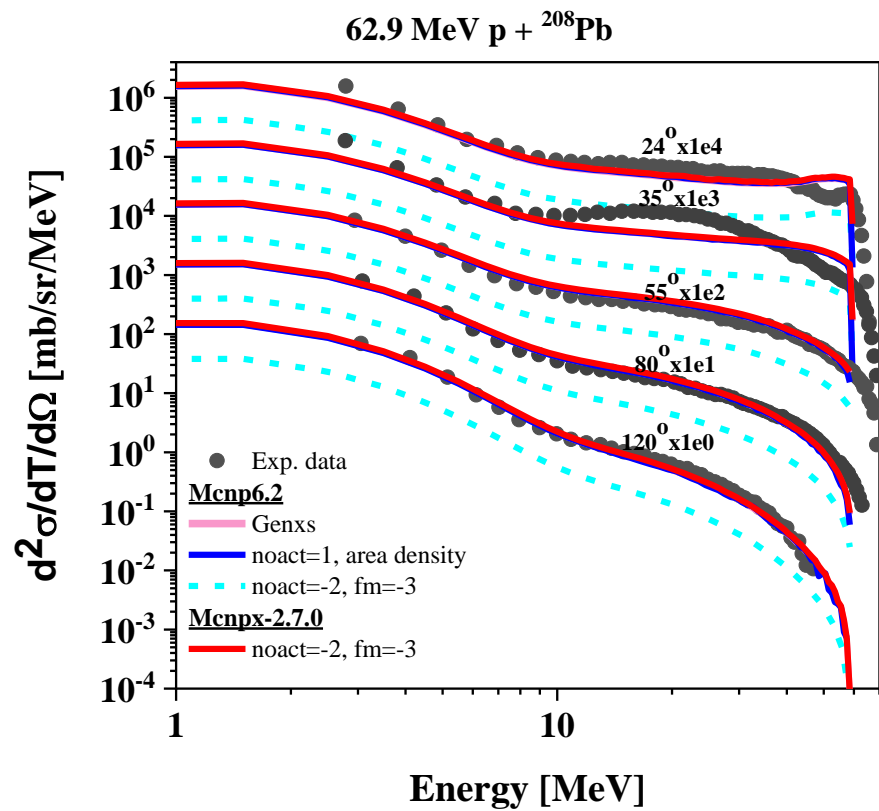
- **GENXS** et l'option **noact=1** donnent presque les mêmes résultats.

Ref. for exp.: A. Guertin, et. al., "Neutron and light-charged-particle productions in proton-induced reactions on 208Pb at 62.9 MeV," Eur. Phys. J. A 23 (2005) 49–60.



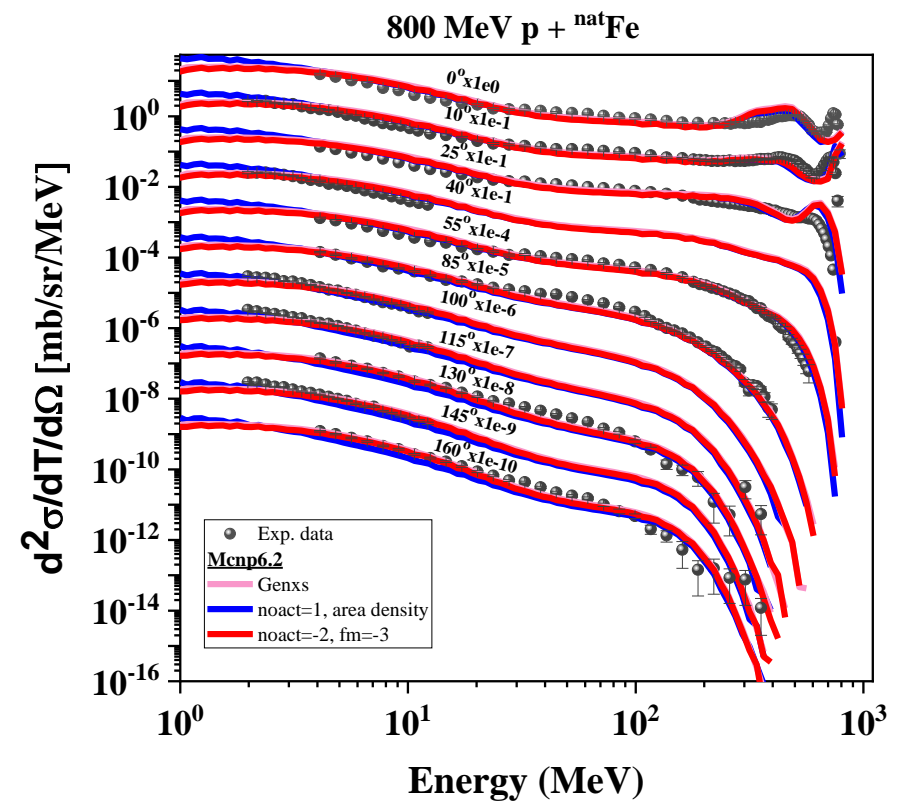
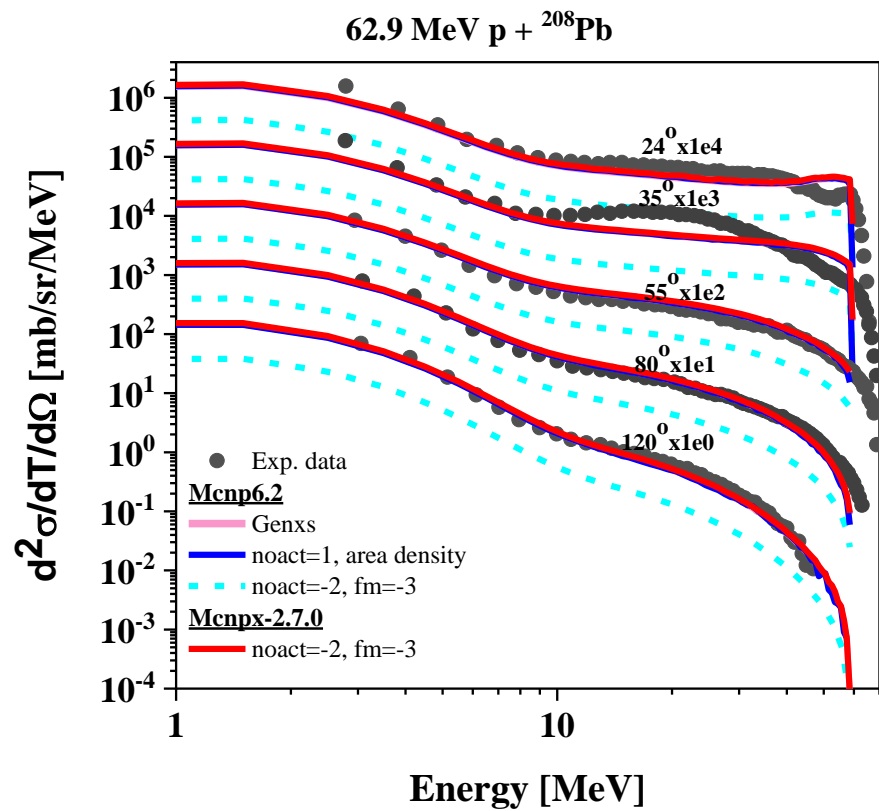
- **GENXS** et l'option **noact=1** donnent presque les mêmes résultats.
- L'option **FM= -3** option donne des valeurs 4 fois plus basses que **GENXS** et **noact=1**.

Ref. for exp.: A. Guertin, et. al., "Neutron and light-charged-particle productions in proton-induced reactions on 208Pb at 62.9 MeV," Eur. Phys. J. A 23 (2005) 49–60.



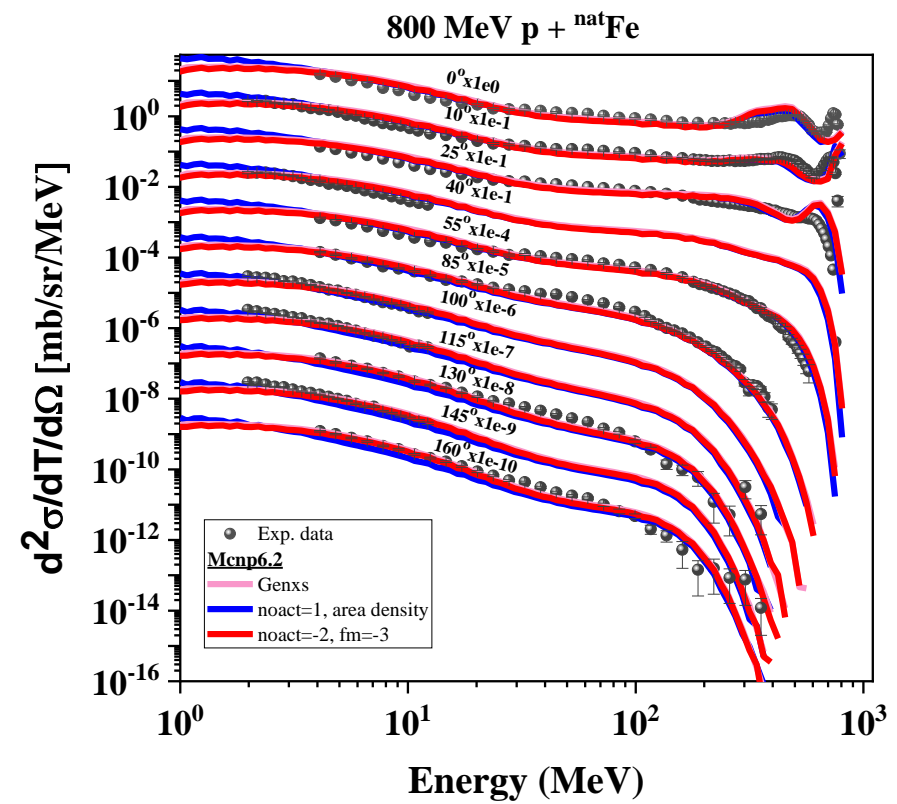
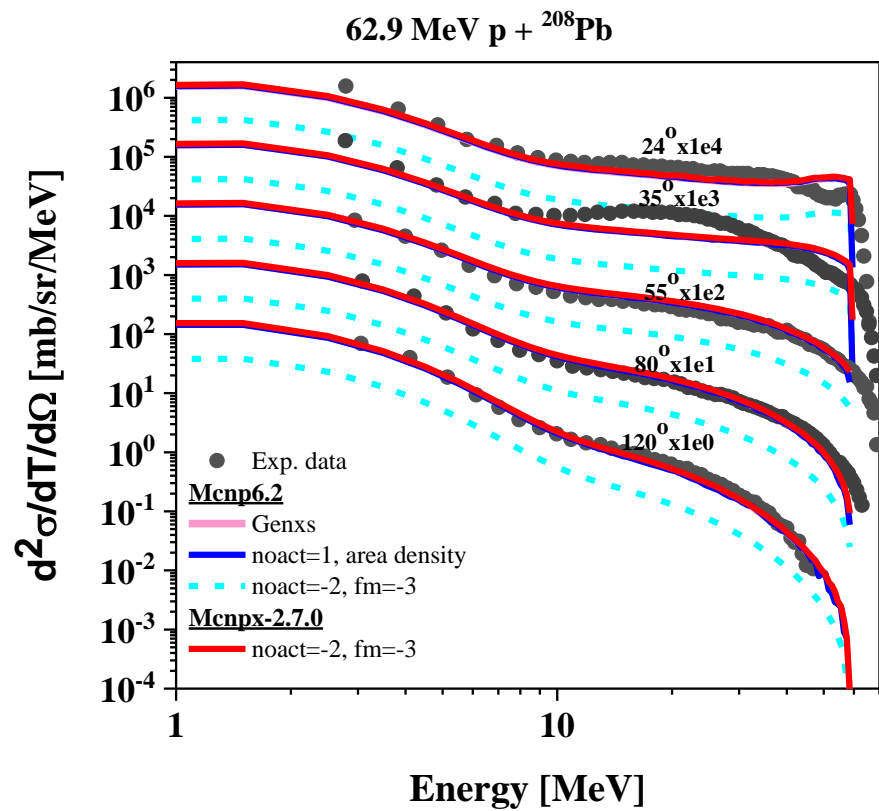
- **GENXS** et l'option **noact=1** donnent presque les mêmes résultats.
- L'option **FM= -3** option donne des valeurs 4 fois plus basses que **GENXS** et **noact=1**.
- **MCNPX-2.7.0** (version précédente de MCNP6) produit des résultats corrects avec l'option **FM=-3**.

Ref. for exp.: A. Guertin, et. al., "Neutron and light-charged-particle productions in proton-induced reactions on 208Pb at 62.9 MeV," Eur. Phys. J. A 23 (2005) 49–60.



- **GENXS** et l'option **noact=1** donnent presque les mêmes résultats.
- L'option **FM= -3** donne des valeurs 4 fois plus basses que **GENXS** et **noact=1**.
- **MCNPX-2.7.0** (version précédente de MCNP6) produit des résultats corrects avec l'option **FM=-3**. **MCNP-6.2** pourrait produire des résultats corrects en fonction du matériel de la cible. Néanmoins, cette option n'est pas fiable.

Ref. for exp.: A. Guertin, et. all., "Neutron and light-charged-particle productions in proton-induced reactions on 208Pb at 62.9 MeV," Eur. Phys. J. A 23 (2005) 49–60.



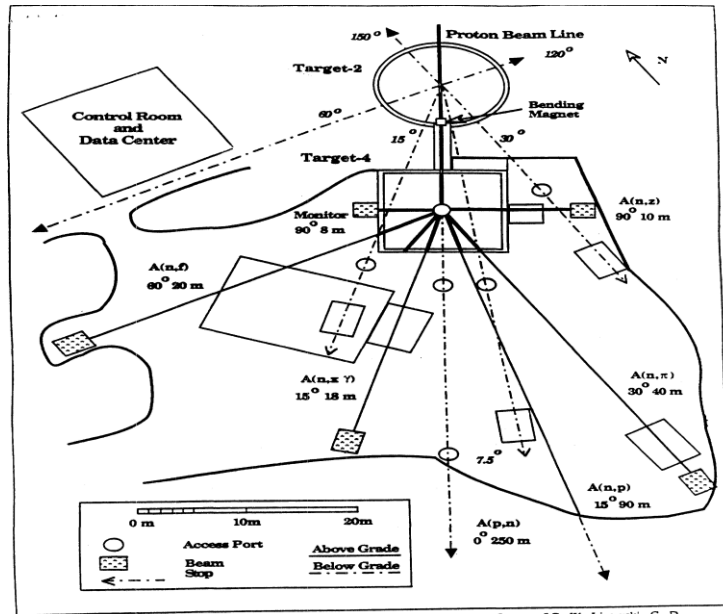
- **GENXS** et l'option **noact=1** donnent presque les mêmes résultats.
- L'option **FM= -3** donne des valeurs 4 fois plus basses que **GENXS** et **noact=1**.
- **MCNPX-2.7.0** (version précédente de MCNP6) produit des résultats corrects avec l'option **FM=-3**. **MCNP-6.2** pourrait produire des résultats corrects en fonction du matériel de la cible. Néanmoins, cette option n'est pas fiable.
- **GENXS** est la méthode la plus simple mais n'est applicable qu'avec des modèles physiques.
- L'option **noact=1** est sensible à l'épaisseur de la cible puisque le transport normal est effectué.

Ref. for exp.: A. Guertin, et. all., "Neutron and light-charged-particle productions in proton-induced reactions on 208Pb at 62.9 MeV," Eur. Phys. J. A 23 (2005) 49–60.

Expériences : sections efficaces doublement différentielles

La précision de la prédiction des spectres des neutrons aux angles « arrière » → un impact direct sur la conception du blindage.

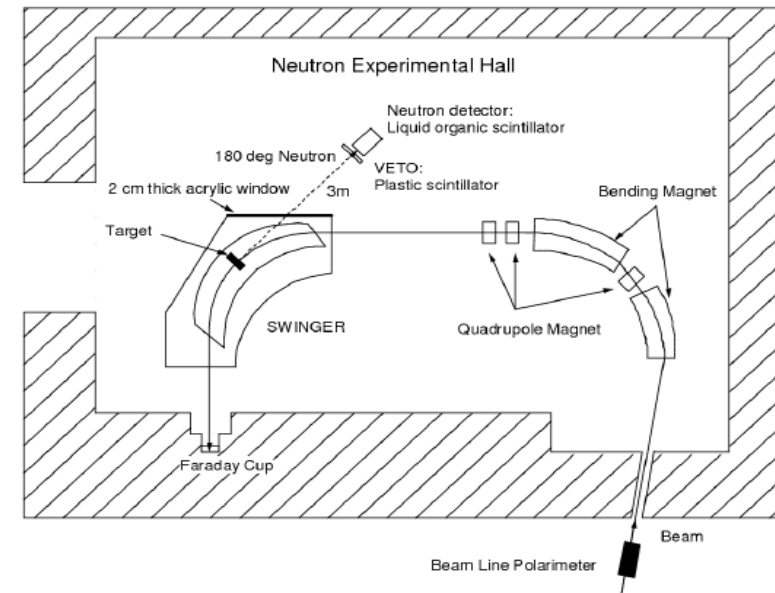
113 MeV p+C/Fe DDX @ 150°



Target 2 area of the Weapons Neutron Research Facility (WNR) at Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE)

Ref.: [Meier, M.M., et al., Nucl. Sci. Eng. 102 (1989), 310.]

140 MeV p+C/Fe DDX @ 180°



Neutron experimental hall of the Research Center for Nuclear Physics (RCNP) ring cyclotron of Osaka University

Ref.: [Y. Iwamoto, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 620 (2010) 484–489]

MCNP6.2&PHITS

Bibliothèques des sections efficaces pour le calcul transport des neutrons

Library	energy range (MeV)	neutron	proton
		Z-target range (number of nuclides)	
TENDL-2017	→200	1→115 (556)	1→83 (283)
JENDL-4.0/HE	→200	1→95 (130)	1→95 (133)
ENDF/B-VII.0	→150	1→95 (393)	1→83 (48)

Bibliothèques des sections efficaces pour les protons

isotopes	JENDL-4.0/HE	TENDL-2017	ENDF/B-VII.0
	Énergie maximale [MeV]		
¹² C	200	200	150
¹³ C	200	200	Pas de données
⁵⁴ Fe	200	200	150
⁵⁶ Fe	200	200	150
⁵⁷ Fe	200	200	150
⁵⁸ Fe	200	200	Pas de données

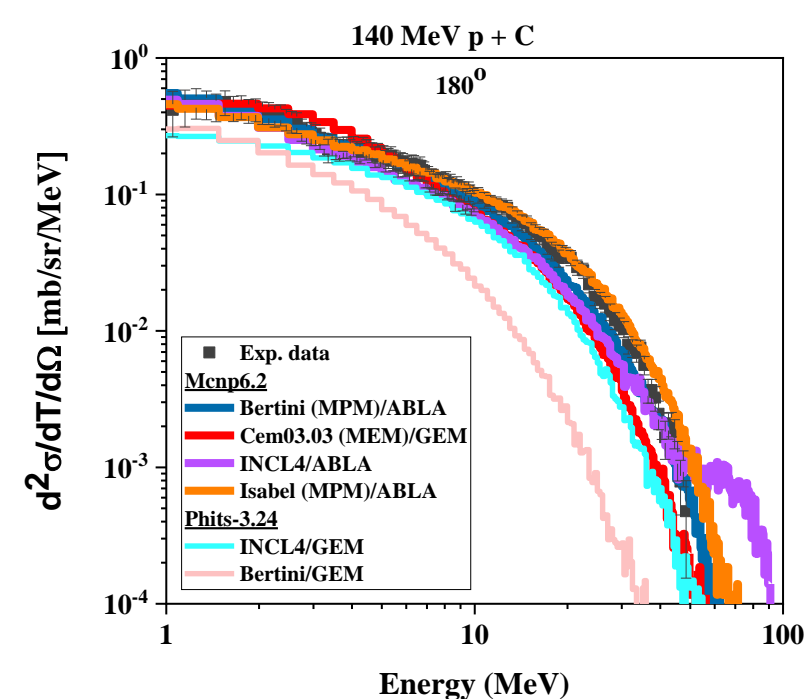
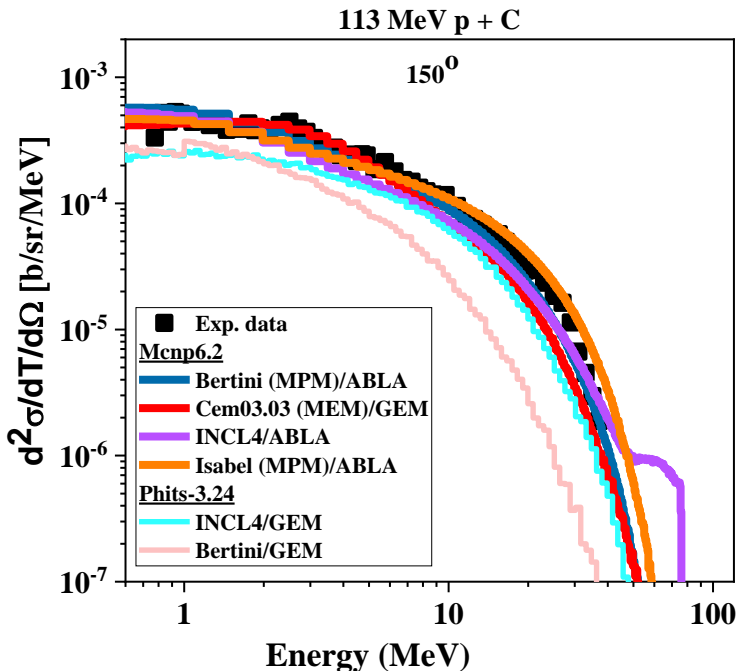
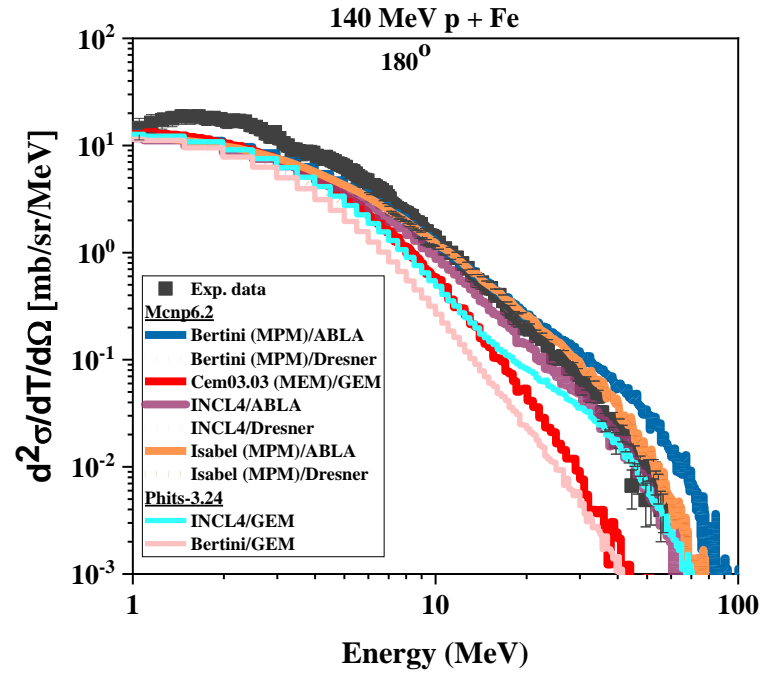
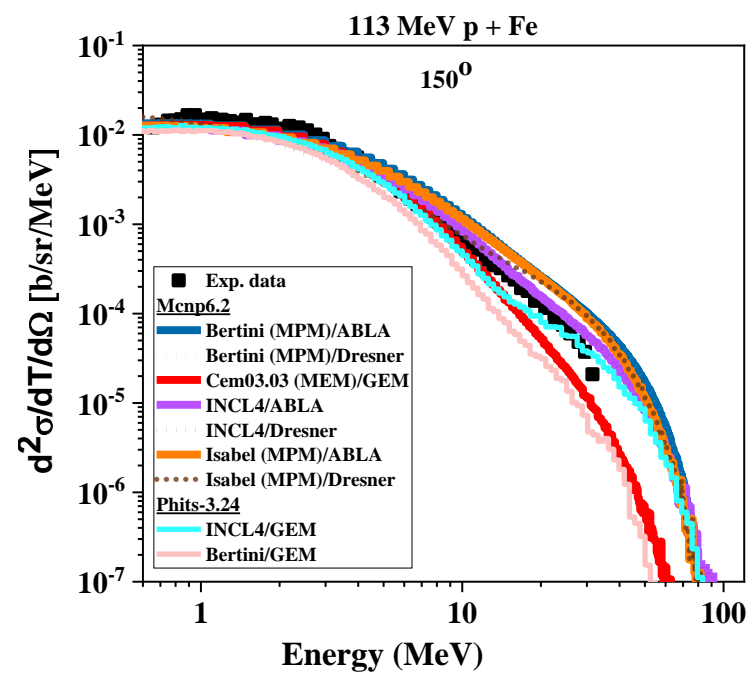
MCNP6.2

PHITS-3.24

MCNP6.2				PHITS-3.24			
INC	Pre-eq.	Evap.	Fis.	INC	Pre-eq.	Evap.	Fis.
➤ CEM03.03 (default)	➤ MEM	➤ GEM		➤ INCL4.6 (default)	➤ x	➤ GEM	
➤ Bertini	➤ MPM	➤ EVAP (Dresner)	➤ RAL				
➤ ISABEL			➤ ABLA	➤ ORNL	➤ Bertini		
➤ INCL4	➤ x			➤ PROFI			

Calculs avec modèles physiques

Observations

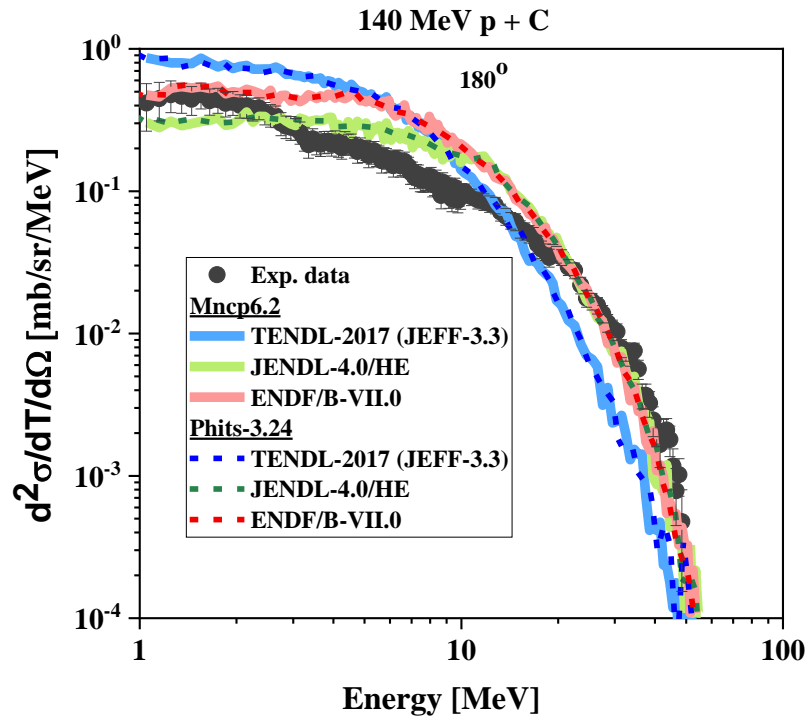
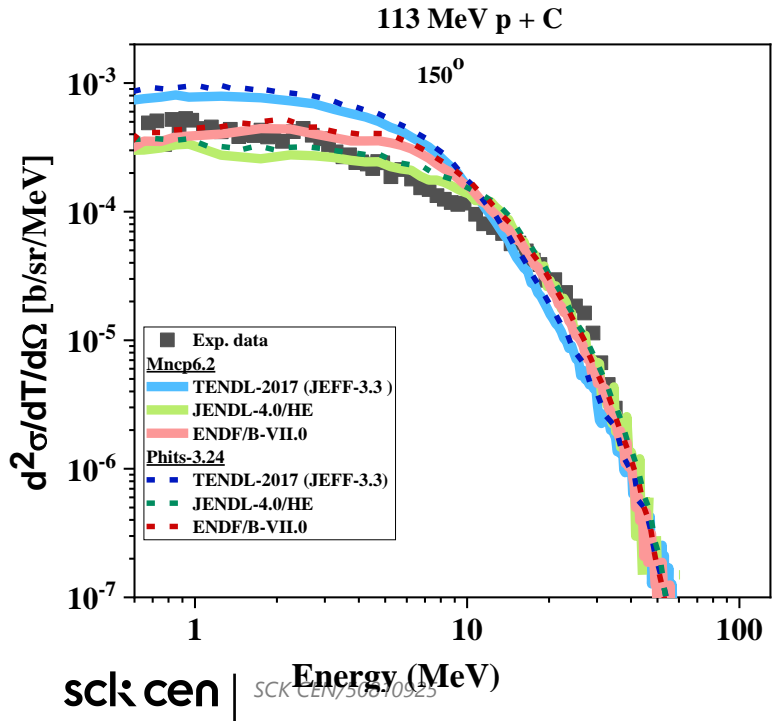
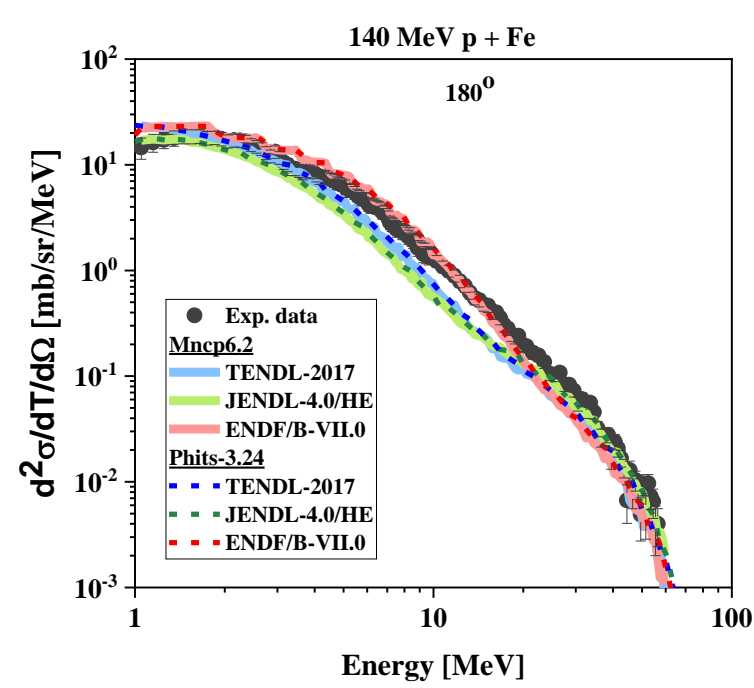
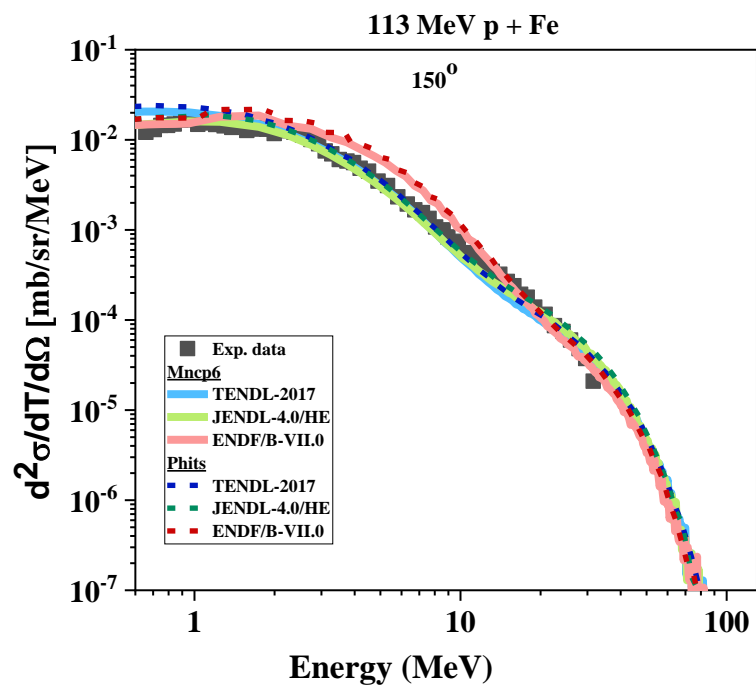


- Les modèles donnent des résultats raisonnablement bons dans la partie à faible énergie (évaporation), sauf le modèle Bertini/GEM pour C.
- La tendance générale est un désaccord croissant entre les modèles physiques avec l'augmentation de l'énergie des neutrons. Les divergences sont plus importantes avec la cible lourde, si Bertini/GEM n'est pas pris en compte.
- INCL4 ne considère pas explicitement les réactions de pré-équilibre après l'étape INC des réactions. Cependant, il rivalise raisonnablement bien avec les modèles INC utilisant des modèles de pré-équilibre. INCL4 dans PHITS et CEM03.03 dans MCNP6 donnent des résultats similaires dans la région d'évaporation pour le Fe grâce au modèle d'évaporation GEM.
- Bertini donne les plus mauvais résultats, car il n'est pas utilisé avec un modèle de prééquilibre dans le code PHITS. Cela peut être une indication que les processus de prééquilibre sont le mécanisme dominant de production de neutrons dans ce régime d'énergie et d'angle.
- Dans le cas de C, en raison du faible nombre de nucléons, l'étape d'évaporation est moins importante.

Calculs avec des données nucléaires

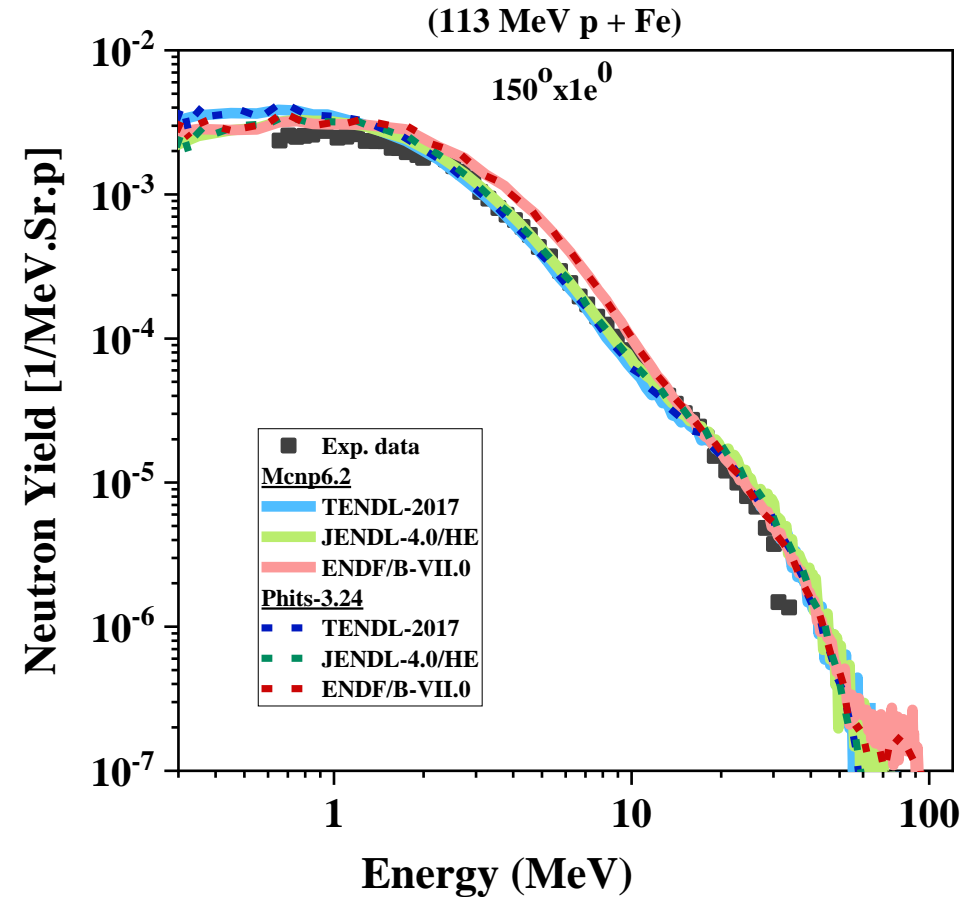
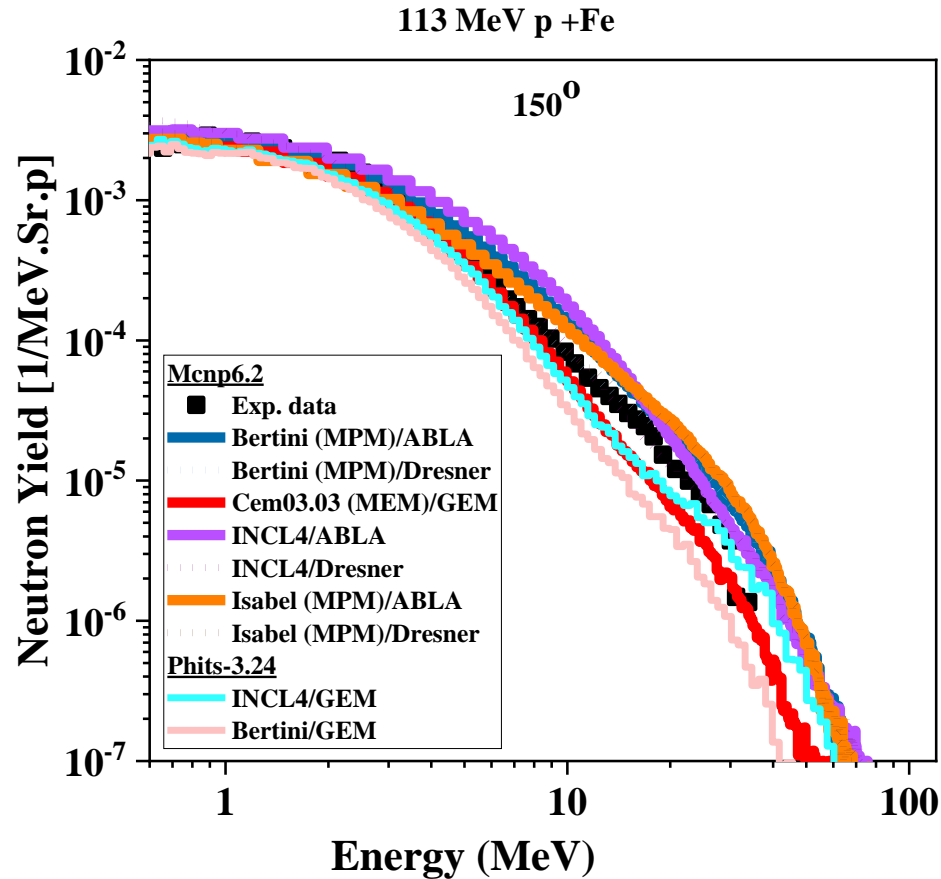
Observations

- Les différences entre les résultats obtenus avec les bibliothèques utilisées dans PHITS et MCNP sont négligeables.
- Tendance générale avec TENDL: surestimation en dessous de 15 MeV et sous-estimation au dessus de 15 MeV pour les cibles C.
- Pour toutes les cibles, ENDF/B-VII.0 se comporte raisonnablement bien.



Impact sur la conception du blindage

Spectres de neutrons émis par des cibles épaisses



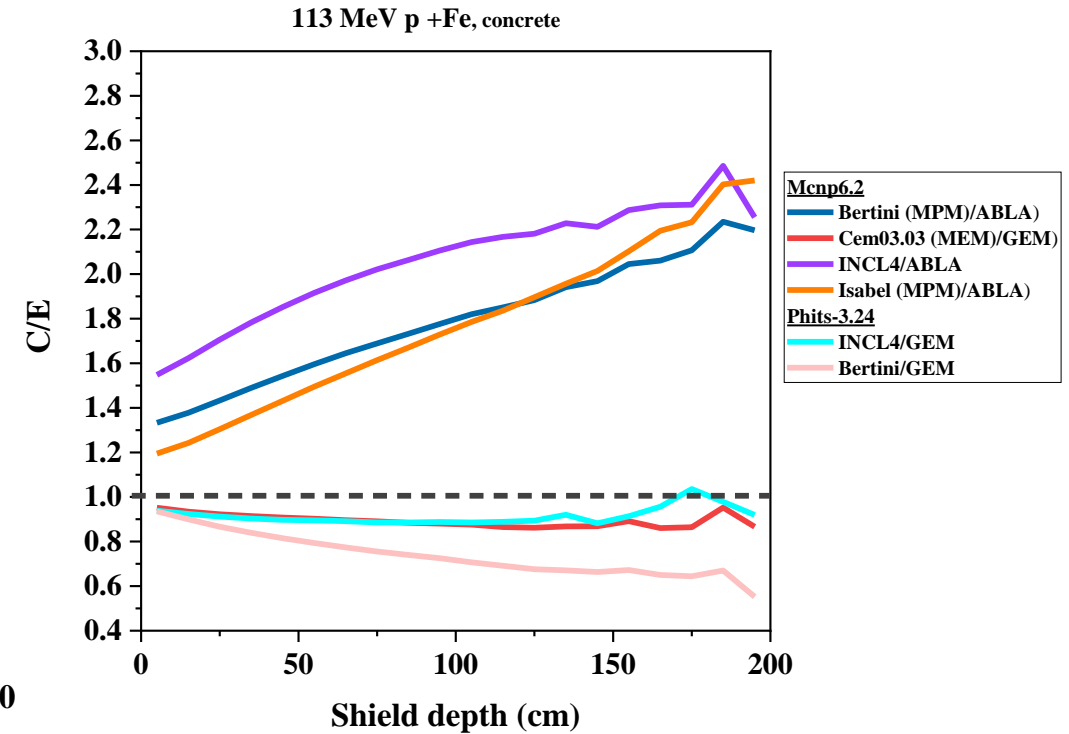
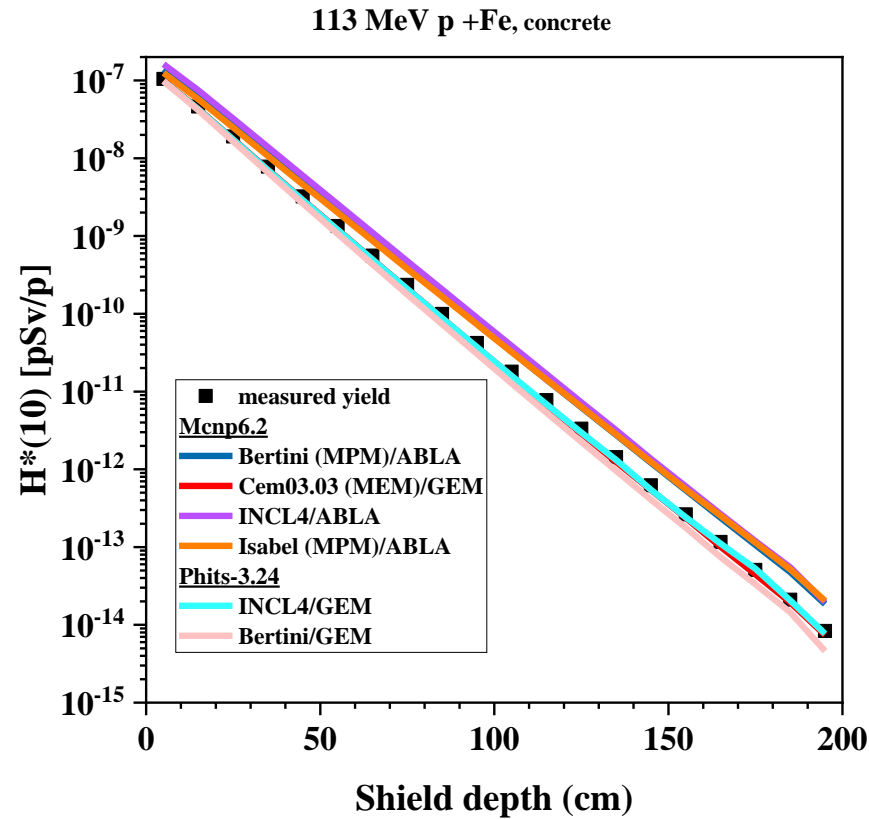
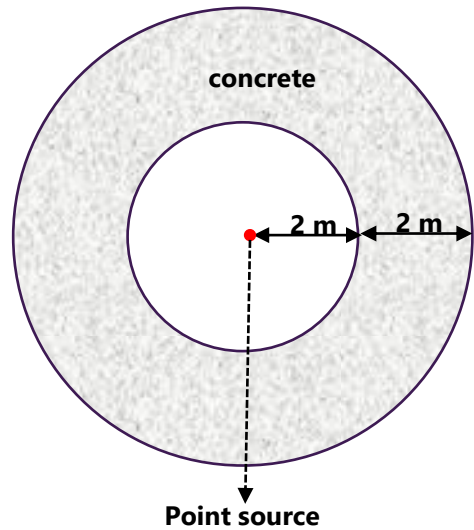
- Tendence similaire avec les données de sections efficaces différentielle, mais légèrement meilleure en raison des effets du moyennage lors du transport dans la cible épaisse

Impact sur la conception du blindage

Débits de dose derrière le blindage - modèles physiques

Il est très important de connaître l'influence des divergences sur la conception du blindage, si les codes MCNP et PHITS sont utilisés pour cela.

Résultats débit de dose > sous-estimé → Facteur de sûreté de 2
> surestimation → surestimation de l'épaisseur du béton

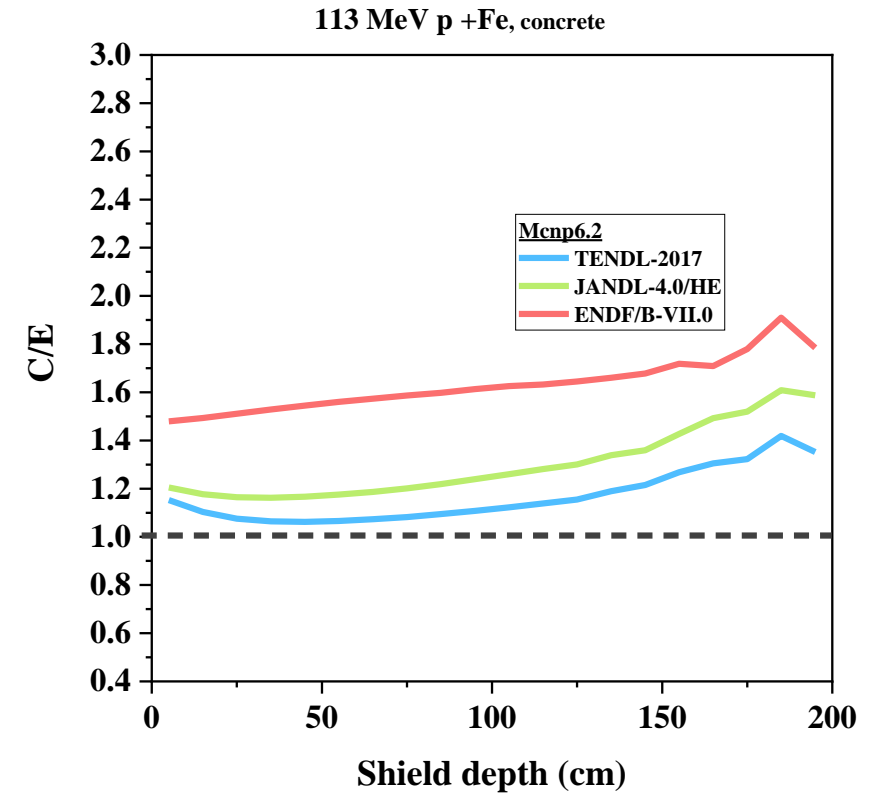
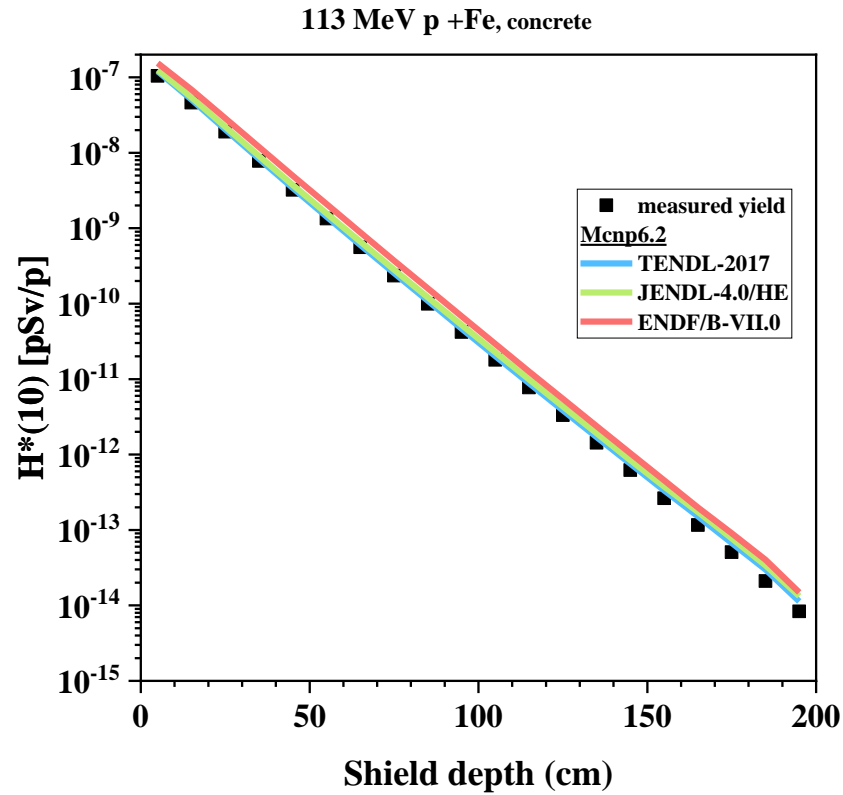
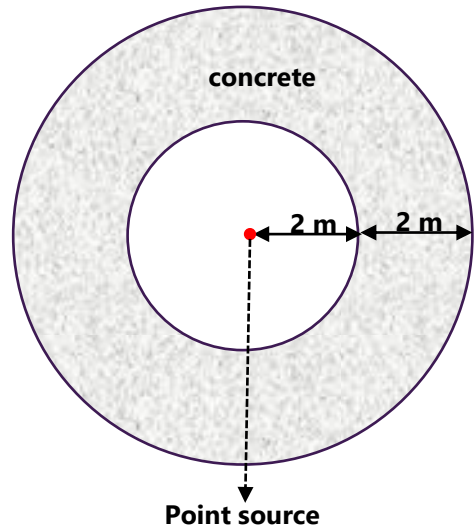


Impact sur la conception du blindage

Débits de dose derrière le blindage - bibliothèques de données

Il est très important de connaître l'influence des divergences sur la conception du blindage, si les codes MCNP et PHITS sont utilisés pour cela.

Résultats débit de dose > sous-estimé → Facteur de sûreté de 2
> surestimation → surestimation de l'épaisseur du béton

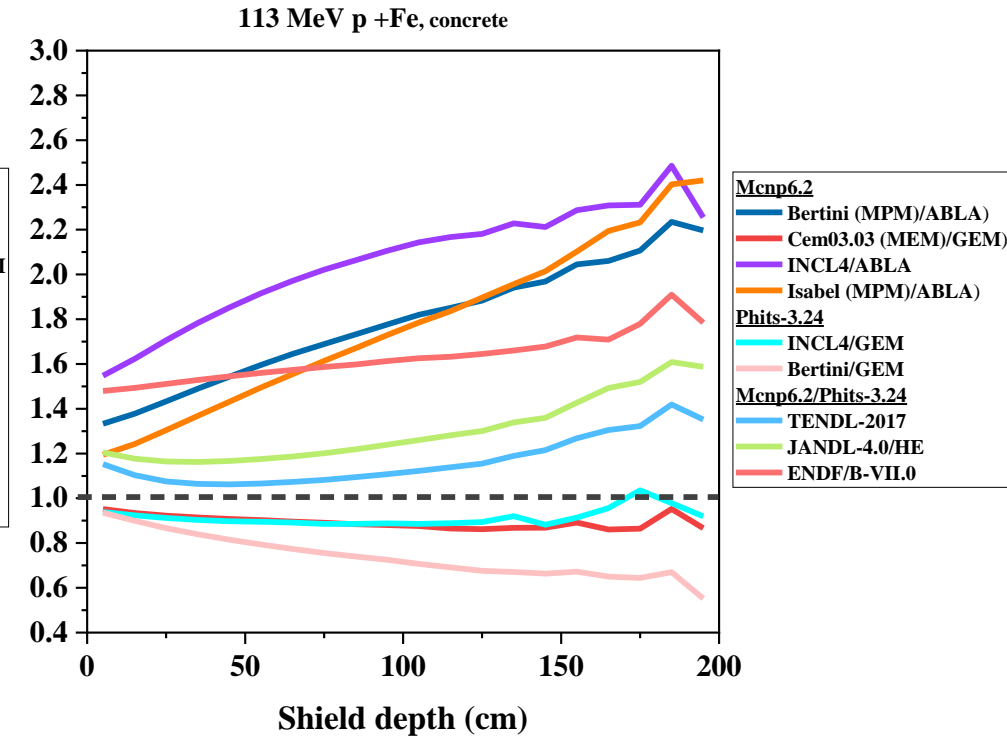
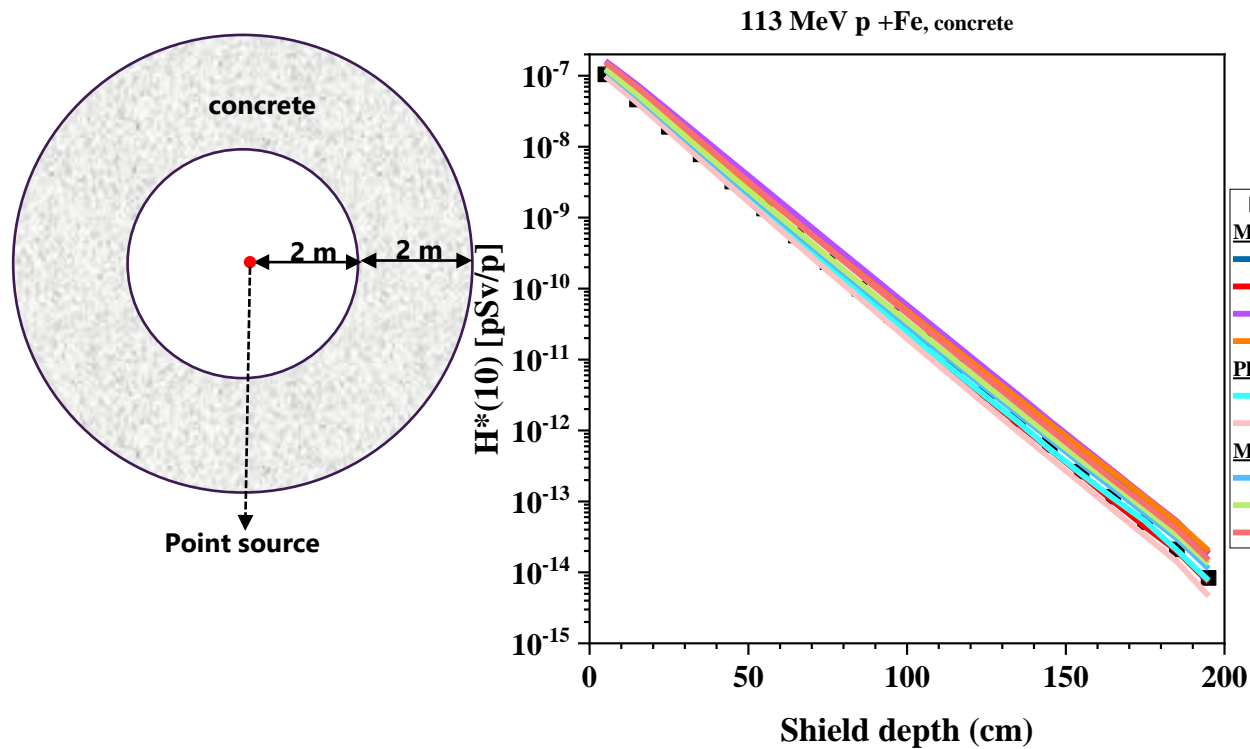


Impact sur la conception du blindage

Débits de dose derrière le blindage – modèles + données

Il est très important de connaître l'influence des divergences sur la conception du blindage, si les codes MCNP et PHITS sont utilisés pour cela.

Résultats débit de dose > sous-estimé → Facteur de sécurité de 2
> surestimation → surestimation de l'épaisseur du béton



Conclusions

Les calculs ont été effectués de deux manières: en utilisant uniquement les modèles physiques et en utilisant les bibliothèques de données nucléaires.

- Les modèles physiques incorporés dans MCNP6 et PHITS peuvent décrire de manière adéquate les spectres d'émission de neutrons des cibles en carbone ou en fer.
- Les bibliothèques pour les protons sont plus performantes que les modèles physiques, bien qu'il y ait certainement une marge d'amélioration. Parmi les bibliothèques, l'évaluation ENDF/B montre le meilleur accord avec les expériences..

Deux expériences de rendement neutronique réalisées avec un proton de 113 MeV frappant une cible en fer ont été utilisées pour déterminer l'impact des modèles physiques et des bibliothèques de données nucléaires sur la conception du blindage.

- INCL/ABLA, qui donne les débits de dose les plus élevés, a conduit à la surestimation de l'épaisseur du béton de 10 cm, principalement causée par la surestimation des rendements neutroniques calculés dans la région de faible énergie des neutrons.
- Bertini/GEM, INCL4/GEM et CEM03.03 donnent les rendements des neutrons sous-estimés pour la cible Fe et donc les débits de dose des neutrons les plus faibles le long de l'épaisseur du blindage. Leurs écarts sont inférieures de la marge d'incertitude de 2 dans le calcul du blindage.

- Dans tous cas, les bibliothèques de données nucléaires de protons sont préférables. Nous travaillons sur la sélection des meilleurs fichiers de protons à partir des données existantes (ENDF/B, JENDL, TENDL) dans le cadre du projet de données nucléaires JEFF-4.
- La validation des codes se poursuivra pour d'autres expériences appropriées

Experimental benchmarking: Double differential cross sections

