



# Etude Simβ-AD : une méthodologie basée sur la simulation Monte-Carlo et la détection neutronique pour améliorer la gestion des déchets radioactifs en cyclotron

Jean-Michel HORODYNSKI - Abir HASSANI - Frédéric CHAPELLE - Hugues MONARD (iRSD)

Nicolas ARBOR (IPHC)

Cédric DOSSAT - Inès DUARTE (TRAD)

Marie-Lène GAAB - Hanadi SKEIF - Nicolas DELCROIX (CYCERON)

Sébastien BOUILLON - David CHAULIN (CEMHTI)

Thierry FOEHRENBACHER - Denis OSTER (IPHC-CYRCé)

Samuel Meyroneinc - Jerome Verdonck (CPO)

Frédéric STICHELBAULT (IBA)

8-10 octobre 2025

Journées Accélérateurs de la SFP - 2025





La gestion des déchets radioactifs lors de l'exploitation et du démantèlement des installations de cyclotrons constitue un processus particulièrement exigeant :

- Sécurité de l'entreposage temporaire
- Caractérisation radiologique (spectrométrie  $\beta$ - $\gamma$ )
- Procédures administratives
- Ressources financières



# Projet Sim $\beta$ -AD (Simulation et détection pour l'évaluation de l'activation en radionucléides émetteur $\beta$ -purs)



Le projet Sim $\beta$ -AD a pour objectif de développer une méthodologie fiable, précise et facilement déployable pour évaluer l'activation des radionucléides  $\beta$ -purs présents dans les matériaux irradiés des installations de cyclotrons.

Deux approches sont combinées :

- Des simulations Monte Carlo pour établir des facteurs de corrélation entre émetteurs gamma mesurables et  $\beta$ -purs
- La réalisation et l'exploitation de mesures expérimentales afin de s'assurer de la précision des modélisations Monte Carlo, élément fondamental pour l'estimation des facteurs de corrélation

Cette démarche intégrée contribue directement à l'amélioration de la gestion des déchets radioactifs.



# Méthodologie industrielle de caractérisation des déchets activés par l'exploitation des cyclotrons



Fiabilité (Simulations + Détections)



Impact minimal sur l'exploitation



Optimisation de la production de déchets radioactifs



Rentabilité



# Consortium Simβ-AD



Projet financé par le programme FRANCE2030 piloté par BPiFrance et l'ANDRA



Le CNRS s'associe à deux entreprises, IBA et TRAD, afin d'associer les expertises et expériences de chacun dans le but de valoriser les travaux de recherche menés.



Simulations numériques  
Détection des neutrons



Accélérateurs  
construction et modélisation

Simulations numériques  
RayXpert®  
Code Monte Carlo





# Simulations numériques

- Validation et comparaison des codes Monte-Carlo / bibliothèques de sections efficaces
- Simulations numériques sur différentes installations de cyclotrons
- Irradiation de détecteurs passifs
- Caractérisation radiologique des déchets radioactifs existants





# Les installations cyclotrons

Plusieurs installations des cyclotrons fourniront du temps faisceau pour le projet Simβ-AD

Installations	Faisceau	E <sub>max</sub> (MeV)	I <sub>max</sub> (μA)	Cibles
CYRCé	p	25	300	L/S
CYCERON	p/d	18/9	80-50	L/G/S
CEMHTI	p/d/α	38/25/50	40/40/15	Irradiation
CPO	p	235	600.10 <sup>-3</sup>	Protonthérapie
CAL	p	65/235	-	Protonthérapie

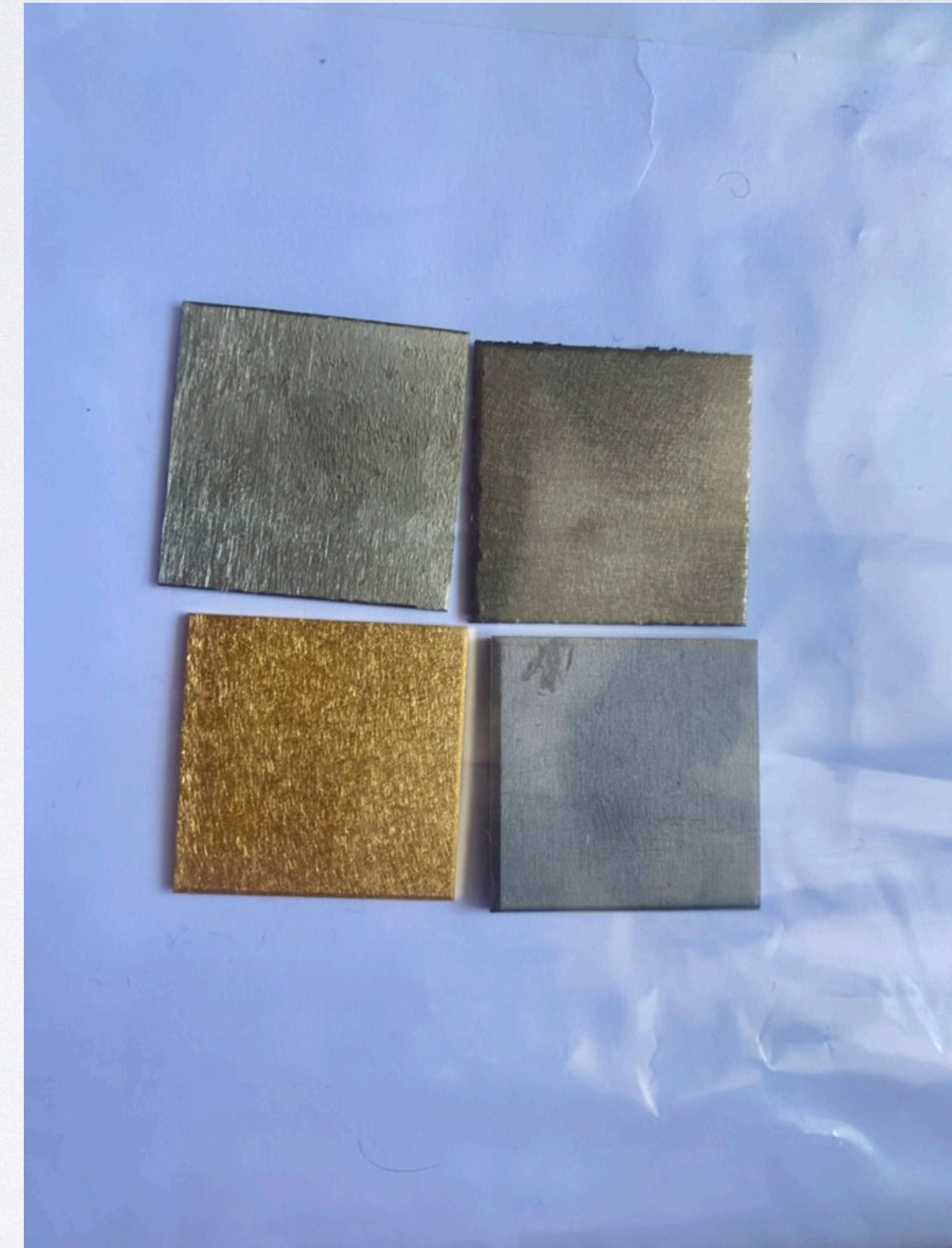
Tester la méthodologie dans des contextes variés





# Irradiation des détecteurs passifs

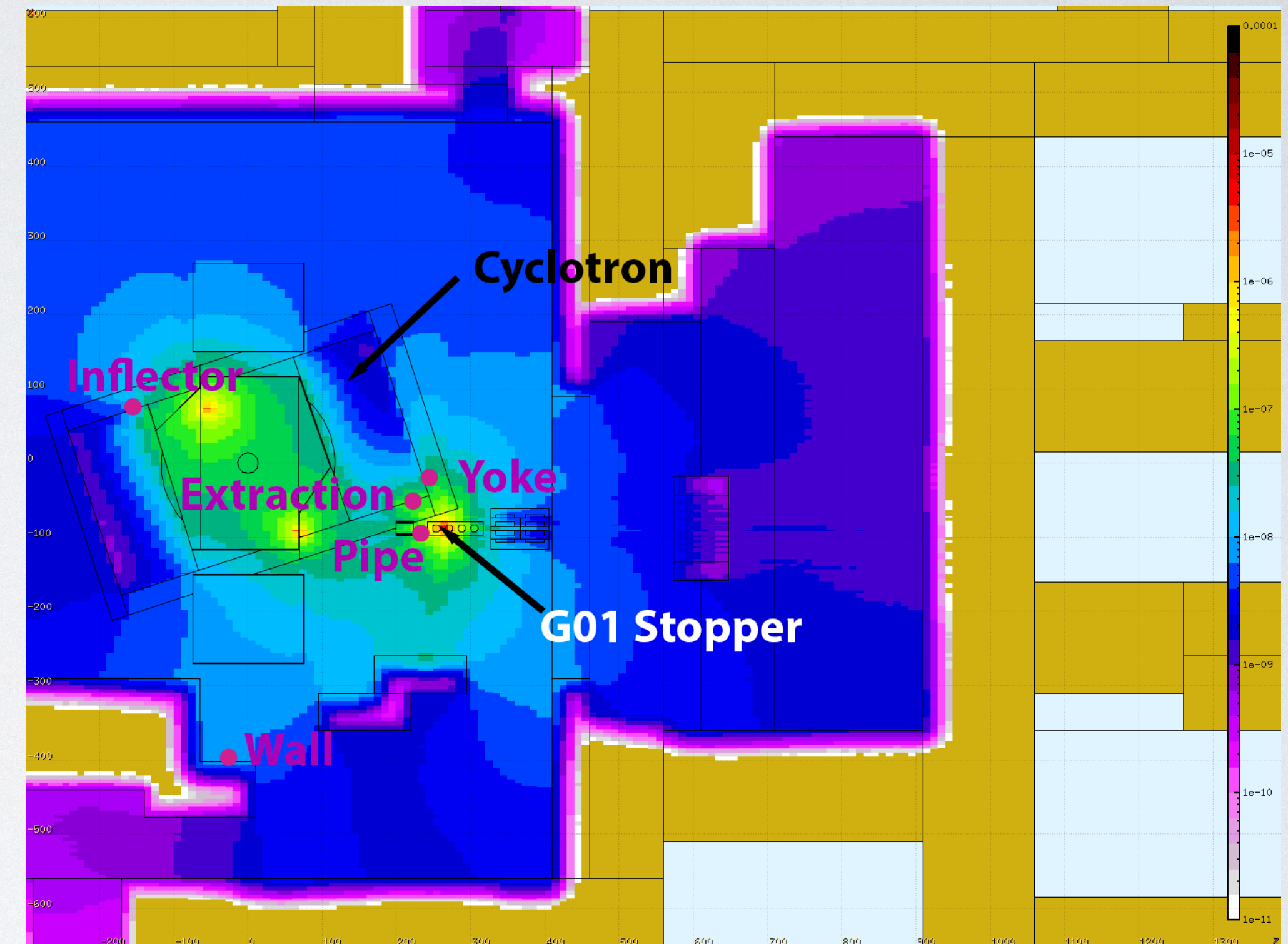
- Des expériences d'irradiation de détecteurs d'activation ont été réalisées pour des installations (CEMHTI – CYRCé – CYCERON et CPO)
- Quatre matériaux mis en œuvre : Au, Sc, Ta, Tb
- Faisceaux de protons et de deutérons pour CEMHTI,
- Faisceaux de protons et production de  $^{18}\text{F}$  pour CYRCé
- Faisceaux de protons et production de  $^{18}\text{F}$  et  $^{11}\text{C}$  (gaz) pour CYCERON
- Faisceau de protons pour CPO
- Spectrométries  $\gamma$  réalisées par l'IRSD et l'IPHC





# CEMTHI – Faisceau de proton 16MeV

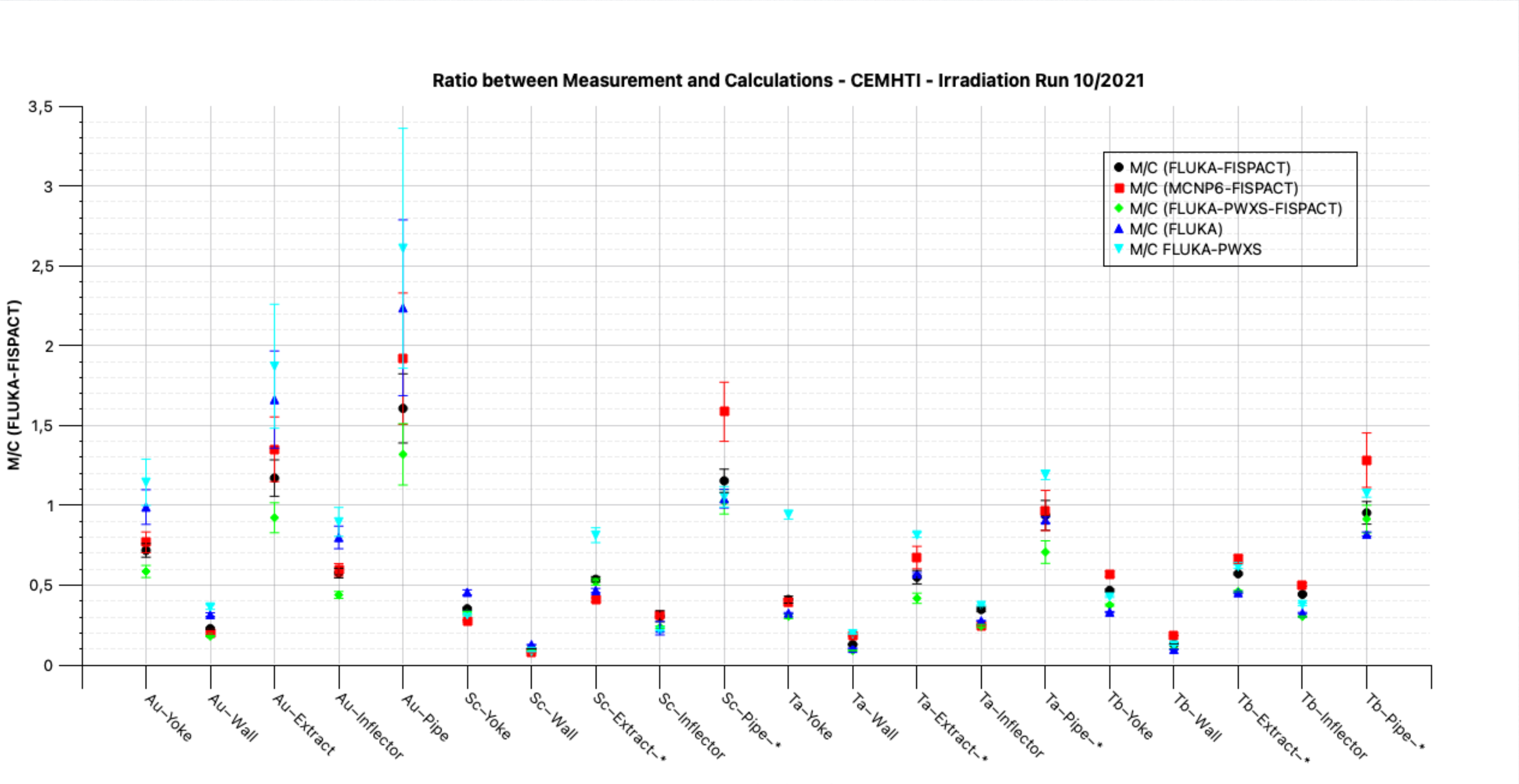
- Irradiation des détecteurs avec un faisceau de protons de 16 MeV
- 5 matrices de 4 détecteurs d'activations déposées autour du cyclotron
- Première irradiation : 3 matrices de 3 matériaux seulement
- Deuxième irradiation : 5 matrices, 4 matériaux (les détecteurs de la première irradiation ont été réutilisés pour tester leur recyclage).
- Faisceau extrait du cyclotron entièrement perdu sur un arrêt (G01)
- Deux points de pertes considérés : G01 et inflecteur



Location of the different activation foils and the beam stopper – Neutron Fluence in  $\text{n.cm}^{-2} .\text{pp}^{-1}$



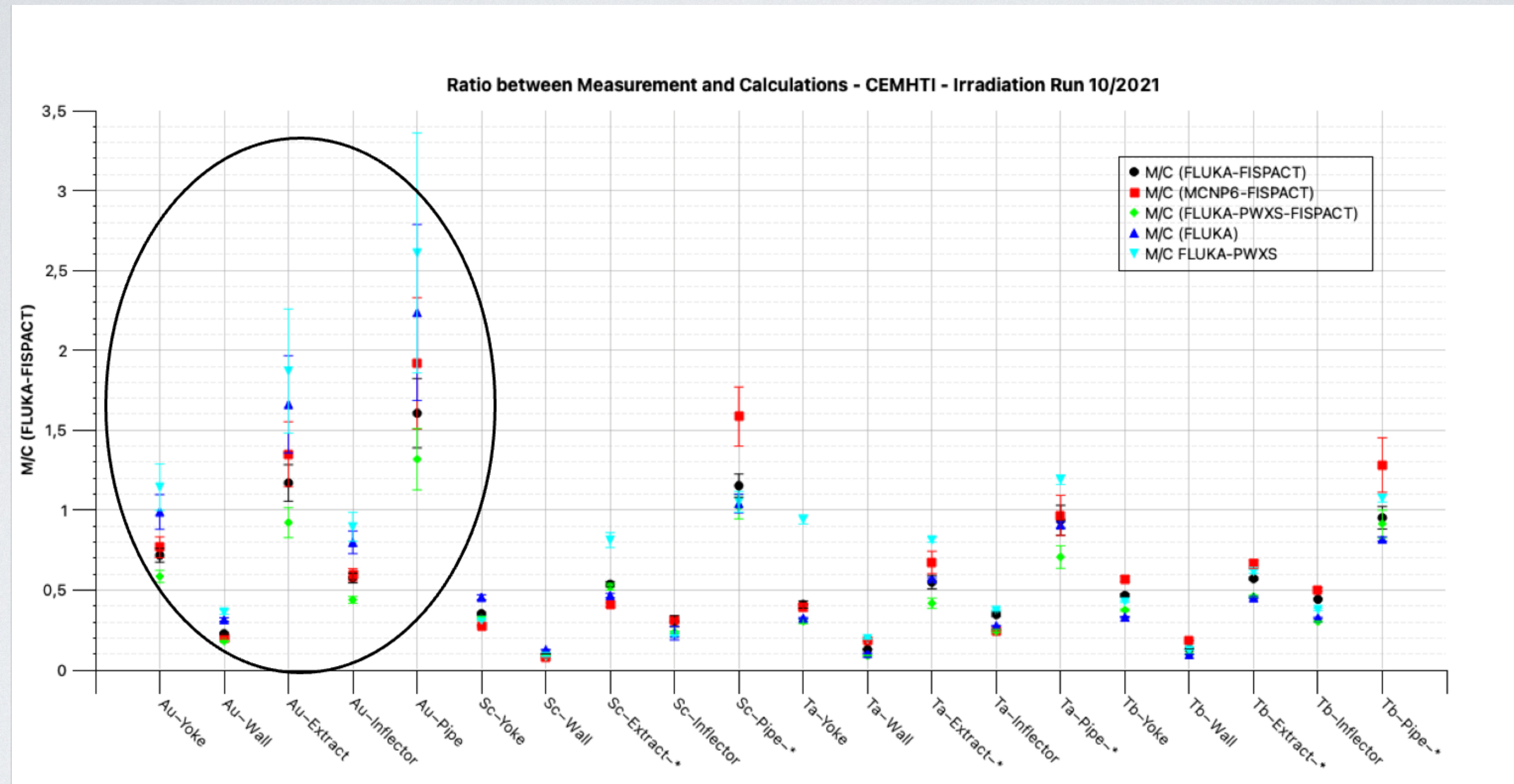
# CEMTHI - Résultats



Rapport entre l'activation mesurée par spectrométrie gamma à la fin de l'irradiation et l'activation calculée à l'aide des fluences de neutrons produites par les codes Monte-Carlo



# CEMTHI - Résultats



Des disparités importantes dans l'estimation de l'activité de  $^{198}\text{Au}$  par les différents codes. Lors de l'utilisation de FISPACT-II, ses disparités se réduisent

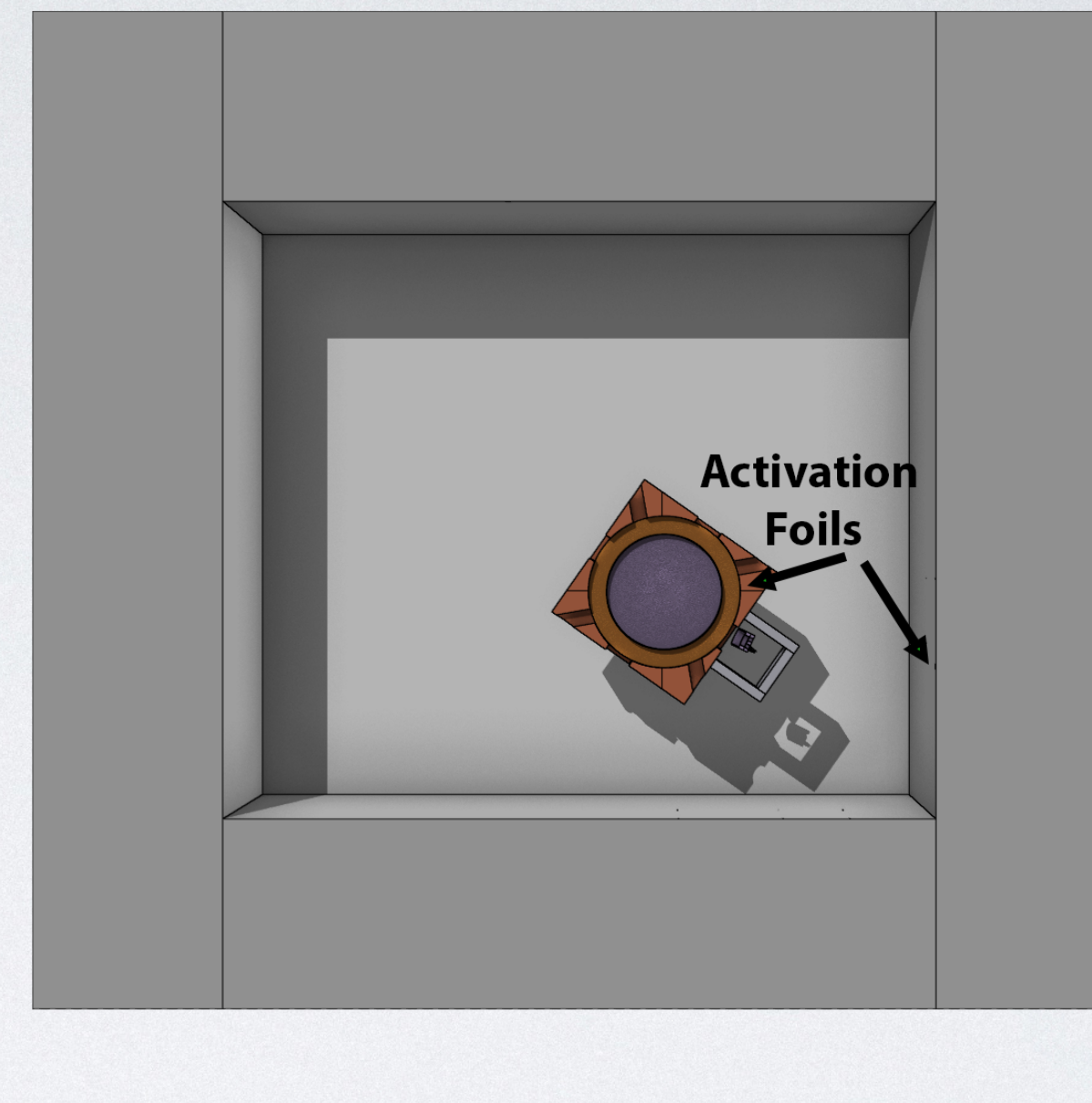


# CYRCé - Faisceau de proton 16,5 MeV

Irradiation des détecteurs avec un faisceau de protons de 16,5 MeV

Détecteurs d'activation à deux endroits :

- Mur devant la cible
- Sur le côté de la cible

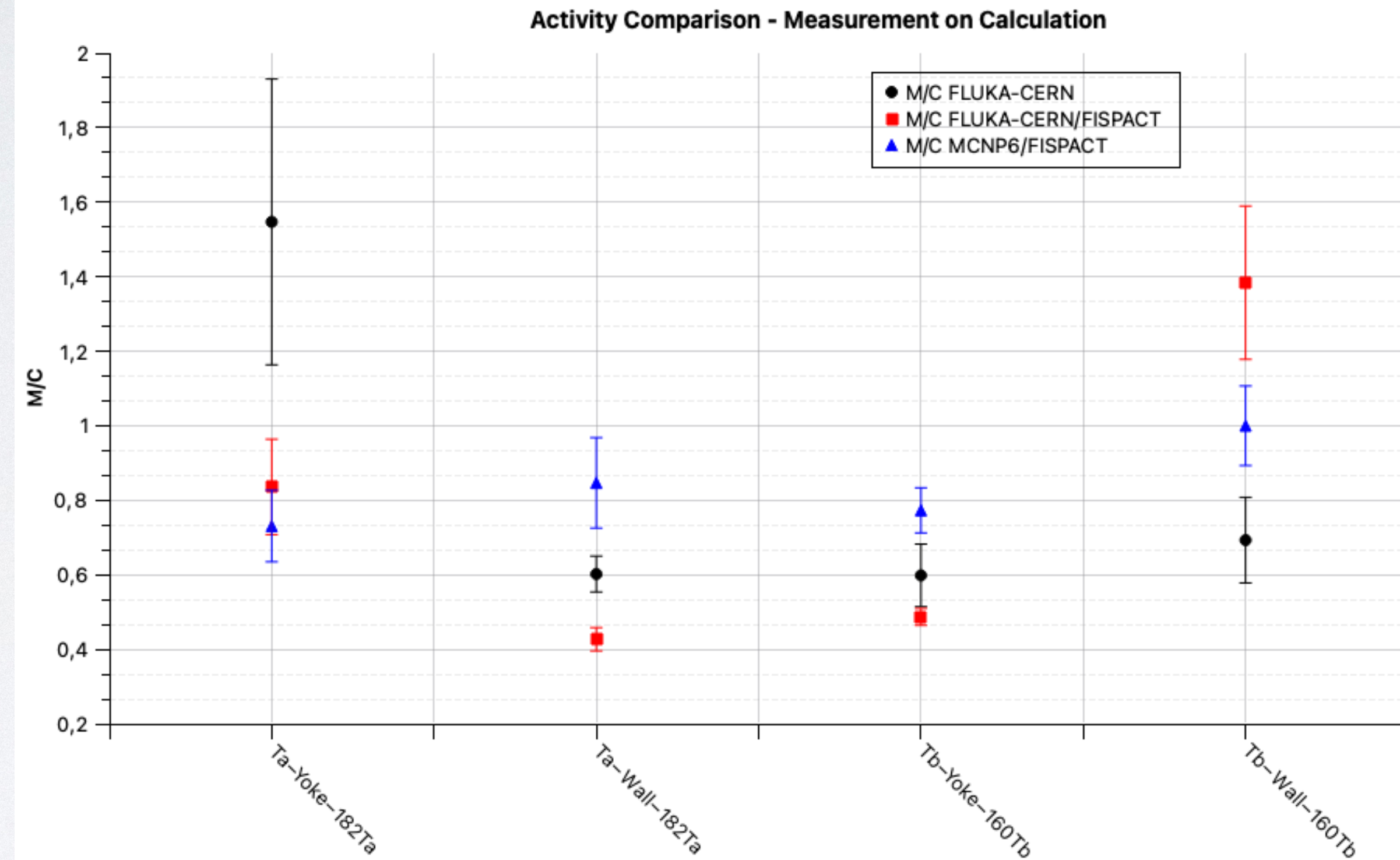


Location of the different activation foils



# CYRCé - Résultats

- Première irradiation (04/2021) : 2 matrices de deux matériaux (Ta, Tb)
- Tirs sur 180 seuls

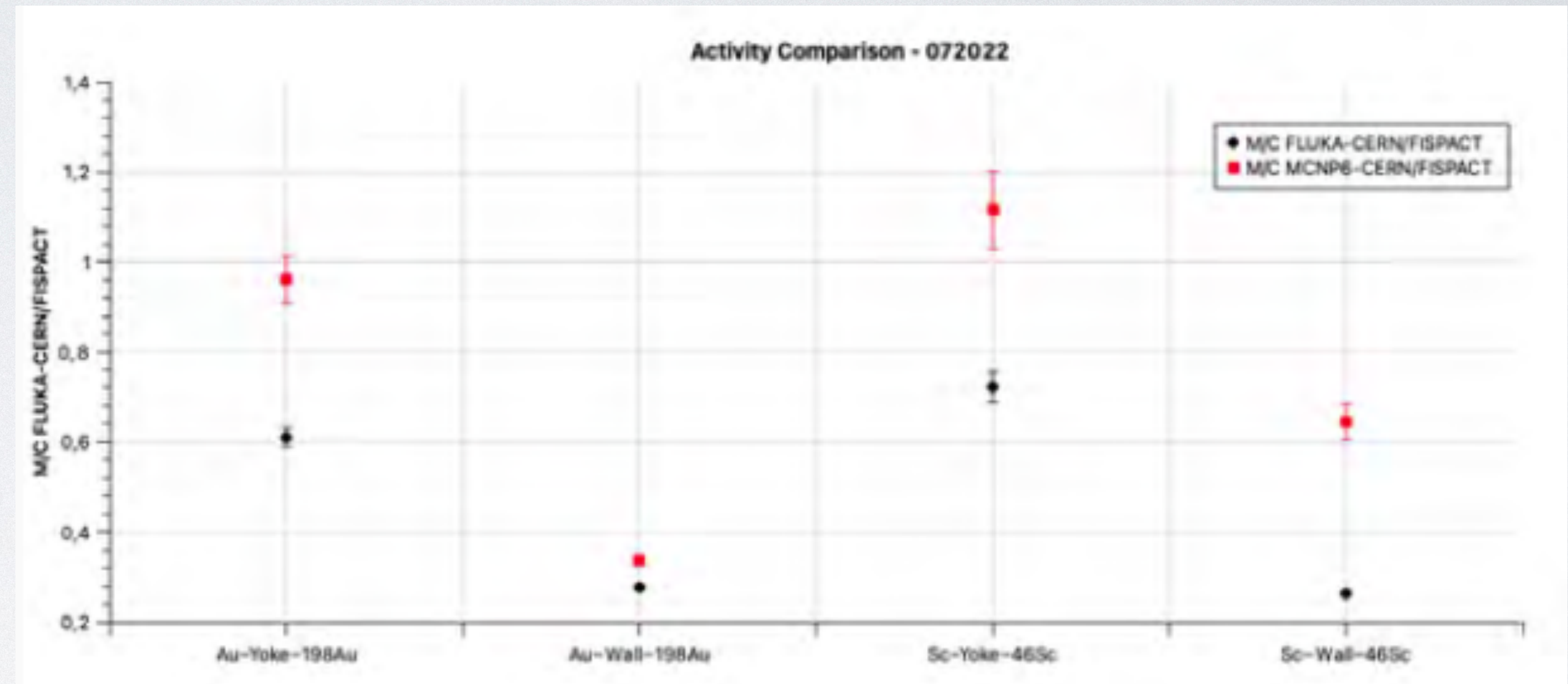


Rapport entre l'activation mesurée par spectrométrie gamma à la fin de l'irradiation et l'activation calculée à l'aide des fluences de neutrons produites par les codes Monte-Carlo



# CYRCé - Résultats

- Deuxième irradiation (07/2022) : 2 matrices de deux matériaux (Au, Sc)
- Tirs sur 180 + 160
- Une bonne cohérence

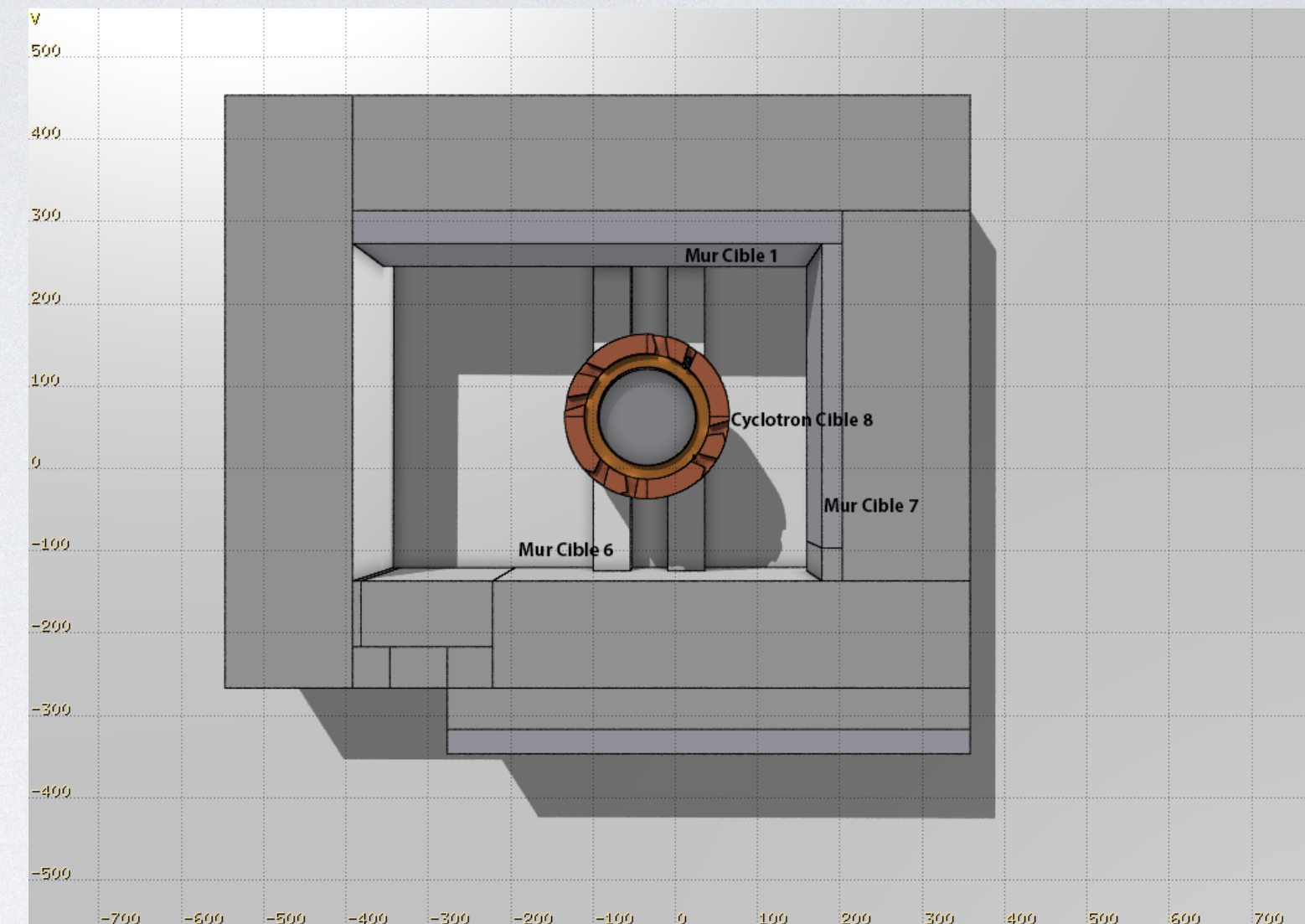


Rapport entre l'activation mesurée par spectrométrie  $\gamma$  à la fin de l'irradiation et l'activation calculée à l'aide des fluences de neutrons produites par les codes Monte-Carlo



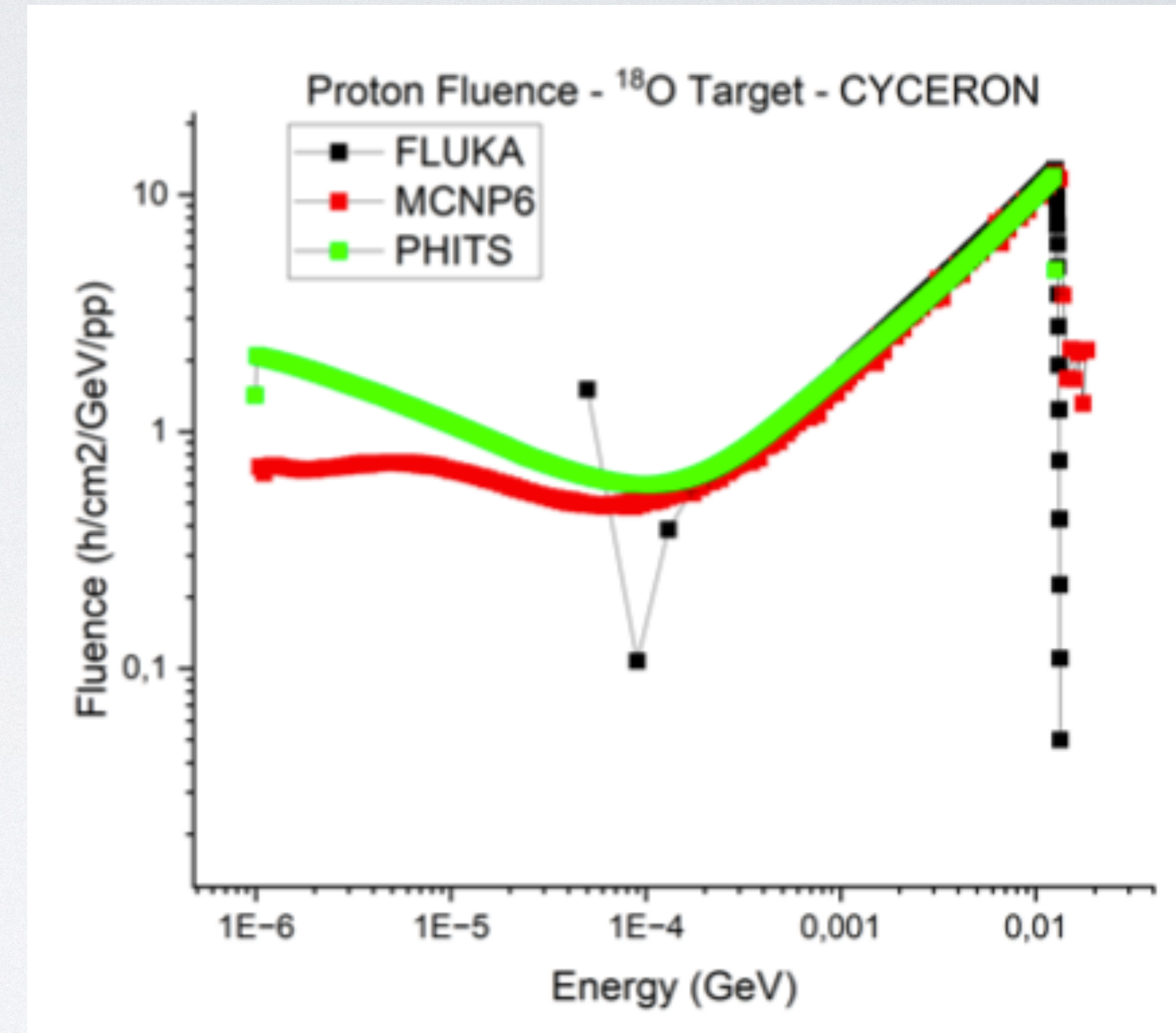
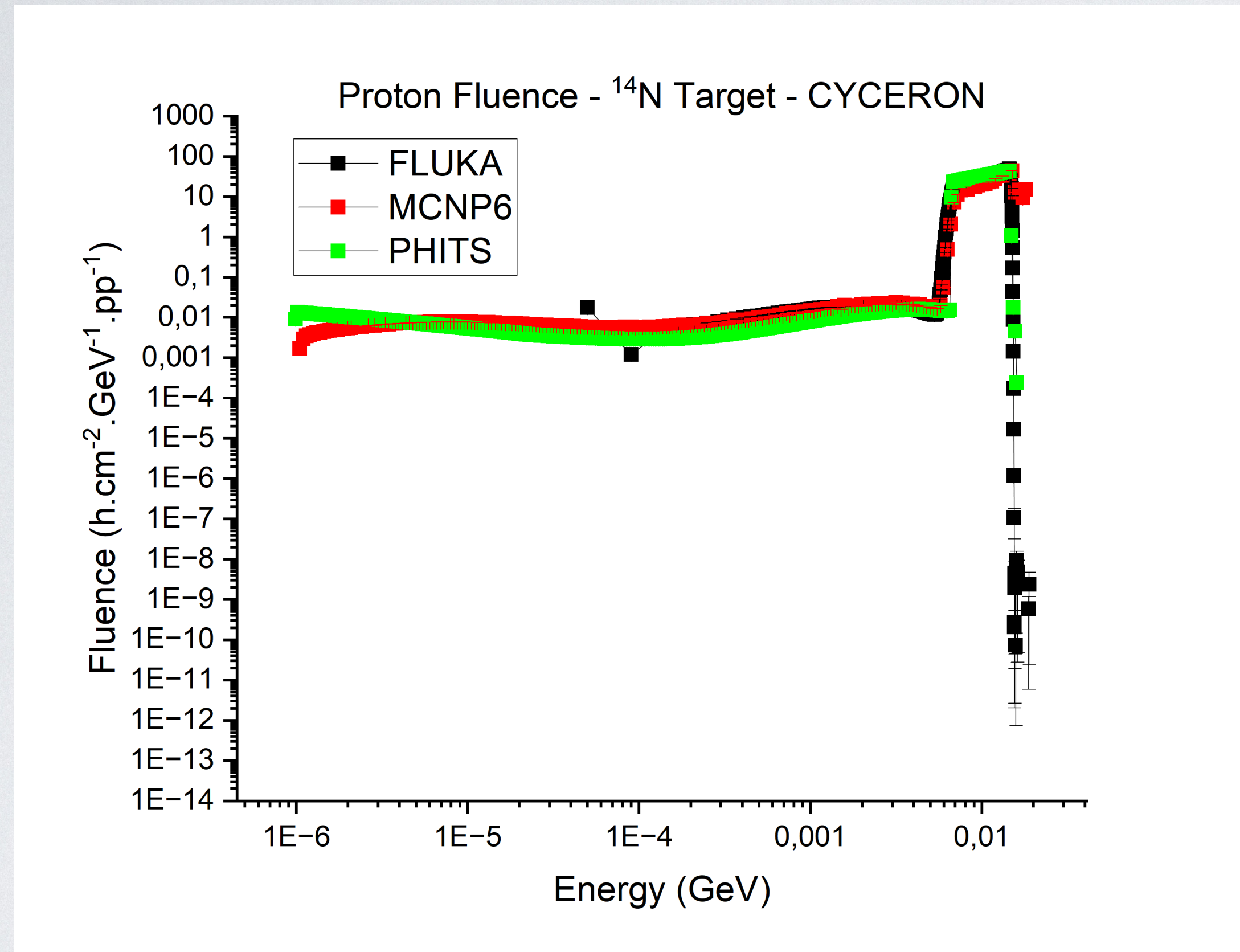
# CYCERON – Faisceau de proton 18MeV

- Irradiation des détecteurs avec un faisceau de protons de 18 MeV (15–16 MeV avec dégradeur pour la cible gazeuse)
- Irradiations sur cible gazeuse d'azote-14 et à une cible liquide d'eau enrichie en oxygène-18
- Matrice de quatre détecteurs d'activation pendant les cycles d'irradiation réalisés entre juin et juillet 2023





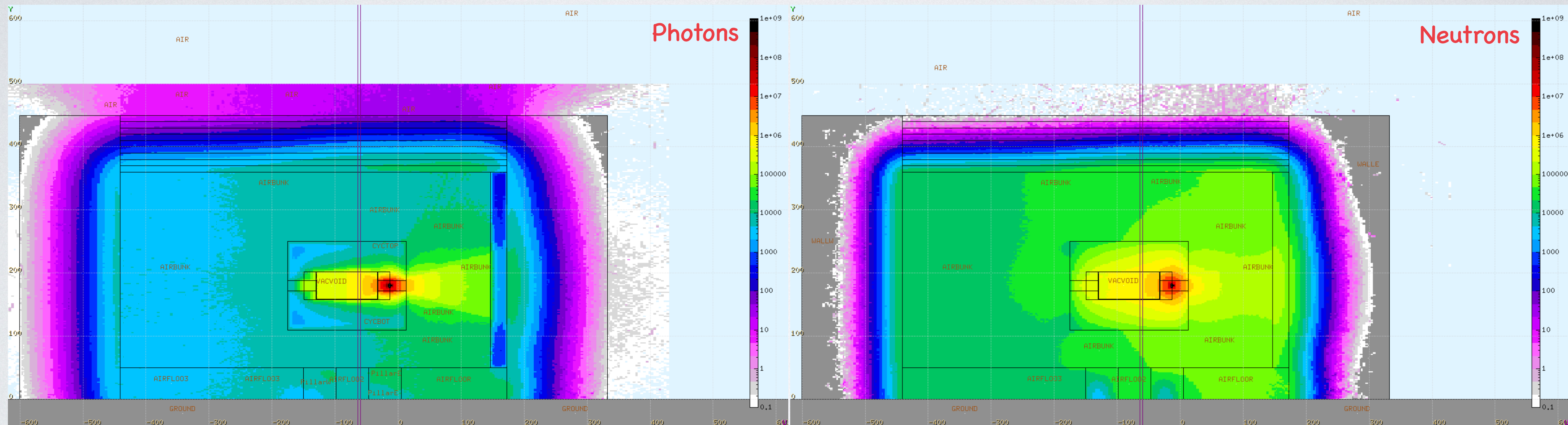
# CYCERON - Résultats



- Tendances très similaires pour les protons dont l'énergie est supérieure à 1 MeV
- Confirmation de la validité des corrélations établies



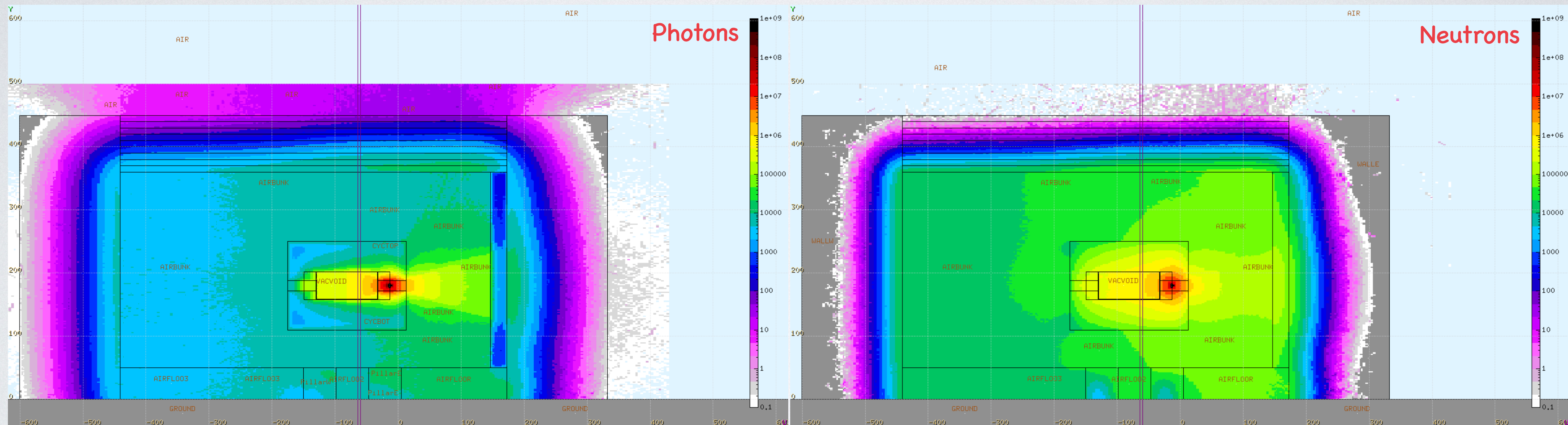
Les mesures pour les photons montrent des valeurs de l'ordre d'une vingtaine de  $\mu\text{Sv/h}$  en photons, les simulations donnent des valeurs comprises dans cette même ordre de grandeur





# CYCERON - Résultats

Débits d'équivalents de dose ambiants ( $H^*(10)$ ) sur le toit de la casemate pour les photons et les neutrons, en  $\mu\text{Sv/h}$ , lors de tirs de production de  $^{18}\text{F}$



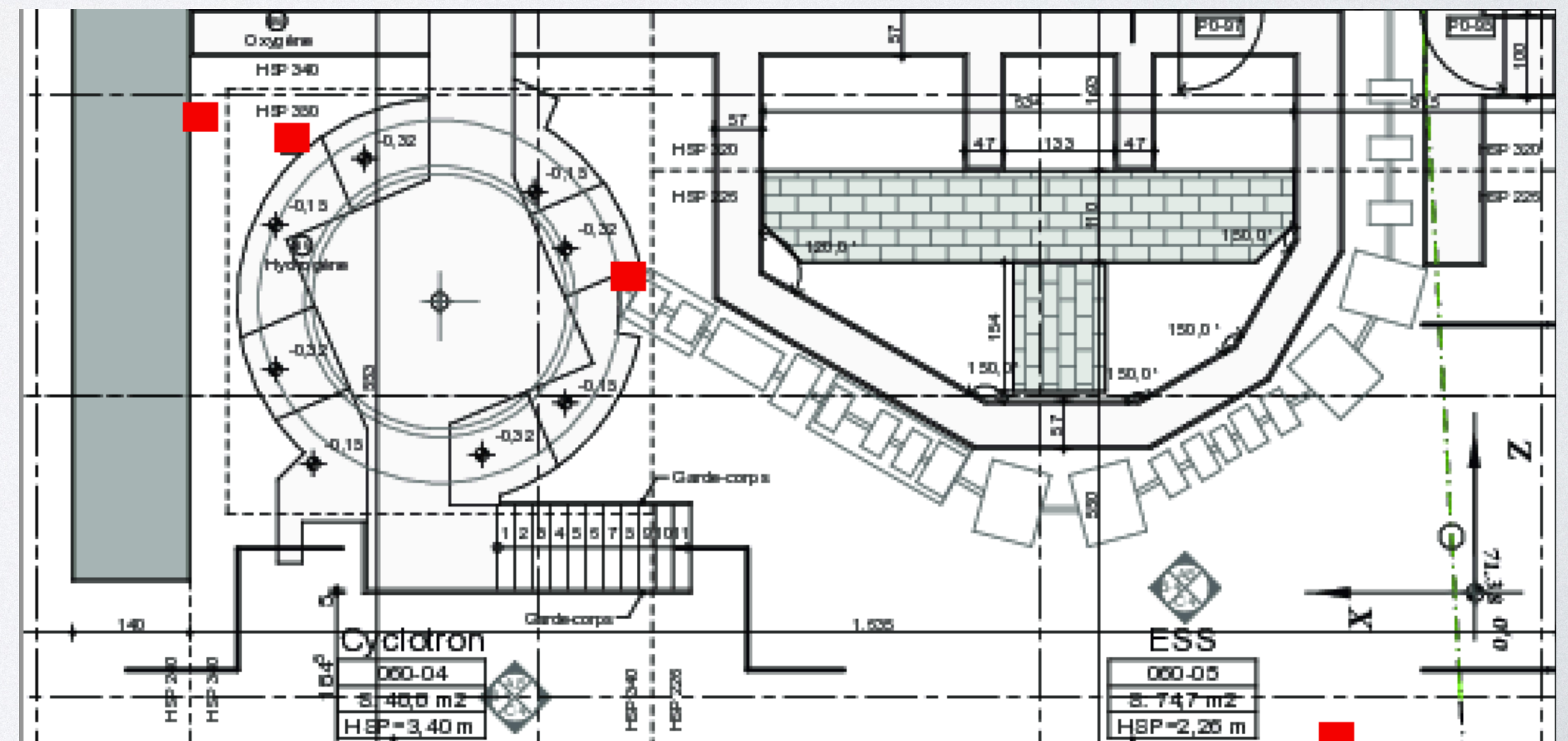
- Un protocole de mesures plus élaboré sera mis en place (à base de dosimétrie passive par exemple) afin d'obtenir des éléments de comparaison plus fiables



# CPO - Faisceau de proton

4 détecteurs d'activations déposés autour du cyclotron

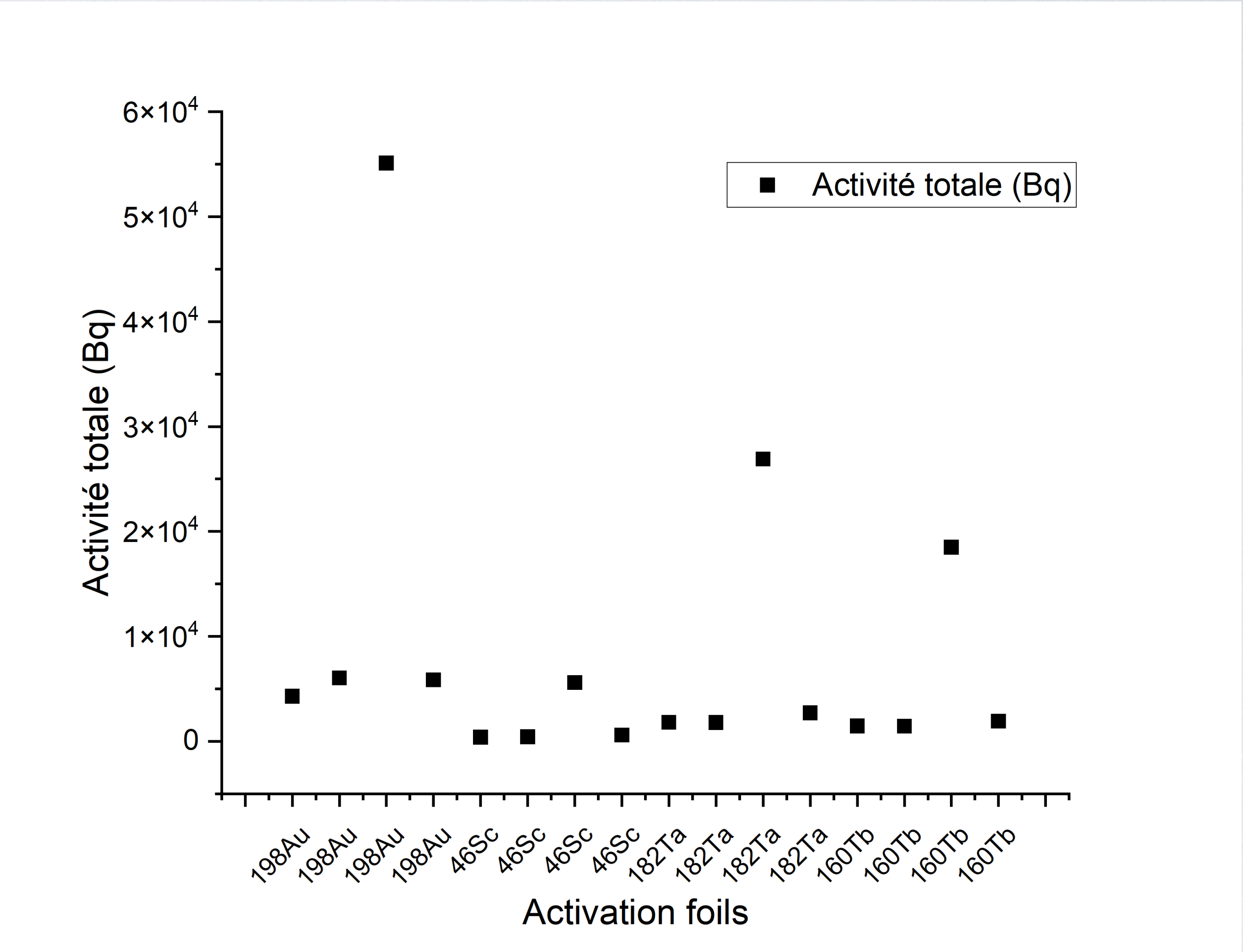
- Cyclo inflecteur
- Mur axe dégradeur
- Mur axe extraction
- Mur inflecteur





# CPO - Résultats

Echantillon	Localisation	RN	Activité totale (Bq)
Au	Cyclo Inflecteur	198Au	4,29E+03
	Mur axe dégradeur	198Au	6,03E+03
	Mur extraction	198Au	5,51E+04
	Mur Inflecteur	198Au	5,86E+03
Sc	Cyclo Inflecteur	46Sc	3,92E+02
	Mur axe dégradeur	46Sc	4,24E+02
	Mur axe extraction	46Sc	5,59E+03
	Mur inflecteur	46Sc	5,87E+02
Ta	Cyclo Inflecteur	182Ta	1,80E+03
	Mur axe dégradeur	182Ta	1,78E+03
	Mur axe extraction	182Ta	2,69E+04
	Mur inflecteur	182Ta	2,71E+03
Tb	Cyclo Inflecteur	160Tb	1,46E+03
	Mur axe dégradeur	160Tb	1,44E+03
	Mur axe extraction	160Tb	1,85E+04
	Mur inflecteur	160Tb	1,91E+03



L'activité de chaque détecteur a été mesurée ensuite par spectrométrie  $\gamma$ , ce qui nous permet de compléter la comparaison entre mesures et simulations dans un autre environnement expérimental



## Travaux en cours

- CYRCé : de nouvelles sessions d'irradiations seront organisées avec l'utilisation de détecteurs passifs métalliques ainsi qu'actifs
- CYCERON : Deuxième irradiation a été faite → Modélisation
- CAL : Une proposition a été soumise et nous sommes en attente de confirmation pour obtenir du temps faisceau
- Rédaction de deux articles (Comparaisons codes et Résultats CEMHTI)



Merci pour votre attention



# Isotopic inventories calculation – Nuclear Databases



## FISPACT-II

« FISPACT-II est un système de codes multiphysiques, d'inventaire et de terme source amélioré qui offre une grande variété de méthodes de simulation avancées, prédictives, spectrales et temporelles »

Ce code est développé et maintenu par l'Autorité britannique de l'énergie atomique

Utilisation des bases de données TENDL2019 pour les calculs

