

Etude Sim β -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

Problématique

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 β - γ)
- Procédures administratives
- Ressources financières

Projet Sim β -AD (Simulation et détection pour l'évaluation de l'activation en radionucléides émetteur β -purs)

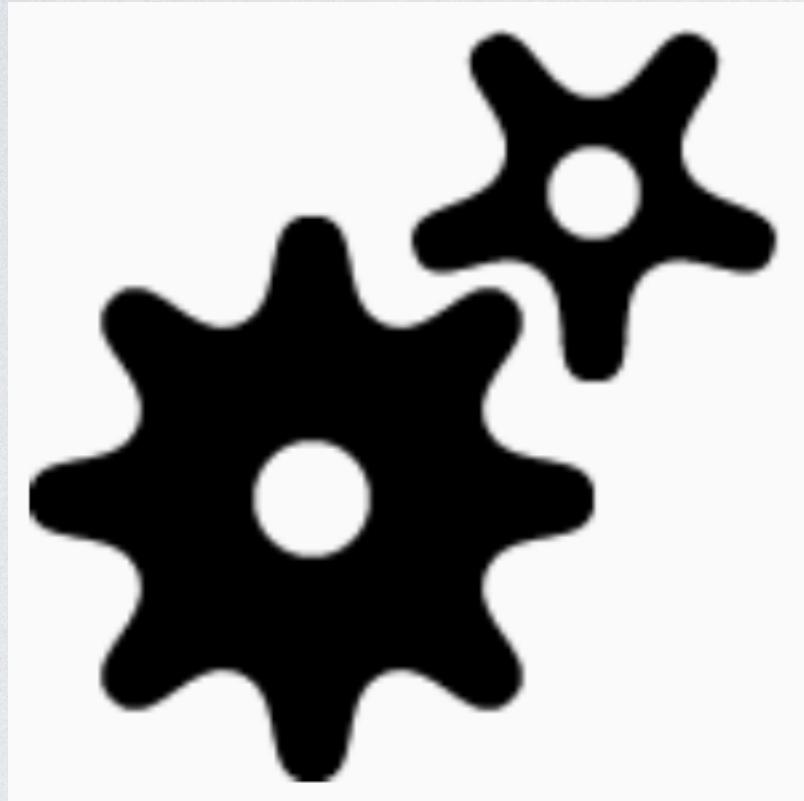
Le projet Sim β -AD a pour objectif de développer une méthodologie fiable, précise et facilement déployable pour évaluer l'activation des radionucléides β -purs présents dans les matériaux irradiés des installations de cyclotrons.

Deux approches sont combinées :

- Des simulations Monte Carlo pour établir des facteurs de corrélation entre émetteurs gamma mesurables et β -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



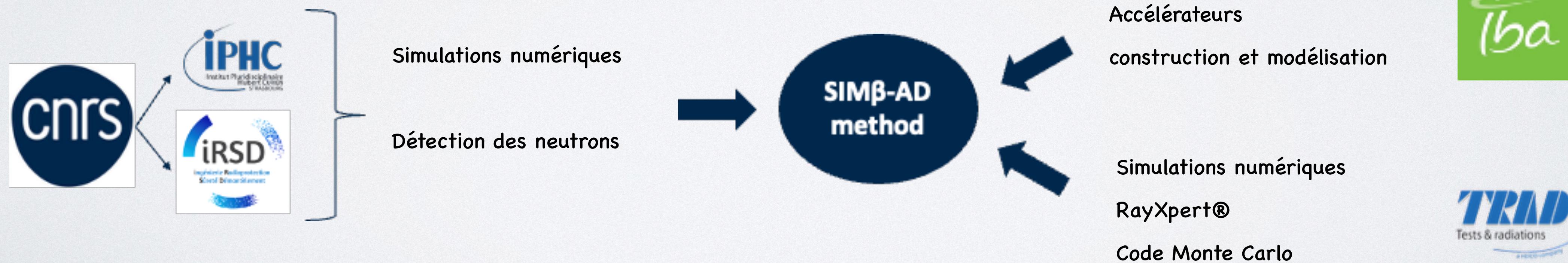
Rentabilité

Consortium Sim β -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

- 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 Sim β -AD

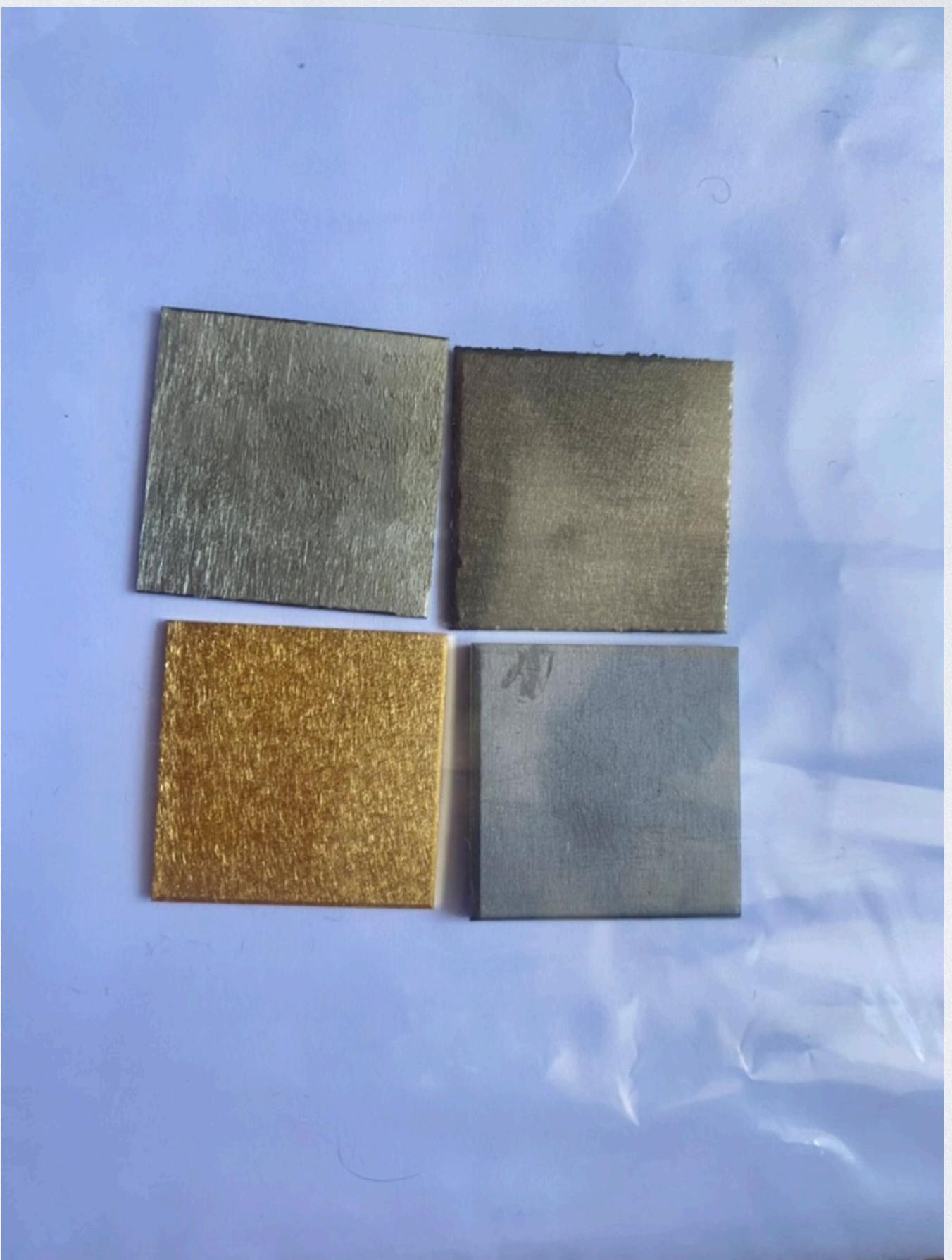
Installations	Faisceau	Emax (MeV)	Imax(μ A)	Cibles
CYRCé	p	25	300	L/S
CYCERON	p/d	18/9	80-50	L/G/S
CEMHTI	p/d/ α	38/25/50	40/40/15	Irradiation
CPO	p	235	600.10^{-3}	Protonthérapie
CAL	p	65/235	-	Protonthérapie

Tester la méthodologie dans des contextes variés



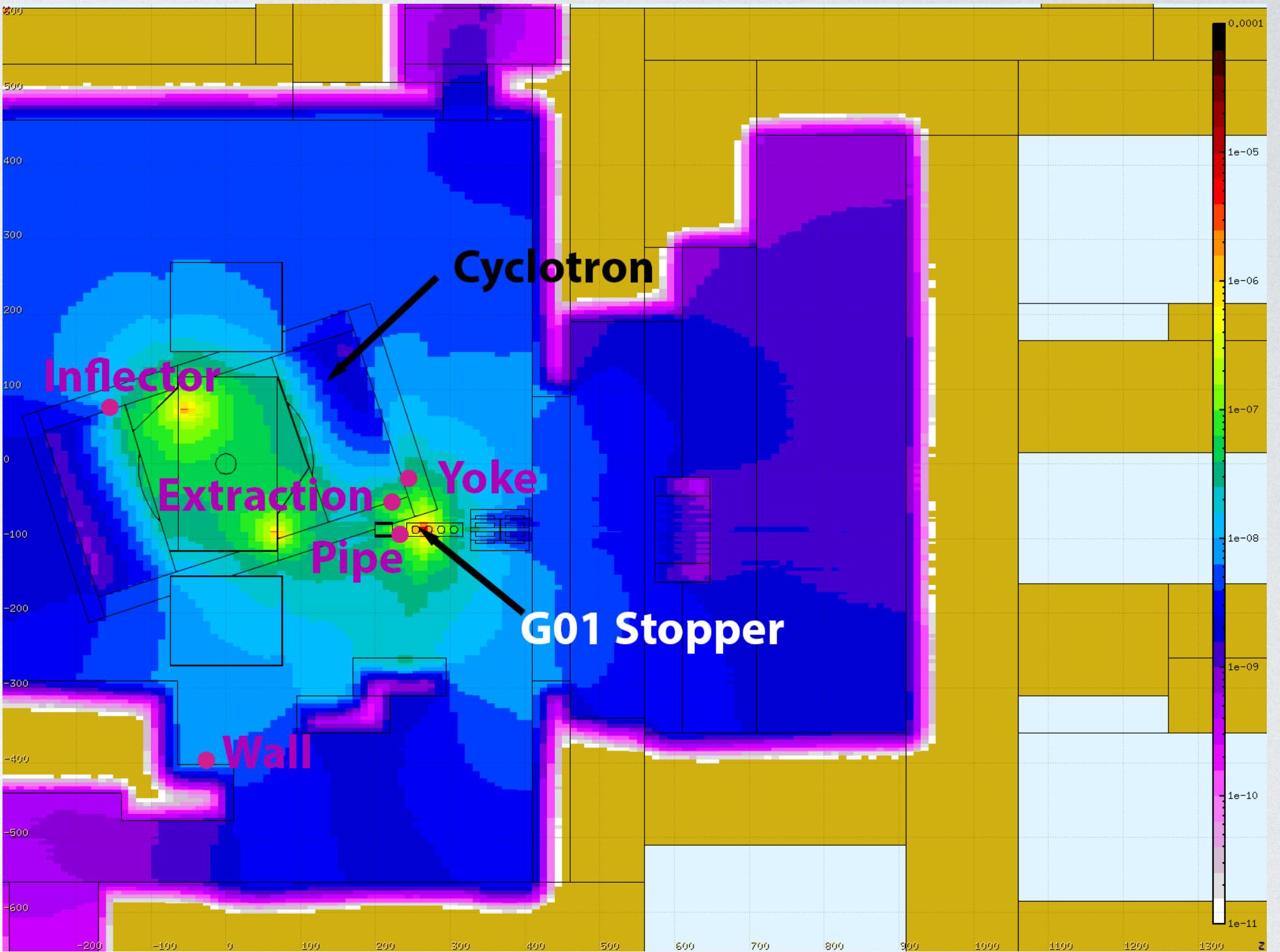
Irradiation des détecteurs passifs

- 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}F pour CYRCé
- Faisceaux de protons et production de ^{18}F et ^{11}C (gaz) pour CYCERON
- Faisceau de protons pour CPO
- Spectrométries γ 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 arrêteur (G01)
- Deux points de pertes considérés : G01 et inflecteur

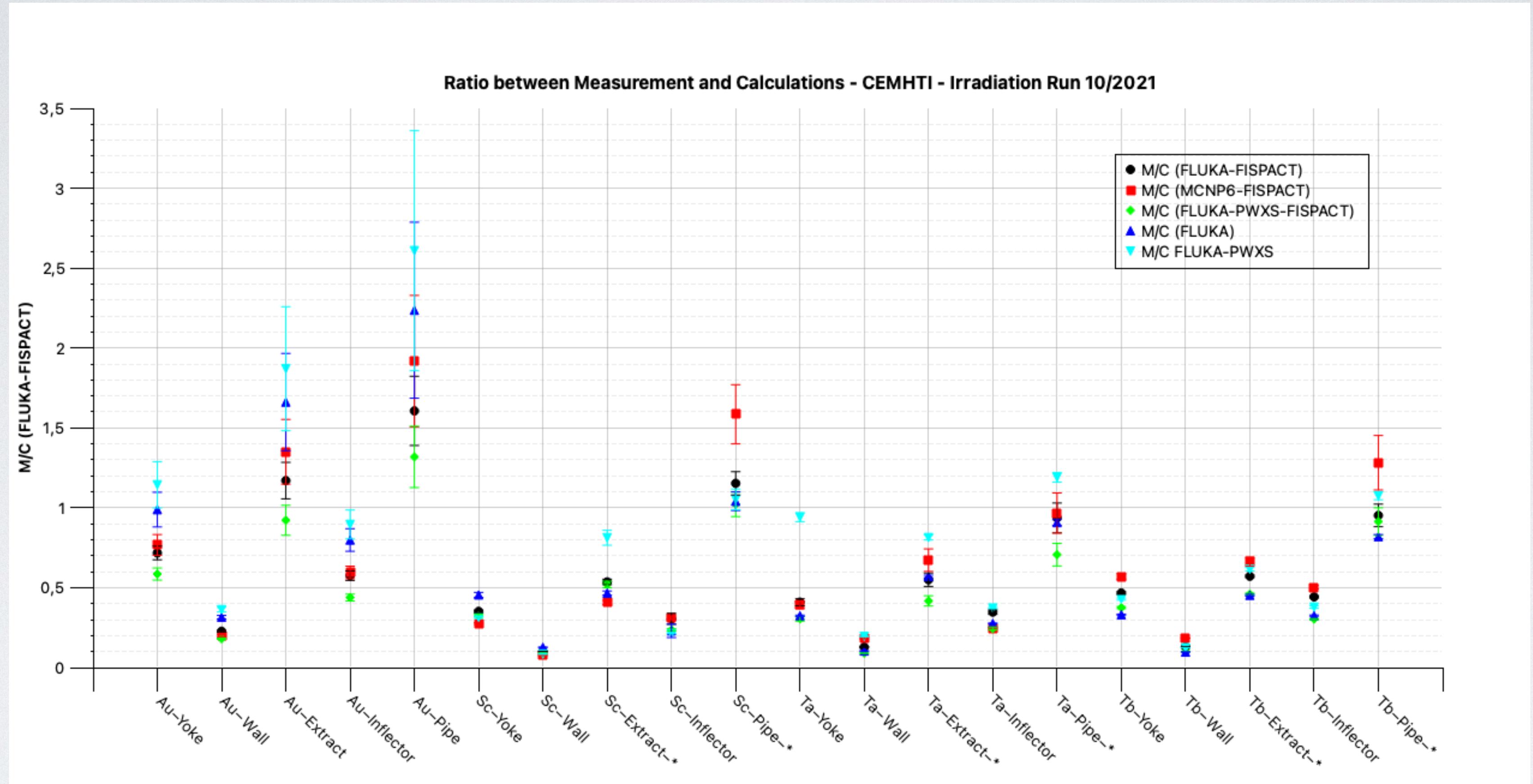


Location of the different activation foils and the beam stopper - Neutron Fluence in $n.cm^{-2} .pp^{-1}$

CEMHTI - Résultats



Financé par

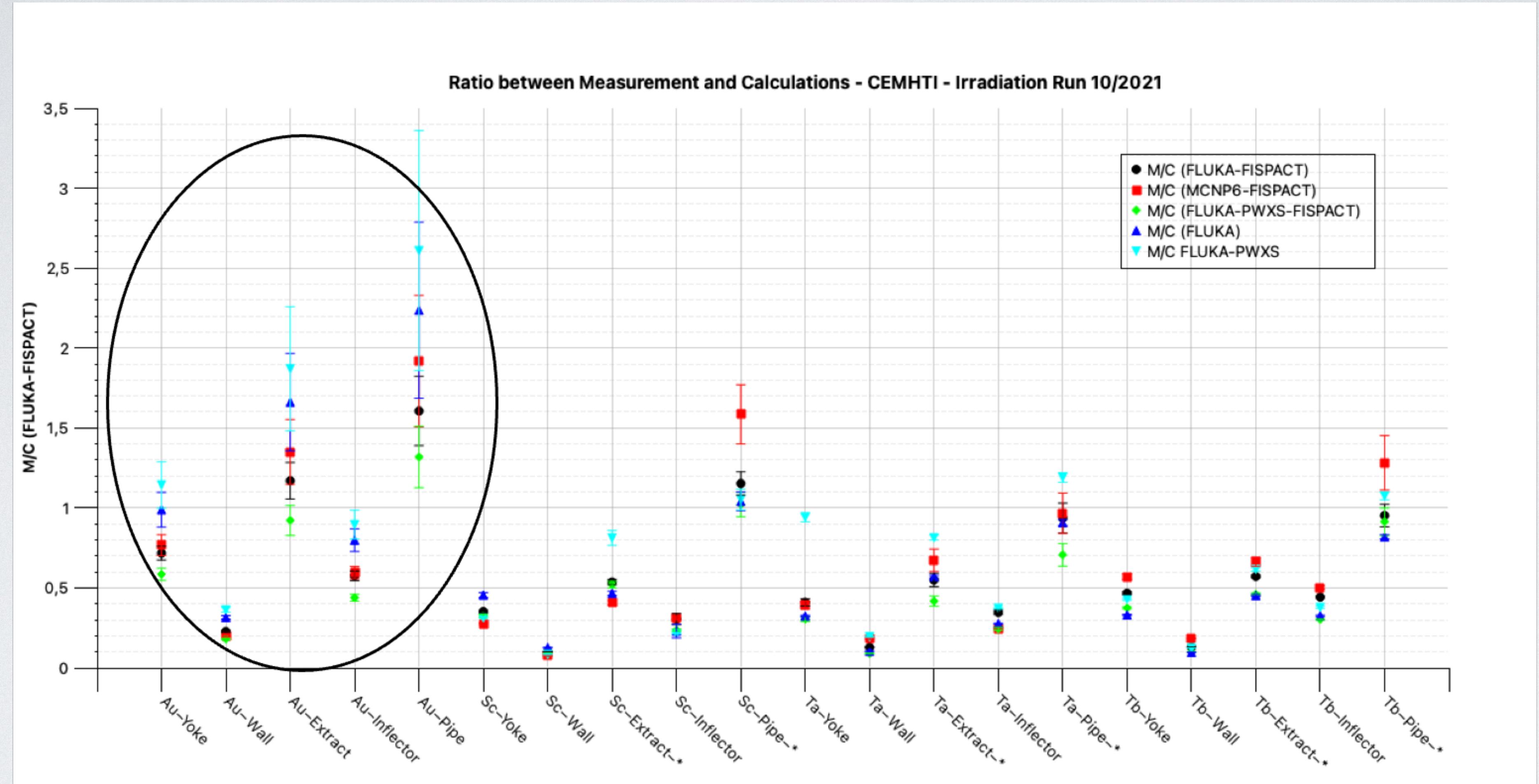


Rapport entre l'activation mesurée par spectrométrie gamma à la fin de l'irradiation et l'activation calculée à l'aide des fluences de neutrons produites par les codes Monte-Carlo

CEMHTI - Résultats



Financé par



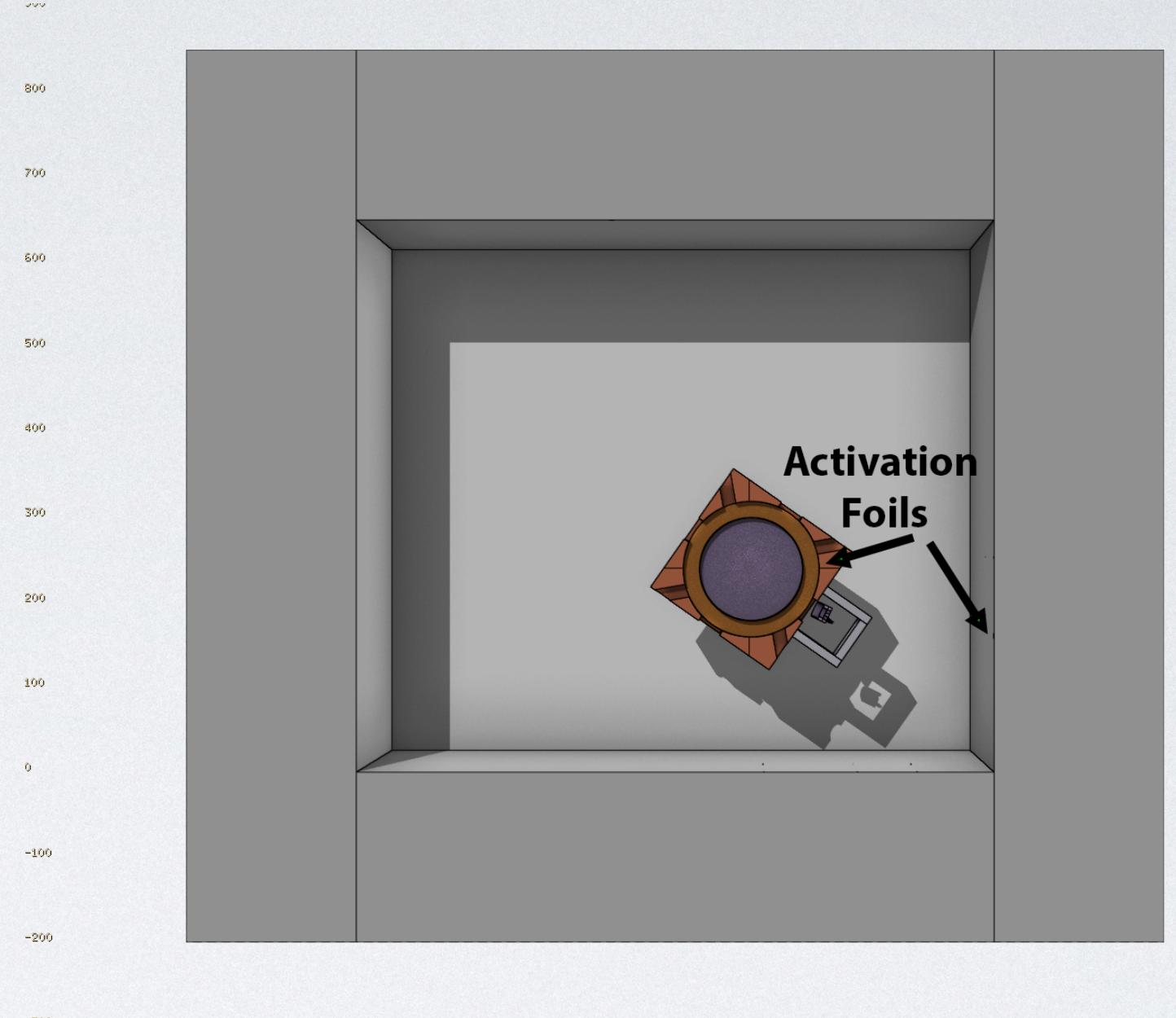
Des disparités importantes dans l'estimation de l'activité de ^{198}Au par les différents codes. Lors de l'utilisation de FISPACT-II, ses disparités se réduisent

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 :

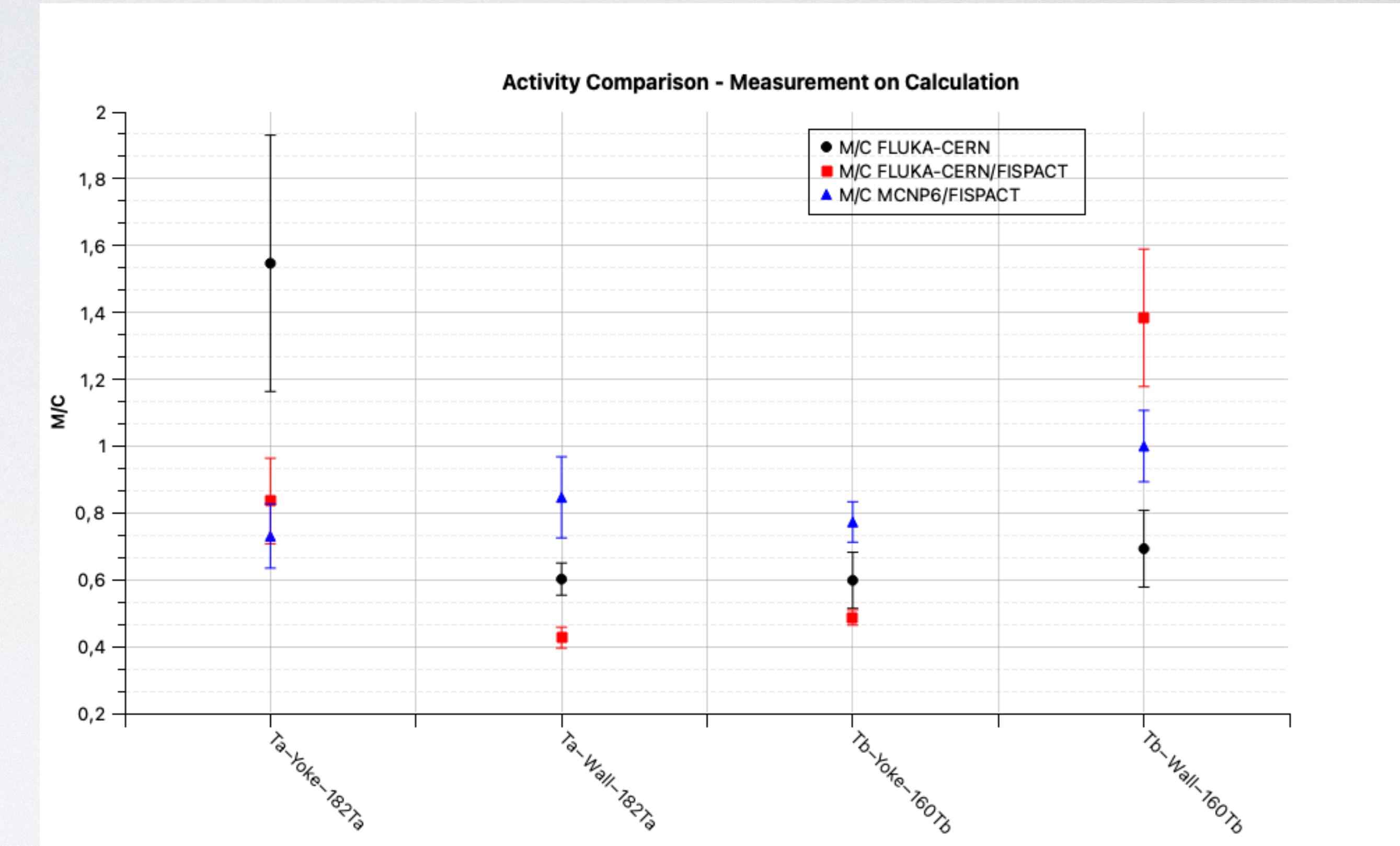
- Mur devant la cible
- Sur le côté de la cible



Location of the different activation foils

CYRCé - Résultats

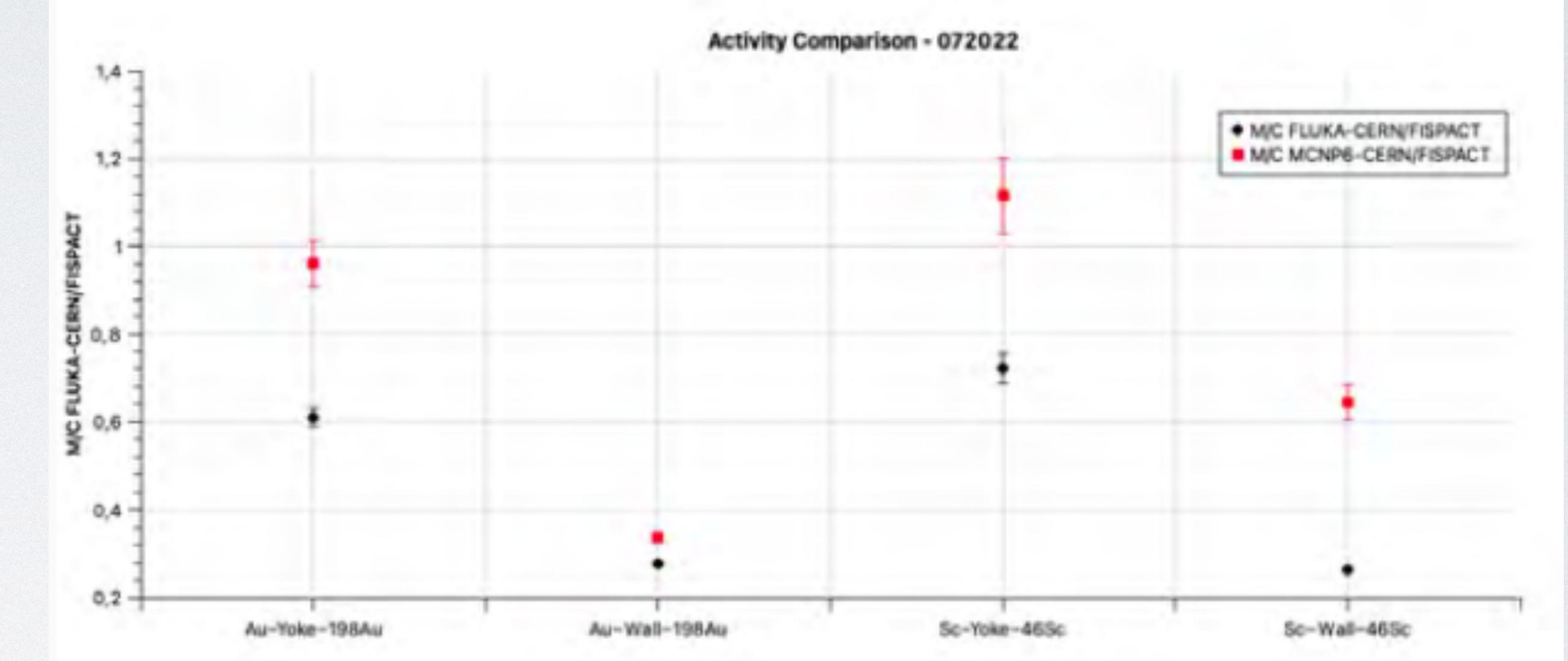
- Première irradiation (04/2021) : 2 matrices de deux matériaux (Ta, Tb)
- Tirs sur 180 seuls



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

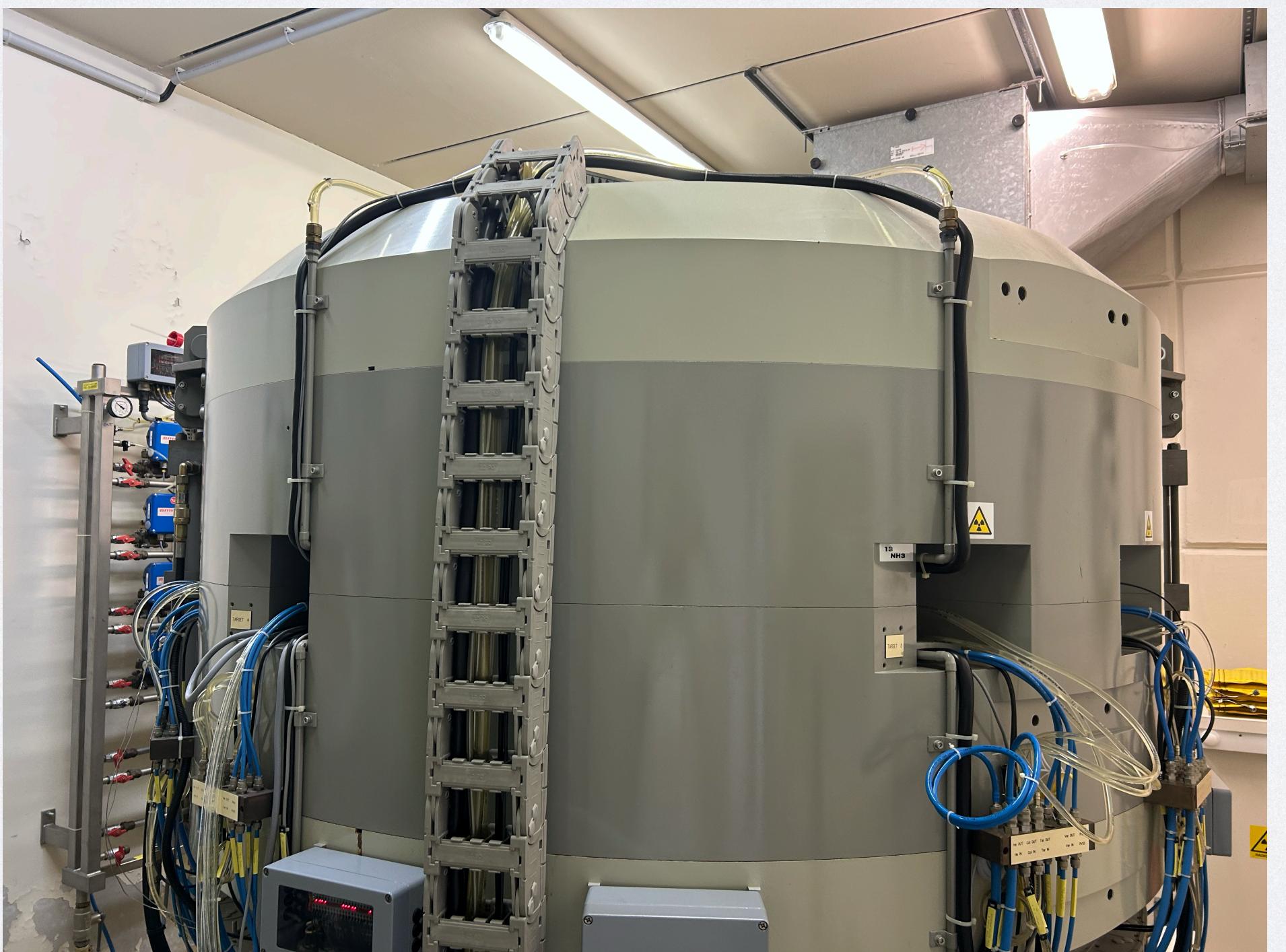
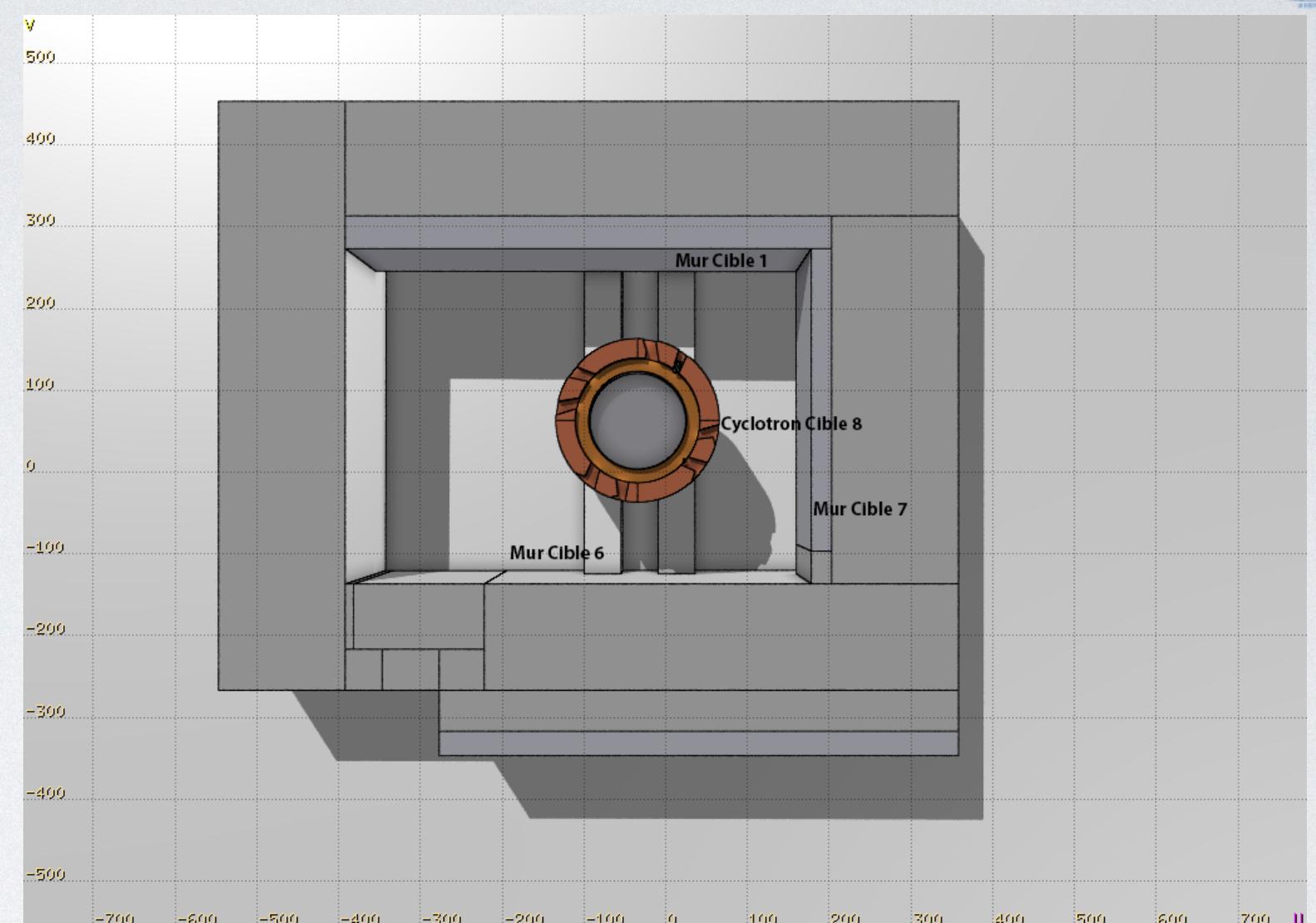
- Deuxième irradiation (07/2022) : 2 matrices de deux matériaux (Au, Sc)
- Tirs sur 180 + 160
- Une bonne cohérence



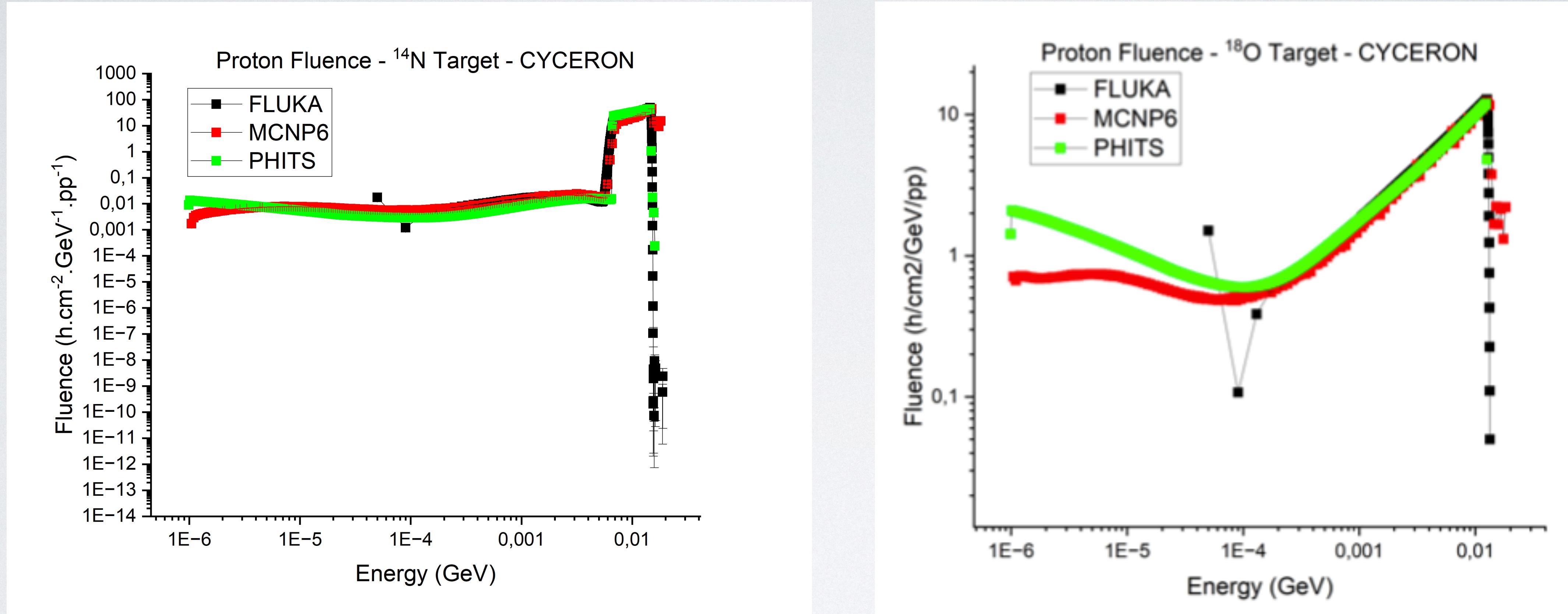
Rapport entre l'activation mesurée par spectrométrie γ à la fin de l'irradiation et l'activation calculée à l'aide des fluences de neutrons produites par les codes Monte-Carlo

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



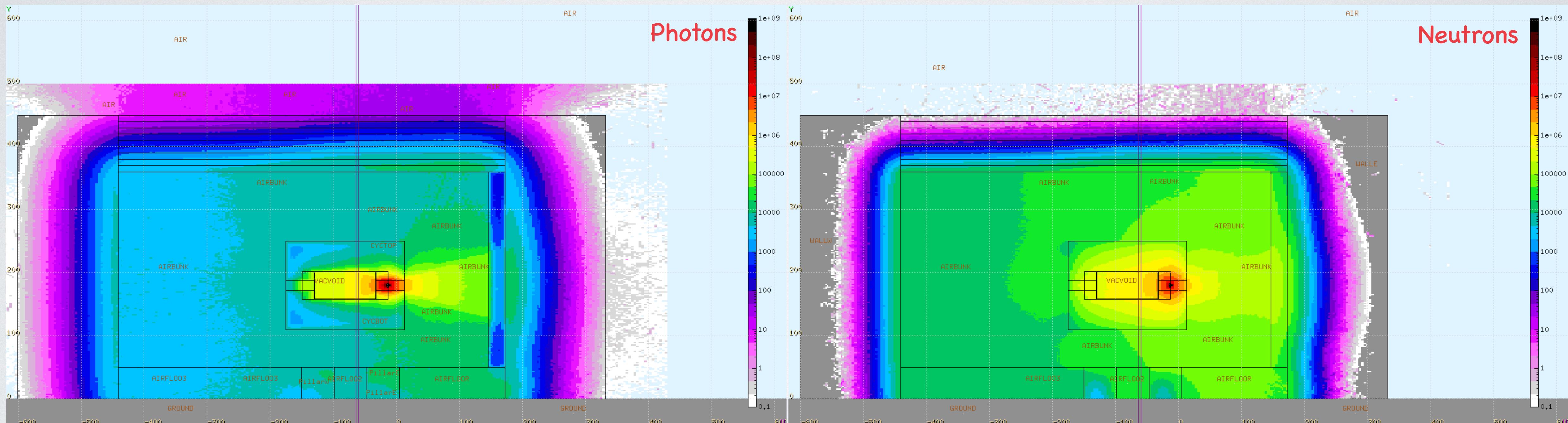
CYCERON - Résultats



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

CYCERON - Résultats

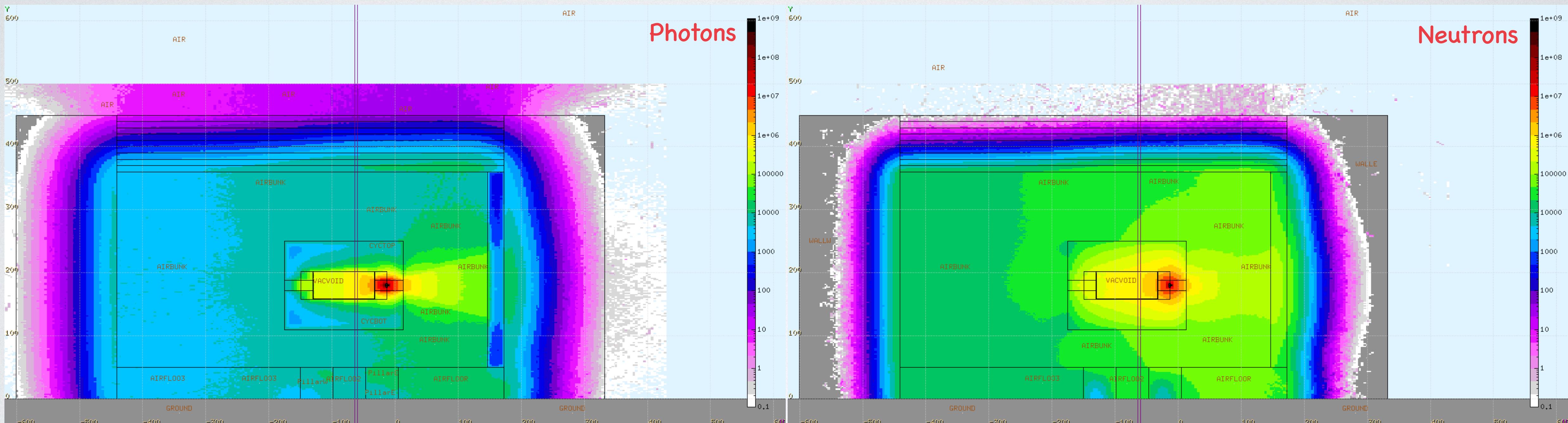
Débits d'équivalents de dose ambients ($H^*(10)$) sur le toit de la casemate pour les photons et les neutrons, en $\mu\text{Sv}/\text{h}$, lors de tirs de production de ^{18}F



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

CYCERON - Résultats

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

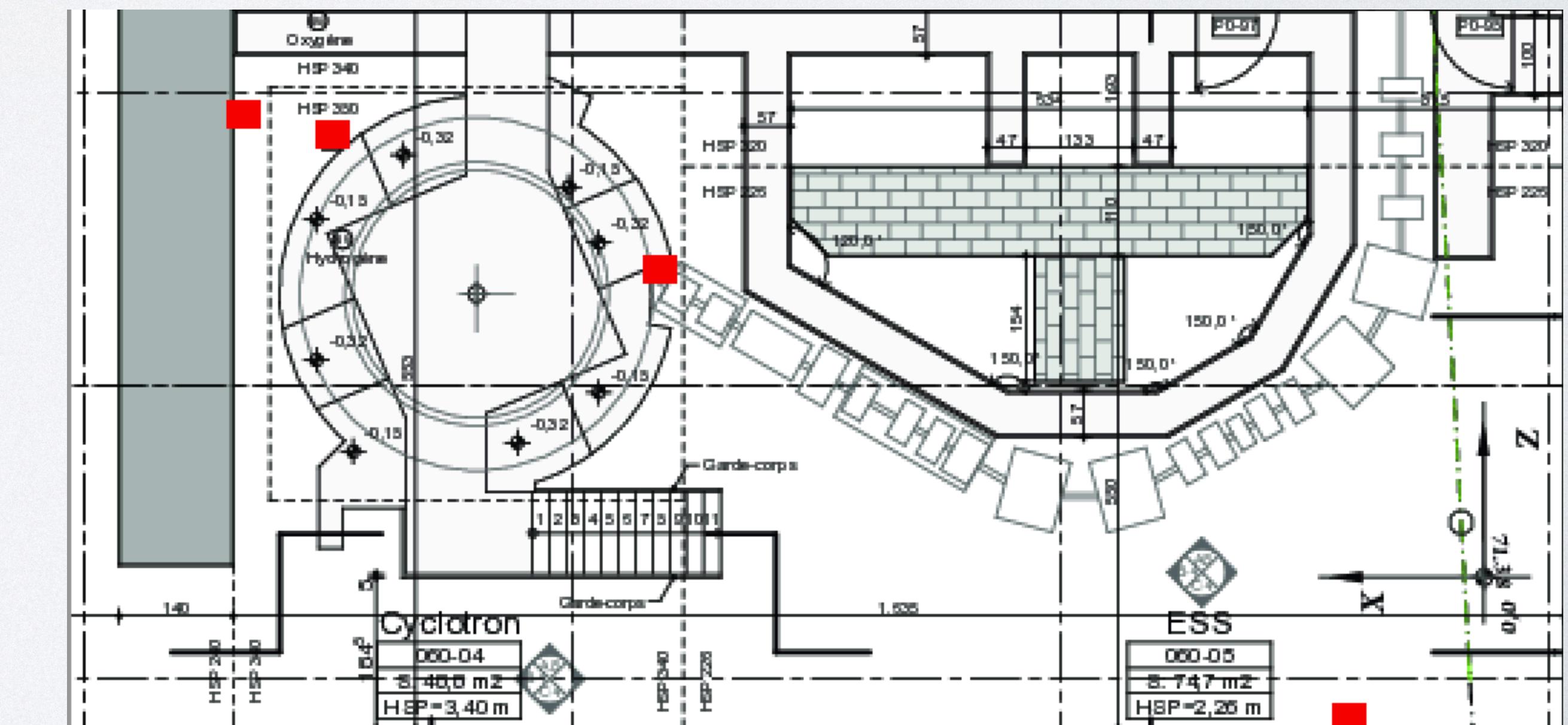


- Un protocole de mesures plus élaboré sera mis en place (à base de dosimétrie passive par exemple) afin d'obtenir des éléments de comparaison plus fiables

CPO - Faisceau de proton

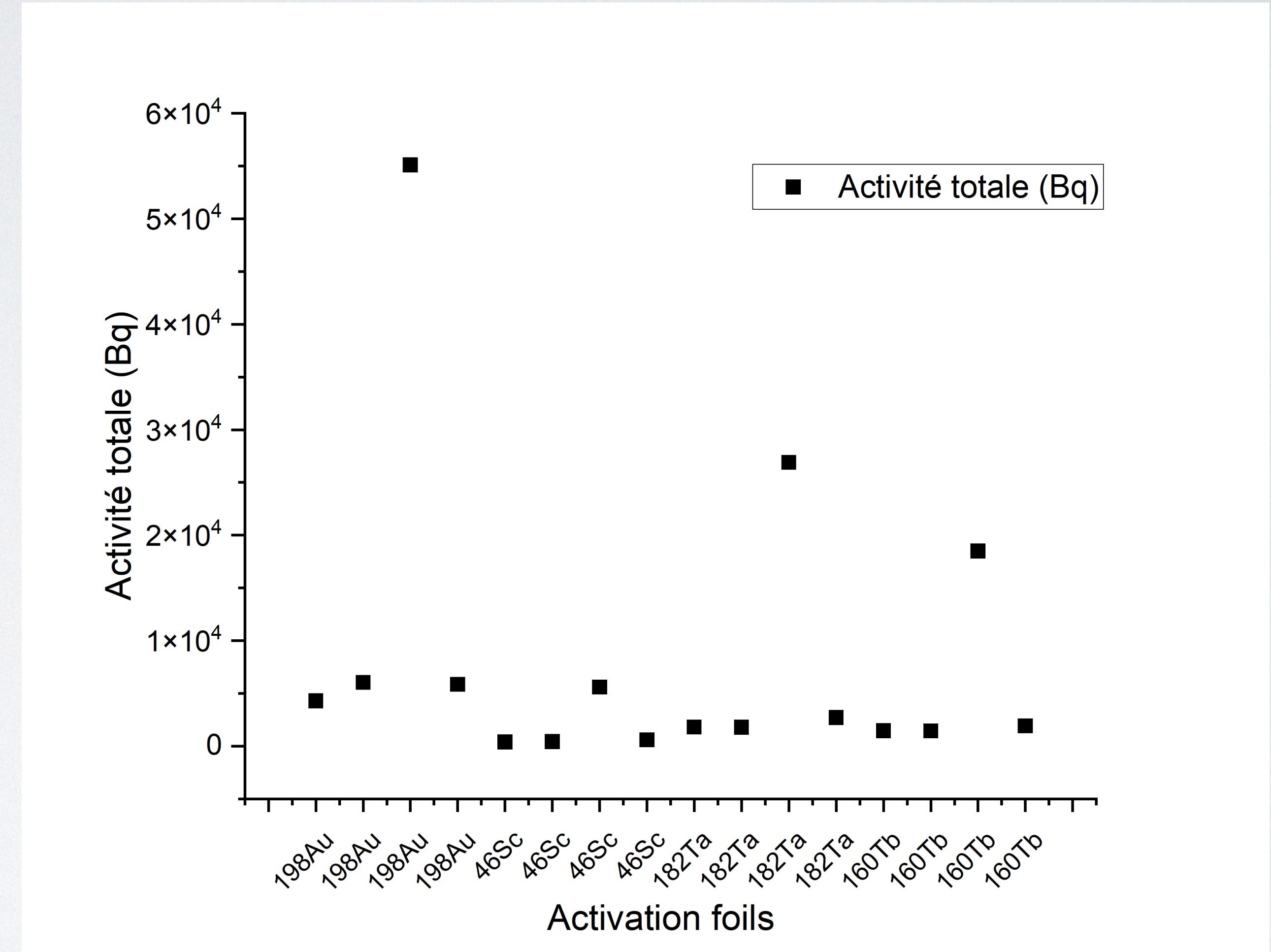
4 détecteurs d'activations déposés autour du cyclotron

- 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 γ , 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

