

# Sim $\beta$ -AD - Méthode d'évaluation de l'activation des cyclotrons

---

Jean-Michel HORODYNSKI -Frédéric CHAPELLE - **Hugues MONARD** - Silas JOHN (iRSD)

Sébastien BOUILLON - David CHAULIN (CEMHTI)

Thierry FOEHRENBACHER - Denis OSTER (IPHC-CYRCé)

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

Nicolas ARBOR - Stéphane HIGUERET - Daniel HUSSON - The-Duc LÊ - Jonathan COLLIN (IPHC)

Cédric DOSSAT - Nicolas DRAY - Ludovic EYCHENNE (TRAD)

Frédéric STICHELBAULT (IBA)

03-06/10/2023

Journées Accélérateurs de la SFP - 2023

La prise en charge des déchets radioactifs produits lors de l'exploitation et le démantèlement des installations de cyclotrons demande d'importantes ressources :

- Gestion de l'entreposage (locaux nécessaires, mises en sécurité. . . )
- **Caractérisation radiologique (contrôles destructifs/non destructifs)**
- Rédaction des documents/dossiers
- Coût de la prise en charge

- L'activation des matériaux est due aux particules secondaires produites lors du fonctionnement des cyclotrons, principalement les neutrons : captures neutroniques  $(n, \gamma)$ , réactions nucléaires  $(n, xp)$ ,  $(n, x\alpha)$ ...
- La caractérisation des fluences neutroniques lors du fonctionnement des accélérateurs de particules est essentiel à la détermination des niveaux d'activation dans les matériaux.

- L'utilisation de codes de calculs Monte-Carlo de transports et d'interaction des particules permet de réaliser cette estimation des fluences neutroniques. Toutefois, il est nécessaire de valider les résultats sur la base de données expérimentales.
- L'utilisation de systèmes de détections neutrons *in-situ* lors du fonctionnement des cyclotrons permettra de consolider les résultats issus de simulations numériques.
- Il sera alors possible de définir des facteurs de corrélation  $R_{\frac{\beta}{\gamma}}$  afin de pouvoir, par simple mesures directes (spectrométrie  $\gamma$ ), de réaliser une caractérisation radiologique complète des déchets radioactifs produits.

# Sim $\beta$ -AD : Méthodologie industrielle de caractérisation des déchets activés lors de l'exploitation des cyclotrons



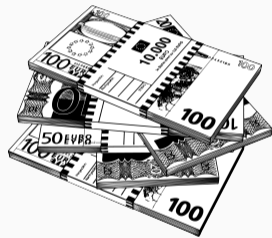
Fiabilité  
(Simulations +  
Détections)



Impact minimal sur  
l'exploitation



Optimisation de la  
production de déchets  
radioactifs



Facilité de mise en  
œuvre

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.

Le projet est lauréat du PIA4 - Déchets nucléaires - FRANCE2030



Financé par

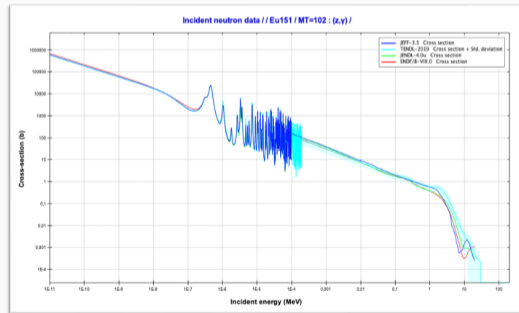


**GOUVERNEMENT**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

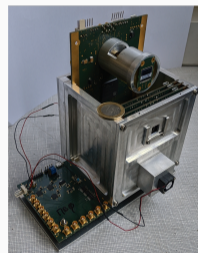
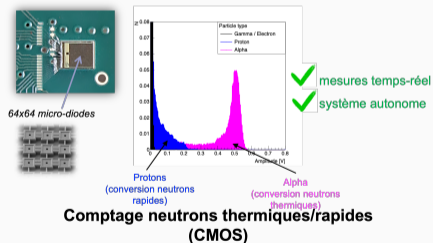


- Mise en œuvre de la méthode Sim $\beta$ -AD dans plusieurs installations de cyclotrons
  - Différents types de finalités, de faisceau primaire et de temps d'utilisation
  - Simulations numériques + Caractérisations des champs neutroniques par mesures actives et passives
  - Caractérisations radiologiques (spectrométrie  $\gamma+\beta$ ) de déchets existants
- Analyse comparative de codes de calculs et de bibliothèques de sections efficaces
- Détermination de facteurs de corrélation

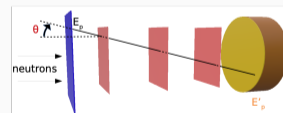


$$R_{\frac{\beta}{\gamma}}$$

- L'IPHC développe des **systèmes innovants de mesure neutrons** basés sur la technologie CMOS
- Premiers prototypes testés auprès de différentes installations (LINAC, cyclotrons...)



- ✓✓ mesures temps-réel
- ✓✓ compacité (10x7x10 cm<sup>3</sup>)



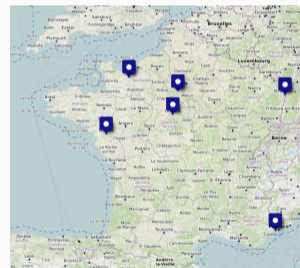
**Spectrométrie neutron (télescope à protons de recul)**

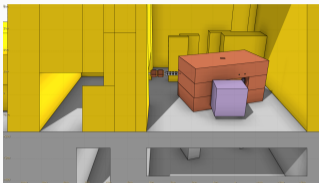


- L'IPHC développe des **systèmes innovants de mesure neutrons** basés sur la technologie CMOS
- Premiers prototypes testés auprès de différentes installations (LINAC, cyclotrons. . . )
- **Spectromètre neutron compact temps-réel**  
⇒ Caractérisation rapide des champs de neutrons rapides en différentes positions avec information spectrométrique
- **Compteurs miniaturisés neutrons thermiques/rapides**  
⇒ Réseau de capteurs pour un maillage 3D régulier des distributions de neutrons thermiques et rapides

Plusieurs installations exploitant des cyclotrons fourniront du temps faisceau pour le projet Sim $\beta$ -AD

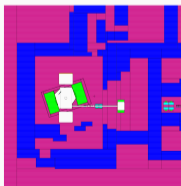
Installations	Faisceau	$E_{max}$ (MeV)	$I_{max}$ ( $\mu$ A)	Cibles
CYRCé	p	25	300	L/S
CYCERON	p/d	18/9	80-50	L/G/S
CEMHTI	p/d/ $\alpha$	38/25/50	40/40/15	Irradiation
ARRONAX	p/d/ $\alpha$	70/30/68	750/80/35	L/S
CPO	p	235	$600 \cdot 10^{-3}$	Protonthérapie
CAL	p	65/235		Protonthérapie



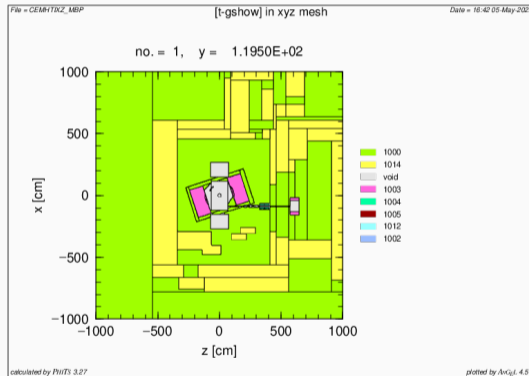


Modélisation par FLUKA - Visualisation par FLAIR

```
05/05/24 10:23:14  
CEMHTI Number  
  
JOBNAME = 05/05/24 10:23:14  
TITLE = 02  
I 1 0.000000, 0.000000, 1.000000  
J 1 0.000000, 0.000000, 0.000000  
MATERIAL  
1 100 100 1.000E+00 1.000E+00  
*****
```

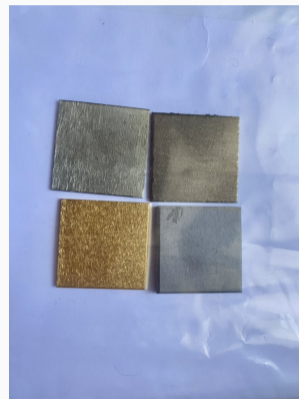


Modélisation par MCNP6

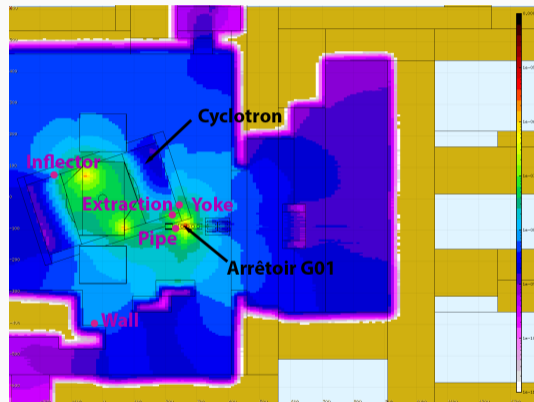


Modélisation par PHITS

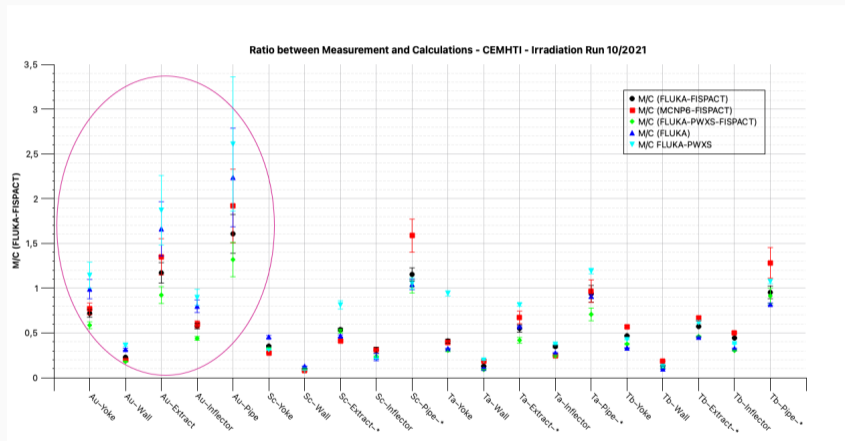
- Des expériences d'irradiation de détecteurs d'activation ont été réalisées pour les deux installations (CEMHTI-CYRCé)
- Quatre matériaux mis en œuvre : Au, Sc, Ta, Tb
- Faisceaux de protons et de deutérons pour CEMHTI, faisceaux de protons et production de  $^{18}\text{F}$  pour CYRCé
- Spectrométries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



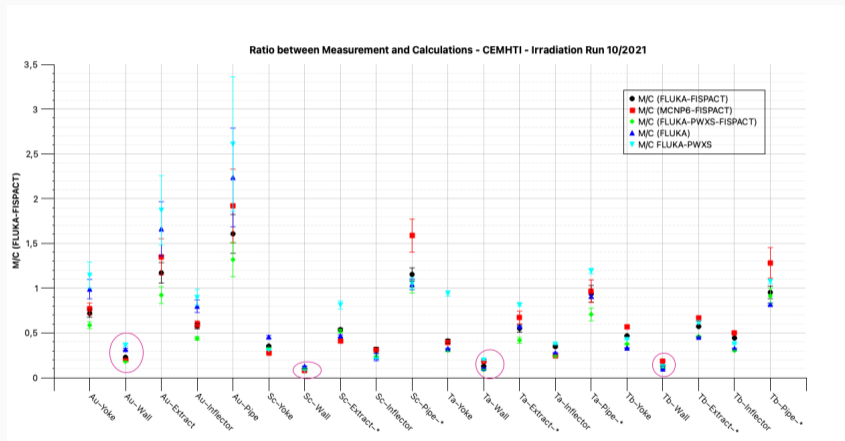
- 5 matrices de 4 détecteurs d'activations disposées autour du cyclotron (différentes fluences de neutrons)
- Première irradiation : 3 matrices de 3 matériaux seulement
- Deuxième irradiation : 5 matrices, 4 matériaux. Les détecteurs de la première irradiation ont été réutilisés pour tester leur recyclage (réduction de la consommation de matière première).
- Faisceau extrait du cyclotron entièrement perdu sur un arrêtôir (G01).
- Trois points de pertes considérés : G01, inflecteur et extraction (0,5:0,25:0,25)



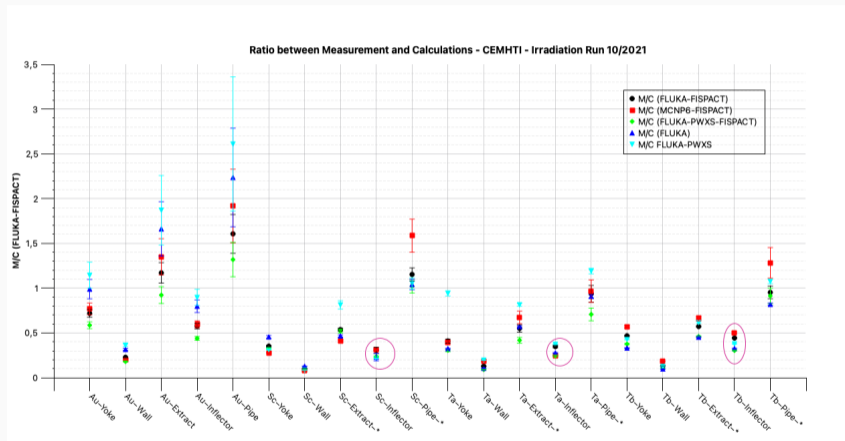
Fluence neutrons lors de tirs protons 16 MeV sur arrêtôir G01 ( $n.cm^{-2}.pp^{-1}$ )



Quelques 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.



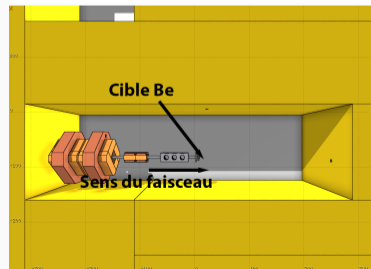
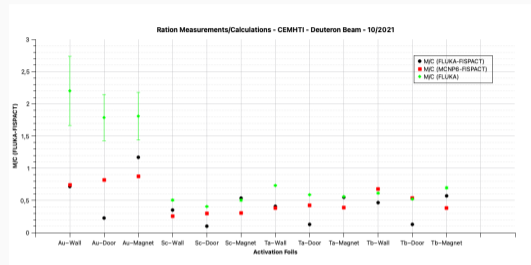
Ratio inférieur à 0,5 pour les échantillons Murs : modèle à améliorer par la prise en compte de protections radiologiques autour de G01 (intégration en cours).



Surestimation de l'activation au niveau de l'inflcteur : le pourcentage de perte au niveau de cet élément est inconnu : nécessité de le corriger.



- 4 matrices de 4 détecteurs d'activations disposées autour de ligne d'expérience deuteron.
- Première irradiation : 2 matrices de 2 matériaux seulement
- Deuxième irradiation : 3 matrices, 4 matériaux. Les détecteurs de la première irradiation ont été réutilisés pour tester leur recyclage (réduction de la consommation de matière première).
- Faisceau de deutérons sur cible de beryllium.

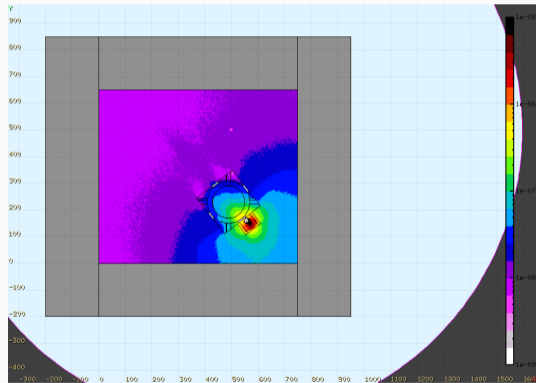




Détecteurs passif sur murs de la casemate

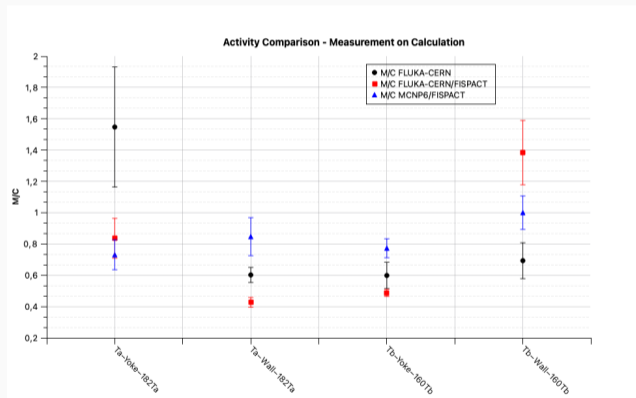


Détecteurs passifs sur la culasse de CYRCé

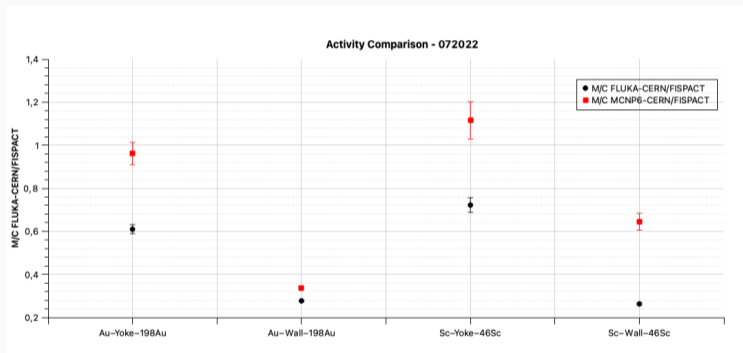


Fluence neutrons lors du fonctionnement de CYRCé, tir  $^{18}\text{F}$  ( $\text{n.cm}^{-2}.\text{pp}^{-1}$ )

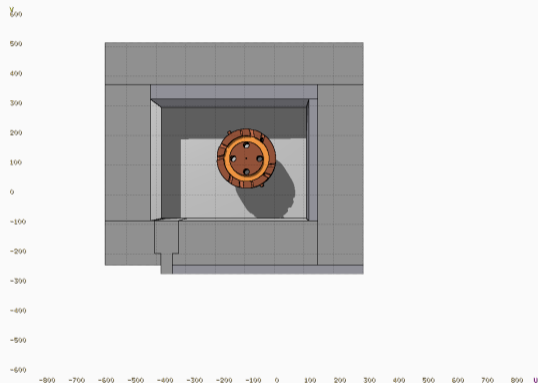
- Deuxième version du modèle avec participation de J. COLLIN, thésard IPHC/TRANSMUTEX
- Première irradiation (04/2021) : 2 matrices de deux matériaux (Ta, Tb).
- Tirs sur  $^{18}\text{O}$  seuls



- Deuxième irradiation (07/2022) : 2 matrices de deux matériaux (Au, Sc).
- Tirs sur  $^{18}\text{O}$  +  $^{16}\text{O}$



- Nouvelle campagne d'irradiation à CYRCé en cours (Tirs liquide + Solide, 5 groupes de détecteurs d'activation)
- Premières irradiations à CYCERON (tirs  $^{18}\text{F}$  et  $^{11}\text{C}$ )
- Préparation de la nouvelle version de détecteurs actifs de neutrons
- Travaux d'intercomparaison des codes pour identifier et quantifier les incertitudes systématiques.



Vue de dessus du cyclotron CYCERON