

Sim β -AD - Couplage codes de calculs et mesures actives pour une meilleure détermination de l'activation des cyclotrons

Jean-Michel HORODYNSKI -Frédéric CHAPELLE - Hugues MONARD (iRSD) - Nicolas ARBOR - Stéphane Higuereet - Daniel HUSSON - The-Duc Lê (IPHC) - Cédric DOSSAT - Nicolas DRAY (TRAD) - Frédéric STICHELBAULT (IBA)

09/03/2023

Journées francophones des codes de calculs en radioprotection, radiophysique et dosimétrie ...et l'apport de l'intelligence artificielle
- 2023 - Fontenay-aux-Roses

Les cyclotrons - outils indispensables pour la médecine et la recherche

- Utilisées pour de multiples applications :
 - Production de radionucléides à des fins médicales et de recherche
 - Études des matériaux sous irradiations
 - Thérapie des cancers : protonthérapie, hadronthérapie, FLASH...
- Leur exploitation entraîne l'activation des matériaux et structures environnantes (par réactions nucléaires avec les neutrons principalement)



Figure 1: CYCERON (Caen) - CYCLONE 18/9 - IBA

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

Sim β -AD : Méthodologie industrielle de caractérisation des déchets activés par l'exploitation des cyclotrons



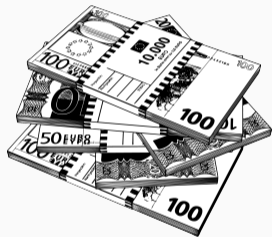
Fiabilité
(Simulations +
Détections)



Impact minimal sur
l'exploitation



Optimisation de la
production de déchets
radioactifs



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

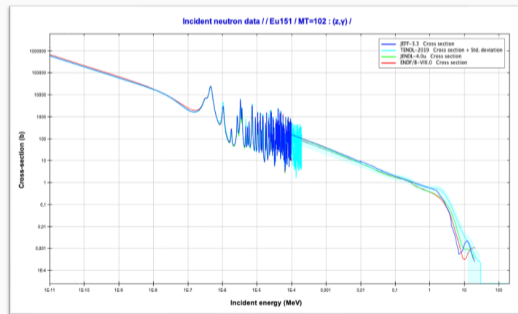


- Développe le logiciel RayXpert
- Collaborations pour la modélisation numérique des cyclotrons du projet
- Collaborations dans le cadre de l'intercomparaison (module activation - module protons)
- Développement d'un module dédié à la méthode Sim β -AD, avec couplage simulations numériques/détecteurs actifs, pour la détermination des facteurs de corrélations $R_{\frac{\beta}{\gamma}}$ pour les cyclotrons

- Constructeurs de cyclotrons
- Collaborations pour la modélisation numérique des cyclotrons de leur marque
- Étude pour l'intégration des capteurs actifs de neutrons au niveau de leur machine pour réaliser des opérations de surveillance des performances (variation des champs neutroniques hors de la machine)

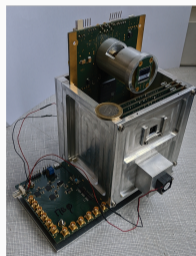
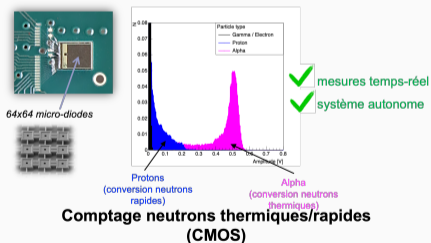
- La caractérisation des champs neutroniques produits lors du fonctionnement des accélérateurs de particules est essentiel à la détermination des niveaux d'activation dans les matériaux.
- Plus particulièrement, les cyclotrons accélérant des faisceaux d'ions produisent majoritairement des neutrons qui sont responsables de l'activation : captures neutroniques (n, γ) , réactions nucléaires (n, xp) , $(n, x\alpha)$. . .
- L'utilisation de systèmes de détections neutrons *in-situ* lors du fonctionnement des cyclotrons permettra de consolider les résultats issus de simulations numériques. La détermination des facteurs de corrélation $R_{\frac{\beta}{\gamma}}$ est alors plus précise.

- Mise en œuvre de la méthode Sim β -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

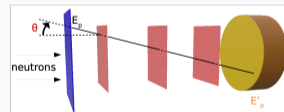


$$R_{\frac{\beta}{\gamma}}$$

- 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 cm³)



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 β -AD

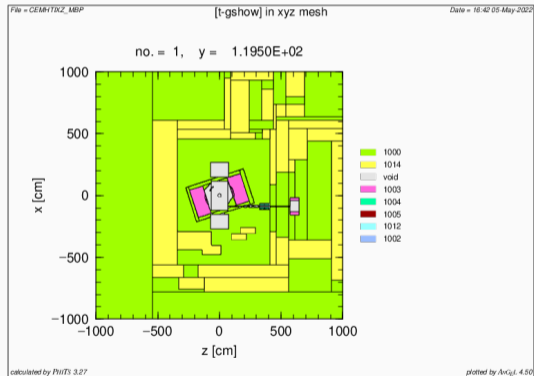
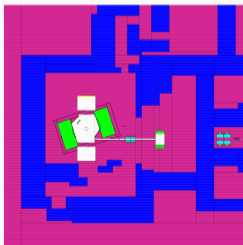
Installations	Faisceau	E_{max} (MeV)	I_{max} (μA)	Cibles
CYRCé	p	25	300	L/S
CYCERON	p/d	18/9	80-50	L/G/S
CEMHTI	p/d/ α	38/25/50	40/40/15	Irradiation
ARRONAX	p/d/ α	70/30/68	750/80/35	L/S
CPO	p	235	$600 \cdot 10^{-3}$	Protonthérapie
CAL	p	65/235		Protonthérapie



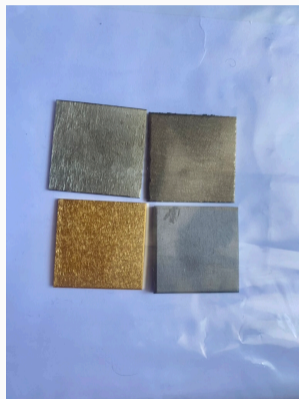


05/05/22 14:13:19
CEMHTI: buzzer

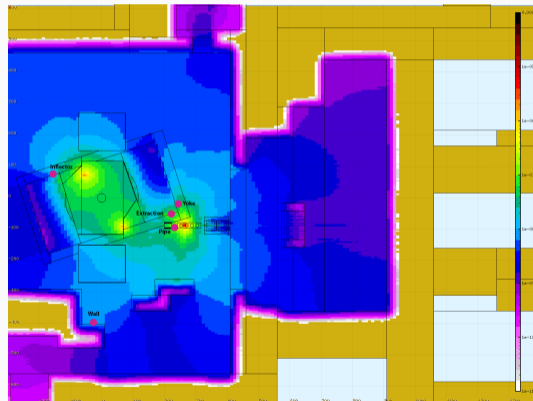
```
probid = 05/25/22 14:12:25  
baseid = 32  
( 1.000000, 0.000000, 1.000000)  
( 1.000000, 0.000000, 0.000000)  
ori: dir:  
( 19.44, 120.00, 313.89)  
extens = 1 1000.00, 1000.00)
```



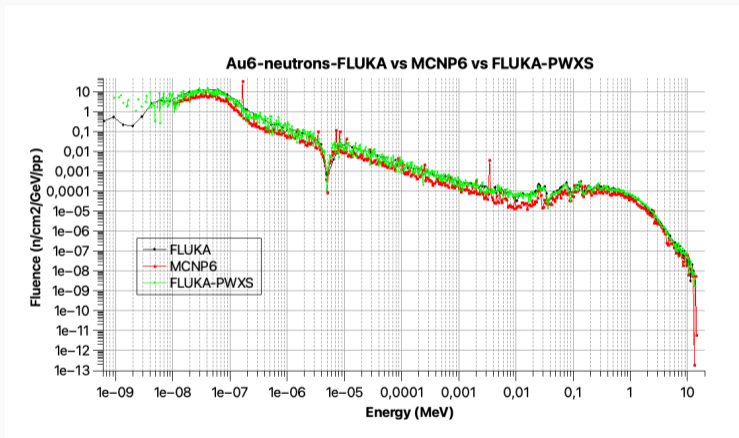
- Des expériences d'irradiation de détecteurs d'activation ont été réalisées pour les deux installations (CEMHTI-CYRCé)
- Quatre matériaux mis en œuvre : Au, Sc, Ta, Tb
- Faisceaux de protons et de deutérons pour CEMHTI, faisceaux de protons et production de ^{18}F pour CYRCé
- Spectrométries γ réalisées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

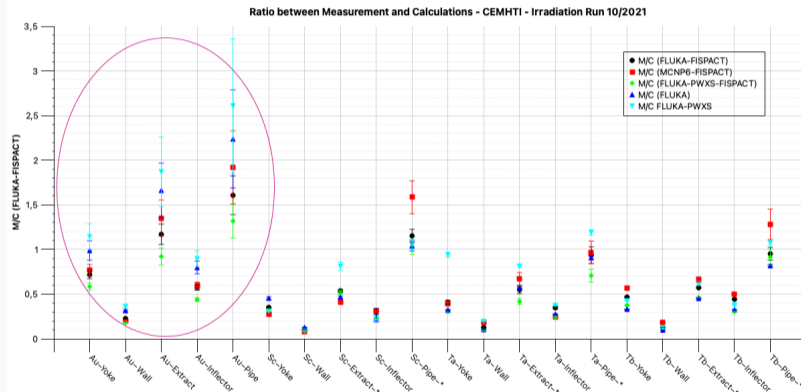


- 5 matrices de 4 détecteurs d'activations disposées autour du cyclotron (différentes fluences de neutrons)
- Première irradiation : 3 matrices de 3 matériaux seulement
- Deuxième irradiation : 5 matrices, 4 matériaux. Les détecteurs de la première irradiation ont été réutilisés pour tester leur recyclage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



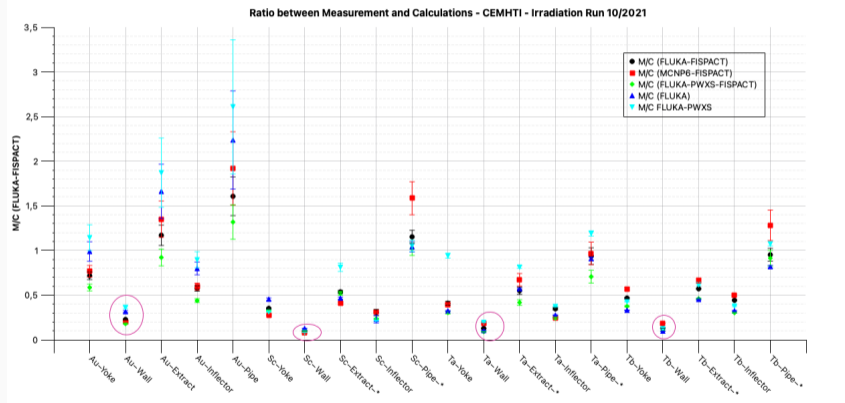
- Codes MC utilisés :
FLUKA,
FLUKA-PWXS
(JEFF-3.3) MCNP6
(TENDL19) (PHITS en
cours)
- FLUKA : calcul direct
de l'activation +
utilisation de PWXS
- Fluences utilisés dans
FISPACT-II pour le
calcul d'activation
(TENDL21)



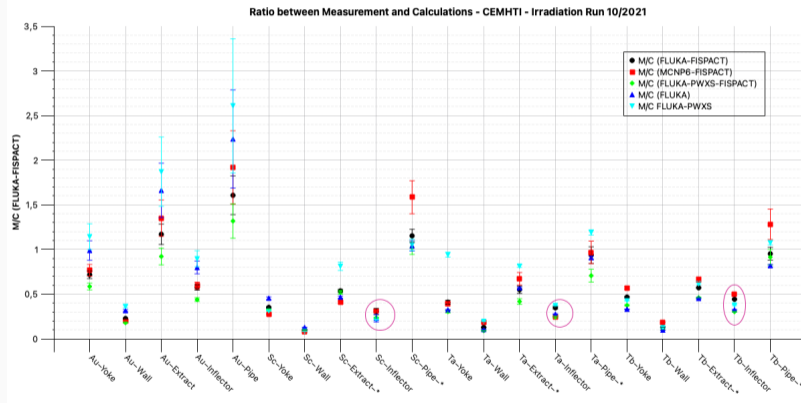


Quelques disparités importantes dans l'estimation de l'activité de ^{198}Au par les différents codes. Lors de l'utilisation de FISPACT-II, ses disparités se réduisent.

Comparaison mesures-calculs



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'inflacteur : le pourcentage de perte au niveau de cet élément est inconnu : nécessité de le corriger.

- L'utilisation des capteurs passifs et actifs permettra de détecter les faiblesses au niveau de la modélisation et ainsi d'identifier les éléments-clefs.
- Pour une modélisation à fortes incertitudes (ici, la distribution des pertes), les informations qui seront obtenus permettront également de corriger les modèles.
- Les incertitudes systématiques doivent également être identifiées \Rightarrow phase importante d'intercomparaison.