Mise en situation d’un accident de criticité : exercice d’irradiation de dosimètres et retour d’expérience opérationnel

Orano Recyclage La Hague



Congrès de radioprotection ATSR 2026
M. Delarue*, L. Tondut, I. Robbes, L. Laîné, J-C. Vandamme, J. Marin, D. Trinh
16 septembre 2026

orano

*Contact : manon.delarue@orano.group

SOMMAIRE

01
Introduction

02
Hypothèses et configuration d'irradiation

03
Géométrie simulée via PHITS

04
Étude compteur bêta

05
Résultats et comparaison mesure labo/simulation

06
Conclusion

orano

01 Introduction

01 Introduction

Contexte

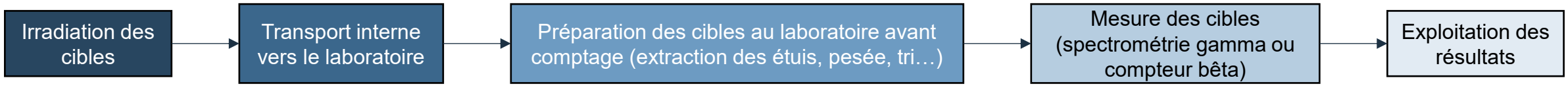
- Réaliser une mise en situation d'un accident de criticité en interne Orano
- En cas d'accident de criticité, le laboratoire doit mesurer des échantillons pour la dosimétrie. Ces échantillons proviennent des **dosimètres individuels,** des **ceintures de criticité** et des **dosimètres de zone.**

Objectifs de l'exercice

- **Capitaliser sur l'expérience** : REx organisationnel, technique et logistique.
- **Analyser la performance** : Identifier les points forts et les points bloquants rencontrés.
- **Optimiser la pratique** : Exploiter la simulation pour faciliter la mise en œuvre.
- **Renouveler la démarche** : Exercice non réalisé depuis 12 ans (installations du CEA Valduc fermées depuis 2013), besoin de maintenir l'expertise et les savoir-faire.

Déroulement

- **Etape préalable** : Simulations Monte Carlo (PHITS) pour optimiser la configuration d'irradiation et exploiter certains résultats
- **Etapes pendant l'exercice** :

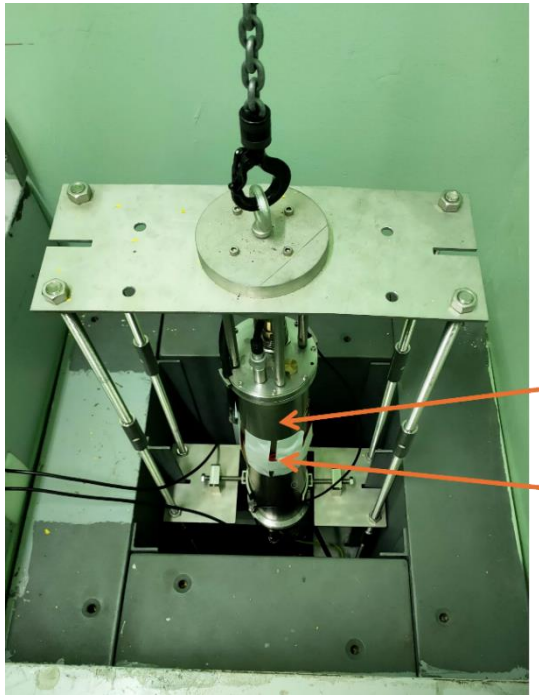


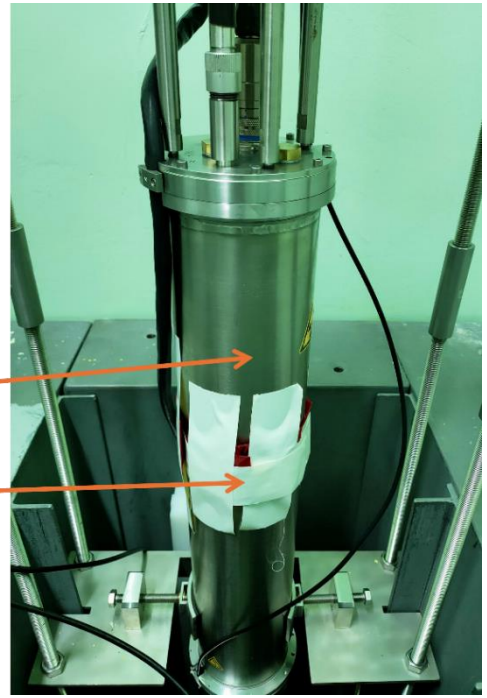
- **Moyens utilisés** : Générateur de neutrons, cibles à analyser
- **Temporalité** : Exercice effectué fin mars 2025 (6 mois de préparation)

OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

02 Hypothèses et configuration d’irradiation

01 Configuration d'irradiation



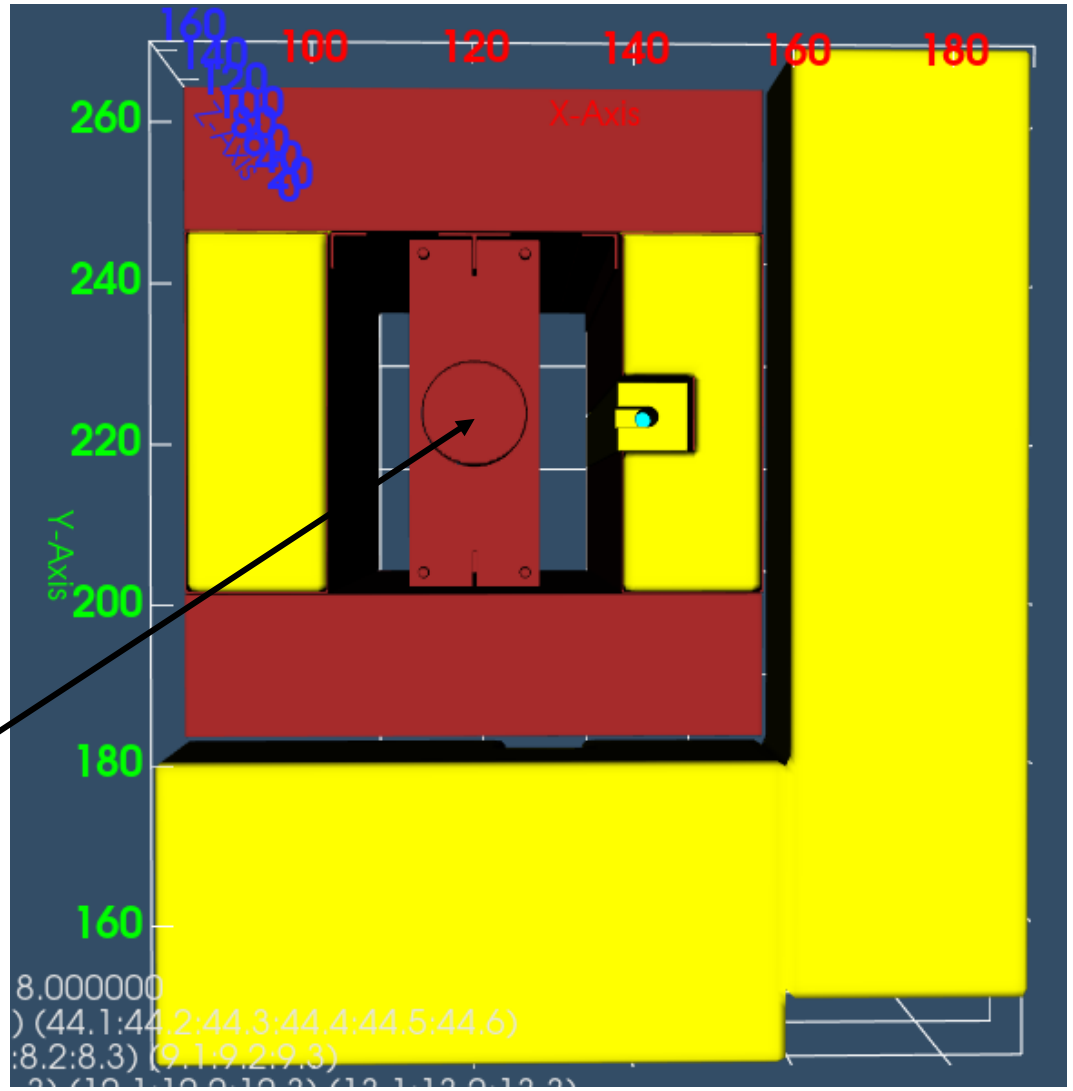




02 Hypothèses retenues pour la simulation

- Utilisation du code PHITS et de l'outil D-CHAIN pour simuler l'activation
- Générateur de neutrons GENIE36 : émission de neutrons de 14 MeV via réaction de fusion DT
- 3 phases d'irradiation et 3 phases de refroidissement (cf. slide suivant)
- Objets à irradier placés directement sur l'enveloppe du générateur de neutrons
- Ajout de polyéthylène derrière le SNAC + les dosimètres pour augmenter le diffusé

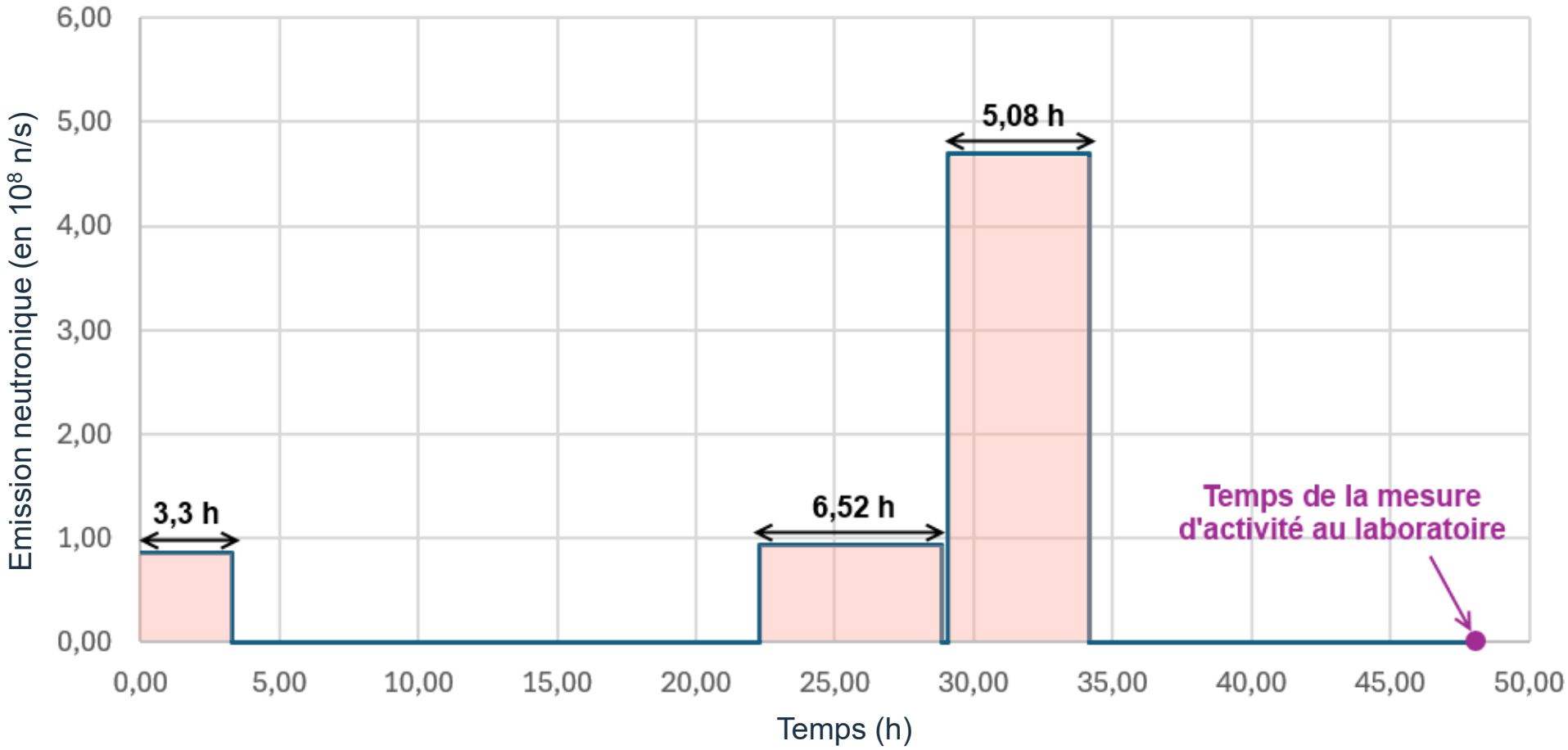
Vue de dessus du bloc générateur dans la cellule de maintenance



Emplacement du générateur de neutrons

OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

03 Phases d'irradiation des cibles



- 2 phases d'irradiation en mode continu (~1.10^8 n/s) et 1 phase en mode pulsé (~5.10^8 n/s)
- Début du comptage au laboratoire 48h après le début de l'irradiation

03 Géométrie simulée via PHITS

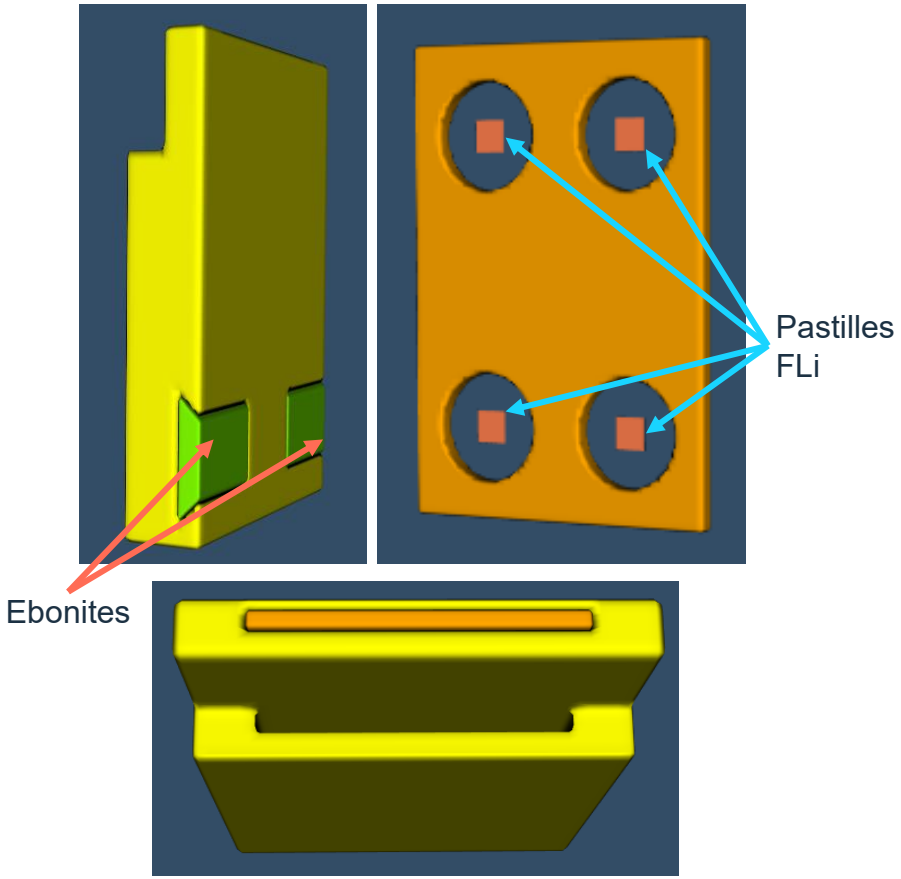
01 Objets à irradier

Ebonites ceinture de criticité (x6)



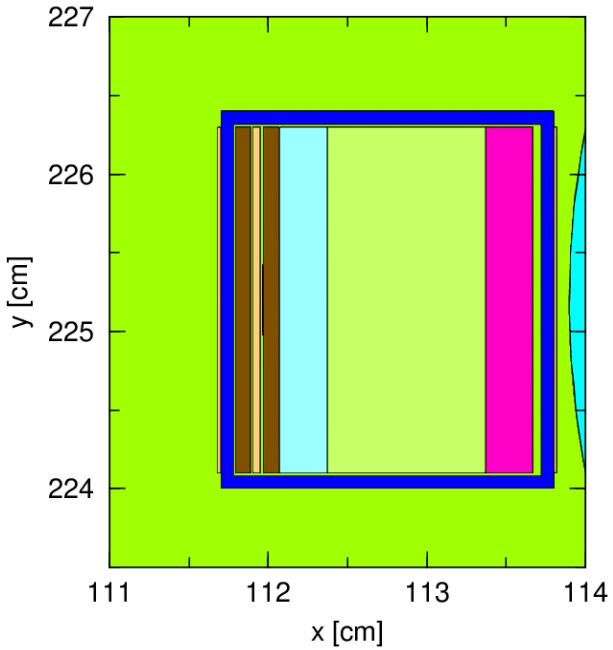
Longueur : 3 cm
Largeur : 3 cm
Epaisseur : 0,3 cm
Densité : 1,33
Volume : 2,7 cm^3
Masse : 3,59 g
Teneur en soufre : 20%

Cogebadge (dosimètre) (x2)



- 2 ébonites
- 1 pastille d'or seule
- 1 pastille d'or sous cadmium
- 4 pastilles FLi pour calcul dose Hp(10)

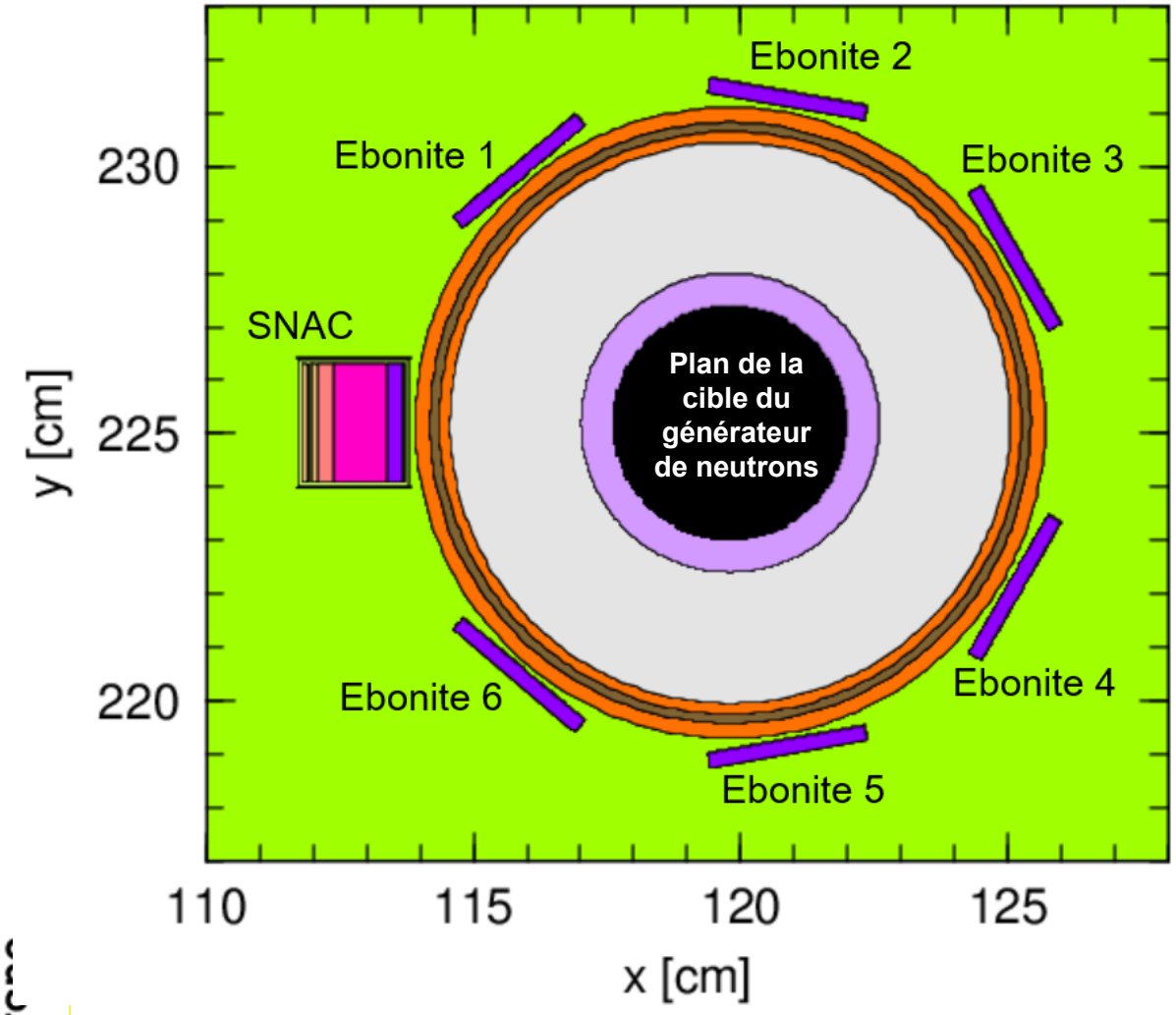
SNAC

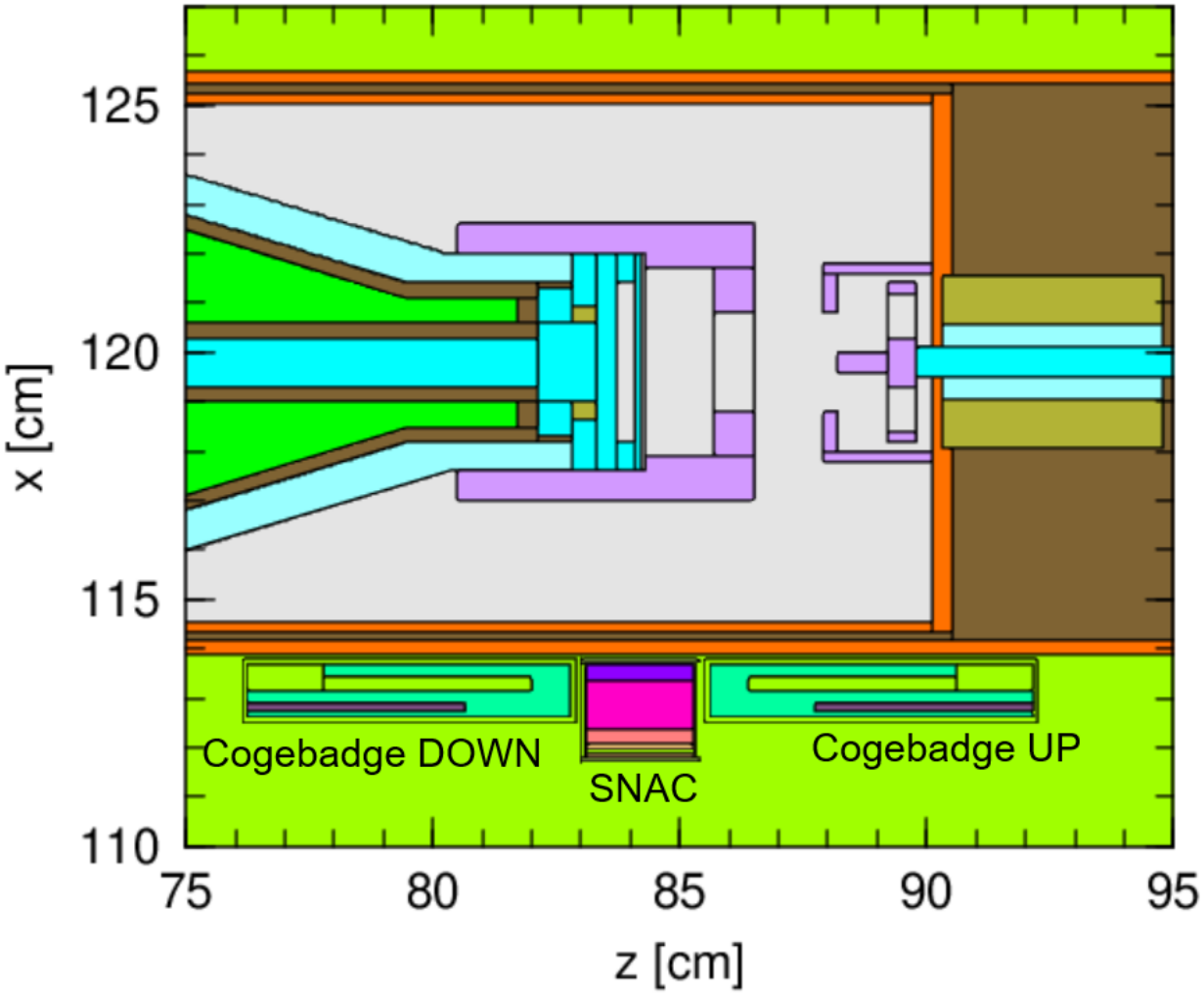


Hors enveloppe cadmium :
- 2 pastilles de Cu

Sous cadmium :
- 1 ébonite
- 1 magnésium
- 1 nickel
- 2 indium
- 1 or
- 1 cuivre

02 Modélisation de la configuration d'irradiation





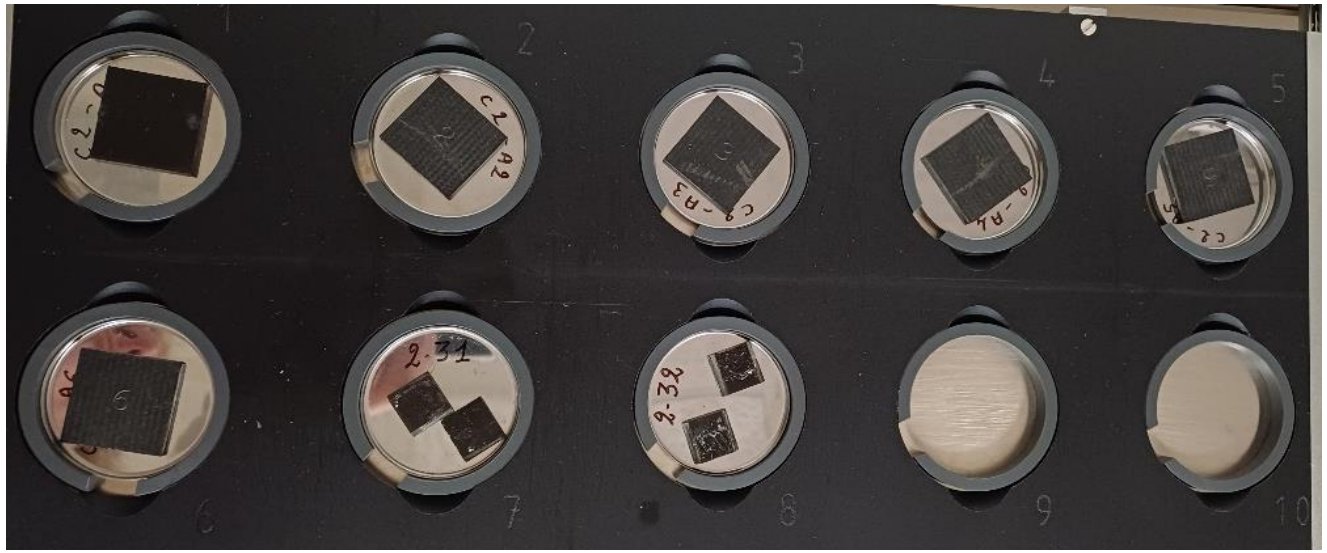
04 • Étude sur le compteur bêta

01 Compteur bêta pour la mesure des ébonites



- Compteur LB790 (BERTHOLD)
- 2 tiroirs de 10 détecteurs (compteurs proportionnels à circulation de gaz)
- Rendement déterminé en ^{90}Sr/Y via dépôt liquide sur coupelle

❑ Positionnement des ébonites irradiées dans un tiroir de mesure

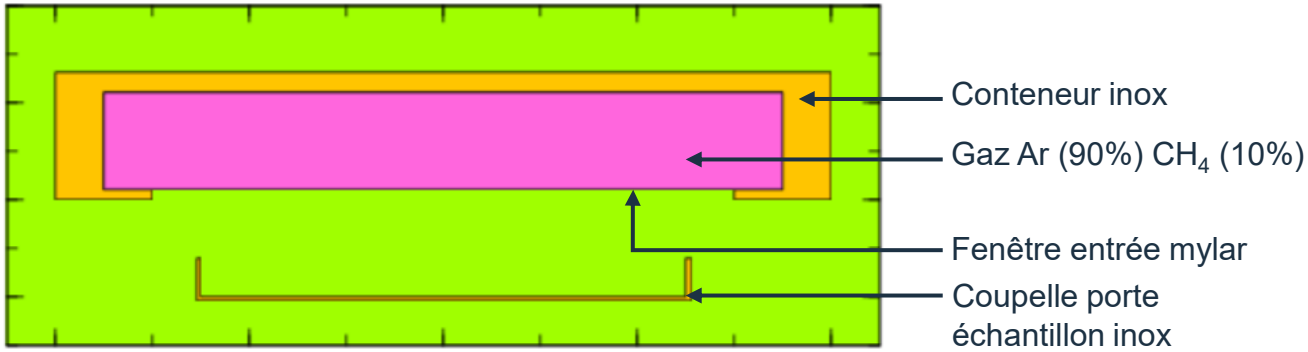


- Le rendement du compteur est connu pour une source surfacique de ^{90}Sr/Y, or ici nous avons des sources volumiques de ^{32}P

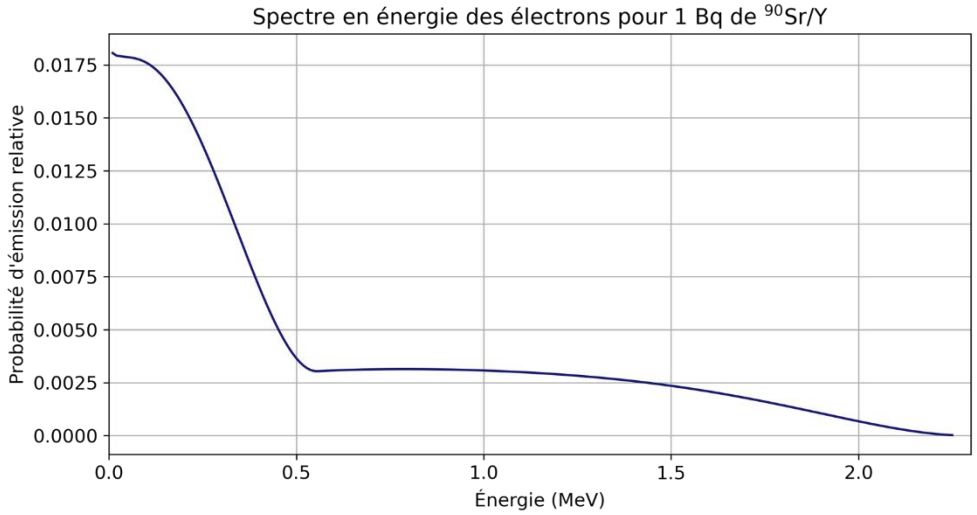
➢ **Simulations du compteur et des ébonites pour déterminer le rendement de détection pour l'estimation directe de l'activité en ^{32}P**

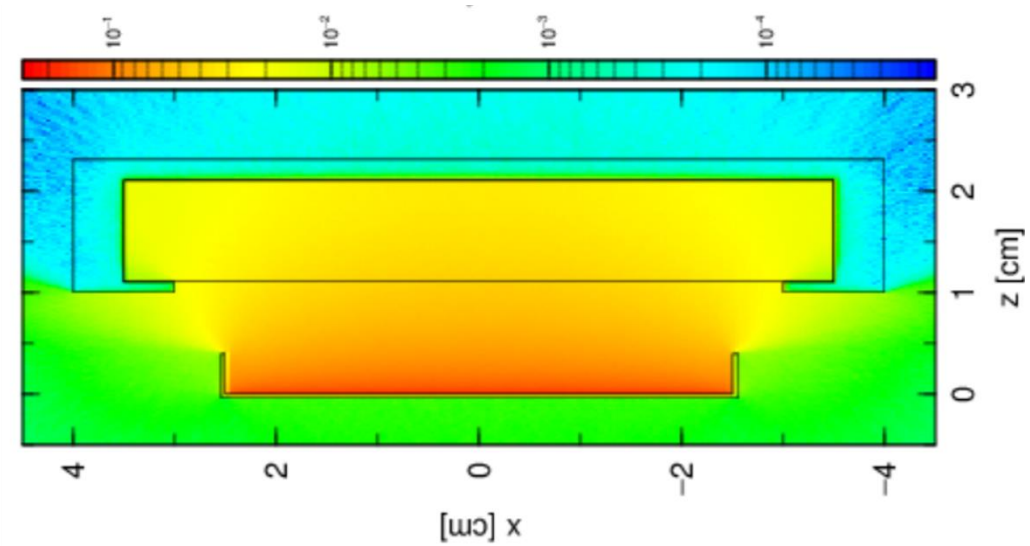
02 Modélisation du compteur bêta LB790

- **Etape 1** : Modélisation du compteur et de la coupelle



- **Etape 2** : Simulation d'une source surfacique de ^{90}Sr/Y dans la coupelle





02 Modélisation du compteur bêta LB790

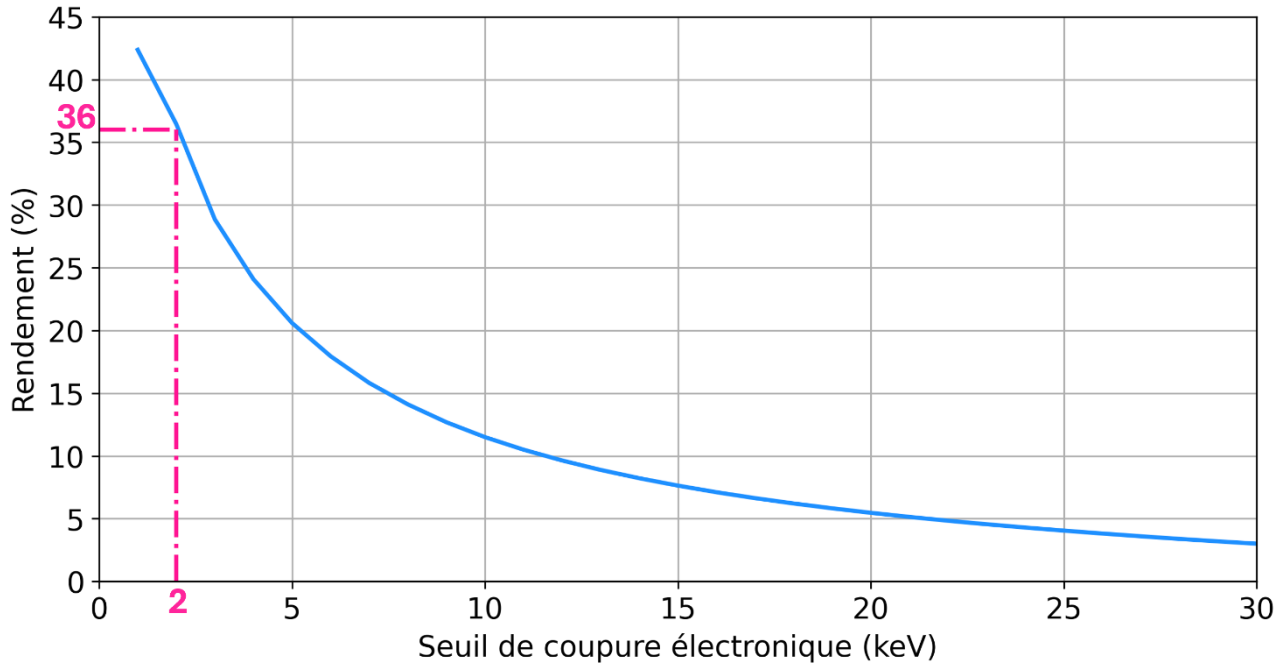
❑ **Etape 3** : Détermination du seuil de coupure électronique avec les résultats de simulation vs. le rendement mesuré

TIROIR HAUT										
RENDEMENTS Critères ± 5%										
Voie de mesure	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
RDTβ (%)	36.28%	34.74%	33.76%	34.37%	35.48%	36.64%	35.70%	34.73%	34.34%	35.70%
BRUIT DE FOND BETA 7200 s (impulsions)										
Référence	138.2	108.9	109.7	100.8	113.2	118.3	119.0	108.1	119.8	117.2

TIROIR BAS										
RENDEMENTS Critères ± 5%										
Voie de mesure	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
RDTβ (%)	36.90%	36.49%	36.18%	36.24%	36.20%	36.47%	36.79%	36.61%	36.60%	36.44%
BRUIT DE FOND BETA 7200 s (impulsions)										
Référence	135.9	106.6	115.7	112.7	123.6	145.9	160.7	115.9	105.0	121.6

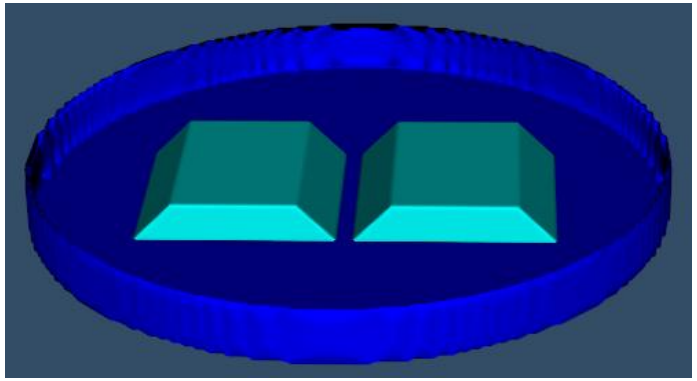
Rendement β moyen sur les 20 voies : ~36%

➡ Correspond à un seuil de coupure électronique ~2 keV

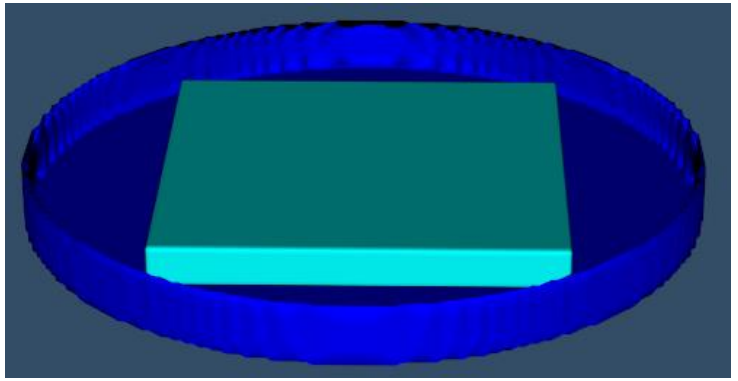


03 Modélisation des ébonites dans la coupelle

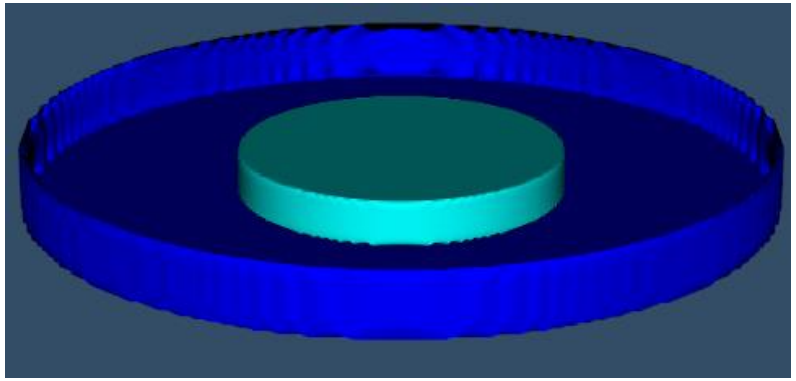
Cogebadge



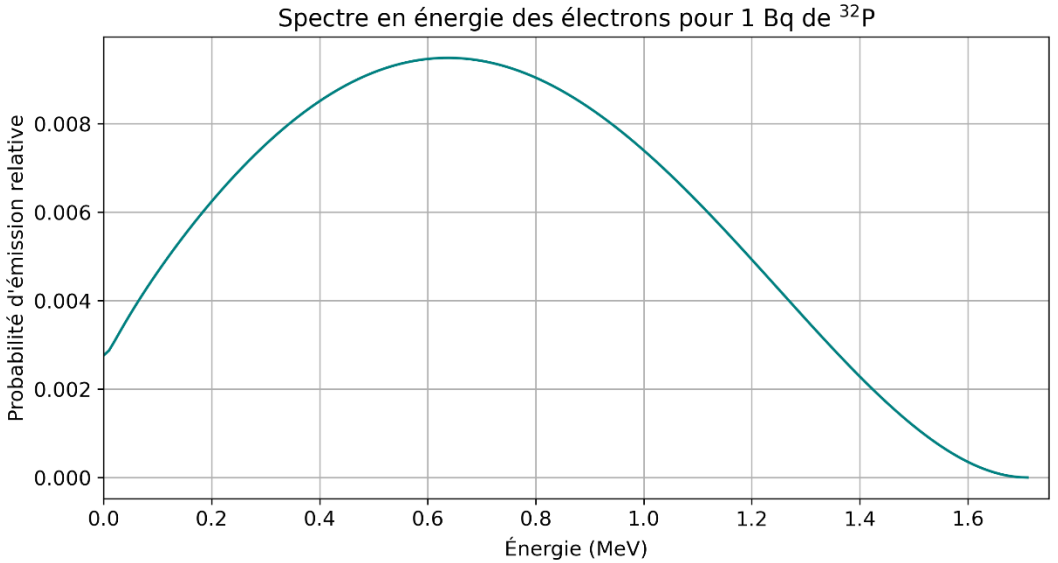
Ceinture de criticité



SNAC



+

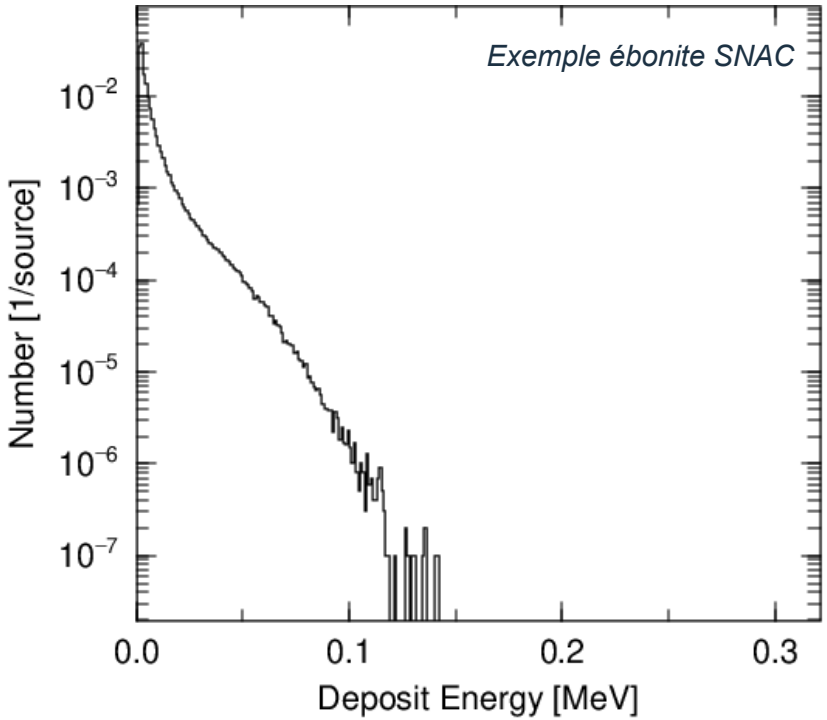


- Source volumique d'électrons avec la distribution en énergie des β du ^{32}P dans les ébonites pour chaque cas de figure

OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

04 Simulation de la détection par le compteur

- Spectre de l'énergie déposée par les électrons dans le gaz du compteur pour chaque géométrie d'ébonite équivalente à une source de ^{32}P



- Estimation du rendement de détection pour chaque géométrie d'ébonite
  - Fraction des électrons émis dans l'ébonite qui déposent de l'énergie dans le gaz du compteur
  - Fraction des dépôts d'énergie supérieurs au seuil de coupure électronique

	Ebonites Cogebadge	Ebonite ceinture	Ebonite SNAC
Fraction des électrons déposant de l'énergie dans le gaz	16,1%	14,5%	15,5%
Dépôts d'énergie supérieurs au seuil de coupure électronique (~2 keV)	78%	78%	79%
Rendement de détection	12,6%	11,3%	12,2%

05 Résultats et comparaison mesure laboratoire/simulation

01 Préparation et mesure des cibles

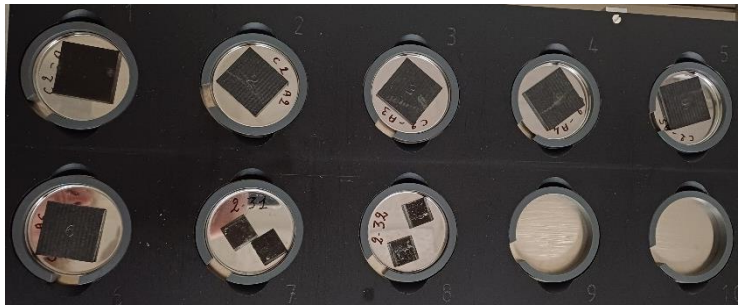
Classement des cibles du SNAC



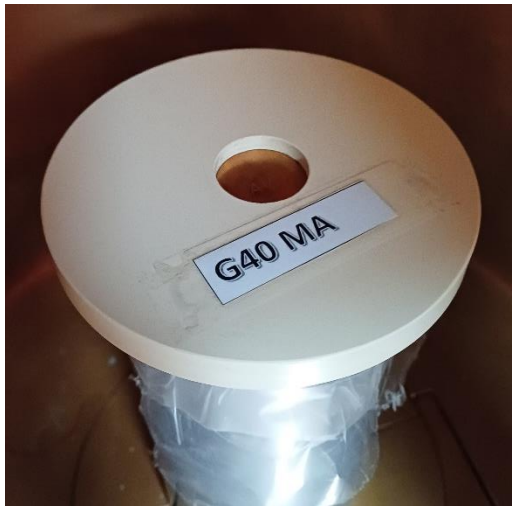
Pesée des cibles

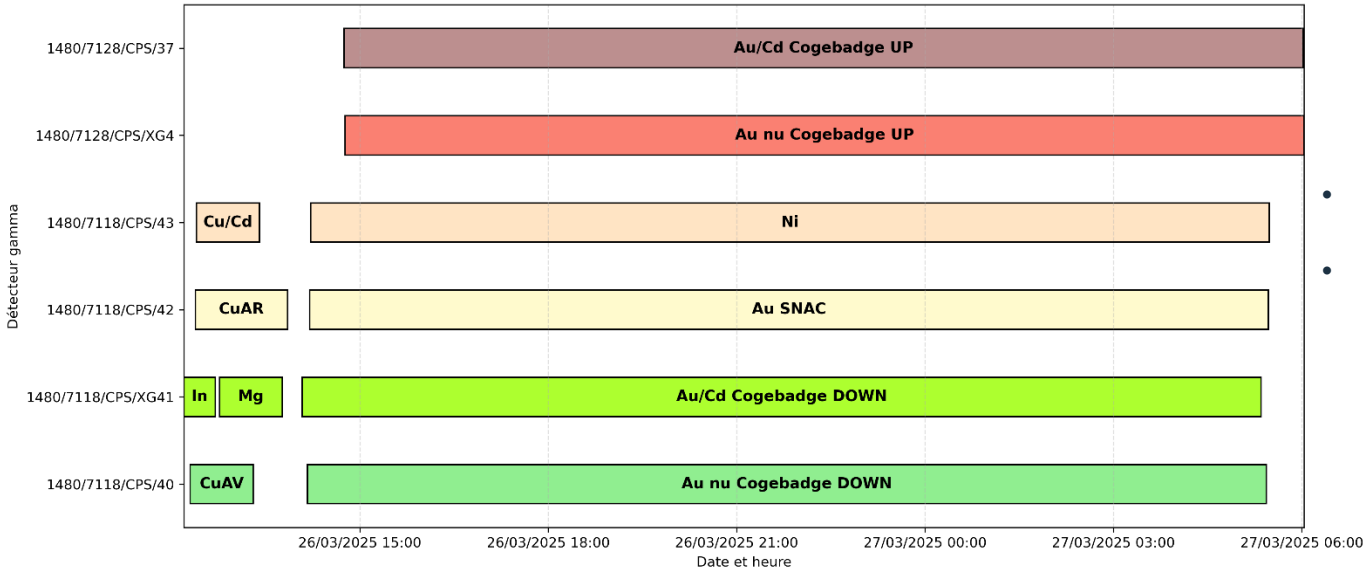


Ebonites dans le tiroir de mesure du compteur béta



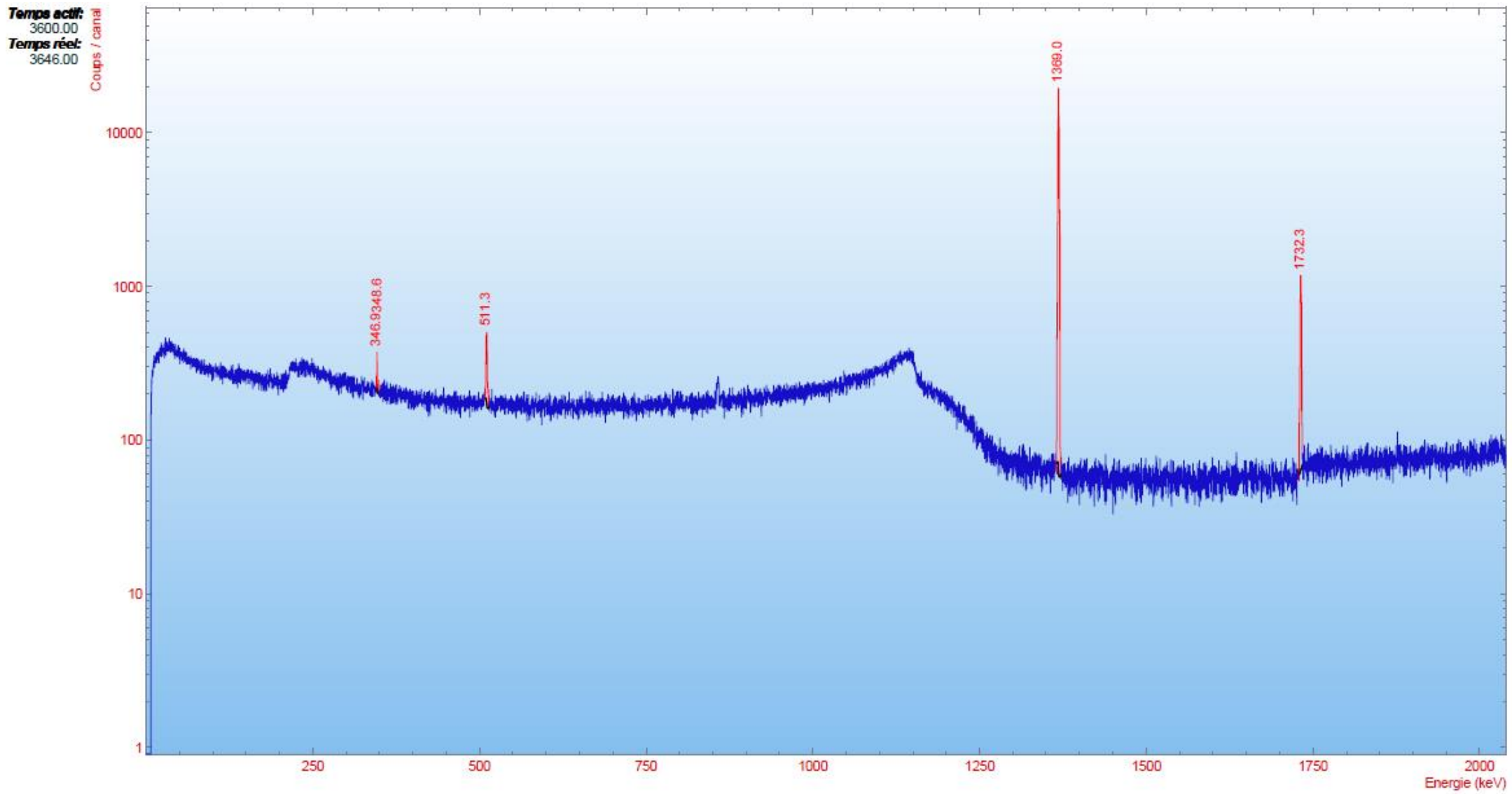
Pastille dans le centreur du germanium





- Mobilisation de 6 détecteurs germanium pendant 18h pour mesurer 11 pastilles
- Mesure simultanée des pastilles d'ébonite pendant 2h

02 Exemple de spectre gamma : pastille de Mg activée

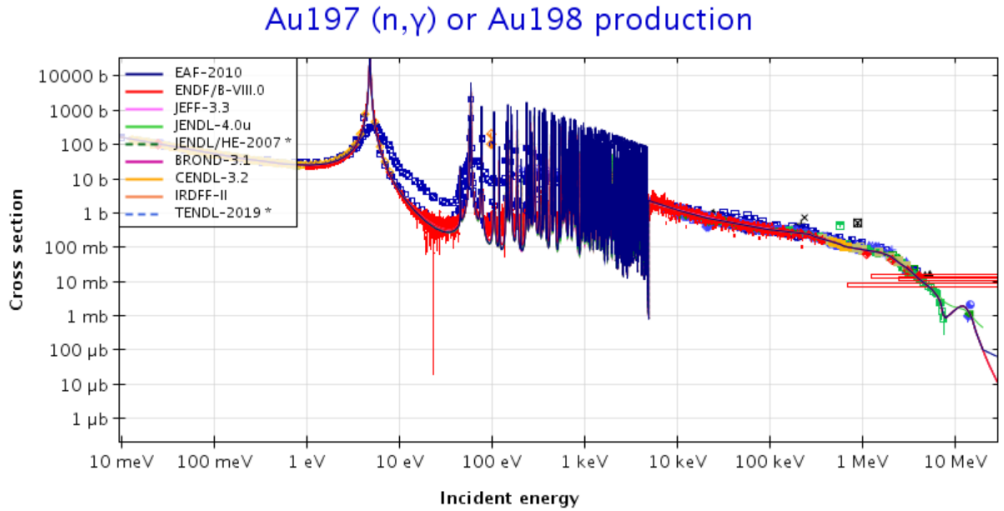


OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

03 Interprétation des résultats pour les émetteurs gamma

	Pastille	RN mesuré	Activité mesurée (Bq)	Activité simulée (Bq)	Ecart simulation vs. Labo
SNAC	Cuivre AV	^{64}Cu	183	216	+18%
	Magnésium	^{24}Na	1687	1924	+14%
	Nickel	^{58}Co	36,7	36,5	-1%
	Indium 1 + 2	^{115m}In	113	129	+14%
	Or int	^{198}Au	2,5	1,2	-54%
	Cuivre int	^{64}Cu	240	250	+4%
	Cuivre AR	^{64}Cu	116	139	+20%
Cogebadge up	Or seul	^{198}Au	9,8	8,2	-17%
	Or sous Cd		3,5	2,2	-38%
Cogebadge down	Or seul	^{198}Au	11	10,9	-1%
	Or sous Cd		3,07	2,6	-15%

- Écarts ≤ 20% pour les pastilles de cuivre, magnésium, nickel, indium
- Écarts au global pour les pastilles d'or : masse faible de l'ordre de 15 mg, peu de statistique pour la réaction de capture
- Écarts les plus importants pour les pastilles d'or sous cadmium : absorption des neutrons thermiques pour lesquels la réaction de capture pour former ^{198}Au est favorisée (cf section efficace ci-dessous) : encore moins de statistique



OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

04 Résultats sur les pastilles d'ébonites (mesure β)

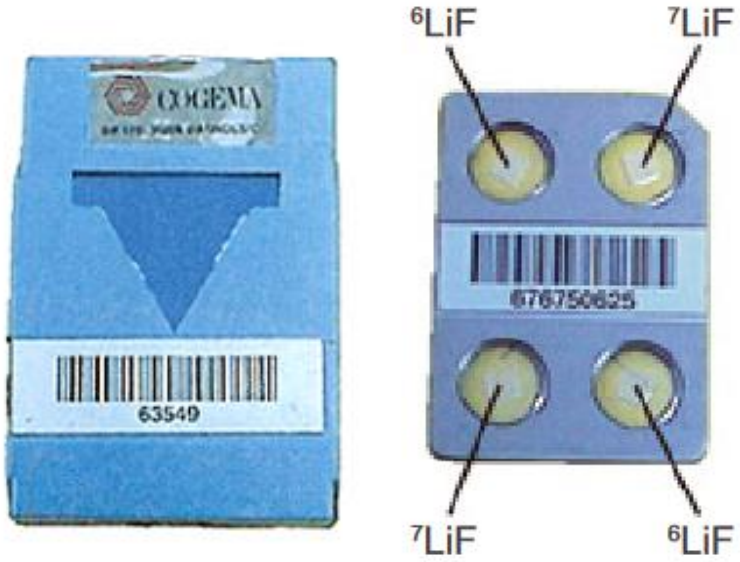
Ebonite concernée	RN mesuré	Activité mesurée (Bq)	Activité simulée (Bq)	Ecart simulation vs. labo
Cogebadge up	^{32}P	13	13,3	-2%
Cogebadge down		15,7	12,4	-21%
Ceinture 1		44	38,5	-12%
Ceinture 2		49	38,3	-22%
Ceinture 3		60	38,2	-36%
Ceinture 4		52	38,4	-26%
Ceinture 5		63	38,5	-39%
Ceinture 6		58	38,4	-34%
SNAC		22,2	15,5	-30%

- Les résultats estimés par simulation sont plus faibles que ceux mesurés au laboratoire
- **Il est possible que les ébonites contiennent plus de soufre que la composition simulée (20%) : importance de disposer de données de caractérisation des ébonites**
- Il est également possible que le rendement de détection soit sous-estimé (plusieurs étapes de simulation)
- Autres sources d'incertitude (sections efficaces, position irradiation, flux de neutrons, modélisation cellule pour rétrodiffusé, etc)

OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

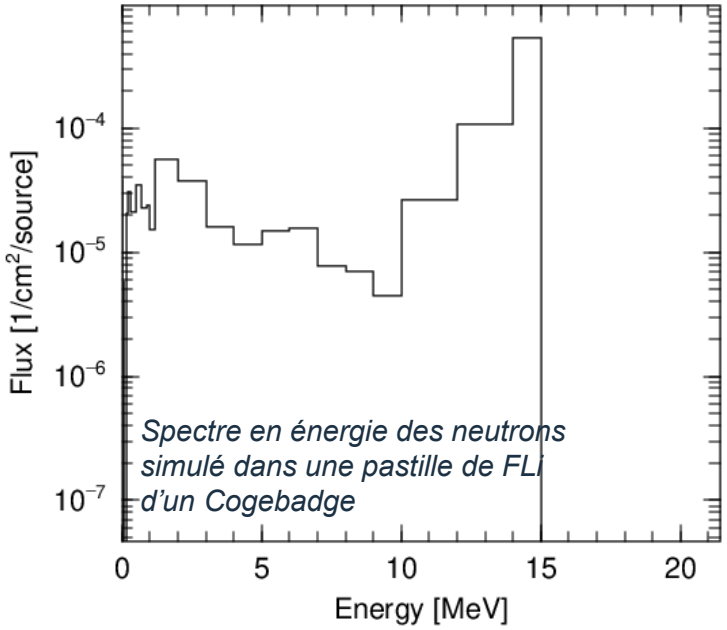
05 Estimation de la dose neutron sur les FLi du Cogebadge

- Chaque Cogebadge comporte une carte avec des pastilles FLi thermoluminescentes qui est chauffée pour une lecture de la dose (voir ci-dessous).



- ^{6}Li sensible aux gamma et aux neutrons thermiques
- ^{7}Li sensible aux gamma

- Simulation PHITS de la dose (Hp(10)) reçue par une pastille de FLi pour chaque dosimètre irradié pendant l'exercice.



- Estimation par simulation de la dose par FLi à **environ 5 Sv**
- **Résultats de mesure de dose sur les 2 Cogebadges à 6 Sv** (avec filtre) **et 4,4 Sv** (sans filtre)
  - Eventuel biais de réponse avec le filtre
  - Exploitation non standard des cartes TLD : utilisation forcée du coefficient de réponse à 14,8 MeV étant donné le spectre en énergie des neutrons (50% 14 MeV)

OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

06 Conclusion

01 Conclusion

❑ Exercice simulant un accident de criticité en interne Orano en 2025

- ➢ Non réalisé depuis de nombreuses années faute d'installation expérimentale disponible en France

❑ Exploitation des résultats

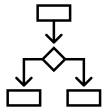
- ➢ Bonne statistique de comptage pour toutes les pastilles
- ➢ Écarts acceptables entre les résultats expérimentaux et simulés pour les spectrométries gamma et les comptages béta

❑ Retour d'expérience

- ➢ Bon déroulement de l'exercice : ~15 personnes mobilisées chez Orano Recyclage
- ➢ Faisabilité démontrée sur le site de La Hague et simulation utile pour préparer l'exercice
- ➢ Données à consolider pour la teneur en soufre des ébonites
- ➢ Améliorations possibles pour estimer la dose par les Cogebadges : logiciel post-traitement, filtre, irradier plus de 2 dosimètres
- ➢ Prochain exercice : analyse complète des SNAC, optimisation spectre neutronique, irradiation échantillon cheveux et sang, etc.



Mise en œuvre des dispositions prévues pour l'analyse des cibles activées/irradiées



Vérification de la robustesse de la chaîne logistique



Consolidation de la coordination entre les différents acteurs



Maintien des compétences techniques et organisationnelles

OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

orano

Donnons toute sa valeur au nucléaire

Annexes

01 Radionucléides principaux produits par activation neutronique

	Pastille	RN mesuré	Eγ (keV)	Période (h)
SNAC	Cuivre AV	^{64}Cu	511 (35%)	12,7
	Ebonite	^{32}P	Emetteur β	342,5
	Magnésium	^{24}Na	1369 (100%) 2754 (100%)	15
	Nickel	^{58}Co	810 (99%)	1700
	Indium 1	^{115m}In	336 (46%)	4,5
	Or int	^{198}Au	411 (96%)	64,7
	Cuivre int	^{64}Cu	511 (35%)	12,7
	Indium 2	^{115m}In	336 (46%)	4,5
	Cuivre AR	^{64}Cu	511 (35%)	12,7
Cogebadge	Ebonite 1	^{32}P	Emetteur β	342,5
	Ebonite 2			
	Or seul	^{198}Au	411 (96%)	64,7
	Or sous Cd			
Ceinture de criticité	Ebonite	^{32}P	Emetteur β	342,5

OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

02 Résultats sur les radionucléides émetteurs gamma

	Pastille	RN mesuré	Eγ (keV) mesurée	Période (h)	Durée de comptage (s)	Surface nette pic	Activité mesurée* (Bq)	Activité simulée (Bq)	Ecart simulation vs. Labo
SNAC	Cuivre AV	^{64}Cu	511 (35%)	12,7	3600	18324	183	216	+18%
	Magnésium	^{24}Na	1369 (100%)	15	3600	148073	1687	1924	+14%
	Nickel	^{58}Co	810 (99%)	1700	55000	94696	36,7	36,5	-1%
	Indium 1 + 2	^{115m}In	336 (46%)	4,5	1832	10162	113	129	+14%
	Or int	^{198}Au	411 (96%)	64,7	55000	11087	2,5	1,2	-54%
	Cuivre int	^{64}Cu	511 (35%)	12,7	3600	24693	240	250	+4%
	Cuivre AR	^{64}Cu	511 (35%)	12,7	5280	15850	116	139	+20%
Cogebadge up	Or seul	^{198}Au	411 (96%)	64,7	55000	54500	9,8	8,2	-17%
	Or sous Cd					16090	3,5	2,2	-38%
Cogebadge down	Or seul	^{198}Au	411 (96%)	64,7	55000	48821	11	10,9	-1%
	Or sous Cd					15916	3,07	2,6	-15%

*Activité mesurée extrapolée au moment du début du premier comptage pour toutes les pastilles mesurées en spectrométrie gamma

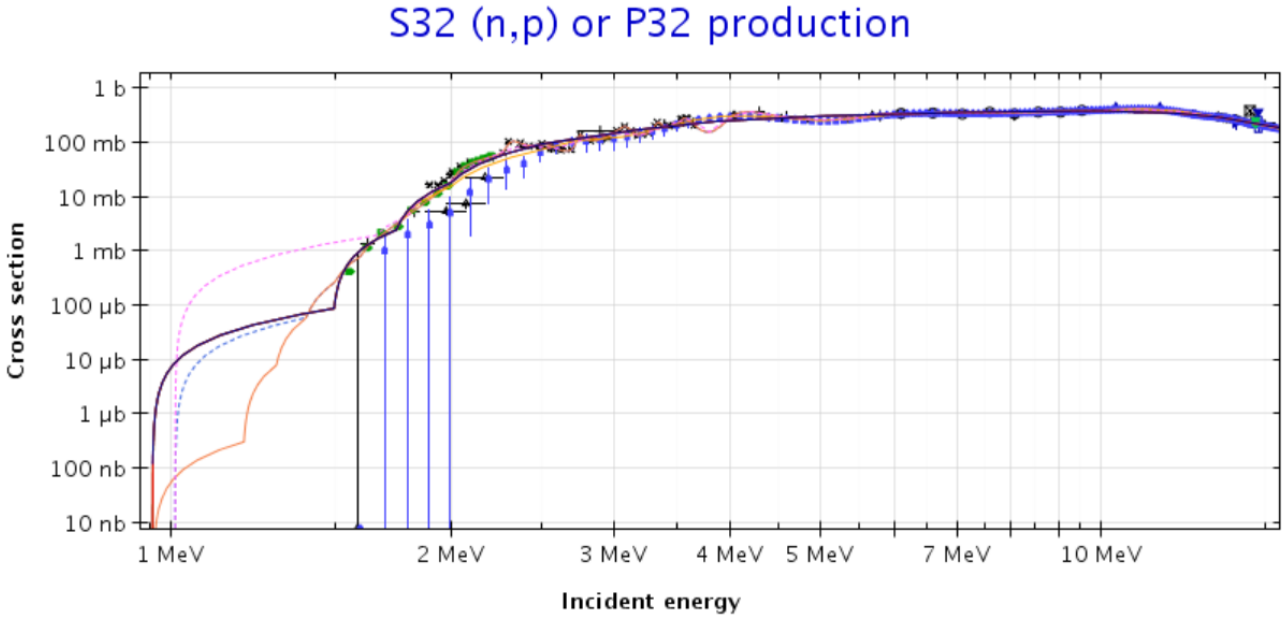
OPI1 : DIFFUSION LIMITEE / RESTRICTED

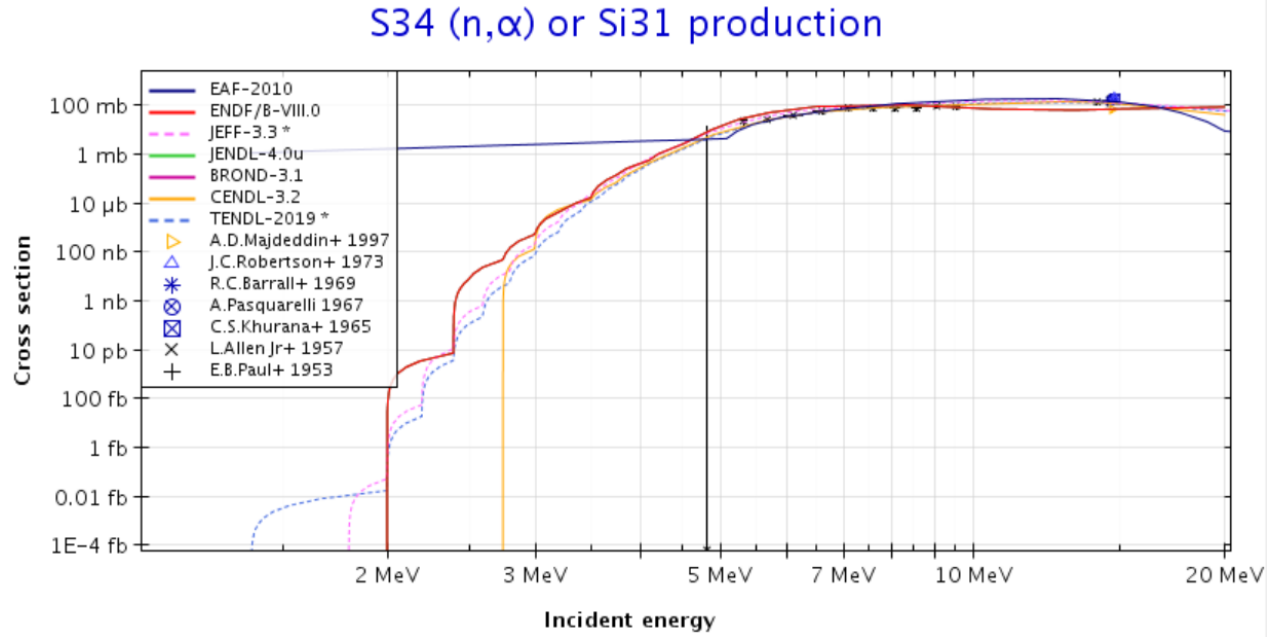
03 Résultats sur les pastilles d'ébonites (mesure β)

Ebonite concernée	Temps de mesure (s)	Comptage net (coups)	Rendement de détection (%)	Activité mesurée (Bq)	Activité simulée (Bq)	Ecart simulation vs. labo
Cogebadge up	7200	11785	12,6	13	13,3	-2%
Cogebadge down		14287		15,7	12,4	-21%
Ceinture 1		35786	11,3	44	38,5	-12%
Ceinture 2		39867		49	38,3	-22%
Ceinture 3		48808		60	38,2	-36%
Ceinture 4		42318		52	38,4	-26%
Ceinture 5		51207		63	38,5	-39%
Ceinture 6		47173		58	38,4	-34%
SNAC		19496	12,2	22,2	15,5	-30%

- Les résultats estimés par simulation sont plus faibles que ceux mesurés au laboratoire
- **Il est possible que les ébonites contiennent plus de soufre que la composition simulée (20%) : importance de disposer de données de caractérisation des ébonites**
- Il est également possible que le rendement de détection soit sous-estimé (plusieurs étapes de simulation)
- Autres sources d'incertitude (sections efficaces, position irradiation, flux de neutrons, modélisation cellule pour rétrodiffusé, etc)

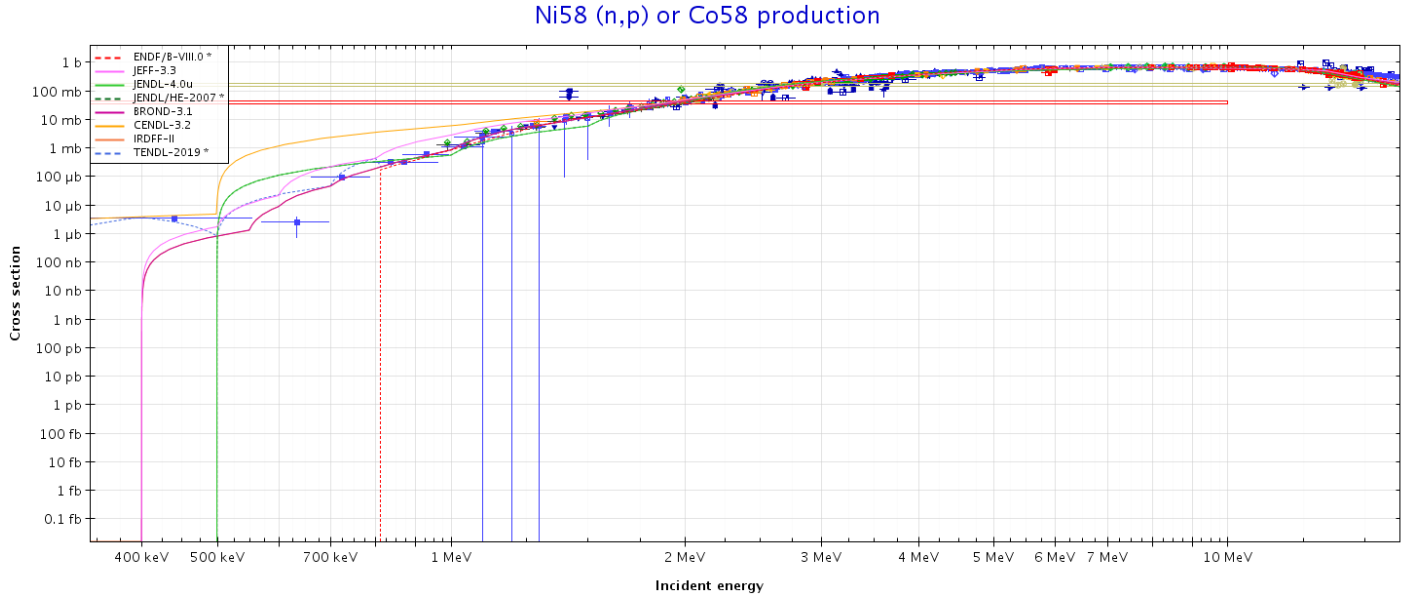
04 Sections efficaces activation neutronique ébonite

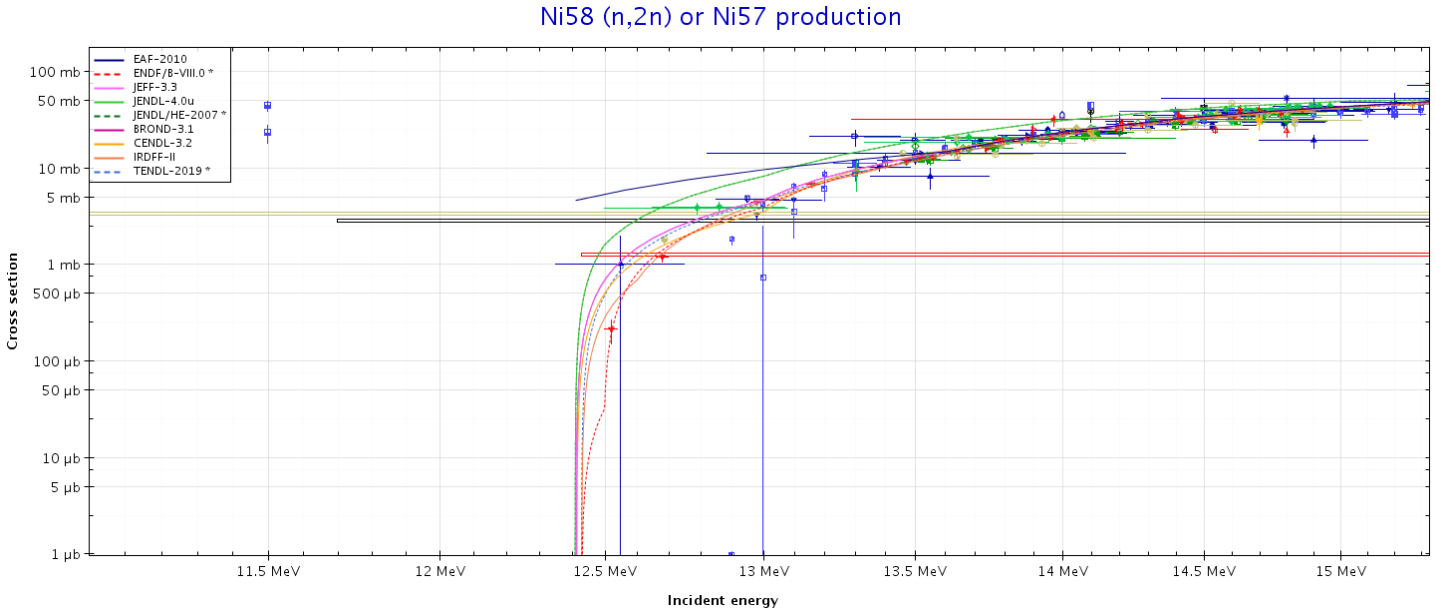




- Deux réactions à seuil avec des neutrons rapides
- Le ^{34}S représente seulement 4% du soufre, mais les sections efficaces sont du même ordre de grandeur et le ^{31}Si a une période beaucoup plus courte (2,6 h) que le ^{32}P (342 h), d'où l'activité significative dans l'ébonite à la fin de l'irradiation.
- C'est le ^{32}P qui est référencé dans la procédure.

05 Sections efficaces activation neutronique nickel

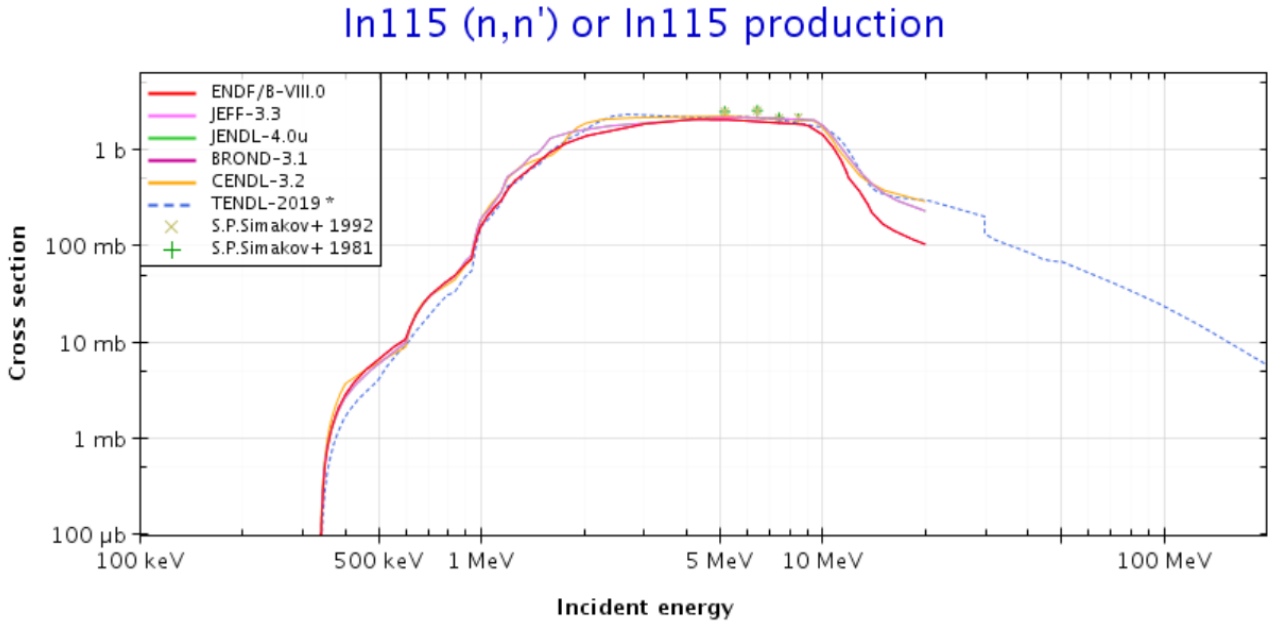




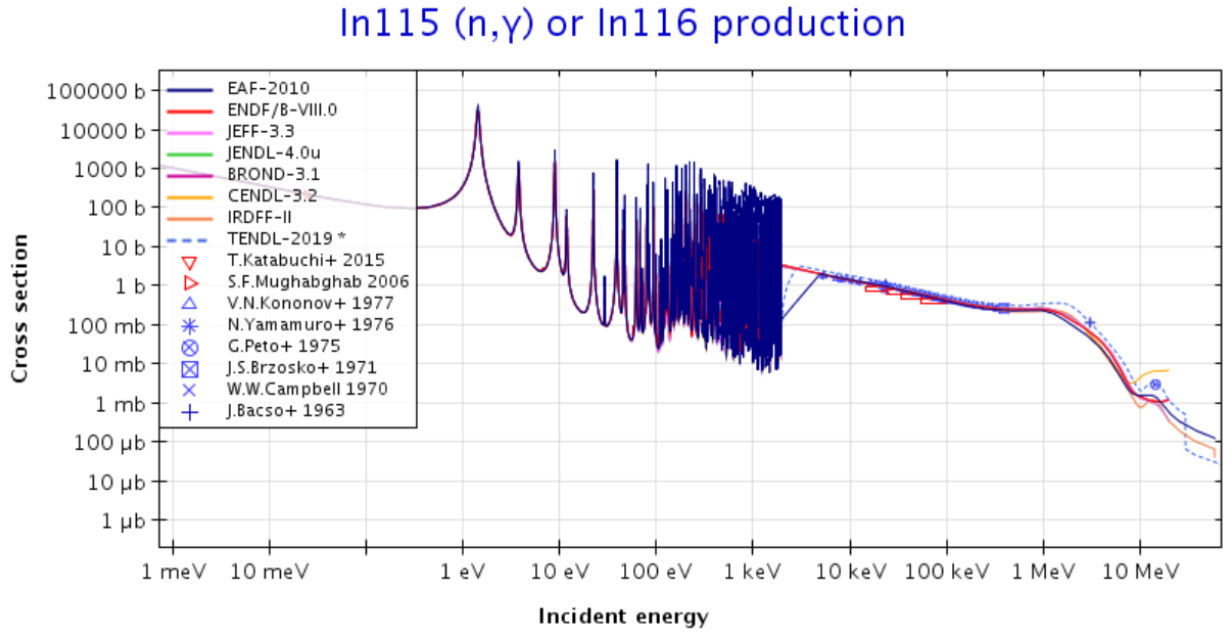
- Section efficace plus importante pour la production de ^{58}Co, mais période assez longue d'où l'activité pas en 1ère position.

- Production de ^{57}Ni par une réaction à seuil pour des neutrons E>12,5 MeV

06 Sections efficaces activation neutronique indium

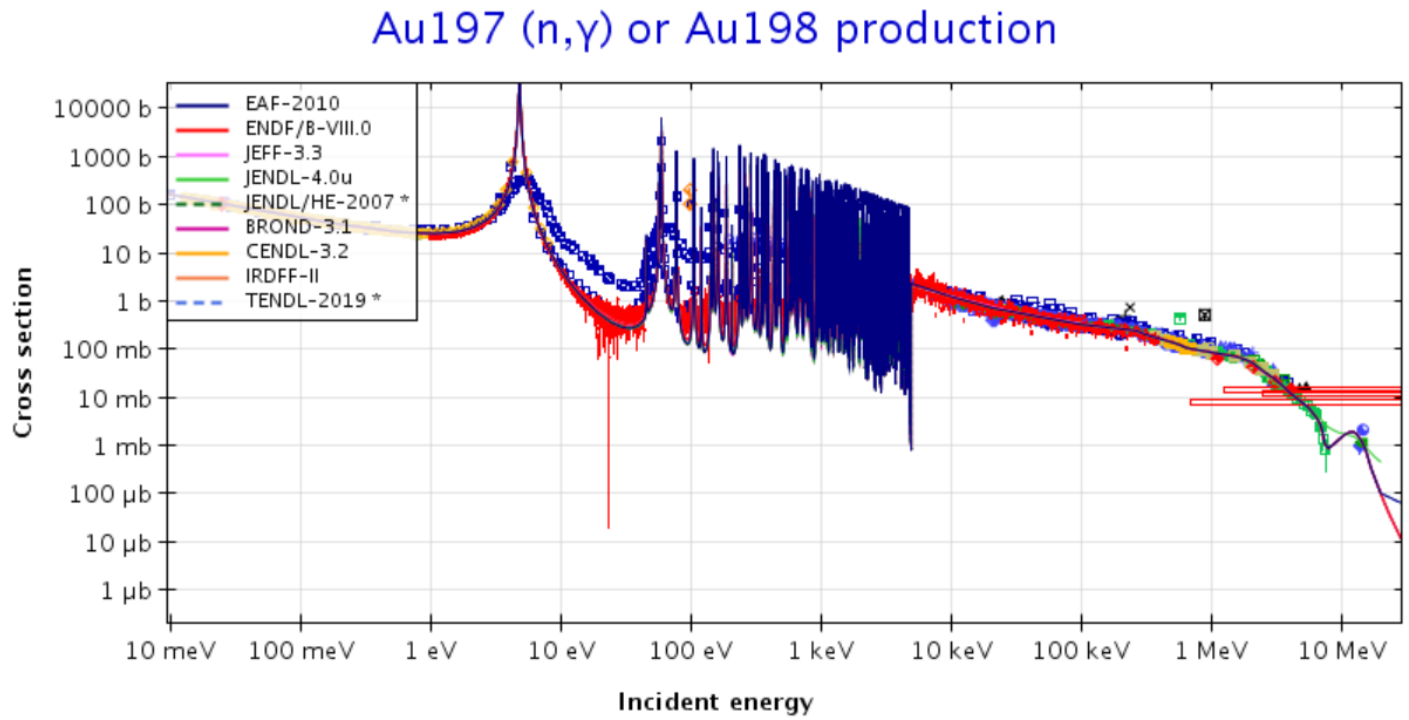


- Réaction à seuil pour la production de ^{115m}In et qui décroit ensuite avec l'énergie. Favorisée pour des neutrons entre 2 et 10 MeV.



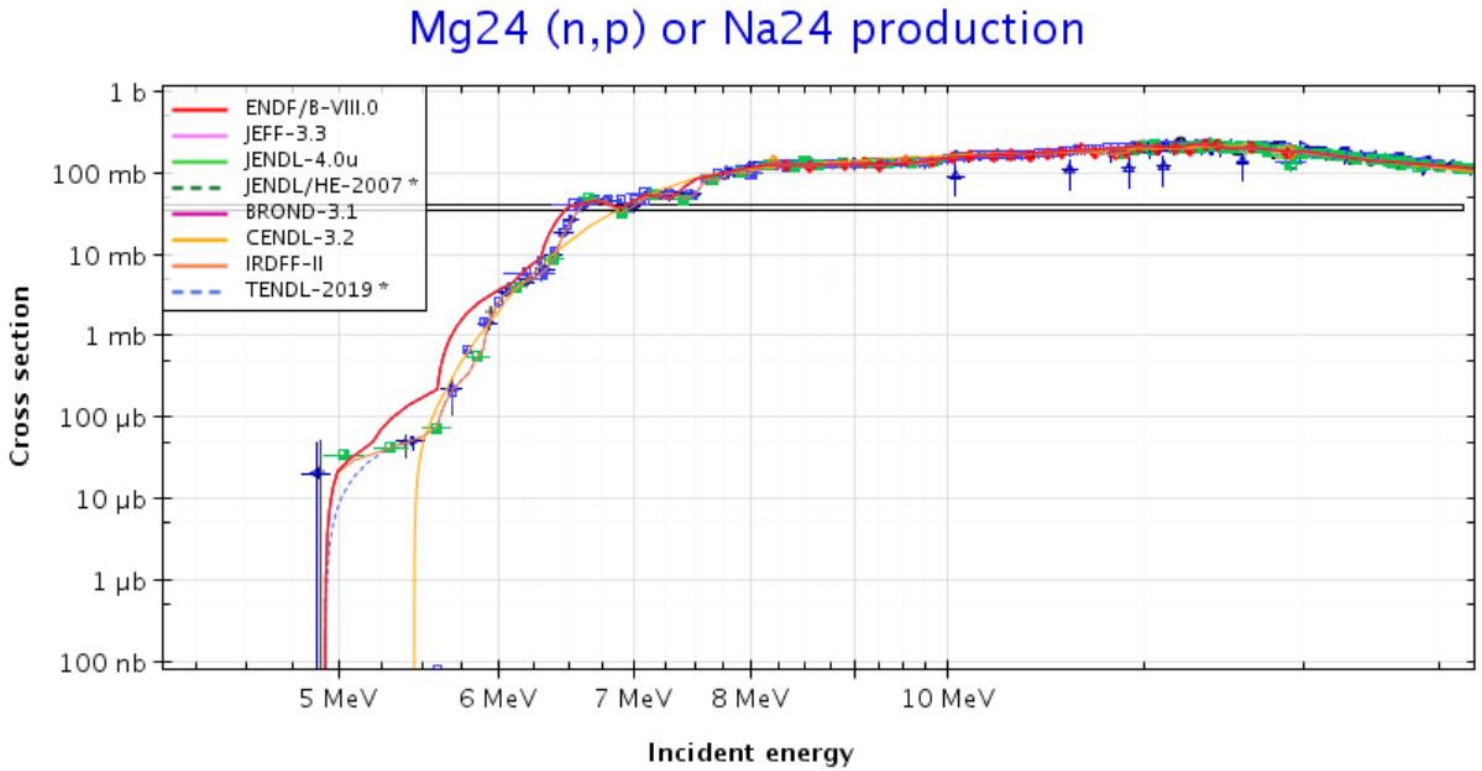
- Section efficace de production de ^{116m}In continue énorme à basse énergie et en épithermique. Mais demi-vie très faible compte-tenu du temps de transfert des échantillons au labo

07 Section efficace activation neutronique or



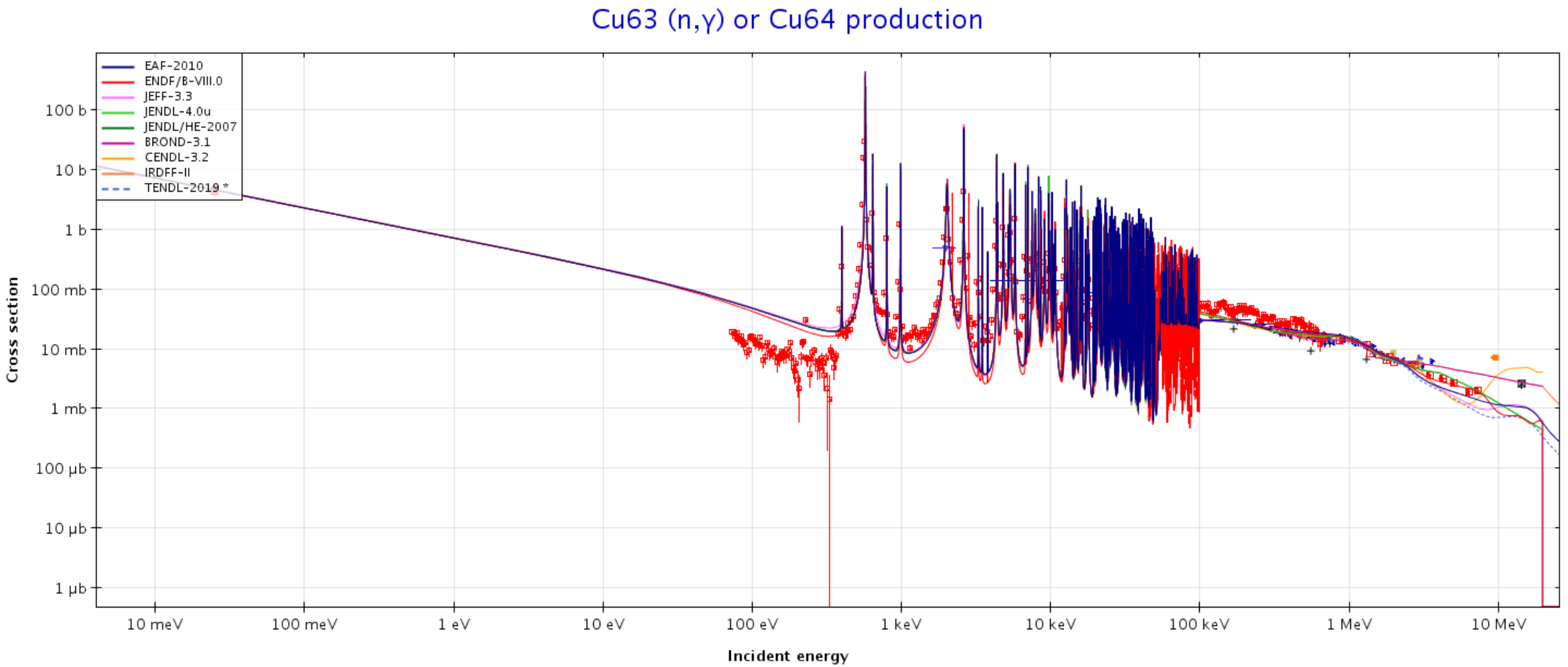
- Section efficace continue pour la réaction (n,γ) produisant du ^{198}Au, d'autant plus importante pour des neutrons de faible énergie.

08 Section efficace activation neutronique magnésium



- Réaction d'activation à seuil pour la production de ^{24}Na.

09 Section efficace activation neutronique cuivre



- Production de ^{64}Cu favorisée pour des neutrons thermiques et épithermiques.
- Une autre voie de production du ^{64}Cu est par réaction (n,2n) sur du ^{65}Cu (seuil en énergie > 10 MeV).