

Présentation de stage :

Modélisation d'irradiations gammas à l'aide d'une source cobalt-60

Julien WEBER – CEA Saclay – DES/ISAS/DM2S/SERMA/CP2C

01/03/2024 – 31/08/2024

Encadré par Stéphane Bourganel

*Ecole d'été des Gustins : Aiguebelette
16-22 juillet 2024*



But du stage

- Modéliser PAGURE qui est un irradiateur gamma avec des sources de cobalt 60
- Calculer le débit de dose dans PAGURE de plusieurs manières
 - TRIPOLI-4®
 - Programme écrit au cours du stage : PagureC
 - NARMER-1
 - Utilisation des cartes d'importances
- Produire une maquette d'un logiciel prédisant les débits de doses dans PAGURE et prenant en compte le changement des sources
- Préparer la thèse qui étudiera l'irradiateur POSEIDON



1 ■ Théorie

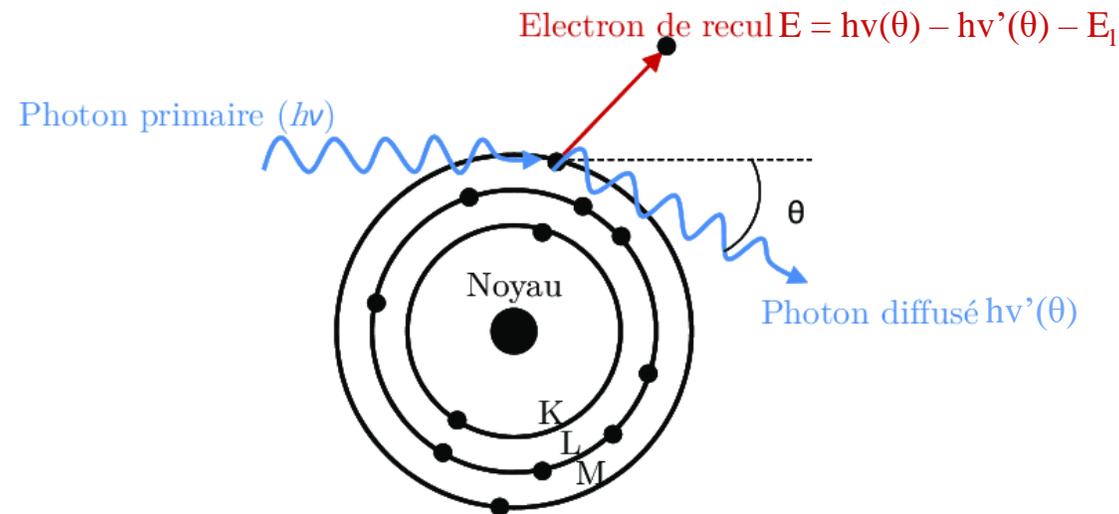
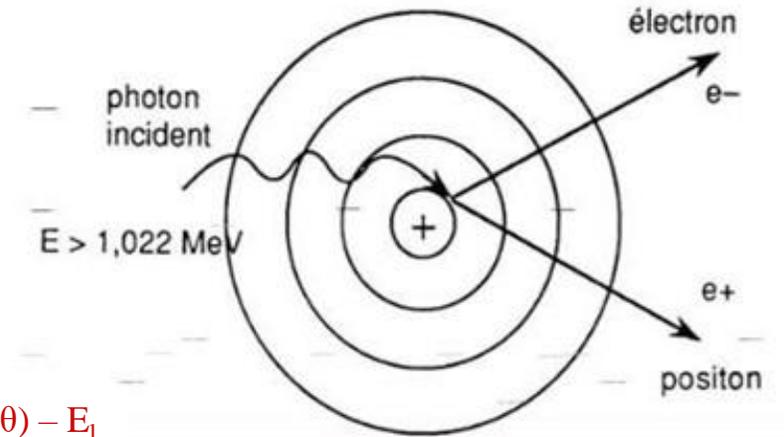
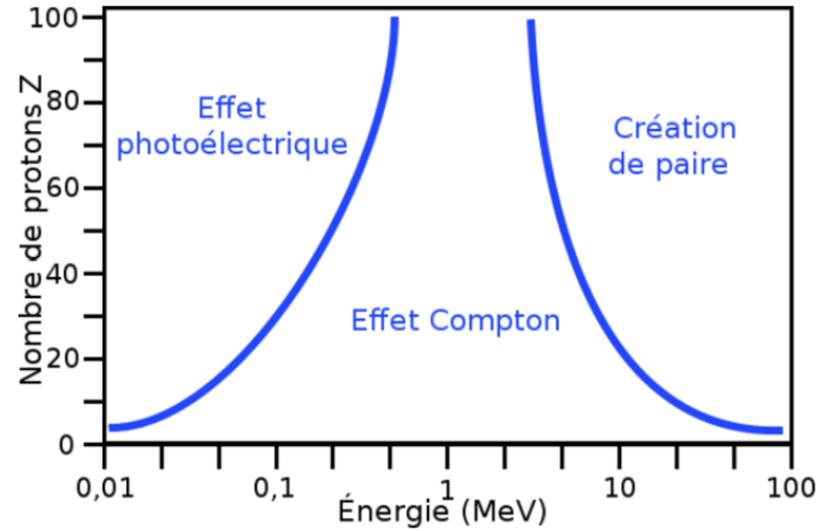
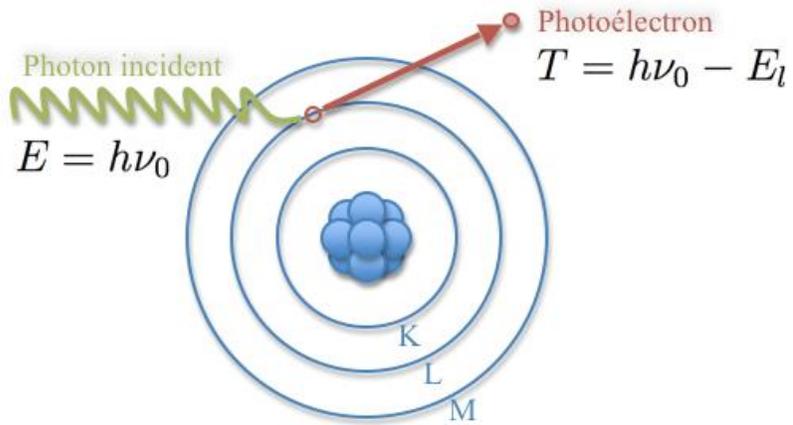
Monte-Carlo et TRIPOLI-4®



- Code de calcul simulant des particules de façon aléatoire
- Nécessite de faire beaucoup de simulations de particules indépendantes (10^9) afin de réduire l'erreur statistique
- Tire parti de la loi des grand nombres (toutes expériences aléatoires engendrent des résultats qui ressemblent à une gaussienne si répétées un très grand nombre de fois)

- 4^{ème} génération du code TRIPOLI, code Monte-Carlo probabiliste développé par le CEA
- Simulation du transport de particules (neutrons, photons, électrons, positrons) pendant leur « vie numérique » avec les interactions dans la matière
- Permet de multiples calculs avec diverses options de données et de résultats
- Référence dans le domaine des codes neutroniques

Théorie préliminaire : interactions photon-matière

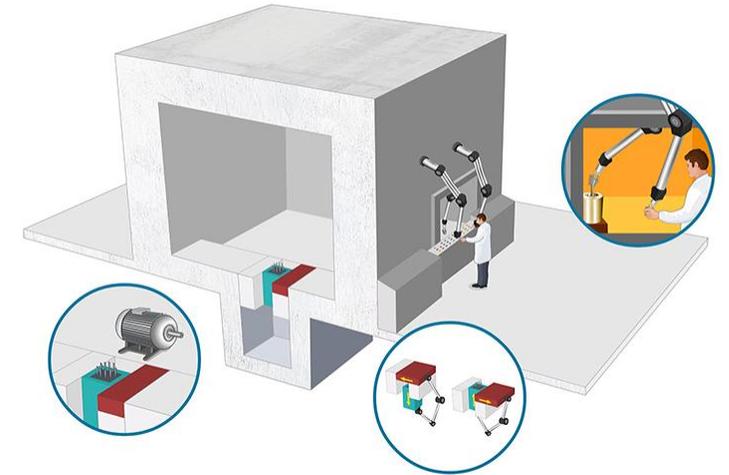




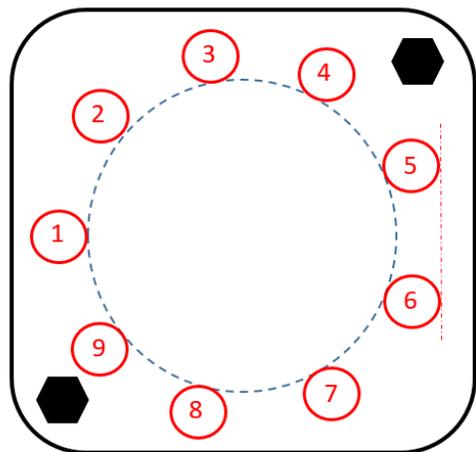
2. PAGURE

LABRA et irradiateur PAGURE

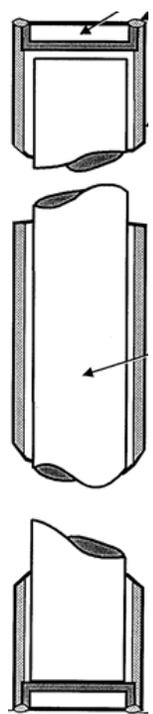
- LABoratoire des Rayonnements Appliqués, laboratoire du CEA
- Créé le 11/07/1969 (DES/ISAS/DRMP/SPC/LABRA)
- Utilisé principalement pour étudier le vieillissement des matériaux et participer à la qualification de matériels dans l'industrie du nucléaire
- Irradiateur du LABRA avec POSEIDON, VULCAIN et CALINE
- Utilisé pour la stérilisation, le vieillissement et diverses expériences, pour le CEA ou ses collaborateurs (EDF...)



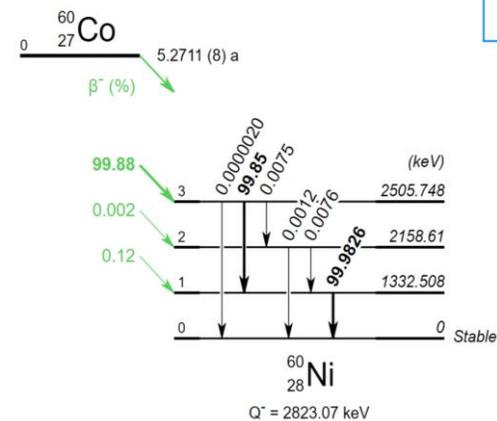
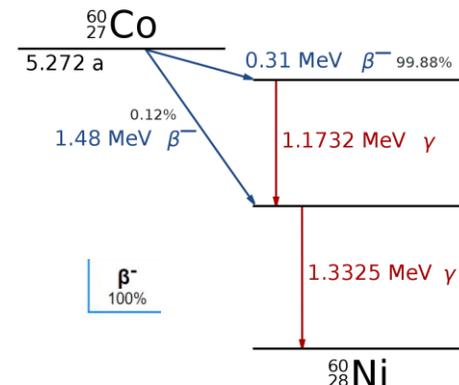
Choix du spectre d'émission de la source



Coté hublot



Activité : 2000 Ci
soit $7,4 \cdot 10^{14}$ Bq



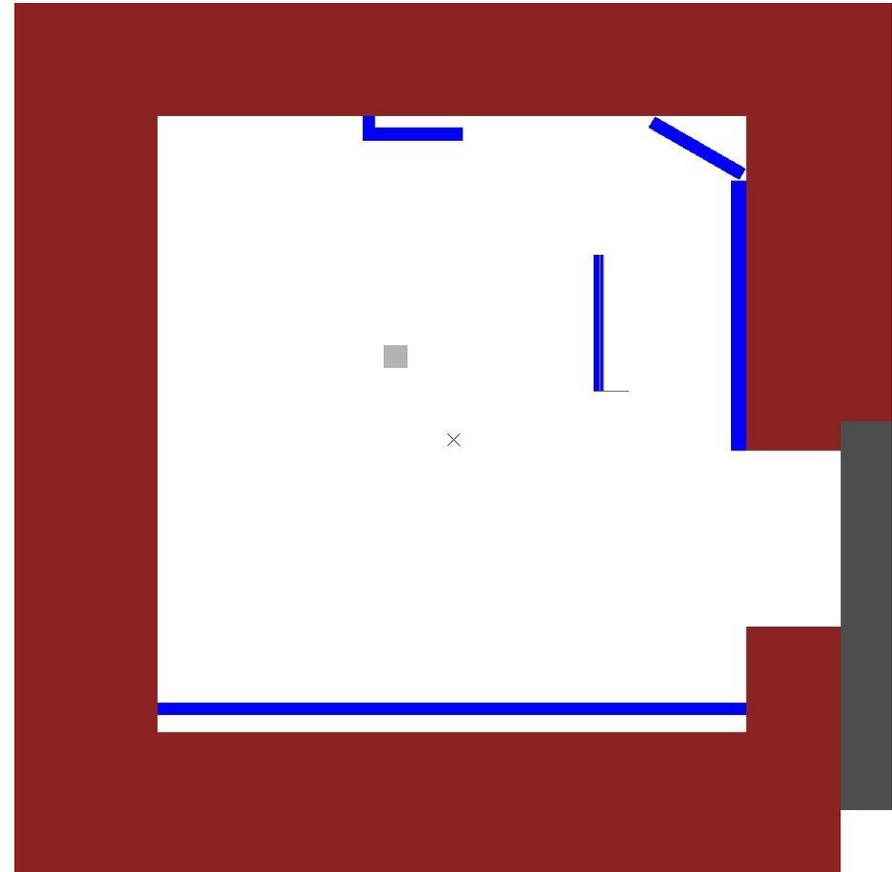
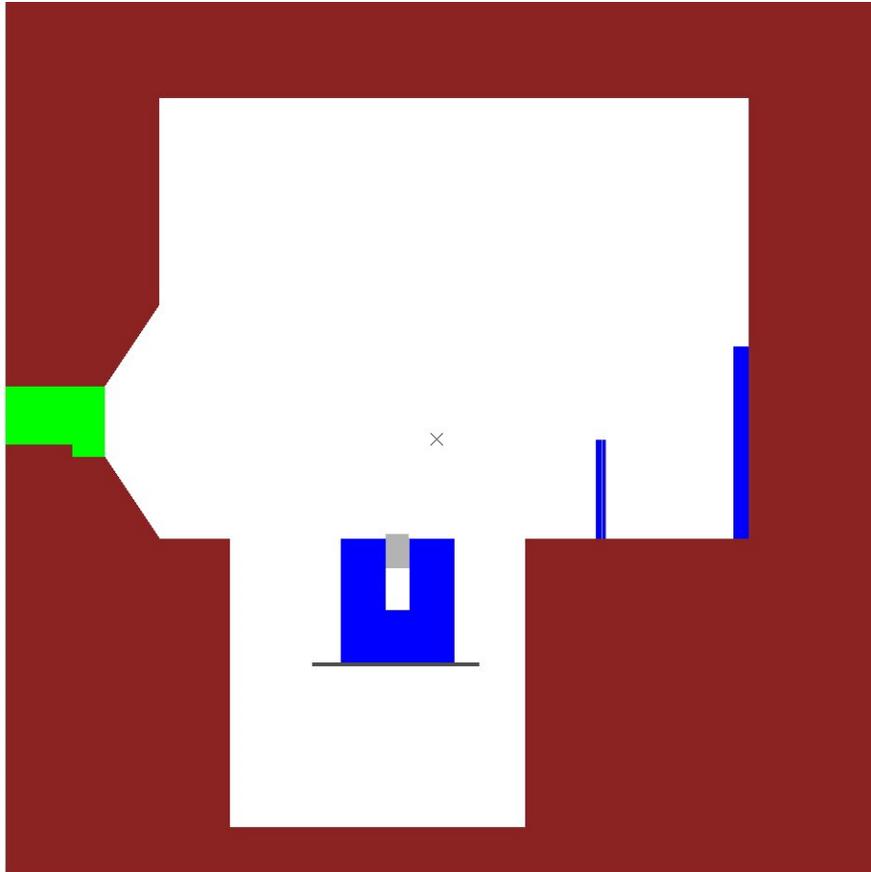
Cobalt 60 => simplification des raies

Excel (atténuation ligne droite)

TRIPOLI-4® (Simulation)

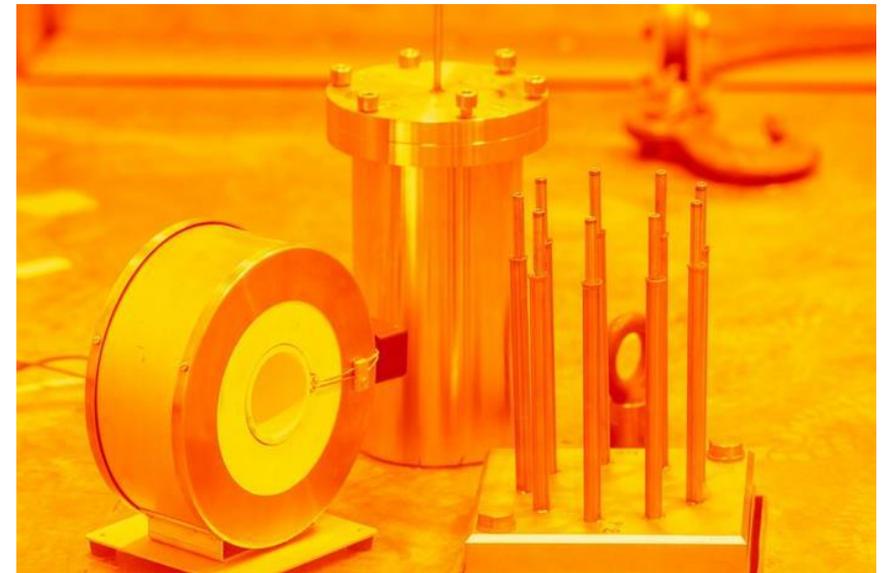
	E (keV)	%	Débit de dose (U.A.)	Total	Différence relative		Débit de dose (U.A.)	Incertitude	Différence relative
Spectre simplifié 1	1330	100	$2,372 \cdot 10^{-2}$	$4,5385 \cdot 10^{-2}$	-0.09 %	Source simplifié 1	$4,3812 \cdot 10^{-2}$	0,010 %	$-8,3 \cdot 10^{-2}$ %
	1170	100	$2,167 \cdot 10^{-2}$						
Spectre simplifié 5	1332	100	$2,375 \cdot 10^{-2}$	$4,5430 \cdot 10^{-2}$	0,01 %	Source simplifié 5	$4,3852 \cdot 10^{-2}$	0,010 %	8,4 · 10 ⁻³ %
	1173	99,9	$2,169 \cdot 10^{-2}$						

Jumeau numérique



Coupes de PAGURE sur le côté et de dessus

PAGURE (photos)



Grandeurs calculées (DED, DD et Flux)



Débit d'Equivalent de Dose

- Exprimé en $\mu\text{Sv/h}$ par l'opérateur $H^*(10)$
- Equivalent par rapport à un volume d'eau
- N'est PAS réellement l'énergie déposée

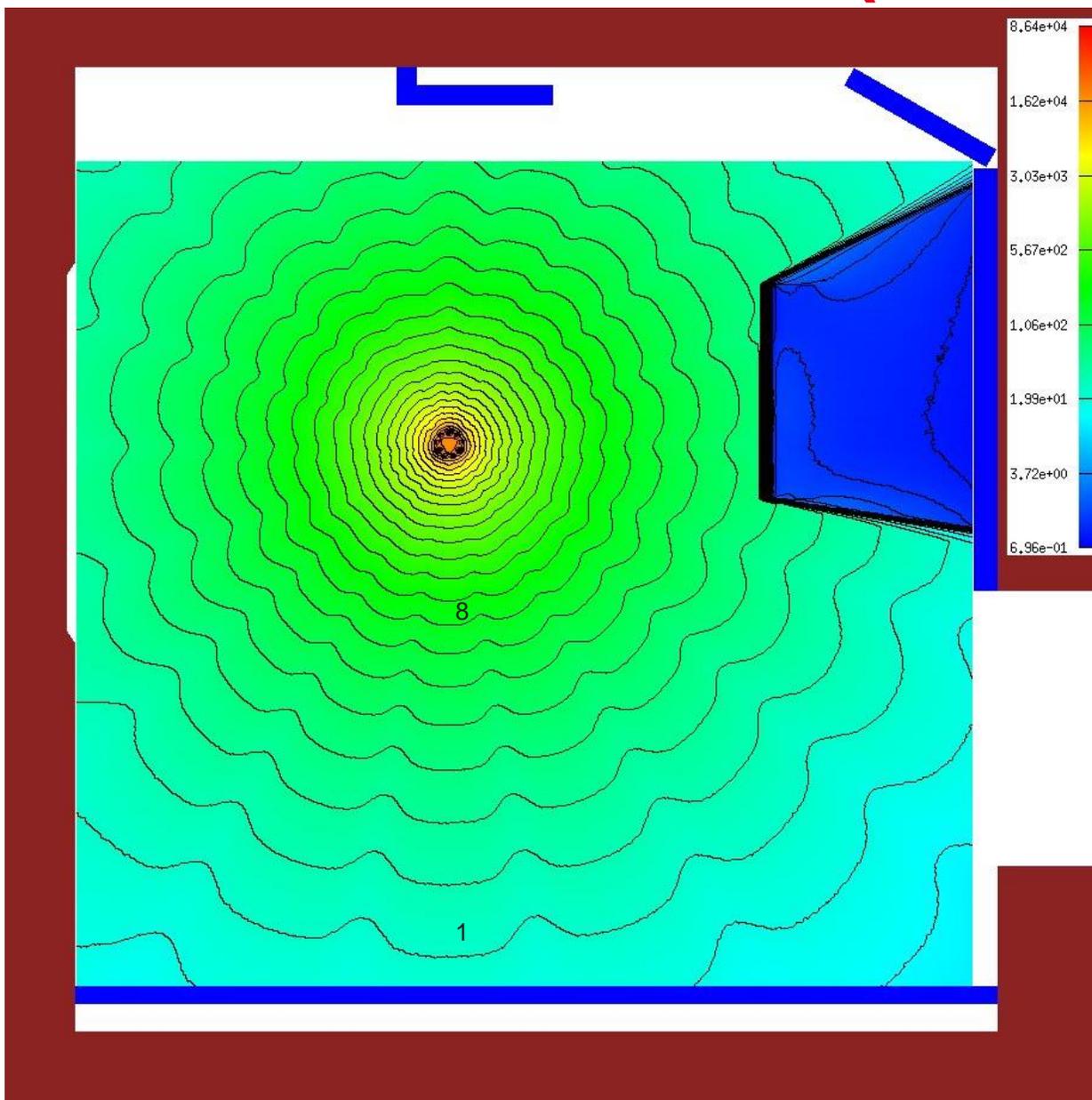
Flux

- Exprimé en particules/ cm^2/s
- Sert de référence pour valider PagureC

Débit de Dose

- Exprimé en Gy/h
- Plus traditionnellement utilisé dans les installations

Dosimétrie PAGURE (référence TRIPOLI-4®)

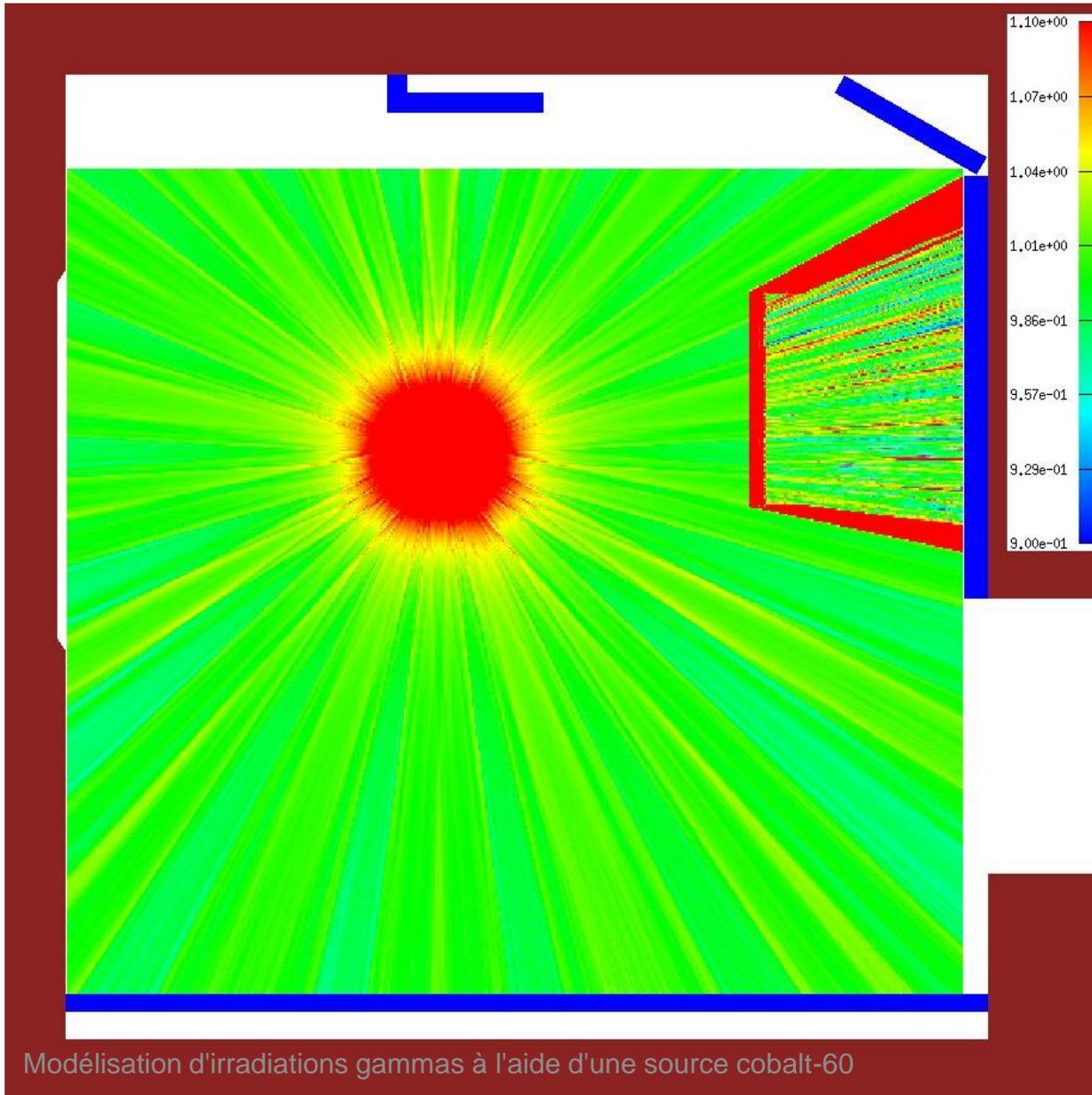


Isodose	d (cm)	min	max	moyenne	min/moyenne	max/moyenne
1	278,75	2,05E+01	2,44E+01	2,30E+01	0,895	1,062
2	239,75	2,66E+01	3,36E+01	3,03E+01	0,877	1,108
3	208,75	3,53E+01	4,33E+01	3,99E+01	0,884	1,086
4	177,75	4,92E+01	5,95E+01	5,48E+01	0,897	1,085
8	99,75	1,61E+02	1,86E+02	1,75E+02	0,924	1,066
	± 0,25			moyenne	0,896	1,082

Soit une erreur d'environ $\pm 10\%$ par rapport au DD moyen en fonction du rayon

Temps réel : 49 j
Temps machines : 2 j

Dosimétrie PAGURE (rapport PagureC/référence)



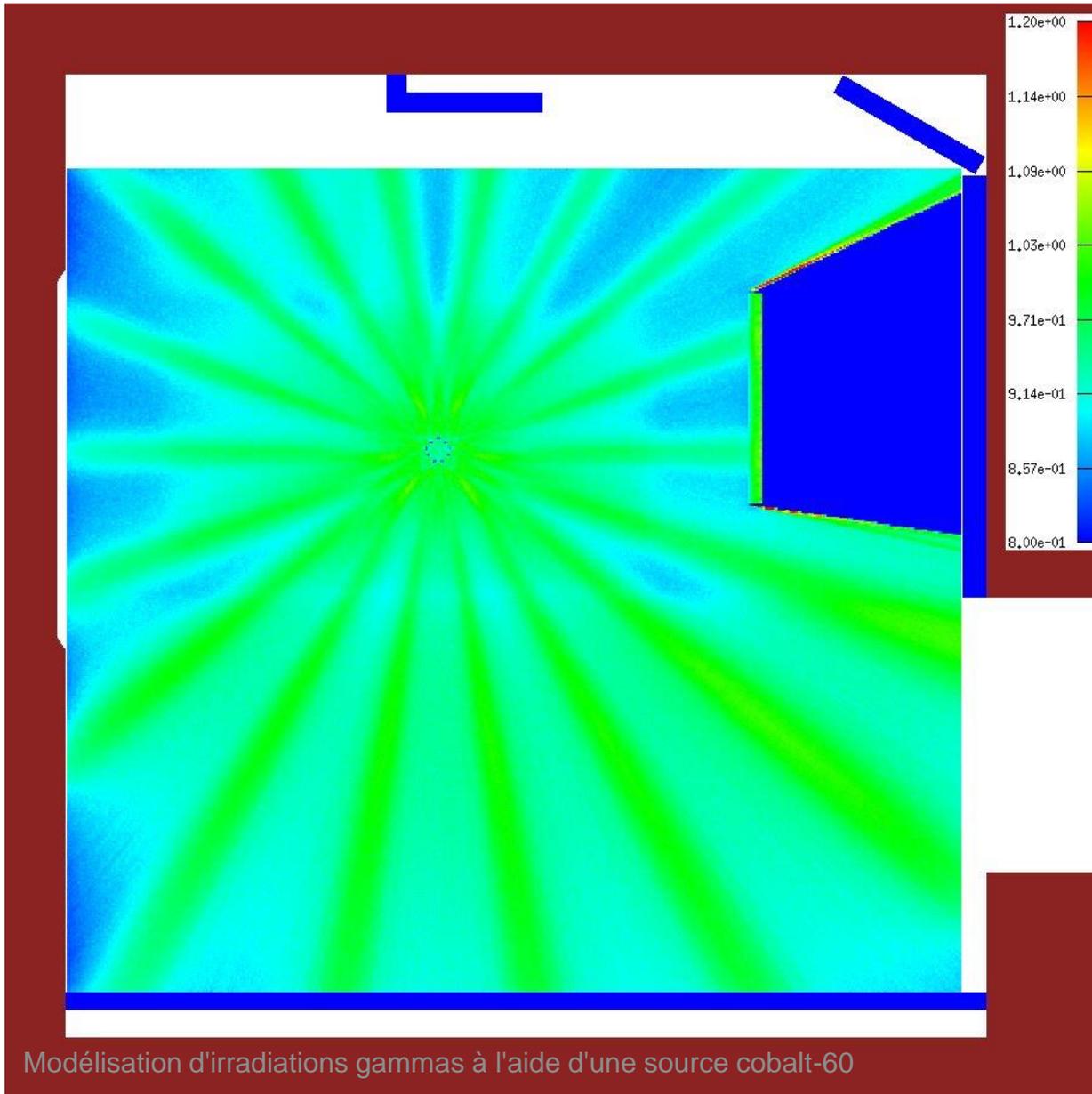
Utilise la formule d'atténuation en ligne droite

$$DD = \frac{A \times I(E)}{4\pi d^2} \times B_i(E) \times F(E) \times e^{-\mu_i x}$$

Erreur de moins de 5% sur la majorité de l'espace

Temps : 5 s

Dosimétrie PAGURE (rapport NARMER-1/référence)



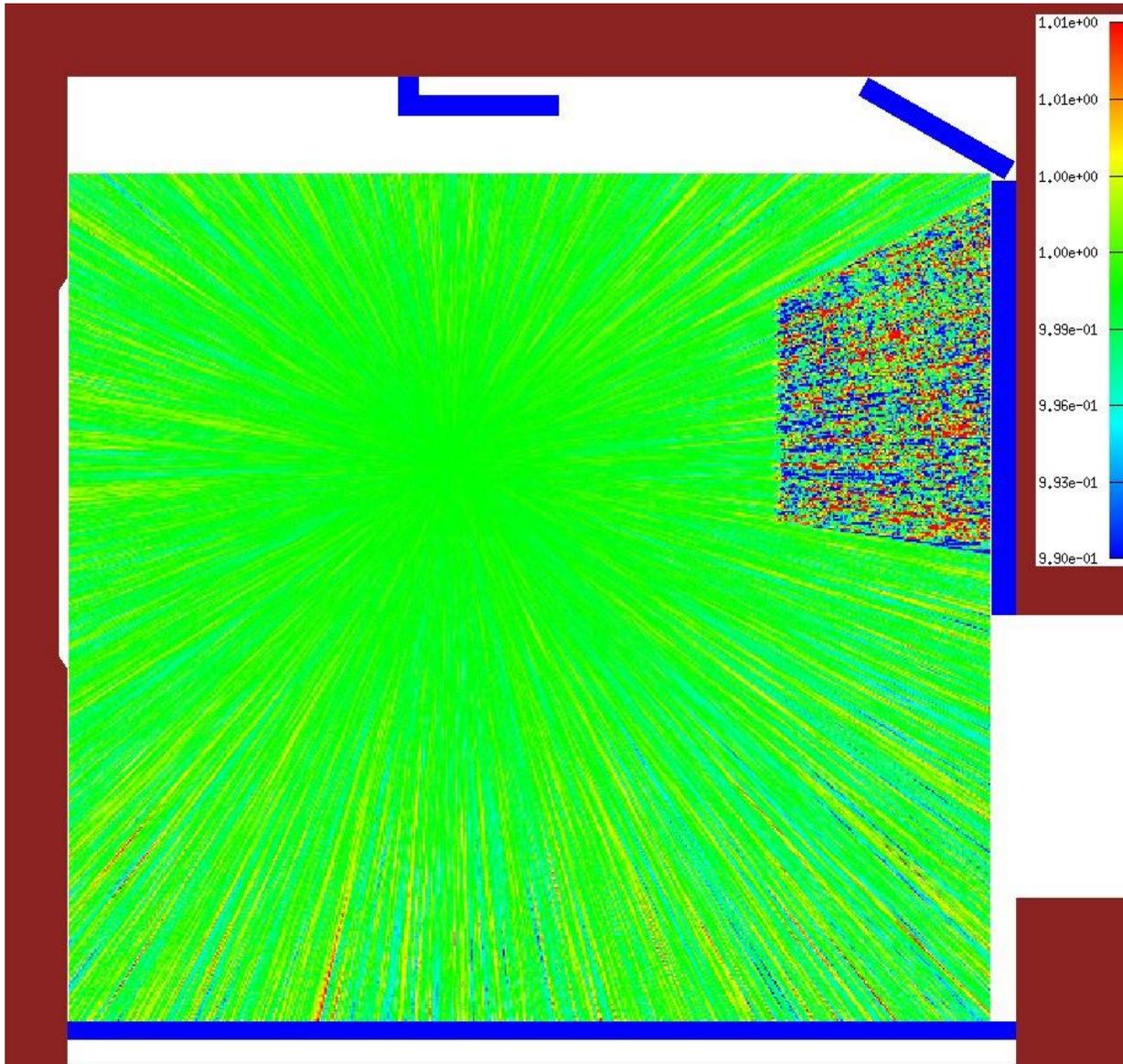
Code analytique utilisant l'atténuation en ligne droite

Utilisation de la même géométrie que TRIPOLI-4®

Erreur de moins de 10 %, sauf en contournement

Temps : 30 min

Dosimétrie PAGURE (rapport CIP/référence)



Se déroule en deux étapes :

Calculer le DD par sources normalisées à 1 photons par secondes *via* TRIPOLI-4®, c'est l'importance I_{nij}

Sommer les importances multipliées par les intensités *via* le programme CIP pour gérer les différents fichiers

$$DD_{ij} = \sum_{n=1}^9 S_n \times I_{nij}$$

Temps : 2 s

Peu d'écart significatifs (fluctuation statistiques)

Comparatifs des méthodes utilisées

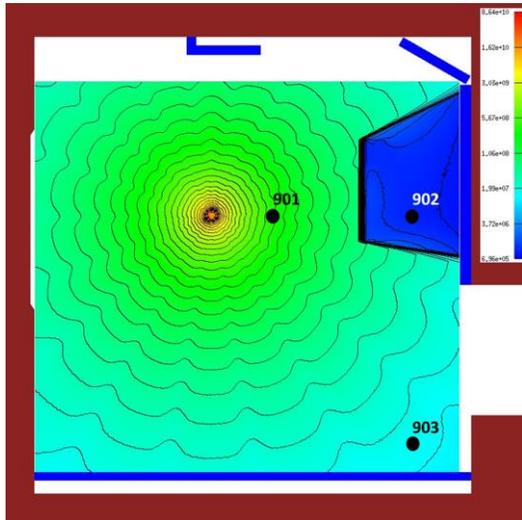


Méthodes	Précision	Rapidité	Facilité d'utilisation	Mémoire
TRIPOLI-4® (référence)	++	--	-	+
PagureC	--	++	++	-
NARMER-1	-	+	-	+
Cartes d'importances CIP	+	++	++	--

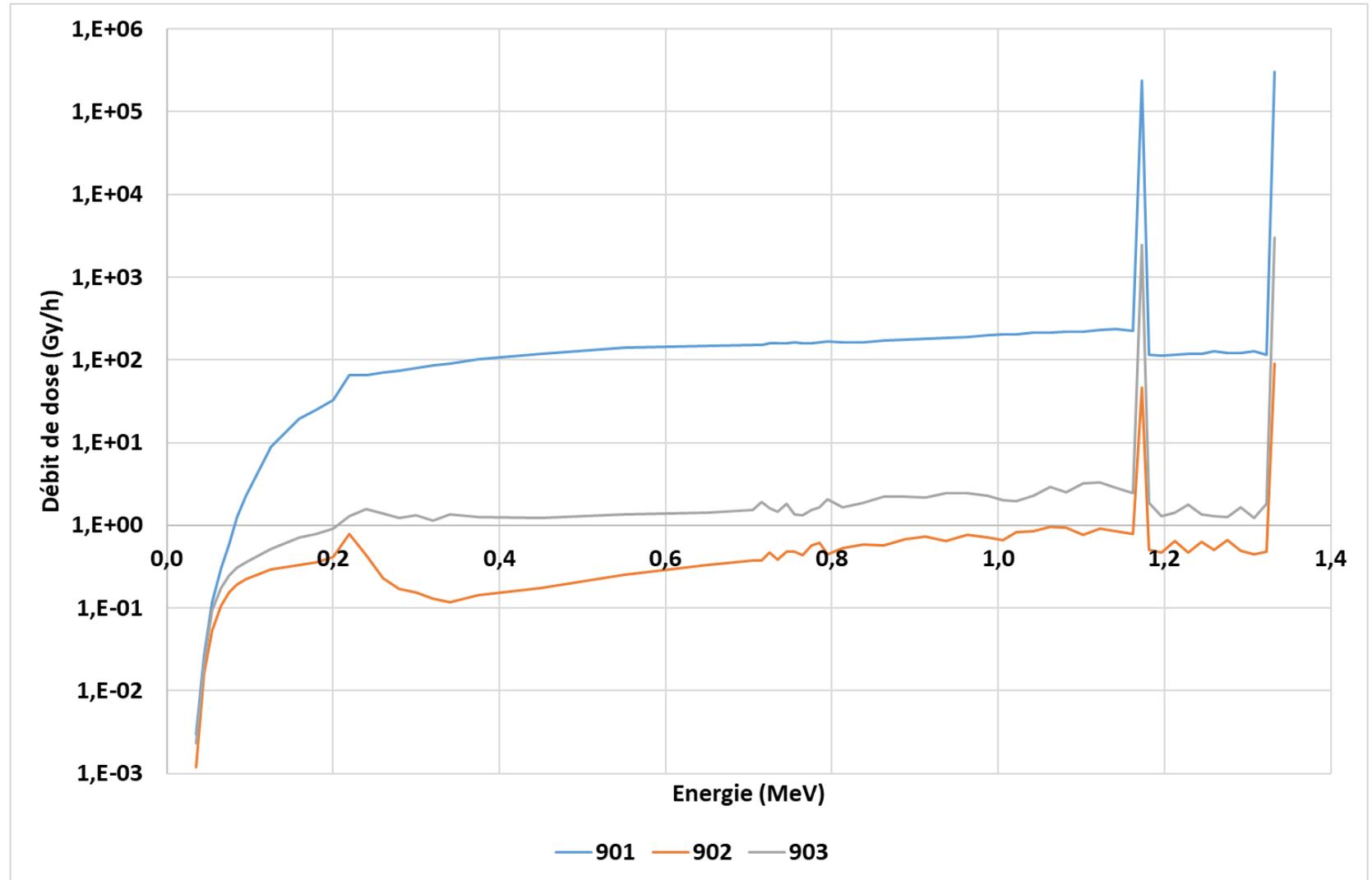


3 ■ Compléments

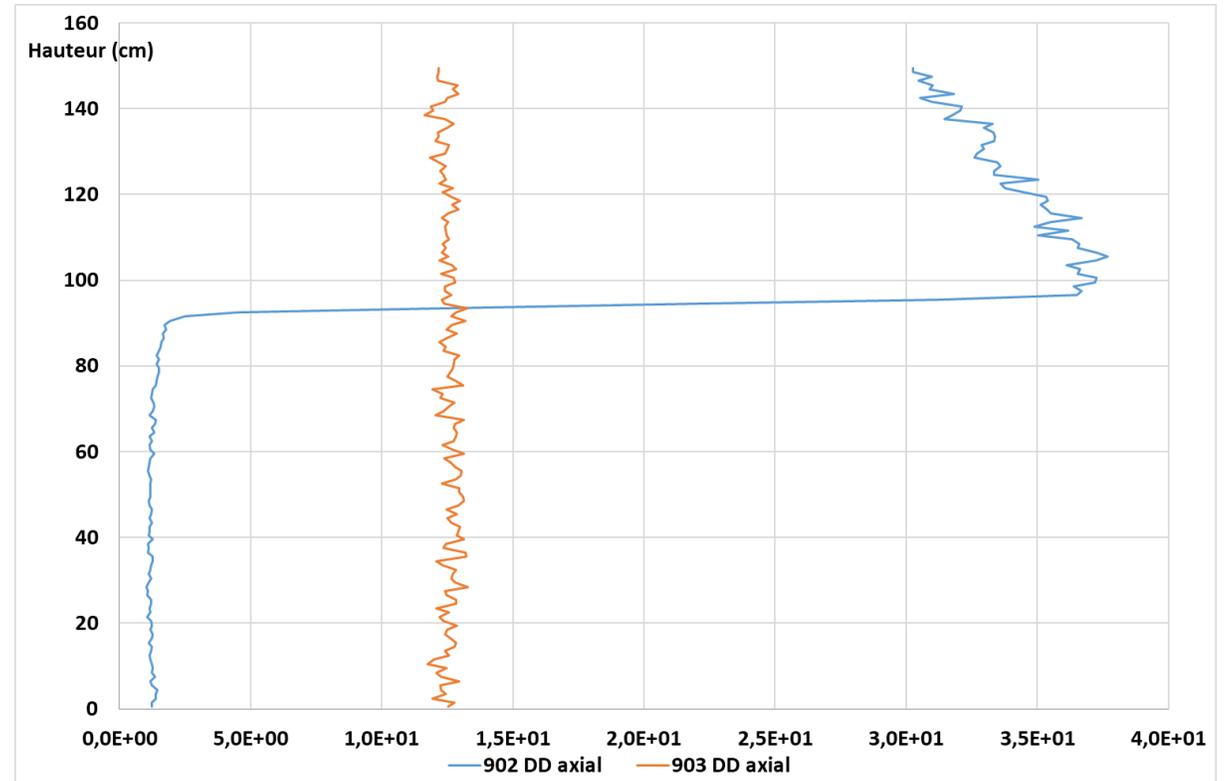
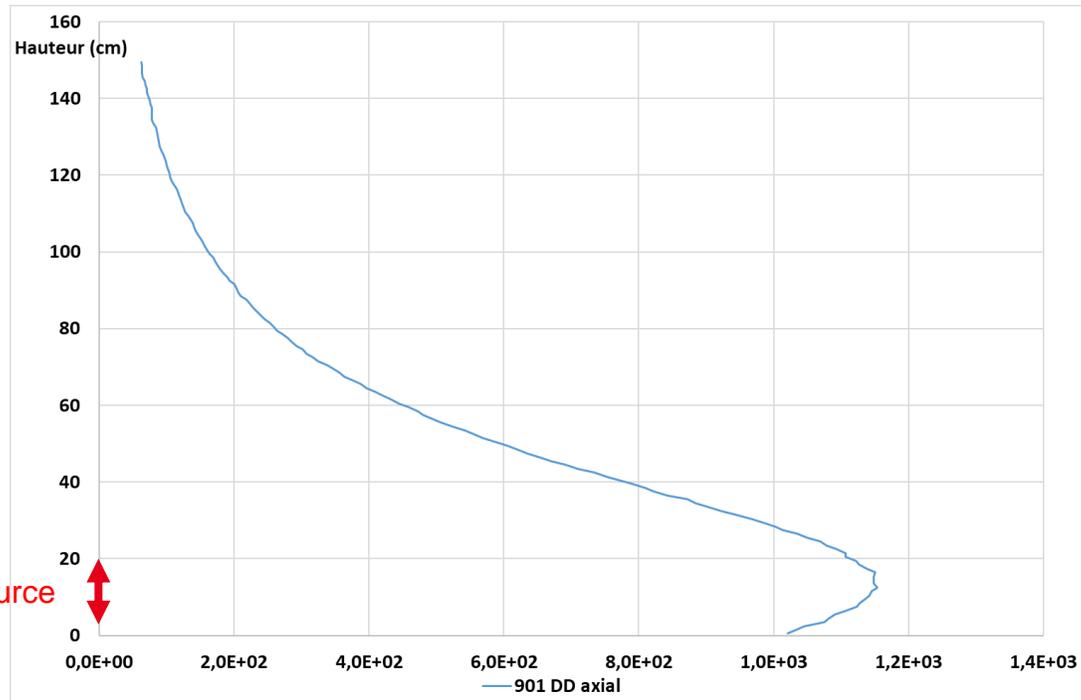
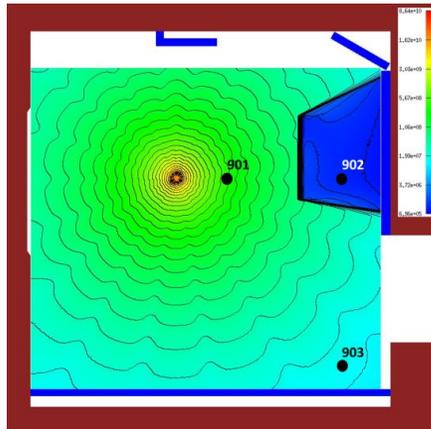
Spectres



901 : 75 % du cobalt
902 : 17 % du cobalt
903 : 70 % du cobalt



Dose en axial



Energie déposée et KERMA

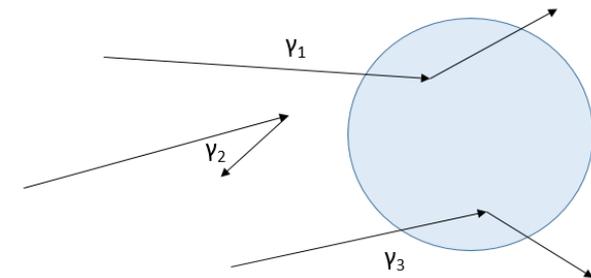
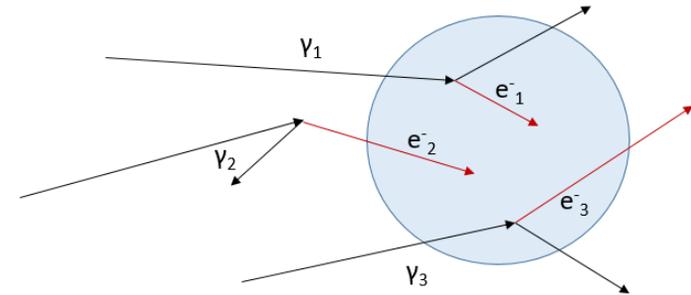
Energie déposée

- Tout est dans le nom
- Energie réellement déposée à l'intérieur d'un volume défini

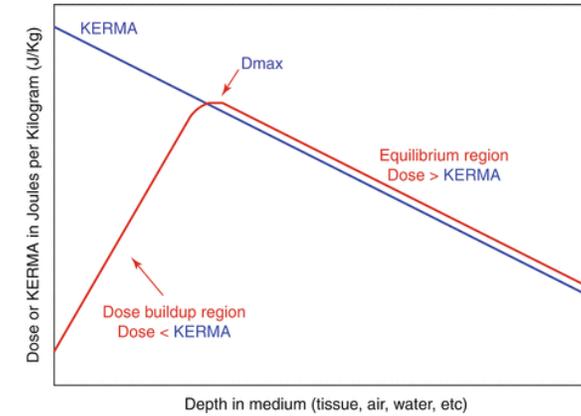
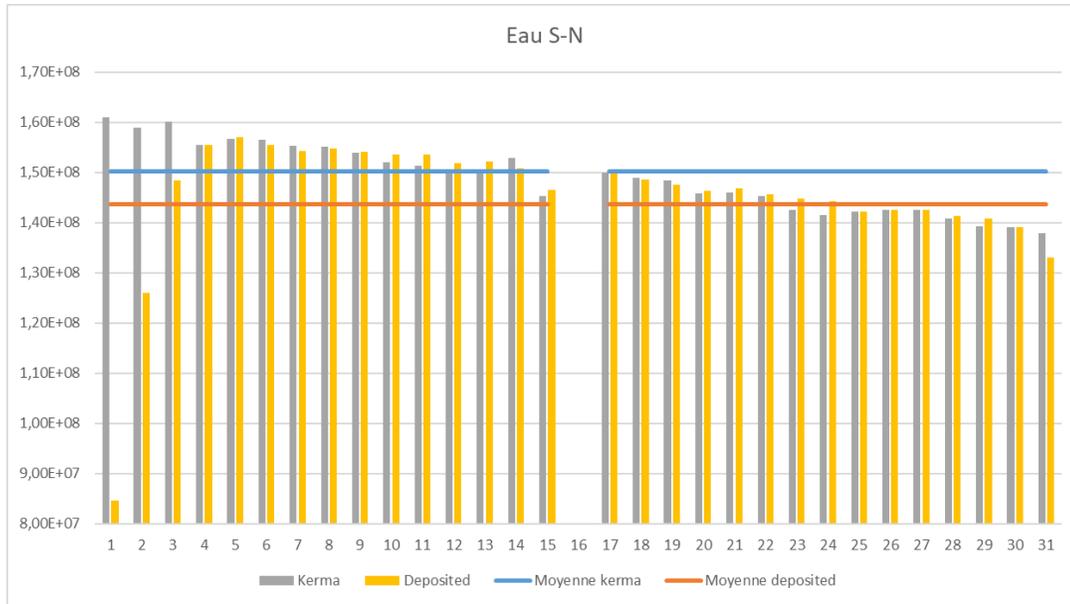
KERMA

- Kinetic Energy Realease per unit MAss
- Approximation de l'énergie déposée avec uniquement les photons
- Energie des photons passant par le volume défini
- L'énergie des particules secondaires est déposée localement

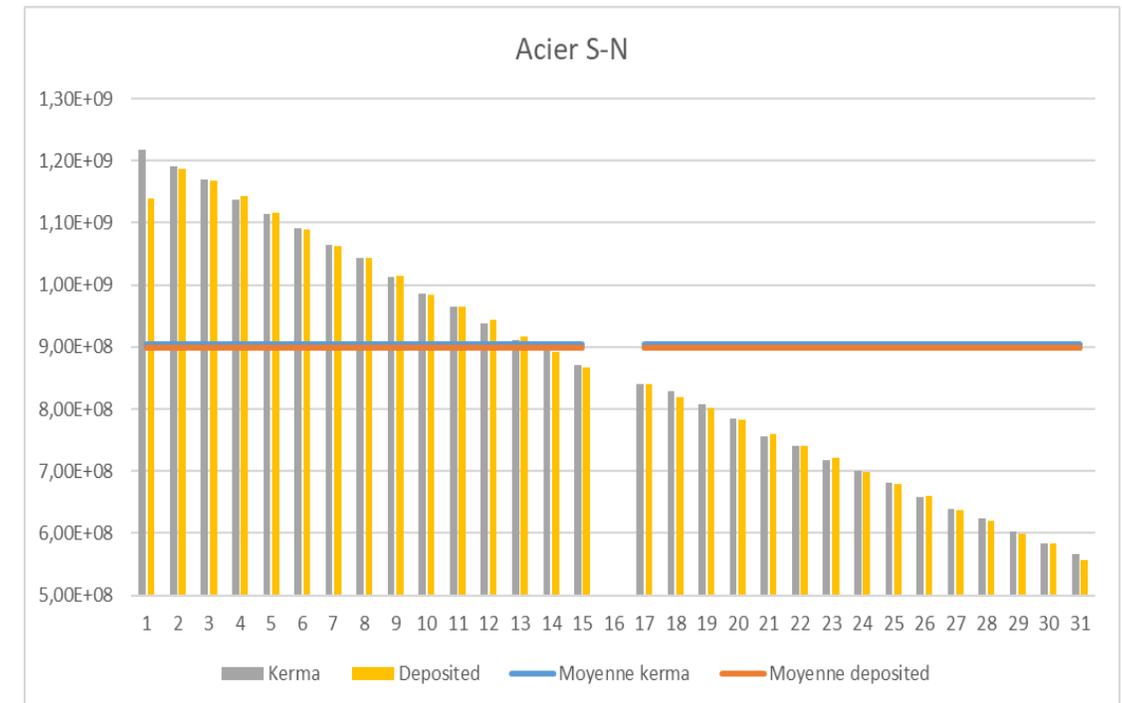
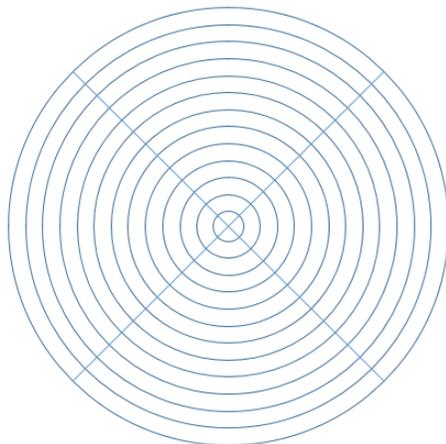
KERMA = Energie déposée SI équilibre électronique atteint
Grosse différence sur le temps de calcul (x2)



Irradiation homogène ? (1)



Source



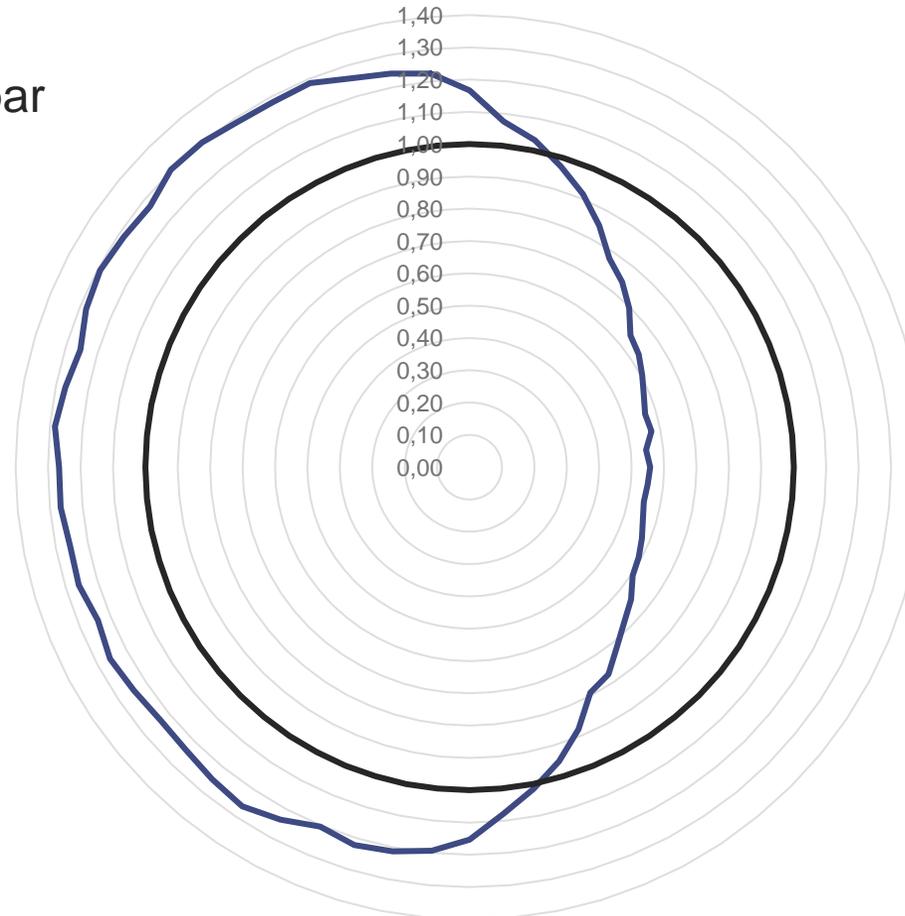
Irradiation homogène ? (2)

- Cylindre en acier de 3 cm de diamètre
- KERMA angulaire
- Rapport à la moyenne donnée par TRIPOLI-4®

Source



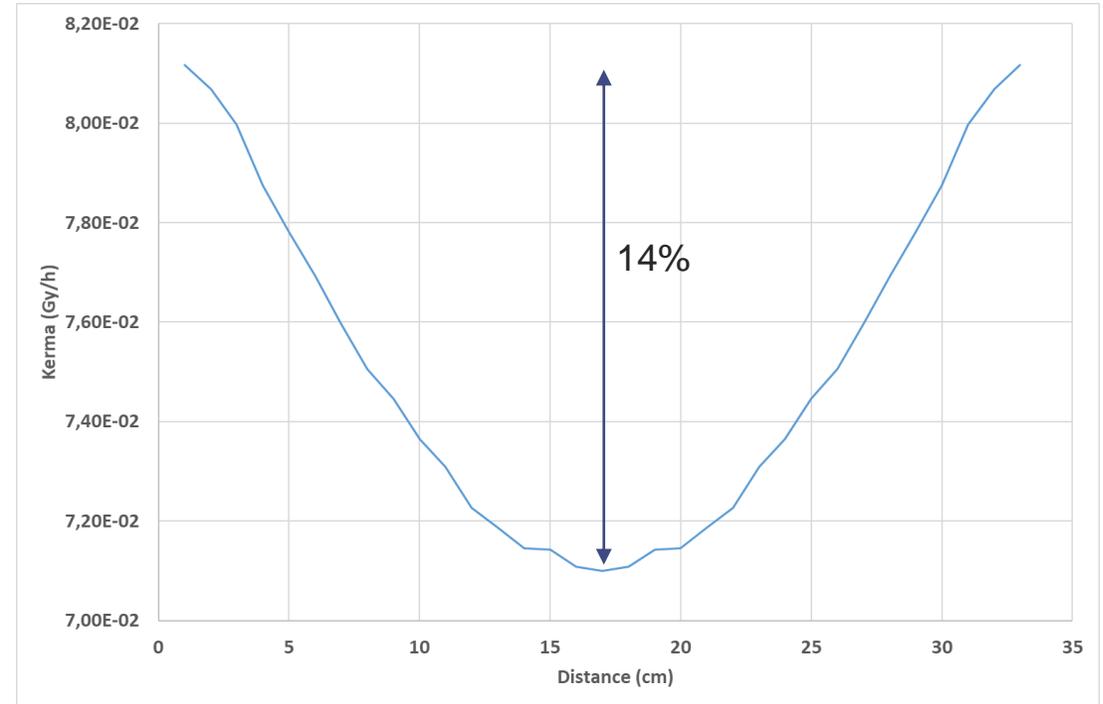
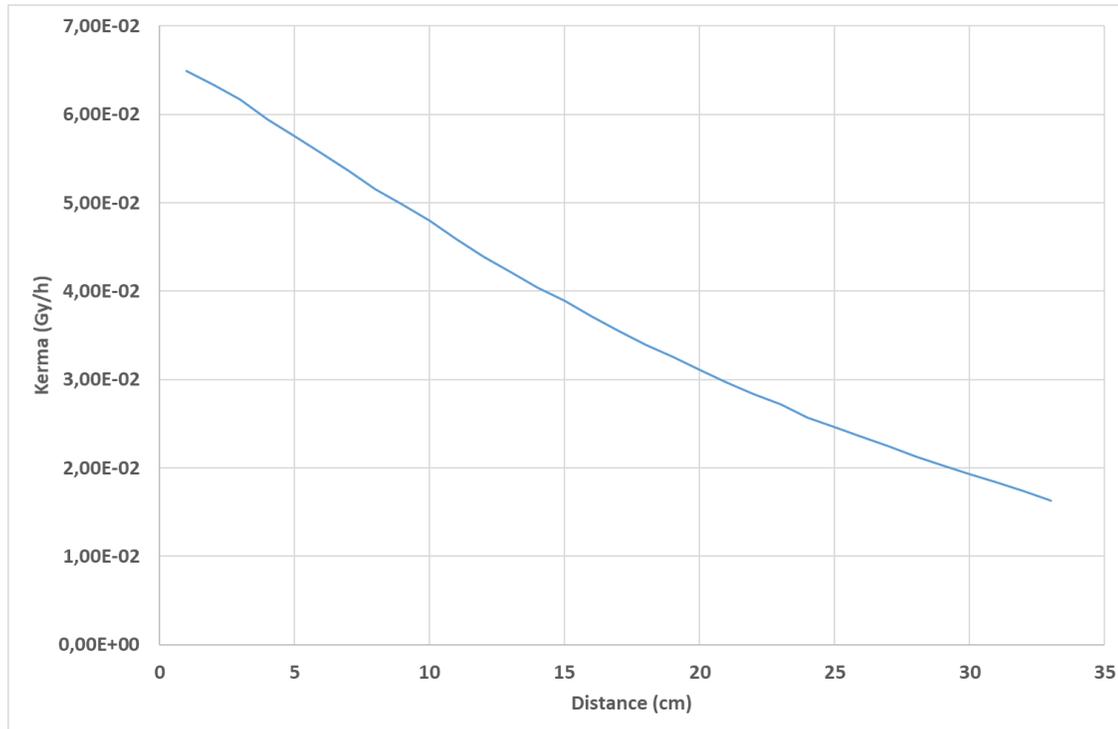
Sud



Nord

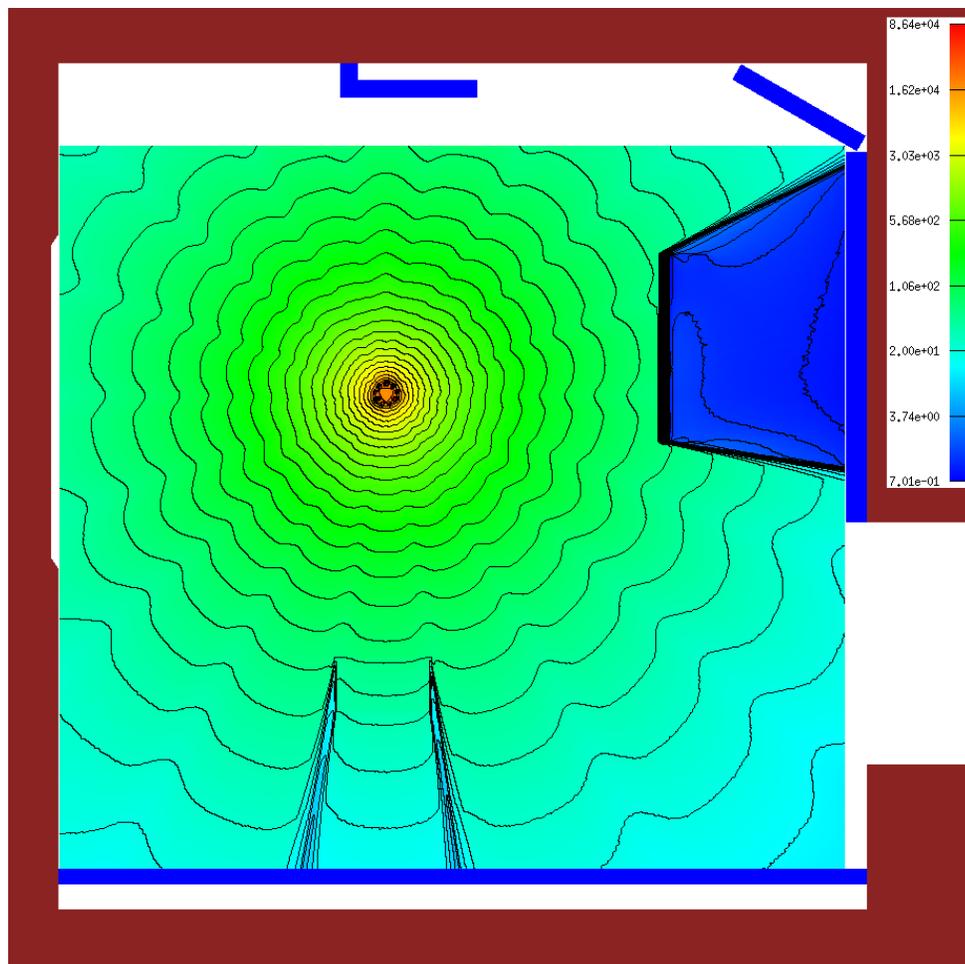
Irradiation d'un carton

Dimensions externes : 59 x 34 x 29 cm³
Épaisseur : 0,5 cm

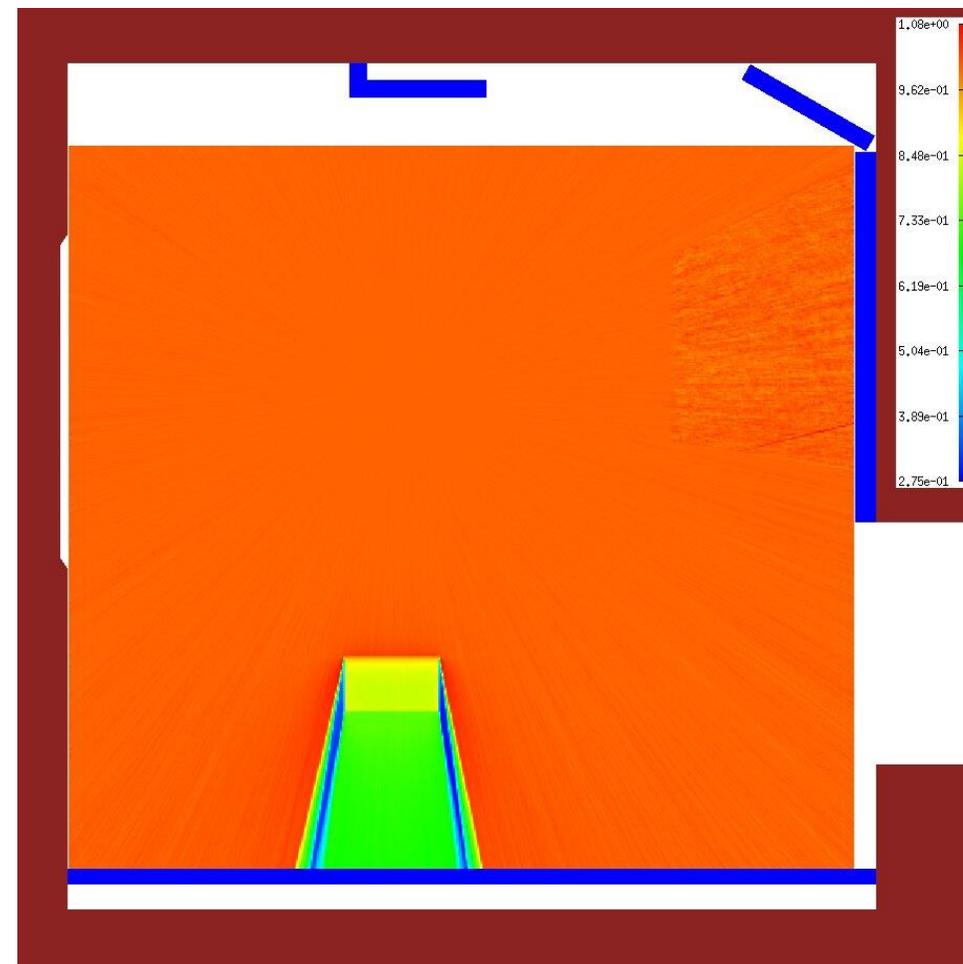


Intégralement rempli en papier
KERMA tous les cm

Dosimétrie PAGURE avec une boîte en inox vide

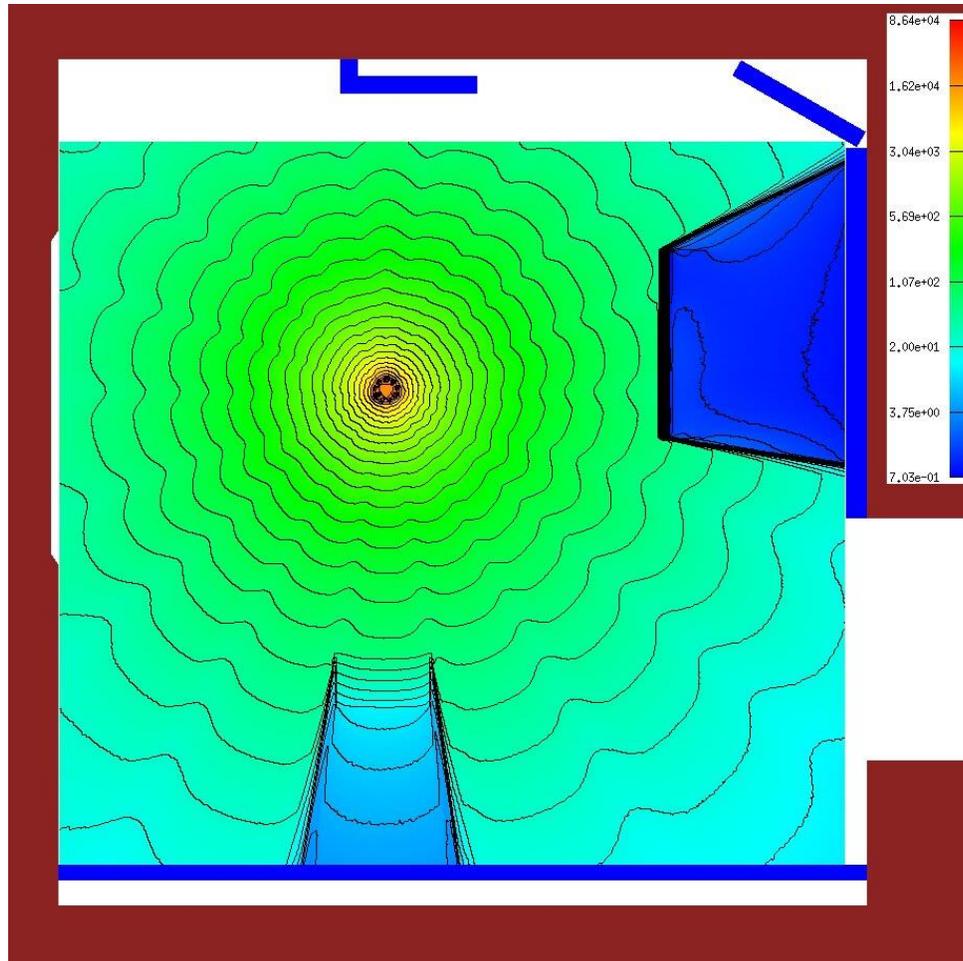


Nappe de débit de dose

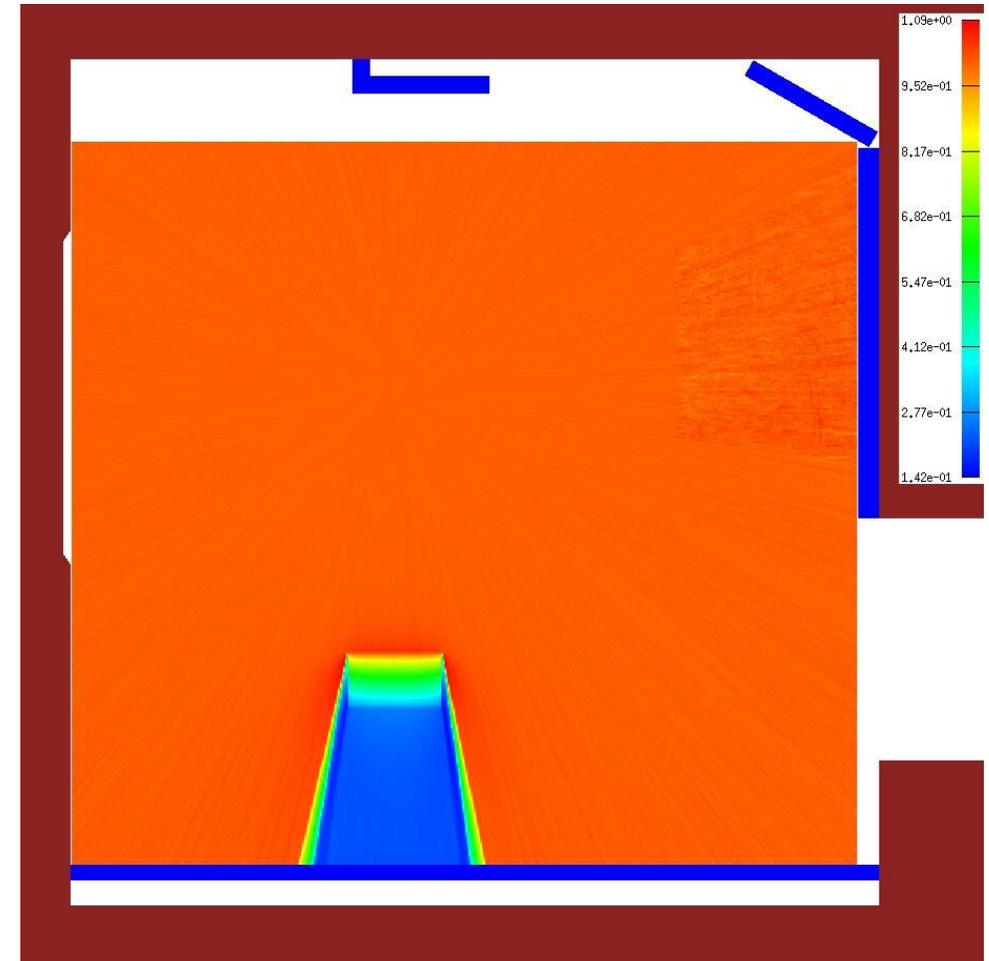


Rapport des débits de dose

Dosimétrie PAGURE avec une boîte en inox pleine



Nappe de débit de dose



Rapport des débits de dose



4. Conclusion

Bilan du stage

Réalisé durant ce stage :

- Modélisation de PAGURE sur TRIPOLI-4®
- Extension en 3D de la nappe de débit de dose
- Programme pour prédire le débit de dose de façon analytique

- Mesure sur place pour valider le modèle



Merci pour votre attention !

Remerciement à Stephane Bourganel, à toute la CP2C et au LABRA