







NOTE TECHNIQUE

Référence de la note	LNHB 2022-15
----------------------	--------------

TITRE : Aide à la conception de deux installations d'étalonnage en champs de rayonnement photon ou neutron

RÉSUMÉ : L'étude menée pour le compte du CEA-Cadarache a comme objectif l'évaluation des conditions d'étalonnage en champs de rayonnement photon et neutron pour les nouvelles installations du SPR, ainsi que les contraintes radiologiques générées et leur adéquation avec le zonage de radioprotection envisagé.

Mots-clés : débits équivalent de dose ambiant, sources ^{60}Co , ^{137}Cs et Am-Be, code Monte Carlo MCNP, étalonnage, radioprotection, installations SPR du CEA-Cadarache

O		Émission initiale		
IND.	DATE	OBJET		
	Auteur(s)	Vérificateur(s)	Chef de laboratoire	Chef du LNHB
Noms	V. Blideanu	J. Gouriou	A. Veres	Isabelle Aubineau-Lanièce
Dates	13/07/2022	18/07/2022	18.07.2022	22.07.2022
Signatures				

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	3
2	DONNÉES D'ENTREE ET HYPOTHESES.....	3
3	RESULTATS ET DISCUSSION.....	5
3.1	CALCUL DES SPECTRES AU POINT DE MESURE	5
3.1.1	<i>Installation utilisant la source de photons.....</i>	<i>5</i>
3.1.2	<i>Installation utilisant la source de neutrons</i>	<i>6</i>
3.2	CARTOGRAPHIES DES DÉBITS D'ÉQUIVALENT DE DOSE AMBIANT.....	8
4	CONCLUSIONS.....	10
5	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	11

1 INTRODUCTION

Le SPRE du centre CEA de Cadarache projette la mise en place dans de nouveaux locaux de deux installations destinées à la réalisation d'étalonnages dans des champs de rayonnement photons et neutrons.

La présente étude a deux objectifs principaux :

- La vérification du zonage radioprotection tel que défini pour les deux installations, qui impose une zone avec accès non-réglementé à l'extérieur avec des débits d'équivalent de dose ambiant nécessairement inférieurs à 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ (ou 80 $\mu\text{Sv/mois}$)
- L'estimation pour l'installation utilisant un champ de rayonnement neutron de l'influence du phénomène de diffusion sur les conditions d'étalonnage et de leur optimisation à cet égard

Les travaux réalisés consistent en la modélisation de la géométrie des deux installations et le transport en 3D des photons et des neutrons dans cette géométrie. Les débits de fluence pour ces deux types de particules sont calculés dans chaque position de la géométrie à partir des valeurs moyennées dans des volumes élémentaires de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ dont l'ensemble constitue une matrice de détection superposée à la géométrie de l'installation.

Les débits de fluence ainsi calculés sont ensuite convertis en débits d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec la prise en compte de l'énergie des particules en utilisant les valeurs des coefficients de conversion de l'ANSI/ANS 6.1.1 [1] pour les photons et de l'ICRP-74 [2] pour les neutrons. Cette dernière étape permet d'obtenir les cartographies en 3D des débits d'équivalent de dose ambiant dans l'ensemble de la géométrie modélisée. La figure ci-dessous présente les distributions des coefficients de conversion utilisés en fonction de l'énergie des particules.

Les calculs décrits ci-dessus ont été réalisés avec le code Monte-Carlo MCNP (version 6.2) [3] qui permet de simuler, en utilisant les bibliothèques des sections efficaces évaluées toutes les interactions des photons et des neutrons avec les noyaux constitutifs des matériaux considérés dans la modélisation des installations à étudier.

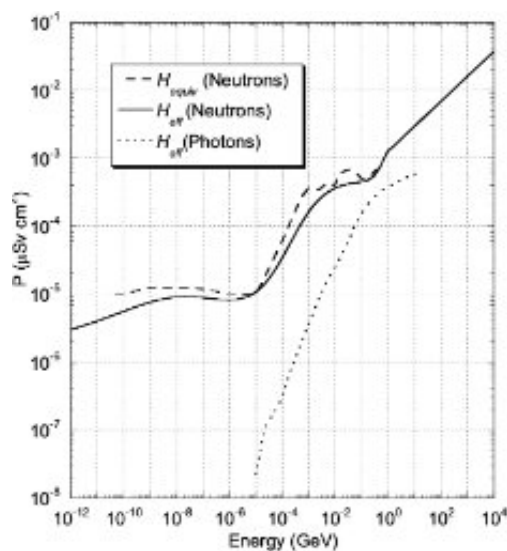


Figure 1 : Coefficients de conversion fluence-équivalent de dose ambiant pour les photons et les neutrons en fonction de leur énergie

2 DONNÉES D'ENTREE ET HYPOTHESES

Les plans détaillés du bâtiment destiné à accueillir les deux installations ont été fournis par le CEA-Cadarache, ainsi que la répartition dans les salles des deux installations : celle utilisant le champ de rayonnement photons au rez-de-chaussée, l'installation utilisant le champ de rayonnement neutrons occupera le premier étage.

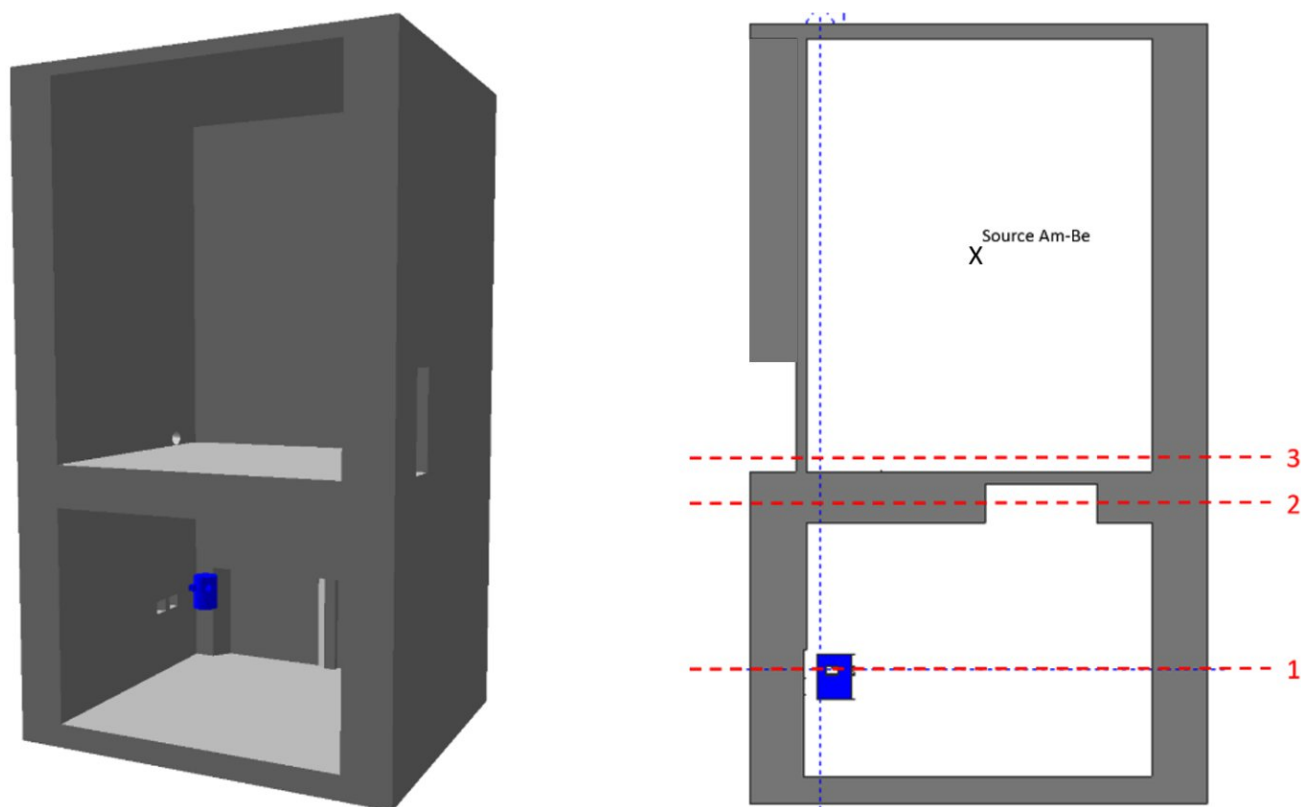
Le champ de rayonnement photons sera généré par un irradiateur type multi-sources constitué d'un blindage en plomb pouvant accueillir des sources de ^{137}Cs et ^{60}Co . Le blindage comporte sur un côté une ouverture avec un collimateur permettant de définir un faisceau de photons conique dans un angle solide de 20° . Pour le besoin de cette étude il a été considéré une source ponctuelle de ^{60}Co afin de prendre en compte le cas le plus pénalisant au regard des énergies des photons générés (1,1732 et 1,3325 MeV), plus élevées que pour la source de ^{137}Cs . La valeur de l'activité de la source de ^{60}Co considérée est 1,48 TBq.

Une source de Am-Be sera utilisée pour générer le champ de rayonnement neutrons. Cette source n'est pas collimatée, générant ainsi un champ de rayonnement uniforme en 4π . L'activité maximale de la source envisagée est de 60 GBq pour la désintégration de l' ^{241}Am ce qui correspond à une intensité de $3,96 \times 10^6$ neutrons/seconde en prenant en compte la section efficace de la réaction $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$.

La Figure 2 montre la géométrie modélisée. Au rez-de-chaussée, la source de ^{60}Co est placée dans l'irradiateur de telle sorte qu'elle soit positionnée à une hauteur de 1,90 m et que le faisceau défini par le collimateur soit dirigé en diagonale vers un coin de la salle assurant ainsi la distance la plus élevée possible entre la source et les murs en béton (voir plan de coupe n°1). Les murs de la salle de l'irradiateur photons ont une épaisseur de 1 m et ne comportent pas de discontinuités majeures, cette salle étant équipée par ailleurs d'une porte lourde en béton. On note cependant deux régions avec une épaisseur de béton plus faible au niveau du mur de gauche et deux trous dans le mur derrière l'irradiateur à 1,40 m du sol.

Le plafond séparant les deux étages comporte trois régions avec une épaisseur de béton plus faible (0,20 m) et est traversé par quatre trous situés aux angles formés par les murs latéraux (voir plan de coupe n°2).

La salle au premier étage qui accueillera la source de neutrons dispose également de murs latéraux en béton de 1 m d'épaisseur, à l'exception d'une région à gauche avec une épaisseur du béton de 0,18 m sur une hauteur de 2 m et une largeur de 1 m (voir plan de coupe n°3). Un trou oblique horizontal existe également au niveau du sol ainsi qu'un espace de 0,7 m de largeur et de 2 m de hauteur pour permettre l'accès à la salle qui ne comporte pas de porte à ce jour. Le plafond de cette salle qui constitue également le toit du bâtiment a également une épaisseur de béton plus faible de 0,27 m. La source de neutrons est positionnée au centre de la salle afin qu'elle soit éloignée le plus possible des structures en béton dans les trois directions et de limiter autant que possible l'effet de diffusion des neutrons avec celles-ci. La source se trouve ainsi à une distance de 3,17 m des murs latéraux et à une hauteur de 3,85 m.



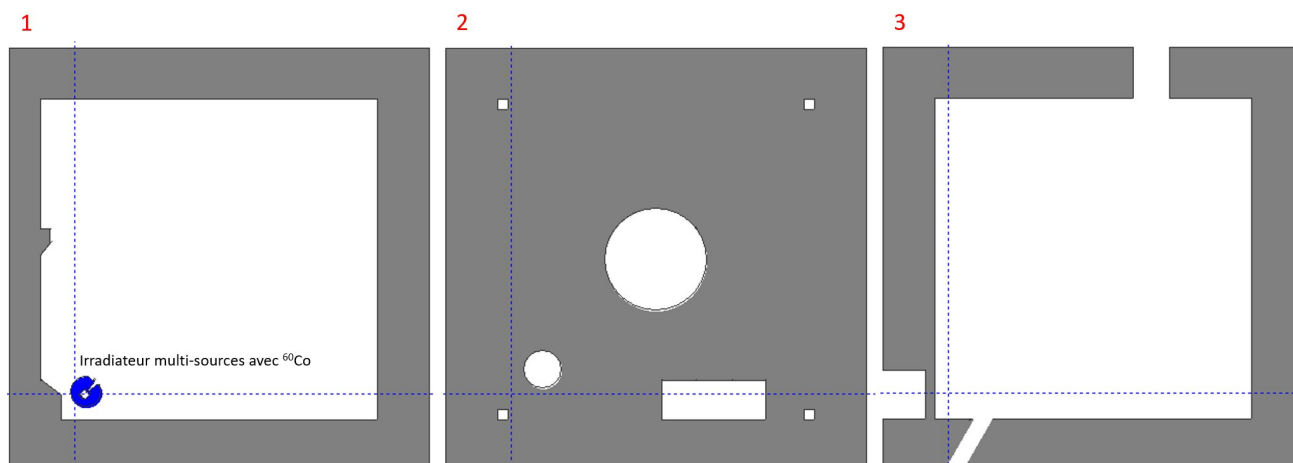


Figure 2 : Modélisation de la géométrie des deux installations du SPR CEA-Cadarache pour les calculs de transport avec le code MCNP

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 CALCUL DES SPECTRES AU POINT DE MESURE

Le rayonnement généré par les deux sources a été transporté en 3D dans la géométrie modélisée permettant ainsi de simuler les conditions expérimentales des étalonnages qui seront réalisés.

3.1.1 Installation utilisant la source de photons

Pour la source de photons, un détecteur (sphère de 5 cm de rayon) a été positionné dans le faisceau défini par le collimateur à une distance de 1 m de la source. Le spectre des photons calculé dans cette configuration est présenté dans la Figure 3. On constate la présence d'un fond continu ayant principalement pour l'origine les diffusions dans le collimateur en plomb et présentant quelques éléments de structure liés aux raies de fluorescence et aux annihilations $e^- e^+$ (pic à 0,511 MeV). Le spectre au point de mesure est néanmoins largement dominé par les deux raies issues de la désintégration du ^{60}Co , la valeur du débit de fluence des photons correspondante étant au moins trois ordres de grandeur supérieure en amplitude au fond présent aux énergies plus faibles.

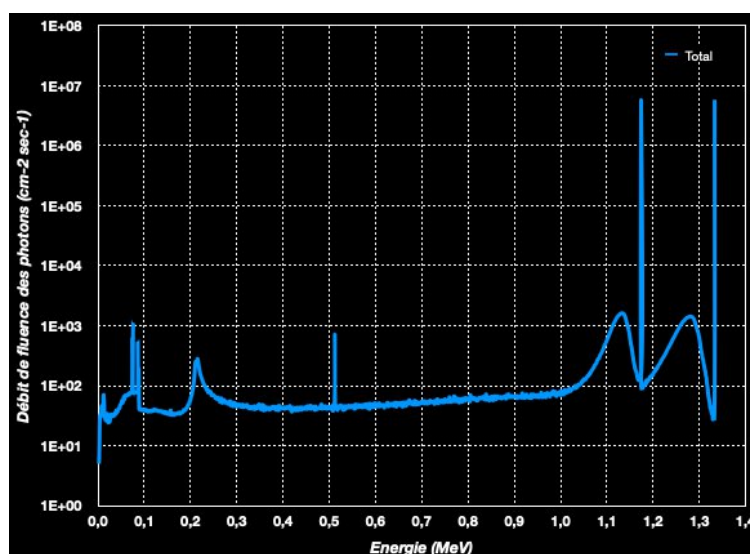


Figure 3 : Spectre des photons calculé au point de mesure à 1 m de la source de ^{60}Co

3.1.2 Installation utilisant la source de neutrons

De façon similaire, le spectre des neutrons a été calculé dans un premier temps dans un détecteur (sphère de 5 cm de rayon) positionné à une distance de 1 m de la source. Afin d'augmenter la distance par rapport aux murs latéraux, le détecteur n'a pas été placé sur un axe perpendiculaire au mur mais sur la diagonale de la salle. Enfin, plusieurs autres détecteurs à des distances différentes ont été utilisés afin d'étudier l'importance du phénomène de diffusion en fonction de la distance par rapport à la source placée au centre de la salle. La Figure 4 ci-dessous illustre la configuration de calcul mise en place.

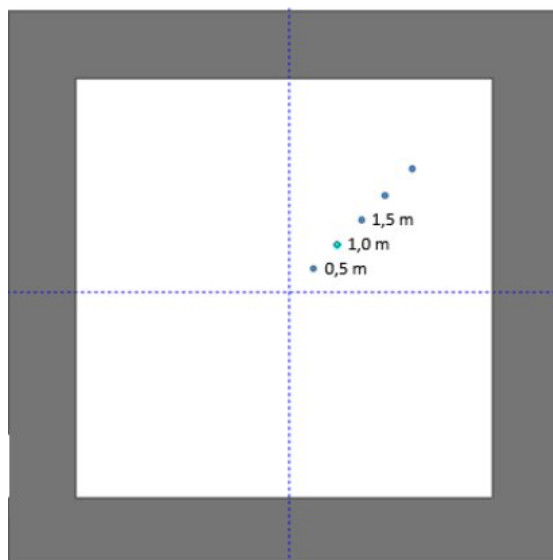


Figure 4 : Position dans la salle des détecteurs utilisés pour le calcul des spectres des neutrons à plusieurs distances de la source d'Am-Be

Le spectre des neutrons calculé au point de mesure à 1 m de la source est présenté dans la Figure 5 par la courbe en bleu. Il correspond au débit de fluence total vu par le détecteur, alors qu'en vert est représenté le spectre direct à la même distance, tel qu'émis par la source en accord avec les recommandations de la norme ISO 8529 [4] et donc sans la contribution des diffusions dans l'air et dans les structures en béton. On constate la présence dans le spectre total d'une contribution qui se rajoute aux basses énergies. Afin de mieux identifier les énergies des neutrons à l'origine de cette contribution, les mêmes spectres ont été également représentés avec une échelle en énergie logarithmique de type « lethargy » qui permet d'affirmer que la plupart des neutrons diffusés arrivant dans le détecteur sont thermalisés.

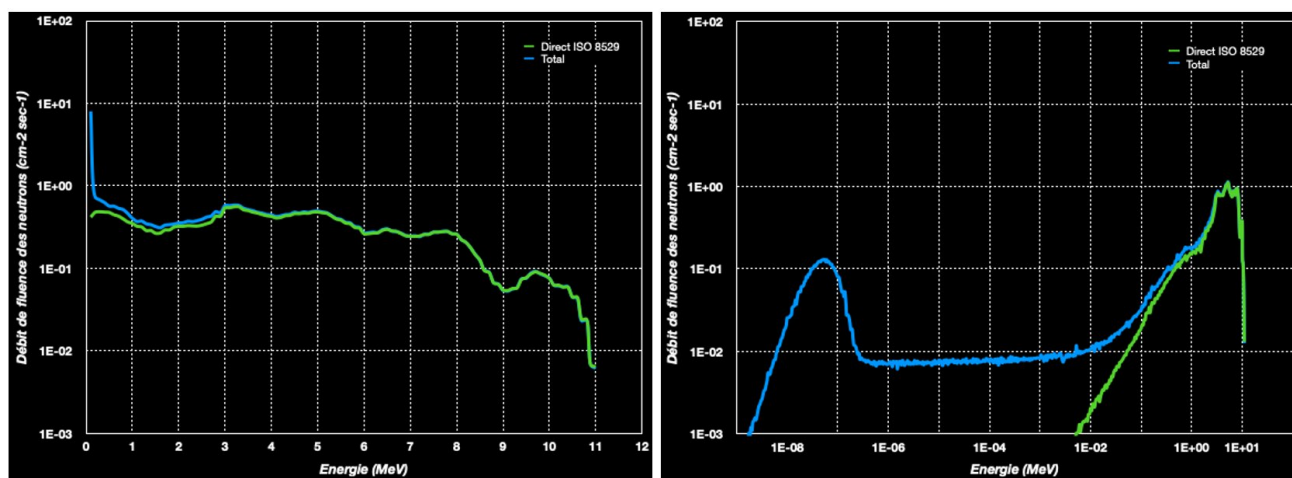


Figure 5 : Spectres des neutrons calculés au point de mesure à 1 m de la source permettant d'identifier la contribution du phénomène de diffusion (échelle en énergie linéaire à gauche et logarithmique à droite)

La norme ISO 8529 stipule qu'une installation d'étalonnage dans des champs de rayonnement neutronique doit être conçue de manière à ce que la contribution des neutrons diffusés soit la plus faible possible et que cette contribution ne doit pas dépasser dans tous les cas 40% de la fluence totale dans le détecteur. Afin de vérifier cette condition pour l'installation envisagée par le CEA de Cadarache, le tableau ci-dessous résume les valeurs calculées pour le débit de fluence et pour le débit d'équivalent de dose ambiant au point de mesure à 1 m (intégration des spectres de la Figure 5) et à 2 m de la source. La contribution des neutrons diffusés a été obtenue pour les deux configurations par la soustraction de la composante directe de la valeur totale. On constate que pour le débit de fluence à une distance de 1 m, la contribution des neutrons diffusés s'élève à 24% du débit total ce qui reste inférieur aux 40% exigés par la norme. Pour le débit d'équivalent de dose ambiant, cette contribution est encore plus faible, de 7,3%, ce qui s'explique par le fait que les neutrons thermiques, majoritairement présents dans la contribution du diffusé, ont un impact dosimétrique inférieur à celui des neutrons rapides (voir Figure 1). Enfin, l'énergie moyenne du spectre se trouve diminuée, passant de 4,06 MeV, qui correspond au spectre initial de la source, à 3,33 MeV pour le spectre total calculé au point de mesure.

Les valeurs calculées à une distance de 2 m de la source mettent en évidence la dégradation des conditions de mesure avec la distance source-détecteur. La contribution des neutrons diffusés représente dans ce cas plus de la moitié du débit de fluence total au point de mesure et 23,4% du débit d'équivalent de dose.

		Direct	Total	Contribution du diffusé
Détecteur à 100 cm	Fluence (n/cm ² /sec)	3,18E+01	4,19E+01	24,0 %
	H*(10) (Sv/h)	4,50E-05	4,85E-05	7,3 %
	Energie moyenne (MeV)	4,06	3,33	
Détecteur à 200 cm	Fluence (n/cm ² /sec)	7,96E+00	1,81E+01	56,0 %
	H*(10) (Sv/h)	1,12E-05	1,47E-05	23,4 %
	Energie moyenne (MeV)	4,06	2,11	

Tableau 1 : Débits de fluence et d'équivalent de dose ambiant calculés aux points de mesure à 1 m et à 2 m de la source de neutrons

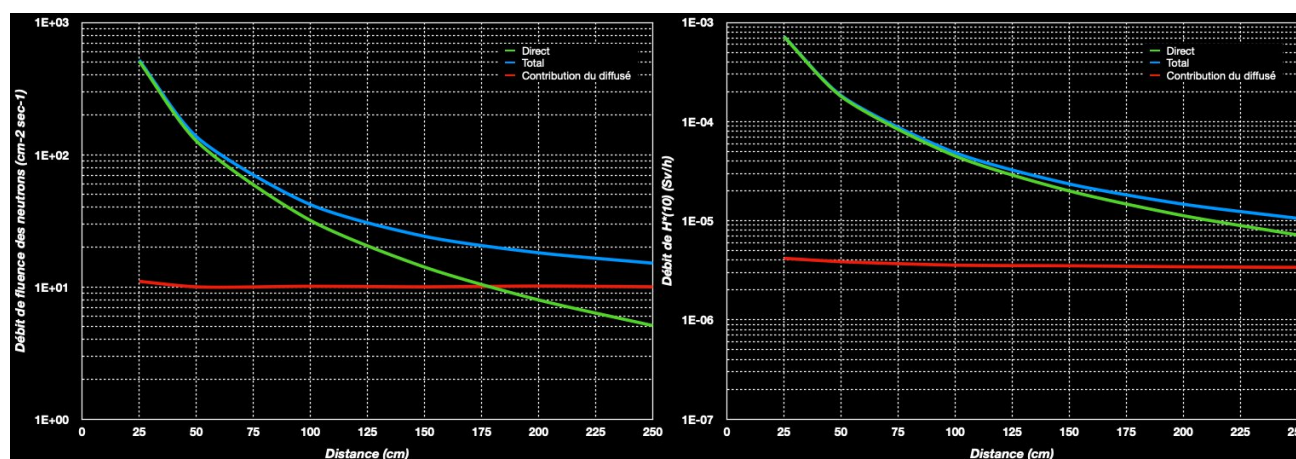


Figure 6 : Variation avec la distance source-détecteur du débit de fluence (à gauche) et du débit d'équivalent de dose ambiant (à droite)

Cet effet est mis en évidence plus clairement dans la Figure 6 qui présente la variation avec la distance par rapport à la source du débit de fluence total et du débit d'équivalent de dose ambiant dans le détecteur. Les contributions des neutrons diffusés sont représentées par la courbe rouge et sont pratiquement indépendantes de la distance source-détecteur. Les valeurs totales, qui incluent les neutrons provenant de la source et les diffusés, diminuent avec la distance sous l'effet prépondérant de l'atténuation selon la loi $1/d^2$ de la contribution directe des neutrons de la source. Ainsi, pour des distances source-détecteur importantes, la contribution directe des neutrons provenant de la source étant de plus en plus faible, la contribution dans le détecteur des neutrons diffusés devient prépondérante.

3.2 CARTOGRAPHIES DES DÉBITS D'ÉQUIVALENT DE DOSE AMBIANT

Les cartographies en 3D calculées pour les deux installations sont présentées dans la Figure 7. Afin de faciliter la visualisation, les échelles ont été coupées à une valeur minimale de 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ (correspondant à la limite haute d'une zone avec accès non-réglementé) et par conséquent les débits d'équivalent de dose ambiant inférieurs à cette valeur n'apparaissent pas dans les cartographies représentées.

L'installation en rez-de-chaussée utilisant la source de ^{60}Co dans son irradiateur en plomb génère un débit d'équivalent de dose maximal au niveau de la source de l'ordre de 100 Sv/h. Les valeurs diminuent cependant rapidement dans la direction du faisceau, sous l'effet de la distance par rapport à la source et de l'épaisseur de béton traversée pour atteindre des niveaux inférieurs à 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ partout autour de l'installation. Une exception est à noter au niveau des passages dans le mur en bas de la figure qui créent une légère fuite de photons à cet endroit, générant un débit d'équivalent de dose maximal de 1 $\mu\text{Sv/h}$ à l'extérieur. L'utilisation d'une plaque en plomb de quelques centimètres d'épaisseur permettrait facilement de diminuer cette valeur à des niveaux inférieurs à 0,5 $\mu\text{Sv/h}$.

Une conclusion similaire peut être tirée pour l'installation utilisant la source de neutrons située au premier étage. La zone de fuite la plus significative se situe dans cette configuration au niveau de l'accès à la salle, modélisé comme une ouverture de 0,7 m de largeur et de 2 m de hauteur dans le mur en béton (conformément à la modélisation décrite dans la section 2). Le débit d'équivalent de dose ambiant maximal calculé dans cette région atteint 3 $\mu\text{Sv/h}$. Un calcul supplémentaire a été réalisé en comblant cette ouverture avec soit une épaisseur de 5 cm de bois simulant la présence d'une porte ordinaire, ou 5 cm, 10 cm de polyéthylène. La porte en bois ne permettrait qu'une faible diminution du débit d'équivalent de dose à 2,3 $\mu\text{Sv/h}$. Un effet plus important pourrait être obtenu avec le polyéthylène, les valeurs étant diminuées à 1,4 $\mu\text{Sv/h}$ et 0,7 $\mu\text{Sv/h}$ respectivement pour 5 et 10 cm d'épaisseur.

La réaction à l'origine de la production des neutrons par une source Am-Be s'accompagne de l'émission d'un photon énergétique de 4,44 MeV :



En faisant l'hypothèse que la source produit autant de photons que de neutrons, le débit d'équivalent de dose ambiant correspondant aux photons de la source a une valeur maximale de 1 mSv/h à l'intérieur de la salle (pour 26 mSv/h provenant de neutrons) et atteint des valeurs négligeables à l'extérieur.

De plus, des photons secondaires sont également produits par des réactions (n, γ). Le débit d'équivalent de dose ambiant correspondant a été également calculé et les résultats montrent une contribution négligeable (inférieure à 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ à l'intérieur de la salle).

Les irradiations avec la source de photons en rez-de-chaussée n'ont pas d'impact radiologique sur la salle au premier étage. A l'inverse, lorsque l'installation utilisant la source de neutrons est en fonctionnement, ceci a un léger impact sur la salle en rez-de-chaussée, cependant limité à une zone tout en hauteur de celle-ci au niveau du plafond (valeur maximale calculée du débit d'équivalent de dose ambiant de l'ordre de 0,8 $\mu\text{Sv/h}$).

Au niveau du toit du bâtiment (au-dessus du plafond de la salle au premier étage), le débit d'équivalent de dose ambiant calculé atteint une valeur maximale de l'ordre de 0,4 $\mu\text{Sv/h}$.

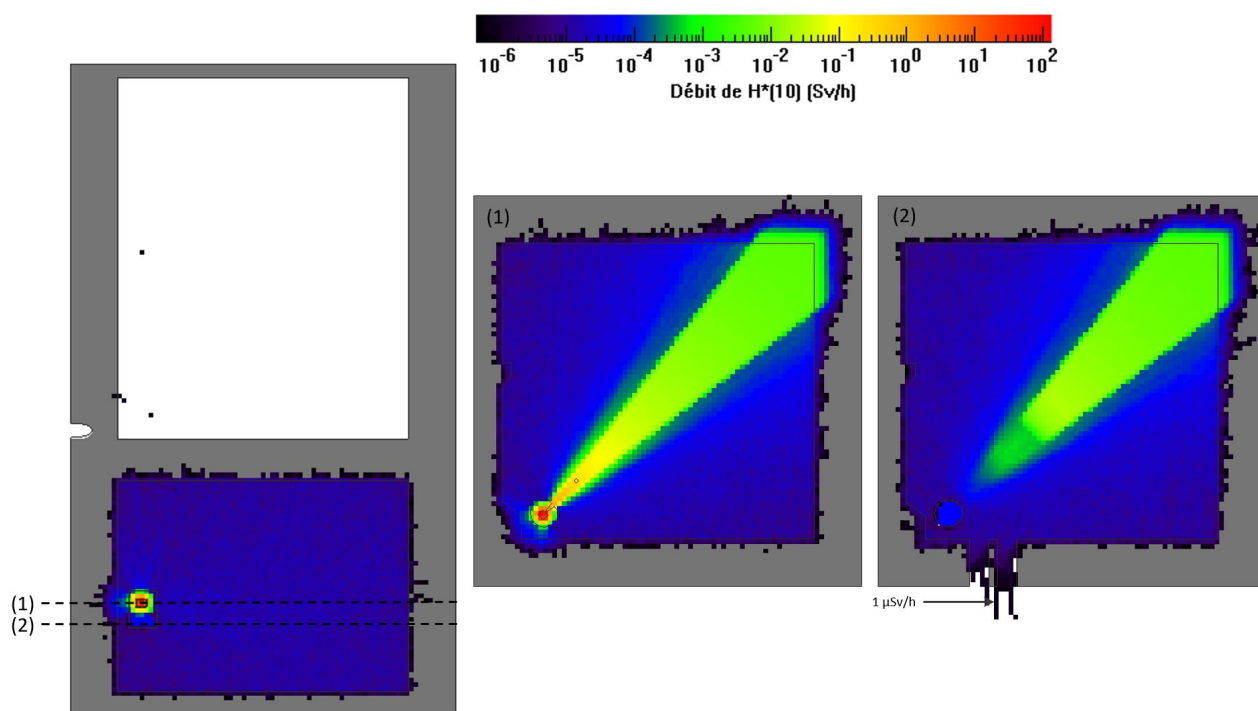


Figure 7a : Cartographies des débits d'équivalent de dose ambiant pour l'installation utilisant la source de photons

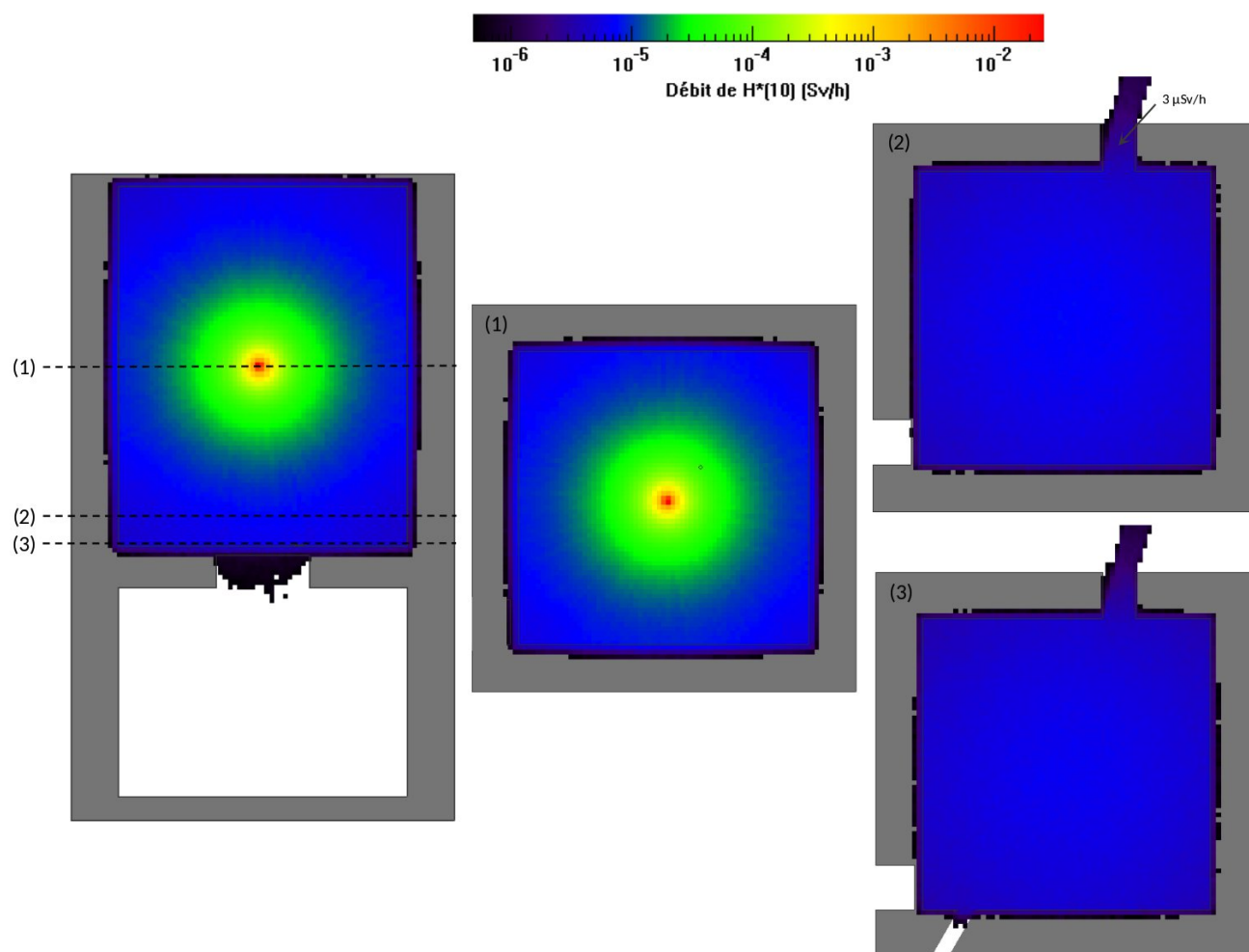


Figure 7b : Cartographies des débits d'équivalent de dose ambiant pour l'installation utilisant la source de neutrons

4 CONCLUSIONS

La présente étude a permis d'évaluer les conditions d'étalonnage pour les deux futures installations SPRE du centre CEA de Cadarache. Les calculs réalisés ont montré que les exigences des normes applicables relatives à la contribution des neutrons diffusés pour la réalisation d'étalonnages en champ de rayonnement neutronique pourront être satisfaites pour des distances sources détecteur inférieures à 1,5 m. Il faut noter cependant que la détermination précise de cette contribution doit se faire directement auprès de l'installation par une méthode semi-empirique ou basée sur l'utilisation d'un cône d'ombre [5].

Le zonage radioprotection visé (zone publique autour des salles) est généralement respecté pour les deux installations. Il existe pour chacune des installations une exception avec des légers dépassements de la valeur cible qui est de $0,5 \mu\text{Sv/h}$. Cet aspect concerne cependant des zones restreintes et très localisées au niveau de certaines discontinuités présentes dans les murs en béton. La mise en place relativement aisée des protections biologiques supplémentaires dans ces régions permettrait de lever cette dernière difficulté. Cet ajout de blindages peut par ailleurs s'avérer non indispensable, dans la mesure où le critère de $80 \mu\text{Sv/mois}$ peut être retenu et satisfait avec une durée mensuelle d'utilisation des installations adéquate.

5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] American National Standard: neutron and gamma-ray flux-to-dose rate factors. United States, Report number ANSI/ANS-6.1.1-1977
- [2] Conversion coefficients for use in radiological protection against external exposure, ICRP Report 74. Ann. ICRP 26(3/4). Elsevier, Oxford (1996)
- [3] C.J. Werner, et al., "MCNP6.2 Release Notes", Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-18-20808 (2018)
- [4] ISO 8529-1 :2001 Rayonnements neutroniques de référence- Partie1 : Caractéristiques et méthodes de production
- [5] ISO 8529-2 :2000 Rayonnements neutroniques de référence- Partie 2 : Concepts d'étalonnage des dispositifs de radioprotection en relation avec les grandeurs fondamentales caractérisant le champ de rayonnement