

---

# Simulations Monte Carlo des futurs bunkers proton du CHUV

---

Destination : Interne

Version : 05.02.2016

Auteur : XXXXXXXXXX

---

## Table

<b>1. Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Définition des objectifs des simulations Monte Carlo</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Description des géométries considérées dans les simulations</b> .....	<b>4</b>
3.1. Modèle des bunkers protons.....	4
3.2. Géométrie de la tête du faisceau de protons, et des fantômes d'eau ou de fer .....	6
3.3. Composition de certains matériaux considérés dans nos simulations .....	7
<b>4. Modélisation de la source de proton</b> .....	<b>7</b>
<b>5. Description des scénarios de simulation Monte Carlo</b> .....	<b>8</b>
5.1. Etude du SOBP .....	8
5.2. Calcul de l'activation des collimateurs et des compensateurs.....	8
5.3. Calcul de l'équivalent de dose ambiant à l'intérieur et à l'extérieur du bunker de protonthérapie	8
5.4. Calcul de l'activation dans les murs, et dans l'air.....	9
<b>6. Résultats des simulations Monte Carlo</b> .....	<b>9</b>
6.1. Etude de la modulation du pic de Bragg (SOBP) .....	9
6.2. Estimation des sections efficaces de production de radio-isotopes considérées dans GEANT4 et FLUKA	12
6.3. Calcul de l'activation de la tête du faisceau .....	14
6.4. Calcul de l'équivalent de dose ambiant H*(10).....	23
6.4.1. Comparaisons Geant4 et FLUKA .....	23
6.4.2. Comparaisons cible de Fer et fantôme d'eau .....	25
6.4.3. Comparaisons avec les simulations MCNP de J. Siebers .....	27
6.4.4. Cartes et courbes d'isodose de l'équivalent de dose ambiant .....	28
6.4.5. Calcul de l'épaisseur des murs.....	32
6.4.6. Etude de la rétrodiffusion .....	41
6.4.7. Impact des trous de l'ancrage des axes du Mevion S250.....	43
6.4.8. Calcul de l'influence de la perte cyclotron .....	44
6.4.9. Influence du type de mur sur la dose H*(10) .....	45
6.4.10. Etude de solution "smart" de murs .....	46
6.4.11. Utilisation de portes blindées .....	49
6.4.12. Impacts des trous d'aération au dessus des portes blindées .....	53
6.4.13. Impacts des conduites dans les murs .....	54
6.4.14. Influence des alcôves dans le mur extérieur de la chicane .....	55
6.4.15. Variation de la dose à travers les murs de l'entrée du bunker.....	56

---

<b>6.5.</b>	<b>Calcul de l'activation de l'air, de l'eau et des murs .....</b>	<b>57</b>
6.5.1.	Activation du béton dans les murs .....	58
6.5.2.	Influence des impuretés de $^{59}\text{Co}$ et $^{151}\text{Eu}$ sur l'activation des murs .....	61
6.5.3.	Activation des barres de fer et d'acier dans les murs.....	62
6.5.4.	Activation de la terre et de la silice dans les murs .....	65
6.5.5.	Activation de l'eau dans les murs .....	68
6.5.6.	Activation de l'air .....	71
6.5.7.	Calcul de l'activation de l'eau près du faisceau .....	73
<b>6.6.</b>	<b>Calcul de l'ionisation de l'air .....</b>	<b>74</b>
<b>7.</b>	<b>Résumé et conclusions .....</b>	<b>75</b>
<b>8.</b>	<b>Références .....</b>	<b>76</b>

## 1. Introduction

Dans le cadre de la mise à l'enquête de l'extension du centre de radiothérapie du CHUV, l'IRA a été mandaté pour valider les dimensions des murs de deux nouveaux bunkers de protonthérapie afin que ces bunkers répondent aux normes légales de sécurité de la radioprotection (débit d'équivalent de dose maximal de 20  $\mu\text{Sv}$ /semaine pour zone publique et 100  $\mu\text{Sv}$  /semaine pour zone contrôlée). Afin de mener à bien cette étude nous avons calculé les débits d'équivalent de dose ambiants  $H^*(10)$  par simulation Monte Carlo en utilisant FLUKA et GEANT4 [1,2]. Il nous a aussi été demandé de calculer l'activation de certains éléments de la géométrie par le faisceau de protons. Dans ce rapport nous présentons les résultats de notre étude.

## 2. Définition des objectifs des simulations Monte Carlo

Les objectifs principaux des simulations Monte Carlo sont les suivants :

- Calculer la modulation du pic de Bragg (« Spread of Bragg Peak » SOBP) par des absorbeurs de carbone afin de déterminer la fluence de proton nécessaire pour obtenir une dose absorbée donnée au niveau de la tumeur ;
- Calculer l'activation des collimateurs et compensateurs par le faisceau de protons afin d'assister le service de radioprotection dans la définition des dimensions optimales des locaux de stockages, des périodes maximales de stockage et des blindages nécessaires pour ces éléments ;
- Calculer l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  dans un modèle précis des nouveaux bunkers protons pour des conditions extrêmes d'utilisation du centre de protonthérapie à 1000 Gy/semaine;
- Déterminer d'après les résultats des simulations Monte Carlo l'épaisseur minimale nécessaire des murs pour garantir un débit de dose inférieur à la limite légale en zone contrôlée de 100  $\mu\text{Sv}$ /semaine pour les murs extérieurs et 20  $\mu\text{Sv}$ /semaine pour le mur de fond;
- Étudier l'avantage qu'il y aurait d'utiliser du béton baryté au lieu du béton classique ;
- Étudier la possibilité d'utiliser des solutions smart de prémur pour optimiser l'épaisseur des murs ;
- Calculer le niveau d'activation du béton, de l'eau, des barres de fer, et de la terre dans les murs ;
- Calculer le niveau d'activation de l'air dans le bunker ;
- Calculer le niveau d'activation de l'eau près du cyclotron.

### 3. Description des géométries considérées dans les simulations

Les différents types de géométrie qui ont été considérés dans les simulations, sont présentés ci-dessous.

#### 3.1. Modèle des bunkers protons

Nous avons reçu de l'architecte A. Moruzzi des plans 3D et 2D précis des bunkers proton. Le modèle 3D au format IFC a été visualisé au moyen du logiciel « Solibri model viewer » pour obtenir les dimensions et formes des différents éléments géométriques du bunker. La Figure 1 représente une prise de vue du bunker obtenue avec ce logiciel. La majeure partie des éléments géométriques présents dans le modèle architectural a été modélisée dans GEANT4 sous forme de fichier au format GDML. Certains détails ont été négligés vu leur faible impact sur le calcul du rayonnement ambiant. Les Figures 2 et 3 visualisent le bunker proton comme modélisé dans GEANT4. Ce modèle a aussi été implémenté dans FLUKA à l'aide d'un programme qui converti directement les fichiers GEANT4 GDML en fichiers input FLUKA.

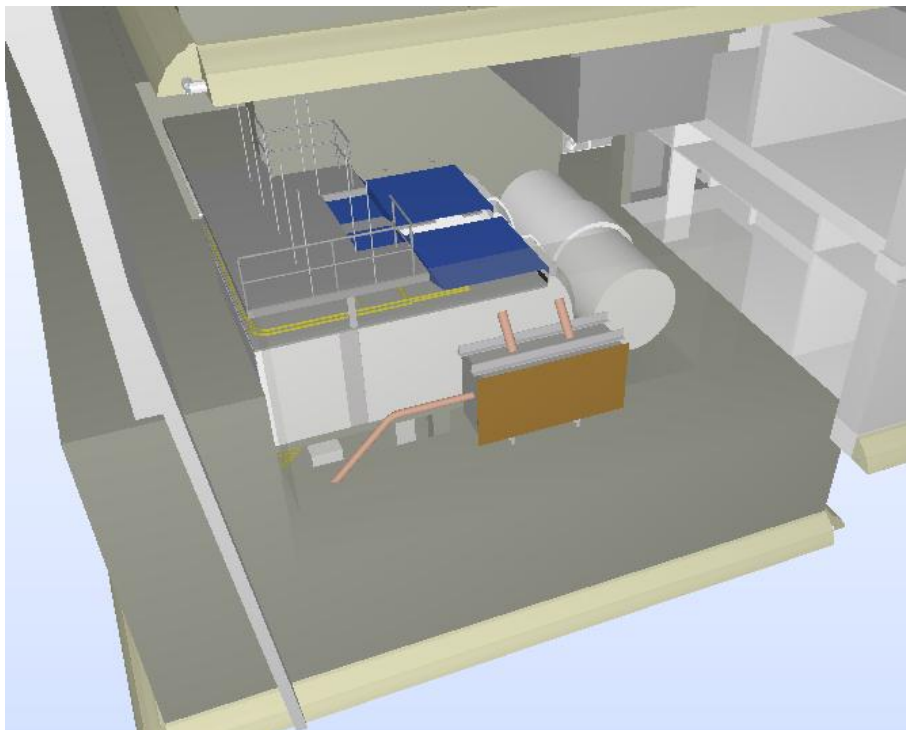


Figure 1 Vue 3D du modèle architectural du bunker qui accueillera le Mevion 250 pour la protonthérapie au CHUV.

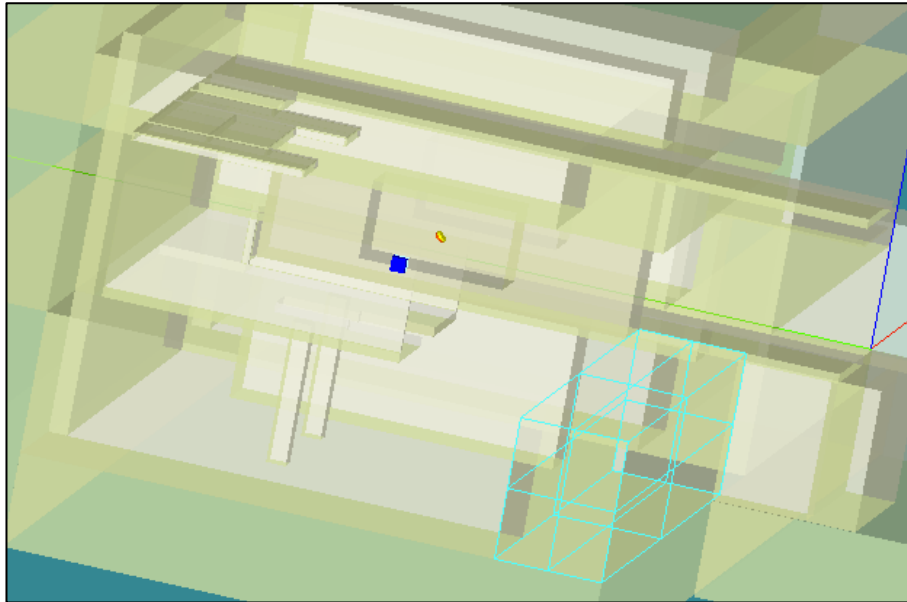


Figure 2 Vue 3D du modèle du bunker proton considéré dans nos simulations GEANT4 et FLUKA.

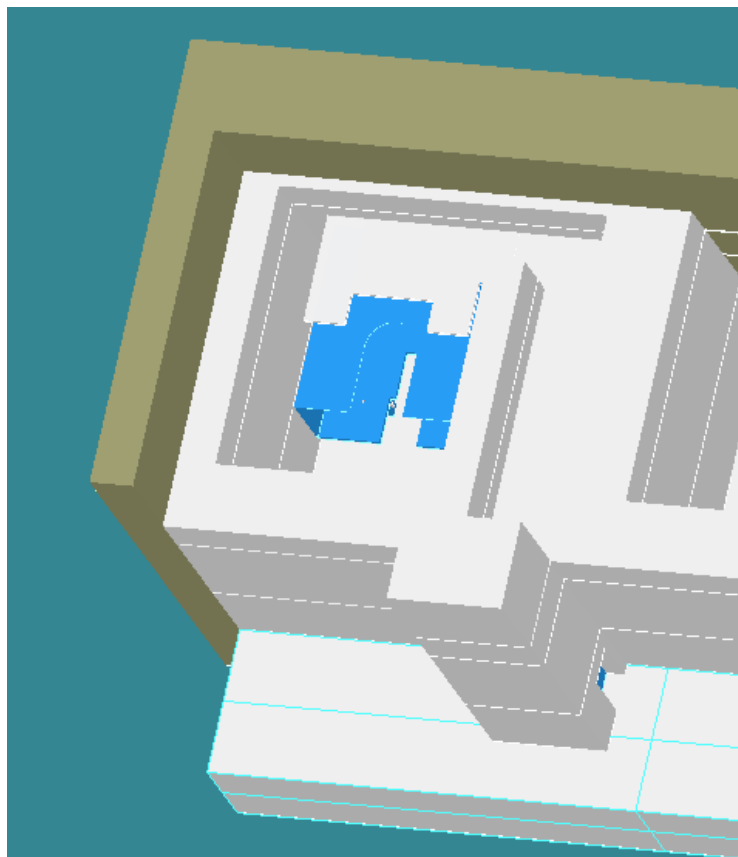


Figure 3 Vue 3D du modèle du bunker proton considéré dans nos simulations GEANT4 et FLUKA.

La dénomination des murs du bunker telle qu'utilisée dans ce document est présentée à la Figure 4.

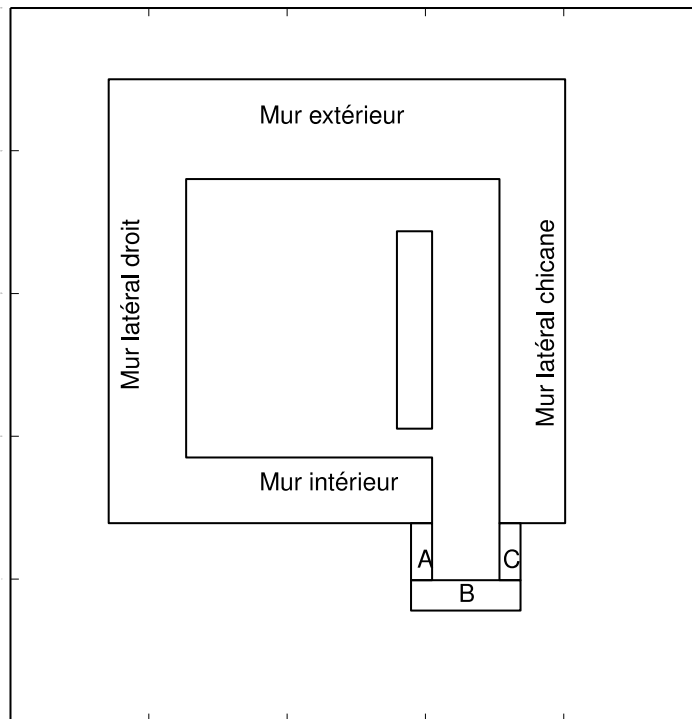


Figure 4 Dénomination des murs du bunker proton telle qu'utilisée dans ce document.

### 3.2. Géométrie de la tête du faisceau de protons, et des fantômes d'eau ou de fer

La Figure 5 représente la tête simplifiée du faisceau de proton modélisée dans nos simulations, ainsi que d'un fantôme composé d'eau ou de fer. La tête du faisceau est composée d'un collimateur en cuivre (cylindre orange) de 15 cm de diamètre intérieur, 25 cm de diamètre extérieur, et 7.5 cm d'épaisseur, ainsi que d'un compensateur en PMMA (cylindre blanc) de 20 cm de diamètre et d'une épaisseur variable. La géométrie de la tête du faisceau est prise en compte exclusivement dans les simulations GEANT4 et FLUKA de l'activation des collimateurs et des compensateurs. Pour la simulation du SOBP, des cibles de carbone d'épaisseur variable sont placées directement après la source de protons, en remplacement du collimateur et du compensateur.

Pour les calculs de l'équivalent de dose ambiant, la présence du collimateur et du compensateur sont négligés et un fantôme d'eau de dimension  $45 \times 45 \times 45 \text{ cm}^3$  ou une cible de fer cylindrique de 5 cm de rayon et 10cm de hauteur est placé dans le faisceau à l'isocentre du bunker comme modèle simplifié du patient. La raison qu'il y a de remplacer le fantôme d'eau par une cible de fer est de générer à l'isocentre un flux maximal de neutrons que l'on utilise comme modèle conservateur des neutrons produits dans les différents éléments du faisceau de proton (diffuseur, modérateur, collimateur,...) et dans le patient. Pour l'eau nous avons choisi un fantôme plus large que les fantômes de  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  utilisés dans d'autres calculs de dose, afin d'assurer que les proton de 250 MeV s'arrêtent dans l'eau (libre parcours de 38 cm). La distance qui sépare la tête du faisceau du fantôme est un paramètre de la simulation fixé entre 20 cm et 1 m. Le faisceau de protons et la tête du faisceau tournent autour de l'axe X horizontal de la géométrie assurant ainsi une incidence

variable du faisceau par rapport à la verticale. Pour les simulations nous considérons des angles d'incidence de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$ .

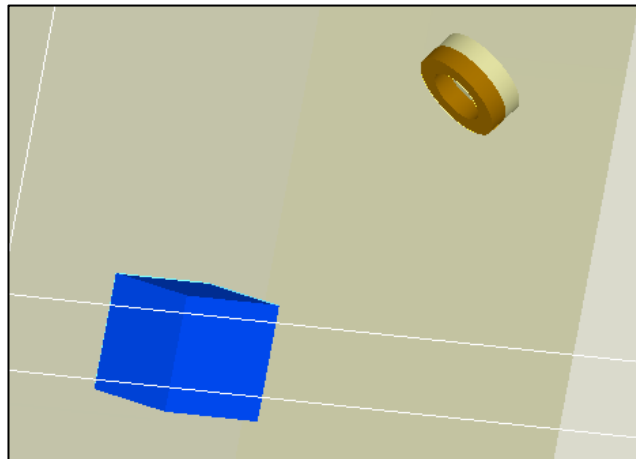


Figure 5 Modélisation de la tête du faisceau de proton et du fantôme d'eau considéré dans certaines simulations GEANT4 et FLUKA. La tête du faisceau consiste en un collimateur cylindrique (orange/brun) de cuivre derrière lequel est placé une plaque cylindrique de PMMA (cylindre blanc) comme compensateur. Les épaisseurs du collimateur et du compensateur sont des paramètres libres des simulations. Un fantôme d'eau (cube bleu) de dimension variable ( $45 \times 45 \times 45 \text{ cm}^3$  par défaut) est placé à l'iso-centre du bunker. L'axe du faisceau et de sa tête tourne dans le plan vertical YZ autour de l'axe horizontal X avec un angle d'incidence par rapport à la direction verticale variant de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ . La direction  $0^\circ$  pointe vers le bas.

### 3.3. Composition de certains matériaux considérés dans nos simulations

Les compositions massiques des différents types de matériaux que nous avons considérés dans nos simulations sont présentées dans la Table 1.

Matériel	Composition (% poids)	Densité ( $\text{g/cm}^3$ )
<b>Béton classique de type NIST</b>	H 2.21%, C 0.25%, O 57.49%, Na 1.52%, Mg 0.13 %, Al 2 %, Si 30.46 %, K 1%, Ca 4.3 %, Fe 0.64 %	2.35
<b>Béton baryté</b>	H 0.36%, O 31.16%, Mg 0.12 %, Al 0.42 %, Si 1.05 %, S 10.79 %, Ca 5.02 %, Fe 4.75 %, Ba 46.34 %	3.35
<b>Polyéthylène PE</b>	H 14.4 %, C 85.6 %	0.93
<b>Polyéthylène borée</b>	H 12.5 %, B 10 %, C 77.5 %	1
<b>Acier</b>	Fe 74%, Cr 18%, Ni 8%	8
<b>Barre de fer</b>	Fe 100 %	7.874
<b>Eau</b>	H 11.2, O 88.8	1
<b>Air</b>	N 75.53%, O 23.18 %, Ar 1.29 %	$1.2 \cdot 10^{-3}$
<b>Silice</b>	O 53%, Si 47%	2.32
<b>Terre type EarthUS</b>	O 51.3% , Na 0.6 %, Mg 1.3%, Al 6.8 %, Si 27.1%, K 1.4%, Ca 5.1%, Ti 0.46%, Mn 0.7%, Fe 5.6%	1.52

Table 1 Composition massique des matériaux utilisés dans nos simulations FLUKA et GEANT4

## 4. Modélisation de la source de proton

La source de proton est générée uniformément sur un disque de diamètre variable. Le faisceau est modélisé comme monodirectionnel pointant vers l'isocentre de la géométrie. Il tourne autour de l'axe X horizontal de la géométrie assurant ainsi une incidence variable du faisceau par rapport à la verticale. Les protons sont mono-énergétiques avec une énergie fixée à 250 MeV ce qui représente l'énergie d'extraction à la sortie du cyclotron.

## 5. Description des scénarios de simulation Monte Carlo

Les différents types de simulations Monte Carlo qui ont été effectués dans notre étude, sont décrits ci-dessous

### 5.1. Etude du SOBP

Dans ces simulations, un faisceau de protons à 250 MeV et de 25 cm de diamètre irradie à incidence normale un absorbeur de carbone cylindrique de 25 cm de diamètre et d'épaisseur variable, placé devant le fantôme d'eau. La dose absorbée dans le fantôme d'eau est enregistrée sur une grille divisée en cellules de dimension  $5 \times 5 \times 0.1 \text{ cm}^3$ . Le but de ces simulations est de calculer le facteur de normalisation définissant la fluence de proton nécessaire à l'entrée du fantôme d'eau pour assurer une dose moyenne de 1 Gy au niveau du « spread of bragg peak » (SOBP) en fonction de la largeur de ce dernier. Dans ces simulations nous utilisons GEANT4 et FLUKA.

### 5.2. Calcul de l'activation des collimateurs et des compensateurs

Dans une première série de simulations Geant4 et FLUKA un faisceau de protons mono-énergétiques à 250 MeV irradie à incidence normale un collimateur cylindrique de cuivre, de 5 cm d'épaisseur, 25 cm de diamètre, et percé en son centre d'un trou cylindrique de 15 cm de diamètre. Une plaque cylindrique de PMMA de 10 cm d'épaisseur et 20 cm de diamètre est placée après le collimateur. Dans une seconde série de simulation nous avons simulé l'irradiation d'un collimateur de laiton de 15 cm de diamètre intérieur et 25 cm de diamètre extérieur placé dans le faisceau de 250 MeV de proton en aval de couches de carbone identiques à celles utilisées pour le calcul du SOBP.

### 5.3. Calcul de l'équivalent de dose ambiant à l'intérieur et à l'extérieur du bunker de protonthérapie

Dans ces simulations le modèle précis d'un bunker proton est considéré. Un faisceau de protons à 250 MeV est généré sur un disque de 4.5 cm de diamètre et tourne autour de l'axe X horizontal centré à l'isocentre afin d'assurer différents angles d'incidence du faisceau par rapport à la verticale. Un fantôme d'eau de  $45 \times 45 \times 45 \text{ cm}^3$  de dimension ou une cible de fer cylindrique de 5 cm de rayon et 10 cm de hauteur, est placé à l'isocentre du bunker comme modèle simplifié du patient. L'option d'une cible de fer est considérée pour obtenir une estimation très conservatrice du calcul de la dose (les simulations qui sont effectués par J. Siebers utilisent un fantôme de fer de même dimension).

L'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  est enregistré sur une grille recouvrant toute la géométrie des bunkers jusqu'à l'extérieur des murs. Cette grille est divisée en cellules de dimension  $25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$ . Cette dose est calculée dans GEANT4 et FLUKA à partir des flux de particules en considérant des facteurs de conversion publiés dans le rapport ICRP74 [3]. Pour le cas des protons et des électrons les facteurs publiés par Pellicioni sont considérés [4]. Le but de ces simulations est de

définir l'épaisseur minimale nécessaire des murs afin d'obtenir à l'extérieur un débit d'équivalent de dose maximal de 10, 20, 50, et 100  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$  en fonction du type de mur.

#### 5.4. Calcul de l'activation dans les murs, et dans l'air

Pour le calcul de l'activation des murs nous avons fait des simulations ou des plaques minces, de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  de surface, et de matériaux divers sont insérés dans les murs de béton à différentes profondeurs. Les matériaux que nous avons considérés sont le béton, le fer, la silice ( $\text{SiO}_2$ ), la terre (type US) et l'eau. La Table 1 donne la composition de ces différents matériaux comme nous l'avons considéré dans nos simulations. Des simulations FLUKA sont principalement utilisées pour calculer le taux de production d'isotope radioactif dans les plaques et dans l'air induit par l'irradiation des protons et neutrons. Bien que l'activité des isotopes produits par les neutrons puisse être calculée directement dans FLUKA, nous avons développé un programme qui permet de calculer rapidement offline la variation temporelle de l'activité de chaque isotope radioactif après différentes périodes d'irradiation. Nous évitons ainsi de devoir refaire des simulations Monte Carlo pour chaque nouvelle période d'irradiation.

### 6. Résultats des simulations Monte Carlo

#### 6.1. Etude de la modulation du pic de Bragg (SOBP)

Nous avons réalisé une série de simulations GEANT4 et FLUKA avec des épaisseurs d'absorbeur de carbone variant de manière progressive de 0 à 16.25 cm, avec un pas de 0.625 cm. La densité de carbone utilisée étant de  $2 \text{ g}/\text{cm}^3$ , cela correspond à des épaisseurs d'eau de 0 à 32.5 cm avec un pas de 1.25 cm. Pour chaque simulation nous considérons  $10^4$  protons incidents et enregistrons la courbe de Bragg avec un pas de 1mm en profondeur, moyennée sur une surface carrée de  $7.5 \times 7.5 \text{ cm}^2$ .

Nous avons développé un algorithme qui permet de calculer les facteurs de pondérations des différentes courbes de Bragg pour obtenir une dose de 1 Gy sur toute l'étendue du SOBP. Pour chaque courbe de Bragg nous localisons les profondeurs  $z_i$  de dose maximum. Ensuite, nous construisons une matrice carrée  $M$ , dont chaque élément  $M_{i,j}$  est égal à la dose absorbée dans l'eau de la courbe de Bragg  $i$  à la position  $z_j$ . Les facteurs de normalisation à 1Gy des courbes de Bragg  $x_i$  sont obtenus en résolvant le système d'équations linéaires

$$M\bar{x} = \begin{pmatrix} 1 \text{ Gy} \\ \dots \\ 1 \text{ Gy} \end{pmatrix}$$

Après inversion de la matrice  $M$  nous obtenons pour les facteurs de normalisation à 1Gy

$$\bar{x} = M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 \text{ Gy} \\ \dots \\ 1 \text{ Gy} \end{pmatrix}$$

Un exemple de solution de notre algorithme est présenté sur la Figure 6, pour un SOBP localisé entre 20 et 35 cm de profondeur, ce qui correspondrait à irradier de manière uniforme une tumeur de 15 cm d'épaisseur le long de l'axe du faisceau. Les différentes courbes de Bragg des protons de 250 MeV dans l'eau ont été calculées avec GEANT4 pour différentes épaisseurs d'absorbeurs de carbone placé entre le faisceau et le fantôme d'eau. Notre algorithme calcule la pondération nécessaire des différents faisceaux de protons et de leurs courbes de Bragg afin d'obtenir

l'étendue souhaitée du SOBP. Le SOBP résultant de la somme des courbes pondérées est présenté en noir sur la Figure 4.

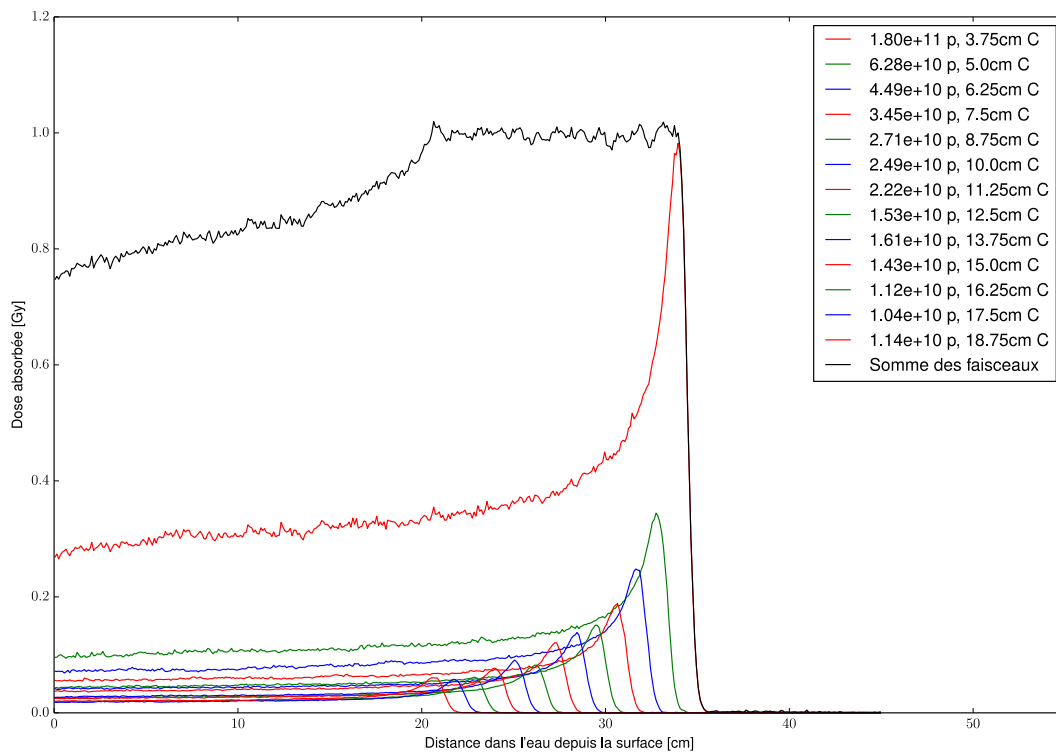


Figure 6 Exemple de solution de notre algorithme de calcul du SOBP pour le cas où le pic de Bragg s'étend de 20 à 35 cm. Les différentes courbes de Bragg des protons de 250 MeV dans l'eau ont été calculés avec GEANT4 pour différentes épaisseurs d'absorbeurs de carbone placé entre le faisceau et le fantôme d'eau. Notre algorithme calcule la pondération nécessaire des différents faisceaux de protons et de leurs courbes de Bragg afin d'obtenir l'étendue souhaitée du SOBP (somme des courbes pondérés présenté en noir). Notre algorithme est décrit plus précisément dans le texte.

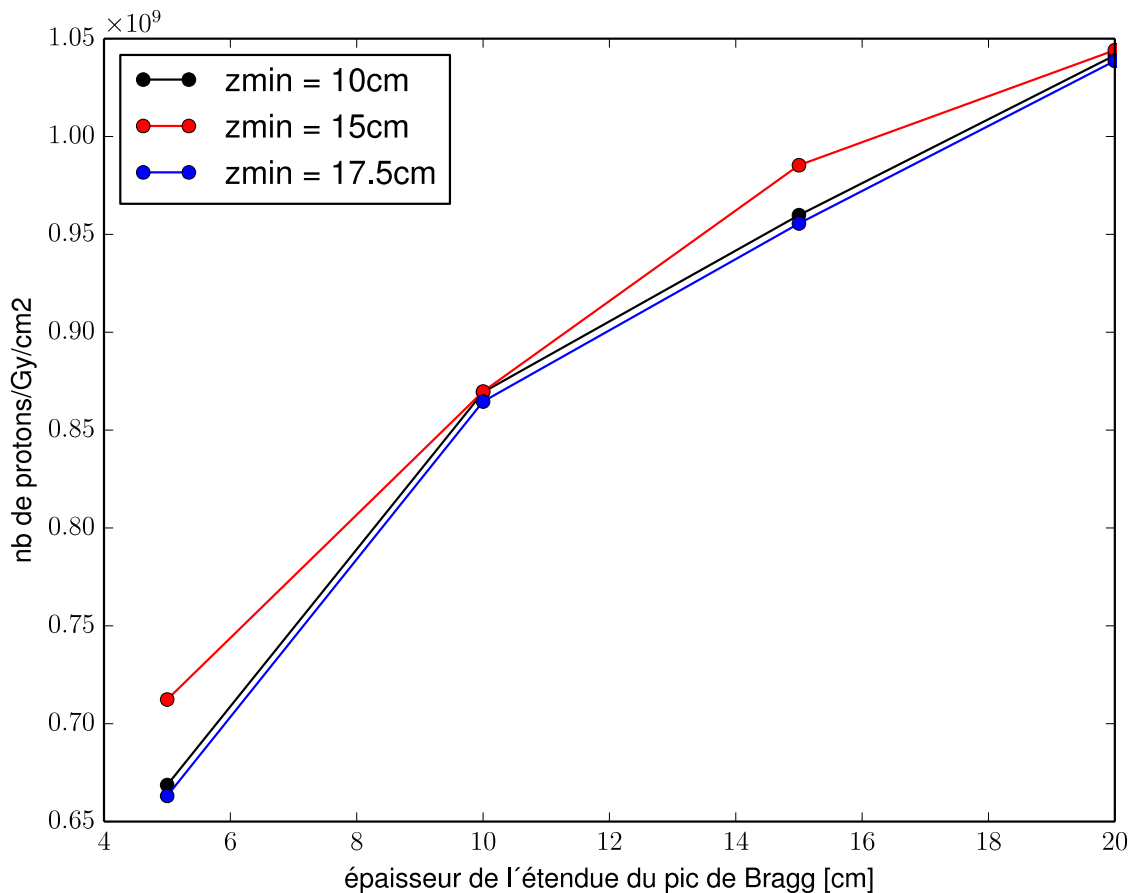


Figure 7 Variation du facteur "fluence proton sur dose délivré" en fonction de la largeur de l'étendue du pic de Bragg pour différentes positions de la tumeur par rapport à la surface du fantôme d'eau.

L'algorithme de calcul du SOBP que nous avons développé nous permet de déterminer la fluence de protons nécessaire pour obtenir une modulation souhaitée du pic de Bragg. Ces valeurs de conversion entre dose absorbée et fluence sont primordiales pour normaliser correctement nos résultats de calcul d'activation et d'équivalent de dose ambiant. La Figure 7 présente ces facteurs de conversion en fonction de la largeur du SOBP pour différentes localisations des tumeurs depuis le point d'entrée du fantôme d'eau. Nous voyons que la fluence nécessaire pour obtenir une dose de 1 Gy sur toute l'étendue du SOBP augmente avec la profondeur de celui-ci, mais ne dépend que très peu de la position relative de la tumeur dans le patient. Ceci signifie que la fluence de protons nécessaire pour irradier une tumeur donnée dépend principalement du volume du parallélépipède limitant cette tumeur. Si nous considérons une valeur maximale de largeur de tumeur de 15 cm nous obtenons un facteur conservatif de conversion dose-fluence de  $9.7 \cdot 10^8$  protons/Gy/cm<sup>2</sup>. Nous utiliserons cette valeur pour la normalisation des résultats des autres simulations Monte Carlo.

Il est aussi possible de calculer une approximation du facteur de normalisation en considérant la dose moyenne déposée par un proton de 250 MeV le long de sa trajectoire dans l'eau. Le libre parcours moyen d'un proton de 250 MeV dans l'eau étant environ de 37.9 cm, en considérant un faisceau couvrant une surface de 1cm<sup>2</sup> nous obtenons dans l'eau une dose moyenne par proton de  $D_p = \frac{250 \text{ MeV}}{37.9 \text{ g}}$ . Le nombre de protons par cm<sup>2</sup> qui est nécessaire pour obtenir une dose moyenne de 1 Gy est donné par  $1 \text{ Gy}/D_p$  est s'élève à  $9.37 \cdot 10^8$  protons/Gy/cm<sup>2</sup>. Cette valeur est très proche de la valeur de  $9.7 \cdot 10^8$  protons/Gy/cm<sup>2</sup> obtenue en utilisant notre algorithme de calcul de SOBP,

validant ainsi nos calculs du facteur de normalisation. Il est aussi intéressant de remarquer que Mevion, dans ses calculs de blindage, considère un facteur de conversion fluence sur dose de  $7.5 \cdot 10^8$  protons/Gy/cm<sup>2</sup>, à nouveau assez proche de celui que nous avons déterminé.

## 6.2. Estimation des sections efficaces de production de radio-isotopes considérées dans GEANT4 et FLUKA

Avant de calculer l'activation des collimateurs et des compensateurs, nous avons évalué les modèles de section efficace de production de radio-isotopes dans le cuivre utilisés dans GEANT4 et dans FLUKA, en les comparant avec des valeurs mesurées publiées par Yashima et al. [5]. Afin de calculer ces sections efficaces nous avons simulé l'irradiation d'une cible mince de cuivre d'une épaisseur de 1mm par des protons de 230 MeV à incidence normale.

La section efficace  $S\left({}^A_ZX\right)$  de production de l'isotope  ${}^A_ZX$  est obtenue par la formule suivante

$$S\left({}^A_ZX\right) = \frac{nb\left({}^A_ZX\right)}{nb_{\text{protons}} n_{\text{Cu}} X}$$

avec  $nb\left({}^A_ZX\right)$  le nombre d'isotope  ${}^A_ZX$  produit dans la cible,  $nb_{\text{protons}}$  le nombre de protons incidents,  $n_{\text{Cu}}$  la densité atomique de la cible de cuivre, et  $X$  l'épaisseur de la cible.

La Table 2 présente les sections efficaces de production d'isotope de cobalt obtenue avec GEANT4 et FLUKA et comparées avec les mesures de Yashima et al. [5]. Nous limitons cette table au cobalt parce qu'il représente les isotopes avec les périodes les plus longues pour le problème d'activation que nous considérons ici. On observe que FLUKA est en général en meilleur accord avec les mesures que GEANT4 sauf pour le <sup>60</sup>Co où GEANT4 diffère le moins de la mesure par 30-40 %. En résumé, le biais relatif entre les valeurs obtenues par les simulations et les mesures ne diffère pas plus de 120 % et entre les deux codes de simulation de 220 %. Etant donné le grand nombre de source d'incertitudes du calcul, cet écart n'a pas de lourdes conséquences et nous semble acceptable. Il est tout de même important de noter que dans l'activation des cibles épaisses le flux de neutrons secondaires et la perte d'énergie des protons influencent d'une manière significative la production des isotopes radioactifs et qu'une validation complète ne peut être obtenue qu'en comparant les résultats Monte Carlo d'activation directement avec des mesures d'activation.

Isotope	Measured CS [mBarn]	GEANT4 CS [mBarn]	G4/mesure [%]	FLUKA CS [mBarn]	FLUKA/mesure [%]	FLUKA/GEANT4
<sup>55</sup> Co	2.08 ± 0.061	4.57	120	1.76	-15	-61
<sup>56</sup> Co	10.6 ± 0.35	4.39	-59	13.87	31	216
<sup>57</sup> Co	42.5 ± 4.3	23.00	-46	36.89	-13	60
<sup>58</sup> Co	39.2 ± 1.1	15.13	-61	16.00	-59	6
<sup>59</sup> Co		19.43		22.83		17
<sup>60</sup> Co	13.6 ± 0.87	8.91	-34	3.08	-77	-65
<sup>61</sup> Co	4.58 ± 0.46	8.08	76	2.259	-51	-72

Table 2 Sections efficaces de la production d'isotopes du cobalt dans le cuivre par irradiation d'un faisceau de proton de 230 MeV. Les sections efficaces considérées dans GEANT4 et FLUKA sont comparées avec les données expérimentales de Yashima et al [5].

Nous avons aussi calculé avec FLUKA les section efficaces de production d'isotope pour des neutrons incidents sur du fer naturel et comparé les résultats avec des données de référence de production d'isotope accessibles dans la base de donnée « Evaluated Nuclear Data File » [6] . La Figure 8 compare les résultats de FLUKA avec les données MENDL et TENDL. On observe un accord excellent entre FLUKA et MENDL pour tous les isotopes exceptés pour l'isotope  $^{50}\text{Fe}$  qui a une section efficace de production très faible. De ces résultats nous concluons que FLUKA est valide pour calculer la production d'isotopes radioactifs et l'activation des matériaux exposés aux flux de neutrons.

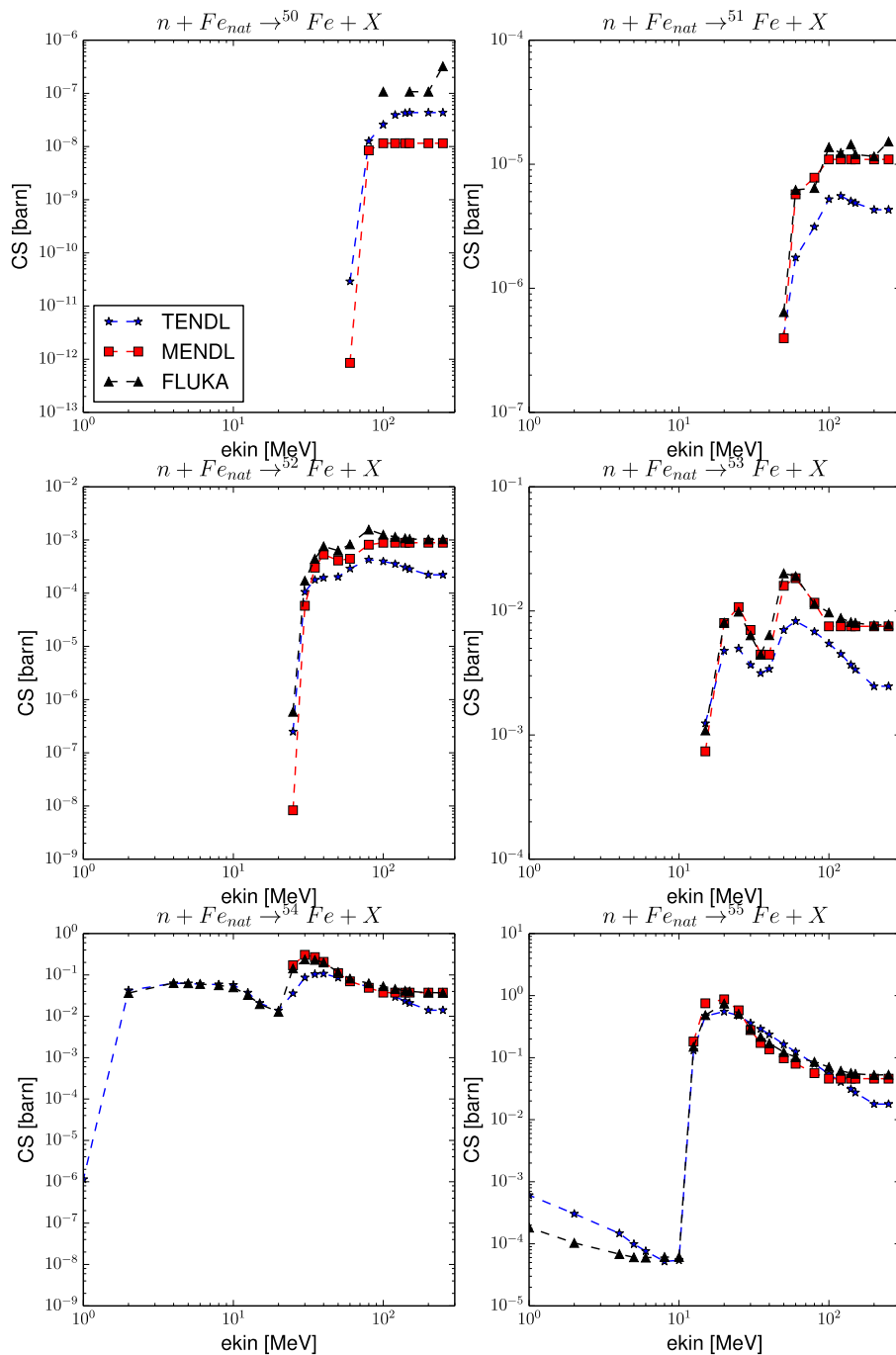


Figure 8 Section efficaces de production d'isotopes de fer pour des neutrons incidents sur du fer naturel calculé avec FLUKA et comparé avec les bases de données de référence MENDL et TENDL (ENDF [6]).

### 6.3. Calcul de l'activation de la tête du faisceau

Afin d'estimer le niveau d'activation des collimateurs par le faisceau de proton, nous avons calculé avec des simulations GEANT4 et FLUKA l'activation d'un cylindre de cuivre de 5 cm d'épaisseur

irradié par un faisceau de protons de 250 MeV à incidence normale. Les résultats des simulations Monte Carlo donnent l'activité des différents isotopes radioactifs produits dans la cible pour différents intervalles de temps après irradiation et normalisé pour une irradiation par un proton. En considérant une irradiation de 10 Gy pour chaque collimateur et en appliquant le facteur de conversion de la dose à la fluence calculé précédemment, nous obtenons un facteur de normalisation de nos résultats de

$$\frac{10 \text{ Gy } 9.7 \cdot 10^8 \text{ S}}{\text{Gy cm}^2 \text{ M}}$$

avec S et M représentant respectivement l'aire de la section du collimateur et sa masse. Les Figures 6 à 10 représentent les calculs d'activité des isotopes radioactifs dans les collimateurs de cuivre une minute, une heure, un jour, une semaine et trois mois après une irradiation de 10 Gy durant 1 seconde obtenu avec GEANT4 et FLUKA. Bien que le niveau d'activation obtenu par GEANT4 et FLUKA diffère sensiblement pour certains isotopes nous remarquons qu'après une période de trois mois, GEANT4 et FLUKA donne des niveaux d'activation équivalents pour les radioisotopes dominants du <sup>58</sup>Co, <sup>57</sup>Co, et <sup>56</sup>Co. Les niveaux d'activations du <sup>56</sup>Co, <sup>57</sup>Co ainsi que celui du <sup>60</sup>Co sont bien au-dessous des limites de libération donnée dans l'ébauche de la nouvelle ORaP [7]. Par contre, pour le <sup>56</sup>Co la valeur d'activité spécifique est proche de la nouvelle valeur de libération de 0.1 Bq/g. Il est tout de même important de noter que ces niveaux calculés d'activation sont assez conservateurs puisqu'ils ont été calculés pour un faisceau de 250 MeV de protons incident directement sur les collimateurs, alors qu'en réalité l'énergie des protons entrant dans le collimateur dépend du type de modulation de pic de Bragg considéré. Des résultats de simulations considérant des collimateurs en laiton et simulant le SOBP sont présentés plus bas.

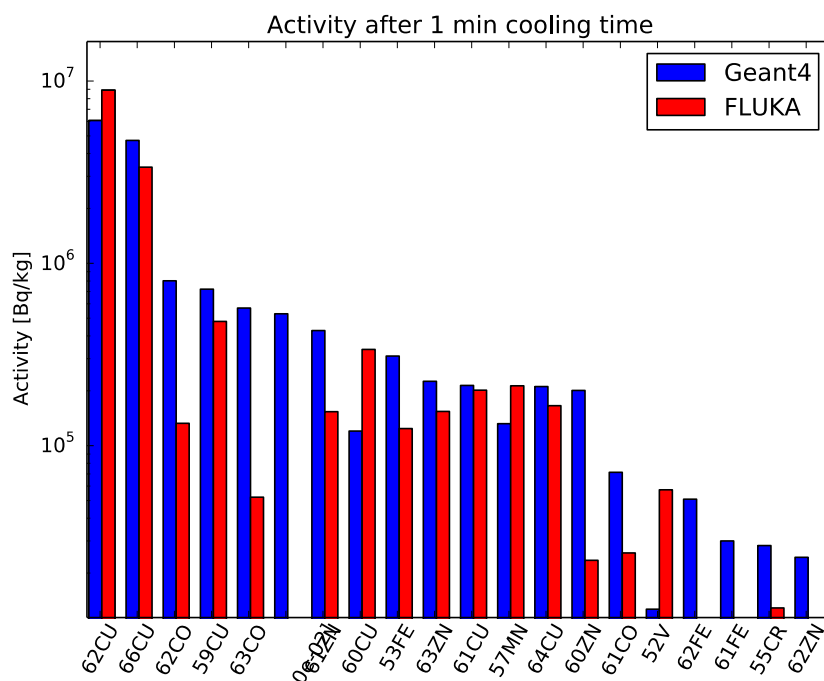


Figure 9 Activité spécifique des isotopes radioactifs dominants dans les collimateurs de cuivre ,comme calculé avec GEANT4 et FLUKA, 1 minute après une irradiation à 10 Gy par un faisceau de protons de 250 MeV.

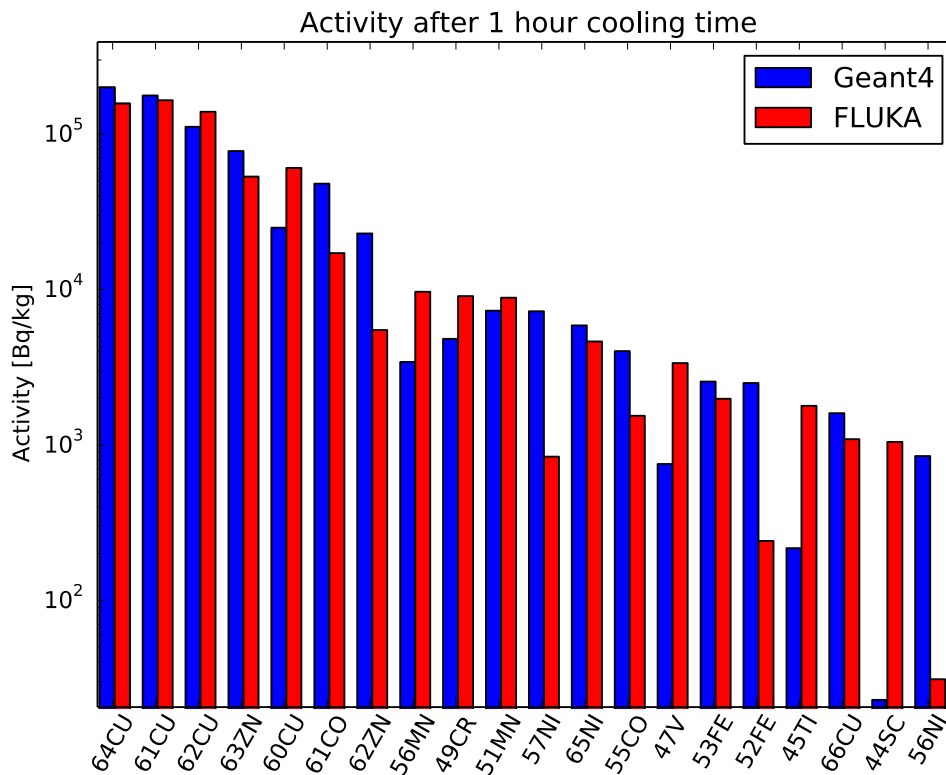


Figure 10 Activité spécifique des isotopes radioactifs dominants dans les collimateurs de cuivre comme calculé avec GEANT4 et FLUKA, une heure après une irradiation à 10 Gy par un faisceau de protons à 250 MeV.

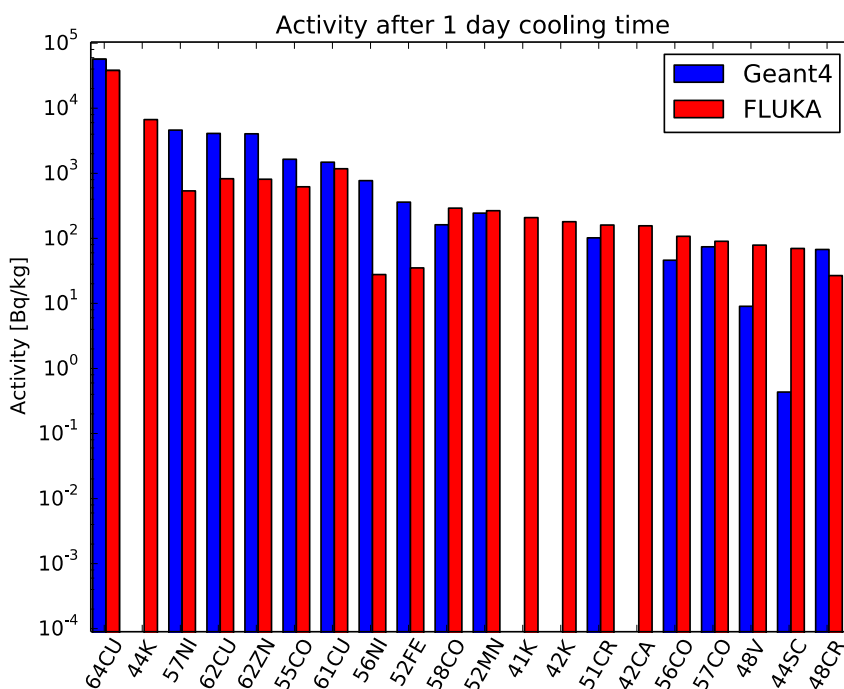


Figure 11 Activité spécifique des isotopes radioactifs dominants dans les collimateurs de cuivre comme calculé avec GEANT4 et FLUKA, un jour après une irradiation à 10 Gy par un faisceau de protons à 250 MeV.

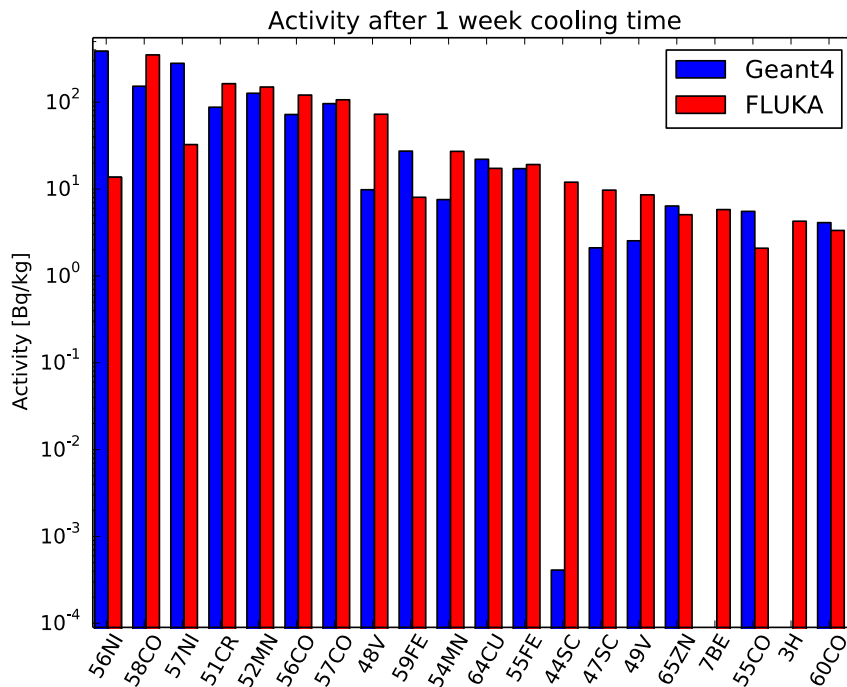


Figure 12 Activité spécifique des isotopes radioactifs dominants dans les collimateurs de cuivre comme calculé avec GEANT4 et FLUKA, une semaine après une irradiation à 10 Gy par un faisceau de protons à 250 MeV.

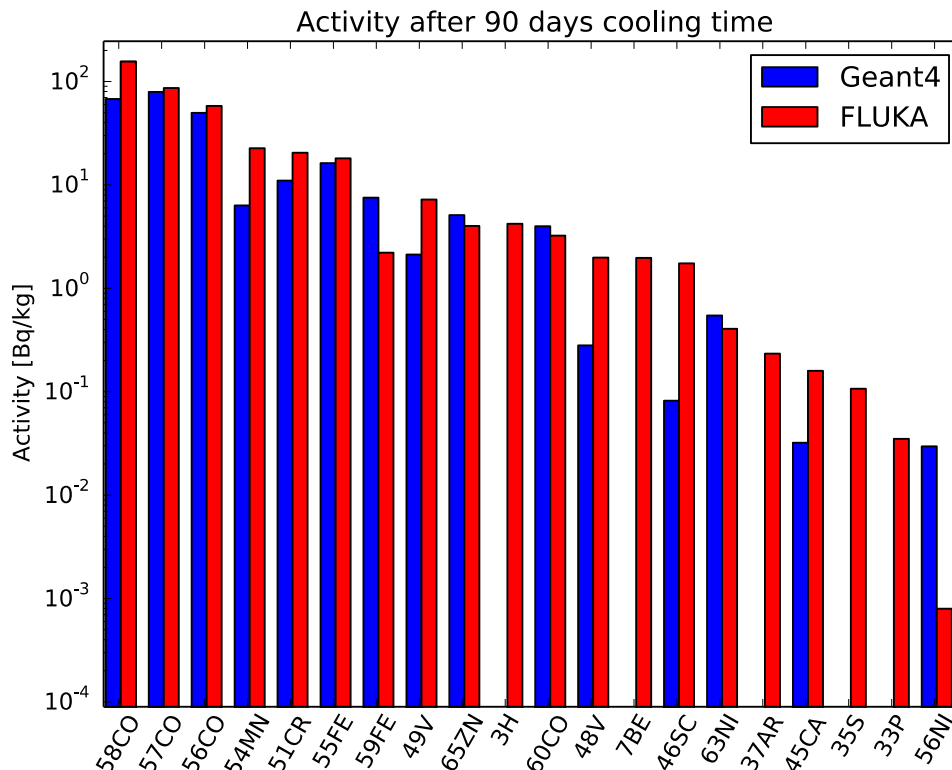


Figure 13 Activité spécifique des isotopes radioactifs dominants dans les collimateurs de cuivre comme calculé avec GEANT4 et FLUKA, trois mois après une irradiation à 10 Gy par un faisceau de protons à 250 MeV.

Nous avons aussi calculé l'activation des compensateurs, en simulant avec GEANT4 et FLUKA l'irradiation d'une plaque de PMMA de 10 cm d'épaisseur par un faisceau de protons de 250 MeV. Les Figures 11 à 13 représentent l'activité spécifique calculée 1 heure, 1 jour, et une semaine après une irradiation par le faisceau de proton à 250 MeV délivrant une dose de 10 Gy.

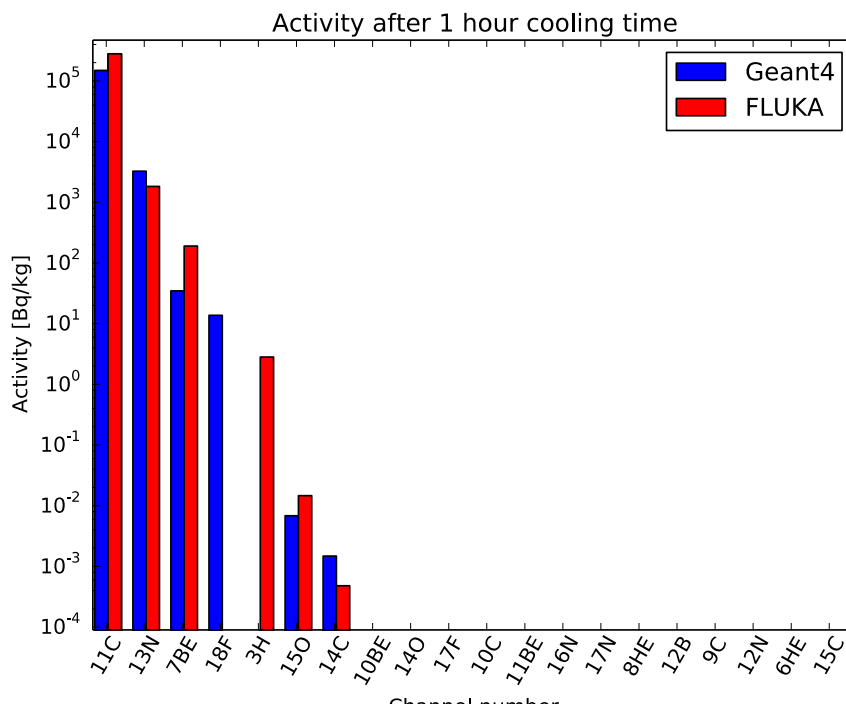


Figure 14 Estimation de l'activité spécifique des isotopes radioactifs dominants dans les modérateurs en PMMA calculé avec GEANT4 et FLUKA, une heure après une irradiation à 10 Gy par un faisceau de protons à 250 MeV. Calculs obtenus à l'aide de GEANT4 et FLUKA.

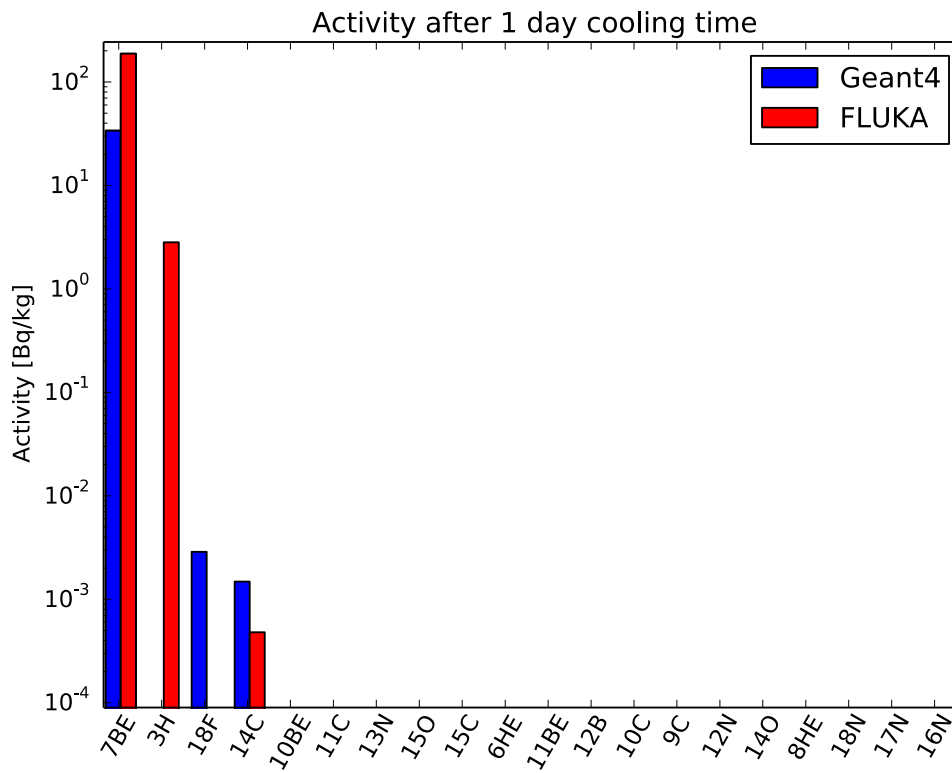


Figure 15 Activité spécifique des isotopes radioactifs dominants dans les modérateurs en PMMA, comme calculée avec GEANT4 et FLUKA, un jour après une irradiation à 10 Gy par un faisceau de protons à 250 MeV.

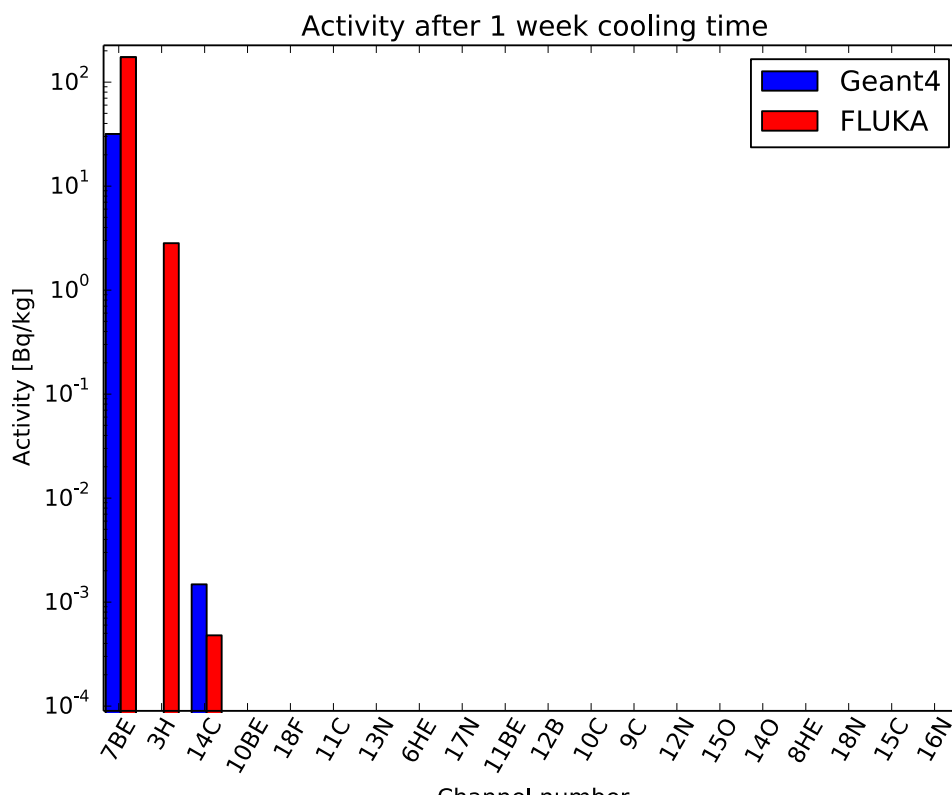


Figure 16 Activité spécifique des isotopes radioactifs dominants dans les modérateurs en PMMA, comme calculé avec GEANT4 et FLUKA, un jour après une irradiation à 10 Gy par un faisceau de protons à 250 MeV.

Nous avons aussi calculé avec FLUKA l'activation des collimateurs de laiton de 6.6 cm d'épaisseur composé à 70-50% de cuivre et 30-50% de zinc pour un SOBP de 22 à 32 cm et de 0 à 20 cm. Pour ce faire nous avons simulé l'irradiation d'un collimateur de laiton de 15 cm de diamètre intérieur et 25 cm de diamètre extérieur placé dans le faisceau de 250 MeV de proton en aval de couches de carbone identiques à celles utilisées pour le calcul du SOBP. La production de radioisotopes dans le collimateur pour un type donné de SOBP est obtenue en pondérant les résultats obtenus avec les différentes couches de carbone, de la même manière que dans le calcul du SOBP expliqué dans la section 6.1. Le facteur conservatif de conversion dose-fluence de  $9.7 \cdot 10^8$  protons/Gy/cm<sup>2</sup> et une dose patient de 10 Gy sont utilisés pour normaliser les résultats. La Figure 17 représente les résultats de nos calculs pour un SOBP de 22 à 32 cm et une composition de laiton de 70% de cuivre et 30% de zinc. Nous voyons qu'à long terme la contribution des isotopes <sup>56,57,58</sup>Co et <sup>65</sup>Zn, à l'activité totale, domine. La Figure 18 représente la valeur d'exemption des isotopes radioactifs calculée avec l'aide des coefficients LE de l'ORaP actuelle et des coefficients LL de la nouvelle ORaP pour des SOBP de 0 à 20 cm et 22 à 32 cm et des compositions de laiton de 50% de cuivre et 50% de zinc et 70% de cuivre et 30% de zinc. Nous voyons que, pour un SOBP de 22 à 32 cm, la valeur limite de libération de 1 est atteinte selon l'ORaP actuelle après seulement un jour tandis que selon la nouvelle ORaP un stockage de 100 à 150 jours sera nécessaire. Pour un SOBP de 0 à 20 cm la valeur limite de libération, selon la nouvelle ORaP, est obtenue après plus ou moins un mois. Nos résultats confirment qu'une période de stockage de 5 mois des collimateurs devrait être suffisante. La grande différence entre les valeurs d'exemption obtenues selon l'ORaP actuelle et selon la nouvelle ORaP est due à l'abaissement, dans la nouvelle ORaP des valeurs LE(LL) de certains isotopes du cobalt et du zinc par plus d'un ordre de grandeur.

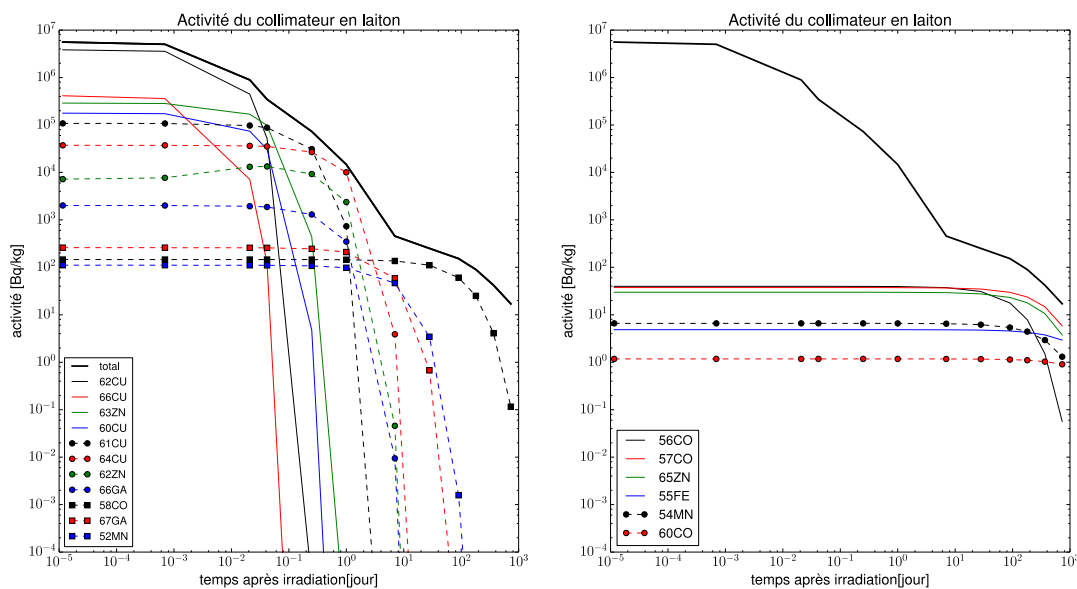


Figure 17 Variation temporelle de l'activité des isotopes radioactifs les plus actifs dans un collimateur de laiton composé de 30% de zinc et 70% de cuivre pour une irradiation à 10 Gy avec un SOBP de 22-32 cm. La production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est obtenue avec des simulations FLUKA. Le calcul de l'activité des éléments radioactifs à partir de leurs taux de production est effectué séparément de FLUKA

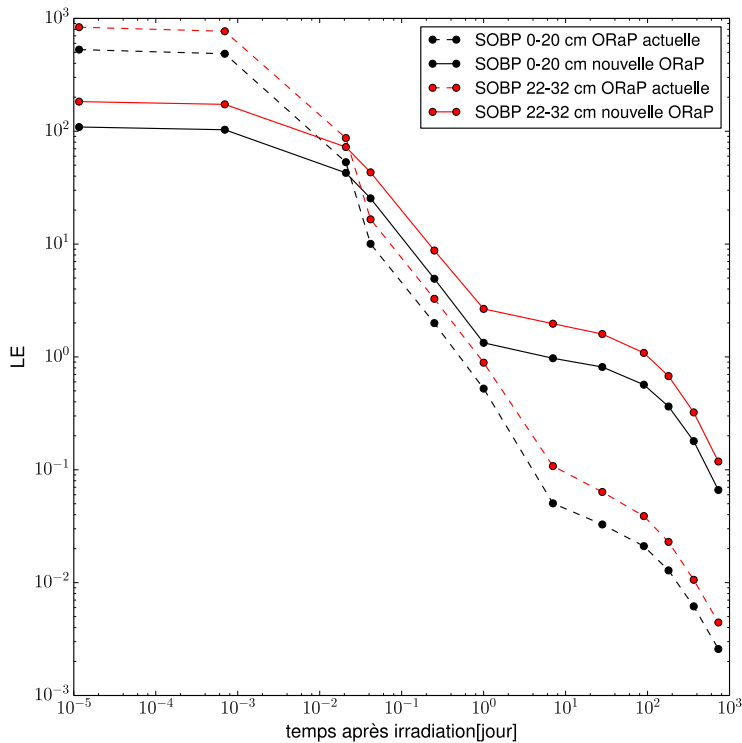


Figure 18 Calcul de la valeur limite d'exemption total de tous les isotopes radioactifs contenus dans les collimateurs de laiton composé de 30% de zinc et 70% de cuivre pour une irradiation à 10 Gy avec un SOBP de 0-20 cm et de 22-32cm. Le taux de production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est calculé avec des simulations FLUKA. Le calcul de l'activité des éléments radioactifs à partir de leurs taux de production est calculé séparément de FLUKA. La courbe noire présente les résultats obtenus en tenant compte de coefficients LE de l'ORaP actuelle, tandis que pour la courbe rouge les coefficients LL de la nouvelle ORaP sont utilisés.

Finalement nous avons estimé l'influence de la composition du laiton sur les niveaux de radioactivité des collimateurs. La Figure 19 représente le calcul de la valeur limite d'exemption totale de tous les isotopes radioactifs contenus dans les collimateurs de laiton composé de 30% de zinc et 70% de cuivre et de 50% de zinc et 50% de cuivre, pour une irradiation à 10 Gy avec un SOBP de 22-32cm. Les lignes pointillées présentent les résultats obtenus en tenant compte des coefficients LE de l'ORaP actuelle, tandis que pour les lignes solides les coefficients LL de la nouvelle ORaP sont utilisés. Nous voyons qu'à long terme les collimateurs en laiton composés de 50% de cuivre et 50% de zinc sont légèrement plus radioactifs que ceux composés à de 70% de cuivre et 30% de zinc.

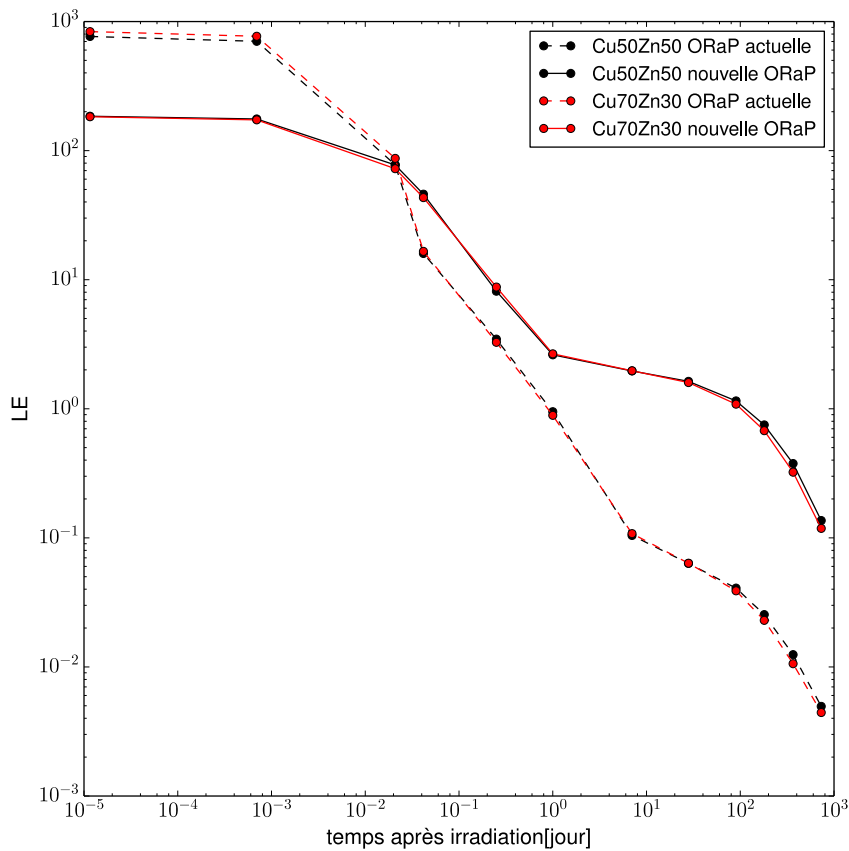


Figure 19 Calcul de la valeur limite d'exemption total de tous les isotopes radioactifs contenus dans les collimateurs de laiton composé de 30% de zinc et 70% de cuivre ou de 50 % de zinc et 50% de cuivre, pour une irradiation à 10 Gy avec un SOBP de 22-32cm. La production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est obtenue avec des simulations FLUKA. Le calcul de l'activité des éléments radioactifs à partir de leurs taux de production est effectué séparément de FLUKA. Les courbes noires présentent les résultats obtenus en tenant compte de coefficients LE de l'ORaP actuelle, tandis que pour la courbe rouge les coefficients LL de la nouvelle ORaP sont utilisés.

## 6.4. Calcul de l'équivalent de dose ambient $H^*(10)$

Nous avons calculé avec FLUKA et Geant4 l'équivalent de dose ambient  $H^*(10)$  à l'intérieur et à l'extérieur du bunker proton sur une grille divisée en mailles de dimension  $25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$ . Dans ces simulations les cavités des murs latéraux contenant les fixations des axes de rotation du Mevion250 sont considérées comme remplies de béton d'une densité de  $2.35 \text{ g/cm}^3$  et la présence des axes de rotation est négligée. Des séries de trois simulations avec différents angles d'incidence du faisceau de protons à respectivement  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  ont été réalisés pour chaque configuration.

Dans nos simulations un faisceau de proton de 1cm de diamètre tape soit sur une fantôme d'eau de  $45 \times 45 \times 45 \text{ cm}^3$ , ou sur une cible de fer cylindrique de 5 cm de rayon et 10 cm de hauteur. Les résultats des simulations sont normalisés en considérant un débit de dose absorbée dans l'eau de 1000 Gy par semaine et en considérant un facteur de perte des protons dans la ligne du faisceau de 50%. La cible de fer et le facteur de perte de 50% sont utilisés pour modéliser de manière conservatrice la production de neutrons dans le patient et dans tous les éléments de la ligne. Le fantôme d'eau est utilisé pour comparer les niveaux de dose obtenus avec le fer. En considérant le facteur de conversion fluence proton sur dose calculé plus haut nous obtenons le nombre total de protons

$$\frac{1000 \text{ Gy } 9.7 \cdot 10^8 \pi r^2}{P \text{ Gy cm}^2} = 9.52 \cdot 10^{14}$$

que nous devons considérer pour normaliser nos résultats, avec  $r=12.5 \text{ cm}$  le rayon maximal du faisceau réel à la sortie de la tête, et  $P$  le facteur de perte de 0.5. Le nombre total de protons de  $9.52 \cdot 10^{14}$  correspond à plus ou moins quatre fois et deux fois le nombre de protons considéré respectivement dans le calcul de blindage fourni par Mevion et celui considéré dans les calculs préliminaires de radioprotection [7,8]. La différence entre notre facteur de normalisation et celui utilisé dans les calculs préliminaires de radioprotection est due au fait que nous normalisons nos résultats pour un débit de dose maximum délivré au patient de 1000 Gy/semaine au lieu de 400 Gy/semaine.

### 6.4.1. Comparaisons Geant4 et FLUKA

La Figure 20 compare les calculs de l'équivalent de dose ambient  $H^*(10)$  obtenus avec Geant4 et FLUKA dans le cas d'un faisceau de proton vertical pointant vers le plafond, et tirant sur une cible de fer. Les valeurs de  $H^*(10)$  sont présentées en fonction de la profondeur des murs le long d'une colonne perpendiculaire au mur, ayant une section de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  et passant par l'isocentre. Les profondeurs inférieures à zéro correspondent à l'intérieur du bunker. La dénomination des murs est la même que celle présentée à la Figure 4. La Figure 21 représente le même type de comparaison entre GEANT4 et FLUKA, que dans la Figure 20, mais pour un fantôme d'eau au lieu d'une cible de fer. Les résultats de FLUKA et GEANT4 s'accordent bien pour la cible de fer, avec une différence maximum de l'ordre de 70% pour les murs non directement exposés à la direction du faisceau, et une différence inférieure à 10% pour le mur vers lequel le faisceau pointe (ici le plafond). Des différences plus significatives de maximum 150% sont observés entre FLUKA et GEANT4 pour le cas de l'irradiation sur un fantôme d'eau. Dans ce cas FLUKA obtient des doses plus élevées que GEANT4 pour les murs directement exposés mais plus petites pour les autres murs. Tenant compte du fait que FLUKA est plus utilisé dans le domaine de calcul de blindage autour des accélérateurs que GEANT4, et que pour ce type de simulation FLUKA est jusqu'à 5x plus rapide, nous avons décidé de baser la plupart de nos calculs de valeurs de  $H^*(10)$  sur des simulations FLUKA.

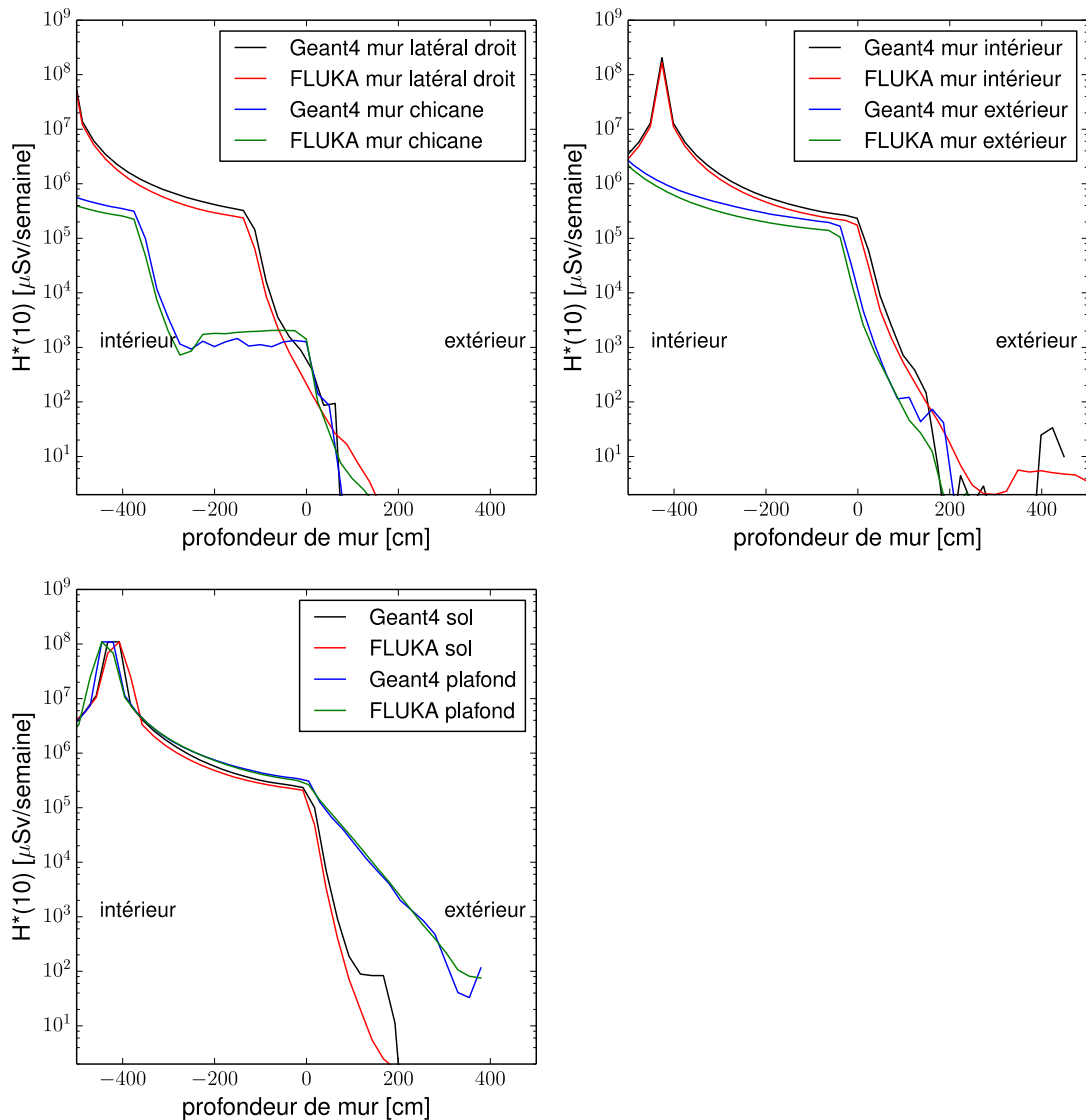


Figure 20 Variation de la dose  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur des murs calculés avec GEANT4 et FLUKA pour le cas d'une irradiation avec un faisceau vertical de proton à 250MeV, pointant vers le plafond, tirant sur un fantôme de fer, et délivrant un débit de dose de 1000 Gy par semaine. Les profondeurs de mur inférieures à zéro correspondent à l'intérieur du bunker. Les doses à chaque profondeur de mur sont moyennées sur une section de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  centrée l'isocentre. La dénomination des murs est la même que celle présentée à la Figure 4.

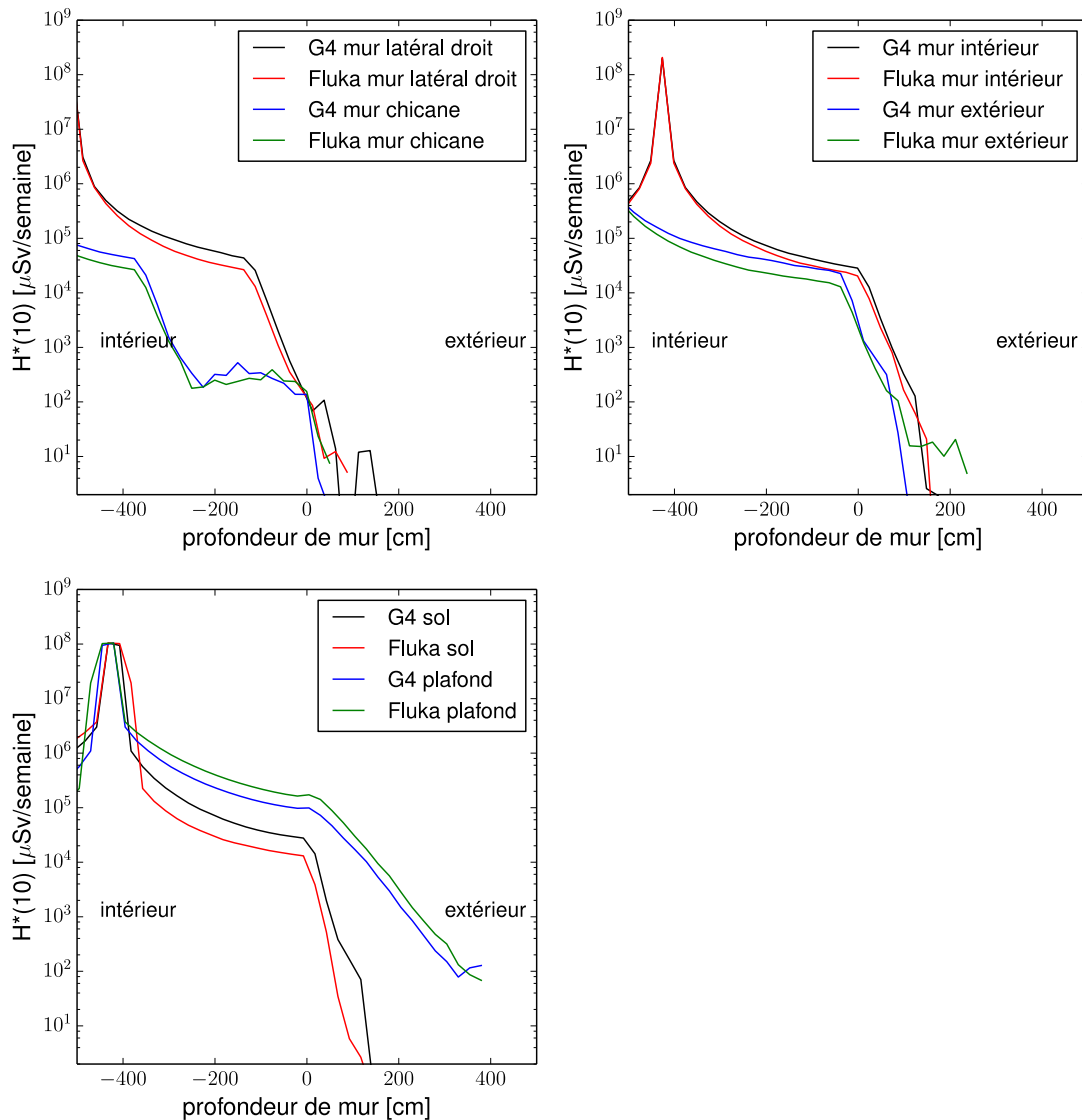


Figure 21 Variation de la dose  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur des murs calculés avec GEANT4 et FLUKA pour le cas d'une irradiation avec un faisceau vertical de proton à 250MeV, pointant vers le plafond, tirant sur un fantôme d'eau, et délivrant un débit de dose de 1000 Gy par semaine. Les profondeurs de mur inférieures à zéro correspondent à l'intérieur du bunker. Les doses à chaque profondeur de mur sont moyennées sur une section de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  centrée l'isocentre. La dénomination des murs est la même que celle présentée à la Figure 4.

#### 6.4.2. Comparaisons cible de Fer et fantôme d'eau

La Figure 22 compare les calculs de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  obtenus avec FLUKA dans le cas d'un faisceau de proton vertical pointant vers le plafond, tirant sur une cible de fer de  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^2$  et sur un fantôme d'eau de  $45 \times 45 \times 45 \text{ cm}^3$ . Les résultats sont présentés de la même manière que dans les Figures 19 et 20. Les valeurs de  $H^*(10)$  obtenues avec la cible de fer et le fantôme d'eau sont équivalentes dans le mur vers lequel le faisceau pointe (ici le plafond). Ceci s'explique par le fait que ce mur est directement exposé aux neutrons très énergétiques ( $>10\text{-}20 \text{ MeV}$ ) produits dans la phase dite « intranucléaire » de l'interaction des protons avec les noyaux de la cible (éjection directe de nucléon du noyau). Cette composante de neutron est très anisotropique et pointe principalement le long de la direction du faisceau.

Les autres murs sont eux principalement exposés aux flux isotropique de neutrons à plus faible énergie émanant de la phase dite d'évaporation de l'interaction nucléaire du faisceau avec les noyaux de la cible, et de la thermalisation. Le flux de neutrons d'évaporation augmente fortement avec la taille des noyaux cibles. Les murs latéraux qui reçoivent essentiellement cette composante neutronique, voient dès-lors une dose plus élevée dans le cas de la cible de fer, que dans le cas du fantôme d'eau. Nous pouvons finalement conclure que l'utilisation d'une cible de fer au lieu d'un fantôme d'eau, dans nos simulations, représente une approche conservatrice de nos calculs de dose pour les murs qui ne font pas face au faisceau. Par contre pour le mur faisant face au faisceau, des niveaux de dose équivalents seront obtenus avec le fantôme d'eau et la cible de fer.

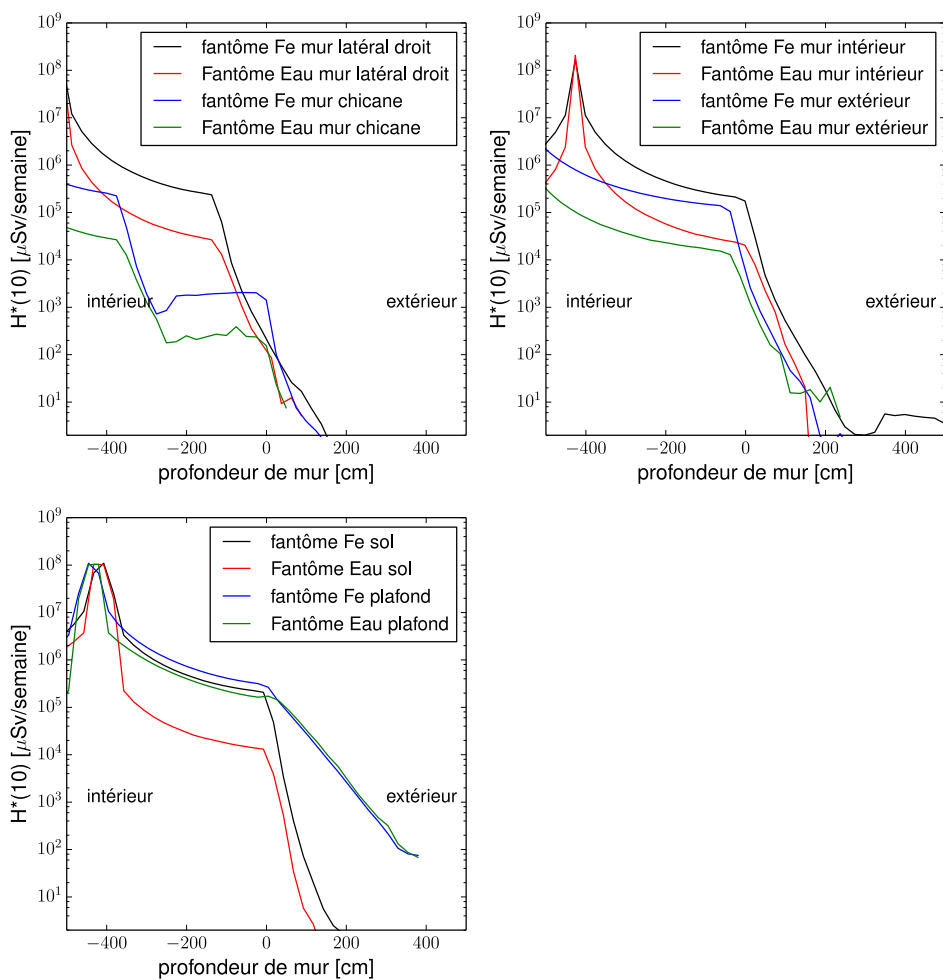


Figure 22 Variation de la dose  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur des murs extérieurs le long d'une colonne perpendiculaire au mur, avec une section de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  et passant par l'isocentre. Les profondeurs inférieures à zéro correspondent à l'intérieur du bunker. Les calculs de doses, obtenus avec FLUKA, pour un fantôme d'eau et une cible de fer sont comparés. Dans ce cas de figure un faisceau vertical de proton pointe directement vers le plafond, délivrant une dose de  $1000 \text{ Gy/semaine}$ . La dénomination des murs est définie à la Figure 4.

### 6.4.3. Comparaisons avec les simulations MCNP de J. Siebers

Afin de valider nos calculs nous avons mandaté Monsieur J. Siebers pour calculer l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  avec le code Monte Carlo MCNP dans le même modèle de Bunker que celui que nous utilisons pour nos calculs. Monsieur Siebers est un expert dans le domaine du calcul de blindage de la proton-thérapie est en particulier pour des installations de type Mevion250. La Figure 23 et la Figure 24 comparent les valeurs de dose  $H^*(10)$  calculés avec FLUKA et MCNP pour un faisceau de proton à 250MeV respectivement vertical et horizontal. Un bon accord est généralement observé entre FLUKA et MCNP avec une différence significative à l'isocentre. Cette différence est probablement due à l'utilisation d'un maillage de 50x50x50 cm<sup>3</sup> dans les simulations MCNP au lieu de 25x25x25 cm<sup>3</sup> dans nos simulations FLUKA.

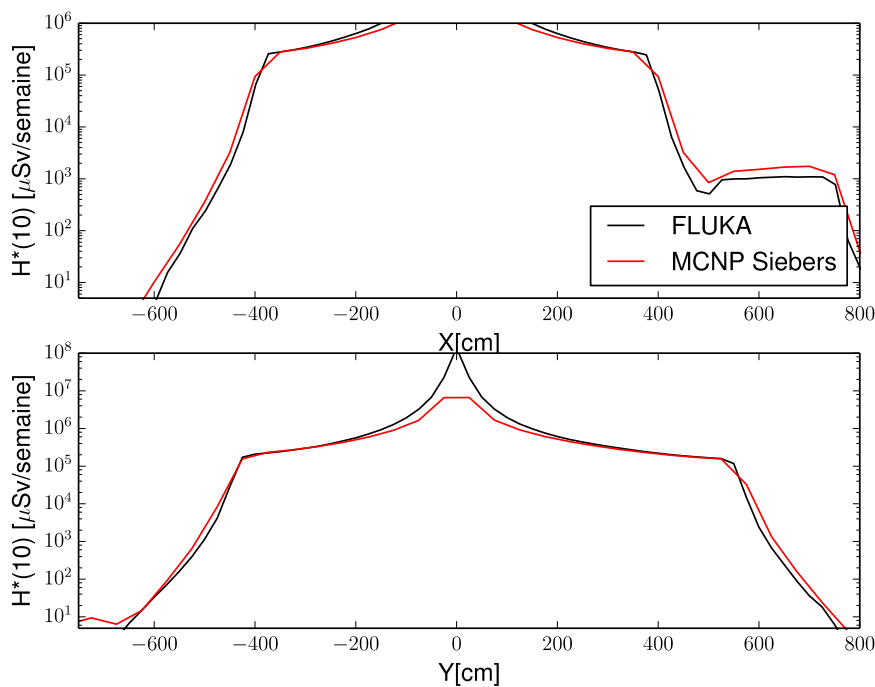


Figure 23 Variation de la dose  $H^*(10)$  le long de axes horizontaux X et Y centrés sur l'isocentre, comme calculé avec FLUKA et MCNP pour le cas d'une irradiation avec un faisceau vertical de proton à 250MeV, pointant vers le sol, tirant sur un fantôme de fer cylindrique, et délivrant un débit de dose de 1000 Gy par semaine.

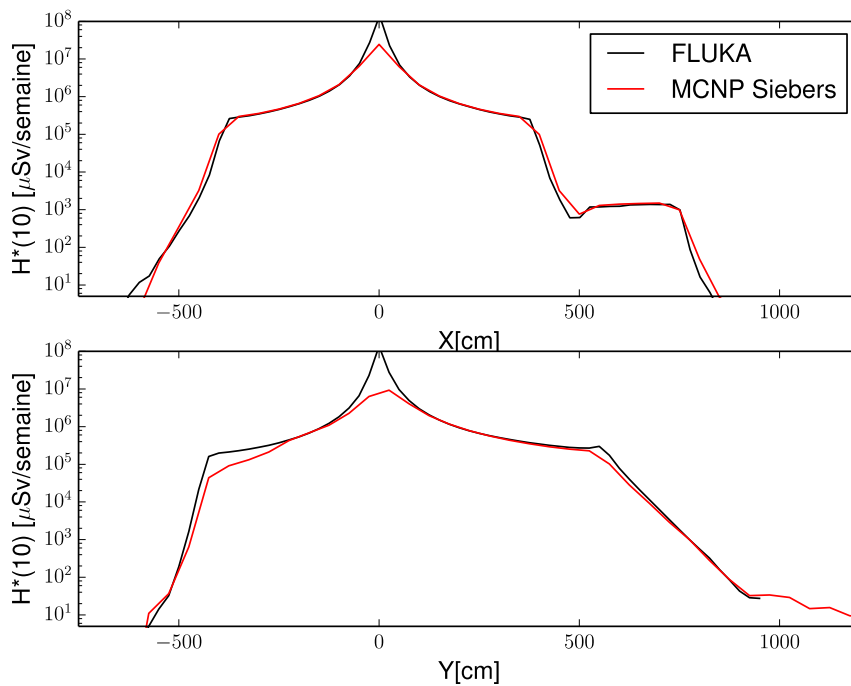


Figure 24 Variation de la dose  $H^*(10)$  le long d'axes horizontaux X et Y centrés sur l'isocentre, comme calculé avec FLUKA et MCNP pour le cas d'une irradiation avec un faisceau horizontal de proton à 250MeV, pointant vers le sol, tirant sur un fantôme de fer cylindrique, et délivrant un débit de dose de 1000 Gy par semaine.

#### 6.4.4. Cartes et courbes d'isodose de l'équivalent de dose ambiant

La Figure 25 représente la valeur calculée de  $H^*(10)$  dans le plan horizontal moyennée à  $\pm 20$  cm autour de la hauteur de l'isocentre, pour le cas d'une irradiation à  $90^\circ$  d'incidence du faisceau de protons. Les limites de certains murs sont reproduites en ligne noire sur le graphe. Les courbes d'isodose à 20 et 100  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$  sont aussi représentées. Dans ce cas d'irradiation nous voyons que FLUKA donne des valeurs de doses bien en dessous de la limite de 20  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$  à l'extérieur du mur intérieur et des murs latéraux, et en dessous de 100  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$  à l'extérieur du mur extérieur. Notons que nos valeurs calculées de  $H^*(10)$  sont sensiblement plus élevées que les mesures de dose publiées par Bloch et al. [7] confirmant ainsi le caractère conservatif de nos calculs.

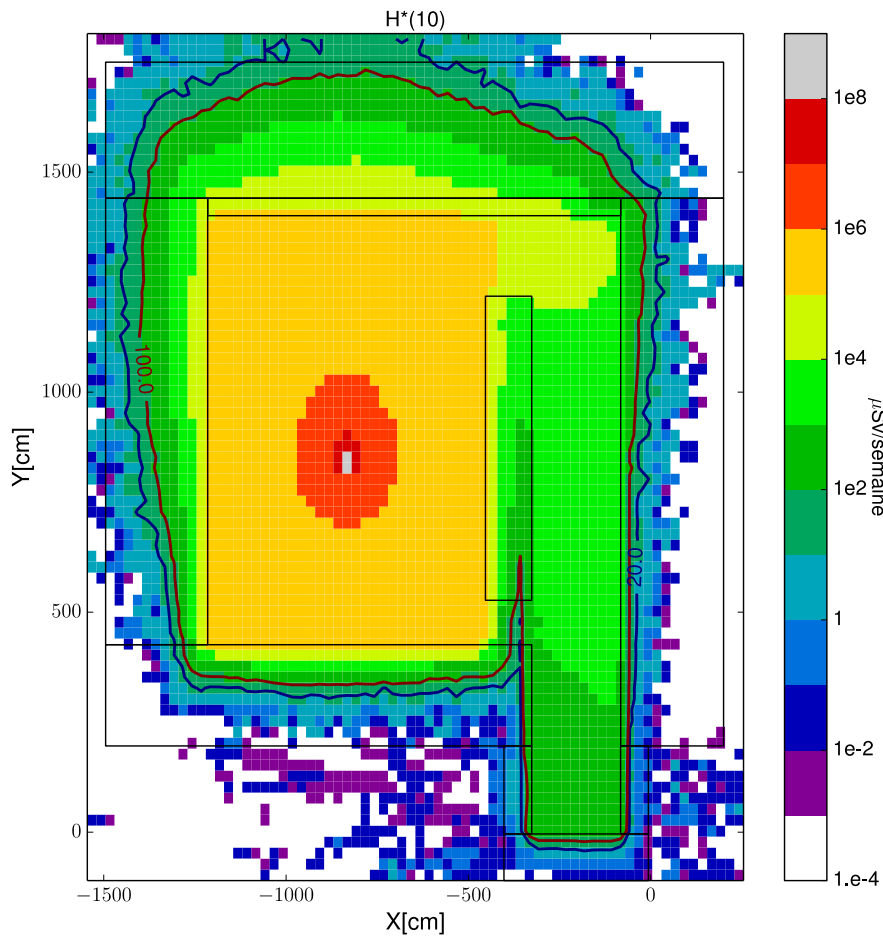


Figure 25 Calcul, obtenu avec FLUKA, de la distribution de  $H^*(10)$  dans le plan horizontal XY du bunker protons moyenné à  $\pm 12.5$  cm du plan de l'isocentre. Cas d'une irradiation par un faisceau horizontal de proton tirant sur une cible de  $10 \times 10 \times 10$  cm<sup>2</sup> et délivrant une dose absorbée de 1000 Gy par semaine.

La Figure 26 représente la valeur calculée de  $H^*(10)$  moyennée à  $\pm 20$  cm autour d'un plan horizontal situé à 1 m de hauteur au dessus du sol du niveau 5, pour le cas d'une irradiation à  $0^\circ$  d'incidence du faisceau de protons. Cela montre les niveaux dose au niveau 5 du bunker, dans des conditions extrêmes d'irradiation pour ce niveau lorsque le faisceau pointe vers le bas. Dans ce cas d'irradiation nous voyons clairement que FLUKA donne des valeurs de  $H^*(10)$  bien au-dessous de la limite de  $20 \mu\text{Sv/semaine}$  à l'extérieur du mur extérieur et des murs latéraux, et juste à la limite de  $20 \mu\text{Sv/semaine}$  à l'extérieur du mur intérieur. La dose en dessous du sol de 330 cm d'épaisseur atteint une valeur légèrement plus élevée que la limite de  $100 \mu\text{Sv/semaine}$  (pas montré sur cette figure).

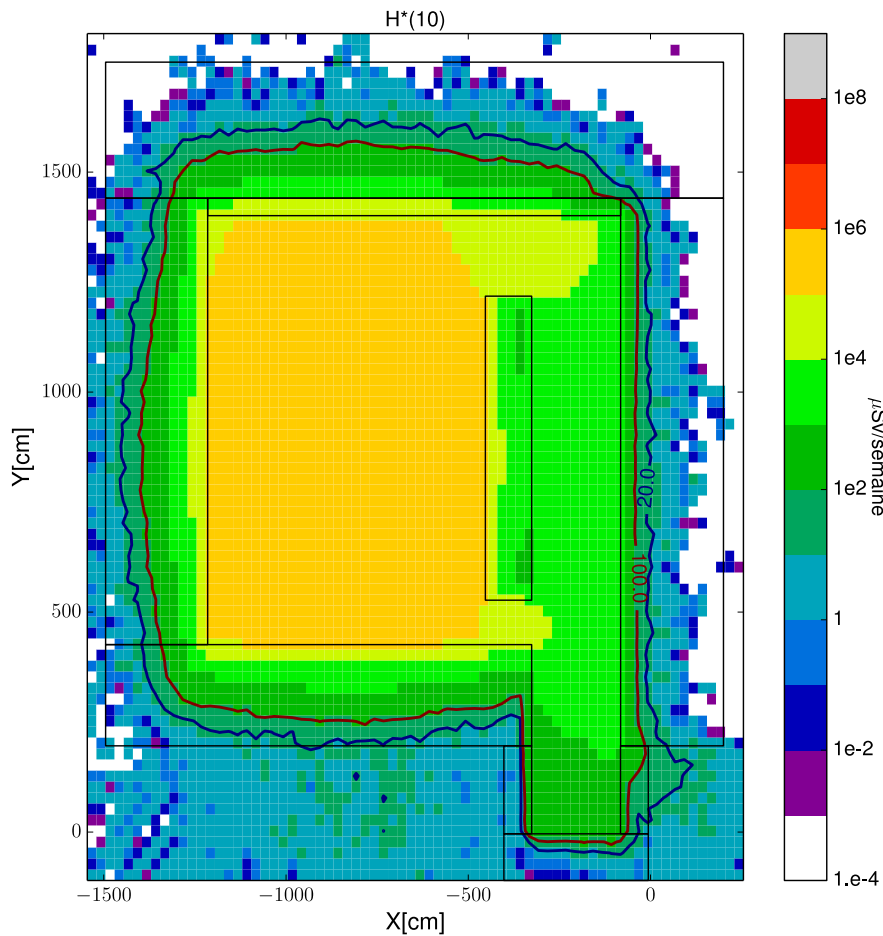


Figure 26 Calcul, obtenu avec FLUKA, de la distribution de  $H^*(10)$  dans le plan horizontal XY du bunker protons moyenné à  $\pm 12.5$  cm autour d'un plan situé 3m en dessous du plan de l'isocentre, correspondant au niveau5 du bunker. Cas d'une irradiation par un faisceau horizontal de proton tirant sur une cible de Fer de  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  et délivrant une dose absorbée de 1000 Gy par semaine.

La Figure 27 représente la valeur calculée de  $H^*(10)$  moyennée à  $\pm 20$  cm autour d'un plan horizontal situé juste au dessous du plafond du niveau7, pour le cas d'une irradiation à  $180^\circ$  d'incidence du faisceau de protons. Cela donne la variation de la dose au niveau7 du bunker, dans des conditions extrêmes d'irradiation pour ce niveau lorsque le faisceau pointe vers le haut. Dans ce cas d'irradiation nous voyons que FLUKA donne des valeurs de  $H^*(10)$  bien au-dessous de la limite de  $20 \mu\text{Sv/semaine}$  à l'extérieur du mur de face et des murs latéraux, et juste à la limite de  $20 \mu\text{Sv/semaine}$  à l'extérieur du mur de fond. La dose au-dessus du plafond de 330 cm d'épaisseur (pas montrer ici) atteint une valeur légèrement plus élevée que la limite de  $100 \mu\text{Sv/semaine}$ .

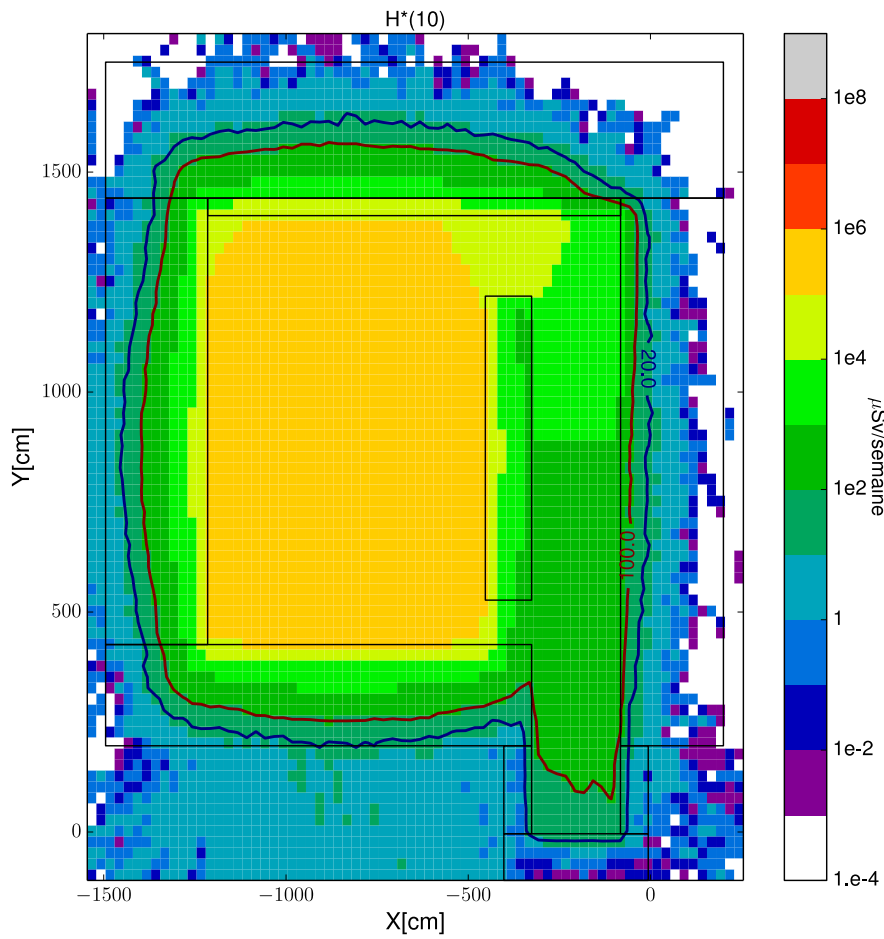


Figure 27 Calcul, obtenu avec FLUKA, de la distribution de  $H^*(10)$  dans le plan horizontal XY du bunker protons moyenné à +/- 12.5 cm autour d'un plan situé 3m au dessus du plan de l'isocentre, correspondant au niveau7 du bunker. Cas d'une irradiation par un faisceau vertical de proton, pointant vers le haut, tirant sur une cible de Fer de  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ , et délivrant une dose absorbée de 1000 Gy par semaine.

#### 6.4.5. Calcul de l'épaisseur des murs

Nous avons estimé l'épaisseur nécessaire des murs pour assurer, durant une irradiation maximal de 1000 Gy/semaine, une dose limite de 100, 50, 20, et 10  $\mu\text{Sv/semaine}$  à l'extérieur des différents murs. Pour ce faire nous avons calculé avec FLUKA des grilles de doses  $H^*(10)$  pour une irradiation avec un faisceau de protons à 250 MeV, tirant sur un fantôme de fer cylindrique de 5cm de rayon et 10 cm de longueur, avec des directions d'incidence de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $180^\circ$ . Dans ces simulations les murs sont remplis de béton classique. La contribution des fuites du cyclotron à la dose est négligée. De ces grilles de dose nous déduisons la variation de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur des murs. À chaque profondeur de mur la valeur maximale de  $H^*(10)$  est calculée sur toute la surface du mur.

La Figure 28 représente la variation de la valeur maximal de  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur des murs. Les courbes bleues représentent les doses qui sont obtenues avec un faisceau pointant directement vers les murs à l'exception du mur intérieur et des murs latéraux où la valeur maximale est retenue parmi les cas des faisceaux pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$ . Les courbes rouges représentent la variation de la valeur maximale de  $H^*(10)$  pour un scénario avec une distribution de la direction du faisceau de 25% à  $0^\circ$  et  $180^\circ$ , et 50% à  $90^\circ$ . Les lignes en tirets représentent les ajustements exponentiels des courbes de dose que nous utilisons pour déduire l'épaisseur minimale des murs nécessaire pour limiter la dose en dessous des limites légales de radioprotection. Pour les murs latéraux les épaisseurs minimales sont calculées par interpolation des courbes de dose aux valeurs de dose limite. Les épaisseurs minimales calculées sont reportées sur la Figure 28 pour une dose de 100 et 50  $\mu\text{Sv/semaine}$  et dans la Table 3 pour les doses limites de 100, 50, 20 et 10  $\mu\text{Sv/semaine}$ . Il est important de noter que, pour l'estimation de l'épaisseur des murs latéraux, nous considérons que les trous dans les murs intérieurs qui contiennent les supports d'axe de rotation de la machine sont complètement bouchés et que l'épaisseur est donné au delà de la chicane pour le mur latéral de la chicane. Dans la dernière colonne de la Table 3 nous reportons les résultats d'épaisseur de murs qui ont été obtenus dans les calculs préliminaires de radioprotection suivant les directives NPTC [10-11], que nous avons échelonné pour une condition d'irradiation de 1000 Gy/semaine au lieu de 400 Gy/semaine et une limite de dose de 50  $\mu\text{Sv/semaine}$ . Dans ces calculs un cocktail de direction ayant été aussi considéré il y a lieu de regarder les colonnes 6 et 9 pour comparer les deux méthodes. Nous voyons que les calculs Monte Carlo, comparé à la méthode analytique, donnent des épaisseurs de mur plus petites de 20 cm pour le plafond, le sol, et le mur extérieur, plus petites de 10 cm pour le mur intérieur, et de 60 à 70 cm plus petites pour les murs latéraux.

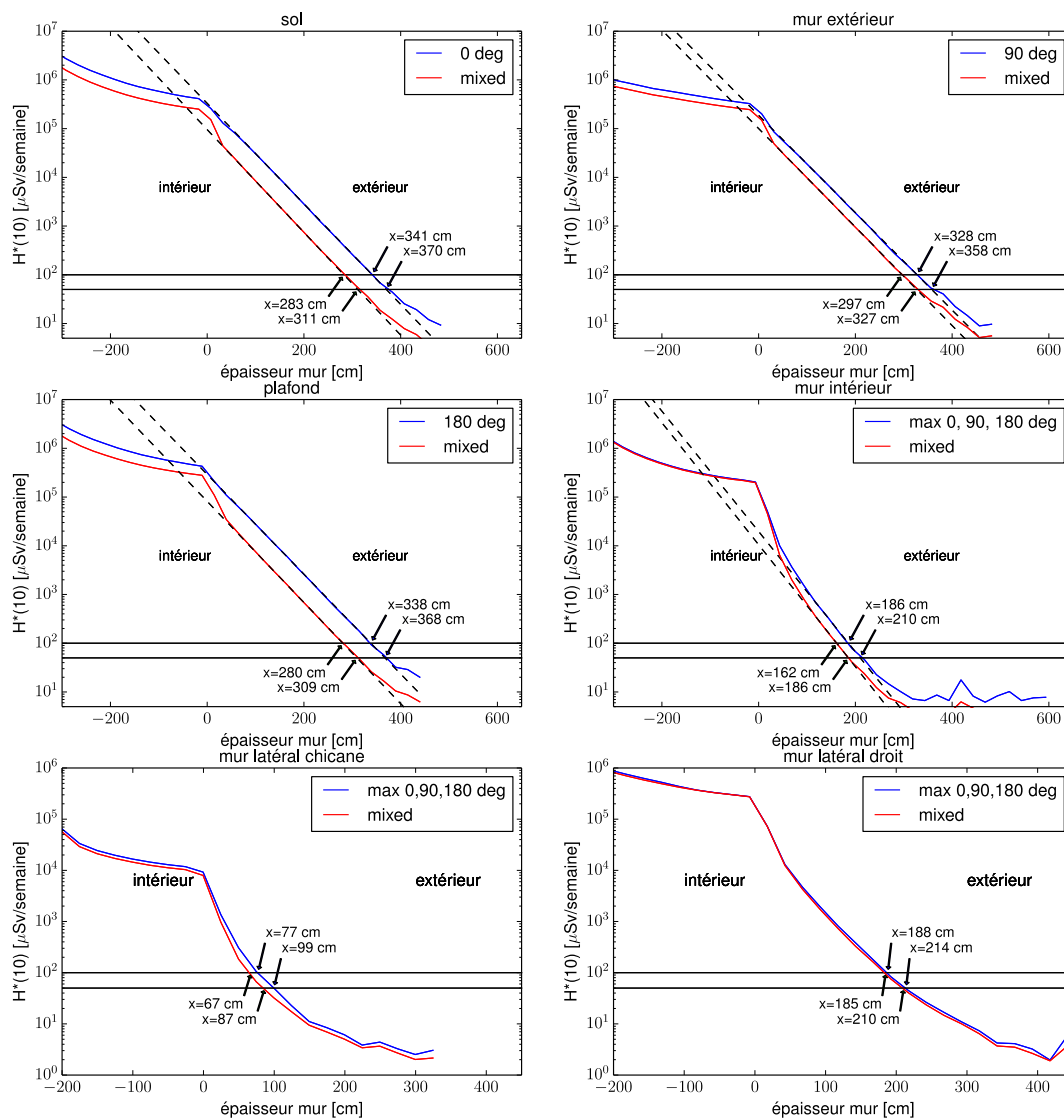


Figure 28 Variation du maximum de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur des murs. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose au patient de 1000 Gy par semaine, délivrée par un faisceau de protons de 250 MeV à 0°, 90°, et 180° d'incidence. La dénomination des murs est définie à la Figure 4. Les courbes de doses pour certains murs sont ajustées avec des exponentiels afin de déterminer les épaisseurs minimales pour atteindre des valeurs de  $H^*(10)$  en dessous des limites légales. Pour les autres murs le calcul des épaisseurs minimales est obtenu par une simple interpolation.

Type de mur	épaisseur de murs dans le cas d'une exposition max				Épaisseur de mur pour le cas 25% à 0° et 180° et 50% à 90°				Calcul analytique de radioprotection (50 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$ )
	100 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	50 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	20 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	10 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	100 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	50 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	20 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	10 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	
plafond	338 cm	368 cm	406 cm	435 cm	280 cm	309 cm	348 cm	376 cm	330 cm
sol	341 cm	370 cm	409 cm	438 cm	283 cm	311 cm	349 cm	377 cm	330 cm
mur extérieur	328 cm	358 cm	397 cm	428 cm	297 cm	327 cm	366 cm	396 cm	360 cm
mur intérieur	186 cm	210 cm	242 cm	267 cm	162 cm	186 cm	217 cm	241 cm	195cm
mur latéral droit	188 cm	214 cm	259 cm	299 cm	185 cm	210 cm	252 cm	292 cm	280 cm
mur latéral chicane	77 cm	99 cm	130 cm	159 cm	67 cm	87 cm	120 cm	1148 cm	280 cm

Table 3 Estimation des épaisseurs minimales des murs, nécessaires pour limiter la dose  $H^*(10)$  en dessous des limites légales de radioprotection. Ces valeurs sont déduites des résultats de simulations Monte Carlo faites avec FLUKA. La dénomination des murs est définie à la Figure 4. Les calculs d'épaisseur de mur obtenus avec les calculs préliminaires de radioprotection sont reportés dans la dernière colonne pour une dose limite de 100  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$ .

Puisque différentes limites de dose seront fixées pour le mur intérieur aux différents niveaux du bunker, nous avons aussi calculé la variation du maximum de  $H^*(10)$  pour ce mur niveau par niveau. La Figure 29 représente les résultats de ces calculs. Nous voyons que la variation de la dose maximale en fonction de l'épaisseur du mur est quasi identique à tous les niveaux. Nous recommandons dès lors pour chaque niveau de prendre la valeur d'épaisseur de mur estimée pour l'ensemble des niveaux.

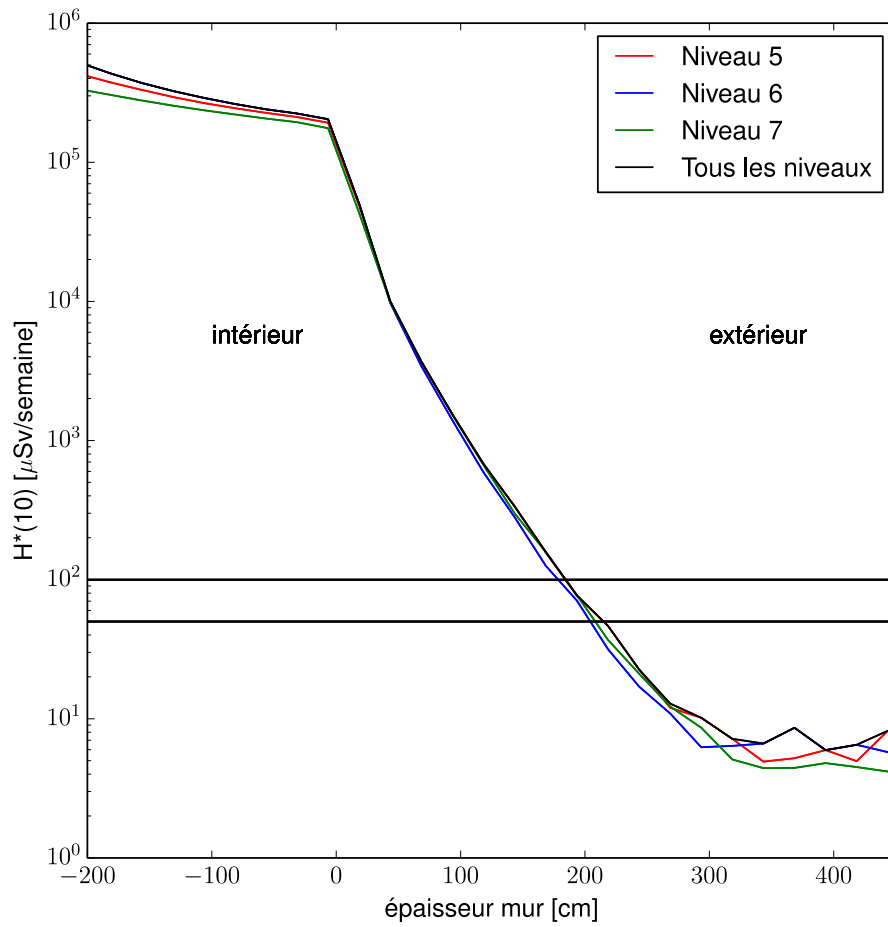


Figure 29 Variation du maximum de l'équivalent de dose ambient  $H^*(10)$  en fonction de l'épaisseur du mur intérieur aux différents niveaux du bunker.

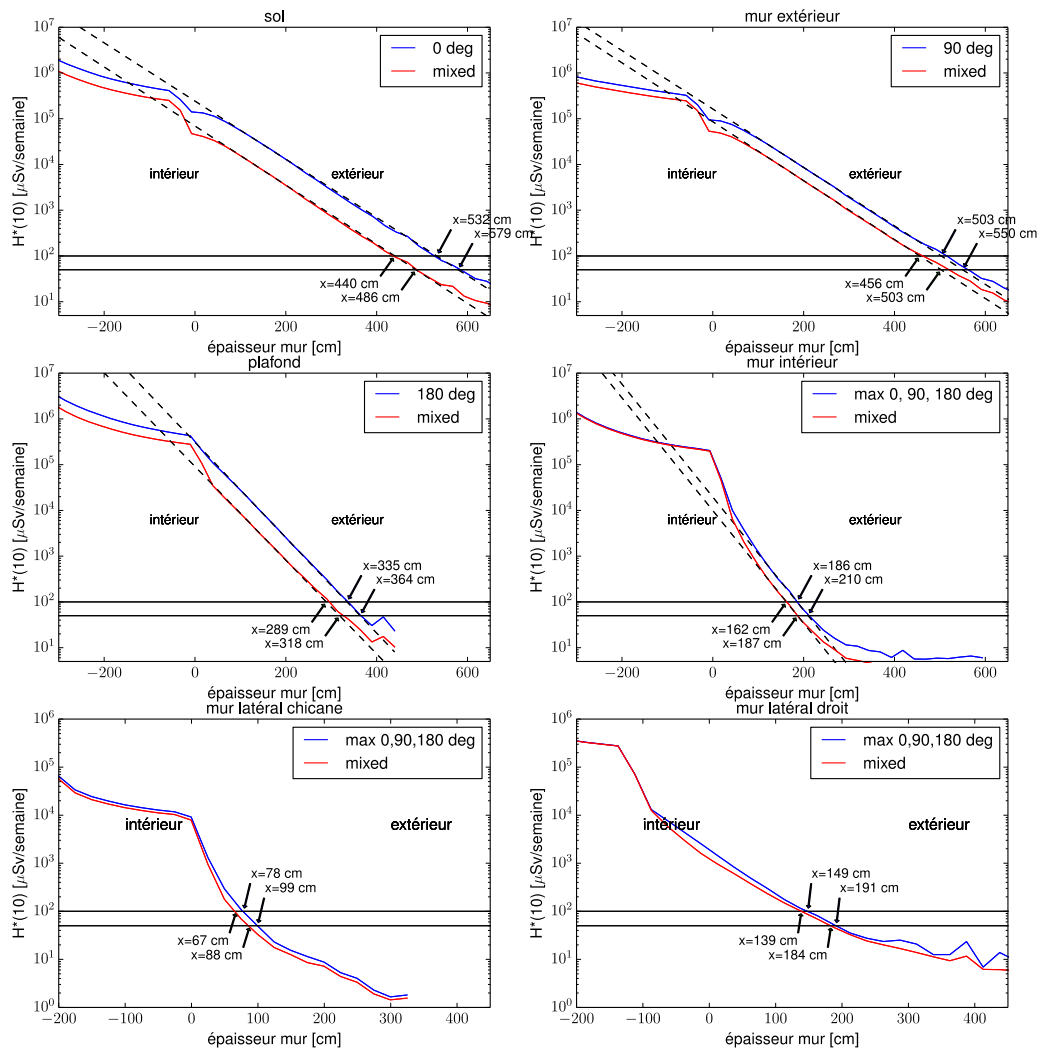


Figure 30 Variation du maximum de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur des murs pour la cas où le mur extérieur, le sol, et le mur latéral droit sont remplacés par une couche de terre après une épaisseur de béton de respectivement 40 cm, 40 cm, et 130 cm. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose au patient de 1000 Gy par semaine, délivrée par un faisceau de protons de 250 MeV à 0°, 90°, et 180° d'incidence. La dénomination des murs est définie à la Figure 4. Les courbes de certains murs sont ajustées avec des exponentiels afin de déterminer les épaisseurs minimales pour atteindre des valeurs de  $H^*(10)$  en dessous de 100 et 50  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$ .

Nous avons aussi estimé les épaisseurs de couche de terre qui seraient nécessaires, au delà d'un mur latéral droit de béton d'une épaisseur de 130 cm et au delà du mur extérieur de béton d'une épaisseur de 40 cm, et en dessous d'une dalle de béton de 40 cm afin de limiter la dose à l'extérieur en dessous de 100, 50, 20, et 10  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$ . Pour cela des simulations FLUKA ont été effectuées avec des larges couches de terre placées derrière le mur extérieur, derrière le mur latéral droit, et sous la dalle de 40cm d'épaisseur. La Figure 30 représente la variation de la valeur maximale de  $H^*(10)$  en fonction de l'épaisseur des murs et des couches de terre. Les épaisseurs minimales calculées sont reportées dans la Table 4 pour les doses limites de 100, 50, 20 et 10

$\mu\text{Sv}/\text{semaine}$ . Comme attendu des couches plus épaisses de murs sont nécessaires pour remplacer le béton dur mur extérieur, du mur latéral droit, et du sol, par contre la présence de ces couches de terre n'a pas d'impact sur l'épaisseur des autres murs en béton non touchés par de la terre. Finalement afin de vérifier que les épaisseurs de murs calculés assurent bien les limites de dose donnée nous avons fait des simulations en fixant les épaisseurs des murs à leurs valeurs données dans la Table 4 pour une limite de dose de  $50 \mu\text{Sv}/\text{semaine}$  et dans le cas d'une exposition maximum au faisceau. Les courbes noires dans la Figure 31 représente la variation du maximum de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur du mur, obtenues avec ces épaisseurs de murs. Nous voyons que les épaisseurs de murs et de couche de terres fixés permettent d'atteindre au delà des murs des valeurs de dose proche de  $50 \mu\text{Sv}/\text{semaine}$ .

Type de mur	épaisseur de murs dans le cas d'une exposition max				Épaisseur de mur pour le cas 25% à 0° et 180° et 50% à 90°			
	100 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	50 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	20 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	10 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	100 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	50 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	20 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$	10 $\mu\text{Sv}/\text{sem}$
plafond	335 cm	364 cm	402 cm	431 cm	289 cm	318 cm	357 cm	386 cm
sol	532 cm	579 cm	642 cm	689 cm	440 cm	486 cm	548 cm	595 cm
mur extérieur	503 cm	550 cm	612 cm	659 cm	456 cm	503 cm	564 cm	611 cm
mur intérieur	186 cm	210 cm	242 cm	266 cm	162 cm	187 cm	219 cm	243 cm
mur latéral droit	149 cm	191 cm	326 cm	385 cm	139 cm	184 cm	263 cm	
mur latéral chicane	78 cm	99 cm	134 cm	188 cm	67 cm	88 cm	120 cm	165 cm

Table 4 Estimation des épaisseurs minimales des murs, nécessaires pour limiter la dose  $H^*(10)$  en dessous des limites légales de radioprotection. Ces valeurs sont déduites des résultats de simulations Monte Carlo faites avec FLUKA. Les calculs d'épaisseur de mur obtenus avec les calculs préliminaires de radioprotection sont reportés dans la colonne 4.

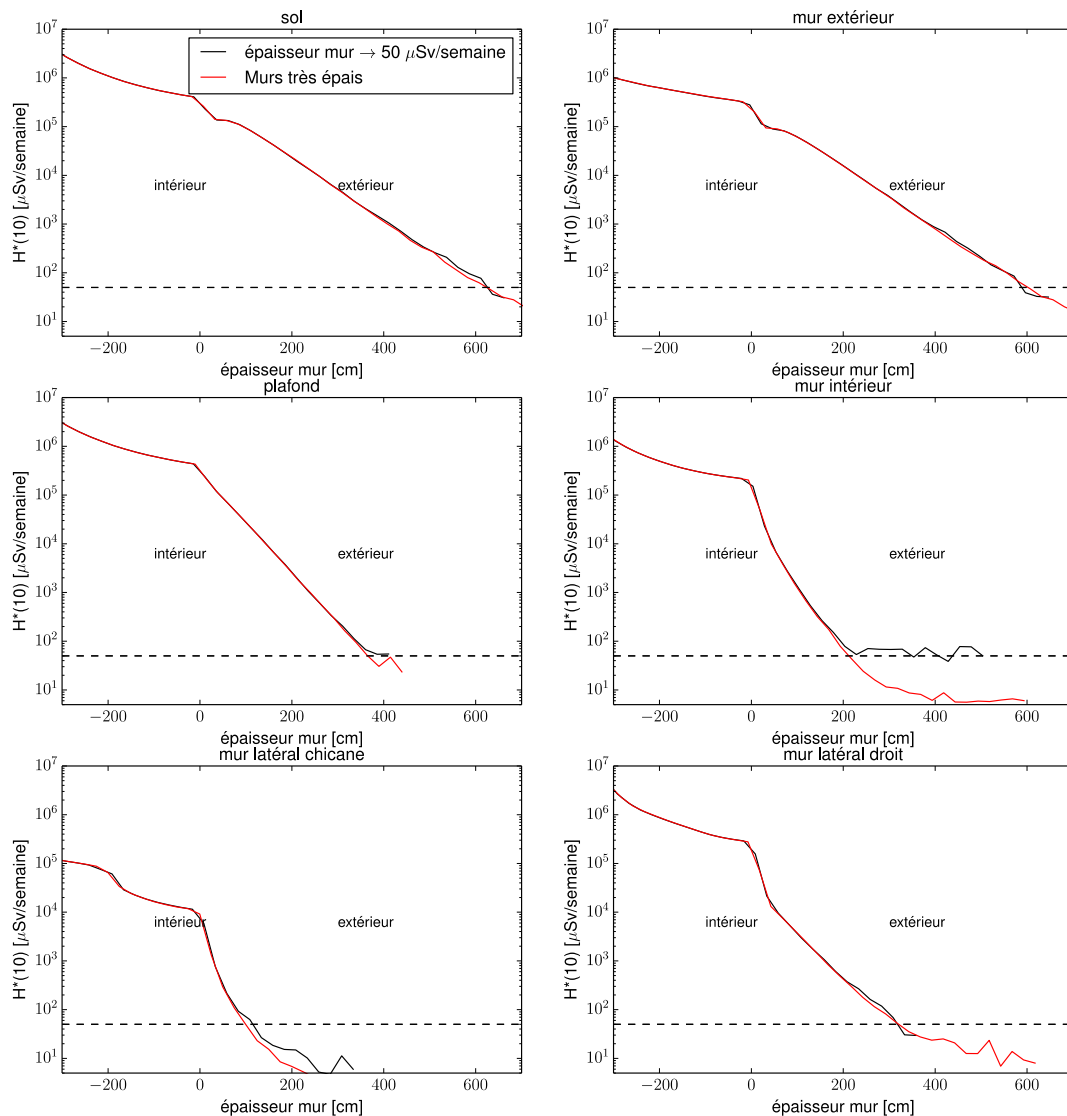


Figure 31 Variation du maximum de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur des murs pour la cas où les épaisseurs des murs sont fixés à leurs valeurs données dans la Table 4 (courbes noires) et le cas où les épaisseurs de murs sont beaucoup plus larges.

Nous avons aussi fait des simulations avec des faisceaux pointant à  $120^\circ$ ,  $135^\circ$  et  $150^\circ$  pour vérifier si ces cas de direction de faisceaux pourraient donner lieu à des doses au dessus du bunker plus élevées que dans le cas d'une irradiation à  $180^\circ$ . La Figure 32 représente la valeur calculée de  $H^*(10)$  moyennée à  $\pm 20$  cm autour du plan vertical YZ passant par l'isocentre pour le cas d'une irradiation à  $120^\circ$  d'incidence du faisceau de protons. La Figure 33 compare les courbes d'isodoses à 50 et 1000  $\mu\text{Sv/semaine}$  pour les cas d'irradiations à  $120^\circ$  (ligne en tirets) et  $180^\circ$  (ligne solide) d'incidence. Nous voyons que pour une irradiation oblique la ligne d'isodose à 50  $\mu\text{Sv/semaine}$  s'étend dans la couche de terre au delà de la hauteur du plafond jusqu'à 4m. Nous recommandons dès lors d'assurer que la couche de terre au delà du mur extérieur s'étende au moins 4m au dessus de la base du plafond.

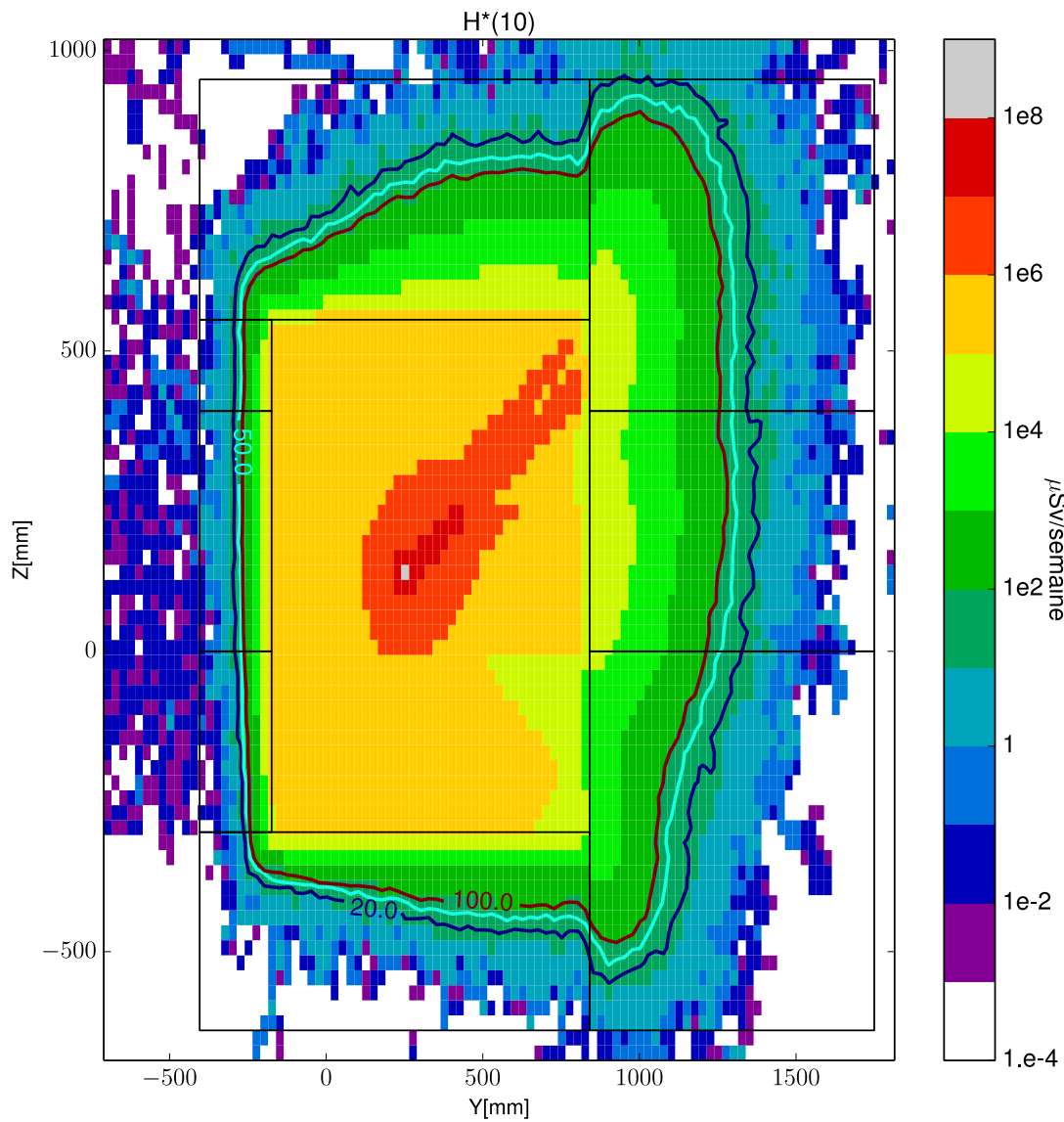


Figure 32 Calcul, obtenu avec FLUKA, de la distribution de  $H^*(10)$  dans le plan vertical YZ du bunker protons moyenné à  $\pm 12.5$  cm autour d'un plan contenant l'isocentre. Dans ce cas de simulation des couches de terre sont utilisés en prolongement du mur extérieur et du mur latéral droit. Cas d'une irradiation par un faisceau oblique de proton tirant à  $120^\circ$  d'incidence sur une cible de Fer de 10 cm d'épaisseur et délivrant une dose absorbée de 1000 Gy par semaine.

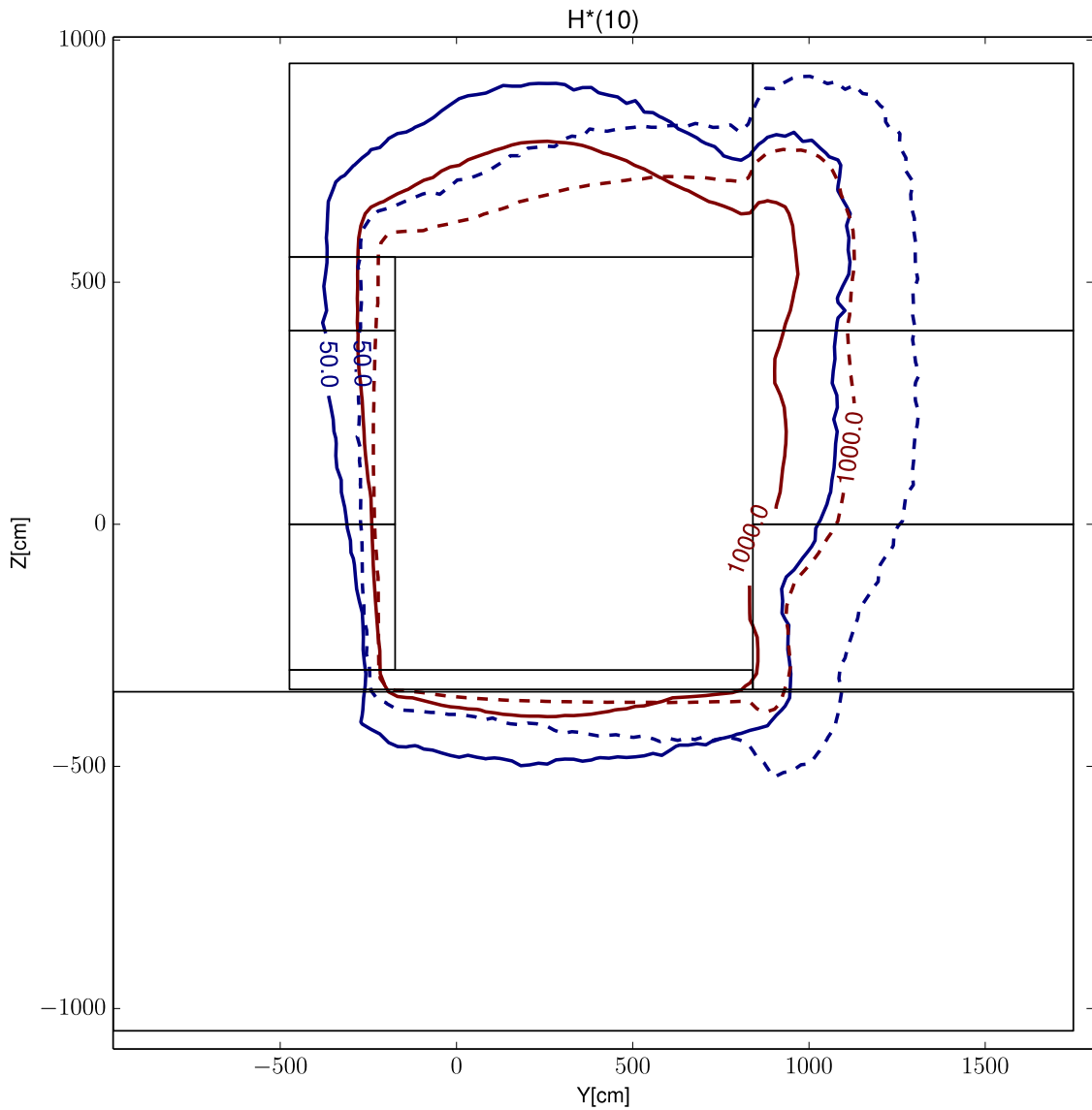


Figure 33 Comparaison des courbes isodose ( $H^*(10)$ ) à 50 et 1000  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$  dans le plan vertical YZ passant par l'isocentre, comme calculé avec FLUKA pour un faisceau à  $180^\circ$  (ligne solide) et à  $120^\circ$  (ligne en tirets)

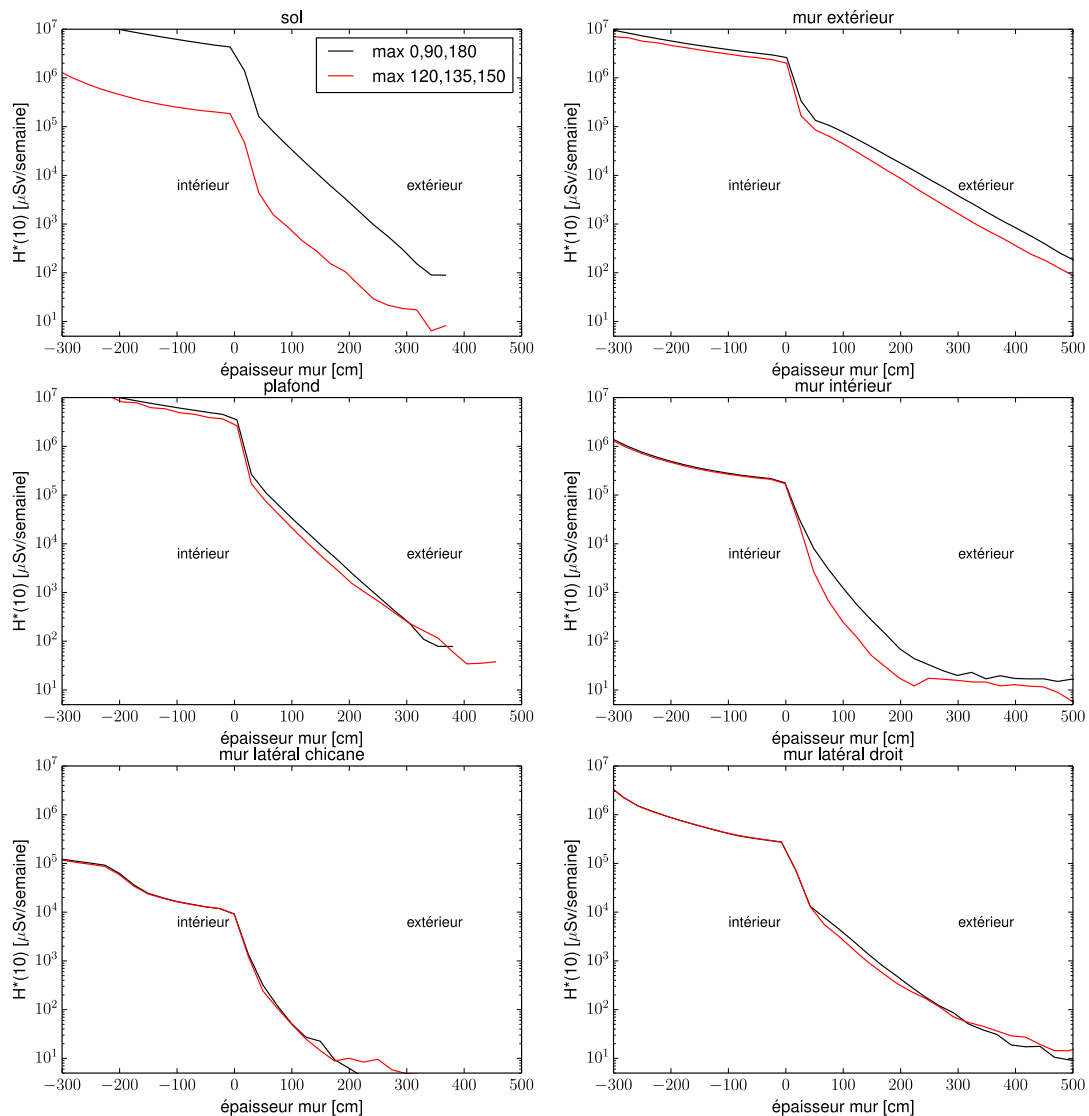


Figure 34 Comparaison de la variation de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  à travers les murs des bunkers dans le cas où de faisceaux de protons vertical et horizontal sont considérés, et dans le cas où des faisceaux pointant vers le coin supérieur du bunker à  $120^\circ$ ,  $135^\circ$ , et  $150^\circ$  sont pris en compte. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par le faisceau de protons de 250 MeV. Pour chaque groupe de simulations la valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les trois cas de faisceaux simulés.

#### 6.4.6. Etude de la rétrodiffusion

L'analyse des distributions de l'équivalent de dose  $H^*(10)$  dans le plan horizontal au niveau 5 juste au dessus de la dalle en béton de 40 cm d'épaisseur situé au-dessus d'un sous sol en terre de type EarthUS ne montrent pas d'effet de rétrodiffusion (voir Figures 34 et 35).

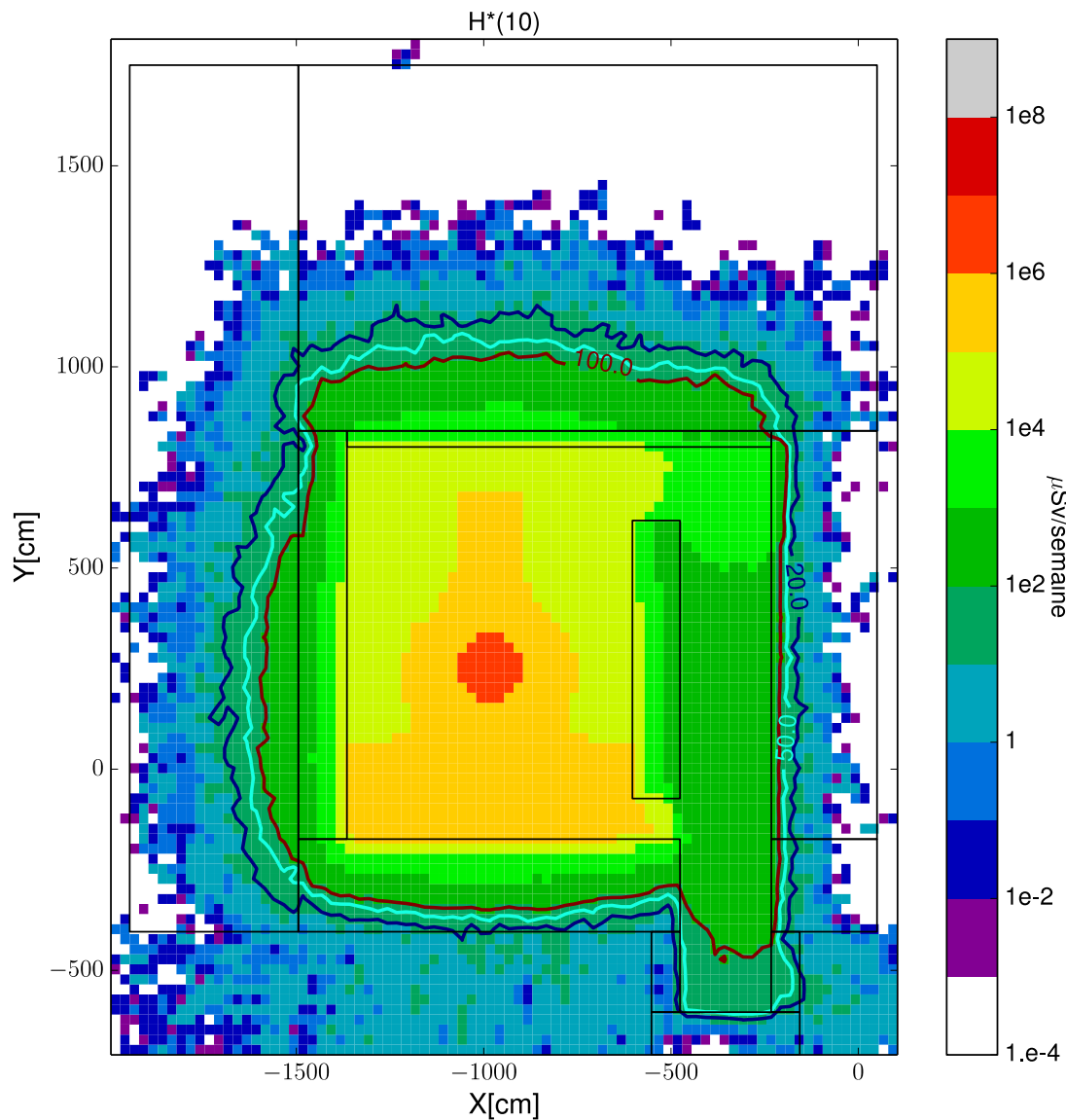


Figure 35 Calcul, obtenu avec FLUKA, de la distribution de  $H^*(10)$  dans le plan horizontal au dessus de la dalle du niveau5 du bunker. Dans ce cas de simulation des couches de terre sont utilisés en prolongement du mur extérieur, du sol (dalle de 40 cm) et du mur latéral droit. Cas d'une irradiation par un faisceau de proton tirant à  $0^\circ$  d'incidence sur une cible de Fer de 10 cm d'épaisseur et délivrant une dose absorbée de 1000 Gy par semaine.

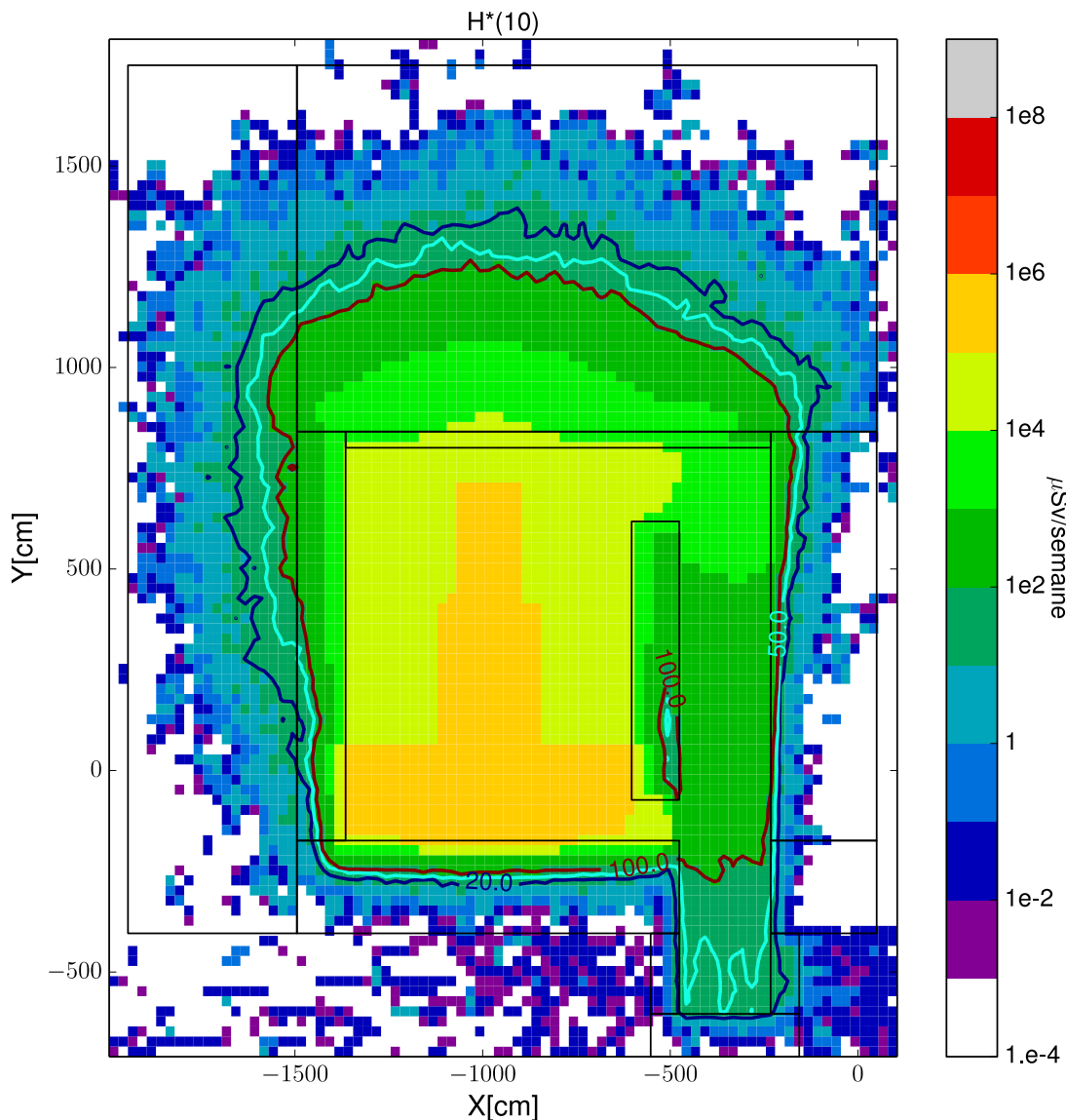


Figure 36 Calcul, obtenu avec FLUKA, de la distribution de  $H^*(10)$  dans le plan horizontal au dessus de la dalle du niveau5 du bunker. Dans ce cas de simulation des couches de terre sont utilisés en prolongement du mur extérieur, du sol (dalle de 40 cm) et du mur latéral droit. Cas d’une irradiation par un faisceau de proton tirant à  $90^\circ$  d’incidence sur une cible de Fer de 10 cm d’épaisseur et délivrant une dose absorbée de 1000 Gy par semaine.

#### 6.4.7. Impact des trous de l’ancrage des axes du Mevion S250

Nous avons calculé l’impact des trous dans l’ancrage des axes du Mevion S250 sur les niveaux d’équivalent de dose ambiant à l’intérieur et à l’extérieur du bunker. La Figure 37 compare les isocourbes de l’équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  dans le plan horizontal contenant l’isocentre, comme calculées avec FLUKA dans la cas où les trous dans l’ancrage du Mevion S250 sont ou ne sont pas pris en compte. Nous voyons que les lignes d’isodose rentrent dans les trous quand ceux ci sont pris en compte mais que dans les murs latéraux extérieurs les lignes de dose sont identiques dans les deux cas de figure. Nous en concluons que la présence des trous dans l’ancrage du Mevion S250 n’a pas d’influence sur le niveau de dose dans les murs et à l’extérieur du bunker.

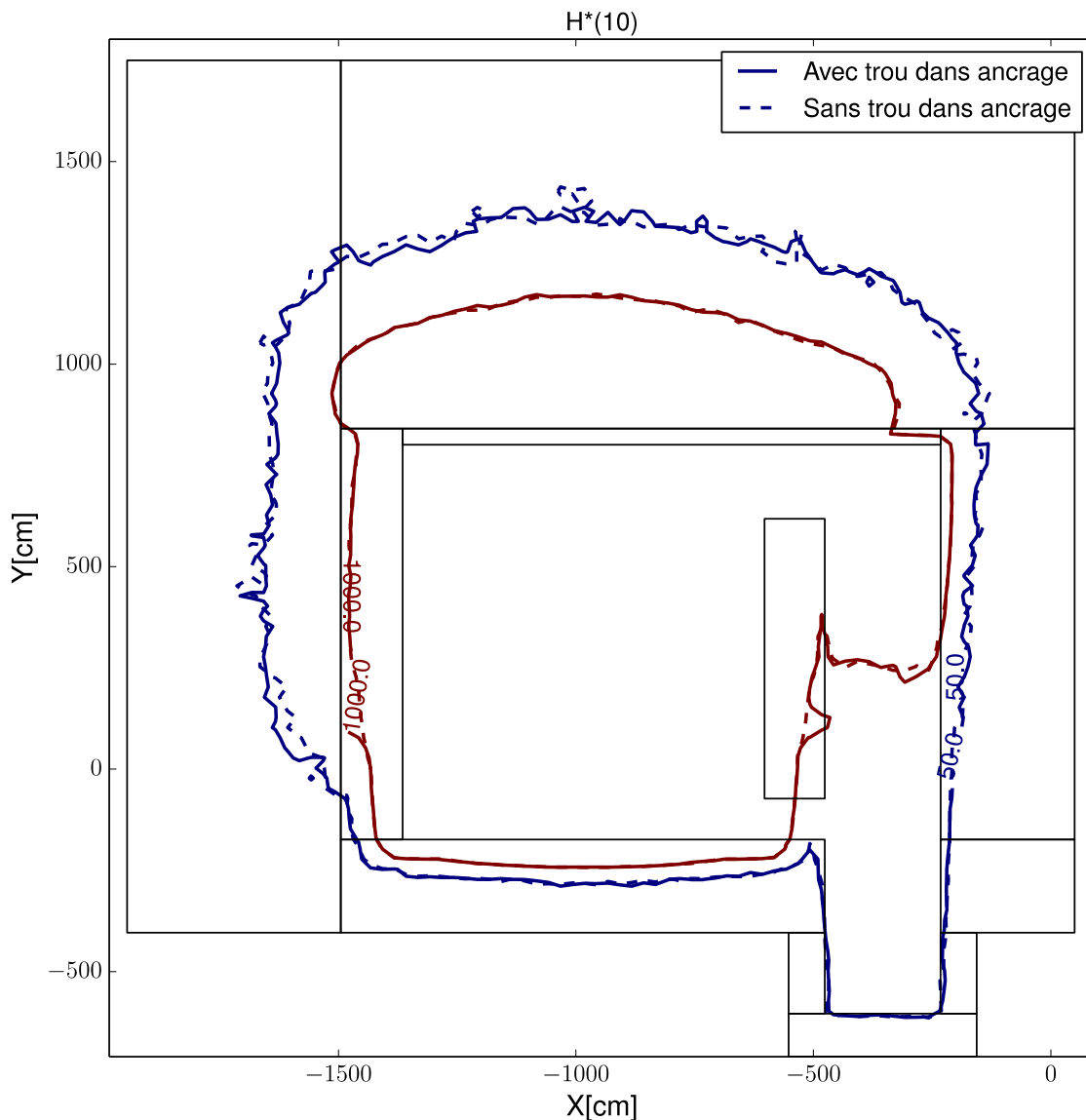


Figure 37 Comparaison des courbes d'isodose de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  à 50 et 1000  $\mu\text{Sv/semaine}$  dans le plan horizontal  $XY$  passant par l'isocentre, obtenues en ne tenant pas compte (ligne solide) et en tenant compte (ligne en tirets) des trous dans l'ancrage du Mevion S250.

#### 6.4.8. Calcul de l'influence de la perte cyclotron

Nous avons estimé l'impact de la perte des protons du cyclotron sur le niveau de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  à l'intérieur et à l'extérieur du bunker. Nous avons utilisé le même modèle que dans les simulations de J. Siebers pour modéliser cette perte. Dans ce modèle le cyclotron est représenté par un cylindre plein de fer de 88.4 cm de rayon et 72.8 cm de hauteur, entouré d'une couche de 2.54 cm de polyéthylène borée. Le centre du cyclotron est placé à 2.92 m de l'isocentre le long de l'axe du faisceau. Une source de proton monodirectionnel à 250MeV est placée dans le cylindre à 33.5 cm du centre du cyclotron le long de la ligne formée par l'isocentre et le centre du cyclotron. La direction des protons est perpendiculaire à l'axe joignant l'isocentre au centre du cyclotron, pointant vers la bas dans le cas d'un faisceau à  $90^\circ$  d'incidence. Une valeur conservative

de 20% de perte du faisceau est considérée pour la normalisation des résultats. Les doses  $H^*(10)$  obtenues avec les simulations de la perte des faisceaux pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $135^\circ$  sont ajoutées respectivement aux résultats obtenus avec le faisceau bombardant le fantôme de fer à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$ . La Figure 38 représente la valeur maximum de  $H^*(10)$  prise parmi les trois cas de faisceaux en fonction de l'épaisseur des murs avec la perte cyclotron (total) et sans la perte cyclotron (seulement fantôme de fer à l'isocentre). Nous remarquons que la perte cyclotron induit dans la partie extérieure du mur intérieur une augmentation de la dose de 50 à 100% nécessitant une épaisseur supplémentaire de mur de 10-15 cm. Pour les autres murs l'effet de la perte cyclotron est négligeable.

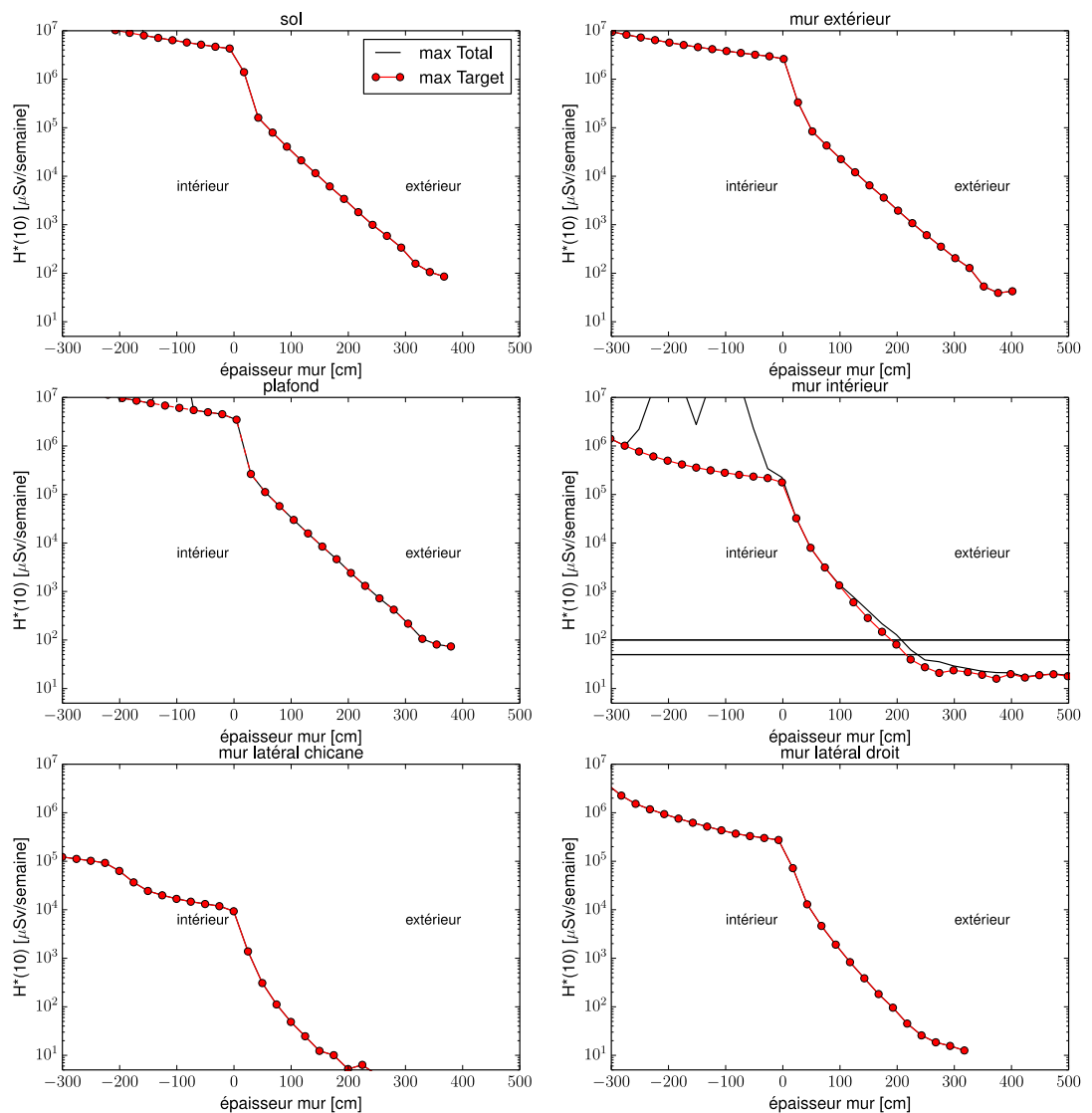


Figure 38 Variation de la valeur maximum de  $H^*(10)$  en fonction de l'épaisseur des murs dans le cas où la perte cyclotron est prise en compte (ligne noire solide) ou n'est pas prise en compte (ligne rouge) dans le calcul des la dose.

#### 6.4.9. Influence du type de mur sur la dose $H^*(10)$

La Figure 39 représente la variation de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur du plafond comme calculée à partir des résultats de simulations FLUKA avec différents types de béton. Dans ce cas une direction du faisceau de  $180^\circ$  pointant directement vers le plafond est considérée. L'on voit clairement qu'une dose plus élevée est obtenue avec le béton baryté. Ceci est dû à une production plus élevée des neutrons secondaires dans ce type de matériel comparé au béton classique. Des murs en polyéthylène et en polyéthylène borée donnent, comparé au béton classique, des doses plus petites à faible épaisseur des murs mais atténuent moins rapidement la dose pour des épaisseurs plus grande que 50 cm. En conclusion un béton de type classique garantira le meilleur blindage des neutrons. Notons aussi que les simulations Geant4 donnent des résultats équivalents à FLUKA pour l'étude des types de béton.

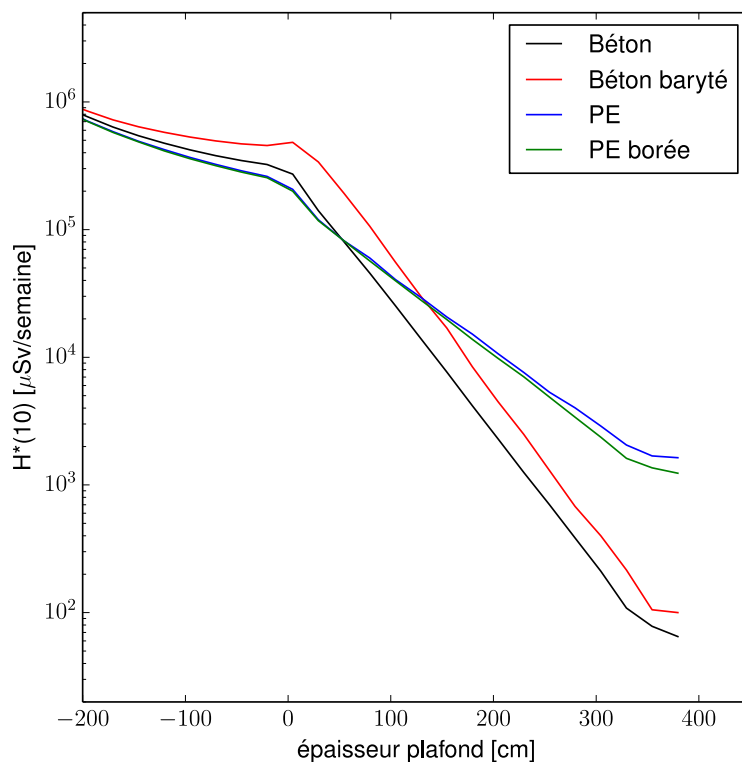


Figure 39 Comparaison de la variation du maximum de  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur du plafond pour différents types de bétons. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose au patient de  $1000 \text{ Gy/semaine}$  délivré par un faisceau de protons de  $250 \text{ MeV}$  à  $180^\circ$  d'incidence.

#### 6.4.10. Etude de solution "smart" de murs

Nous avons étudié l'avantage qu'il y aurait d'utiliser des prémurs de polyéthylène borée devant les murs en béton classique. Pour ce faire nous avons fait différentes simulations FLUKA ou nous avons rajouté une épaisseur de 25, 50, et 100 cm de polyéthylène borée devant les murs en béton. La Figure 40 représente la variation de la valeur maximum de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  en fonction de l'épaisseur du plafond obtenus avec différentes épaisseurs de prémurs. Depuis ces courbes nous déduisons qu'avec un prémur de 100 cm d'épaisseur une épaisseur de 297 cm de béton classique est nécessaire pour limiter la dose à l'extérieur à  $100 \mu\text{Sv/semaine}$ , alors que sans le prémur une épaisseur de 335cm est nécessaire. En conclusion dans cette configuration un prémur de 100 cm de polyéthylène borée permet de réduire l'épaisseur du mur de béton d'environ 38 cm.

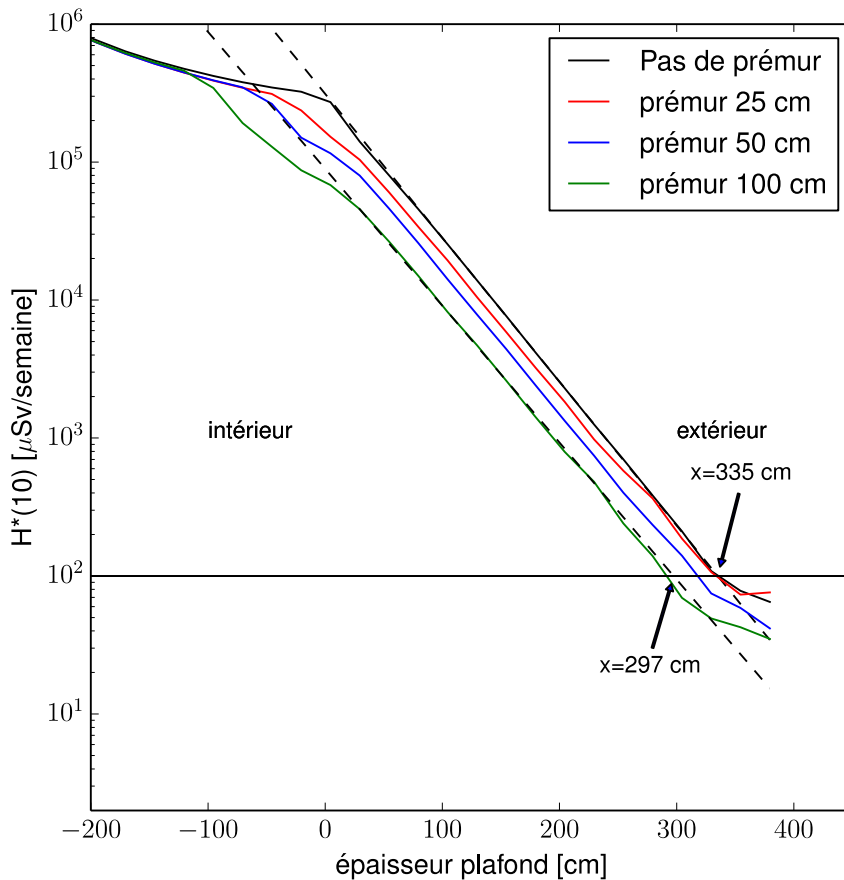


Figure 40 Comparaison de la variation du maximum de  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur du plafond pour différentes épaisseurs de prémur en polyéthylène borée placé devant les murs en béton classique. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par un faisceau de protons de 250 MeV à  $180^\circ$  d'incidence.

Dans le cas où les prémurs ne sont pas placés devant les murs en béton existant mais remplacent leur partie intérieur, la valeur maximum de  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur du plafond varie comme indiquée dans la Figure 41. Depuis ces courbes nous déduisons qu'avec un prémur de 100 cm d'épaisseur une épaisseur totale de prémur et de mur de 376 cm est nécessaire pour limiter la dose à l'extérieur à  $100 \mu\text{Sv/semaine}$ , ce qui donne une épaisseur de mur de béton classique derrière le prémur de 276 cm ( $376-100$ ). En conclusion dans cette configuration un prémur de 100 cm de polyéthylène borée permet de diminuer l'épaisseur du mur de béton classique de 60 cm ( $335-276$  cm).

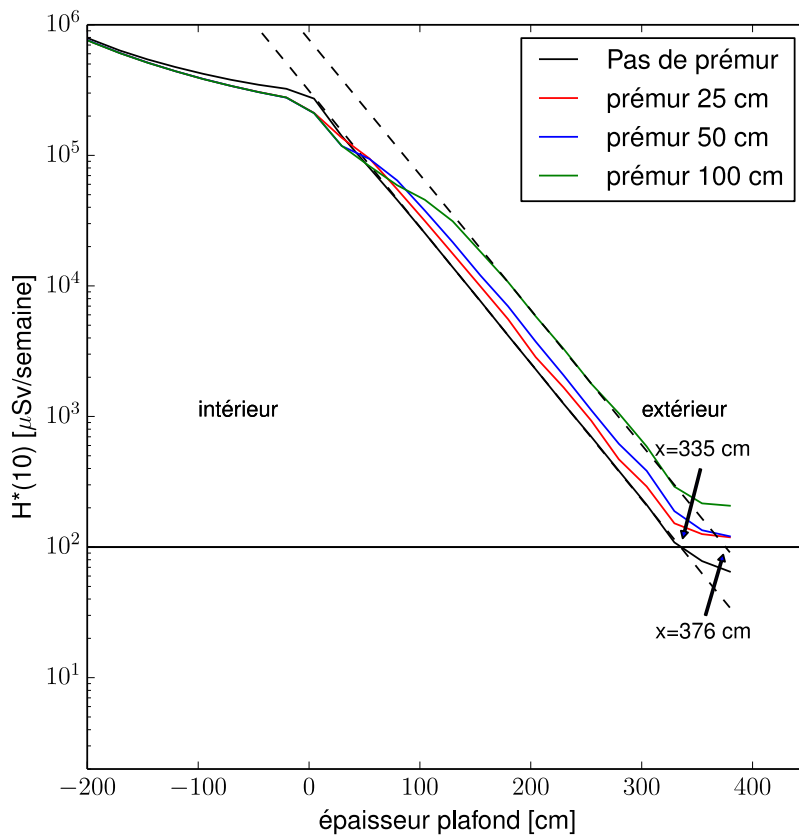


Figure 41 Comparaison de la variation du maximum de  $H^*(10)$  en fonction de la profondeur du plafond pour différentes épaisseurs de prémur en polyéthylène borée remplaçant la partie intérieure des murs en béton classique. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par un faisceau de protons de 250 MeV à 180° d'incidence.

A la demande des architectes nous avons aussi calculé l'impact de la présence d'un prémur d'une épaisseur de 2 pouces de polyéthylène borée sur les épaisseurs de mur nécessaires pour limiter la dose en dessous des valeurs limites. Comme attendu des résultats déjà obtenus avec des couches plus épaisses, la présence d'une couche mince de polyéthylène borée ne permet pas de réduire l'épaisseur des murs en béton de manière significative.

### 6.4.11. Utilisation de portes blindées

Afin d'évaluer, s'il sera nécessaire d'utiliser des portes blindées pour limiter l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  en dessous des limites légales aux environs de l'entrée des bunkers, nous avons fait des simulations FLUKA ou des portes blindées à l'entrée des bunkers sont soit considérées soit négligées dans la géométrie. Les portes sont placées de telle manière que la partie intérieure des portes touche l'intérieur du couloir de la chicane (orienté vers intérieur). La composition de base des portes blindées considérée dans nos simulations, qui nous a été transmise par Losinger, est la suivante : 1 cm de plomb, 1 cm d'acier, et 10 cm de polyéthylène borée. Nous avons aussi considéré des portes blindées avec des épaisseurs différentes de polyéthylène borée (10, 20, 30 et 40 cm). Nous avons également considéré le cas où une porte blindée est rajoutée dans la chicane à l'entrée d'accès de la partie sous-sol du bunker (voire partie bleue sur Figure 42). La composition de cette porte, qui nous a été transmise par Losinger, est la suivante : 6.4 cm de plomb, 28 cm de polyéthylène borée, et 6.4 cm de plomb. Finalement pour chaque niveau du bunker nous avons aussi étudié la possibilité de prolonger les sorties par des couloirs d'accès de 1 à 2 m, afin d'éviter l'utilisation de portes blindées à l'extérieur (voire partie rouge sur Figure 42).

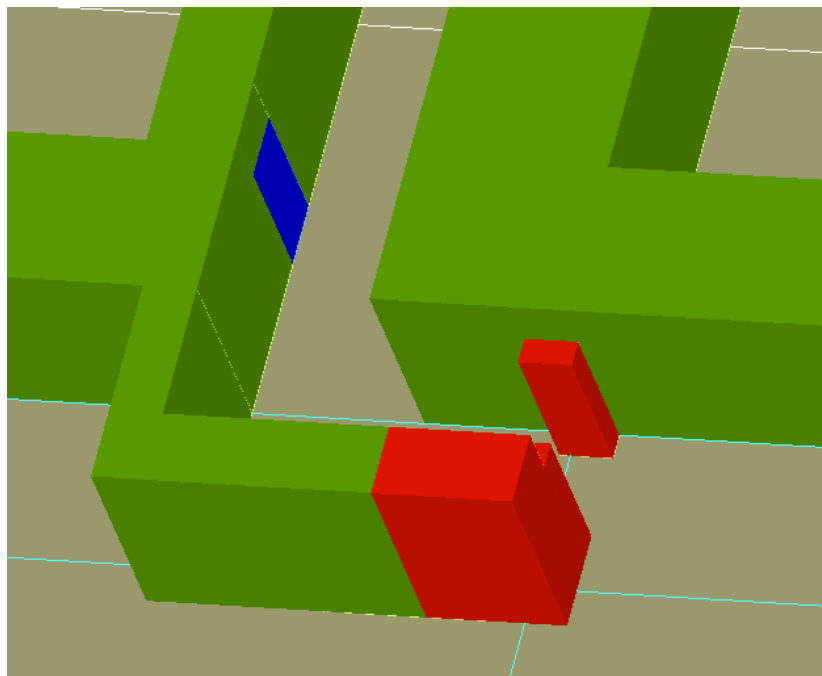


Figure 42 Coupe de l'entrée du bunker au niveau5 avec une porte blindée (bleu) dans la chicane à l'entrée d'accès de la partie sous-sol du bunker, et un couloir de 2m (rouge) prolongant la sortie du bunker.

La Figure 43 compare la variation de la valeur maximale et moyenne de  $H^*(10)$  à travers l'entrée d'accès au niveau5 du bunker pour différentes configurations d'utilisation de portes blindées. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les cas des faisceaux pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$ . Nous voyons que seul la configuration avec une porte blindée dans la chicane et une porte blindée à l'extérieur avec la couche de polyéthylène borée de 40cm permet de limiter le débit de dose à la sortie du bunker en dessous de  $50 \mu\text{Sv/semaine}$ . Nous avons aussi étudié le cas où une porte blindée à l'entrée du niveau5 serait remplacée par un couloir d'accès de 2m de long dans le prolongement de l'entrée du bunker (voire partie rouge sur Figure 42). Le débit de  $H^*(10)$  à travers l'entrée, obtenu avec cette solution est présenté par la courbe bleue claire sur la Figure 44. Nous voyons que cette solution permettrait également d'assurer une limite de débit de dose à 50

$\mu\text{Sv}/\text{semaine}$  après 2m de couloir depuis l'entrée dans la chicane. Nous prévoyons de faire une ultime simulation sans portes blindées dans la chicane et à l'extérieur du bunker mais avec un couloir prolongant l'entrée du bunker pour voir après quelle longueur de couloir une dose de 50  $\mu\text{Sv}/\text{heure}$  serait atteinte.

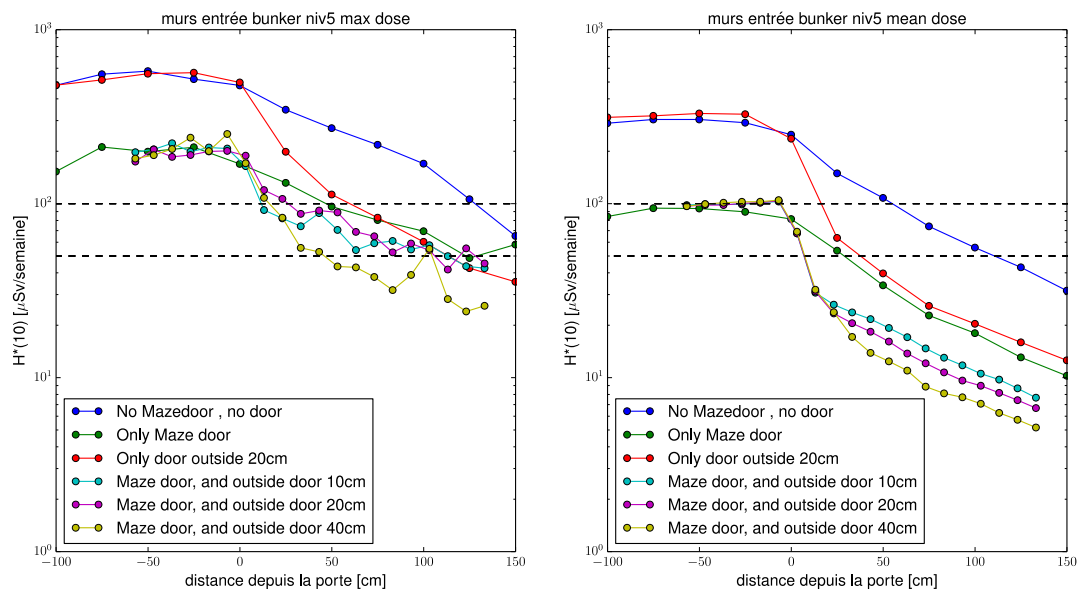


Figure 43 Comparaison de la variation du maximum (gauche) et de la moyenne (droite) de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  à travers l'entrée du bunker au niveau 5, avec différentes configurations de portes blindées dans la chicane, et à l'entrée du bunker. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par le faisceau de protons de 250 MeV. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les trois cas de faisceaux simulés, pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$

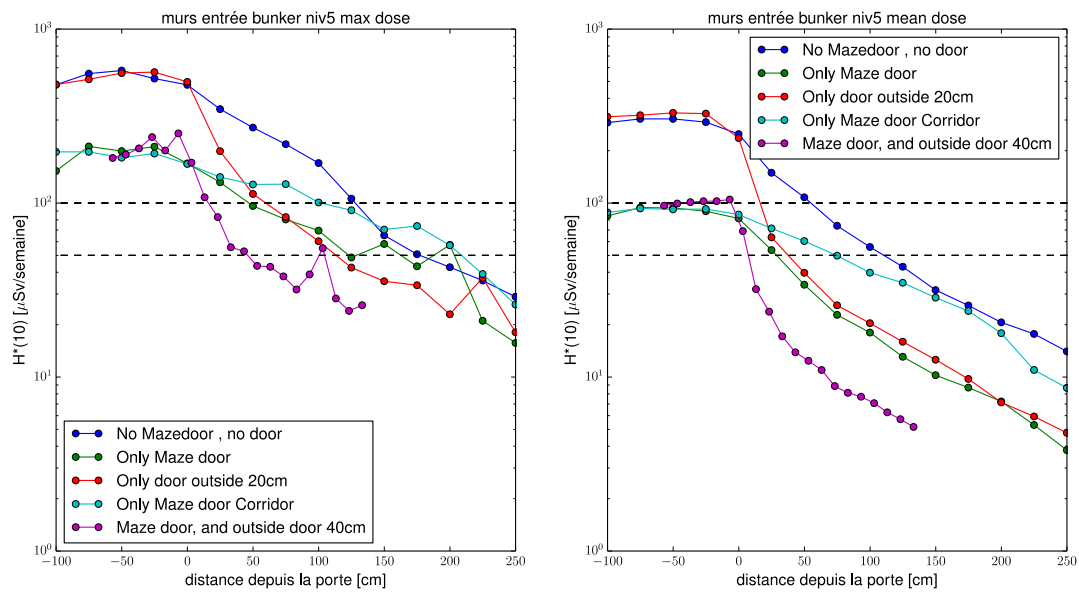


Figure 44 Comparaison de la variation de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  à travers l'entrée du bunker au niveau5, obtenues avec différentes configurations de portes blindée dans la chicane, et à l'entrée du bunker. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par le faisceau de protons de 250 MeV. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les trois cas de faisceaux simulés, pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$

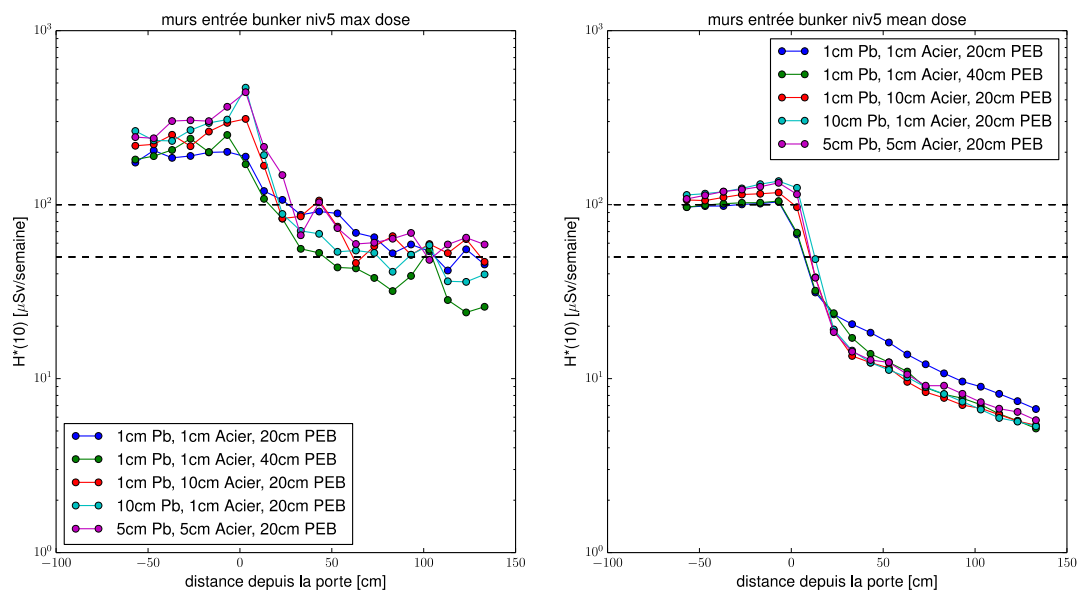


Figure 45 Cette figure montre l'influence des épaisseurs de couches d'acier et de plomb des portes porte blindées sur le niveau de dose à travers l'entrée du bunker au niveau5.

La Figure 46 compare la variation de la valeur maximale et moyenne de  $H^*(10)$  à travers l'entrée d'accès au niveau6 du bunker pour les cas où : i) il n'y a pas de porte blindée et de couloir de

prolongement (courbe bleue) ; ii) il y a un couloir de prolongement mais pas de porte blindée (courbe rouge) ; iii) et il y a une porte blindée, mais pas de couloir de prolongement (courbe verte) . La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les cas des faisceaux pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$ . Nous voyons que bien qu'une porte blindée permet une chute rapide de la dose bien en dessous de la valeur limite de 50  $\mu\text{Sv/h}$ . Cependant une entrée ou un couloir d'accès s'étendant vers l'extérieur de 60-70 cm à partir de l'intérieur de la chicane permet aussi d'assurer une valeur de débit de dose en dessous de 50  $\mu\text{Sv/h}$ , et ainsi donc d'éviter l'utilisation d'une porte blindée au niveau 6. Cette distance de 60-70 cm est déjà assurée dans les plans du bunker proposés par les architectes, puisque que la limite extérieur de l'entrée de bunker se trouve à une distance de +/- 70 cm de l'intérieur de la chicane.

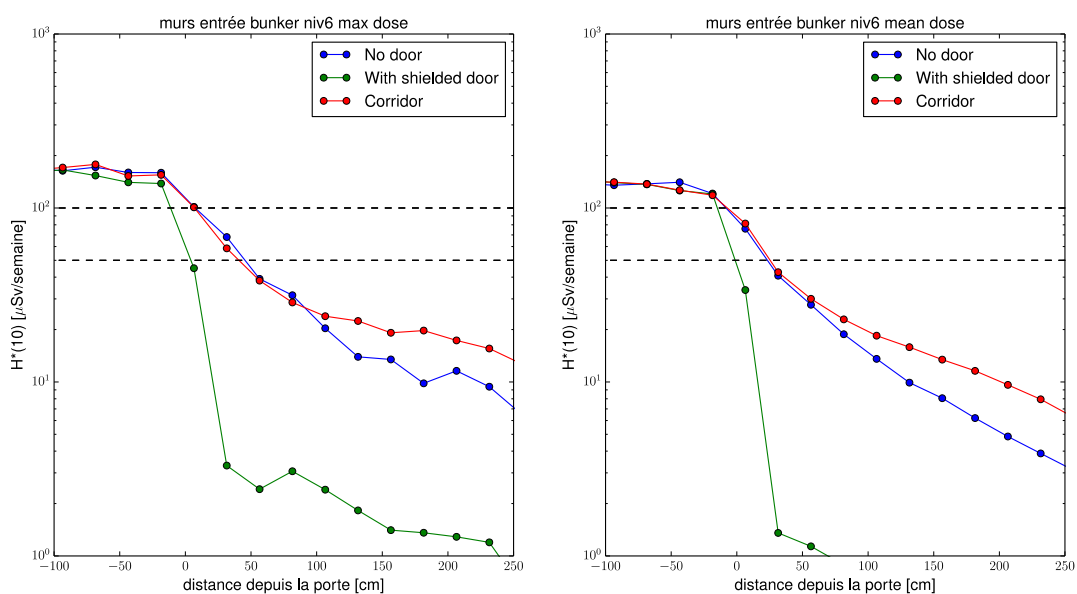


Figure 46 Comparaison de la variation de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  au niveau 6 à travers le entrées des bunkers avec ou sans portes blindées. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par le faisceau de protons de 250 MeV. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les trois cas de faisceaux simulés, pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$

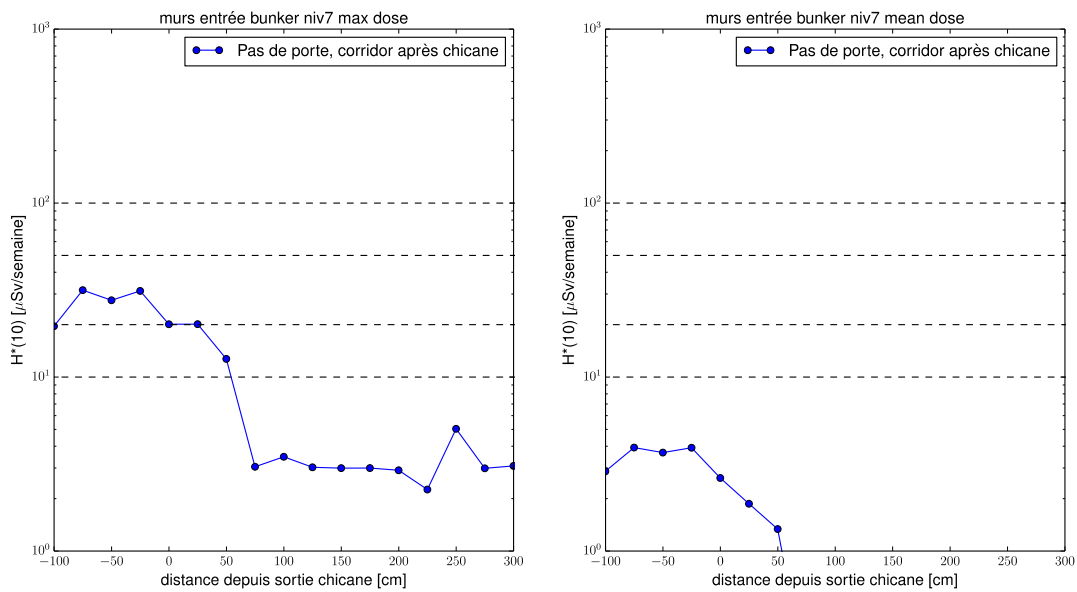


Figure 47 Comparaison de la variation de l'équivalent de dose ambient  $H^*(10)$  à travers l'entrée du bunker au niveau7 sand porte blindée mais avec un couloir prolongeant l'entrée du bunker. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par le faisceau de protons de 250 MeV. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les trois cas de faisceaux simulés, pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$

La Figure 47 montre la variation de la valeur maximale et moyenne de  $H^*(10)$  à travers l'entrée d'accès au niveau7 du bunker pour le cas où il y a un couloir de prolongement à l'entrée mais pas de porte blindée. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les cas des faisceaux pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$ . Nous voyons qu'une entrée ou un couloir d'accès s'étendant vers l'extérieur de 60 cm à partir de l'intérieur de la chicane permet d'assurer une valeur de débit de dose en dessous de 10  $\mu\text{Sv/h}$ . Cette distance de 60 cm est déjà assurée dans les plans du bunker proposés par les architectes puisque qu'une entrée de bunker à une distance de  $\pm 70$  cm. Une porte blindée ne semble dès lors pas nécessaire au niveau7.

#### 6.4.12. Impacts des trous d'aération au dessus des portes blindées

La Figure 48 représente les courbes d'isodose au niveau du trou d'aération au dessus de la porte d'entrée du niveau5 dans le cas d'une irradiation à  $0^\circ$ . Les lignes solides et en tirets sont respectivement obtenues dans le cas où il n'y a pas et où il y a des trous. Nous voyons clairement que les courbes d'isodose s'étendent dans le trou d'aération. Cependant la valeur limite de dose à 50  $\mu\text{Sv/semaine}$  dans le trou d'aération est atteinte plus ou moins à la même distance de la chicane que plus bas au niveau de la porte (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

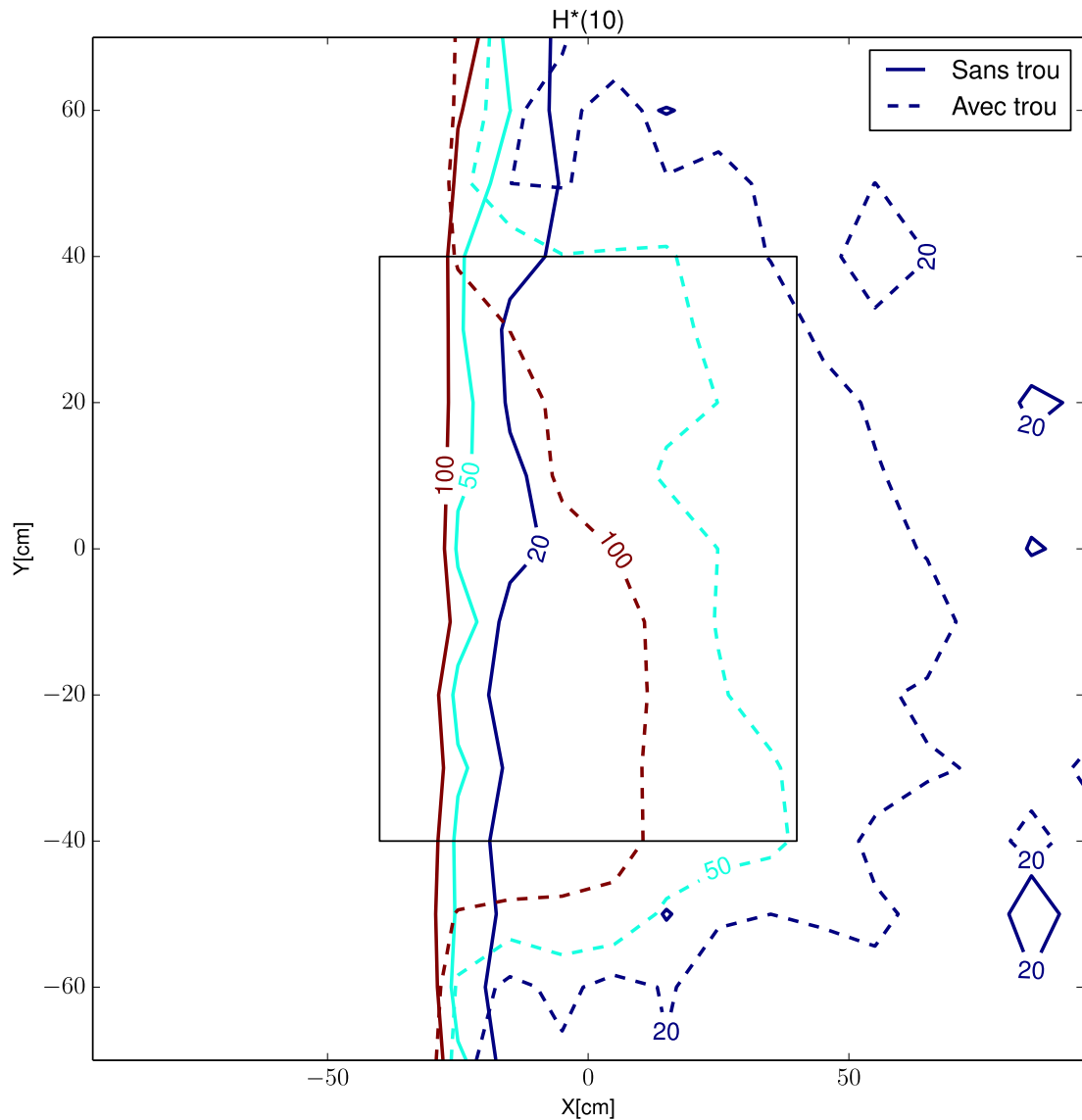


Figure 48 Comparaison des courbes isodose ( $H^*(10)$ ) à 20, 50, et 1000  $\mu\text{Sv}/\text{semaine}$  dans le plan horizontal XY passant au centre du trou d'aération situé au dessus de l'entrée du bunker au niveau 5. Les calculs sont obtenus avec FLUKA pour un faisceau à  $0^\circ$ . Les lignes solides et en tirets représentent respectivement les cas où il n'y a pas de trou d'aération et où il y a un trou d'aération. Le rectangle au centre du graphe représente le contour du trou d'aération.

### 6.4.13. Impacts des conduites dans les murs

Nous avons calculé l'impact de la présence de conduites et de cylindres carbone creux dans les murs latéraux soutenant les bras de rotation de l'accélérateur. Dans le modèle géométrique FLUKA, les conduites sont modélisées par des tubes droits remplis d'air avec un rayon de 7 cm. Certaines sections courbes de conduites sont modélisées par une suite juxtaposée de petits tubes alignés le long de la ligne de courbure de la conduite. La Figure 49 compare la variation de la valeur maximale de  $H^*(10)$  dans les murs du bunker calculés avec FLUKA pour le cas où les conduites

(trous) sont soit négligées (courbe noire) soit prises en compte (courbe rouge). Nous voyons qu'aucune différence significative n'est observée entre les deux cas. Nous en concluons que la présence des conduites, prise en compte dans nos simulations n'affecte pas la valeur de la dose  $H^*(10)$  à l'extérieur du bunker et n'a aucune influence sur nos calculs d'épaisseur de murs.

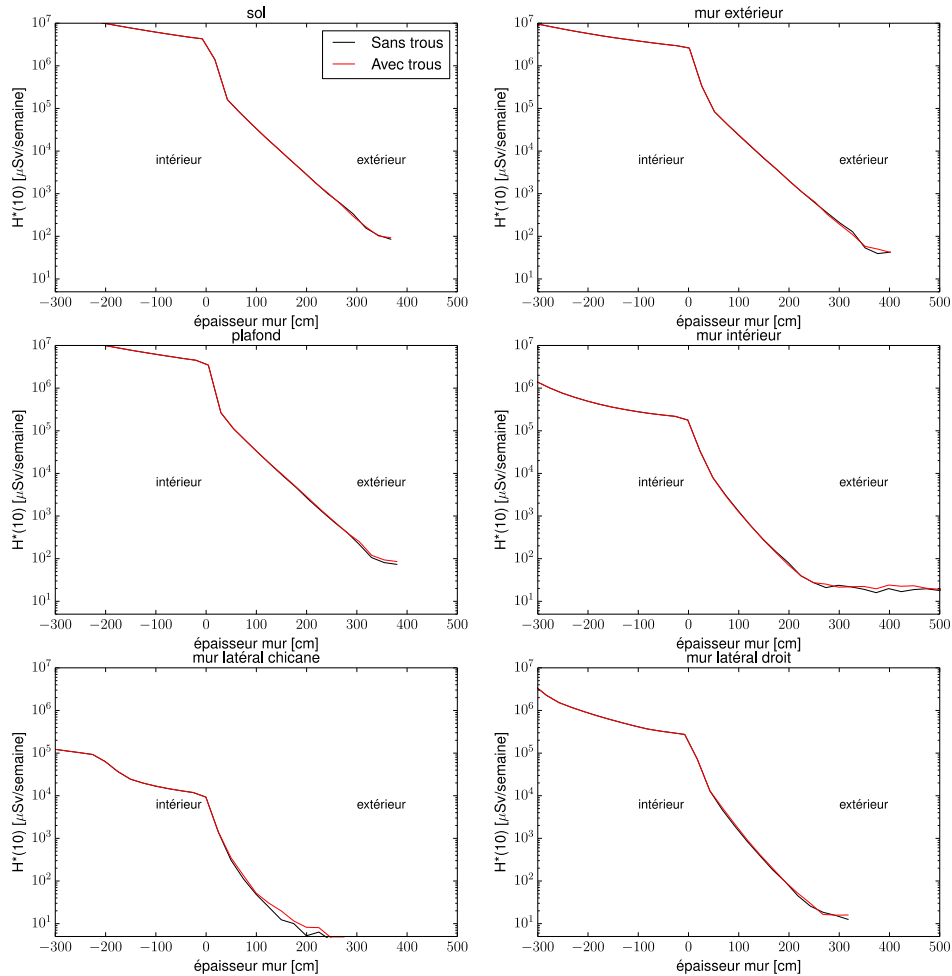


Figure 49 Comparaison de la variation de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  à travers les murs des bunkers pour le cas où la présence de conduites est soit négligée soit prise en compte. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par le faisceau de protons de 250 MeV. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les trois cas de faisceaux simulés, pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$

#### 6.4.14. Influence des alcôves dans le mur extérieur de la chicane

Il nous a été demandé par les architectes d'étudier l'impact de la présence d'une alcôve de 50 et 100 cm de profondeur dans la mur latéral extérieur de la chicane. La Figure 50 compare la variation du maximum de  $H^*(10)$  dans le mur latéral de la chicane en fonction de la profondeur du mur avec

ou sans alcôve, comme calculé avec FLUKA. Nous voyons que la présence de l'alcôve induit une translation de la courbe de dose vers l'extérieur du mur d'une distance équivalente à la profondeur de l'alcôve. En d'autres termes afin d'assurer avec l'alcôve le même niveau de dose à l'extérieur que sans alcôve, le mur à l'extérieur devra être prolongé d'une épaisseur équivalente à la profondeur de l'alcôve.

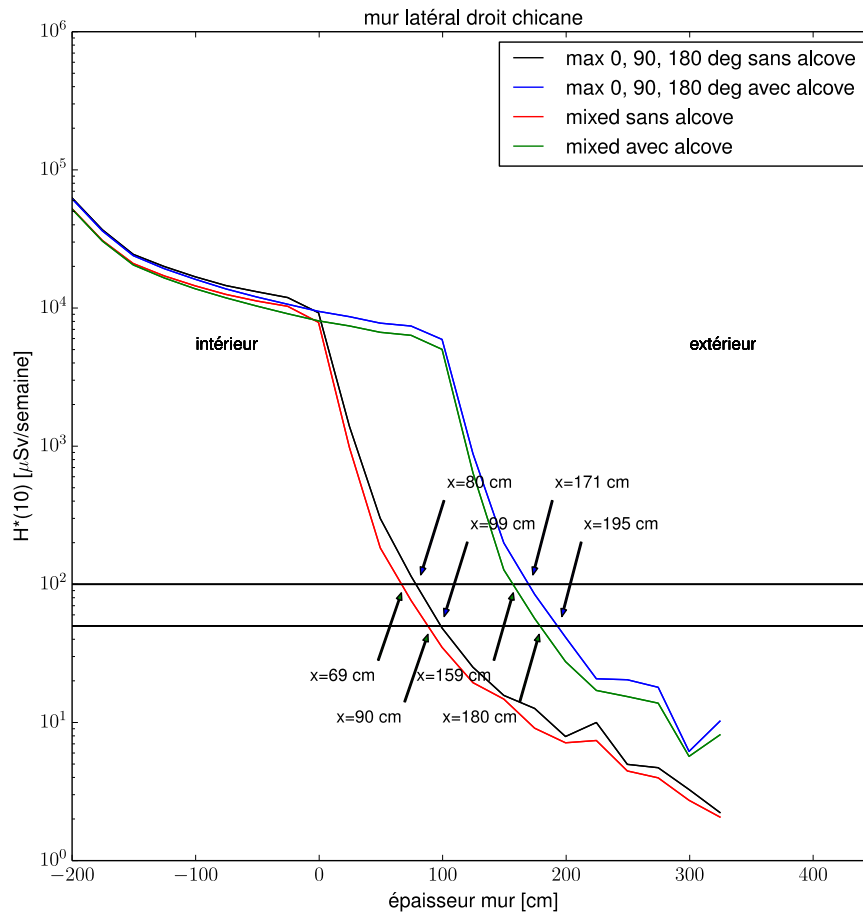


Figure 50 Comparaison de la variation du maximum de  $H^*(10)$  dans le mur latéral gauche de la chicane en fonction de la profondeur du mur. Les calculs de dose sont obtenus avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de 1000 Gy/semaine délivré par des faisceaux de protons de 250 MeV à 0°, 90° et 180° d'incidence. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les trois cas de faisceaux simulés, pointant à 0°, 90°, et 180°

#### 6.4.15. Variation de la dose à travers les murs de l'entrée du bunker

Nous avons calculé la variation de la dose à travers les murs de l'excroissance à l'entrée du bunker. La Figure 51 représente la valeur maximal de  $H^*(10)$  calculée avec des simulations FLUKA en fonction de la profondeur des murs. Le mur A correspond au mur contenant l'entrée au niveau 6, le mur C correspond au mur contenant l'entrée au niveau 5, et le mur B correspond au mur parallèle au mur intérieur du bunker (voir Figure 4). Les doses maximales ne sont calculés que sur les surfaces recouvertes par du béton et ne tiennent donc pas

compte des entrées. Nous voyons qu'en général une épaisseur de 50 cm des mur assurera des niveaux de doses  $H^*(10)$  en dessous de  $50 \mu\text{Sv}/\text{semaine}$

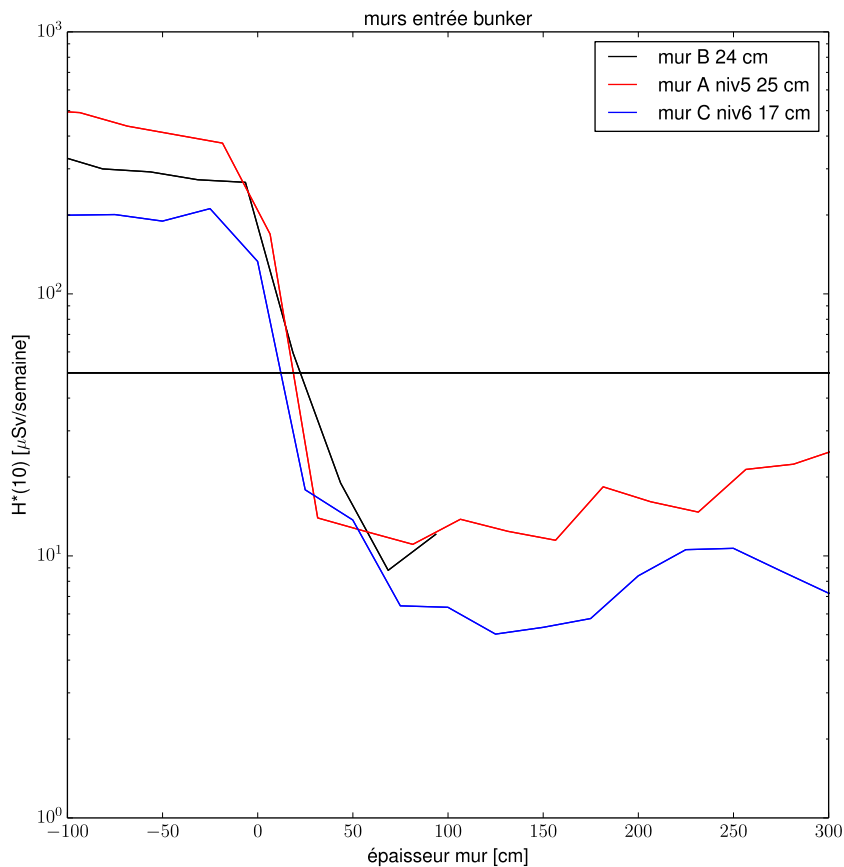


Figure 51 Comparaison de la variation du maximum de  $H^*(10)$  dans les murs extérieurs de l'excroissance à l'entrée du bunker simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer, avec un débit de dose de  $1000 \text{ Gy}/\text{semaine}$  délivré par des faisceaux de protons de  $250 \text{ MeV}$  à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $180^\circ$  d'incidence. La valeur maximale de  $H^*(10)$  est retenue parmi les trois cas de faisceaux simulés, pointant à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , et  $180^\circ$

## 6.5. Calcul de l'activation de l'air, de l'eau et des murs

Nous avons calculé à l'aide de FLUKA l'activation de différents types de matériaux dans les murs, ainsi que de l'air dans le bunker. La méthode utilisée pour ces calculs est décrite dans la section 5.4. Pour tous les calculs d'activation nous considérons les quatre plans d'irradiation suivants:  $2 \text{ Gy}$  durant une minute ;  $25 \text{ Gy}$  pendant une heure,  $200 \text{ Gy}$  pendant 8 heures ;  $1000 \text{ Gy}$  pendant une semaine (5 jours) ; et  $1000 \text{ Gy}$  par semaine pendant deux ans. Pour le calcul de l'activité dans les murs nous considérons toujours le cas où le faisceau pointe directement vers le mur. Nous trouvons

des valeurs d'activation limitées pour l'air dans le bunker, le béton, la terre, la silice, et l'eau dans les murs. Par contre nous trouvons qu'après 2 ans d'irradiation les barres de fer et d'acier à 3cm de profondeur du mur restent radioactives durant plus ou moins deux ans.

### 6.5.1. Activation du béton dans les murs

La Figure 52 représente l'activation du béton à une profondeur de 10 cm dans le plafond après une irradiation de 25 Gy pendant une heure avec le faisceau pointant directement vers le plafond. L'activité totale et l'activité des isotopes le plus actifs sont présentées. Les lignes solides représentent l'activité calculée avec FLUKA alors que les cercles représentent l'activation calculée avec notre propre programme à partir des taux de production d'isotopes radioactifs obtenus avec FLUKA. Un très bon accord est observé entre FLUKA et notre méthode validant ainsi nos deux manières de calculer l'activité. Par la suite nous ne présenterons que des résultats obtenus à l'aide de notre méthode.

La Figure 53 représente l'évolution temporelle de l'activité totale dans le béton à différentes profondeurs du plafond, après différentes phases d'utilisation du faisceau de proton. La Figure 54 représente la valeur d'exemption à 10 cm de profondeur du béton après différentes phases d'irradiation. Il est clair que pour une période longue d'irradiation les isotopes à long temps de vie finissent par s'accumuler et à être dominant pour l'activité à long terme. Toutefois le niveau d'exemption reste à un niveau bas même après 2 ans d'irradiation à intensité maximal du faisceau de 1000 Gy/semaine. En conclusion l'activation du béton dans les murs ne semble pas être un problème dans notre cas au vu de la radioprotection. Il est important toutefois de mentionner que dans nos calculs d'activation du fer et du béton dans les murs nous avons négligés la présence d'impuretés de Co et Eu. Ces impuretés sont en général responsables d'une activité à long terme des isotopes de  $^{60}\text{Co}$  et  $^{152}\text{Eu}$  qui sont produits à la suite de capture de neutron thermique par les impuretés de Co et Eu. Il est impossible de tenir compte de la présence de ces impuretés dans les simulations Monte Carlo mais les taux de production de  $^{60}\text{Co}$  et  $^{152}\text{Eu}$  pourrait être calculé à partir des flux de neutrons sortis des simulations et des sections efficaces des captures de neutron. Nous prévoyons de faire ce genre de calcul dans l'avenir.

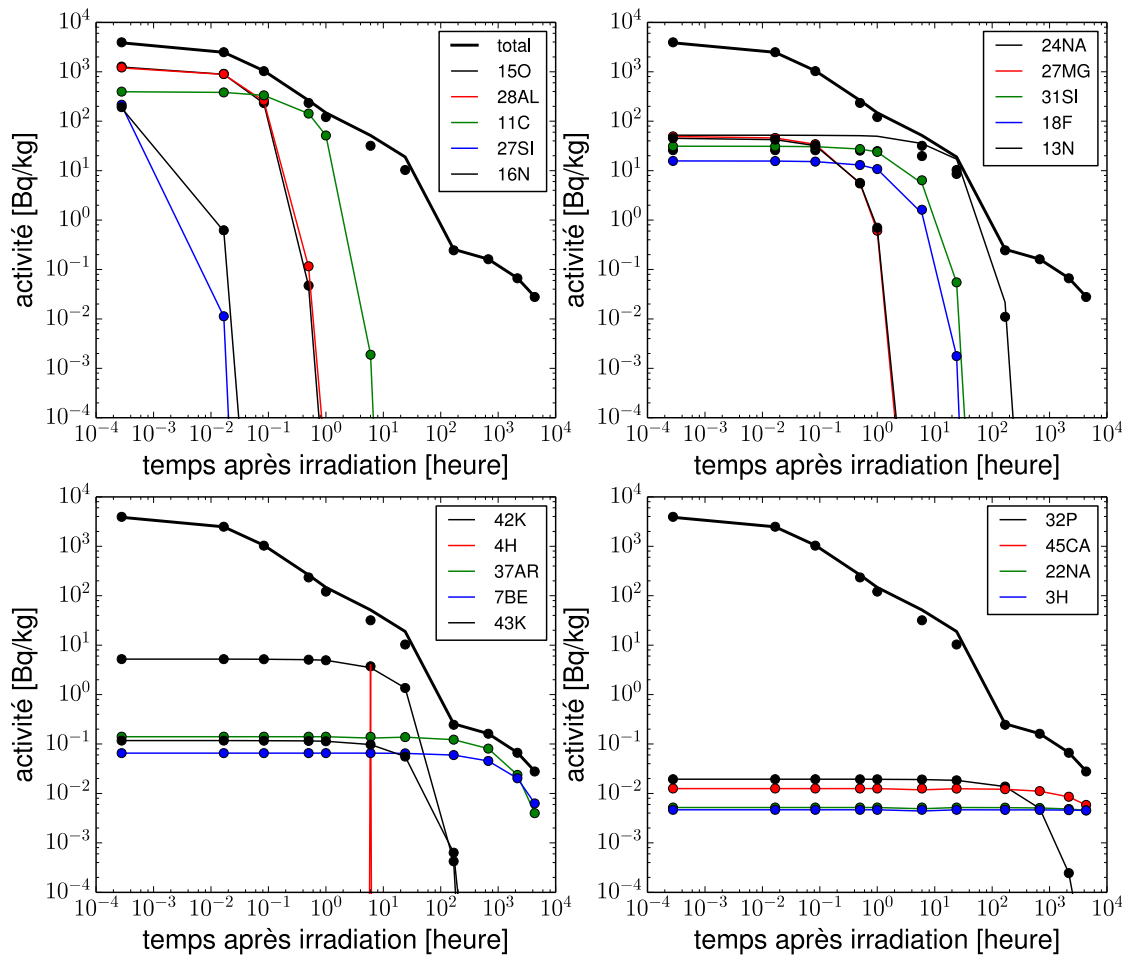


Figure 52 Variation temporelle de l'activité des isotopes radioactifs les plus actifs dans le béton à 10 cm de profondeur dans le plafond, après une irradiation ou le faisceau de proton délivre une dose au patient de 200 Gy réparti sur huit heures. La production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est obtenue avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer par un faisceau de protons de 250 MeV à 180° d'incidence. Les courbes continues représentent l'activité des isotopes obtenus directement dans FLUKA tandis que les cercles sont obtenus avec un programme extérieur à FLUKA.

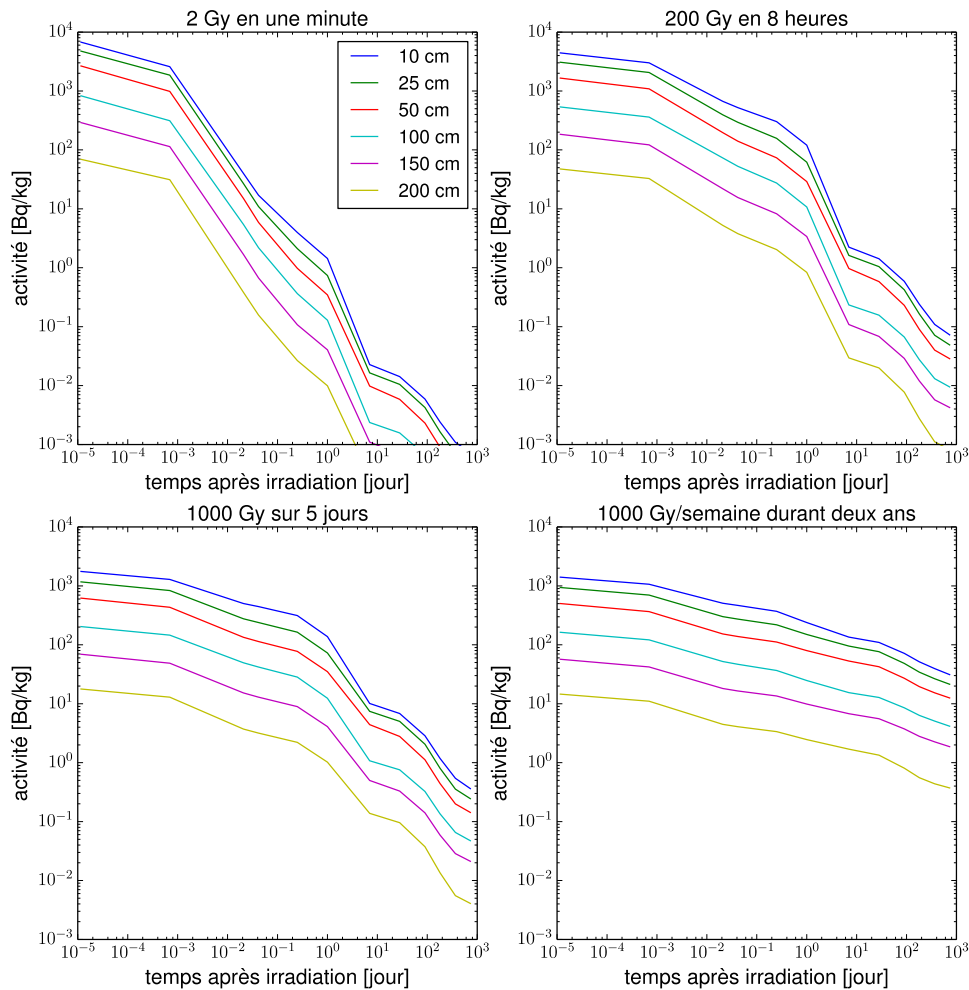


Figure 53 Variation temporelle de l'activité totale des isotopes radioactifs dans le béton à différentes profondeurs du plafond, après différentes phases d'utilisation du faisceau de proton. Le taux de production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est obtenu avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer par un faisceau de protons de 250 MeV à 180° d'incidence. Le calcul de l'activité des isotopes radioactifs après leur production est calculé avec un programme extérieur à FLUKA.

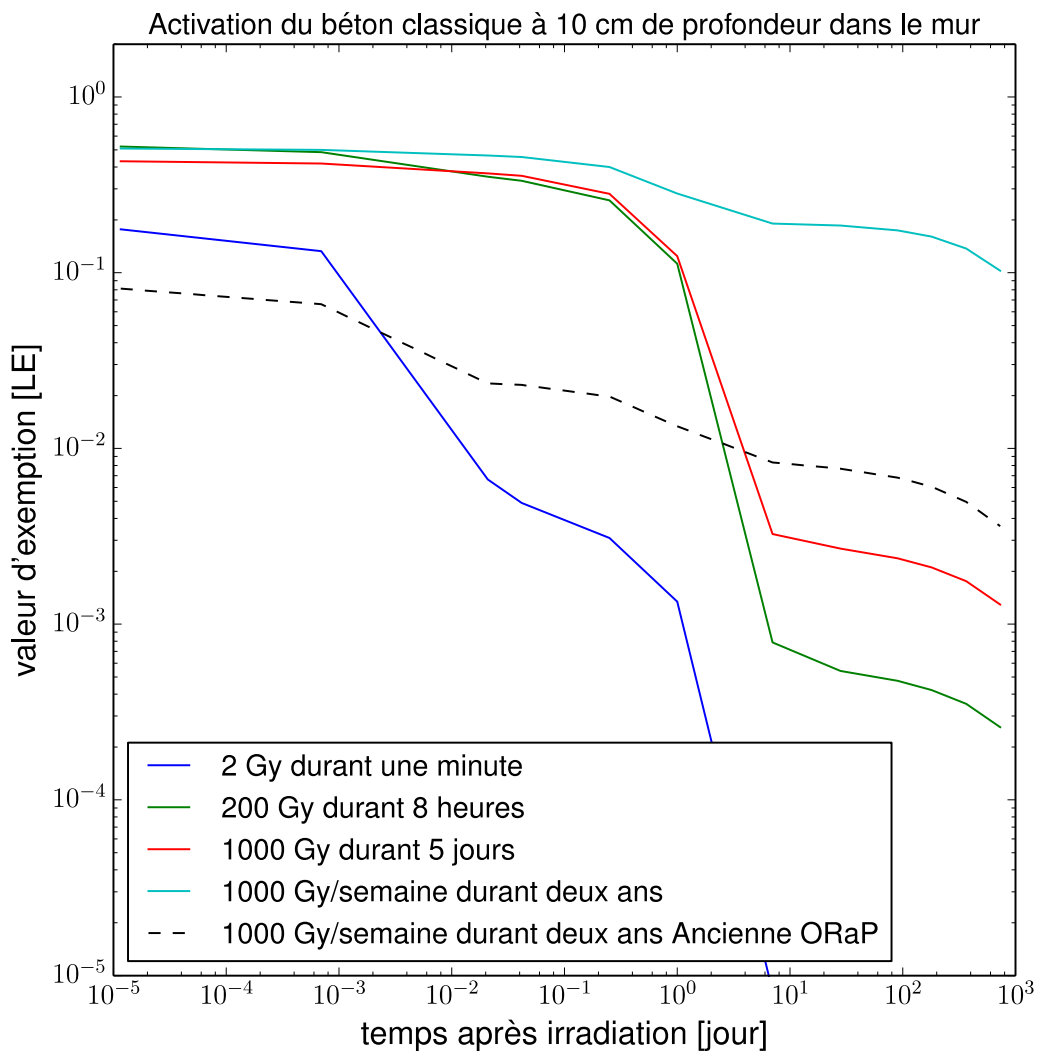


Figure 54 Variation temporelle de la valeur totale d'exemption des isotopes radioactifs dans le béton à différentes profondeurs du plafond, après une irradiation ou le faisceau de proton délivre une dose au patient de 200 Gy réparti sur huit heures. La valeur d'exemption est calculée à partir des activités en considérant les directives publiés dans la nouvelle l'ORaP. La production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est obtenue avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer par un faisceau de protons de 250 MeV à 180° d'incidence. Le calcul de l'activité des isotopes radioactifs après leur production est calculé avec un programme extérieur à FLUKA.

### 6.5.2. Influence des impuretés de $^{59}\text{Co}$ et $^{151}\text{Eu}$ sur l'activation des murs

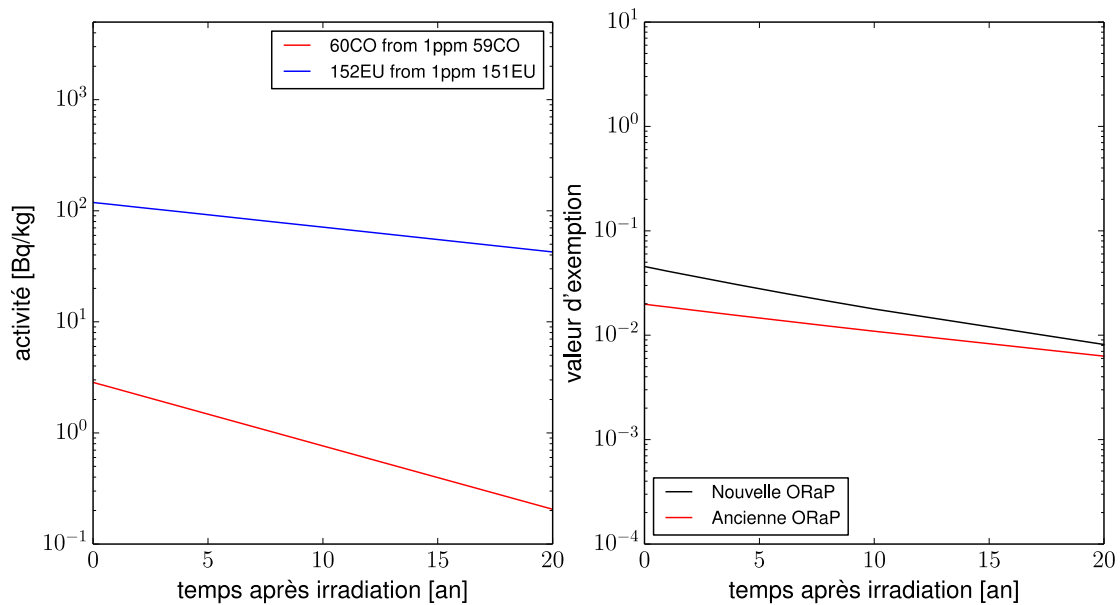


Figure 55 Activité du  $^{60}\text{Co}$  et  $^{152}\text{Eu}$  dans le béton après 20 ans d’irradiation pour un niveau d’impuretés de  $^{59}\text{Co}$  et  $^{151}\text{Eu}$  de 1ppm dans le béton.

### 6.5.3. Activation des barres de fer et d’acier dans les murs

La Figure 56 représente les résultats de nos calculs de l’activité d’une plaque de fer de 1.8 cm d’épaisseur et de 1x1 m<sup>2</sup> de surface, placé dans le plafond à 3 cm de profondeur. Dans ces calculs nous considérons une irradiation avec le faisceau pointant directement vers le plafond avec différentes périodes d’irradiation continues. Dans le panneau de droite la valeur totale d’exemption est calculée suivant les directives de la nouvelle ORaP. La ligne en tirets représente la valeur d’exemption obtenue avec l’ancienne ORaP pour une irradiation durant deux ans. La Figure 57 représente l’activation des isotopes radioactifs dominant pour une irradiation du faisceau à 200 Gy durant 8 heures. Il est clair que pour une période longue d’irradiation les isotopes à long temps de vie finissent par s’accumuler et à être dominant pour l’activité à long terme. Après 2 ans d’irradiation à intensité maximal du faisceau de 1000 Gy/semaine, les barres de fer reste radioactives pendant plus de deux ans selon la nouvelle ORaP, dus à la présence essentiellement de  $^{54}\text{Mn}$ . Toutefois il est important de rappeler que nos calculs sont effectués pour des conditions d’irradiation conservatives et que le niveau d’activation des barres de fer est probablement moins élevé. Cependant comme mentionné déjà dans la section 6.5.1 nous avons négligé dans nos calculs la présence d’impureté de Co et d’Eu qui peuvent à long terme dominé l’activité des matériaux.

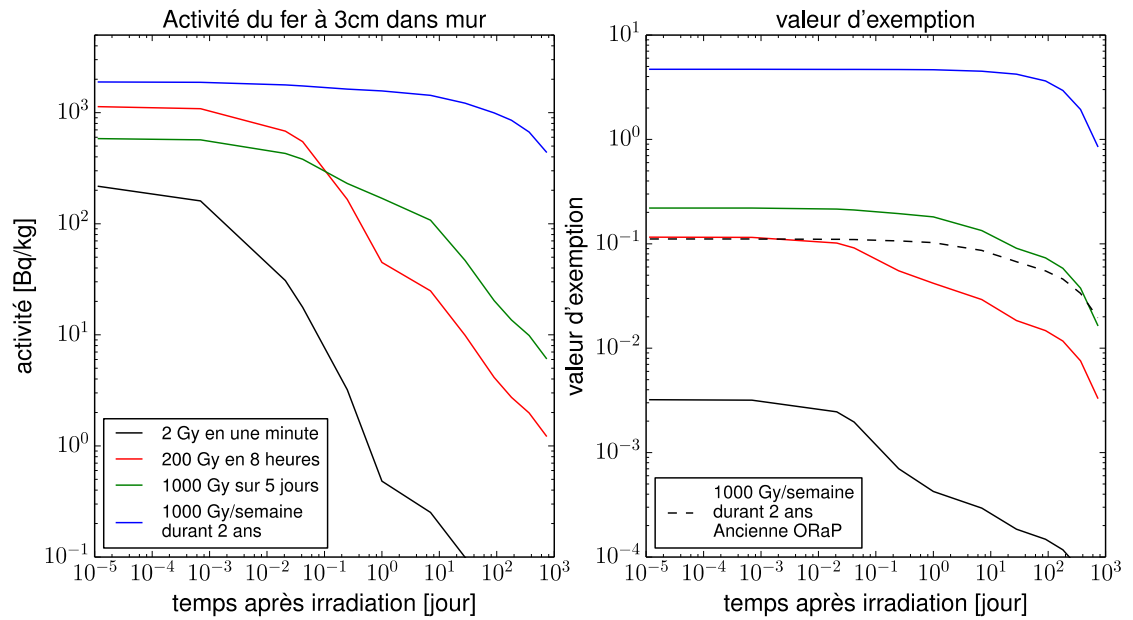


Figure 56 Calcul de la variation temporelle de l'activité totale et de la valeur totale d'exemption des isotopes radioactifs dans une plaque de fer de 1.8 cm d'épaisseur, placée à 3 cm de profondeur dans le plafond. Dans ce cas de figure, le faisceau de proton pointe directement vers le plafond. Les résultats sont présentés pour différentes phases d'utilisation du faisceau. La valeur d'exemption est calculée à partir des activités des isotopes en considérant les directives publiées dans la nouvelle ORaP.

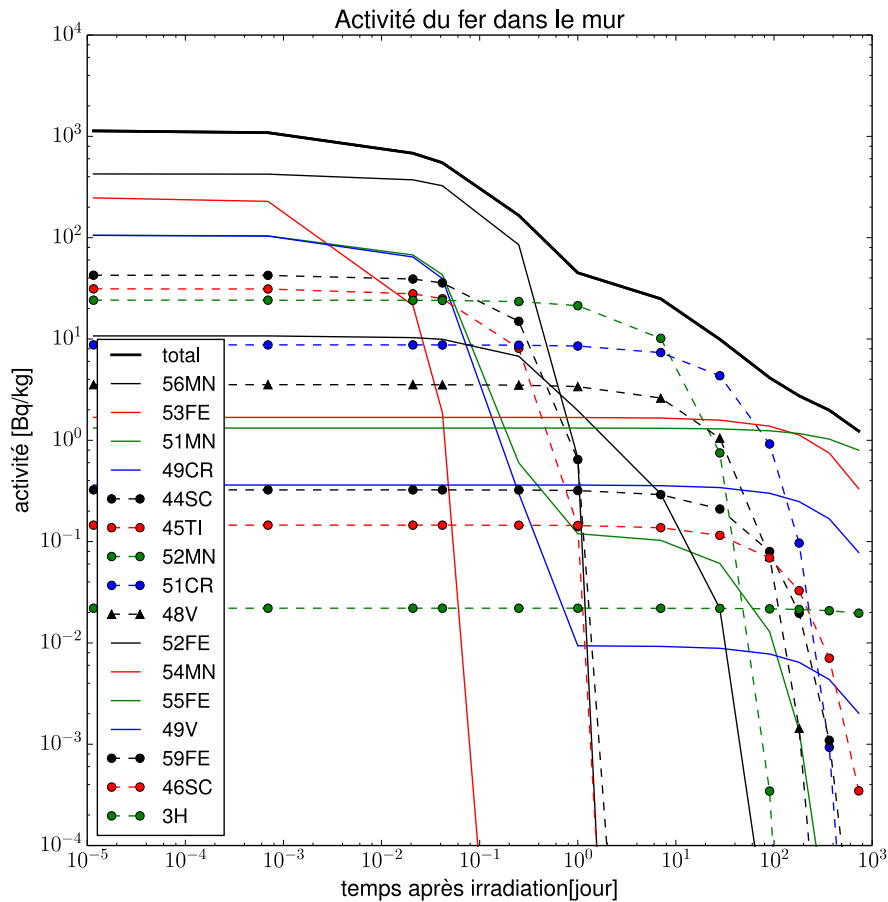


Figure 57 Calcul de la variation temporelle de l'activité des isotopes radioactifs les plus actifs dans une plaque de Fer de 1.8 cm d'épaisseur, placé à 3 cm de profondeur dans le plafond, obtenu après une irradiation où le faisceau de proton délivre une dose au patient de 200 Gy réparti sur huit heures. Dans ce cas de figure, le faisceau de proton pointe directement vers le plafond.

Finalement nous avons aussi calculé l'activation d'une plaque d'acier de 1.8 cm d'épaisseur situé 3 cm de profondeur dans le plafond au lieu d'une plaque de fer. La Figure 58 présente les résultats de nos calculs d'activation de l'acier comme pour le fer dans la Figure 56. Le même niveau d'activation que dans le cas du fer est obtenu.

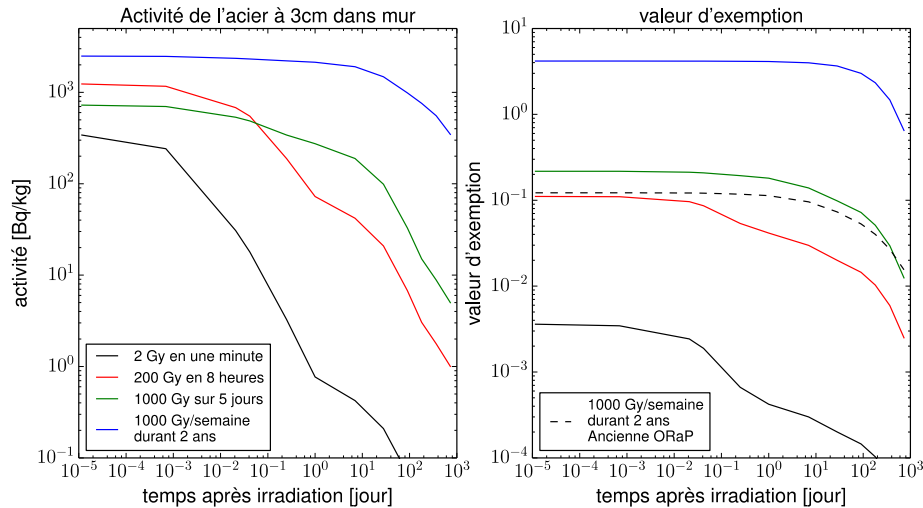


Figure 58 Calcul de la variation temporelle de l'activité totale et de la valeur totale d'exemption des isotopes radioactifs dans une plaque d'acier de 1.8 cm d'épaisseur, placée à 3 cm de profondeur dans le plafond. Dans ce cas de figure, le faisceau de proton pointe directement vers le plafond. Les résultats sont présentés pour différentes phases d'utilisation du faisceau. La valeur d'exemption est calculée à partir des activités des isotopes en considérant les directives publiés dans la nouvelle ORaP.

#### 6.5.4. Activation de la terre et de la silice dans les murs

La Figure 59 représente l'évolution temporelle de l'activité totale de couches de 2 cm d'épaisseur de terre de type « Earth US » placées à différentes profondeurs dans le plafond, après différentes phases d'utilisation du faisceau de proton. La Figure 60 représente la valeur d'exemption de la terre à 10 cm de profondeur après différentes phases d'irradiation. La Figure 61 représente la même information que le Figure 59 pour des couches de Silice. Il est clair que pour une période longue d'irradiation, les isotopes à long temps de vie finissent par s'accumuler et à être dominant pour l'activité à long terme. Toutefois le niveau d'exemption de la terre reste à un niveau bas même après 2 ans d'irradiation à intensité maximal du faisceau de 1000 Gy/semaine. En conclusion l'activation de la terre derrière les murs semble négligeable. Il semble dès lors raisonnable de limiter l'épaisseur des murs qui seront recouverts vers l'extérieur de terre.

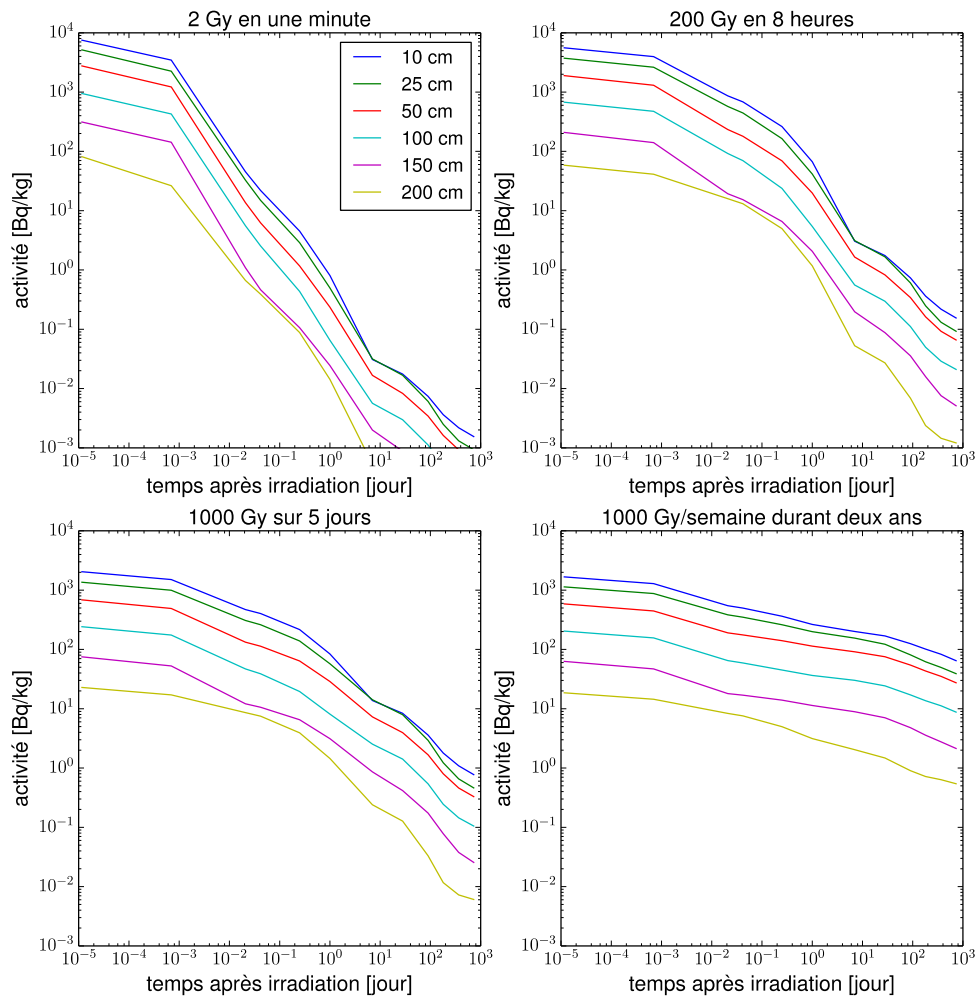


Figure 59 Calcul de la variation temporelle de l'activité totale des isotopes radioactifs dans des couches de 2 cm de terre de type «EarthUS » placées à différentes profondeurs dans le plafond. Les activités sont calculées pour différentes phases d'utilisation du faisceau de proton. La production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est obtenue avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer par un faisceau de protons de 250 MeV à 180° d'incidence. Le calcul de l'activité des isotopes radioactifs après leur production est calculé avec un programme extérieur à FLUKA.

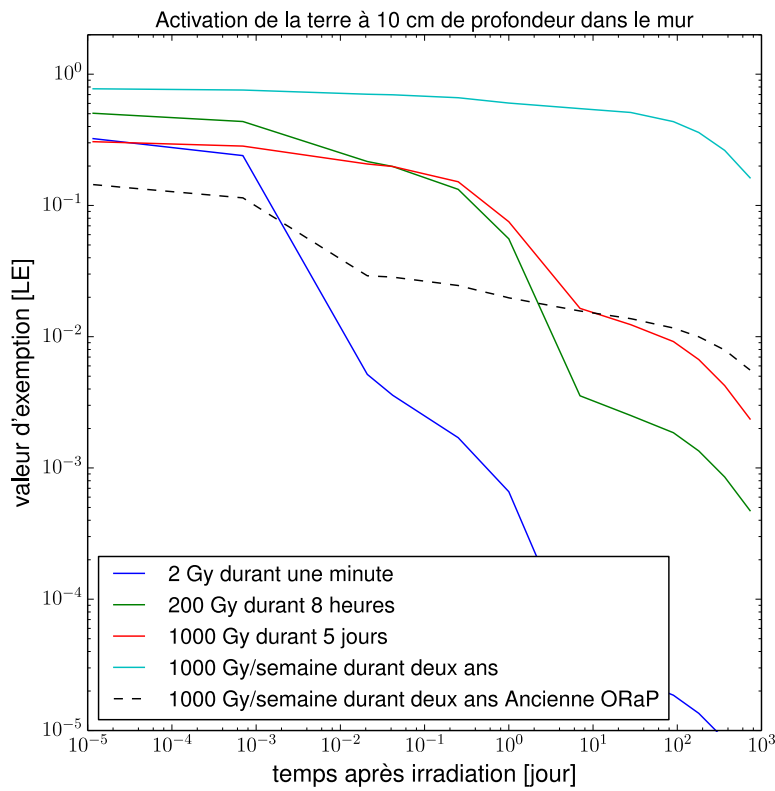


Figure 60 Calcul de la variation temporelle de la valeur totale d'exemption des isotopes radioactifs dans une couche de terre de type « EarthUS », placée à 10 cm de profondeur dans le plafond. Dans ce cas de figure, le faisceau de proton pointe directement vers le plafond. Les résultats sont présentés pour différentes phases d'utilisation du faisceau. La valeur d'exemption est calculée à partir des activités des isotopes en considérant les directives publiés dans l'ORAP.

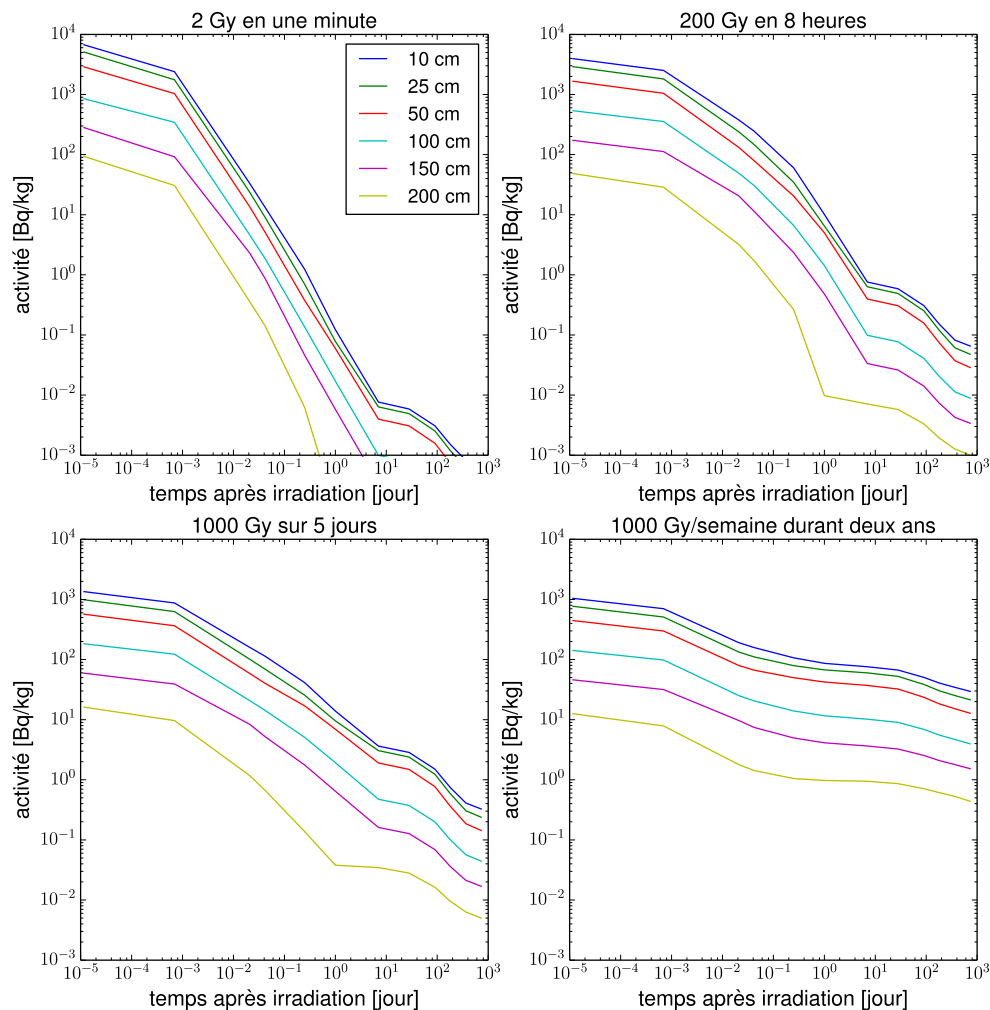


Figure 61 Calcul de la variation temporelle de l'activité totale des isotopes radioactifs dans des couches de 2 cm de silice placées à différentes profondeurs dans le plafond. Les activités sont calculées pour différentes phases d'utilisation du faisceau de proton. La production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est obtenue avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer par un faisceau de protons de 250 MeV à 180° d'incidence. Le calcul de l'activité des isotopes radioactifs après leur production est calculé avec un programme extérieur à FLUKA.

### 6.5.5. Activation de l'eau dans les murs

La Figure 62 représente l'évolution temporelle de l'activité totale de couches de 2 cm d'eau placées à différentes profondeurs dans le plafond, après différentes phases d'utilisation du faisceau de proton pointant directement vers le plafond. La Figure 63 représente la valeur d'exemption de la terre à 10 cm de profondeur après différentes phases d'irradiation.

Il est clair que pour une période longue d'irradiation les isotopes à long temps de vie finissent par s'accumuler et à être dominant pour l'activité à long terme. Toutefois le niveau d'exemption de l'eau reste à un niveau très bas même après 2 ans d'irradiation à intensité maximal du faisceau de 1000 Gy/semaine. Il est important de noter que l'activation par contamination du à la dissolution du <sup>22</sup>Na du béton dans l'eau n'est pas estimé dans nos calculs. Il serait peut-être aussi utile à

l'avenir, de calculer l'activation des eaux de refroidissement des élément du cyclotron et de la ligne de protons.

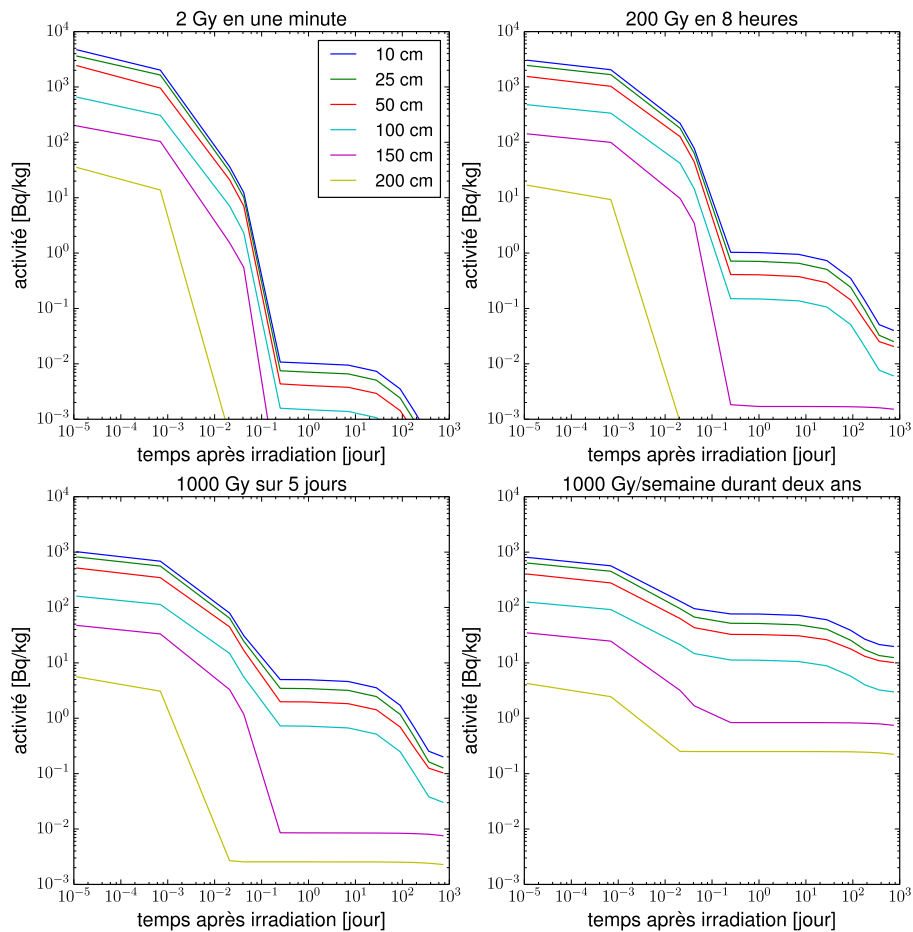


Figure 62 Calcul de la variation temporelle de l'activité totale des isotopes radioactifs dans des couches de 2 cm d'eau placées à différentes profondeurs dans le plafond. Les activités sont calculées pour différentes phases d'utilisation du faisceau de proton. La production des isotopes radioactifs par le flux de neutron est obtenue avec des simulations FLUKA pour le cas d'une irradiation d'un fantôme de fer par un faisceau de protons de 250 MeV à 180° d'incidence. Le calcul de l'activité des isotopes radioactifs après leur production est calculé avec un programme extérieur à FLUKA .

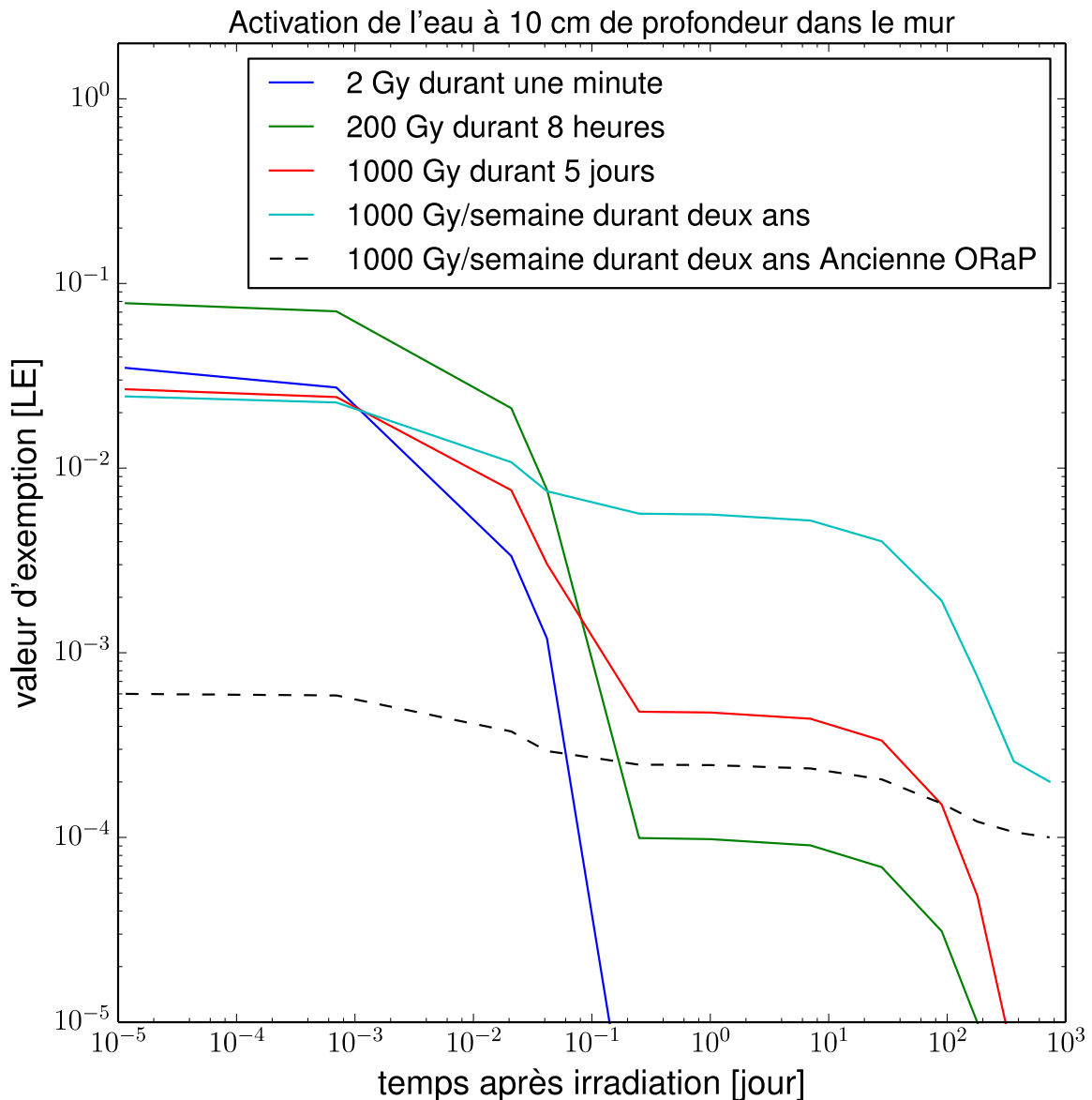


Figure 63 Calcul de la variation temporelle de la valeur totale d'exemption des isotopes radioactifs dans une couche d'eau de 2 cm d'épaisseur placée à 10 cm de profondeur dans le plafond. Dans ce cas de figure, le faisceau de proton pointe directement vers le plafond. Les résultats sont présentés pour différentes phases d'utilisation du faisceau. La valeur d'exemption (nombre de LE) est calculée à partir des activités des isotopes en considérant les directives publiés dans l'ORaP.

### 6.5.6. Activation de l'air

La Figure 64 représente les résultats de nos calculs de l'activité totale de l'air du bunker après différents plans d'irradiation. Afin d'évaluer si l'inhalation de l'air dans le bunker présente un danger sanitaire, l'activité est donnée en unité de  $\text{CAm}^3$  dans le panneau de droite. Le nombre de CA a été calculé en sommant l'activité de chaque isotope dans l'air, divisé par le coefficient CA correspondant, publié dans l'annexe 3 de la nouvelle l'ORaP. En considérant que l'air radioactif se confine dans le bunker dans un volume de  $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$  (valeur assez conservatrice vu les dimensions du bunker), nous obtenons une activité maximum de 0.2 CA. Suivant la définition du CA cela correspond à une dose de 4 mSV/an pour une personne qui serait constamment exposé durant un an à un tel nuage d'air radioactif. Nous pouvons dès lors déduire que l'activation de l'air, même dans les conditions maximales d'irradiation, restent dans des valeurs acceptables en terme de radioprotection et qu'un filtrage de l'air n'est probablement pas nécessaire.

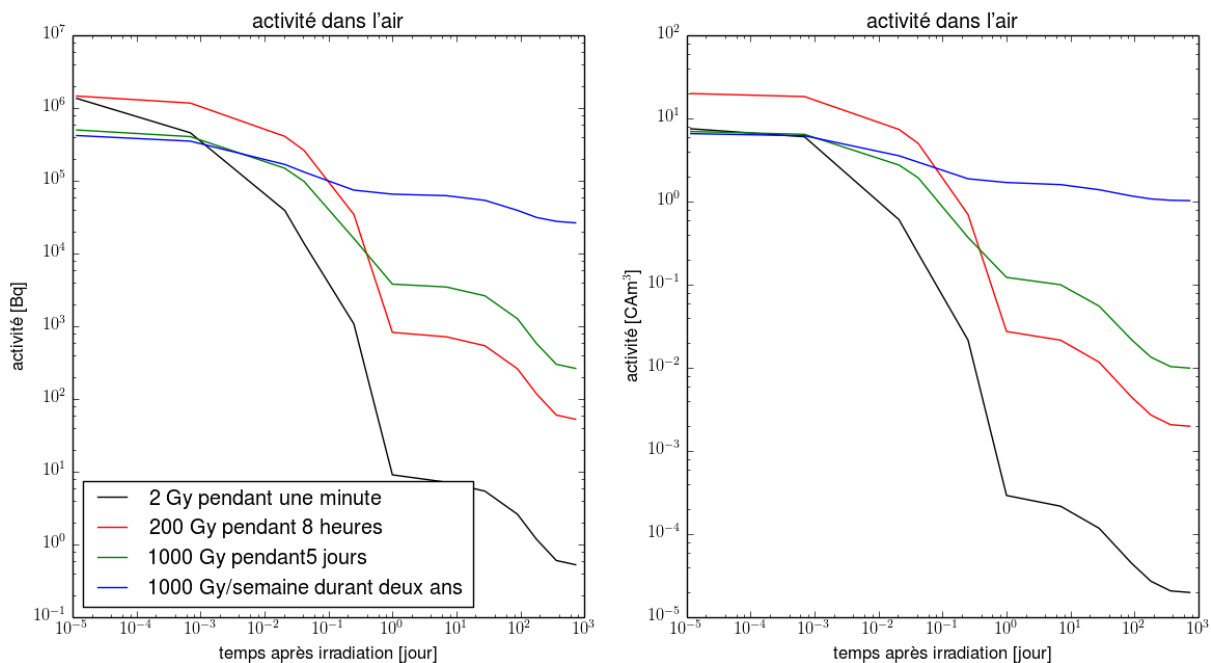


Figure 64 Calcul de la variation temporelle de l'activité de l'air dans le bunker, pour un faisceau de proton pointant vers le plafond et pour différentes phases d'irradiation. L'activité est donnée en unité de  $\text{CAm}^3$  dans le panneau de droite. Le nombre de CA a été calculé suivant les directives publiées dans l'ORaP.

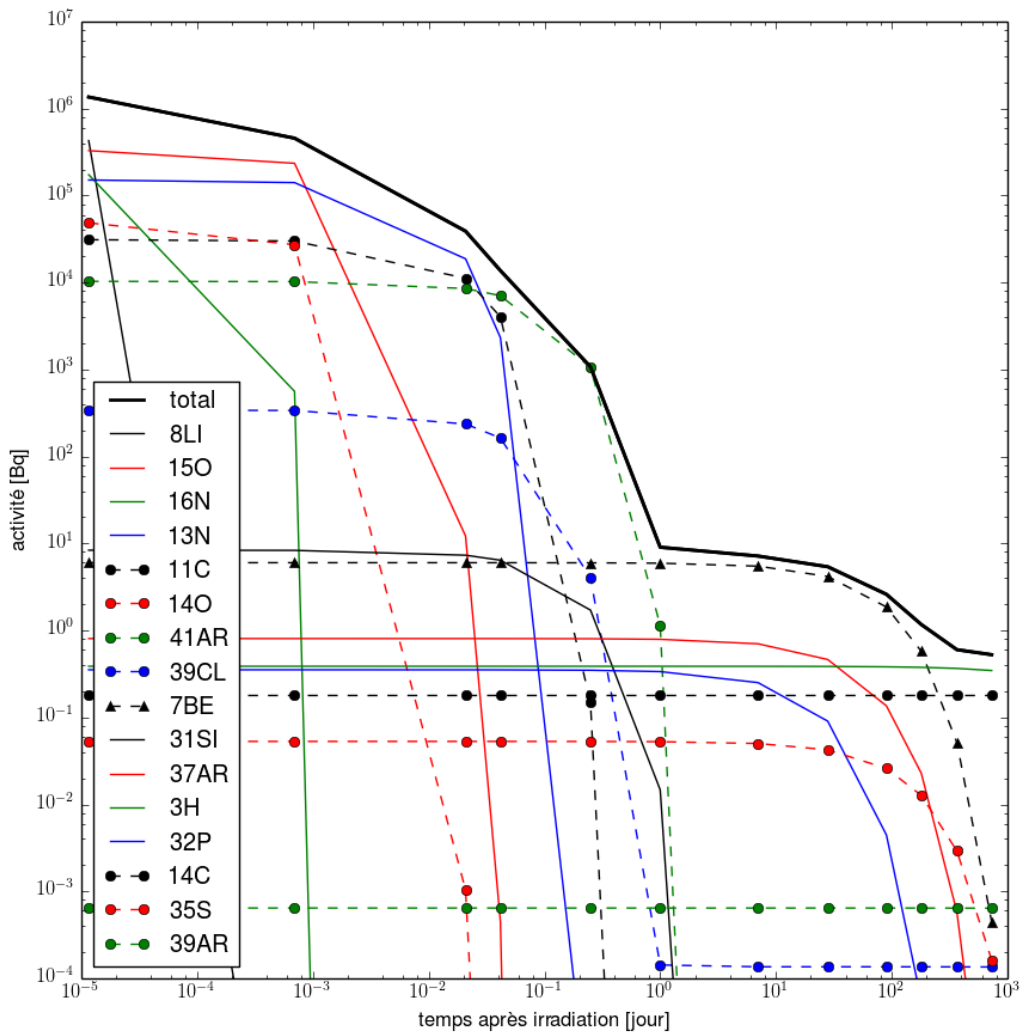


Figure 65 Calcul de la variation temporelle de l'activité des isotopes radioactifs les plus actifs dans l'air du bunker obtenu après une irradiation ou le faisceau de proton délivre une dose au patient de 200 Gy réparti sur huit heures. Dans ce cas de figure, le faisceau de proton pointe directement vers le plafond.

### 6.5.7. Calcul de l'activation de l'eau près du faisceau

Afin d'estimer de manière très conservatrice le niveau d'activation de l'eau près de la ligne de protons, nous avons calculé l'activation d'une couche d'eau entourant la cible de fer. Les résultats des nos calculs sont présentés dans les Figures 60 et 61. L'activité totale après quelques heures est dominée par le  $^{18}\text{F}$  et le  $^7\text{Be}$ . L'activité à plus long terme est dominée par le  $^7\text{Be}$ . Pour des irradiations d'une période de huit heures l'eau restera radioactive au plus quelques heures.

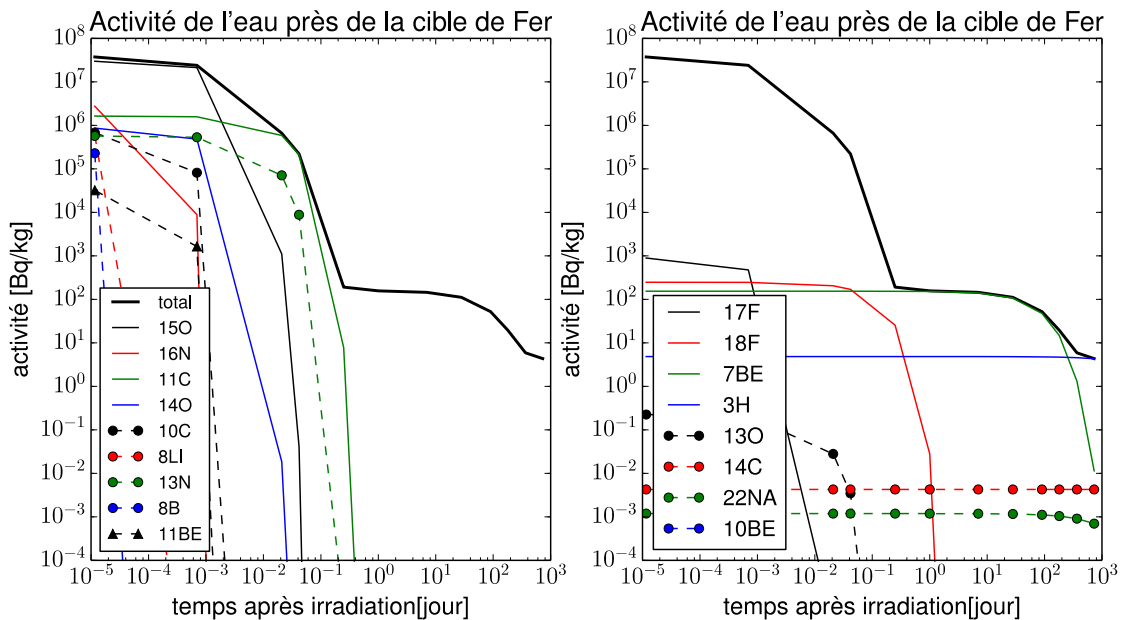


Figure 66 Calcul de la variation temporelle de l'activité des isotopes radioactifs les plus actifs dans de l'eau situé au tour de la cible de fer après une irradiation ou le faisceau de proton délivre une dose au patient de 200 Gy réparti sur huit heures.

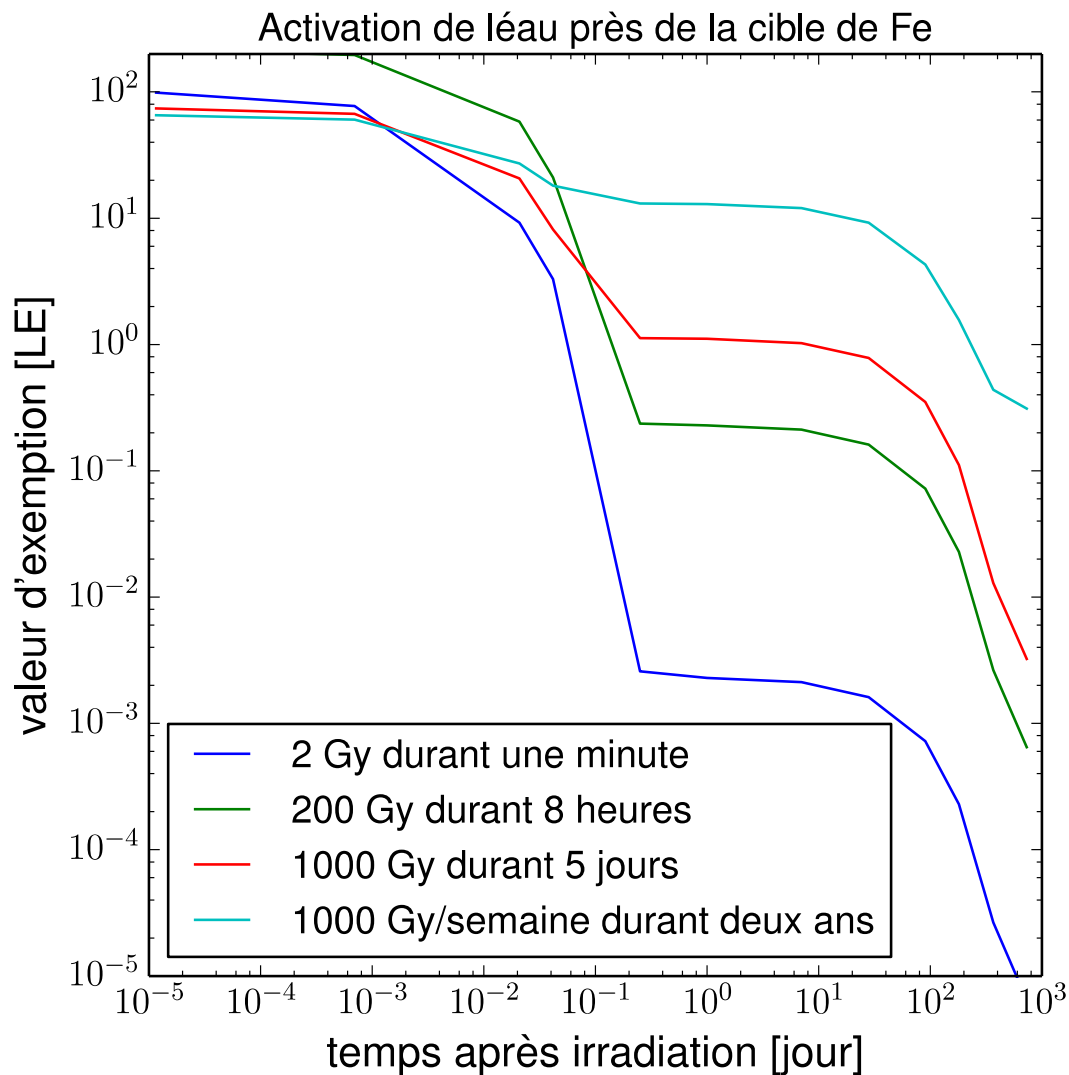


Figure 67 Calcul de la variation temporelle de la valeur totale d'exemption des isotopes radioactifs dans une couche d'eau de 2 cm d'épaisseur placée à 10 cm de profondeur dans le plafond. Dans ce cas de figure, le faisceau de proton pointe directement vers le plafond. Les résultats sont présentés pour différentes phases d'utilisation du faisceau. La valeur d'exemption (nombre de LE) est calculée à partir des activités des isotopes en considérant les directives publiés dans la nouvelle ORaP.

### 6.6. Calcul de l'ionisation de l'air

Nous avons calculé l'ionisation de l'air du bunker par le faisceau et les radiations secondaires. Les simulations FLUKA permettent de calculer l'énergie déposée par le faisceau et les particules secondaires dans les différents volumes de la géométrie. Pour l'air du bunker nous obtenons une énergie moyenne déposée de 0.44 MeV par proton du faisceau. Considérant un potentiel moyen d'ionisation de 34 eV dans l'air nous obtenons un nombre de  $1.29 \cdot 10^4$  paires de charges e-/ion créé par proton incident sur la cible.

## 7. Résumé et conclusions

Nous avons développé un algorithme pour calculer la modulation du pic de Bragg du faisceau de protons. Cet algorithme nous a permis de déterminer une valeur conservative du facteur de fluence sur dose nécessaire pour normaliser nos résultats. Nous avons fixé ce facteur à une valeur de  $9.7 \cdot 10^8 \text{ p/cm}^2/\text{Gy}$ . De plus nous considérons dans nos calculs de  $H^*(10)$  un facteur de 50% de pertes le long de la ligne de protons entre la sortie du cyclotron et la tête du faisceau.

Nous avons calculé avec GEANT4 et FLUKA les niveaux d'activation à attendre dans des collimateurs en cuivre et les modulateurs en PMMA de la tête du faisceau, pour une irradiation maximale de 10 Gy. Les isotopes radioactifs dominants dans le cuivre après une période de trois mois de stockage sont les isotopes  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ , et  $^{58}\text{Co}$ . Les activités spécifiques des isotopes  $^{57}\text{Co}$  et  $^{56}\text{Co}$  sont sensiblement inférieures aux valeurs de libération publiées dans la nouvelle ORaP, tandis que l'activité spécifique du  $^{58}\text{Co}$  est proche de la valeur de libération de 0.1 Bq/g. Pour les modérateurs en PMMA, nos calculs montrent que déjà après un jour les isotopes radioactifs qui restent sont le  $^7\text{Be}$ ,  $^3\text{H}$ , et  $^{14}\text{C}$  avec des niveaux d'activité bien inférieurs aux activités spécifiques de libération publiées dans la nouvelle ORaP. Ce dernier résultat suggère que le stockage des modérateurs pendant une période de quelques mois ne sera pas nécessaire. Nous avons aussi calculé avec FLUKA l'activation des collimateurs de laiton de 6.6 cm d'épaisseur composé à 70-50% de cuivre et 30-50% de zinc. Nos résultats montrent que pour un SOBP de 22 à 32 cm, la valeur limite de libération de 1 est atteinte selon l'ORaP actuelle après seulement un jour tandis que selon la nouvelle ORaP un stockage de 100 à 150 jours sera nécessaire. Pour un SOBP de 0 à 20 cm la valeur limite de libération, selon la nouvelle ORaP, est obtenue après plus ou moins un mois. Nos résultats confirment qu'une période de stockage de 5 mois des collimateurs devrait être suffisante.

Nous avons comparé les niveaux d'équivalent de dose ambient  $H^*(10)$  obtenus avec GEANT4 et FLUKA à l'intérieur et à l'extérieur du bunker pour un faisceau de protons tirant directement sur un fantôme de fer et d'eau. En général les résultats obtenus avec GEANT4 et FLUKA s'accordent bien pour le cas de la cible de fer, tandis que pour le cas du fantôme d'eau des différences maximales de l'ordre de 150 % sont observées. Finalement nous avons utilisé FLUKA pour la majeure partie de nos calculs de  $H^*(10)$  par ce que ce code est beaucoup plus utilisé que GEANT4 dans le domaine du calcul de blindage.

Nos calculs de l'équivalent de dose ambient  $H^*(10)$  que nous utilisons pour vérifier que les dimensions du bunker répondent aux normes légales de la radioprotection sont basés sur des simulations FLUKA d'un faisceau de protons tirant directement sur une cible de fer. Cette approche est utilisée pour modéliser de manière conservative la production des neutrons dans la tête du faisceau et dans le patient. Ces calculs nous ont permis de calculer les épaisseurs nécessaires des murs en béton et de couches externes de terre pour atteindre des valeurs de  $H^*(10)$  en dessous des limites légales. Nous avons aussi pu montrer à l'aide de nos calculs la nécessité de l'utilisation de portes blindées à l'entrée des bunkers et l'impact, sur le niveau de dose, des trous d'aération au dessus des ces portes.

Nous avons évalué les niveaux de blindage offerts par différents types de murs. Nous avons pu montrer que le béton baryté n'offre pas d'avantage comparé au béton classique puisque que des valeurs de  $H^*(10)$  plus élevés sont obtenus avec ce genre de béton. Nous avons aussi pu évaluer que l'ajout d'une couche de 1m de polyéthylène borée devant les murs en béton permettrait de limiter l'épaisseur d'un mur en béton classique directement exposé au faisceau de 40 cm.

Nous avons calculé l'activation de différents types de matériaux dans les murs pour différentes phases d'irradiation. De cette analyse nous concluons que l'activation du béton classique ne présente pas de problème à condition que la concentration d'impuretés de  $^{59}\text{Co}$  et  $^{151}\text{Eu}$  y soit limitée. Par contre il y a un risque non négligeable d'activation des barres de fer et d'acier dans le mur. Nous avons aussi pu déterminer que l'activation de la terre au delà des murs sera très limitée ce qui permet d'entrevoir une solution où l'épaisseur des murs recouvert de terre pourrait être réduite. Finalement les résultats de nos calculs de l'activation de l'air ne montrent pas de nécessité de filtrer l'air après irradiation.

## 8. Références

- [1] Allison et al. , Geant4 developments and applications, Allison et al., *Nuclear Science, IEEE Transactions on* , vol.53, no.1, pp.270-278, Feb. 2006doi: 10.1109/TNS.2006.869826
- [2] Ferrari A., P.R. Sala, A. Fasso, and J. Ranft, FLUKA: a multi-particle transport code", CERN-2005-10 (2005), INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773
- [3] ICRP, 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4).
- [4] Pelliccioni M., Fluence to Dose Equivalent Conversion Data and Radiation Weighting Factors for High-Energy Radiation, *Radiat. Prot. Dosim.* 77(4), 159-170 (1998).
- [5] Yashima, H., Uwamino, Y., Iwase, H., et al. (2009). Measurement and calculation of radioactivities of spallation products by high-energy heavy ions. *Radiochimica Acta/International journal for chemical aspects of nuclear science and technology*, 91(12/2003), pp. 689-696.
- [6] Evaluated Nuclear Data File, <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
- [7] Bloch, C., Grantham, K., and Klein, E., Measured Neutron Levels at the Washington University Proton Therapy Facility
- [8] Ordonnance sur la radioprotection, ORaP (2014)
- [9] Mevion medical systems, Site Planning Guide
- [10] Pietschke A., Radioprotection requirements and recommendations for the MEVION S250 Proton Therapy System at CHUV, (2015)
- [11] PTC Radiation Safety Committee, Radiation Shielding Guidelines for the NPTC (Internal Report NPTC-11), (1993)

