

BU-AP	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	101682	42	0001	A	
INSTN						<del>REF</del>

## NOTE TECHNIQUE

# Comparaison des résultats de modélisations MCNP avec les résultats de modélisations DOSIMEX

Rév.	Rédaction	Vérification	Approbation
A	JC. BENOIT	JC. DALOUZY	E. LE ROUXEL
			<b>ATTESTATION DE SIGNATURE ELECTRONIQUE</b> NOM : Catherine VANHAECKE Le : 03/02/2017

BU-AP	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	101682	42	0001	A	
INSTN						<del>REF</del>

## HISTORIQUE DES REVISIONS

Rév.	Signataire et repérages des paragraphes modifiés
A	<p>Période de validation : (01/2017)</p> <p>Rédacteur : JC. BENOIT  Vérificateur : JC. DALOUZY  Approbateur : E. LE ROUXEL</p> <p>Janvier 2017 : Première émission</p>

BU-AP	Type Doc.    Activité    Cat.MT    N° Ordre    Révision <b>NT        101682    42    0001    A</b>	REF
INSTN		<del>REF</del>

## SOMMAIRE

1	OBJET .....	8
2	REFERENCES.....	9
3	METHODOLOGIE DE DETERMINATION DU DEBIT D'EQUIVALENT DE DOSE A PARTIR DES RESULTATS MCNP .....	10
4	DONNEES NUCLEAIRES .....	12
5	SCENARIO 1 : COMPARAISONS DES RESULTATS POUR 33 RADIONUCLEIDES PRINCIPAUX .....	13
5.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP.....	13
5.1.1	Géométrie .....	13
5.1.2	Matériaux .....	13
5.1.3	Source .....	14
5.1.4	Accumulateur .....	14
5.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	14
5.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	15
6	SCENARIO 2 : EVOLUTION DES RESULTATS EN FONCTION DE LA DISTANCE .....	17
6.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP.....	17
6.1.1	Géométrie .....	17
6.1.2	Matériaux .....	17
6.1.3	Source .....	17
6.1.4	Accumulateur .....	17

6.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	18
6.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	18
7	SCENARIO 3 : IMPACT DE LA PRESENCE D'UN ECRAN ET DU BUILD-UP .....	19
7.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP .....	19
7.1.1	Géométrie .....	19
7.1.2	Matériaux .....	20
7.1.3	Source .....	20
7.1.4	Accumulateur .....	20
7.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	20
7.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	21
8	SCENARIO 5 : INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DE LA SOURCE .....	22
8.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP .....	22
8.1.1	Géométrie .....	22
8.1.2	Matériaux .....	22
8.1.3	Source .....	23
8.1.4	Accumulateur .....	23
8.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	23
8.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	24
9	SCENARIO 6 : COUPLAGES SOURCES VOLUMIQUES + ECRAN .....	25
9.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP .....	25
9.1.1	Géométrie .....	25
9.1.2	Matériaux .....	26

BU-AP	Type Doc.    Activité    Cat.MT    N° Ordre    Révision <b>NT        101682    42    0001    A</b>	REF
INSTN		<del>REF</del>

9.1.3	Source .....	26
9.1.4	Accumulateur .....	26
9.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	26
9.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	27
10	SCENARIO 7 : INFLUENCE DU MATERIAU.....	28
10.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP.....	28
10.1.1	Géométrie .....	28
10.1.2	Matériaux .....	28
10.1.3	Source .....	29
10.1.4	Accumulateur .....	29
10.2	ACTIVITE DE LA SOURCE.....	29
10.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	29
11	SCENARIO 8 : MAILLAGE EN PUISSANCE ADAPTE ET MODELISATION DE GRANDS VOLUMES.....	30
11.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP.....	30
11.1.1	Géométrie .....	30
11.1.2	Matériaux .....	31
11.1.3	Source .....	31
11.1.4	Accumulateur .....	31
11.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	32
11.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	32
12	SCENARIO 9 : GEOMETRIE PARALLELEPIPEDE DE GRANDE DIMENSION AVEC ECRAN .....	33
12.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP.....	33
12.1.1	Géométrie .....	33

BU-AP	Type Doc.    Activité    Cat.MT    N° Ordre    Révision <b>NT        101682    42       0001       A</b>	REF
INSTN		<del>REF</del>

12.1.2	Matériaux .....	34
12.1.3	Source .....	34
12.1.4	Accumulateur .....	34
12.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	34
12.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	34
13	SCENARIO 10.1 : MODELISATION MULTIRADIONUCLEIDES POUR UN CSD-V .....	35
13.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP .....	35
13.1.1	Géométrie .....	35
13.1.2	Matériaux .....	36
13.1.3	Source .....	36
13.1.4	Accumulateur .....	36
13.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	36
13.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	37
14	SCENARIO 10.2 : MODELISATION MULTIRADIONUCLEIDES POUR UN MUR EN BETON .....	38
14.1	PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP .....	38
14.1.1	Géométrie .....	38
14.1.2	Matériaux .....	38
14.1.3	Source .....	39
14.1.4	Accumulateur .....	39
14.2	ACTIVITE DE LA SOURCE .....	39
14.3	COMPARAISON DES RESULTATS .....	39
15	CONCLUSION .....	40

BU-AP	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	101682	42	0001	A	
INSTN						<del>REF</del>

16	ANNEXES.....	42
16.1	ANNEXE 1 : COMPOSITIONS MASSIQUES DES MATERIAUX MODELISES DANS MCNP .....	42
16.2	ANNEXE 2 : ENERGIES ET INTENSITES D'EMISSIONS DES RADIONUCLEIDES ETUDIES SELON LA BASE NUCLEIDE- LARA .....	44
16.3	ANNEXE 3 : ENERGIES ET INTENSITES D'EMISSION DU CALIFORNIUM 252 .....	51
16.4	ANNEXE 4 : DETAIL DES RESULTATS MCNP POUR LE SCENARIO 8 .....	52
16.5	ANNEXE 5 : COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS AVEC DOSIMEX, MERCURAD, MICROSHIELD, RAYXPRT ET MCNP .....	54

BU-AP	<table><tr><td>Type Doc.</td><td>Activité</td><td>Cat.MT</td><td>N° Ordre</td><td>Révision</td></tr><tr><td>NT</td><td>101682</td><td>42</td><td>0001</td><td>A</td></tr></table>	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	NT	101682	42	0001	A	REF
Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision								
NT	101682	42	0001	A								
INSTN		REF										

## 1 OBJET

Dans le cadre du projet « établissement d'un dossier de validation du code déterministe Dosimex-GX 2.0 », selon le paragraphe 3 de la note en référence [1], pour neuf configurations géométriques et radiologiques parmi celles présentées dans la note en référence [2], il est demandé à AREVA NP de :

- modéliser ces configurations à l'aide du code de calcul MCNP version 4c2 ;
- comparer les résultats issus des calculs MCNP 4c2 avec ceux présentés dans la note en référence [2] (obtenus avec les codes de calcul DOSIMEX-GX 2.0, MicroShield, Mercurad et RayXpert).

Dans cette note, les résultats bruts issus de MCNP 4c2 sont donnés en sievert pour une particule source émise. Pour comparer ces résultats avec ceux présentés dans la note en référence [2], un traitement mathématique supplémentaire est réalisé. Il est présenté au paragraphe 3.

Les origines des données nucléaires utilisées dans cette note sont présentées au paragraphe 4.

Chaque modélisation est présentée dans un paragraphe qui lui est propre. La structure de ces paragraphes est la suivante :

- présentation de la modélisation MCNP ;
- présentation des activités des radionucléides ;
- comparaison des résultats.

Remarque 1 : Les résultats DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert présentés dans cette note peuvent être légèrement différents de ceux présentés dans la note en référence [2]. En effet, pour ces résultats, des correctifs ont été réalisés par l'INSTN et transmis à AREVA NP. De plus, pour RayXpert, des correctifs ont été transmis par la société TRAD (qui commercialise ce logiciel) pour les scénarios 1, 3, 6 et 10.1.

Remarque 2 : Pour toutes les configurations étudiées dans cette note, l'annexe 5 présente les résultats DOSIMEX-GX 2.0, MERCURAD, MicroShield, RayXpert et MCNP. Les seuls calculs réalisés par AREVA NP sont les calculs MCNP. Les résultats issus des autres logiciels sont issus, en particulier, de la note en référence [2].

Remarque 3 : Ce document ne constitue pas un dossier de validation mais présente des écarts entre résultats issus de calculs DOSIMEX et issus de calculs MCNP.



BU-AP	<table><tr><td>Type Doc.</td><td>Activité</td><td>Cat.MT</td><td>N° Ordre</td><td>Révision</td></tr><tr><td>NT</td><td>101682</td><td>42</td><td>0001</td><td>A</td></tr></table>	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	NT	101682	42	0001	A	REF
Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision								
NT	101682	42	0001	A								
INSTN		REF										

## 2 REFERENCES

- [1] 10269 rév. 0 « Etablissement d'un dossier de validation du code déterministe Dosimex-GX 2.0 », Proposition Commerciale & Technique, rédacteurs : JC. DALOUZY et JM. HERS, décembre 2015
- [2] DOSIMEX-GX 2.0 « Dossier de validation », rédacteur : A. VIVIER et G. LOPEZ, Juillet 2015
- [3] LA-13709-M « MCNP – A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code Version 4C », Manuel Utilisateur, Rédacteur : J.F BRIESMEISTER
- [4] CEA-R-6201 « Nucléide-LARA bibliothèque des émissions alpha, X et gamma », Rapport, rédacteurs : MM. BE, V. CHISTE et C. DULIEU, 2008 (MàJ 25/03/2016 sur [www.nucleide.org/Laraweb/](http://www.nucleide.org/Laraweb/))
- [5] NBSIR 87-3597 « XCOM : Photon Cross Sections on a Personal Computer », rédacteurs : M.J. BERGER & J.H. HUBBELL, Juillet 1987 ; « XCOM : Photon Cross Section Database (version 1.5) », rédacteurs : M.J. BERGER & al, 2010 ; « NIST X-ray and Gamma-ray Attenuation Coefficients and Cross Sections Database », NIST Standard Reference Database 8 version 2.0, rédacteurs : M.J. BERGER et J.H. HUBBELL, 1990
- [6] X-6 :HGH-93-77 « Information on the Photon Library MCPLIB02 », LANL internal memorandum, rédacteur : H.G. HUGHES (révisé en 1996)

### 3 METHODOLOGIE DE DETERMINATION DU DEBIT D'EQUIVALENT DE DOSE A PARTIR DES RESULTATS MCNP

Tels que réalisés dans cette étude, les calculs MCNP fournissent une dose pour un photon émis par la source. L'unité est le sievert par photon émis. A partir de ce résultat, le débit d'équivalent de dose pour chaque photon d'énergie « E » émis par un radionucléide « RN », noté «  $\dot{H}^*(10, RN, E)$  », est déduit selon la formule :

$$(Equ.1) \quad \dot{H}^*(10, RN, E) = Resu\_MCNP_E^{brut} \times I_E^{RN} \times A^{RN} \times conv(s \rightarrow h) \times conv(unit)$$

Avec :

- $\dot{H}^*(10, RN, E)$  : Débit d'équivalent de dose dû au photon d'énergie « E » du radionucléide « RN » (en mSv/h ou  $\mu$ Sv/h suivant configuration) ;
- $Resu\_MCNP_E^{brut}$  : Résultat brut du calcul MCNP pour une source émettant des photons d'énergie « E » (en Sv/photon émis) ;
- $I_E^{RN}$  : Nombre de photons d'énergie « E » émis pour une décroissance radioactive du radionucléide « RN » (photon émis/décroissance) ;
- $A^{RN}$  : Activité du radionucléide « RN » (en Bq) ;
- $conv(s \rightarrow h)$  : Coefficient de conversion des heures en secondes (3600 s/h) ;
- $conv(unit)$  : Coefficient de conversion des résultats pour obtenir un débit d'équivalent de dose «  $\dot{H}^*(10, RN, E)$  » dans l'unité désirée (sans unité).

Le débit d'équivalent de dose «  $\dot{H}^*(10, RN)$  » dû à un radionucléide « RN » est obtenu en sommant les débits d'équivalent de dose dus à chacun des photons émis par le radionucléide « RN » selon la formule :

$$(Equ.2) \quad \dot{H}^*(10, RN) = \sum_E \dot{H}^*(10, RN, E)$$

Le débit de dose «  $\dot{H}^*(10)$  » dû à tous les radionucléides « RN » composant la source est obtenu en sommant les débits de dose dus à chacun des radionucléides « RN » selon la formule :

$$(Equ.3) \quad \dot{H}^*(10) = \sum_{RN} \dot{H}^*(10, RN)$$

Pour certaines configurations géométriques et radiologiques, le nombre de photons de différentes énergies émis par un radionucléide est grand (pour l'américium 241, 188 photons d'énergies différentes sont répertoriés dans la base de données nucléaires Nucléide-LARA).

Plutôt que de réaliser un calcul MCNP pour chacune des énergies des photons à étudier, seules certaines énergies sont modélisées afin de réduire le nombre de calculs. Les énergies modélisées sont les suivantes :

- les énergies minimales et maximales ;
- entre l'énergie minimale et l'énergie maximale, un certain nombre d'énergies selon un pas défini.

Par interpolation logarithmique, à partir des résultats MCNP «  $Resu\_MCNP_E^{brut}$  » ainsi déterminés, des valeurs approximatives «  $Resu\_MCNP_E^{approx}$  » sont déterminées pour les photons dont l'énergie «  $E'$  » n'a pas fait l'objet d'un calcul MCNP. La formule de l'interpolation logarithmique est la suivante :

$$(Equ.4) \quad Resu\_MCNP_E^{approx} = \frac{Resu\_MCNP_{E(>E')}^{brut} \times \ln\left(\frac{E'}{E(\leq E')}\right) + Resu\_MCNP_{E(\leq E')}^{brut} \times \ln\left(\frac{E(>E')}{E'}\right)}{\ln\left(\frac{E(>E')}{E(\leq E')}\right)}$$

Avec :

- $E'$  : Energie du photon caractéristique du radionucléide « RN » (en keV) ;
- $E(\leq E')$  : Plus proche énergie inférieure à «  $E'$  » pour laquelle un calcul MCNP a été réalisé (en keV) ;
- $E(> E')$  : Plus proche énergie supérieure à «  $E'$  » pour laquelle un calcul MCNP a été réalisé (en keV) ;
- $Resu\_MCNP_E^{approx}$  : Approximation du résultat MCNP qui aurait été calculé pour un photon d'énergie «  $E'$  » (en Sv/photon émis) ;
- $Resu\_MCNP_{E(\leq E')}^{brut}$  : Résultat brut du calcul MCNP pour une source émettant des photons d'énergie «  $E(\leq E')$  » (en Sv/photon émis) ;
- $Resu\_MCNP_{E(> E')}^{brut}$  : Résultat brut du calcul MCNP pour une source émettant des photons d'énergie «  $E(> E')$  » (en Sv/photon émis).

Pour l'énergie «  $E'$  », le débit d'équivalent de dose «  $\dot{H}^*(10, RN, E')$  » est déterminé selon l'équation (1) en remplaçant  $Resu\_MCNP_E^{brut}$  par  $Resu\_MCNP_E^{approx}$ .

BU-AP	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	101682	42	0001	A	
INSTN						<del>REF</del>

## 4 DONNEES NUCLEAIRES

Pour les radionucléides modélisés dans cette étude hormis  $^{252}\text{Cf}$ , les énergies et les intensités des photons émis par décroissance radioactive sont issues de la base de données nucléaires Nucléide-LARA selon le document en référence [4]. Ces données sont présentées en annexe 2. Pour  $^{252}\text{Cf}$ , les énergies et les intensités des photons émis par décroissance radioactive et par fission sont issues des données fournies par Alain VIVIER. Ces données sont présentées en annexe 3.

Pour les calculs d'atténuation (hors MCNP), les sections efficaces d'interaction entre les photons et la matière sont issues de la base de données nucléaires NIST-XCOM selon les documents en référence [5].

Dans le code de calcul MCNP 4c2, les sections efficaces d'interaction entre les photons et la matière sont disponibles dans le fichier MCPLIB02 et proviennent de la base de données nucléaire ENDF. Une description des données du fichier MCPLIB02 est disponible dans la note en référence [6].

## 5 SCENARIO 1 : COMPARAISONS DES RESULTATS POUR 33 RADIONUCLEIDES PRINCIPAUX

### 5.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 5.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, trois géométries sont modélisées. Elles sont présentées sur la figure 1.

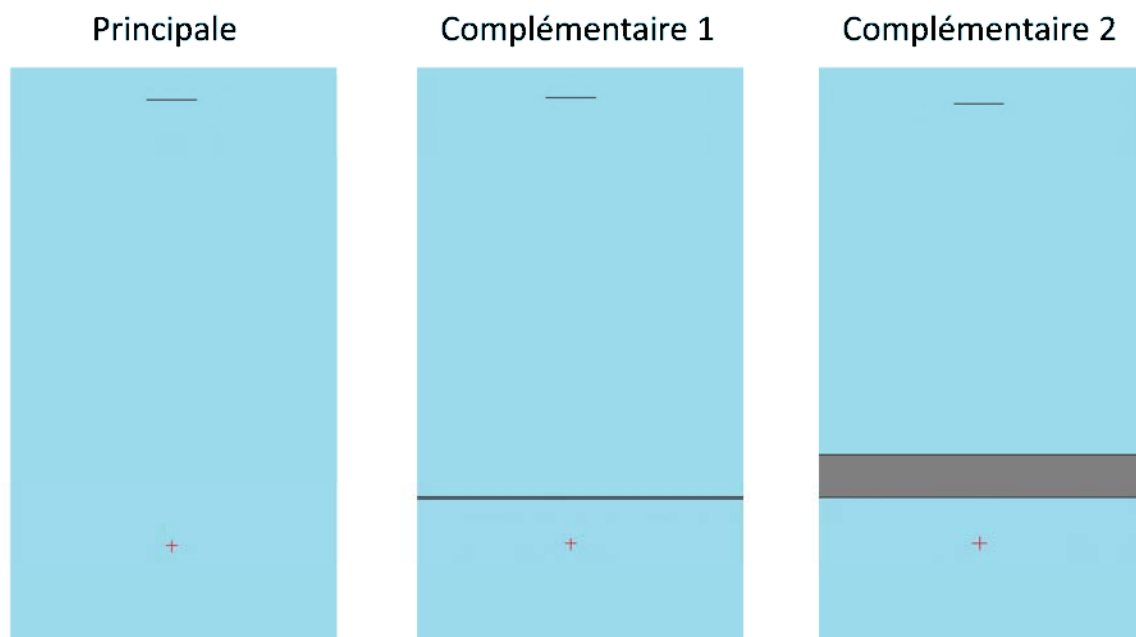


Figure 1 : Géométries modélisées dans MCNP pour le scénario 1

Le point source est situé à une distance de 10 cm d'un cylindre de disque 1 cm<sup>2</sup> et d'épaisseur 0.001 cm. Ce cylindre est constitué d'air et permet de modéliser le « volume de mesure » dans lequel le débit d'équivalent de dose est calculé.

Pour la géométrie « complémentaire 1 », un écran, constitué de fer, d'épaisseur 0.05 cm est ajouté entre le point source et le volume « de mesure ».

Pour la géométrie « complémentaire 2 », un écran, constitué de plomb, d'épaisseur 1 cm est ajouté entre le point source et le volume « de mesure ».

De l'air entoure le cylindre de mesure et le point source.

#### 5.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux modélisés sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- du fer avec une densité de 7.8 ;
- du plomb avec une densité de 11.34.

La composition massique de ce matériau est présentée en annexe 1.

BU-AP	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	101682	42	0001	A	
INSTN						REF

### 5.1.3 Source

Les photons sont émis de façon isotrope depuis le point source. Pour chacune des énergies d'émission des photons, un calcul MCNP est réalisé.

Pour la configuration principale, les énergies modélisées sont :

- de 10 keV à 100 keV par pas de 10 keV ;
- de 100 keV à 2000 keV par pas de 100 keV ;
- de 2000 keV à 10 000 keV par pas de 500 keV.

Pour la configuration « complémentaire 1 », les énergies modélisées sont :

- de 10 keV à 100 keV par pas de 10 keV ;
- de 100 keV à 11000 keV par pas de 100 keV.

Pour la configuration « complémentaire 2 », toutes les énergies du californium 252 présentées en annexe 3 sont modélisées.

Les photons émis avec des énergies plus faibles que celles présentées ci-dessus ne sont pas modélisés.

### 5.1.4 Accumulateur

L'accumulateur modélisé est de type F4 (fluence dans un volume) multipliés par une carte de conversion du flux en équivalent de dose  $H^*(10)$ . Le volume de mesure est présenté sur la figure 1. La distance entre le volume de mesure et le point source est de 10 cm.

## 5.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

Les activités des radionucléides sont de 1.0E+09 Bq.

### 5.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP pour la géométrie « principale » sont présentés dans le tableau 1.

Radio-nucléide	H*(10) (mSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
	MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
Ag110m	42.0	41.5	42.6	1.2%	1.4%
N16	37.5	37.42	39.7	0.31%	5.8%
Y88	37.0	37.25	38.4	0.65%	3.8%
Co60	34.8	34.8	35	0.07%	0.50%
La140	32.1	31.7	31.7	1.4%	1.4%
Sb124	26.4	26.2	26.6	0.60%	0.92%
Cs134	24.8	24.7	25.5	0.52%	2.7%
Nb94	24.4	24.4	24.9	0.01%	2.0%
Fe59	16.8	16.8	17.4	0.22%	3.3%
F18	16.6	16.5	15.51	0.56%	6.5%
Co58	15.4	15.3	14.7	0.47%	4.4%
Ir192	14.0	13.85	14.5	0.93%	3.7%
Mn54	13.0	12.9	12	0.53%	7.5%
Cs137	9.26	9.23	8.98	0.27%	3.0%
Ba133	8.98	8.84	8.93	1.5%	0.52%
In111	9.08	8.82	8.67	2.9%	4.5%
Zn65	8.32	8.4	7.97	1.0%	4.2%
Se75	6.97	6.89	6.86	1.1%	1.5%
I131	6.60	6.46	6.11	2.2%	7.5%
Cf252	5.71	5.8	5.96	1.5%	4.3%
I125	3.50	3.52	3.64	0.53%	4.0%
Rh106	3.33	3.3	3.19	0.82%	4.1%
U235	3.61	3.15	3.36	13%	6.8%
Mo99	2.40	2.41	2.56	0.4%	6.6%
Tc99m	2.49	2.33	2.47	6.5%	0.87%
Bi212	1.63	1.62	1.73	0.81%	5.9%
Xe133	1.64	1.56	1.62	4.9%	1.2%
Am241	1.38	1.34	1.33	2.7%	3.4%
Cr51	0.55	0.54	0.54	1.3%	1.3%
Pu238	0.23	0.29	0.22	27%	3.4%
Ra226	0.139	0.131	0.133	5.4%	4.0%
Pu239	0.10	0.06	0.092	41%	9.5%
Kr85	0.037	0.038	0.035	1.3%	6.7%

Tableau 1 : Résultats des calculs et comparaisons pour la géométrie principale du scénario 1

Selon le tableau 1 :

- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont compris entre 0 % et 10 % ;
- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont inférieurs à 5 % hormis pour <sup>238</sup>Pu et <sup>239</sup>Pu.

Pour <sup>238</sup>Pu et <sup>239</sup>Pu, les écarts peuvent provenir de différences entre les données nucléaires utilisées.

Les résultats issus des calculs MCNP pour la géométrie « complémentaire 1 » sont présentés dans le tableau 2.

Radio-nucléide	H*(10) (mSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
	MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
Pu238	4.10E-04	3.89E-04	3.85E-04	5.1%	6.1%
Pu239	1.22E-03	8.81E-04	9.54E-04	28%	21%
Am241	3.60E-01	3.69E-01	3.48E-01	2.6%	3.3%

Tableau 2 : Résultats des calculs et comparaisons pour la géométrie complémentaire 1 scénario 1

Selon le tableau 2 :

- pour <sup>241</sup>Am, les écarts sont identiques à ceux obtenus pour la géométrie principale ;
- pour <sup>238</sup>Pu, les écarts sont passés de plus de 20 % en géométrie principale à environ 5 % pour cette géométrie ;
- pour <sup>239</sup>Pu, les écarts sont encore supérieurs à 20 %.

Pour <sup>238</sup>Pu, les écarts entre MCNP et DOSIMEX provenaient de raies X à basse énergie. L'écran constitué de fer a coupé la contribution au résultat de ces énergies.

Pour <sup>239</sup>Pu, des écarts entre les données nucléaires utilisées subsistent.

Les résultats issus des calculs MCNP pour la géométrie « complémentaire 2 » sont présentés dans le tableau 3.

Radio-nucléide	H*(10) (mSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
	MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
Cf252	2.81	2.76	2.90	1.8%	3.2%

Tableau 3 : Résultats des calculs et comparaisons pour la géométrie complémentaire 2 scénario 1

Selon le tableau 3, les écarts sont cohérents avec ceux obtenus pour la géométrie principale.



## 6 SCENARIO 2 : EVOLUTION DES RESULTATS EN FONCTION DE LA DISTANCE

### 6.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 6.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, la géométrie modélisée est présentée sur la figure 2.

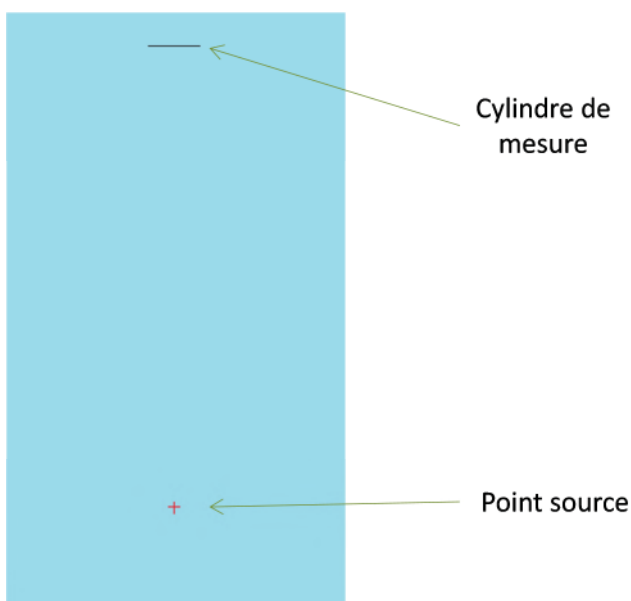


Figure 2 : Géométrie modélisée dans MCNP pour le scénario 2

Le point source est situé à une distance variable d'un cylindre de disque 1 cm<sup>2</sup> et d'épaisseur 0.001 cm. Ce cylindre est constitué d'air et permet de modéliser le « volume de mesure » dans lequel le débit d'équivalent de dose est calculé.

De l'air entoure le cylindre de mesure et le point source.

#### 6.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, l'unique matériau modélisé est de l'air avec une densité de 1.22E-03. La composition massique de ce matériau est présentée en annexe 1.

#### 6.1.3 Source

Les photons sont émis de façon isotrope depuis le point source. Pour cette configuration, les énergies modélisées des photons du césium 137 sont 28.35 keV et 661.7 keV.

#### 6.1.4 Accumulateur

Pour une distance entre le point source et le point de mesure inférieure à 5 cm, l'accumulateur modélisé est de type F4 (fluence dans un volume) multipliés par une carte de conversion du flux en équivalent de dose H\*(10).

Pour une distance entre le point source et le point de mesure supérieure à 5 cm, l'accumulateur modélisé est de type F5 (fluence dans un volume) multipliés par une carte de conversion du flux en équivalent de dose H\*(10).

## 6.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

L'activité  $^{137}\text{Cs}$  est de  $1.0\text{E}+09$  Bq.

## 6.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 4.

Distance (cm)	H*(10) (μSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
	MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
0.001	3.40E+07	3.28E+07	3.60E+07	3.51%	5.90%
0.01	2.28E+07	2.33E+07	2.30E+07	2.27%	0.95%
0.1	9.95E+06	1.01E+07	9.85E+06	1.51%	1.00%
0.5	2.34E+06	2.39E+06	2.32E+06	1.98%	1.01%
1	7.89E+05	8.03E+05	7.80E+05	1.78%	1.14%
5	3.62E+04	3.67E+04	3.61E+04	1.44%	0.22%
15	4043	4113	4050	1.75%	0.18%
30	1011	1027	1010	1.63%	0.06%
50	364	369	373	1.46%	2.55%
100	90.7	92.4	92.7	1.82%	2.15%
150	40.3	41.1	39.8	1.92%	1.31%
200	22.6	23.1	22.6	2.18%	0.11%

Tableau 4 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scénario 2

Selon le tableau 4 :

- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 3 %, hormis pour la plus petite distance ;
- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont inférieurs à 4 %.

## 7 SCENARIO 3 : IMPACT DE LA PRESENCE D'UN ECRAN ET DU BUILD-UP

### 7.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 7.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, trois géométries sont modélisées. Elles sont présentées sur la figure 3.

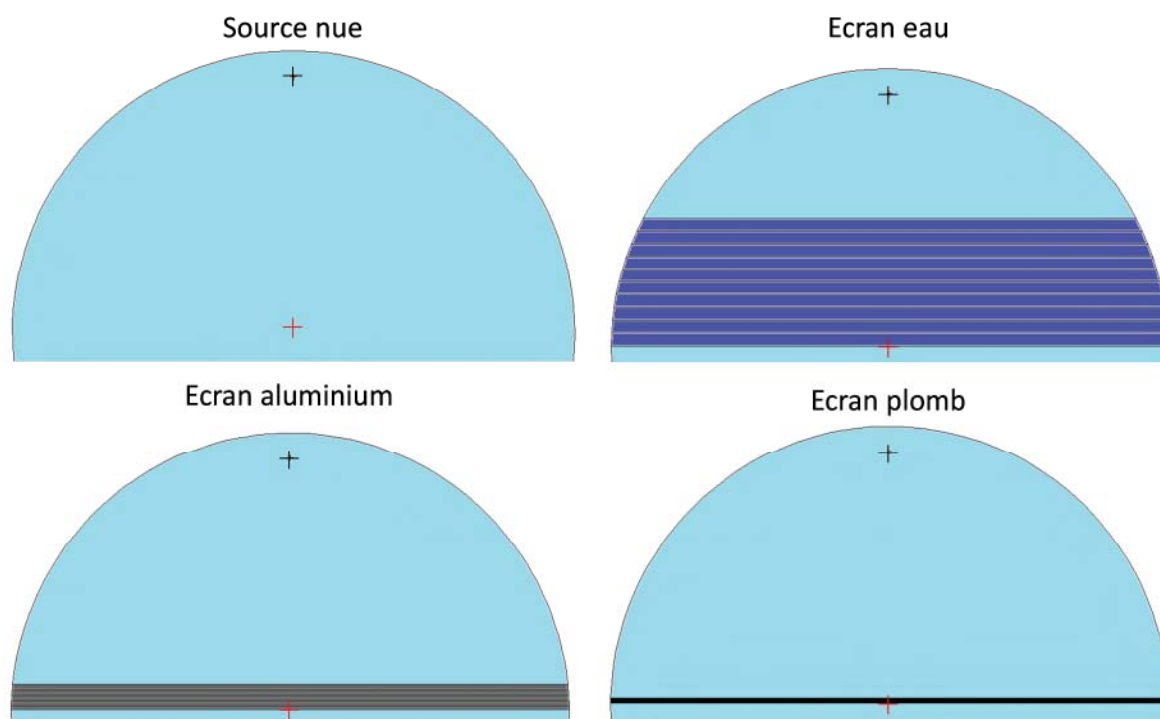


Figure 3 : Géométries modélisées dans MCNP pour le scénario 3

Le point source est situé à une distance de 100 cm du point de mesure. Trois écrans sont alternativement placés entre la source et le point de mesure. Les caractéristiques de ces écrans sont les suivantes :

- constitué d'eau sur une épaisseur de 50 cm ;
- constitué d'aluminium sur une épaisseur de 10 cm ;
- constitué de plomb sur une épaisseur de 2 cm.

Afin d'améliorer la convergence du calcul MCNP (modification des importances) l'écran :

- constitué d'eau est découpé en 10 écrans de 5 cm d'épaisseur chacun ;
- constitué d'aluminium est découpé en 10 écrans de 1 cm d'épaisseur chacun ;
- constitué de plomb est découpé en 20 écrans de 0.1 cm d'épaisseur chacun.

De l'air entoure le point source, le point de mesure et les écrans.

BU-AP	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	101682	42	0001	A	
INSTN						<del>REF</del>

### 7.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux modélisés sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- de l'eau avec une densité de 1.0 ;
- de l'aluminium avec une densité de 2.3 ;
- du plomb avec une densité de 11.34.

Les compositions massiques de ces matériaux sont présentées en annexe 1.

### 7.1.3 Source

Les photons sont émis de façon isotrope depuis le point source. Pour chacune des énergies d'émission des photons, un calcul MCNP est réalisé. Pour cette configuration, les énergies modélisées sont :

- pour les géométries « sans écran », « écran eau » et « écran aluminium » ;
  - de 50 keV à 100 keV par pas de 10 keV ;
  - de 100 keV à 1100 keV par pas de 100 keV ;
- pour la géométrie « écran plomb » : de 200 keV à 1100 keV par pas de 100 keV.

### 7.1.4 Accumulateur

L'accumulateur modélisé est de type F5 (fluence en un point) multiplié par une carte de conversion du flux en équivalent de dose H\*(10). Sa position est présentée sur la figure 3. La distance entre le point source et le point de mesure est de 100 cm.

## 7.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

Les activités  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{60}\text{Co}$  sont chacune de 1.0E+09 Bq.

### 7.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 5.

Radio-nucléide	Ecran	H*(10) (μSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
		MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
<sup>241</sup> Am	Sans écran	13.3	13.4	13.3	0.4%	0.3%
	10 cm alu	1.77E-02	3.80E-02	1.67E-02	114.5%	5.7%
	2 cm plomb	1.44E-04	1.30E-04	1.40E-04	9.4%	2.5%
	50 cm eau	1.33E-02	5.10E-02	1.10E-02	283.6%	17.3%
<sup>137</sup> Cs	Sans écran	90.8	92.5	90.7	1.9%	0.1%
	10 cm alu	35.5	44.0	35.9	23.9%	1.1%
	2 cm plomb	13.0	13.3	13.1	2.6%	1.0%
	50 cm eau	9.2	14.0	9.3	52.8%	1.8%
<sup>60</sup> Co	Sans écran	347	349	352	0.4%	1.3%
	10 cm alu	174	203	181	16.8%	4.2%
	2 cm plomb	145	143	146	1.6%	0.5%
	50 cm eau	60.3	80.0	60.0	32.7%	0.5%

Tableau 5 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scénario 3

Selon le tableau 5 :

- pour <sup>241</sup>Am, les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX :
  - sont supérieurs à 50 % pour des écrans d'aluminium ou d'eau,
  - sont inférieurs à 15 % pour un écran de plomb ou pour une géométrie sans écran,
- pour <sup>241</sup>Am, les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 20 % :
- pour <sup>137</sup>Cs et <sup>60</sup>Co, les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de :
  - RayXpert sont inférieurs à 5 %,
  - DOSIMEX sont inférieurs à 3 % pour un écran de plomb ou pour une géométrie sans écran,
  - DOSIMEX sont compris entre 15 % et 53 % pour un écran d'aluminium ou d'eau.

## 8 SCENARIO 5 : INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DE LA SOURCE

### 8.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 8.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, trois géométries sont modélisées. Elles sont présentées sur la figure 4.

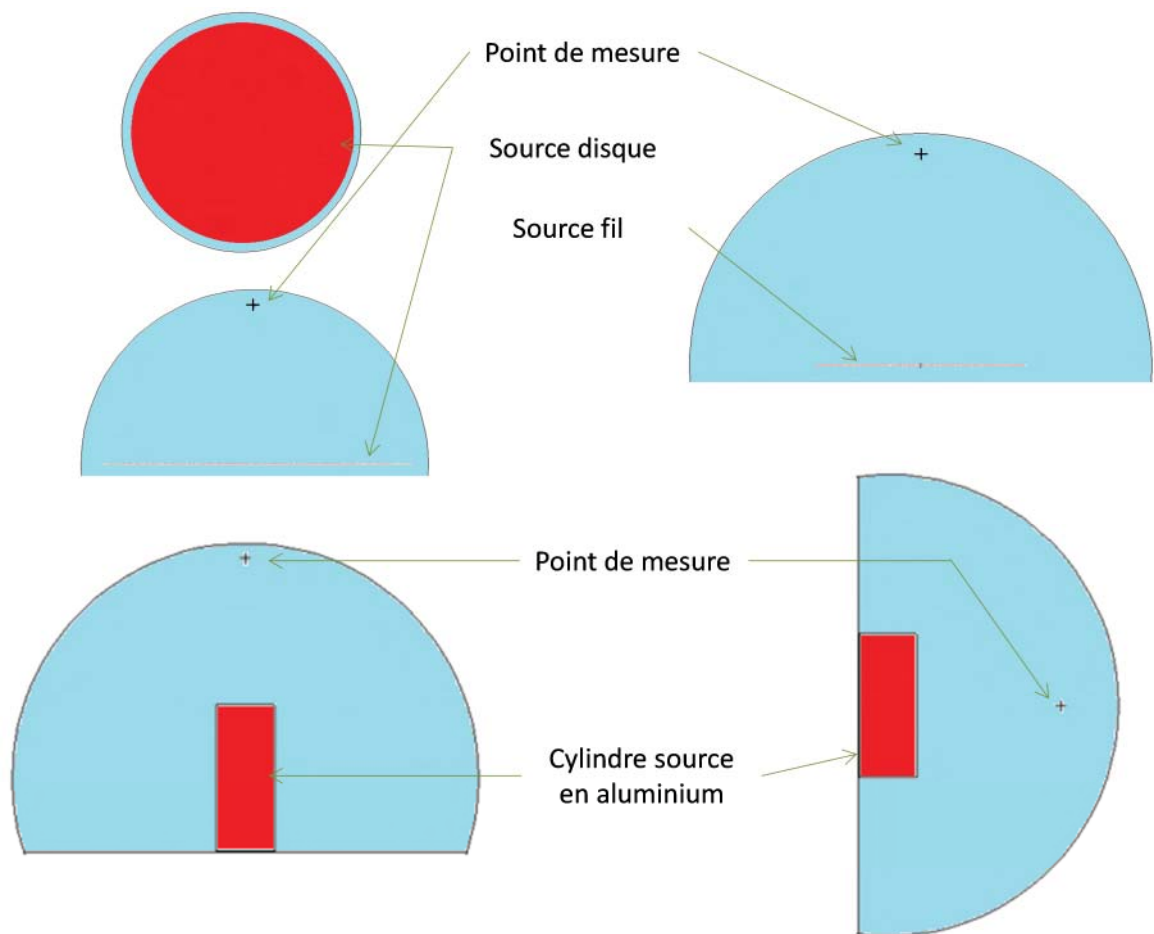


Figure 4 : Géométries modélisées dans MCNP pour le scénario 5

Le point de mesure est situé à une distance de 100 cm :

- d'un fil source de longueur 100 cm ;
- d'un disque source de rayon 100 cm ;
- d'un cylindre source, constitué d'aluminium, de rayon 10 cm et de hauteur 20 cm.

De l'air entoure la source et le point de mesure.

#### 8.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux modélisés sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- de l'aluminium avec une densité de 2.7.

La composition massique de ce matériau est présentée en annexe 1.

BU-AP	<table><tr><td>Type Doc.</td><td>Activité</td><td>Cat.MT</td><td>N° Ordre</td><td>Révision</td></tr><tr><td>NT</td><td>101682</td><td>42</td><td>0001</td><td>A</td></tr></table>	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	NT	101682	42	0001	A	REF
Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision								
NT	101682	42	0001	A								
INSTN		REF										

### 8.1.3 Source

Les photons sont émis de façon isotrope depuis le point source. Pour chacune des énergies d'émission des photons, un calcul MCNP est réalisé. Pour cette configuration, les énergies modélisées sont :

- pour  $^{137}\text{Cs}$  : 32 keV et 661.76 keV ;
- pour  $^{60}\text{Co}$  : 1173.23 keV et 1332.49 keV ;
- pour  $^{241}\text{Am}$  :
  - pour les sources surfaciques : 13.852 keV, 15.876 keV, 16.96 keV, 21.16 keV, 26.34 keV et 59.54 keV ;
  - pour la source cylindrique : 10 keV, 12 keV, 14 keV, 17 keV, 20 keV, 23 keV, 27 keV, 30 keV, 34 keV, 40 keV, 50 keV, 60 keV, 70 keV, 80 keV, 90 keV, 100 keV, 120 keV, 140 keV, 170 keV, 200 keV, 230 keV, 270 keV, 300 keV, 340 keV, 400 keV, 500 keV, 600 keV, 700 keV, 800 keV, 900 keV, 1000 keV et 1020 keV.

### 8.1.4 Accumulateur

Les accumulateurs modélisés sont de type F5 (fluence en un point) multipliés par une carte de conversion du flux en équivalent de dose  $H^*(10)$ . Leurs positions sont présentées sur la figure 4. La distance entre le point de mesure et respectivement le milieu du fil source, le centre du disque source et le bord du cylindre source est de 100 cm.

Pour la géométrie où le point de mesure est au-dessus du cylindre, le point de mesure est sur l'axe de rotation du cylindre. Pour la géométrie où le point de mesure est sur le côté du cylindre, le point de mesure est sur l'axe de symétrie axiale du cylindre.

## 8.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

Les activités  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{60}\text{Co}$  sont chacune de 1.0E+09 Bq.

### 8.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 6.

RN	Source	H*(10) (μSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
		MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
241Am	Fil	12.4	12.5	11.9	0.51%	3.9%
	Disque	9.0	9.3	9.5	3.7%	5.7%
	Cylindre 1 (sur le côté)	0.79	0.94	0.77	19%	2.2%
	Cylindre pt 2 (sur le dessus)	0.70	0.74	0.69	6.4%	0.75%
137Cs	Fil	85	86	83	0.71%	2.8%
	Disque	63	64	63	2.3%	0.74%
	Cylindre 1 (sur le côté)	40	48	41	19%	1.8%
	Cylindre pt 2 (sur le dessus)	36	44	37	23%	3.1%
60Co	Fil	322	323	326	0.19%	1.1%
	Disque	236	242	244	2.7%	3.5%
	Cylindre 1 (sur le côté)	171	195	173	14%	1.3%
	Cylindre 2 (sur le dessus)	155	185	156	20%	0.79%

Tableau 6 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scenario 5

Selon le tableau 6 :

- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 3.5 %, hormis pour les sources fil et disque <sup>241</sup>Am pour lesquelles les écarts sont compris entre 4 % et 6 % ;
- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont :
  - inférieurs à 1 % pour la source fil,
  - d'environ 3 % pour la source disque,
  - compris entre 6 et 25 %, pour le cylindre source,
- les résultats issus de MCNP sont toujours inférieurs à ceux issus de DOSIMEX.



## 9 SCENARIO 6 : COUPLAGES SOURCES VOLUMIQUES + ECRAN

### 9.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 9.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, quatre géométries sont modélisées pour prendre en compte les caractéristiques suivantes :

- présence / absence d'un écran ;
- point de mesure sur le dessus / sur le côté du cylindre source.

Les géométries sont présentées dans la figure 5.

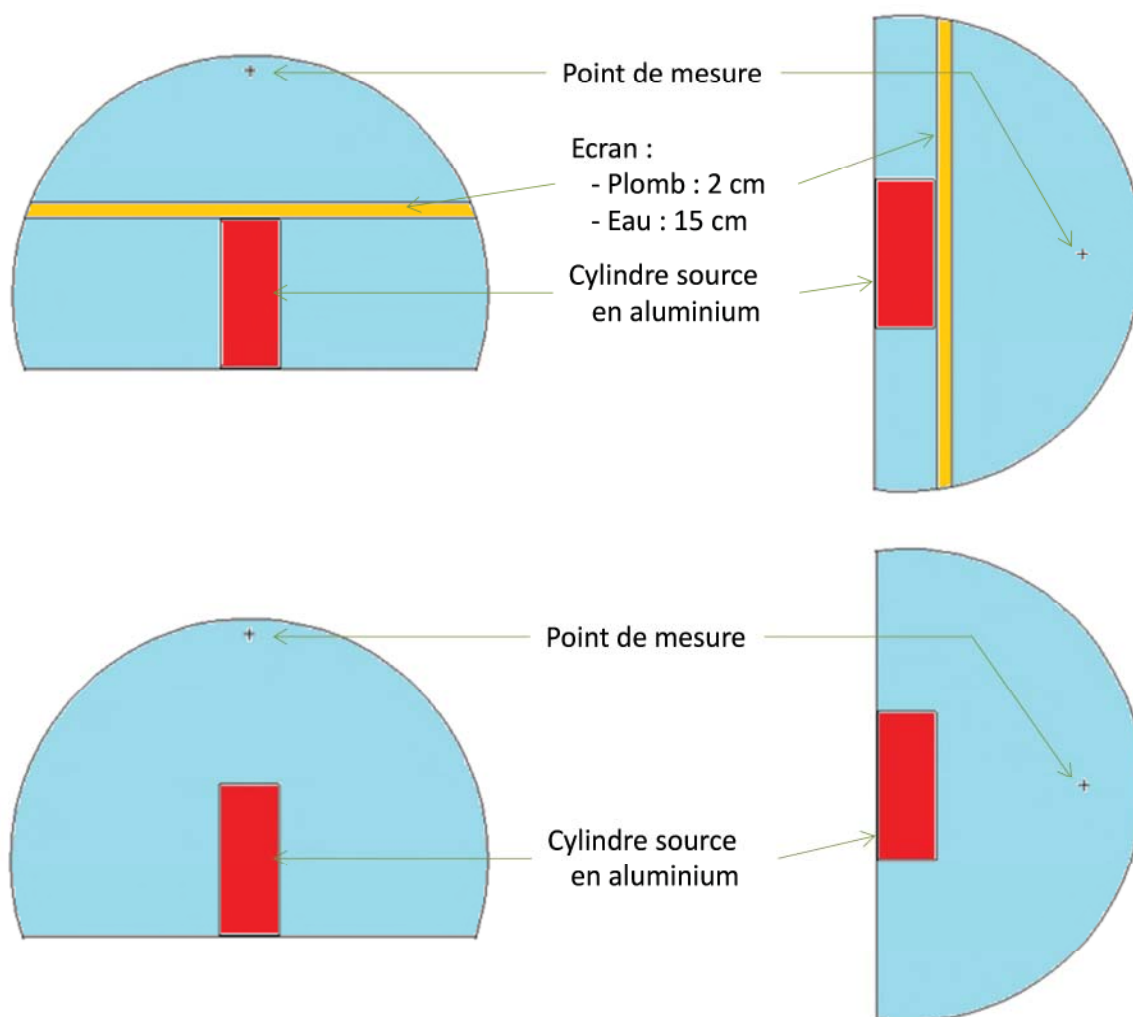


Figure 5 : Géométries modélisées dans MCNP pour le scénario 6

Le cylindre source a un rayon de 20 cm et une hauteur de 100 cm. Il est constitué d'aluminium. L'écran a une épaisseur de 2 cm s'il est constitué de plomb et 15 cm s'il est constitué d'eau. De l'air entoure le cylindre et l'écran.

BU-AP	<table><tr><td>Type Doc.</td><td>Activité</td><td>Cat.MT</td><td>N° Ordre</td><td>Révision</td></tr><tr><td>NT</td><td>101682</td><td>42</td><td>0001</td><td>A</td></tr></table>	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	NT	101682	42	0001	A	REF
Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision								
NT	101682	42	0001	A								
INSTN		REF										

### 9.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux modélisés sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- de l'aluminium avec une densité de 2.7 ;
- du plomb avec une densité de 11.34 ;
- de l'eau avec une densité de 1.0.

Les compositions massiques de ces matériaux sont présentées en annexe 1.

### 9.1.3 Source

Les photons sont émis de façon isotrope et uniforme dans tout le volume du cylindre source. Pour chacune des énergies d'émission des photons, un calcul MCNP est réalisé. Pour cette configuration, les énergies modélisées sont :

- pour  $^{137}\text{Cs}$  : 661.76 keV ;
- pour  $^{60}\text{Co}$  : 1173.23 keV et 1332.49 keV.

Etant donné le volume et la densité du cylindre source ainsi que la présence d'un écran, pour  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{60}\text{Co}$ , les photons émis avec des énergies plus faibles que celles présentées ci-dessus ne sont pas modélisés.

### 9.1.4 Accumulateur

Les accumulateurs modélisés sont de type F5 (fluence en un point) multipliés par une carte de conversion du flux en équivalent de dose  $H^*(10)$ . Leurs positions sont présentées sur la figure 5. La distance entre le point de mesure et le bord du cylindre source est de 100 cm. Pour la géométrie où le point de mesure est au-dessus du cylindre, le point de mesure est sur l'axe de rotation du cylindre. Pour la géométrie où le point de mesure est sur le côté du cylindre, le point de mesure est sur l'axe de symétrie axiale du cylindre.

## 9.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

Les activités  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{60}\text{Co}$  sont chacune de 1.0E+09 Bq.

### 9.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 7.

Point	Source	Ecran	H*(10) (μSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
			MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
1 (sur le côté)	Cs137	Sans	20.2	24.0	21.5	19 %	6.4 %
		2 cm Pb	1.6	2.3	1.8	42 %	11 %
		15 cm eau	10.9	14.0	10.0	29 %	8.0 %
	Co60	Sans	89.9	101.0	90.0	12 %	0.06 %
		2 cm Pb	26.3	32.0	28.0	22 %	6.6 %
		15 cm eau	54.5	68.0	50.1	25 %	8.0 %
2 (au-dessus)	Cs137	Sans	8.0	9.6	8.3	20 %	3.7 %
		2 cm Pb	0.75	0.95	0.71	27 %	4.8 %
		15 cm eau	5.5	5.7	5.4	2.8 %	2.7 %
	Co60	Sans	35.5	40.0	36.0	13 %	1.5 %
		2 cm Pb	11.7	13.0	11.0	11 %	6.1 %
		15 cm eau	25.9	27.0	24.2	4.4 %	6.4 %

Tableau 7 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scénario 6

Selon le tableau 7 :

- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 11 % ;
- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont compris entre 10 et 42 %, hormis pour l'écran de 15 cm avec un point de mesure au-dessus du cylindre (écart d'environ 4 %) ;
- les résultats issus de MCNP sont toujours inférieurs à ceux issus de DOSIMEX.

## 10 SCENARIO 7 : INFLUENCE DU MATERIAU

### 10.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 10.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, une seule géométrie est modélisée. Elle est présentée sur la figure 6.

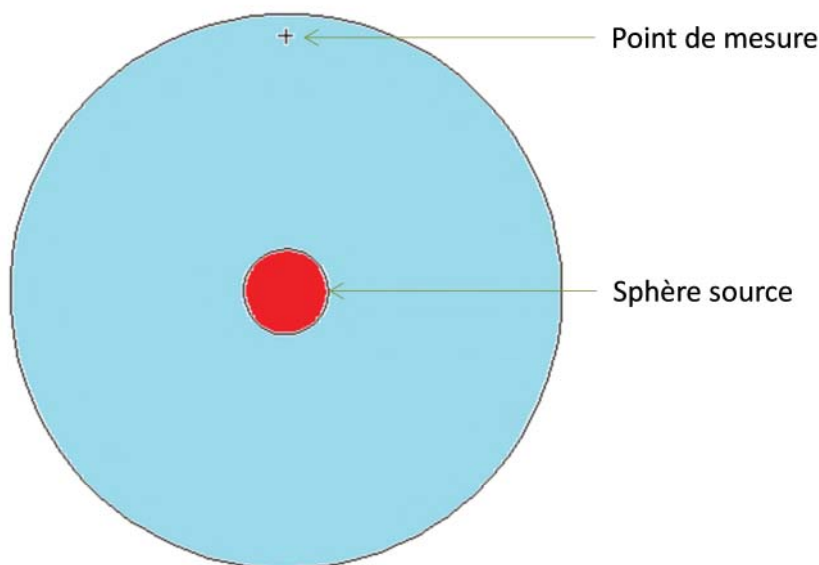


Figure 6 : Géométrie modélisée dans MCNP pour le scénario 7

La sphère source a un rayon de 20 cm. Pour chacun des fichiers MCNP réalisés, elle est constituée d'un unique matériau. Cette sphère est entourée d'air.

#### 10.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux utilisés pour modéliser la sphère source sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- de l'eau avec une densité de 1.0.
- de l'aluminium de densité 2.7 ;
- du béton de densité 2.35 ;
- du fer de densité 7.86 ;
- du plomb avec une densité de 11.34 ;
- de l'uranium de densité 19 ;
- du béryllium de densité 1.85 ;
- du carbone de densité 2.25 ;
- du sodium de densité 0.97 ;
- du silicium de densité 2.2 ;
- du tungstène de densité 19.25 ;
- de l'étain de densité 6.52.

Les compositions massiques de ces matériaux sont présentées en annexe 1.

### 10.1.3 Source

Les photons sont émis de façon isotrope et uniforme dans tout le volume de la sphère source. Pour chacune des énergies d'émission des photons, un calcul MCNP est réalisé. Pour cette configuration, seules sont modélisées les énergies des photons principaux du cobalt 60 : 1173.23 keV et 1332.49 keV.

### 10.1.4 Accumulateur

L'accumulateur modélisés est de type F5 (fluence en un point) multiplié par une carte de conversion du flux en équivalent de dose  $H^*(10)$ . Sa position est présentée sur la figure 6. La distance entre le point de mesure et le bord de la sphère est de 100 cm.

## 10.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

L'activité  $^{60}\text{Co}$  est de  $1.0\text{E}+9$  Bq.

## 10.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 8.

Matériau	(densité)	$H^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			Ecart $ (1)-(2) /(1)$	Ecart $ (1)-(3) /(1)$
		MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
Air	(1.3E-3)	243	244	244	0.6%	0.6 %
Eau	(1)	164	184	170	12%	3.7 %
Alu	(2.7)	99	107	102	8%	2.7 %
Béton	(2.35)	107	117	114	10%	6.8 %
Fer	(7.86)	38	36	42	5%	11 %
Plomb	(11.34)	19	16	18	18%	7.5 %
Uranium	(19)	10	8	10	22%	2.3 %
Béryllium	(1.85)	138	174	150	26%	8.5 %
Carbone	(2.25)	113	133	115	18%	1.6 %
Sodium	(0.97)	174	191	171	10%	1.9 %
Silicium	(2.2)	112	121	115	8%	2.7 %
Tungstène	(19.25)	13	10	13	21%	2.9 %
Etain	(6.52)	44	41	45	6%	2.9 %

Tableau 8 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scénario 7

Selon le Tableau 8 :

- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 11 % ;
- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont inférieurs à 26 % ;
- pour les matériaux fer, plomb, uranium et tungstène, les résultats issus de MCNP sont supérieurs à ceux issus de DOSIMEX ; pour ces matériaux, l'écart maximum est de 22 % ;
- il n'y a pas de corrélation entre la densité du matériau et la valeur de l'écart entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX.

# 11 SCENARIO 8 : MAILLAGE EN PUISSANCE ADAPTE ET MODELISATION DE GRANDS VOLUMES

## 11.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

### 11.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, plusieurs géométries sont réalisées afin de discrétiser le cylindre source. Certaines de ces géométries sont présentées sur la figure 7.

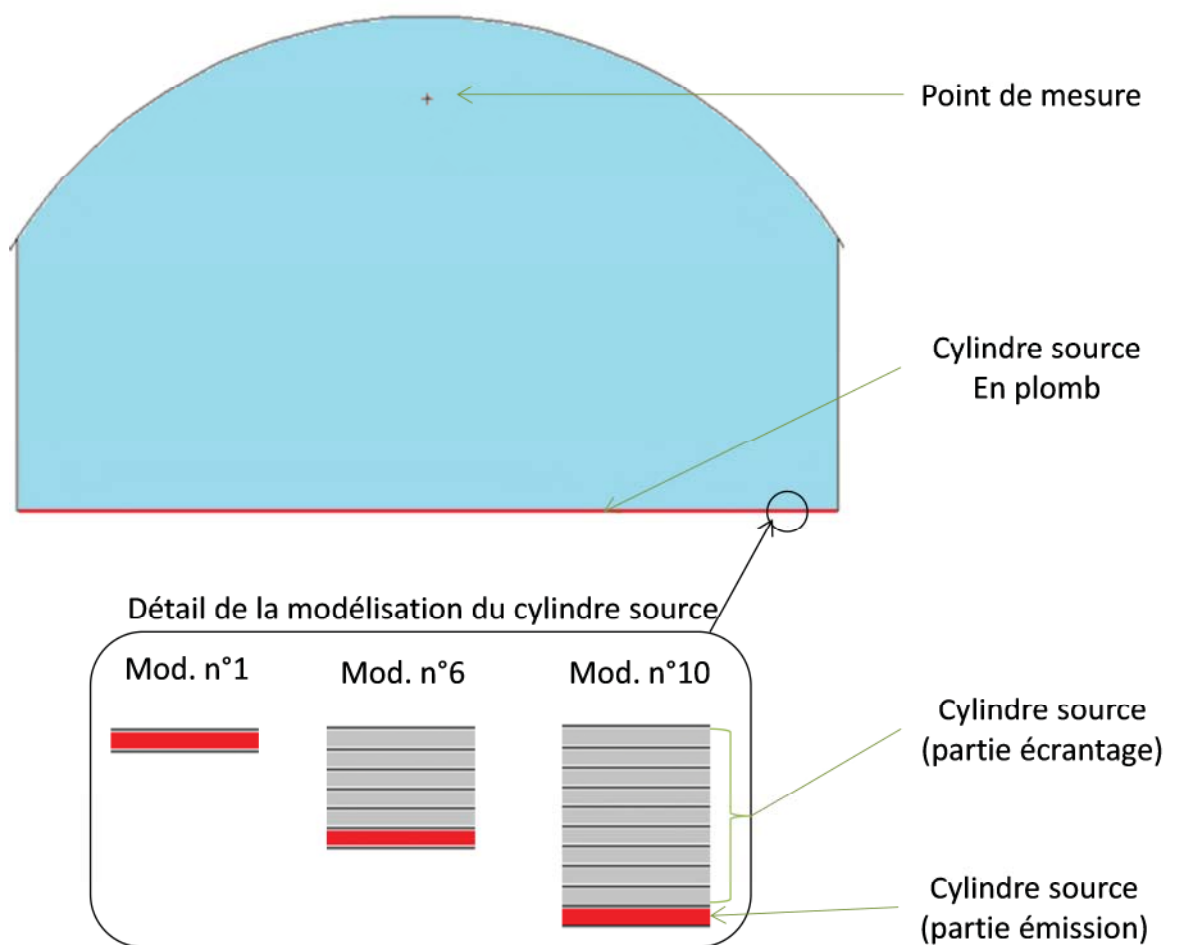


Figure 7 : Géométries modélisées dans MCNP pour le scénario 8

Pour les photons dont l'énergie d'émission est comprise entre 10 keV et 40 keV, 10 géométries du cylindre source sont réalisées :

- 1<sup>ère</sup> géométrie : un cylindre constitué de plomb de rayon 100 cm et de hauteur 0.001 cm et contenant la source volumique ;
- 2<sup>ème</sup> géométrie : deux cylindres constitués de plomb, chacun de rayon 100 cm et de hauteur 0.001 cm, dont l'un est un écran et l'autre contient la source volumique ;
- 10<sup>ème</sup> géométrie : dix cylindres constitués de plomb, chacun de rayon 100 cm et de hauteur 0.001 cm, dont neuf sont des écrans et le dernier contient la source volumique.

Pour les photons dont l'énergie d'émission est de 59 keV, 10 géométries du cylindre source sont réalisées :

- 1<sup>ère</sup> géométrie : un cylindre constitué de plomb de rayon 100 cm et de hauteur 0.01 cm et contenant la source volumique ;
- 2<sup>ème</sup> géométrie : deux cylindres constitués de plomb, chacun de rayon 100 cm et de hauteur 0.01 cm, dont l'un est un écran et l'autre contient la source volumique ;
- 10<sup>ème</sup> géométrie : dix cylindres constitués de plomb, chacun de rayon 100 cm et de hauteur 0.01 cm, dont neuf sont des écrans et le dernier contient la source volumique.

Ainsi, pour le cylindre source, la hauteur maximale modélisée est de :

- 0.01 cm pour les photons dont l'énergie d'émission est comprise entre 10 keV et 40 keV ;
- 0.1 cm les photons dont l'énergie d'émission est de 59 keV.

Pour chacune des géométries modélisées, les importances de chacun des cylindres sont adaptées en fonction de l'épaisseur d'écran traversé et de l'énergie d'émission des photons.

De l'air est modélisé au-dessus du cylindre source. Pour toute particule qui sort du cylindre par une autre surface que celle du haut, la propagation est arrêtée.

Aucune autre géométrie n'est modélisée.

### 11.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux modélisés sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- du plomb avec une densité de 11.34.

Les compositions massiques de ces matériaux sont présentées en annexe 1.

### 11.1.3 Source

Les photons sont tirés de façon isotrope et uniforme dans tout le volume du cylindre source. Pour chacune des énergies d'émissions des photons, un calcul MCNP est réalisé. Pour cette configuration, les énergies d'émission de l'américium 241 modélisées sont les suivantes : 13.852 keV, 16.96 keV, 21.26 keV, 26.34 keV et 59.54 keV.

Selon l'annexe 4, aucune autre énergie des photons de <sup>241</sup>Am n'est modélisée.

### 11.1.4 Accumulateur

L'accumulateur modélisés est de type F5 (fluence en un point) multiplié par une carte de conversion du flux en équivalent de dose H\*(10). Sa position est représentée sur la figure 7. La distance entre le point de mesure et le bord du cylindre source est de 100 cm.

## 11.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

L'activité volumique  $^{241}\text{Am}$  est de  $1.0\text{E}+9 \text{ Bq/cm}^3$ .

## 11.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 9.

Hauteur cylindre (cm)	H*(10) (μSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
	MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
0.01	1008	721	976	28 %	3.2 %
0.03	1607	1770	1625	10 %	1.1 %
0.05	1822	1980	1796	8.7 %	1.4 %
0.07	1886	2040	1914	8.2 %	1.5 %
0.1	1908	2060	1926	7.9 %	0.9 %
1	1913	2050	2040	7.2 %	6.6 %
2	1913	2050	1970	7.2 %	3.0 %
3	1913	2040	1960	6.6 %	2.5 %
5	1913	2030	1952	6.1 %	2.0 %
7	1913	2030	1981	6.1 %	3.6 %
8	1913	2030	2069	6.1 %	8.2 %
10	1913	2030	2047	6.1 %	7.0 %

Tableau 9 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scénario 8

Selon le tableau 9:

- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 9 % ;
- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont inférieurs à 10 % pour une épaisseur de cylindre supérieure à 0.03 cm ;
- pour une épaisseur du cylindre source de 0.01 cm, le résultat déterminé par DOSIMEX est inférieur à ceux déterminés par MCNP et par RayXpert ; l'écart entre le résultat issu de MCNP et celui issu de DOSIMEX est de 28 %.



## 12 SCENARIO 9 : GEOMETRIE PARALLELEPIPEDE DE GRANDE DIMENSION AVEC ECRAN

### 12.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 12.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, quatre géométries sont modélisées pour prendre en compte les caractéristiques suivantes :

- présence / absence d'un écran ;
- point de mesure sur le dessus / sur le côté du pavé source.

Les géométries sont présentées sur la figure 8.

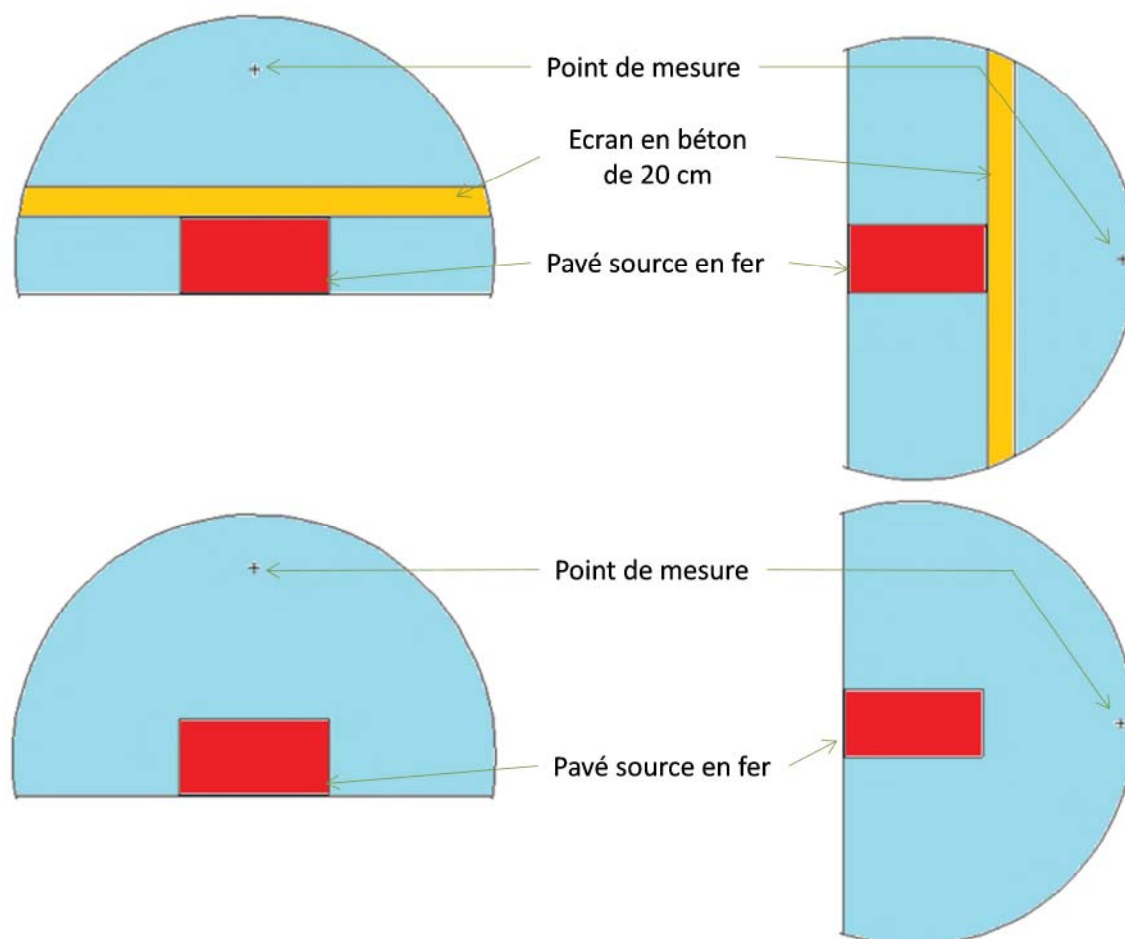


Figure 8 : Géométries modélisées dans MCNP pour le scénario 9

Le pavé source a une longueur de 100 cm, une largeur de 100 cm et une hauteur de 50 cm. Il est constitué de fer. L'écran, constitué de béton, a une épaisseur de 20 cm. De l'air entoure le pavé et l'écran.

### 12.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux modélisés sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- du fer avec une densité de 7.8 ;
- du béton avec une densité de 2.35.

Les compositions massiques de ces matériaux sont présentées en annexe 1.

### 12.1.3 Source

Les photons sont tirés de façon isotrope et uniforme dans tout le pavé source. Pour chacune des énergies d'émission des photons, un calcul MCNP est réalisé. Pour cette configuration, les énergies modélisées de l'yttrium 88 sont les suivantes : 898.04 keV, 1836.07 keV, 2734.09 keV et 3218.43 keV.

### 12.1.4 Accumulateur

Les accumulateurs modélisés sont de type F5 (fluence en un point) multipliés par une carte de conversion du flux en équivalent de dose  $H^*(10)$ . Leurs positions sont représentées sur la figure 8. La distance entre le point de mesure et le bord du pavé source est de 100 cm.

## 12.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

L'activité  $^{88}\text{Y}$  est de 1.0E+12 Bq.

## 12.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 10.

Ecran	Point	$H^*(10)$ (mSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
		MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
Sans écran	1 (sur le côté)	13.7	13.4	13.8	1.8%	0.88%
	2 (au-dessus)	25.6	25.9	26.4	1.2%	3.1%
20 cm béton	1 (sur le côté)	2.60	2.84	2.60	9.4%	0.16%
	2 (au-dessus)	4.24	5.04	4.40	19%	3.7%

Tableau 10 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scénario 9

Selon le tableau 10 :

- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 1 % pour le point 1, et d'environ 3 % pour le point 2 ;
- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont inférieurs à 2 % pour la géométrie sans écran et compris entre 9 et 20 % pour la géométrie avec l'écran de béton ;
- hormis pour la géométrie sans écran avec mesure sur le côté du pavé, les résultats issus de MCNP sont toujours inférieurs à ceux issus de DOSIMEX.

## 13 SCENARIO 10.1 : MODELISATION MULTIRADIONUCLEIDES POUR UN CSD-V

### 13.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 13.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, quatre géométries sont modélisées pour prendre en compte les caractéristiques suivantes :

- présence / absence d'un écran ;
- point de mesure sur le dessus / sur le côté du pavé source.

Les géométries sont présentées sur la figure 9.

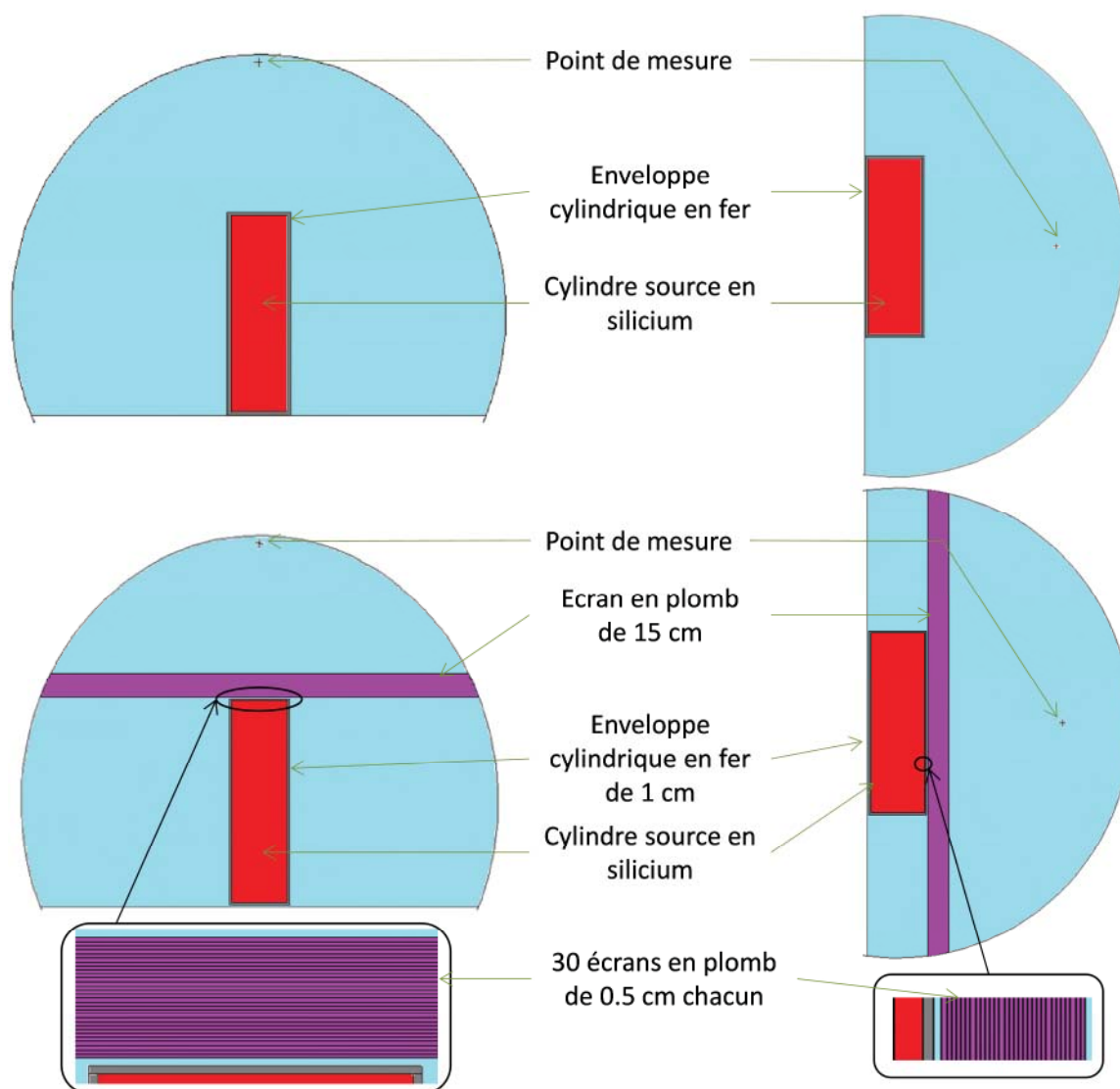


Figure 9 : Géométries modélisées dans MCNP pour le scénario 10.1

Le cylindre source a une hauteur de 130 cm et un rayon de 20 cm. Il est en silicium. Une enveloppe, constituée de fer, entoure le cylindre source sur une épaisseur de 1 cm.

BU-AP	<table><tr><td>Type Doc.</td><td>Activité</td><td>Cat.MT</td><td>N° Ordre</td><td>Révision</td></tr><tr><td>NT</td><td>101682</td><td>42</td><td>0001</td><td>A</td></tr></table>	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	NT	101682	42	0001	A	REF
Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision								
NT	101682	42	0001	A								
INSTN		REF										

L'écran, constitué de plomb, a une épaisseur de 15 cm. Afin d'améliorer la convergence du calcul MCNP (modification des importances), l'écran de 15 cm d'épaisseur est découpé en 30 écrans de 0.5 cm d'épaisseur chacun. De l'air entoure l'écran et l'enveloppe en fer.

### 13.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux modélisés sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- du silicium avec une densité de 2.3 ;
- du fer avec une densité de 7.8 ;
- du plomb avec une densité de 11.34.

Les compositions massiques de ces matériaux sont présentées en annexe 1.

### 13.1.3 Source

Les photons sont tirés de façon isotrope et uniforme depuis le cylindre source. Pour chacune des énergies des photons modélisées, un calcul MCNP est réalisé. Pour cette configuration, les énergies modélisées sont :

- pour  $^{137}\text{Cs}$  : 661.76 keV ;
- pour  $^{134}\text{Cs}$  : 475.36 keV, 563.25 keV, 569.33 keV, 604.72 keV, 795.86 keV, 801.95 keV, 847.00 keV, 1038.61 keV, 1167.97 keV et 1365.19 keV ;
- pour  $^{106}\text{Rh}$  : de 400 keV à 3500 keV par pas de 100 keV.

Etant donné le volume et la densité du cylindre source ainsi que la présence d'un écran, aucune énergie supplémentaire n'est modélisée pour les photons émis.

### 13.1.4 Accumulateur

Les accumulateurs modélisés sont de type F5 (fluence en un point) multipliés par une carte de conversion du flux en équivalent de dose  $H^*(10)$ . Leurs positions sont représentées sur la figure 9. La distance entre le point de mesure et le bord du cylindre source est de 100 cm.

## 13.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

Les activités  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{106}\text{Rh}$  sont respectivement de 2.0E+16 Bq, 5.0E+15 Bq et 2.0E+15 Bq.

### 13.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 11.

Ecran	Pt	H*(10)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
		MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
Sans écran	1 (sur le côté)	436 Sv/h	728 Sv/h	465 Sv/h	67%	6.7%
	2 (au-dessus)	159 Sv/h	233 Sv/h	168 Sv/h	46%	5.4%
15 cm plomb	1 (sur le côté)	1.38 mSv/h	1.49 mSv/h	1.30 mSv/h	8.2%	5.6%
	2 (au-dessus)	0.66 mSv/h	0.65 mSv/h	0.50 mSv/h	1.2%	24%

Tableau 11 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scenario 10.1

Selon le tableau 11 :

- pour la géométrie sans écran :
  - les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 7 % ;
  - les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont d'environ 50 % ;
- pour la géométrie avec écran :
  - les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 25 % ;
  - les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont inférieurs à 10 % ;
- pour ce scénario, les résultats issus de MCNP sont toujours inférieurs à ceux issus de DOSIMEX.

## 14 SCENARIO 10.2 : MODELISATION MULTIRADIONUCLEIDES POUR UN MUR EN BETON

### 14.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION MCNP

#### 14.1.1 Géométrie

Pour ce scénario, quatre géométries sont modélisées pour prendre en compte les caractéristiques suivantes :

- point de mesure sur le dessus / sur le côté du pavé source.
- point de mesure à 1 cm / 100 cm du pavé source.

Les géométries sont présentées sur la figure 10.

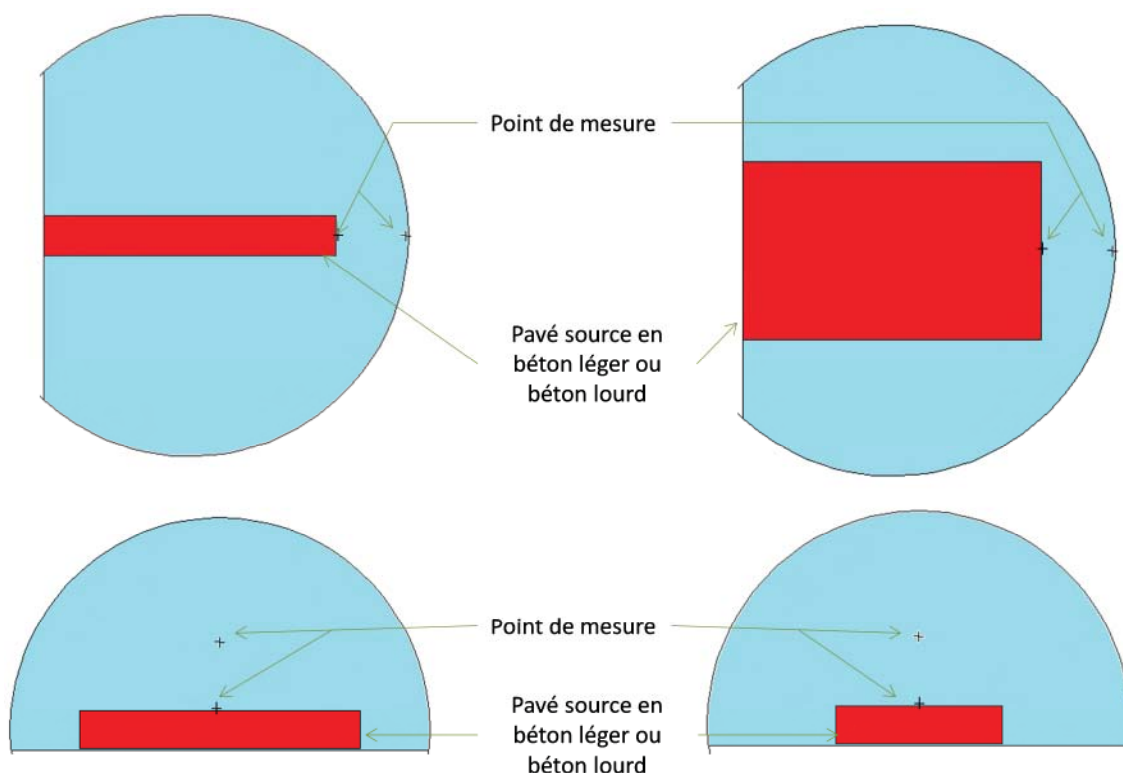


Figure 10 : Géométries modélisées dans MCNP pour le scénario 10.2

Le pavé source a une longueur de 414 cm, une largeur de 244 cm et une épaisseur de 55 cm. Il est en béton. De l'air entoure le pavé source.

#### 14.1.2 Matériaux

Pour cette configuration, les matériaux modélisés sont :

- de l'air avec une densité de 1.22E-03 ;
- du béton dit « léger » avec une densité de 2.3 ;
- du béton dit « lourd » avec une densité de 3.5.

Les compositions massiques de ces matériaux sont présentées en annexe 1.

### 14.1.3 Source

Les photons sont tirés de façon isotrope et uniforme depuis le pavé source. Pour chacune des énergies des photons modélisées, un calcul MCNP est réalisé. Pour cette configuration, les énergies modélisées pour  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  et  $^{133}\text{Ba}$  sont de 30 keV à 3500 keV par pas de 100 keV.

### 14.1.4 Accumulateur

Les accumulateurs modélisés sont de type F5 (fluence en un point) multipliés par une carte de conversion du flux en équivalent de dose  $H^*(10)$ . Leurs positions sont représentées sur la figure 10. Les distances entre le point de mesure et le bord du pavé source sont de 1 cm et 100 cm.

## 14.2 ACTIVITE DE LA SOURCE

Les activités  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  et  $^{133}\text{Ba}$  sont respectivement de  $3.95\text{E}+08$  Bq,  $5.02\text{E}+10$  Bq,  $2.23\text{E}+09$  Bq et  $4.22\text{E}+10$  Bq.

## 14.3 COMPARAISON DES RESULTATS

Les résultats issus des calculs MCNP sont présentés dans le tableau 12.

Matériau	Pt	H*(10) (μSv/h)			ECART  (1)-(2) /(1)	ECART  (1)-(3) /(1)
		MCNP (1)	DOSIMEX (2)	RayXpert (3)		
Béton léger	A1	1589	1720	1493	8.2%	6.0%
	A2	791	841	740	6.4%	6.4%
	B1	1480	1640	1300	11%	12%
	B2	199	210	193	5.4%	3.1%
Béton lourd	A1	1055	1124	923	6.6%	12%
	A2	526	559	480	6.3%	8.8%
	B1	979	1092	1075	12%	10%
	B2	136	142	135	4.4%	0.78%

Tableau 12 : Résultats des calculs et comparaisons pour le scénario 10.2

Selon le tableau 12 :

- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de RayXpert sont inférieurs à 15 % ;
- les écarts entre les résultats issus de MCNP et ceux issus de DOSIMEX sont inférieurs à 15 %.
- quelle que soit la géométrie, les résultats issus de MCNP sont inférieurs à ceux issus de DOSIMEX.

## 15 CONCLUSION

L'objectif de ce document était de :

- réaliser des modélisations MCNP pour 9 scénarios présentés dans la note en référence [2] ;
- comparer les résultats issus des modélisations MCNP avec les résultats issus principalement de DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert et présentés dans la note en référence [2].

Les résultats issus de MERCURAD et de MicroShield et présentés dans la note en référence [2] ont aussi été comparés aux résultats MCNP dans l'annexe 5 de la présente note.

En préambule, les données nucléaires utilisées pour les modélisations MCNP et les formules d'interprétation des résultats MCNP ont été présentées. Puis, pour chaque scénario, la géométrie, les matériaux, les sources, les accumulateurs et les méthodes de biaisage utilisés dans les modélisations MCNP ont été détaillés.

Pour le scénario 1, le débit d'équivalent de dose est déterminé à 10 cm d'un point source. Parmi les 33 radionucléides étudiés, hormis pour  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{133}\text{Xe}$ , les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels sont cohérents entre eux (écarts inférieurs à 16 %). Pour  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  et  $^{241}\text{Am}$ , la présence d'un écran diminue les écarts entre les débits de dose calculés par les différents logiciels.

Pour le scénario 2, les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels à une distance supérieure à 5 cm d'une source ponctuelle  $^{137}\text{Cs}$  sont cohérents entre eux (écarts inférieurs à 5 %). Pour des distances inférieures, les débits d'équivalent de dose déterminés par MicroShield et MERCURAD divergent par rapport à ceux déterminés par les autres logiciels.

Pour le scénario 3, qui simule un point source  $^{241}\text{Am}$  ou  $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{60}\text{Co}$  derrière un écran de 2 cm de plomb ou 10 cm d'aluminium ou 50 cm d'eau ou sans écran, les résultats sont les suivants :

- les débits d'équivalent de dose déterminés par RayXpert sont cohérents avec ceux déterminés par MCNP ;
- pour des écrans en aluminium ou en eau, les débits d'équivalent de dose déterminés par les logiciels déterministes présentent des écarts non négligeables par rapport à ceux déterminés par MCNP ;
- hormis pour  $^{241}\text{Am}$ , sans écran ou pour un écran de 2 cm de plomb, les débits d'équivalent de dose déterminés par les logiciels déterministes sont cohérents avec ceux déterminés par MCNP ;
- pour  $^{241}\text{Am}$ , les débits d'équivalent de dose déterminés par les logiciels déterministes MERCURAD et MicroShield présentent des écarts importants par rapport à ceux déterminés par MCNP, DOSIMEX et RayXpert ; pour information, MCNP et DOSIMEX utilisent la même base de données de désintégration Nucléide-LARA.



BU-AP	<table><tr><td>Type Doc.</td><td>Activité</td><td>Cat.MT</td><td>N° Ordre</td><td>Révision</td></tr><tr><td>NT</td><td>101682</td><td>42</td><td>0001</td><td>A</td></tr></table>	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	NT	101682	42	0001	A	REF
Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision								
NT	101682	42	0001	A								
INSTN		REF										

Pour le scénario 5, les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels à 100 cm d'une source fil, disque ou cylindrique en aluminium contaminée par  $^{241}\text{Am}$  ou  $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{60}\text{Co}$  sont cohérents entre eux. Seuls les résultats MicroShield et MERCURAD pour les sources fil et disque en  $^{241}\text{Am}$  diffèrent de plus d'un facteur 2 par rapport aux autres logiciels. Cependant, comme pour le scénario 3, MCNP et DOSIMEX utilisent la même base de données de désintégration Nucléide-LARA.

Pour le scénario 6, les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels à 100 cm d'une source cylindrique en aluminium uniformément contaminée par  $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{60}\text{Co}$  derrière un écran de 2 cm de plomb ou de 15 cm d'eau sont cohérents entre eux. Seuls les résultats déterminés par MicroShield derrière un écran de 2 cm de plomb sont supérieurs de plus d'un facteur 2 par rapport à ceux des autres logiciels.

Pour le scénario 7, les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels à 100 cm d'une source sphérique composée de matériaux variés et uniformément contaminée par  $^{60}\text{Co}$  sont cohérents entre eux.

Pour le scénario 8, pour un cylindre en plomb ne dépassant pas 10 cm d'épaisseur, les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels à 100 cm du cylindre uniformément contaminé par  $^{241}\text{Am}$  sont cohérents entre eux (écarts inférieurs à 30 %).

Pour le scénario 9, les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels à 100 cm d'une source parallélépipédique en fer contaminée uniformément par  $^{88}\text{Y}$  derrière un écran de 20 cm de béton ou sans écran sont cohérents entre eux (écarts inférieurs à 20 %).

Pour le scénario 10.1, les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels à 100 cm d'un CSD-V sans écran ou derrière un écran de 15 cm de plomb sont cohérents entre eux. Pour le cas sans écran, DOSIMEX surestime d'environ 50 % le débit d'équivalent de dose par rapport à RayXpert et MCNP.

Pour le scénario 10.2, les débits d'équivalent de dose déterminés par les différents logiciels au contact ou à 100 cm d'un mur de béton uniformément contaminé en  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  et  $^{133}\text{Ba}$  sont cohérents entre eux (écarts inférieurs à 15 %).

## 16 ANNEXES

### 16.1 ANNEXE 1 : COMPOSITIONS MASSIQUES DES MATERIAUX MODELISES DANS MCNP

Pour l'ensemble des neuf configurations modélisées, les compositions massiques des matériaux multiéléments sont présentées dans les tableaux ci-après.

Matériau	Air
Composition	Pourcentage massique (%)
Azote	80.000
Oxygène	20.000
TOTAL	100.000

Tableau 13 : Composition massique de l'air

Matériau	Eau
Composition	Pourcentage massique (%)
Hydrogène	11.111
Oxygène	88.889
TOTAL	100.000

Tableau 14 : Composition massique de l'eau

Matériau	Béton
Composition	Pourcentage massique (%)
Hydrogène	0.56
Oxygène	49.83
Sodium	1.71
Magnésium	0.24
Aluminium	4.56
Silicium	31.58
Soufre	0.12
Potassium	1.92
Calcium	8.26
Fer	1.22
TOTAL	100.00

Tableau 15 : Composition massique du béton

BU-AP	<table><tr><td>Type Doc.</td><td>Activité</td><td>Cat.MT</td><td>N° Ordre</td><td>Révision</td></tr><tr><td>NT</td><td>101682</td><td>42</td><td>0001</td><td>A</td></tr></table>	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	NT	101682	42	0001	A	REF
Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision								
NT	101682	42	0001	A								
INSTN		REF										

Les autres matériaux modélisés dans cette étude ne sont composés que d'un seul élément :

- béryllium ;
- carbone ;
- sodium ;
- aluminium ;
- silicium ;
- fer ;
- étain ;
- tungstène ;
- plomb ;
- uranium.

## 16.2 ANNEXE 2 : ENERGIES ET INTENSITES D'EMISSIONS DES RADIONUCLEIDES ETUDIES SELON LA BASE NUCLEIDE-LARA

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
<b>Ag110m</b>	
21.99	1.98E-03
22.16	3.72E-03
22.98	1.54E-03
23.17	2.88E-03
25.00	1.04E-03
25.48	1.79E-04
26.15	8.05E-04
26.67	1.47E-04
116.49	8.03E-05
120.23	1.70E-04
133.33	7.36E-04
219.35	7.25E-04
221.08	6.81E-04
229.42	1.19E-04
264.26	6.06E-05
266.91	4.14E-04
341.32	2.25E-05
356.43	4.25E-05
360.24	8.50E-05
365.45	9.25E-04
387.07	5.19E-04
396.90	3.74E-04
409.45	1.26E-04
446.81	3.66E-02
467.03	2.49E-04
493.43	9.51E-05
544.56	1.83E-04
572.82	1.73E-04
603.08	1.18E-04
620.36	2.73E-02
626.26	2.14E-03
630.63	3.35E-04
647.84	1.85E-04
657.76	9.44E-01
666.65	2.81E-04
676.58	1.41E-03
677.62	1.06E-01
687.01	6.45E-02
706.68	1.65E-01
708.13	2.35E-03
714.91	9.22E-05
744.28	4.71E-02
763.94	2.23E-01
774.71	6.30E-05

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
818.02	7.33E-02
884.68	7.40E-01
937.49	3.45E-01
957.35	9.32E-05
997.24	1.28E-03
1018.96	1.42E-04
1050.55	7.61E-05
1085.45	7.24E-04
1117.46	4.89E-04
1125.70	3.04E-04
1163.15	7.42E-04
1164.95	4.33E-04
1186.71	1.61E-05
1251.04	2.63E-04
1300.05	1.90E-04
1334.33	1.42E-03
1384.29	2.48E-01
1420.08	2.64E-04
1465.61	1.82E-05
1475.78	4.04E-02
1505.03	1.32E-01
1562.29	1.21E-02
1572.42	1.13E-05
1592.80	2.08E-04
1629.75	4.05E-05
1698.82	1.73E-05
1775.41	6.53E-05
1783.46	1.02E-04
1903.52	1.60E-04
2004.65	1.24E-05
<b>N16</b>	
787.26	2.20E-08
867.71	2.10E-06
986.93	3.48E-05
1067.51	1.52E-07
1755.06	1.22E-03
1954.78	3.86E-04
2741.56	8.24E-03
2822.21	1.34E-03
6128.63	6.71E-01
6915.56	3.86E-04
7115.15	4.94E-02
8869.35	7.69E-04

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
<b>Y88</b>	
1.89	2.77E-02
14.10	1.76E-01
14.17	3.37E-01
15.88	8.32E-02
16.09	1.08E-02
484.35	9.90E-06
511.00	4.63E-03
850.64	4.82E-04
898.04	9.37E-01
1382.39	1.63E-04
1836.07	9.93E-01
2734.09	6.08E-03
3218.43	7.12E-05
<b>Co60</b>	
0.84	2.00E-06
7.46	3.34E-05
7.48	6.53E-05
8.30	1.37E-05
347.15	7.54E-05
826.10	7.68E-05
1173.23	9.99E-01
1332.49	1.00E+00
2158.57	1.22E-05
2505.69	2.04E-08
<b>La140</b>	
5.31	3.44E-03
24.60	6.89E-06
34.28	5.92E-03
34.72	1.08E-02
39.33	3.27E-03
40.29	8.28E-04
64.13	1.42E-04
68.92	7.72E-04
109.42	2.18E-03
131.12	4.71E-03
173.55	1.27E-03
241.96	4.36E-03
266.55	4.93E-03
307.08	2.25E-04
328.76	2.08E-01
397.67	7.53E-04
432.51	3.00E-02
438.18	1.71E-04
444.57	3.10E-05

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
487.02	4.62E-01
618.12	4.13E-04
751.65	4.40E-02
815.78	2.37E-01
867.84	5.59E-02
919.53	2.73E-02
925.20	7.05E-02
950.99	5.32E-03
992.64	1.03E-04
1045.03	2.04E-04
1097.59	2.35E-04
1303.35	4.56E-04
1404.67	6.28E-04
1596.20	9.54E-01
1877.33	4.16E-04
1924.52	1.13E-04
2083.22	3.67E-04
2347.85	8.45E-03
2464.03	9.71E-05
2521.39	3.42E-02
2547.18	1.02E-03
2899.54	6.61E-04
3118.49	2.61E-04
3319.52	3.93E-05
<b>Sb124</b>	
4.08	4.50E-04
27.20	1.25E-03
27.47	2.33E-03
31.06	6.67E-04
31.76	1.46E-04
148.03	3.76E-05
159.87	4.96E-05
189.57	4.35E-05
210.40	5.37E-05
254.42	1.43E-04
291.79	6.97E-05
335.80	7.26E-04
370.27	2.86E-04
399.97	1.26E-03
444.00	1.95E-03
468.84	4.59E-04
481.36	2.32E-04
525.36	1.45E-03
530.47	3.69E-04
572.02	1.77E-04

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
602.73	9.78E-01
632.40	1.03E-03
645.85	7.42E-02
662.33	2.41E-04
709.33	1.36E-02
713.78	2.27E-02
722.78	1.07E-01
735.78	1.31E-03
766.17	1.04E-04
775.28	9.84E-05
790.71	7.42E-03
817.15	7.44E-04
856.87	2.28E-04
899.32	1.80E-04
968.20	1.89E-02
976.25	8.33E-04
997.83	3.32E-05
1045.13	1.85E-02
1053.93	5.31E-05
1086.68	3.68E-04
1235.10	7.33E-05
1263.46	4.22E-04
1301.15	3.64E-04
1325.50	1.59E-02
1355.20	1.04E-02
1368.16	2.62E-02
1376.10	5.00E-03
1385.49	6.26E-04
1436.55	1.23E-02
1445.09	3.35E-03
1488.94	6.77E-03
1526.48	4.15E-03
1565.98	1.09E-04
1579.65	4.13E-03
1622.10	4.16E-04
1690.97	4.75E-01
1720.67	9.47E-04
1852.23	3.09E-05
1918.75	5.30E-04
2016.35	9.88E-05
2039.27	6.32E-04
2079.75	2.24E-04
2090.93	5.49E-02
2098.88	4.71E-04
2108.27	4.44E-04

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
2172.32	2.92E-05
2182.37	4.15E-04
2283.63	5.95E-05
2293.69	3.27E-04
2323.39	2.56E-05
2454.94	1.60E-05
2682.47	1.77E-05
2693.65	3.21E-05
2807.52	1.25E-05
<b>Cs134</b>	
4.88	1.06E-03
31.82	2.38E-03
32.19	4.39E-03
36.45	1.29E-03
37.33	3.26E-04
242.77	2.41E-04
326.59	1.71E-04
475.37	1.48E-02
563.25	8.34E-02
569.33	1.54E-01
604.72	9.76E-01
795.86	8.55E-01
801.95	8.69E-02
847.00	3.10E-06
1038.61	9.91E-03
1167.97	1.79E-02
1365.19	3.02E-02
<b>Nb94</b>	
702.62	9.79E-01
871.09	9.99E-01
<b>Fe59</b>	
0.77	5.32E-06
6.92	5.96E-05
6.93	1.17E-04
7.68	2.43E-05
142.65	9.78E-03
192.35	2.92E-02
335.00	2.60E-03
382.46	2.15E-04
511.00	1.16E-05
1099.25	5.65E-01
1291.59	4.32E-01
1481.70	5.96E-04
<b>F18</b>	
0.53	7.20E-05
0.53	1.34E-04
511.00	1.94E+00

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
<b>Co58</b>	
0.73	6.09E-03
6.39	7.98E-02
6.40	1.56E-01
7.08	3.24E-02
511.00	2.99E-01
810.76	9.94E-01
863.96	7.00E-03
1674.71	5.28E-03
<b>Ir192</b>	
10.37	1.53E-02
11.60	3.97E-02
61.49	1.21E-02
63.00	2.10E-02
65.12	2.67E-02
66.83	4.56E-02
71.45	7.10E-03
73.58	1.81E-03
75.78	1.58E-02
78.06	4.11E-03
110.43	1.22E-04
136.34	1.99E-03
176.98	4.31E-05
201.31	4.74E-03
205.79	3.34E-02
280.27	9.50E-05
283.27	2.66E-03
295.96	2.87E-01
308.46	2.97E-01
316.51	8.28E-01
329.17	1.74E-04
374.49	7.27E-03
416.47	6.69E-03
420.53	6.97E-04
468.07	4.78E-01
484.58	3.19E-02
489.06	4.38E-03
588.58	4.52E-02
593.49	4.21E-04
599.41	3.92E-05
604.41	8.20E-02
612.46	5.35E-02
765.83	1.36E-05
884.54	2.92E-03
1061.48	5.31E-04
1089.93	1.22E-05
1378.20	1.23E-05
0.60	6.51E-03

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
<b>Mn54</b>	
5.41	7.65E-02
5.41	1.50E-01
5.97	3.06E-02
511.00	1.14E-08
834.85	1.00E+00
<b>Cs137</b>	
4.88	9.05E-03
31.82	1.95E-02
32.19	3.60E-02
36.45	1.06E-02
37.33	2.67E-03
283.51	5.88E-06
661.66	8.50E-01
<b>Ba133</b>	
4.67	1.59E-01
30.63	3.38E-01
30.97	6.25E-01
35.05	1.82E-01
35.90	4.45E-02
53.16	2.15E-02
79.61	2.63E-02
81.00	3.33E-01
160.61	6.39E-03
223.24	4.51E-03
276.40	7.14E-02
302.85	1.83E-01
356.01	6.21E-01
383.85	8.95E-02
<b>In111</b>	
3.36	6.78E-02
22.98	2.37E-01
23.17	4.45E-01
26.15	1.24E-01
26.68	2.27E-02
150.81	1.52E-05
171.28	9.06E-01
245.35	9.41E-01
<b>Zn65</b>	
0.92	1.31E-02
8.03	1.18E-01
8.05	2.29E-01
8.94	4.83E-02
344.95	2.54E-05
511.00	2.84E-02
770.65	2.69E-05
1115.54	5.02E-01

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
<b>Se75</b>	
1.33	1.94E-02
10.51	1.66E-01
10.54	3.19E-01
11.76	7.30E-02
11.86	2.76E-03
14.88	2.07E-04
24.38	2.76E-04
66.05	1.09E-02
80.94	9.55E-05
96.73	3.36E-02
121.12	1.69E-01
136.00	5.77E-01
198.61	1.47E-02
249.33	3.94E-05
264.66	5.88E-01
279.54	2.49E-01
303.92	1.31E-02
373.61	2.56E-05
400.66	1.14E-01
419.14	1.22E-04
468.64	3.65E-06
542.02	4.36E-06
557.89	2.76E-05
572.22	3.62E-04
617.84	4.54E-05
821.56	1.35E-06
<b>I131</b>	
4.47	6.31E-03
29.46	1.52E-02
29.78	2.82E-02
33.69	8.16E-03
34.49	1.94E-03
80.19	2.61E-02
85.92	5.17E-05
163.93	2.11E-04
177.21	2.78E-03
232.18	2.39E-05
272.50	5.81E-04
284.31	6.15E-02
295.82	1.26E-05
302.42	4.67E-05
318.09	8.07E-04
324.65	2.44E-04
325.79	2.75E-03
358.42	1.78E-04
364.49	8.13E-01
404.81	5.52E-04
503.00	3.54E-03

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
636.99	7.13E-02
642.72	2.18E-03
722.91	1.79E-02
<b>I125</b>	
4.08	1.47E-01
27.20	3.94E-01
27.47	7.33E-01
31.06	2.09E-01
31.76	4.54E-02
35.49	6.64E-02
<b>Rh106</b>	
3.03	7.85E-05
21.02	3.11E-04
21.18	5.87E-04
23.87	1.61E-04
24.32	2.73E-05
428.50	7.04E-04
434.23	2.04E-04
439.24	1.11E-04
511.85	2.05E-01
578.43	9.06E-05
616.16	7.31E-03
621.90	9.87E-02
680.24	1.04E-04
684.81	5.52E-05
702.81	2.92E-06
715.87	9.94E-05
717.44	6.74E-05
751.26	1.21E-05
873.47	4.36E-03
942.64	6.02E-06
1045.82	1.31E-04
1050.39	1.49E-02
1062.15	3.04E-04
1108.72	5.63E-05
1114.46	1.17E-04
1128.01	3.99E-03
1150.09	2.87E-05
1159.90	2.31E-06
1180.80	1.44E-04
1194.59	5.74E-04
1209.80	3.98E-06
1258.72	6.68E-06
1266.04	1.09E-05
1305.34	1.09E-05
1315.67	3.05E-05
1355.61	6.03E-06
1360.18	1.84E-05
1372.29	1.99E-05

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
1397.51	2.77E-05
1489.62	1.83E-05
1496.38	2.40E-04
1498.73	6.84E-05
1562.24	1.57E-03
1572.47	1.85E-05
1577.28	1.05E-05
1687.21	5.52E-06
1693.23	8.21E-06
1730.44	2.09E-05
1766.25	3.05E-04
1774.44	9.48E-06
1784.09	4.31E-06
1796.96	2.75E-04
1854.89	1.25E-05
1909.28	1.07E-05
1927.24	1.47E-04
1954.94	2.04E-06
1973.48	1.74E-06
1988.45	2.59E-04
2093.33	2.96E-06
2112.53	3.52E-04
2185.75	2.56E-06
2193.17	4.95E-05
2242.46	1.96E-05
2271.86	1.18E-05
2309.10	5.75E-05
2316.42	6.22E-05
2366.05	2.33E-04
2390.61	6.59E-05
2405.99	1.45E-04
2439.08	4.64E-05
2456.79	2.24E-06
2484.63	7.61E-06
2525.43	1.13E-06
2542.79	2.90E-05
2571.16	1.34E-05
2651.39	6.84E-06
2705.27	2.48E-05
2709.48	3.73E-05
2740.14	2.14E-06
2788.25	8.22E-07
2809.13	6.24E-06
2821.23	1.20E-05
2865.10	1.48E-07
2902.65	6.62E-07
2917.63	9.44E-06
3037.33	1.05E-05
3055.03	3.64E-06

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
3164.61	2.31E-07
3249.85	8.62E-07
3273.47	4.91E-07
3375.91	1.13E-07
3401.89	1.25E-07
<b>U235</b>	
15.31	4.02E-01
19.59	6.60E-05
31.61	1.76E-04
41.43	2.91E-04
42.02	5.69E-04
51.21	3.47E-04
54.11	1.15E-05
54.26	2.85E-04
64.46	1.80E-04
72.72	1.16E-03
74.94	5.16E-04
89.95	3.57E-02
93.35	5.75E-02
96.09	9.11E-04
974.00	1.64E-04
105.55	2.06E-02
108.97	6.90E-03
109.20	1.66E-02
115.46	3.10E-04
120.36	2.60E-04
136.56	1.20E-04
140.76	2.01E-03
142.41	5.10E-05
143.77	1.09E-01
150.94	9.30E-04
163.36	5.08E-02
173.10	6.50E-05
182.63	3.95E-03
185.72	5.70E-01
194.94	6.31E-03
198.89	3.62E-04
202.12	1.08E-02
205.32	5.02E-02
215.28	2.93E-04
221.39	1.19E-03
228.77	7.40E-05
233.50	3.84E-04
240.88	7.44E-04
246.83	5.53E-04
255.37	7.40E-05
266.47	7.86E-05
275.35	5.16E-04
275.50	3.20E-04

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
281.43	6.30E-05
282.95	6.30E-05
289.56	7.40E-05
291.65	4.06E-04
301.71	5.30E-05
310.70	9.40E-05
317.11	1.10E-05
343.52	3.20E-05
345.92	4.06E-04
350.50	6.00E-05
356.04	5.30E-05
387.84	4.06E-04
390.27	4.01E-04
410.29	3.20E-05
448.41	1.10E-05
<b>Mo99</b>	
2.17	7.00E-11
2.48	6.97E-03
18.25	3.20E-02
18.37	6.06E-02
20.67	1.62E-02
21.02	2.54E-03
40.58	1.02E-02
140.51	8.96E-01
142.68	2.11E-04
158.78	1.46E-04
162.37	1.15E-04
181.07	6.01E-02
242.30	1.43E-05
249.03	3.54E-05
366.42	1.19E-02
380.14	9.15E-05
391.74	2.56E-05
410.27	1.64E-05
411.49	1.61E-04
457.60	7.46E-05
469.64	2.75E-05
528.79	5.41E-04
537.79	1.55E-05
580.52	3.64E-05
581.30	1.05E-06
620.04	2.46E-05
621.77	2.62E-04
689.69	4.22E-06
739.50	1.21E-01
761.78	2.31E-05
777.92	4.29E-02
822.97	1.32E-03
861.29	7.20E-06

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
960.75	9.53E-04
986.44	1.41E-05
1001.34	4.34E-05
1017.05	7.20E-06
1056.21	1.04E-05
1072.24	1.25E-05
<b>Tc99m</b>	
2.17	7.42E-11
2.57	4.82E-03
18.25	2.23E-02
18.37	4.21E-02
20.67	1.12E-02
21.02	1.78E-03
89.63	1.04E-05
140.51	8.85E-01
142.68	2.32E-04
232.72	8.42E-08
322.41	9.66E-07
<b>Bi212</b>	
11.85	7.13E-02
12.94	5.63E-04
39.86	1.07E-02
70.83	5.25E-04
72.87	8.94E-04
76.86	3.89E-04
79.29	6.47E-04
82.60	3.01E-04
85.14	8.95E-05
89.81	2.24E-04
92.62	6.93E-05
164.81	5.56E-05
180.22	3.11E-05
288.19	3.22E-03
328.05	1.21E-03
433.54	1.11E-04
452.98	3.43E-03
473.44	4.43E-04
492.84	3.91E-04
580.53	1.12E-05
620.43	3.84E-05
727.33	6.65E-02
785.38	1.11E-02
893.41	3.81E-03
952.12	1.44E-03
1073.62	1.55E-04
1078.63	5.52E-03
1512.71	2.91E-03
1620.74	1.51E-02

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
1679.45	7.10E-04
1805.96	1.23E-03
<b>Xe133</b>	
4.67	5.79E-02
30.63	1.35E-01
30.97	2.51E-01
35.05	7.31E-02
35.90	1.79E-02
79.61	2.83E-03
81.00	3.70E-01
160.61	6.88E-04
223.24	1.76E-06
302.85	5.88E-05
383.85	2.84E-05
<b>Am241</b>	
11.89	8.45E-03
13.85	1.30E-01
15.88	3.84E-03
16.96	1.86E-01
21.16	4.83E-02
26.34	2.32E-02
32.18	1.74E-04
33.20	1.22E-03
42.70	5.51E-05
43.42	6.69E-04
51.01	2.61E-07
55.56	1.81E-04
57.86	5.22E-05
59.54	3.59E-01
64.83	1.42E-06
67.50	4.21E-06
69.76	2.94E-05
75.90	6.00E-06
96.79	4.72E-07
97.07	1.13E-05
98.97	2.03E-04
101.06	1.82E-05
102.98	1.95E-04
106.43	1.50E-07
109.71	4.90E-08
114.15	6.58E-06
117.92	2.27E-06
120.37	4.50E-08
123.05	1.00E-05
125.30	4.12E-05
139.45	5.31E-08
146.55	4.61E-06
150.04	7.35E-07
154.27	5.00E-09

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
159.26	1.45E-08
161.54	1.50E-08
164.61	6.63E-07
165.82	2.31E-07
169.56	1.71E-06
175.07	1.83E-07
190.40	2.25E-08
191.96	2.15E-07
196.77	4.90E-09
201.70	8.00E-09
204.07	2.07E-08
208.01	7.87E-06
221.46	4.35E-07
232.82	4.83E-08
234.40	8.78E-09
246.73	2.45E-08
248.52	1.46E-08
261.01	1.30E-08
264.88	9.43E-08
267.54	2.69E-07
270.63	5.20E-09
271.54	1.45E-08
275.78	6.32E-08
278.04	1.15E-08
291.32	3.06E-08
292.78	1.42E-07
304.21	9.32E-09
309.13	2.03E-08
322.56	1.51E-06
324.69	1.83E-08
329.69	1.12E-08
332.35	1.50E-06
335.37	4.97E-06
337.72	4.89E-08
350.71	1.40E-08
358.25	1.30E-08
368.62	2.15E-06
370.94	5.21E-07
374.83	3.14E-08
376.65	1.37E-06
383.81	2.82E-07
389.03	4.90E-09
390.62	5.73E-08
400.78	1.43E-09
406.35	1.38E-08
411.27	1.84E-09
419.33	2.84E-07
426.47	3.16E-07
429.91	1.10E-08

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
440.63	5.63E-09
442.82	3.32E-08
446.16	1.12E-09
452.62	2.37E-08
454.67	9.53E-08
459.68	3.56E-08
462.35	1.00E-08
468.12	2.70E-08
486.05	1.06E-08
487.13	6.25E-09
494.39	1.02E-09
501.39	1.42E-09
512.53	2.14E-08
514.05	3.82E-08
522.06	9.95E-09
525.14	1.63E-09
529.17	6.95E-09
532.44	8.20E-10
546.13	2.53E-09
548.15	5.20E-10
555.25	9.20E-10
563.46	4.42E-09
573.94	1.29E-08
582.89	1.02E-08
586.59	1.25E-08
590.09	2.81E-08
597.19	7.29E-08
600.26	2.23E-09
619.01	6.02E-07
627.18	5.12E-09
632.93	1.25E-08
636.90	2.13E-09
641.32	7.04E-08
652.73	3.77E-07
662.40	3.68E-06
666.22	9.57E-09
669.83	5.17E-09
675.78	8.55E-09
679.79	3.32E-08
688.72	3.24E-07
693.46	3.55E-08
696.14	5.18E-08
709.43	6.41E-08
712.50	2.03E-09
721.96	1.97E-06
729.72	1.38E-08
731.44	4.64E-09
736.68	1.29E-08
737.35	7.94E-08

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
740.51	1.93E-09
742.93	3.50E-09
745.02	9.20E-10
750.39	6.20E-10
755.68	7.84E-08
759.51	1.82E-08
763.31	2.32E-09
766.62	5.02E-08
770.57	4.82E-08
772.57	2.79E-08
774.67	1.12E-09
777.39	1.52E-09
780.53	3.12E-09
782.25	1.50E-09
786.00	6.20E-09
789.03	4.26E-09
792.60	3.10E-10
794.92	9.40E-09
801.94	1.24E-08
803.19	1.63E-09
805.77	3.10E-09
811.93	6.36E-09
819.33	4.36E-09
822.21	2.46E-09
828.60	2.14E-09
835.21	3.10E-10
838.88	4.10E-10
841.14	1.03E-09
843.70	9.78E-09
846.86	1.63E-09
847.45	2.73E-09
851.61	4.16E-09
854.95	2.34E-09
856.26	1.03E-09
861.34	8.30E-10
861.80	6.16E-09
870.63	1.50E-08
882.00	4.10E-10
886.53	1.53E-09
887.68	3.36E-09
890.38	3.25E-09
894.47	3.10E-10
898.17	6.20E-10
902.61	3.33E-09
909.95	5.10E-10
912.40	2.83E-09
920.88	1.93E-09
928.95	9.20E-10
939.20	5.10E-10

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
946.06	1.02E-10
952.72	3.10E-10
955.91	6.05E-09
962.19	4.10E-10
969.09	3.10E-10
980.84	3.10E-10
1014.33	1.02E-08
<b>Cr51</b>	
0.54	5.61E-03
4.94	6.79E-02
4.95	1.34E-01
5.45	2.70E-02
320.08	9.89E-02
<b>Pu238</b>	
16.17	1.06E-01
41.82	3.02E-11
43.50	3.98E-04
62.70	1.13E-10
94.67	1.06E-06
98.44	1.70E-06
99.85	7.36E-05
111.23	6.09E-07
114.93	2.09E-07
140.15	3.57E-11
152.72	9.31E-06
192.92	6.62E-12
200.97	3.92E-08
203.12	8.52E-11
235.93	9.50E-11
258.23	7.01E-10
299.12	4.43E-10
705.91	5.01E-10
708.32	4.93E-09
727.82	2.73E-11
742.81	5.10E-08
766.38	2.20E-07
783.41	2.23E-10
786.27	3.21E-08
804.43	1.15E-09
805.81	5.62E-10
808.21	7.67E-09
851.71	1.27E-08
880.51	1.54E-09
883.24	7.24E-09
904.37	6.11E-10
926.72	5.58E-09
941.94	4.66E-09
946.00	9.21E-10
980.31	4.20E-10

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
1001.03	9.84E-09
1041.72	1.97E-09
1085.42	7.79E-10
<b>Ra226</b>	
13.70	8.07E-03
81.07	1.92E-03
83.78	3.18E-03
94.85	1.10E-03
97.90	3.51E-04
186.21	3.56E-02
262.28	5.52E-05
414.61	3.00E-06
449.37	2.00E-06
600.67	5.00E-06
<b>Pu239</b>	
0.08	1.00E-10
12.98	3.42E-04
14.22	5.54E-05
16.17	4.67E-02
30.04	2.20E-06
38.66	1.05E-04
40.42	1.63E-06
41.94	1.64E-06
46.22	7.26E-06
46.68	5.06E-07
47.60	6.25E-07
51.62	2.69E-04
54.04	1.94E-06
56.83	1.14E-05
65.71	4.73E-07
67.67	1.59E-06
68.70	3.61E-06
68.73	1.36E-06
74.96	3.86E-07
77.59	3.81E-06
78.43	1.53E-06
89.40	2.00E-08
89.64	2.72E-07
94.67	4.18E-05
96.14	3.79E-07
97.63	9.60E-07
98.44	6.62E-05
98.78	1.35E-05
103.06	2.18E-06
111.23	2.39E-05
114.93	1.32E-05
115.39	4.65E-06
116.26	5.81E-06
119.70	2.13E-07



Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
119.76	9.20E-08
122.35	9.51E-09
123.23	1.64E-11
123.63	2.38E-07
124.51	6.81E-07
125.21	5.63E-07
129.30	6.31E-05
141.66	3.21E-07
143.35	1.75E-07
144.20	2.86E-06
146.09	1.21E-06
158.13	1.01E-08
160.20	6.21E-08
161.45	1.23E-06
167.82	3.08E-08
171.39	1.10E-06
172.56	3.00E-11
173.71	3.18E-08
179.22	6.56E-07
184.56	2.16E-08
188.23	1.10E-07
189.36	8.20E-07
193.13	9.09E-08
195.68	1.06E-06
196.88	3.74E-08
203.55	5.64E-06
218.05	1.21E-08
225.42	1.50E-07
237.77	1.46E-07
242.08	7.45E-08
243.38	2.55E-07
244.93	5.15E-08
248.96	7.06E-08
255.38	7.95E-07
263.95	2.59E-07
265.73	1.64E-08
281.22	2.13E-08
285.32	1.94E-08
297.46	4.92E-07
302.88	4.94E-08
307.86	5.24E-08
311.78	2.58E-07
316.41	1.34E-07
319.68	4.95E-08
320.86	5.40E-07
323.84	5.30E-07
332.85	4.89E-06
336.11	1.11E-06
341.51	6.50E-07

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
345.00	5.00E-07
345.01	5.49E-06
350.83	1.84E-08
354.05	7.63E-09
361.90	1.18E-07
367.07	8.71E-07
368.55	8.77E-07
375.05	1.54E-05
380.19	3.02E-06
382.76	2.56E-06
392.53	1.21E-06
393.14	4.19E-06
399.54	6.12E-08
406.82	2.97E-08
411.23	6.93E-08
412.50	1.80E-10
413.71	1.46E-05
422.60	1.20E-06
426.68	2.40E-07
428.43	1.01E-08
430.08	4.29E-08
445.72	8.77E-08
446.82	8.51E-09
451.48	1.87E-06
457.62	1.51E-08
461.26	2.30E-08
463.93	2.83E-09
473.95	6.30E-10
481.66	4.61E-08
487.06	2.65E-09
493.09	8.83E-09
497.05	4.43E-10
526.44	5.72E-10
538.82	3.09E-09
550.52	4.35E-09
557.35	3.82E-10
579.43	8.82E-10
582.89	6.18E-09
586.33	1.53E-09
596.05	3.91E-10
598.00	1.75E-08
599.62	2.02E-09
606.92	1.21E-09
608.92	1.17E-09
612.83	9.55E-09
617.11	1.36E-08
618.29	2.07E-08
619.22	1.22E-08
624.78	2.20E-10

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
624.79	4.60E-09
633.16	2.56E-08
637.74	6.46E-09
637.81	1.92E-08
639.99	8.46E-08
645.94	1.49E-07
649.33	7.25E-09
650.54	2.74E-09
652.05	6.63E-08
654.89	2.28E-08
658.87	9.59E-08
664.59	1.67E-08
668.25	4.01E-10
670.85	9.30E-11
670.99	9.30E-11
674.05	5.02E-09
674.45	1.01E-09
685.97	1.27E-08
688.13	1.12E-09
690.82	5.95E-09
693.25	3.21E-10
693.81	1.97E-10
697.85	7.42E-10
699.65	8.02E-10
701.12	5.24E-09
703.69	4.10E-08
712.97	5.26E-10
714.71	7.98E-10
718.05	2.77E-08
720.35	2.95E-10
720.55	2.02E-10
727.92	1.26E-09
736.55	3.09E-10
742.75	3.81E-10
747.45	8.12E-10
756.24	2.85E-08
756.44	6.92E-09
762.62	1.00E-10
763.60	2.20E-10
766.47	1.32E-09
767.29	1.43E-09
769.16	5.11E-08
769.45	6.81E-08
777.13	2.87E-10
779.43	1.38E-09
786.92	8.79E-10
788.53	3.57E-10
792.69	2.04E-10
796.93	1.53E-10

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
803.22	6.45E-10
805.66	2.84E-10
808.21	1.23E-09
813.72	4.55E-10
816.02	2.54E-10
821.25	5.01E-10
821.32	6.00E-11
826.83	1.86E-10
828.92	1.35E-09
832.22	3.04E-10
837.32	2.04E-10
840.42	4.95E-10
843.78	1.36E-09
879.23	3.64E-10
891.03	7.58E-10
895.43	7.63E-11
898.13	1.84E-10
905.53	7.63E-11
911.73	1.43E-10
918.73	8.83E-11
931.93	1.34E-10
940.33	5.05E-10
955.41	3.13E-10
957.63	3.23E-10
968.37	2.80E-10
979.73	2.85E-10
982.73	1.07E-10
986.90	2.15E-10
992.64	2.74E-10
1005.73	1.77E-10
1009.43	1.39E-10
1057.32	4.57E-10
<b>Kr85</b>	
13.34	5.40E-06
13.40	1.04E-05
15.00	2.54E-06
15.20	2.94E-07
151.18	2.21E-08
362.81	2.18E-08
514.00	4.35E-03
<b>Eu152</b>	
39.52	2.08E-01
40.12	3.78E-01
42.31	2.44E-03
43.00	4.37E-03
45.48	1.18E-01
46.70	3.05E-02
48.77	1.38E-03

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
50.09	3.63E-04
121.78	2.84E-01
125.69	1.96E-04
148.01	3.55E-04
192.64	6.82E-05
207.63	5.94E-05
209.41	5.55E-05
212.57	1.97E-04
237.32	2.58E-05
239.42	8.30E-05
244.70	7.55E-02
251.63	6.71E-04
269.87	6.02E-05
271.13	7.83E-04
275.45	3.23E-04
285.98	1.01E-04
295.94	4.42E-03
315.17	4.96E-04
316.22	3.11E-05
320.03	1.76E-05
324.83	7.38E-04
329.43	1.30E-03
330.54	6.02E-05
340.40	3.13E-04
344.28	2.66E-01
351.66	1.40E-04
357.27	4.05E-05
367.79	8.63E-03
379.38	8.32E-06
385.69	5.06E-05
387.91	2.96E-05
391.32	1.25E-05
406.74	8.32E-06
411.12	2.24E-02
416.05	1.09E-03
423.45	3.25E-05
440.86	1.33E-04
443.97	3.12E-02
482.31	2.79E-04
482.31	1.40E-05
488.68	4.14E-03
493.51	2.78E-04
493.51	9.20E-05
496.39	4.95E-05
496.39	4.24E-05
503.47	1.53E-03



Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
511.00	5.43E-04
520.23	5.36E-04
523.14	1.13E-04
526.88	1.30E-04
534.25	3.68E-04
535.44	6.02E-05
538.30	4.26E-05
556.56	1.77E-04
557.91	4.47E-05
561.25	1.08E-05
562.93	3.81E-04
563.99	4.57E-03
566.44	1.31E-03
571.84	4.88E-05
586.27	4.62E-03
595.61	3.12E-05
616.05	9.26E-05
644.38	6.36E-05
656.49	1.44E-03
664.79	1.03E-04
671.16	1.94E-04
674.68	1.70E-03
674.68	1.71E-04
678.62	4.70E-03
683.32	3.18E-05
686.62	2.00E-04
688.67	8.42E-03
696.87	2.91E-05
703.26	5.31E-05
712.84	9.61E-04
719.35	3.27E-03
727.99	1.06E-04
735.41	5.81E-05
756.13	5.48E-05
764.90	1.90E-03
768.94	8.83E-04
778.90	1.30E-01
794.81	2.63E-04
805.71	1.26E-04
810.45	3.17E-03
839.36	1.61E-04
841.57	1.63E-03
867.38	4.24E-02
896.59	6.69E-04
901.18	8.43E-04
906.02	1.61E-04

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
919.34	4.30E-03
926.32	2.73E-03
930.58	7.29E-04
937.05	2.76E-05
958.64	2.10E-04
963.39	1.34E-03
964.08	1.45E-01
974.09	1.39E-04
990.19	3.15E-04
1001.13	4.61E-05
1005.27	6.65E-03
1084.10	2.45E-03
1085.84	1.01E-01
1089.74	1.73E-02
1109.17	1.86E-03
1112.08	1.34E-01
1139.10	1.33E-05
1170.93	3.65E-04
1206.11	1.36E-04
1212.95	1.42E-02
1249.94	1.86E-03
1261.34	3.36E-04
1292.78	1.04E-03
1299.14	1.63E-02
1314.72	4.86E-05
1348.11	1.76E-04
1363.78	2.57E-04
1390.36	4.86E-05
1408.01	2.09E-01
1457.64	4.98E-03
1528.10	2.82E-03
1605.62	8.14E-05
1608.37	5.33E-05
1635.25	1.55E-06
1643.61	1.54E-05
1647.41	6.44E-05
1674.31	6.08E-05
1769.10	9.23E-05
<b>Eu154</b>	
39.52	6.40E-05
40.12	1.08E-04
42.31	7.22E-02
43.00	1.30E-01
45.48	3.20E-05
46.70	1.00E-05
48.77	4.11E-02

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
50.09	1.08E-02
58.40	3.94E-05
80.40	2.81E-05
81.99	3.12E-05
123.07	4.05E-01
125.40	7.20E-05
129.50	1.42E-04
131.59	1.12E-04
134.84	7.24E-05
146.06	2.61E-04
156.20	9.84E-05
159.90	1.05E-05
162.10	1.14E-05
165.90	2.55E-05
180.70	4.05E-05
184.72	3.77E-05
188.24	2.40E-03
195.55	2.10E-05
197.00	1.62E-05
202.50	3.10E-04
209.44	2.56E-05
219.40	2.35E-05
229.01	2.48E-05
232.02	2.41E-04
237.00	6.30E-05
247.93	6.90E-02
260.90	2.27E-05
267.44	1.37E-04
269.80	7.01E-05
274.05	3.92E-05
279.90	3.02E-05
290.00	3.32E-05
295.70	2.42E-05
296.10	1.49E-05
301.25	1.02E-04
305.10	1.75E-04
308.20	2.46E-05
312.30	1.82E-04
315.40	7.20E-05
320.10	1.07E-05
322.03	6.63E-04
329.97	9.15E-05
346.73	2.91E-04
368.21	3.02E-05
370.71	5.61E-05
375.25	2.08E-05

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
382.01	9.94E-05
397.10	2.91E-04
401.26	1.89E-03
403.56	2.61E-04
414.30	4.96E-05
419.40	3.42E-05
422.10	2.29E-05
435.90	3.81E-05
444.49	5.61E-03
463.90	4.23E-05
467.85	6.04E-04
478.28	2.24E-03
480.61	4.83E-05
483.74	5.03E-05
484.64	3.92E-05
488.26	7.30E-05
506.40	6.31E-05
510.00	5.97E-04
512.00	3.27E-04
518.01	4.72E-04
533.10	4.30E-05
533.10	7.20E-05
545.60	1.42E-04
557.59	2.68E-03
563.40	2.87E-05
569.23	1.01E-04
582.02	8.86E-03
591.76	4.96E-02
597.50	5.53E-05
598.30	6.27E-05
600.00	6.40E-05
602.82	3.32E-05
613.27	9.34E-04
620.52	9.15E-04
625.26	3.18E-03
642.40	4.42E-05
649.45	7.83E-04
650.60	9.84E-05
664.69	2.91E-04
668.90	1.32E-04
676.60	1.57E-03
692.42	1.79E-02
715.77	1.91E-03
723.30	2.01E-01
737.60	6.32E-05
756.80	4.54E-02

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
774.40	8.40E-05
790.20	1.03E-04
800.20	3.25E-04
801.21	1.23E-04
815.54	5.13E-03
830.30	8.30E-05
845.42	5.87E-03
850.64	2.41E-03
873.18	1.22E-01
880.60	8.14E-04
892.78	5.15E-03
898.36	2.05E-05
904.06	8.90E-03
906.10	1.19E-04
919.24	1.21E-04
924.64	6.22E-04
928.40	4.52E-05
981.35	8.42E-05
984.50	9.42E-05
996.26	1.05E-01
1004.72	1.79E-01
1012.82	3.10E-05
1023.10	6.63E-05
1033.40	1.20E-04
1047.41	4.93E-04
1049.41	1.73E-04
1072.20	3.51E-05
1110.00	3.20E-05
1118.53	1.08E-03
1124.20	6.91E-05
1128.55	3.18E-03
1136.10	7.10E-05
1140.70	2.35E-03
1153.15	1.14E-04
1160.37	4.36E-04
1170.75	3.61E-05
1188.34	9.37E-04
1216.80	3.31E-05
1232.15	8.50E-05
1241.43	1.34E-03
1246.12	8.62E-03
1274.43	3.49E-01
1290.51	2.53E-04
1292.02	1.28E-04
1295.52	9.11E-05
1316.43	1.74E-04

**BU-AP**

Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision
<b>NT</b>	<b>101682</b>	<b>42</b>	<b>0001</b>	<b>A</b>

**REF****INSTN**~~**REF**~~

Page : 50 / 61

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
1387.05	1.92E-04
1397.35	3.18E-05
1408.52	2.33E-04
1415.05	4.02E-04
1418.62	1.12E-04

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
1419.02	2.01E-05
1425.95	1.27E-05
1489.62	2.94E-05
1494.05	6.99E-03
1510.05	4.81E-05

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
1522.10	6.30E-06
1531.42	6.04E-05
1537.81	5.32E-04
1554.00	1.15E-05
1596.48	1.78E-02

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
1667.32	1.93E-05
1674.05	1.74E-05
1716.95	6.30E-06
1773.10	3.52E-06
1838.05	8.20E-06

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
1895.10	6.20E-06

BU-AP	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	101682	42	0001	A	
INSTN						<del>REF</del>

### 16.3 ANNEXE 3 : ENERGIES ET INTENSITES D'EMISSION DU CALIFORNIUM 252

Les énergies et intensité d'émission des photons du californium 252 utilisées dans cette étude sont les suivantes.

Energie (keV)	Intensité (phot/déc)
<b>Cf252</b>	
21.99	1.98E-03
17.96	6.07E-02
43.00	1.59E-04
100.00	1.19E-04
154.50	5.10E-06
16.73	8.06E-02
49.87	1.22E-02
129.35	2.94E-02
196.07	1.60E-02
264.39	4.50E-02
347.96	5.12E-02
485.45	8.28E-02
861.56	1.39E-01
1645.00	4.37E-02
2520.00	3.01E-02
4220.00	9.40E-03
7590.00	5.23E-04

## 16.4 ANNEXE 4 : DETAIL DES RESULTATS MCNP POUR LE SCENARIO 8

La figure 11 présente le débit d'équivalent de dose dû à chacune des tranches de cylindre modélisées dans MCNP pour des photons dont l'énergie d'émission est inférieure à 30 keV.

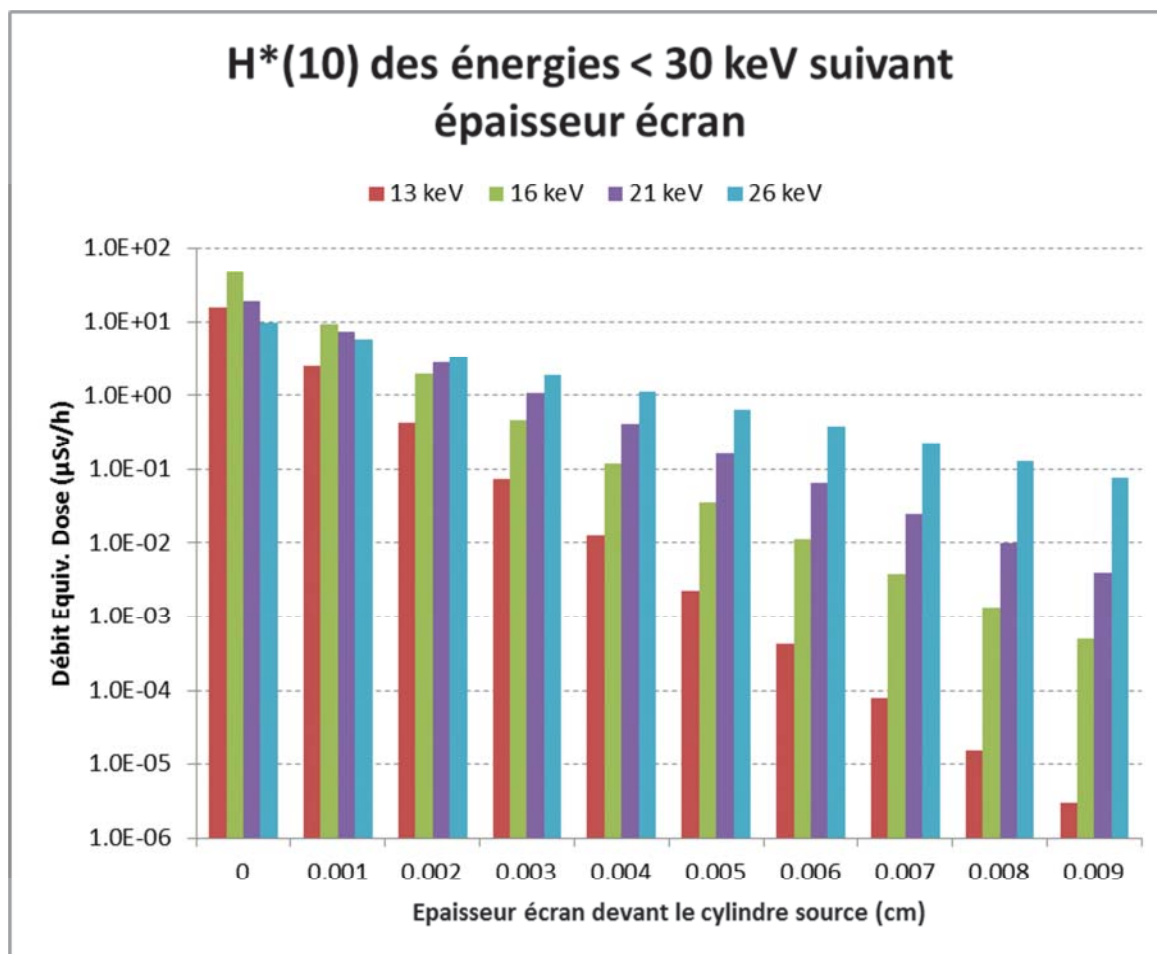


Figure 11 : Débit d'équivalent de dose dû à chacun des cylindres de 0.001 cm d'épaisseur modélisés

Selon la figure 11, quelle que soit l'énergie d'émission inférieure à 30 keV, le débit d'équivalent de dose dû à une tranche de cylindre source qui se trouve derrière 0.009 cm de plomb est inférieur d'un facteur au moins 100 par rapport au débit d'équivalent de dose dû à une tranche de cylindre qui n'est pas écrantée.

Pour les photons dont l'énergie d'émission est inférieure à 30 keV, cela conforte le fait que tout volume de cylindre derrière 0.01 cm de plomb n'a pas d'influence notable sur la valeur du débit d'équivalent de dose.

La figure 12 présente le débit d'équivalent de dose dû à chacune des tranches de cylindre modélisées dans MCNP pour des photons dont l'énergie d'émission est de 59 keV.

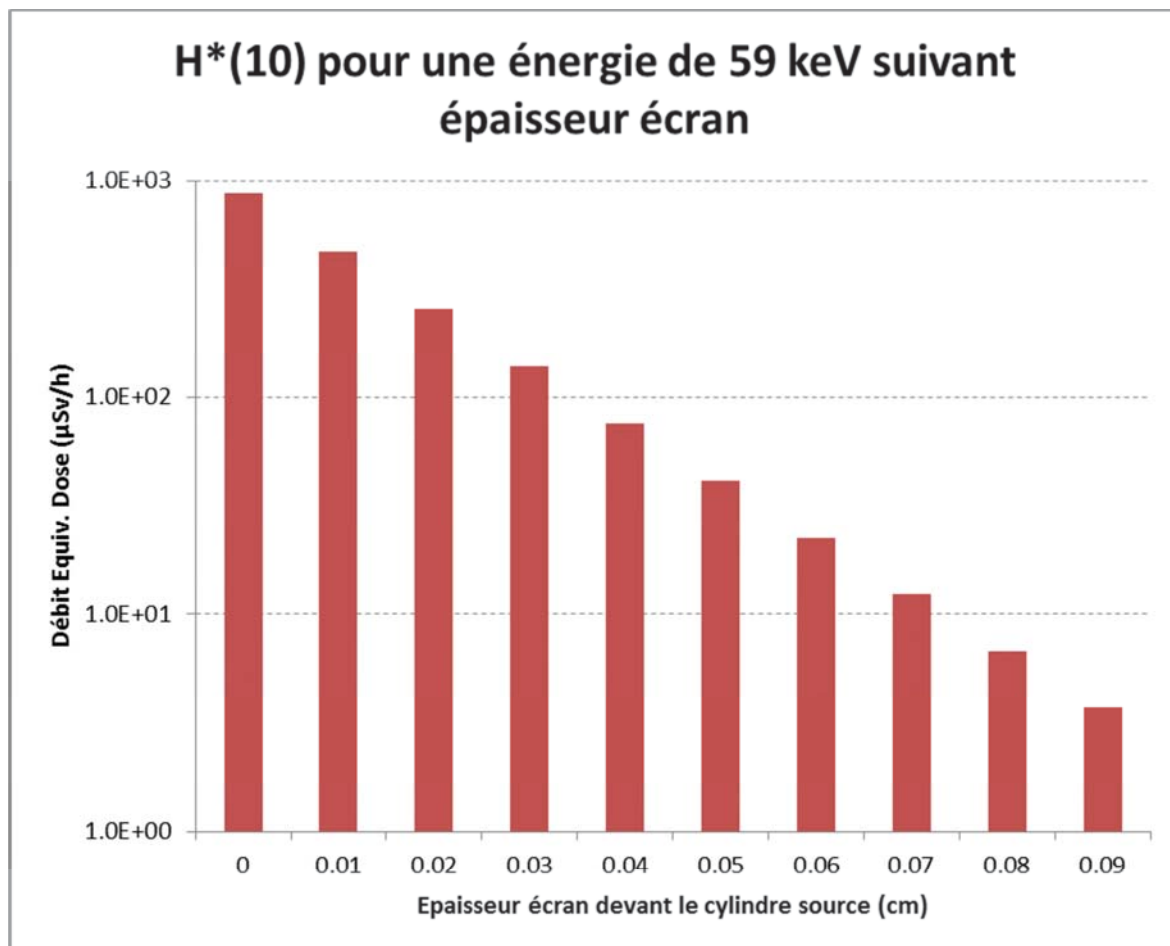


Figure 12 : Débit d'équivalent de dose dû à chacun des cylindres de 0.01 cm d'épaisseur modélisés

Selon la figure 12, pour une énergie d'émission de 59 keV, le débit d'équivalent de dose dû à une tranche de cylindre source qui se trouve derrière 0.09 cm de plomb est inférieur d'un facteur au moins 200 par rapport au débit d'équivalent de dose dû à une tranche de cylindre qui n'est pas écranée.

Pour les photons dont l'énergie d'émission est de 59 keV, cela conforte le fait que tout volume de cylindre derrière 0.1 cm de plomb n'a pas d'influence notable sur la valeur du débit d'équivalent de dose.

En réalisant un ajustement exponentiel sur les points de la figure 12, le débit de dose ajouté par une épaisseur de cylindre de 0.1 cm derrière 0.1 cm de plomb est d'environ 4.4 μSv/h.

## 16.5 ANNEXE 5 : COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS AVEC DOSIMEX, MERCURAD, MICROSHIELD, RAYXPRT ET MCNP

Les résultats issus de calculs DOSIMEX, MERCURAD, MicroShield et RayXpert et présentés dans ce paragraphe sont repris, en particulier, de la note en référence [2]. Seuls les résultats issus de calculs MCNP ont été réalisés par AREVA NP.

Le tableau 16 présente les résultats pour la géométrie principale du scénario 1.

H*(10) source ponctuelle 1 GBQ à 10 cm (mSv/h)						Benchmark vs MCNP			
RN	Dosimex-G 2.0	Microshield™ (Grove)	Mercurad	RayXpert© 1.4	MCNP	Dosimex/MCNP	μShiel/MCNP	Mercurad/MCNP	RayXpert/MCNP
Ag110m	41.5	40.68	42.96	42.6	42.0	1.2%	3.1%	2.3%	1.4%
N16	37.42	38.52	38.34	39.7	37.5	0.3%	2.6%	2.1%	5.8%
Y88	37.25	37.91	36.4	38.4	37.0	0.6%	2.4%	1.6%	3.8%
Co60	34.8	35.03	35.34	35	34.8	0.1%	0.6%	1.5%	0.5%
La140	31.7	31.93	32.32	31.7	32.1	1.4%	0.6%	0.6%	1.4%
Sb124	26.2	25.73	26.64	26.6	26.4	0.6%	2.4%	1.1%	0.9%
Cs134	24.7	24.7	24.82	25.5	24.8	0.5%	0.5%	0.0%	2.7%
Nb94	24.4	24.76	24.72	24.9	24.4	0.0%	1.5%	1.3%	2.0%
Fe59	16.8	16.92	17.05	17.4	16.8	0.2%	0.5%	1.3%	3.3%
F18	16.5	16.62	17.08	15.51	16.6	0.6%	0.2%	2.9%	6.5%
Co58	15.3	15.42	15.41	14.7	15.4	0.5%	0.3%	0.2%	4.4%
Ir192	13.85	14.57	13.88	14.5	14.0	0.9%	4.2%	0.7%	3.7%
Mn54	12.9	12.98	13	12	13.0	0.5%	0.1%	0.2%	7.5%
Cs137	9.23	9.52	9.27	8.98	9.26	0.3%	2.9%	0.2%	3.0%
Ba133	8.84	8.69	9.06	8.93	8.98	1.5%	3.2%	0.9%	0.5%
In111	8.82	8.83	8.97	8.67	9.08	2.9%	2.7%	1.2%	4.5%
Zn65	8.4	8.44	8.5	7.97	8.32	1.0%	1.5%	2.2%	4.2%
Se75	6.89	6.83	6.63	6.86	6.97	1.1%	2.0%	4.8%	1.5%
I131	6.46	6.7	6.57	6.11	6.60	2.2%	1.4%	0.5%	7.5%
Cf252	5.80	0.14	5.48	5.96	5.71	1.5%	97.5%	4.1%	4.3%
I125	3.52	3.45	3.61	3.64	3.50	0.5%	1.5%	3.1%	4.0%
Rh106	3.3	3.39	3.38	3.19	3.33	0.8%	1.9%	1.6%	4.1%
U235	3.15	3.65	2.78	3.36	3.61	12.6%	1.2%	22.9%	6.8%
Mo99	2.41	2.3	2.43	2.56	2.40	0.4%	4.2%	1.2%	6.6%
Tc99m	2.33	2.5	2.34	2.47	2.49	6.5%	0.3%	6.1%	0.9%
Bi212	1.63	2.39	1.63	1.73	1.63	0.2%	46.3%	0.2%	5.9%
Xe133	1.56	1.63	1.23	1.62	1.64	4.9%	0.6%	25.0%	1.2%
Am 241	1.26	1.6	0.6	1.33	1.38	8.5%	16.2%	56.4%	3.4%
Cr51	0.54	0.52	0.54	0.54	0.55	1.3%	4.9%	1.3%	1.3%
Pu238	0.25	0.32	8.50E-04	0.22	0.23	9.8%	40.5%	99.6%	3.4%
Ra226	0.131	0.16	0.12	0.133	0.139	5.4%	15.5%	13.4%	4.0%
Pu239	0.06	0.04	0.0015	0.092	0.10	40.9%	60.6%	98.5%	9.5%
Kr85	0.038	0.037	0.037	0.035	0.037	1.3%	1.3%	1.3%	6.7%

Tableau 16 : Résultats et comparaison des logiciels pour la géométrie principale du scénario 1

Le tableau 17 présente les résultats pour la géométrie complémentaire 1 du scénario 1.

1 GBq source ponctuelle d=10 cm + écran 0,5 mm Fe H*(10) (mSv/h)						Benchmark vs MCNP			
	DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/MCNP	µShiel/MCNP	Mercurad/MCNP	RayXpert/MCNP
Pu238	3.89E-04	3.984E-04	4.22E-04	3.85E-04	4.10E-04	5.1%	2.8%	3.0%	6.1%
Pu239	8.81E-04	8.324E-04	1.12E-03	9.54E-04	1.22E-03	27.5%	31.5%	7.8%	21.5%
Am 241	3.69E-01	3.672E-01	3.97E-01	3.48E-01	3.60E-01	2.6%	2.1%	10.3%	3.3%

Tableau 17 : Résultats et comparaison des logiciels pour la géométrie complémentaire 1 du scénario 1

Le tableau 18 présente les résultats pour la géométrie complémentaire 2 du scénario 1.

Cf 252, 1 GBq avec 1 cm Pb, d=10 cm H*(10) (mSv/h)						Benchmark vs MCNP			
	DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/MCNP	µShiel/MCNP	Mercurad/MCNP	RayXpert/MCNP
Cf 252, 1 GBq avec 1 cm Pb, d=10 cm	2.76	3.83E-20	2.13E-09	2.90	2.81	1.8%	100.0%	100.0%	3.2%

Tableau 18 : Résultats et comparaison des logiciels pour la géométrie complémentaire 2 du scénario 1

Le tableau 19 présente les résultats pour le scénario 2.

	Source ponctuelle Cs 137 1 GBQ H*(10) (µSv/h) vs distance					Benchmark vs MCNP			
	DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/MCNP	µShiel/MCNP	Mercurad/MCNP	RayXpert/MCNP
0	3.68E+07	NC	NC	3.80E+07	NC	NC	NC	NC	NC
0.001	3.28E+07	7.90E+11	NC	3.60E+07	3.40E+07	3.4%	2323784.8%	NC	5.9%
0.01	2.33E+07	7.90E+09	NC	2.30E+07	2.28E+07	2.2%	34573.9%	NC	0.9%
0.1	1.01E+07	7.90E+07	NC	9.85E+06	9.95E+06	1.7%	694.0%	NC	1.0%
0.5	2.39E+06	3.70E+06	3.70E+06	2.32E+06	2.34E+06	1.9%	57.9%	57.9%	1.0%
1	8.03E+05	8.60E+05	9.26E+05	7.80E+05	7.89E+05	1.8%	9.0%	17.4%	1.1%
5	3.67E+04	3.80E+04	3.70E+04	3.61E+04	3.62E+04	1.5%	5.0%	2.3%	0.22%
15	4113.4523	4220	4110	4050	4043	1.7%	4.4%	1.7%	0.18%
30	1027.0907	1053	1030	1010	1011	1.6%	4.2%	1.9%	0.06%
50	369.01174	378	370	373	364	1.5%	3.9%	1.7%	2.6%
100	92.400735	94.5	92.6	92.7	90.7	1.8%	4.1%	2.0%	2.2%
150	41.100145	41.9	41.2	39.8	40.3	1.9%	3.9%	2.2%	1.3%
200	23.120046	23.5	23.16	22.6	22.6	2.2%	3.9%	2.4%	0.11%

Tableau 19 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 2

Le tableau 20 présente les résultats pour le scénario 3.

		H*(10) (μSv/h)					Benchmark vs MCNP			
	Configuration	DOSIMEX-G 2.0	Microshield®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/MCNP	μShield/MCNP	Mercurad/MCNP	RayXpert/MCNP
Am 241	Source nue	13.4	16	6.1	13.3	13.3	0.4%	19.9%	54.3%	0.3%
	Source + écran de 10cm Alu	3.80E-02	3.30E-02	3.70E-02	1.67E-02	1.77E-02	114.5%	86.3%	108.8%	5.7%
	Source + écran de 2cm de Pb	1.30E-04	7.40E-21	1.00E-04	1.40E-04	1.44E-04	9.4%	100.0%	30.3%	2.5%
	Source + écran de 50cm d'eau	5.10E-02	4.09E-02	3.75E-02	1.10E-02	1.33E-02	283.6%	207.6%	182.0%	17.3%
Cs 137	Source à nue	92.5	93.6	92.8	90.7	90.8	1.9%	3.1%	2.3%	0.1%
	Source + écran de 10cm Alu	44	45.3	51.7	35.9	35.5	23.9%	27.6%	45.6%	1.1%
	Source + écran de 2cm de Pb	13.3	14.16	13.7	13.1	13.0	2.6%	9.2%	5.7%	1.0%
	Source + écran de 50cm d'eau	14	14.4	16.5	9.33	9.2	52.8%	57.2%	80.1%	1.8%
Co 60	Source à nue	349	347	353	352	347	0.4%	0.1%	1.6%	1.3%
	Source + écran de 10cm Alu	203	192	210	181	174	16.8%	10.5%	20.8%	4.2%
	Source + écran de 2cm de Pb	143	141	152	146	145	1.6%	3.0%	4.6%	0.5%
	Source + écran de 50cm d'eau	80	76.1178	87	60	60.3	32.7%	26.2%	44.3%	0.5%

Tableau 20 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 3

Le tableau 21 présente les résultats pour le scénario 5.

		H*(10) (μSv/h)					Benchmark vs MCNP			
	Configuration	Dosimex-G	Microshield	Mercurad	RayXpert®	MCNP	Dosimex/MCNP	μShield/MCNP	Mercurad/MCNP	RayXpert/MCNP
Am 241	Fil	12.45	6.2	5.7	11.9	12.39	0.5%	49.9%	54.0%	3.9%
	Disque	9.32	4.7	4.3	9.5	8.99	3.7%	47.7%	52.2%	5.7%
	Cylindre Pt1	0.94	0.9	0.96	0.77	0.79	19.4%	14.3%	21.9%	2.2%
	Cylindre Pt2	0.74	0.89	0.84	0.69	0.70	6.4%	28.0%	20.8%	0.8%
Cs 137	Fil	86	75	86	83	85	0.7%	12.2%	0.7%	2.8%
	Disque	64	65	64	63	63	2.3%	3.9%	2.3%	0.7%
	Cylindre Pt1	48	46	50	41	40	19.2%	14.3%	24.2%	1.8%
	Cylindre Pt2	44	42	46	37	36	22.6%	17.0%	28.2%	3.1%
Co 60	Fil	323	322	327	326	322	0.2%	0.1%	1.4%	1.1%
	Disque	242	240	245	244	236	2.7%	1.8%	3.9%	3.5%
	Cylindre Pt1	195	186	188	173	171	14.2%	8.9%	10.1%	1.3%
	Cylindre Pt2	185	173	206	156	155	19.5%	11.8%	33.1%	0.8%

Tableau 21 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 5



Le tableau 22 présente les résultats pour la géométrie latérale du scénario 6.

		H*(10) (μSv/h)					Benchmark vs MCNP			
		DOSIMEX-G	Microshield	Mercurad	RayXpert®	MCNP	Dosimex/ MCNP	μShiel/ MCNP	Mercurad/ MCNP	RayXpert/ MCNP
	Conf.	latéral	latéral	latéral	latéral	latéral				
Cs 137	Source nue	24	22	24	21.5	20	18.8%	8.9%	18.8%	6.4%
	Source + 2cm de Pb	2.3	4.1	1.7	1.8	1.6	41.9%	153.0%	4.9%	11.1%
	Source + 15 cm d'eau	14	11	15	10	11	28.9%	1.2%	38.1%	8.0%
Co 60	Source à nue	101	96	104	90	90	12.3%	6.7%	15.6%	0.1%
	Source + 2cm de Pb	32	44	29	28	26	21.8%	67.5%	10.4%	6.6%
	Source + 15m d'eau	68	55	69	50.10	54	24.8%	0.9%	26.6%	8.0%

Tableau 22 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 6 latéral

Le tableau 23 présente les résultats pour la géométrie axiale du scénario 6.

		H*(10) (μSv/h)					Benchmark vs MCNP			
		DOSIMEX-G	Microshield	Mercurad	RayXpert®	MCNP	Dosimex/ MCNP	μShiel/ MCNP	Mercurad/ MCNP	RayXpert/ MCNP
	Configuration	axe	axe	axe	Axe	Axe				
Cs137	Source nue	9.6	9	7.6	8.3	8.0	19.9%	12.4%	5.1%	3.7%
	Source + 2cm de Pb	0.95	2.4	0.72	0.71	0.75	27.4%	221.9%	3.4%	4.8%
	Source + 15 cm d'eau	5.7	4.7	6.4	5.4	5.5	2.8%	15.3%	15.4%	2.7%
Co 60	Source à nue	40	39	35	36	35	12.8%	10.0%	1.3%	1.5%
	Source + 2cm de Pb	13	18	12	11	12	10.9%	53.6%	2.4%	6.1%
	Source + 15m d'eau	27	22	29	24.2	26	4.4%	14.9%	12.1%	6.4%

Tableau 23 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 6 axial

Le tableau 24 présente les résultats pour le scénario 7.

H*(10) (μSv/h)						Benchmark vs MCNP			
Matériau (masse vol. réf.)	Dosimex-G BU Taylor	Microshield®	Mercurad™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/ MCNP	μShiel/ MCNP	Mercurad/ MCNP	RayXpert/ MCNP
Air (1,3.10 <sup>-3</sup> )	244	243	247	244	243	0.6%	0.2%	1.8%	0.6%
Eau (1)	184	180	191	170	164	12.3%	9.8%	16.6%	3.7%
Aluminium (2,7)	107	108	118	102	99	7.8%	8.8%	18.9%	2.7%
Béton (2,35)	117	116	126	114	107	9.6%	8.6%	18.0%	6.8%
Fer(7,86)	36	40	44	42	38	5.3%	5.3%	15.8%	10.5%
Plomb (11,34)	16	19	21	18	19	17.8%	2.4%	7.9%	7.5%
Uranium (19)	8	10	11	10	10	21.9%	2.3%	7.4%	2.3%
Béryllium (1,85)	174	NC	181	150	138	25.9%		31.0%	8.5%
Carbone (2,25)	133	131	141	115	113	17.5%	15.7%	24.6%	1.6%
Sodium (0,97)	191	NC	200	171	174	9.6%		14.8%	1.9%
Silicium (2,2)	121	NC	134	115	112	8.0%		19.6%	2.7%
Tungstène (19,25)	10	12	13	13	13	20.9%	5.0%	2.9%	2.9%
Etain (6,52)	41	44	49	45	44	6.3%	0.6%	12.0%	2.9%

Tableau 24 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 7

Le tableau 25 présente les résultats pour le scénario 8.

H*(10) (μSv/h)						Benchmark vs MCNP			
hauteur cylindre (cm)	DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/ MCNP	μShiel/ MCNP	Mercurad/ MCNP	RayXpert/ MCNP
0.01	721	878	1010	976	1008	28.5%	12.9%	0.2%	3.2%
0.03	1770	1811	1894	1625	1607	10.2%	12.7%	17.9%	1.1%
0.05	1980	2008	2142	1796	1822	8.7%	10.2%	17.6%	1.4%
0.07	2040	2075	2218	1914	1886	8.2%	10.0%	17.6%	1.5%
0.1	2060	2112	2246	1926	1908	7.9%	10.7%	17.7%	0.9%
1	2050	2114	2241	2040	1913	7.2%	10.5%	17.2%	6.6%
2	2050	2114	2239	1970	1913	7.2%	10.5%	17.1%	3.0%
3	2040	2114	2237	1960	1913	6.6%	10.5%	16.9%	2.5%
5	2030	2114	2234	1952	1913	6.1%	10.5%	16.8%	2.0%
7	2030	2114	2231	1981	1913	6.1%	10.5%	16.6%	3.6%
8	2030	2114	2229	2069	1913	6.1%	10.5%	16.5%	8.2%
10	2030	2114	2226	2047	1913	6.1%	10.5%	16.4%	7.0%

Tableau 25 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 8

Le tableau 26 présente les résultats pour le scénario 9.

		H*(10) (mSv/h)					Benchmark vs MCNP			
		DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/ MCNP	µShiel/ MCNP	Mercurad/ MCNP	RayXpert/ MCNP
Sans écran	Pt1	13.43	12	13.17	13.8	13.68	1.8%	12.3%	3.7%	0.9%
	Pt2	25.9	22.2	24.44	26.4	25.60	1.2%	13.3%	4.5%	3.1%
Avec écran 20 cm béton	Pt1	2.84	2.21	2.8	2.6	2.60	9.4%	14.9%	7.9%	0.2%
	Pt2	5.04	3.9	5.02	4.4	4.24	18.8%	8.0%	18.4%	3.7%

Tableau 26 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 9

Le tableau 27 présente les résultats pour le scénario 10.1.

		H*(10)					Benchmark vs MCNP			
	hauteur cylindre (cm)	DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/ MCNP	µShiel/ MCNP	Mercurad/ MCNP	RayXpert/ MCNP
Sans protection	Pt 1	751 Sv/h	544 Sv/h	748 Sv/h	465 Sv/h	436 Sv/h	72.4%	24.9%	71.7%	6.7%
	Pt2	240 Sv/h	196 Sv/h	246 Sv/h	168 Sv/h	159 Sv/h	50.5%	22.9%	54.3%	5.4%
Avec protection 15 cm Pb	Pt 1	1.49 mSv/h	1.00 mSv/h	1.26 mSv/h	1.30 mSv/h	1.38 mSv/h	8.2%	27.4%	8.5%	5.6%
	Pt2	0.65 mSv/h	0.54 mSv/h	1.02 mSv/h	0.50 mSv/h	0.66 mSv/h	1.2%	18.0%	55.0%	24.0%

Tableau 27 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 10.1

Le tableau 28 présente les résultats pour le mur de béton lourd du scénario 10.2.

		H*(10) (µSv/h)					Benchmark vs MCNP			
		DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/ MCNP	µShiel/ MCNP	Mercurad/ MCNP	RayXpert/ MCNP
Béton lourd										
Point A1		1124	1131	938	923	1055	6.6%	7.2%	11.1%	12.5%
Point A2		559	541	467	480	526	6.3%	2.8%	11.2%	8.8%
Point B1		1092	809	892	1075	979	11.5%	17.4%	8.9%	9.8%
Point B2		142	145	118	135	136	4.4%	6.6%	13.3%	0.8%

Tableau 28 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 10.2 béton lourd

Le tableau 29 présente les résultats pour le mur de béton léger du scénario 10.2.

		H*(10) (µSv/h)					Benchmark vs MCNP			
		DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	MCNP	Dosimex/ MCNP	µShiel/ MCNP	Mercurad/ MCNP	RayXpert/ MCNP
Béton léger										
Point A1		1720	1729	1238	1493	1589	8.2%	8.8%	22.1%	6.0%
Point A2		841	813	627	740	791	6.4%	2.8%	20.7%	6.4%
Point B1		1640	1392	1194	1300	1480	10.8%	6.0%	19.3%	12.2%
Point B2		210	208	158	193	199	5.4%	4.4%	20.7%	3.1%

Tableau 29 : Résultats et comparaison des logiciels pour le scénario 10.2 béton léger

BU-AP	<table><tr><td>Type Doc.</td><td>Activité</td><td>Cat.MT</td><td>N° Ordre</td><td>Révision</td></tr><tr><td>NT</td><td>101682</td><td>42</td><td>0001</td><td>A</td></tr></table>	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	NT	101682	42	0001	A	REF
Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision								
NT	101682	42	0001	A								
INSTN		REF										

Pour les logiciels DOSIMEX, Microshield, Mercurad et RayXpert, les figures ci-après présentent les histogrammes des rapports entre les valeurs déterminées par ces codes et celles déterminées par des calculs MCNP. Ces rapports sont issus des tableaux présentés dans la présente annexe.

