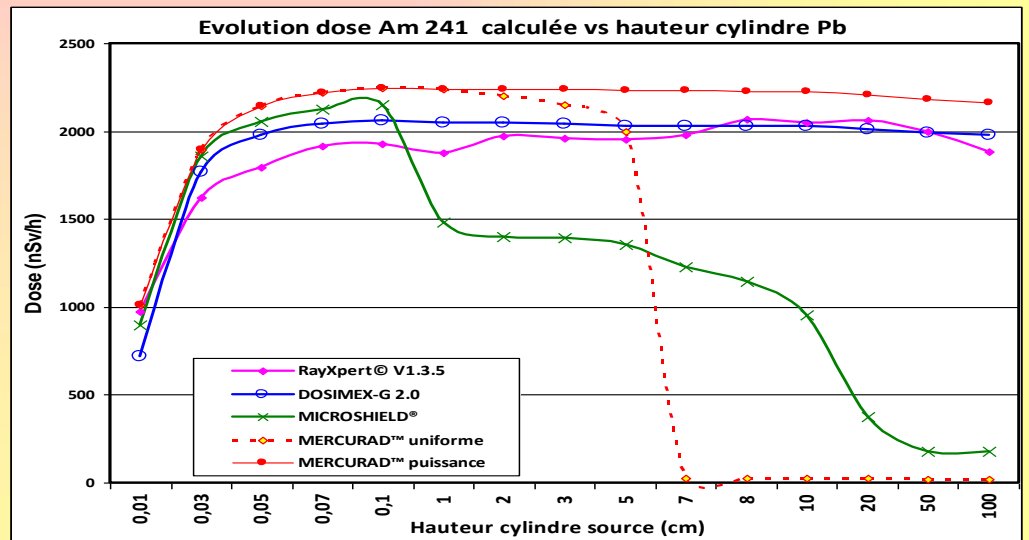
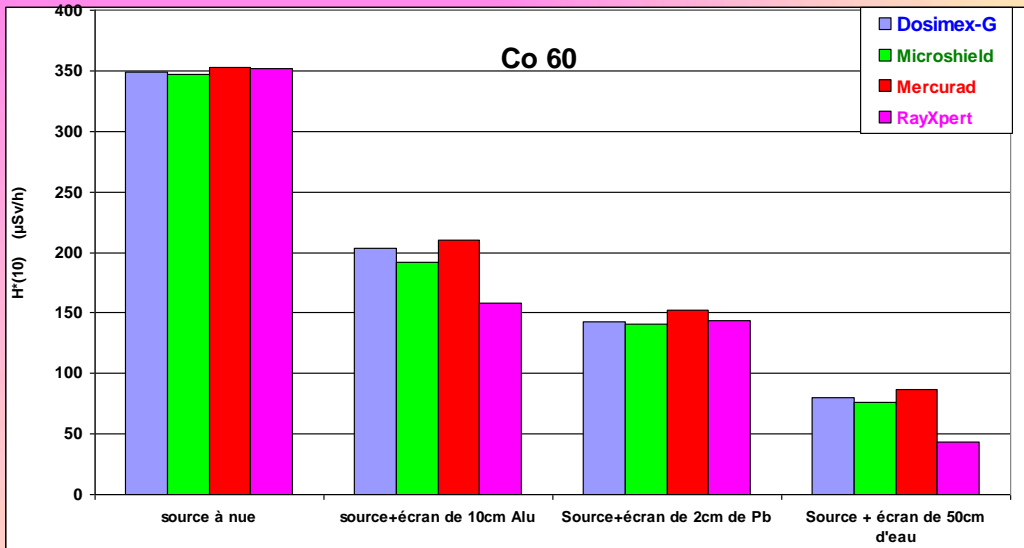




CALCUL DE DOSES GENEREES PAR LES RAYONNEMENTS IONISANTS

DOSIMEX-GX 2.0

✓ **DOSSIER DE VALIDATION**



Alain VIVIER, Gérald LOPEZ



SOMMAIRE

PARTIE II. DOSSIER VALIDATION DOSIMEX-GX 2.0 POUR LES SOURCES GAMMA.....	3
PREAMBULE : CONTEXTE GENERAL DE LA VALIDATION POUR LA PARTIE « SOURCES GAMMA »	
DE DOSIMEX-GX 2.0.....	3
SCENARIO 1 : COMPARAISONS DES RESULTATS POUR 33 RADIONUCLEIDES PRINCIPAUX	6
SCENARIO 2 : EVOLUTION DES RESULTATS EN FONCTION DE LA DISTANCE.....	12
SCENARIO 3 : IMPACT DE LA PRESENCE D'UN ECRAN ET DU BUILD-UP	21
SCENARIO 4 : COMPARAISONS BUILD-UP CALCULES PAR DOSIMEX-GX 2.0 ET MICROSHIELD® :	26
SCENARIO 5 : INFLUENCE DE LA GEOMETRIE SOURCE	28
SCENARIO 6 : COUPLAGES SOURCES VOLUMIQUES + ECRAN.....	31
SCENARIO 7 : INFLUENCE DU MATERIAU.....	33
SCENARIO 8 : MAILLAGE EN PUISSANCE ADAPTE ET MODELISATION DE GRANDS VOLUMES.....	38
SCENARIO 9 : GEOMETRIE PARALLELEPIPEDE DE GRANDE DIMENSION AVEC ECRAN.....	45
SCENARIO 10 : MODELISATION MULTIRADIONUCLEIDES	46
SCENARIO 11 : VALIDATION « EFFET DE CIEL ».....	52
SCENARIO 12 : VALIDATION « RAYONNEMENT DE FREINAGE ».....	54
SCENARIO 13 : FONCTION « DECALAGE » SUR SOURCE CYLINDRIQUE ET FIL.....	57
PARTIE III. CONCLUSION : VALIDATION DOSIMEX-GX 2.0 POUR LES SOURCE GAMMA... ..	60
PARTIE IV. VALIDATION MODELISATION GENERATEUR X	64
SCENARIO 1 : COMPARAISON VS MCNP	64
SCENARIO 2 : COMPARAISONS RENDEMENTS POUR LES ANODES AUTRES QUE TUNGSTENE :	67
SCENARIO 3 : COMPARATIF SPECTRE.....	68
SCENARIO 4 : VALIDATION DED RAYONNEMENT DIFFUSE	69
PARTIE V. VALIDATION OPTION « NORME NF C15-160 » DE DOSIMEX-GX	71



Partie I. DOSSIER VALIDATION DOSIMEX-GX 2.0 POUR LES SOURCES GAMMA

PREAMBULE : CONTEXTE GENERAL DE LA VALIDATION POUR LA PARTIE « SOURCES GAMMA » DE DOSIMEX-GX 2.0

Afin de qualifier le code DOSIMEX-GX, des comparaisons ont été effectuées initialement pour la première édition avec le logiciel MERCURAD™, développé par la Société CANBERRA et le logiciel MICROSHIELD® V.9 de la société Grove-software. DOSIMEX-GX et MICROSHIELD® mettent en œuvre la méthode de calcul déterministe d'atténuation en ligne droite avec correction de build-up.

Le code MERCURAD™ utilise une méthode Monte-Carlo pour la source et un calcul d'atténuation en ligne droite pour les écrans. Basé sur le code MERCURE développé par le CEA, MERCURAD™ est considéré ici comme la référence pour ce type de code.

Nota : Les runs MERCURAD™ ont été réalisés par l'Ecole des Applications Militaires de l'Energie Atomique (EAMEA Cherbourg). Dans certains cas, fort rares, il s'est avéré que les résultats MERCURAD™ ne pouvaient être considérés comme valeurs de références, voir conclusion.

Pour la seconde édition, un travail de collaboration et de validations croisées a été réalisé avec la société TRAD, concepteur du logiciel RayXpert©, code de type Monte-Carlo de dernière génération.

La plupart des scénarii (voir ci-dessous) ont ainsi pu bénéficier de calculs réalisés avec ce logiciel, lui-même validé par rapport MCNPX™ :

<http://www.rayxpert.com/validation-du-logiciel-50.html>.

Certains scénarii n'entrent pas dans ce benchmarking global : l'effet de ciel a par exemple été validé avec RayXpert© seulement, puisque cet effet n'est pas calculable dans un modèle d'atténuation en ligne droite (*il l'est par contre dans un calcul déterministe mettant en œuvre les sections efficaces différentielles de diffusion*). De même le rayonnement de freinage n'a été validé qu'à partir de mesures et de RayXpert©. Les scénarii utilisés dans le benchmarking sont indiqués par un astérisque (*)

Les 12 scénarii utilisés dans ce benchmarking sont les suivants :

Scénario 1 : La qualité des résultats en fonction des radionucléides (*33 RN différents en sources ponctuelles à 10 cm*)*

Scénario 2 : L'évolution des résultats en fonction de la distance (*source ponctuelle de Cs 137*)*

Scénario 3 : L'impact de la présence d'un écran et du build-up (*sources ponctuelles + écran*)*



- Scénario 4 :** Comparaisons build-up Dosimex et Microshield® vs matériaux (4), énergie (3) et nombre de longueur de relaxation (5). Build-up écran multicouche
- Scénario 5 :** L'influence de la géométrie de la source de rayonnement (*sources volumiques, surfaciques, linéiques*)*
- Scénario 6 :** Le couplage source volumique+écran (*sources cylindriques + écran eau ou plomb*) *
- Scénario 7 :** L'influence de la nature des matériaux sur l'autoabsorption dans des sources volumiques (*source sphérique*).*
- Scénario 8 :** La capacité à prendre en compte des dimensions de sources très élevées (*Am 241 + source cylindrique en plomb*).*
- Scénario 9 :** La validation de la géométrie parallélépipédique introduite avec la version 1.3*
- Scénario 10 :** Validation pour une source multi-radionucléides (CSDV et mur béton)* et gradient d'activité (mur béton activé)
- Scénario 11 :** L'effet de ciel
- Scénario 12 :** Le rayonnement de freinage généré par l'émission Bêta
- Scénario 13 :** La fonction décalage sur source cylindrique et fil

Ces scénarii ne prétendent pas à l'exhaustivité, mais sont représentatifs des capacités de calcul principales de DOSIMEX-GX. Ils représentent 217 points de comparaisons pour un total d'environ 750 calculs avec l'ensemble des codes utilisés.

Les résultats utilisés dans le benchmarking sont présentés de 3 façons différentes :

- ❖ Comparaison de DOSIMEX-GX 2.0 vs MICROSHIELD® V.9 dans la mesure où ces deux codes sont très proches en termes de possibilités de calculs offertes, géométries notamment, dans la catégorie des codes déterministes d'atténuation en ligne droite avec correction de build-up.
- ❖ Benchmarking « relatif » de DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V.9 vs MERCURAD™ en considérant ce dernier comme un code de référence pour les codes déterministes.
- ❖ Benchmarking « absolu » de DOSIMEX-GX 2.0, MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ vs RayXpert© en tant que code de référence en tant que code de type Monte-Carlo.

Validation AREVA NC : un stage a été réalisé sur le site d'AREVA NC dans le cadre d'un chantier de démantèlement. L'objectif de ce stage était de valider l'utilisation de DOSIMEX-GX dans un cadre opérationnel :

[Lien vers le mémoire](#)



GESTION DES ECARTS

Les écarts relatifs moyens calculés sur les valeurs de débit d'équivalent de dose (*en général* $\dot{H}^*(10)$) pour chaque scénario sont les moyennes algébriques des valeurs absolues des écarts relatifs :

$$\bar{e}_{(\%)} = \frac{\sum_{i=1}^n |\dot{H}_i - \dot{H}_{iref}|}{n \dot{H}_{iref}}$$

Nous n'avons pas utilisé des paramètres de dispersion tels que l'écart quadratique moyen car ces résultats ne sont pas des variables aléatoires et un écart quadratique moyen mettrait trop de poids sur les valeurs élevées.

Lorsque les écarts relatifs dépassent significativement 50 %, l'écart est alors calculé relativement à la plus grande valeur, pour éviter de faire apparaître des valeurs astronomiques qui écraseraient les moyennes finales. Ces cas particuliers sont soulignés par des cellules de couleur rose :

100%

Exemple :

Dans le scénario 3, le débit d'équivalent de dose avec l'Am241 + un écran de 2 cm de Plomb est égal à 1,30E-04 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ avec Dosimex-GX et 7,40E-21 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ avec Microshield©. L'écart relatif rapporté à Microshield©, en tant que référence, est alors égal à 1,8E18 %. Dans ce cas nous choisirons de rapporter l'écart à la valeur de Dosimex-GX, obtenant ainsi un écart relatif de 100 %. En aucun cas, cette méthode ne favorise Dosimex-GX (voir tableau en conclusion).

Ces cas particuliers seront recensés et analysés en utilisant non plus les écarts relatifs, mais les rapports $\dot{H}_i / \dot{H}_{iref}$ (voir conclusion).



SCENARIO 1 : COMPARAISONS DES RESULTATS POUR 33 RADIONUCLEIDES PRINCIPAUX

Les 33 radionucléides testés ici ont été pris :

- Sur la liste des radionucléides cités dans le memento de la radioprotection EDF
http://prestataires-nucleaire.edf.com/fichiers/fckeditor/File/prestatairesNuc/documentation/memento_rp/Ebook-Memento-BPE/index.htm
- Dans le document « Catégorisation des sources radioactives », guide de sûreté n° RS-G-1.9, AIEA (2011)
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1227f_Web.pdf
- Parmi les radionucléides utilisés en médecine nucléaire ou en imagerie.

La configuration pour tous ces radionucléides est une source ponctuelle de 1 GBq à 10 cm sans écran. Ils sont présentés par ordre de débit d'équivalent de dose décroissant, du plus dosant (Ag 110-m) au moins dosant (K 85).

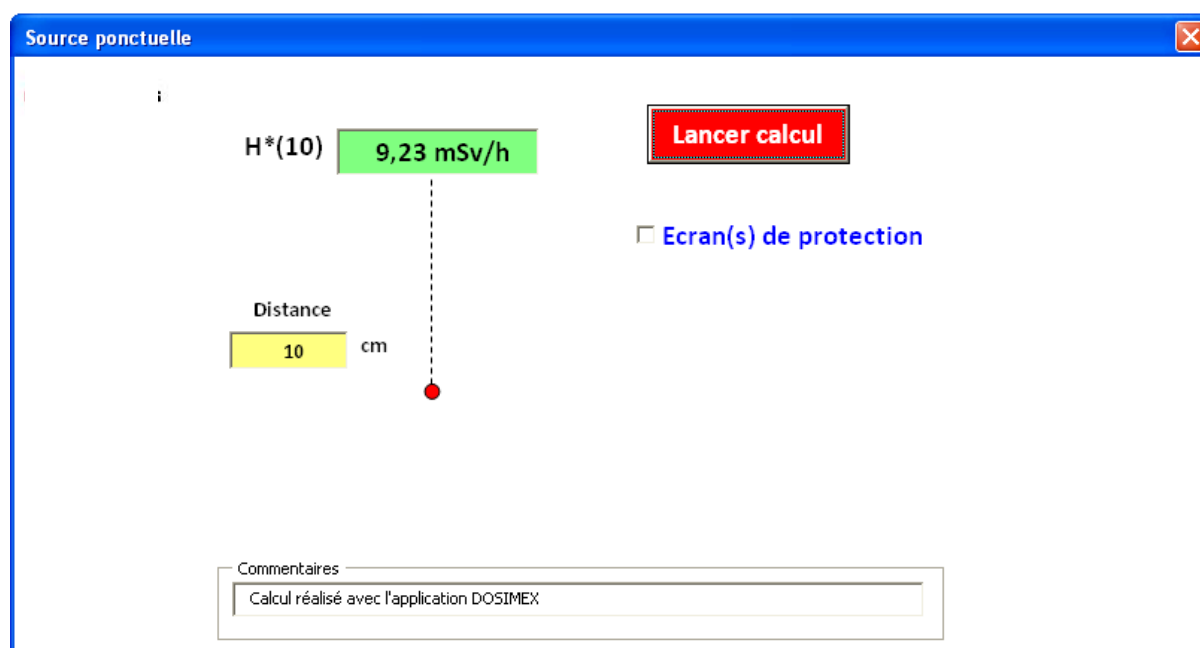


Figure 1: Boîte de dialogue DOSIMEX-GX 2.0 pour source ponctuelle nue à 10 cm (1 GBq Cs 137).

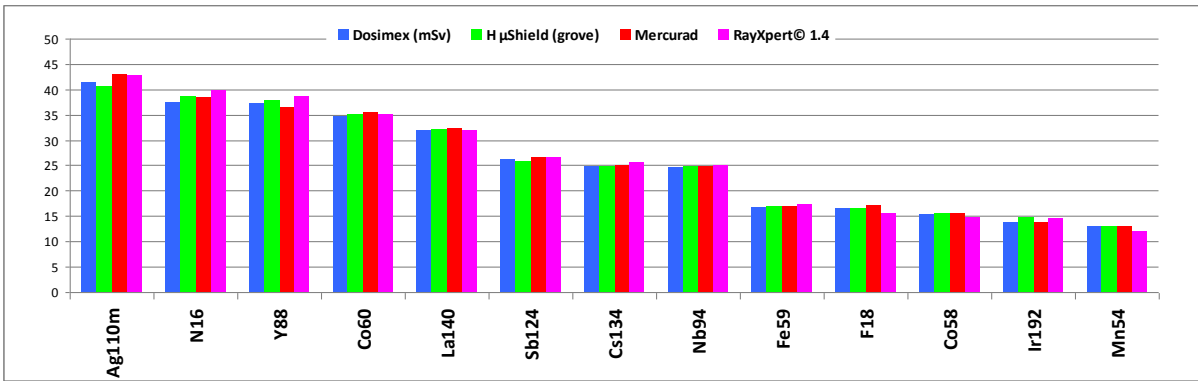


H*(10) (mSv/h) source ponctuelle 1 GBQ à 10 cm					Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
RN	Dosimex- GX 2.0	Microshield™ (Grove)	Mercurad	RayXpert® 1.4	Dosimex/ μshield	Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	μShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
Ag110m	41,5	40,68	42,96	42,6	2,0%	3,4%	5,3%	2,6%	4,5%	0,8%
N16	37,42	38,52	38,34	39,7	2,9%	2,4%	0,5%	5,7%	3,0%	3,4%
Y88	37,25	37,91	36,4	38,4	1,7%	2,3%	4,1%	3,0%	1,3%	5,2%
Co60	34,8	35,03	35,34	35	0,7%	1,5%	0,9%	0,6%	0,1%	1,0%
La140	31,7	31,93	32,32	31,7	0,7%	1,9%	1,2%	0,0%	0,7%	2,0%
Sb124	26,2	25,73	26,64	26,6	1,8%	1,7%	3,4%	1,5%	3,3%	0,2%
Cs134	24,7	24,7	24,82	25,5	0,0%	0,5%	0,5%	3,1%	3,1%	2,7%
Nb94	24,4	24,76	24,72	24,9	1,5%	1,3%	0,2%	2,0%	0,6%	0,7%
Fe59	16,8	16,92	17,05	17,4	0,7%	1,5%	0,8%	3,4%	2,8%	2,0%
F18	16,5	16,62	17,08	15,51	0,7%	3,4%	2,7%	6,4%	7,2%	10,1%
Co58	15,3	15,42	15,41	14,7	0,8%	0,7%	0,1%	4,1%	4,9%	4,8%
Ir192	13,85	14,57	13,88	14,5	4,9%	0,2%	5,0%	4,5%	0,5%	4,3%
Mn54	12,9	12,98	13	12	0,6%	0,8%	0,2%	7,5%	8,2%	8,3%
Cs137	9,23	9,52	9,27	8,98	3,0%	0,4%	2,7%	2,8%	6,0%	3,2%
Ba133	8,84	8,69	9,06	8,93	1,7%	2,4%	4,1%	1,0%	2,7%	1,5%
In111	8,82	8,83	8,97	8,67	0,1%	1,7%	1,6%	1,7%	1,8%	3,5%
Zn65	8,4	8,44	8,5	7,97	0,5%	1,2%	0,7%	5,4%	5,9%	6,6%
Se75	6,89	6,83	6,63	6,86	0,9%	3,9%	3,0%	0,4%	0,4%	3,4%
I131	6,46	6,7	6,57	6,11	3,6%	1,7%	2,0%	5,7%	9,7%	7,5%
Cf252	5,80	0,14	5,48	5,96	97,6%	5,8%	97,4%	2,7%	97,7%	8,1%
I125	3,52	3,45	3,61	3,64	2,0%	2,5%	4,4%	3,3%	5,2%	0,8%
Rh106	3,3	3,39	3,38	3,19	2,7%	2,4%	0,3%	3,4%	6,3%	6,0%
U235	3,15	3,65	2,78	3,36	13,7%	13,3%	31,3%	6,3%	8,6%	17,3%
Mo99	2,41	2,3	2,43	2,56	4,8%	0,8%	5,3%	5,9%	10,2%	5,1%
Tc99m	2,33	2,5	2,34	2,47	6,8%	0,4%	6,8%	5,7%	1,2%	5,3%
Bi212	1,62	2,39	1,63	1,73	47,5%	0,6%	46,6%	6,4%	38,2%	5,8%
Xe133	1,56	1,63	1,23	1,62	4,3%	21,2%	24,5%	3,7%	0,6%	24,1%
Am 241	1,34	1,6	0,6	1,33	16,3%	55,2%	62,5%	0,8%	20,3%	54,9%
Cr51	0,54	0,52	0,54	0,54	3,8%	0,0%	3,7%	0,0%	3,7%	0,0%
Pu238	0,29	0,32	8,50E-04	0,28	7,5%	99,7%	99,7%	5,7%	14,3%	99,7%
Ra226	0,131	0,16	0,12	0,12	18,1%	8,4%	25,0%	9,2%	33,3%	0,0%
Pu239	0,06	0,04	0,0015	0,063	50,0%	97,5%	96,3%	4,8%	36,5%	97,6%
Kr85	0,038	0,037	0,037	0,035	2,7%	2,7%	0,0%	8,6%	5,7%	5,7%

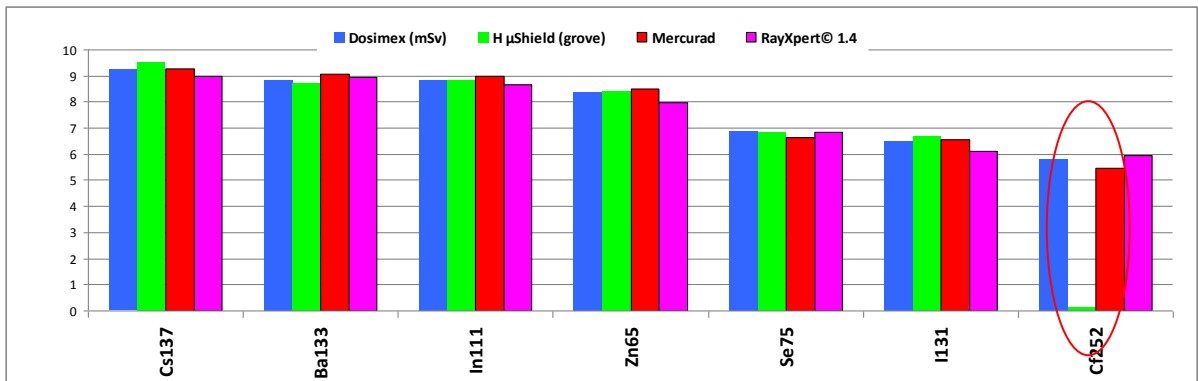
Tableau 1: Benchmarking pour 33 radionucléides en source ponctuelle à 10 cm. Valeurs des débits de dose et écarts relatifs.



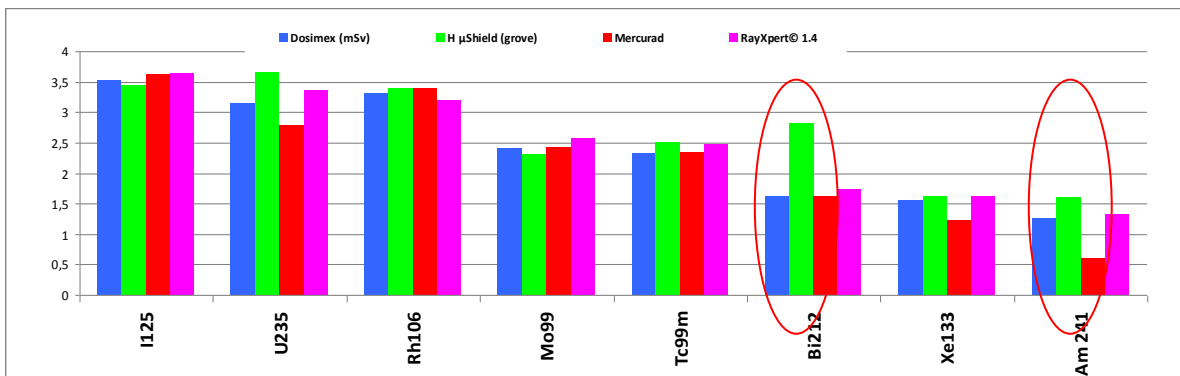
GRAPHES



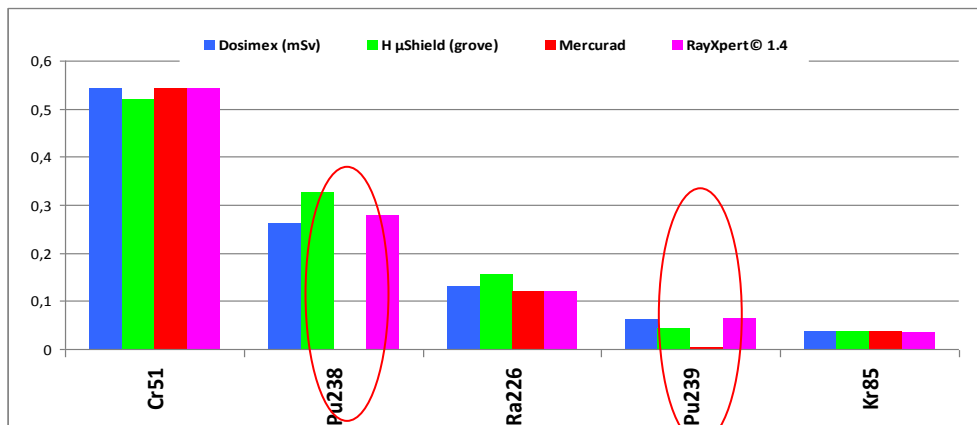
Graphe1



Graphe 2



Graphe 3



Graphe 4



ANALYSE DES RESULTATS :

Cette étude montre pour l'essentiel une bonne cohérence d'ensemble. La moyenne des écarts relatifs, calculée sur la totalité des 198 valeurs d'écarts relatifs, est égale à 10 %. Cette moyenne chute à 5 % si l'on exclue les 13 écarts présentant des écarts relatifs supérieurs à 50 %. Ces écarts apparaissent avec 4 radionucléides particuliers : Cf252 (cf. *graphe 2*), Am241 (cf. *graphe 3*), Pu238 et Pu239 (cf. *graphe 4*).

Il est important d'identifier les causes de ces écarts. Elles sont de deux natures différentes :

Cf 252 : Non prise en compte des produits de fission pour Microshield® et Mercurad™.

La fission spontanée des noyaux lourds s'accompagne d'une émission gamma très intense et très énergétique, avec des gamma de plus de 5 MeV. Cette émission, présentant un spectre continu, n'est pas mentionnée dans les bases de données usuelles. Paradoxalement, Mercurad™ donne un bon résultat en source ponctuelle sans écran, ce qui doit résulter d'un ajustement ad hoc des intensités. Cet ajustement ne peut alors convenir dans un calcul en présence d'un écran significatif (voir plus bas).

Am 241, Pu8 et Pu9 : Non prise en compte du rayonnement X_L pour Mercurad™.

Ces émissions, autour de 15 keV, ont souvent des intensités non négligeables. Contrairement au cas du Cf252, la mise en place d'un écran, même relativement mince, devrait permettre de faire disparaître ces écarts. Dans ces 3 cas, Mercurad™ ne peut plus être considéré comme la référence. Mercurad™ sous-estime le débit d'équivalent de dose d'un facteur 330 par exemple pour le Pu8 en source ponctuelle sans écran.

Remarque : On peut aussi noter pour le Bi 212 un écart relatif proche de 50 % entre la valeur donnée par Microshield et les autres. Cet écart provient d'une différence dans l'intensité d'émission pour la raie prédominante de 727 keV : 11,8% pour Microshield® et 6,65 % environ pour les autres codes.

Ce premier scénario met en évidence l'importance des tables d'émissions mises en œuvre. Les disparités proviennent soit de différence entre table de références, soit de simplifications mises en œuvre trop abruptement, comme par exemple la suppression d'émissions jugées peu intenses par rapport aux émissions prépondérantes, sans prendre en considération l'énergie de ces émissions.



CALCULS COMPLEMENTAIRES

1) Cas précédent Pu8, Pu9 et Am 241, avec rajout d'un écran de 0,5 mm de fer

On constate, comme attendu, que la présence de l'écran, assez modeste tend à égaliser rapidement les résultats pour les 4 codes. L'écart relatif entre RayXpert© et Mercurad™ n'est plus que de 14 % dans ce cas (*respectivement 5% entre Dosimex-GX et RayXpert©*):

	1 GBq source ponctuelle d=10 cm + écran 0,5 mm Fer (mSv/h)				Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
	Dosimex (mSv)	H μShield (grove)	Mercurad	RayXpert© 1.4	Dosimex/ μshield	Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	μShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
	Pu238	3,89E-04	3,984E-04	4,22E-04	3,85E-04	2,4%	7,8%	5,6%	1,0%	3,5%
Pu239	8,81E-04	8,324E-04	1,12E-03	9,54E-04	5,8%	21,3%	25,7%	7,7%	12,7%	17,4%
Am 241	3,69E-01	3,672E-01	3,97E-01	3,48E-01	0,5%	7,1%	7,5%	6,0%	5,5%	14,1%

Tableau 2

2) Cf 252 avec rajout d'écran de 1 cm de Pb

La présence de l'écran de 1 cm de plomb écrase totalement les faibles énergies. Microshield© et Mercurad™ sous-estiment alors dans un tel cas les débits d'équivalent de dose de façon dramatique :

Cf 252, 1 GBq avec 1 cm Pb , d=10 cm H*(10) (mSv/h)				Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
DOSIMEX- GX	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert©	Dosimex/ μshield	Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	μShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
2,76	3,83E-20	2,13E-09	2,90	100,0%	100,0%	100,0%	4,8%	100,0%	100,0%

Tableau 3



SYNTHESE DES RESULTAT SCENARIO 1

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

(En rouge entre parenthèse : résultats moyens en l'absence des cas aberrants)

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 12 % **(5 %)**

Benchmark vs **MERCURAD™**

- Entre **DOSIMEX-GX 2.0** et **MERCURAD™** : écart moyen 13 % **(4 %)**
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MERCURAD™** : écart moyen 18 % **(7 %)**

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPert© V 1.4

- Entre **DOSIMEX-GX 2.0** et **RayXpert© 1.4**: écart moyen 4 % **(4 %)**
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **RayXpert© 1.4**:: écart moyen 13%. **(8 %)**
- Entre **MERCURAD™** et **RayXpert© 1.4** : : écart moyen %. 15 % **(6 %)**

- **Moyenne totale sur l'ensemble des écarts : 12,4 %**
- **Après suppression des valeurs aberrantes : 5,7 %**

On constate une excellente adéquation entre les résultats donnés par Dosimex-GX 2.0 et RayXpert©, sans aucun cas aberrant. Ce qui n'est pas le cas avec Mercurad™ et Microshield® pour certains radionucléides particuliers.



SCENARIO 2 : EVOLUTION DES RESULTATS EN FONCTION DE LA DISTANCE

Les calculs ont été réalisés pour une source ponctuelle de césium 137 de 1 GBq à différentes distances comprises entre 0 (*lorsque le code le permet*) et 200 cm.

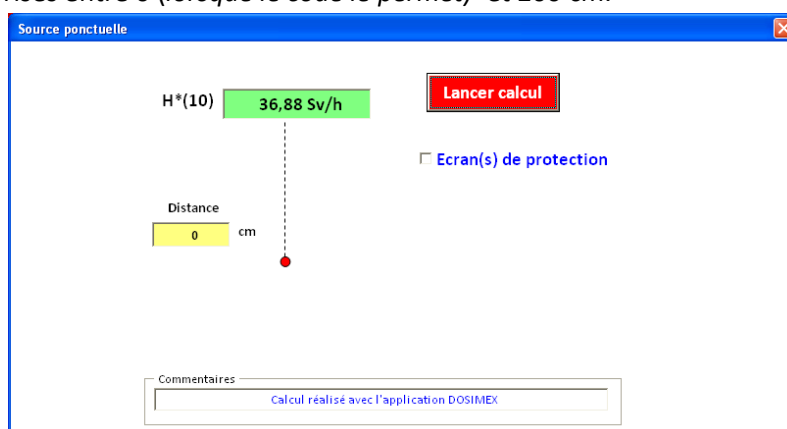
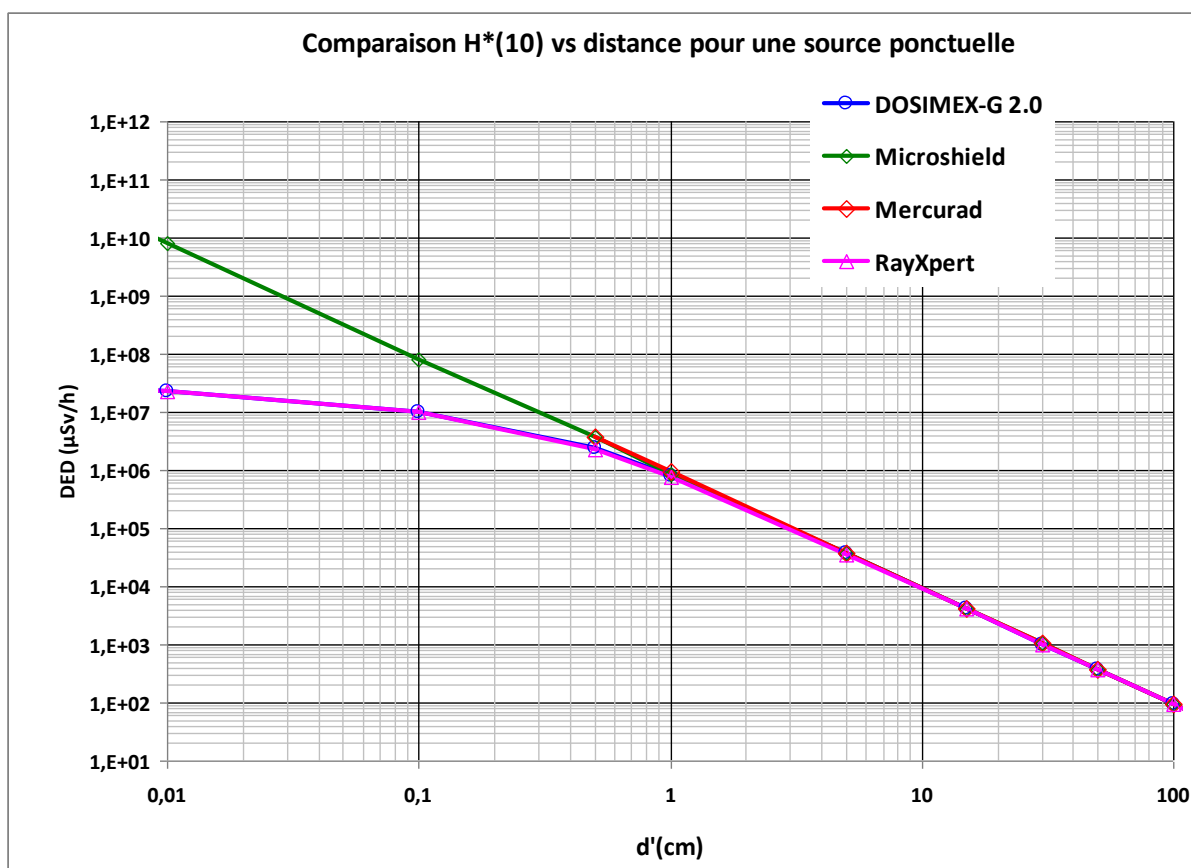


Figure 2: Boîte de dialogue DOSIMEX-GX pour source ponctuelle nue au contact 1 GBq Cs 137).

Le tableau suivant synthétise les résultats obtenus :

d(cm)	Source ponctuelle Cs 137 1 GBq H*(10) (μSv/h) vs distance				Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
	DOSIMEX-GX	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	Dosimex/μshield	Dosimex/mercurad	μShield/mercurad	Dosimex/rayXpert	μShield/rayXpert	mercurad/RayXpert
0 cm	3,68E+07	NC	NC	3,80E+07	NC	NC	NC	3,1%	NC	NC
0,001 cm	3,28E+07	7,90E+11	NC	3,60E+07	100,0%	NC	NC	8,8%	100,0%	NC
0,01 cm	2,33E+07	7,90E+09	NC	2,30E+07	99,7%	NC	NC	1,3%	99,7%	NC
0,10 cm	1,01E+07	7,90E+07	NC	9,85E+06	87,2%	NC	NC	2,7%	87,5%	NC
0,50 cm	2,39E+06	3,70E+06	3,70E+06	2,32E+06	35,4%	35,4%	0,0%	2,9%	59,5%	59,5%
1 cm	8,03E+05	8,60E+05	9,26E+05	7,80E+05	6,6%	13,3%	7,1%	2,9%	10,3%	18,7%
5 cm	3,67E+04	3,80E+04	3,70E+04	3,61E+04	3,4%	0,8%	2,7%	1,7%	5,3%	2,5%
15 cm	4113,4523	4220	4110	4050	2,5%	0,1%	2,7%	1,6%	4,2%	1,5%
30 cm	1027,0907	1053	1030	1010	2,5%	0,3%	2,2%	1,7%	4,3%	2,0%
50 cm	369,01174	378	370	373	2,4%	0,3%	2,2%	1,1%	1,3%	0,8%
100 cm	92,400735	94,5	92,6	92,7	2,2%	0,2%	2,1%	0,3%	1,9%	0,1%
150 cm	41,100145	41,9	41,2	39,8	1,9%	0,2%	1,7%	3,3%	5,3%	3,5%
200 cm	23,120046	23,5	23,16	22,6	1,6%	0,2%	1,5%	2,3%	4,0%	2,5%

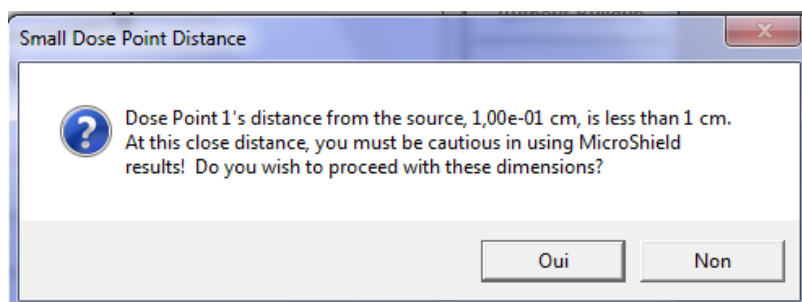
Tableau 4: Inter-comparaisons H*(10) source ponctuelle versus distance



**Grphe 5: Evolution H*(10) source ponctuelle versus distance avec MICROSHIELD®
MERCURAD™ et RayXpert©**

Les écarts relatifs entre les 4 codes sont de l'ordre de 2 % pour des distances supérieures à 1 cm. A partir de 1 cm et en deçà, les résultats donnés par MICROSHIELD® et MERCURAD™ divergent significativement des résultats de DOSIMEX-GX et RayXpert©, alors qu'entre ces deux derniers, les écarts relatifs restent de l'ordre de 3 % même en dessous de 1 cm, y compris pour une distance strictement nulle (contact).

MICROSHIELD® et MERCURAD™ effectuent un calcul selon une simple loi en $1/d^2$ qui perd de son sens pour ces faibles distances, et donnent un résultat qui tend vers l'infini lorsque la distance tend vers 0 (*effet de singularité*). MERCURAD™ ne donne plus de résultats pour des distances inférieures à 0,5 mm pour éviter de tels effets. MICROSHIELD® avertit l'utilisateur pour des distances inférieures à 1 cm :





L'application DOSIMEX-GX calcule la fluence avec une surface élémentaire de 1 cm^2 , évitant ainsi les effets de singularités (*voir méthode en détail ci-après*). Les calculs réalisés avec RayXpert, code de type Monte-Carlo, confirme que cet effet de singularité ne se produit pas lorsque la distance diminue.

Remarque : l'estimation des doses générées par une source ponctuelle en dessous d'une distance de 1 cm ne présente pas d'intérêt pratique en radioprotection, ne serait-ce que parce que les sources ne sont jamais réellement ponctuelles, et d'autre part parce que la plupart des systèmes de mesures ont des zones sensibles volumiques dont le centre effectif n'est pas en contact avec la source. Il n'en demeure pas moins qu'il est intéressant de ne pas surévaluer les débits de dose à faible distance, notamment dans le cas de sources volumiques pour lesquels il est légitime d'estimer les doses reçues pour les tissus (mains par exemple) réellement au contact.

CALCUL A TRES FAIBLES DISTANCES. METHODE MISE EN ŒUVRE PAR DOSIMEX-GX 2.0.

a) Les limites de la loi en " $1/d^2$ "

Considérons une **source ponctuelle** contenant un radionucléide émetteur de photons d'énergie E_γ et d'intensité I_γ . Le nombre de photon émis par la source durant un temps d'exposition T_{exp} est égal à : $N = A I_\gamma T_{\text{exp}}$. L'objectif est de déterminer le débit de dose générée par cette source au point P, à la distance d de la source. En traçant autour de la source une sphère virtuelle de rayon d , on peut alors énoncer :

- Qu'en l'absence d'atténuation, le nombre de photons traversant la sphère, durant le temps d'exposition, est égal au nombre N de photons émis.
- Qu'en raison de l'isotropie¹ de l'émission, la fluence moyenne sur la surface de la sphère est homogène en moyenne, et donc simplement égal au nombre N divisé par la surface de la sphère.

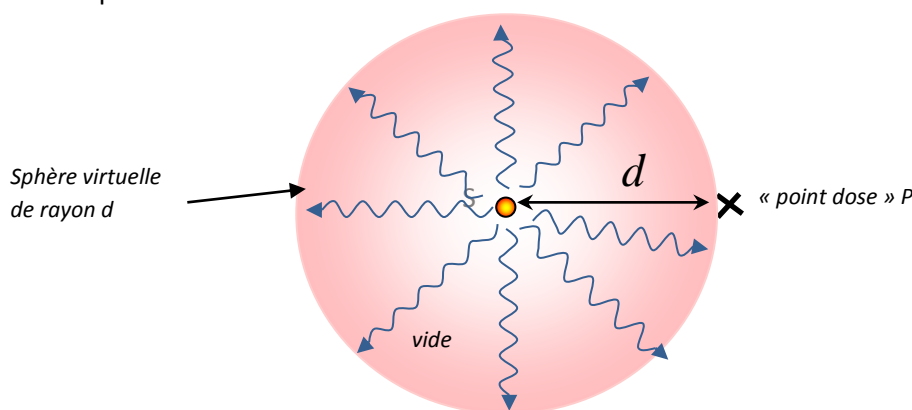


Figure 3 : Schéma radiatif avec une source ponctuelle sans atténuation

¹ Toutes les directions sont équiprobables



La surface de la sphère étant égale à $S_{\text{sphère}} = 4\pi d^2$, la fluence photonique à la distance d est égale à :

$$\Phi(P) = \frac{N}{S_{\text{sphère}}} = \frac{A I_{\gamma} T_{\text{exp}}}{4\pi d^2}$$

Le débit de fluence s'obtient en divisant par le temps d'exposition : $\varphi(P) = \frac{A I_{\gamma}}{4\pi d^2}$

On voit apparaître ici le terme en " $1/d^2$ ", bien connu des radioprotectionnistes. Plus précisément, la quantité $1/4\pi d^2$ représente le rapport :

- du nombre de photons incidents sur une surface de 1cm^2 placée à la distance d d'une source.
- au nombre total de photon émis par cette source, toujours dans l'hypothèse d'absence d'atténuation.

Cette quantité est appelée **fraction d'angle solide**² et notée $\Omega/4\pi$, Ω étant l'angle solide et 4π l'angle solide total (*voir annexe H sur les angles solides*).

Le calcul de la fraction d'angle solide par la quantité $1/4\pi d^2$ pose un problème évident : lorsque la distance d diminue, la quantité $1/4\pi d^2$ augmente très rapidement, tendant à la limite vers l'infini lorsque d tend vers zéro. Cet effet se répercute sur les estimations de dose ou de débits de dose.

Les valeurs de dose obtenues à très faible distance, très élevées, perdent de leur sens. Elles ne sont représentatives de la dose que dans un volume élémentaire très proche du point source, mais de très faible dimension. Un tel point chaud est de moins en moins représentatif de la dose moyenne réelle dans un objet étendu, voire un organe. A la limite $d = 0$, c'est-à-dire au contact de la source, la dose n'est plus calculable (*pour un mathématicien, elle est infinie !*). Plus prosaïquement, le calcul en " $1/d^2$ " n'est valable que lorsque la sphère virtuelle à une surface au moins supérieures à 1cm^2 . Dans le cas inverse, on verrait apparaître un nombre de particules incidentes par cm^2 supérieur au nombre de particules émises par la source.

Exemple numérique :

Considérons une source ponctuelle émettant 1 particule (photon ou électron) par seconde. Si l'on souhaite calculer l'équivalent de dose $H'(0,07)$ avec cette source au contact de la peau sous $70\ \mu\text{m}$ de couche morte alors le calcul direct en " $1/d^2$ " donnerait un débit de fluence égal à 1620 particules par cm^2 par seconde.

² Dans le domaine de la détection des rayonnements, elle est aussi appelée « rendement géométrique »



b) Calcul réaliste avec un détecteur non ponctuel

Pour éviter de telles **singularités**³, il faut calculer le rendement géométrique avec un disque de 1 cm² placé à une distance d centré sur l'axe source–point dose, et perpendiculaire à cet axe.

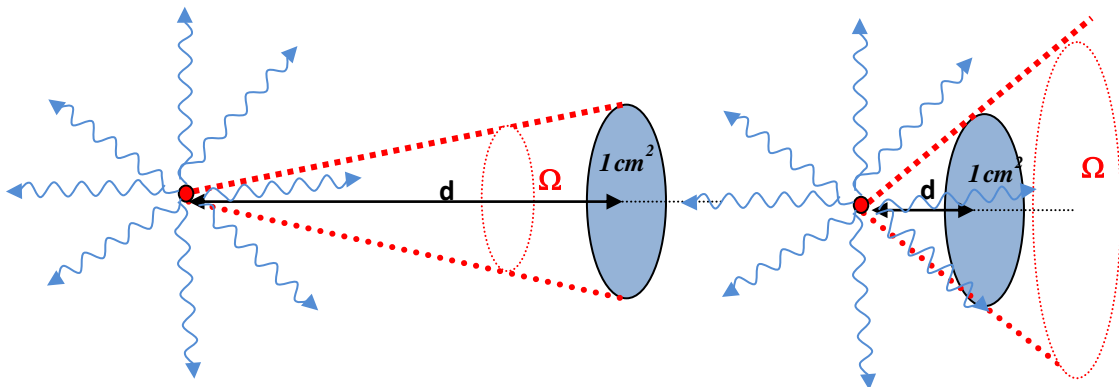


Figure 4 : Calcul de la fluence à l'aide d'une surface normalisée de 1 cm².

La fraction d'angle solide obtenue avec ce schéma (figure 4) est égale à :

$$\frac{\Omega}{4\pi}(d) = \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + \frac{1}{\pi}}} \right) \quad (\text{relation 1})$$

Cette expression est équivalente à l'expression $1/4\pi d^2$ lorsque la distance d est supérieure à quelques centimètres (voir annexe H), mais évite l'effet de singularité lorsque l'on se rapproche de la source. Elle permet de plus de pouvoir calculer une fraction d'angle solide au contact, évitant ainsi l'apparition d'infinis mathématiques :

$$\frac{\Omega}{4\pi}(d=0) = 0,5 (50\%)$$

Elle est de plus cohérente :

- Avec les conceptions de la CIPR, puisqu'elle revient à calculer une dose « point chaud » sur une surface minimale de 1 cm² dans tous les cas de figure.
- Avec les méthodes employées dans les calculs de type Monte-Carlo, qui nécessite de modéliser des pseudo-détecteurs volumiques. Entre autres, les calculs effectués dans la simulation RayXpert© met en œuvre un cylindre mince (h=0,01 mm) de surface de 1 cm² (rayon $r_0 = 0,564$ cm, voir figure 5 ...)

³ En physique, une **singularité** est un point au voisinage duquel certaines grandeurs deviennent infinies. Un trou noir est une singularité gravitationnelle (voir partie 1 §5.2).

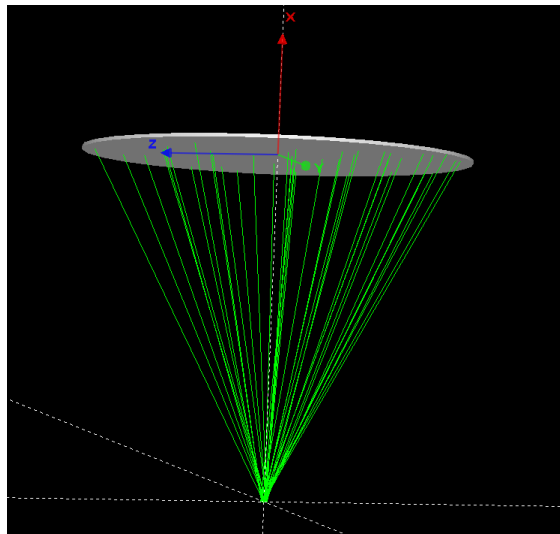


Figure 5 : détecteur normalisé de 1 cm² et d'épaisseur 0,01 mm à une distance de 1 cm, éclairage homogène. Tracking réalisé avec RayXpert© (avec accord de la Société TRAD)

Exemple numérique :

En reprenant le cas de la source ponctuelle émettant 1 particule par seconde, la relation 2 permet d'obtenir une première estimation plus réaliste de l'ordre de 0,49 particule incidente par cm².

c) Correction des effets angulaires pour le calcul de la fluence

La relation 1 permet de calculer le rendement géométrique pour un détecteur normalisée de 1 cm². Elle permet de calculer le nombre de particules atteignant le détecteur par unité de surface, valeur qui correspondrait par exemple à la valeur de comptage réelle obtenue avec des particules chargées. Pour mesurer une dose, il faut tenir compte des effets angulaires. En effet une particule incidente avec un angle α (écart à l'incidence normale) effectue un parcours $h' = h/\cos\alpha$ dans un détecteur d'épaisseur h . Cet effet est pris en compte dans la définition de la fluence au sens de Chilton (*voir annexe A*)

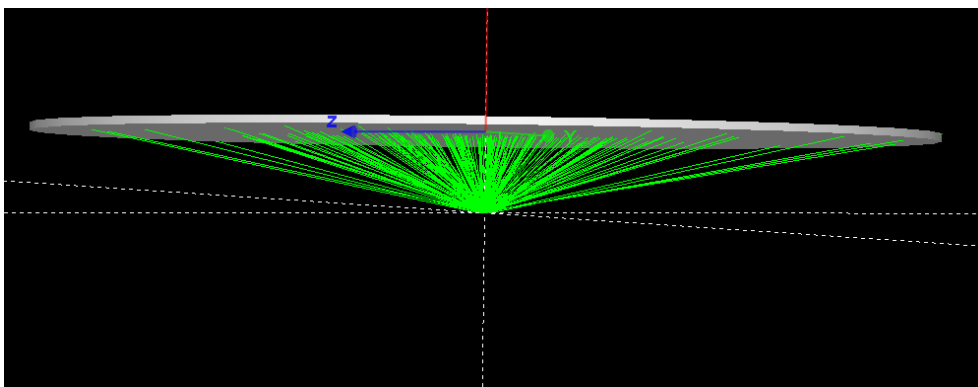


Figure 6 : détecteur normalisé à 0,1 cm. Tracking réalisé avec RayXpert (avec accord de la Société TRAD)



Calcul du cosinus moyen de l'angle d'incidence : $\overline{\cos\alpha} = \int_0^{\alpha_{\max}} \cos\alpha \, dS / \int_0^{\alpha_{\max}} dS$ avec $dS = 2\pi y \, d\alpha$ et

$y = d \operatorname{tg}\alpha$ soit $\overline{\cos\alpha} = \int_0^{\alpha_{\max}} \cos\alpha \operatorname{tg}\alpha \, d\alpha / \int_0^{\alpha_{\max}} \operatorname{tg}\alpha \, d\alpha$. On obtient tout calcul fait :

$\overline{\cos\alpha} = \frac{\cos\alpha_{\max} - 1}{\ln(\cos\alpha_{\max})}$ soit un coefficient de correction angulaire :

$$FC = \frac{1}{\overline{\cos\alpha}} = \frac{\ln(\cos\alpha_{\max})}{\cos\alpha_{\max} - 1} \quad (\text{relation 2})$$

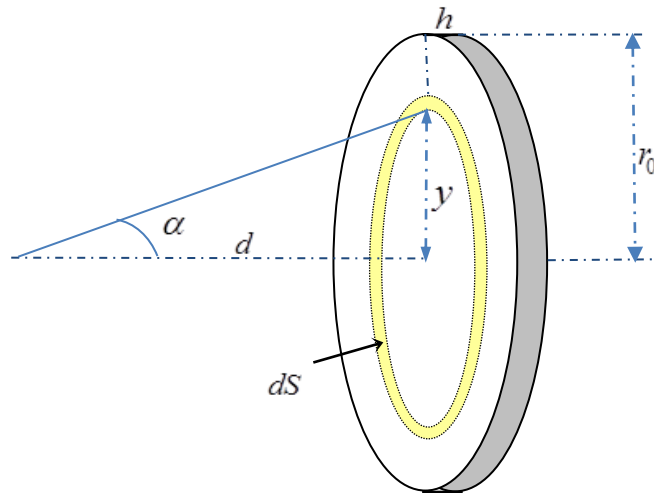


Figure 7 : schéma d'intégration pour le calcul du cosinus moyen

Détermination de l'angle maximum :

Cet angle tient compte de l'épaisseur non nulle h du détecteur, évitant ainsi un facteur de correction infini pour un calcul au contact : $\alpha_{\max}(d) = \operatorname{Arctg}\left(\frac{r_0}{d+h}\right)$. Cette relation reste assez peu sensible à la valeur de h pour des distances $d > h$.

Le choix fait dans Dosimex est $h = 0,001 \text{ cm}$, soit $\alpha_{\max}(d) = \operatorname{Arctg}\left(\frac{0,564}{d+0,001}\right)$

La fonction permettant d'évaluer la fluence particulaire au sens de Chilton utilisée dans Dosimex-G 2.0 s'écrit :

$$\varphi(P) = A I_v \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + \frac{1}{\pi}}} \right) \frac{\ln(\cos\alpha_{\max})}{\cos\alpha_{\max} - 1} \quad (\text{relation 3})$$

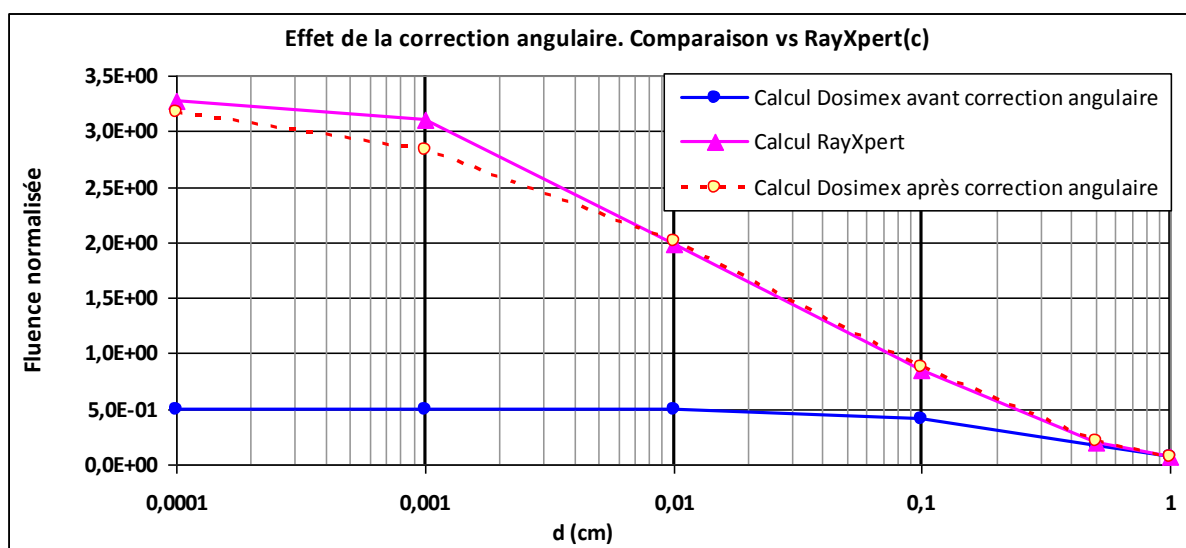
La correction angulaire n'existait pas dans les versions précédentes de Dosimex-GX.



Application numérique pour un taux d'émission de 1 photon par seconde sous 4π ($A I_\gamma = 1$) :

Débit de fluence (gamma/cm ² /s) normalisé à 1 gamma émis par s sous 4pi					
Distance (cm)	rendement géométrique (relation 1)	Correction angulaire FC (relation 2)	Fluence Chilton (relation 3)	RayXpert®	Ecart relatif
0	5,00E-01	6,35	3,17E+00	3,28E+00	-3%
0,001	5,00E-01	5,66	2,83E+00	3,10E+00	-9%
0,01	5,00E-01	4,02	2,01E+00	1,98E+00	1%
0,1	4,14E-01	2,11	8,72E-01	8,49E-01	3%
0,5	1,69E-01	1,22	2,06E-01	2,00E-01	3%
1	6,47E-02	1,07	6,92E-02	6,73E-02	3%
2	1,88E-02	1,02	1,92E-02	1,87E-02	2%
5	3,16E-03	1,00	3,17E-03	3,11E-03	2%

Tableau 5 : méthode de calcul source ponctuelle avec correction angulaire



Graphe 6



SYNTHESE DES RESULTAT SCENARIO 2

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

Distances supérieures à 1 cm

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 3 %
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 2 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 3 %

Toutes distances confondues lorsqu'elles sont calculées

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 29 %
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 6 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 2 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT© V 1.4

Distances supérieures à 1 cm

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 2 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4: écart moyen 5 %
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : écart moyen 4 %.

Toutes distances confondues lorsqu'elles sont calculées

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 2,6 % (calculée jusqu'à 0 cm)
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4: écart moyen 32 % (calculée jusqu'à 0,01 cm)
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : écart moyen 10 % (calculée jusqu'à 0,5 cm)

- Moyenne totale sur l'ensemble des écarts : 15 %
- Après suppression des valeurs aberrantes : 4 %

En dehors des distances inférieures à 1 cm, on constate que les écarts sont faibles entre les 4 codes, de l'ordre de 3 %. La méthode originale mise en œuvre par Dosimex-GX 2.0 évite l'apparition de valeurs élevées non réalistes, très proches des résultats donnés par une simulation Monte-Carlo sur un détecteur non ponctuel.



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

Pour mettre en évidence cet impact, les calculs ont été réalisés avec des sources ponctuelles. Les calculs du débit d'équivalent de dose $H^*(10)$ ont été effectués à 100 cm de la source de 1 GBq pour les radionucléides suivants:

1. Américium 241
2. Césium 137,
3. Cobalt 60.

Ce choix permet de couvrir une gamme énergétique standard comprise entre 60 keV et 1300 keV. Les calculs ont été effectués tout d'abord sans écran puis ensuite avec différents types d'écrans :

- 2 cm de plomb
- 10 cm d'aluminium
- 50 cm d'eau

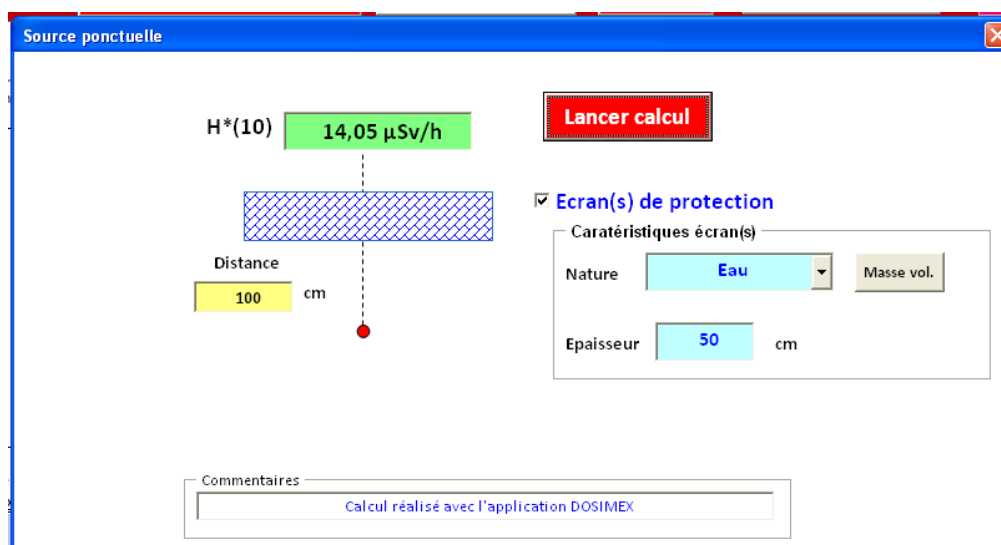


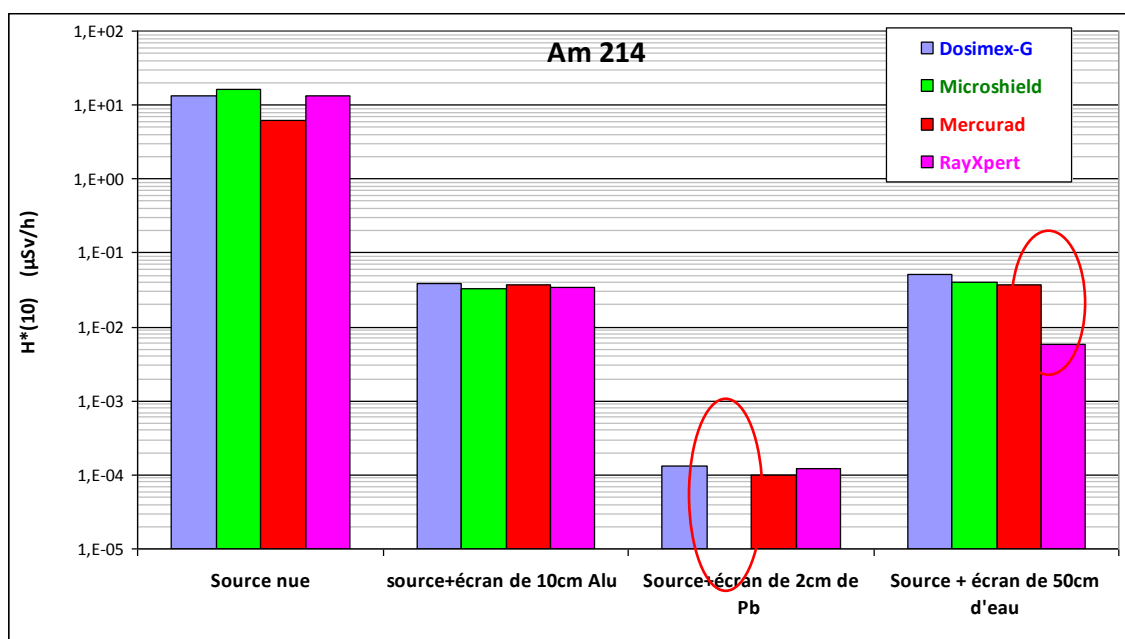
Figure 8: Boîte de dialogue DOSIMEX-GX pour source ponctuelle (1 GBq Cs 137).
+ écran eau 50 cm

Pour être cohérent avec la méthode utilisée par le logiciel MICROSIELD®, seul le build-up de Taylor est utilisé avec DOSIMEX-GX dans cette étude, sauf cas particuliers précisés plus loin.

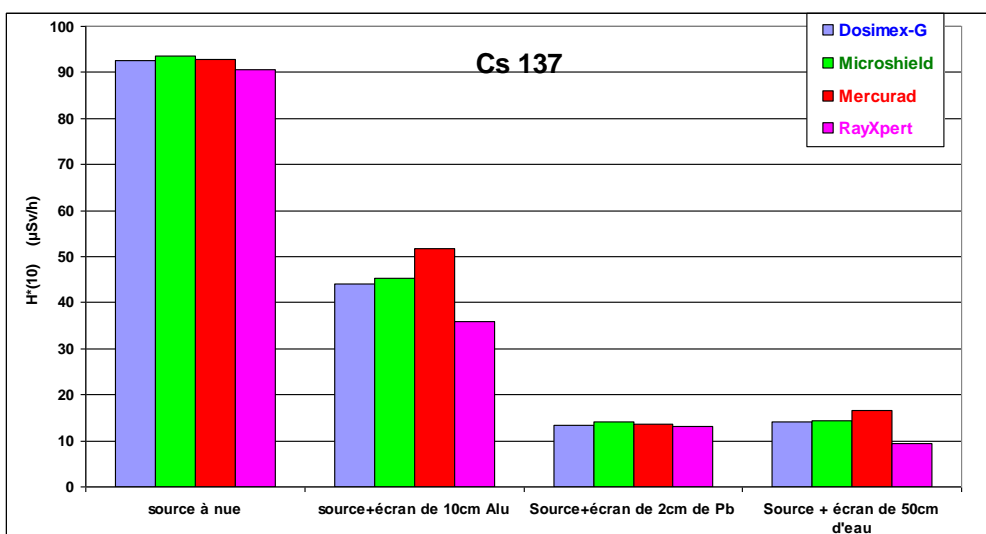


Source ponctuelle 1 GBq à 100 cm + écran H*(10) (µSv/h)						Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
RN	Configuration	DOSIMEX-G 2.0	Microshield	MERCURAD™	RayXpert®	Dosimex/ µshield	Dosimex/ mercurad	µShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	µShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
Am 241	Source nue	13,4	16	6,1	13,3	16,3%	54,5%	61,9%	0,8%	20,3%	54,1%
	source+écran de 10cm Alu	3,80E-02	3,30E-02	3,70E-02	3,49E-02	15,2%	2,7%	10,8%	8,9%	5,4%	6,0%
	Source+écran de 2cm de Pb	1,30E-04	7,40E-21	1,00E-04	1,23E-04	100,0%	30,0%	100,0%	5,7%	100,0%	18,7%
	Source + écran de 50cm d'eau	5,10E-02	4,09E-02	3,75E-02	5,80E-03	24,7%	36,0%	9,1%	88,6%	85,8%	84,5%
Cs 137	source à nue	92,5	93,6	92,8	90,7	1,2%	0,3%	0,9%	2,0%	3,2%	2,3%
	source+écran de 10cm Alu	44	45,3	51,7	35,9	2,9%	14,9%	12,4%	22,6%	26,2%	44,0%
	Source+écran de 2cm de Pb	13,3	14,16	13,7	13,1	6,1%	2,9%	3,4%	1,5%	8,1%	4,6%
	Source + écran de 50cm d'eau	14	14,4	16,5	9,33	2,8%	15,2%	12,7%	50,1%	54,3%	76,8%
Co 60	source à nue	349	347	353	352	0,6%	1,1%	1,7%	0,9%	1,4%	0,3%
	source+écran de 10cm Alu	203	192	210	181	5,7%	3,3%	8,6%	12,2%	6,1%	16,0%
	Source+écran de 2cm de Pb	143	141	152	146	1,4%	5,9%	7,2%	2,1%	3,4%	4,1%
	Source + écran de 50cm d'eau	80	76,1178	87	60	5,1%	8,0%	12,5%	33,3%	26,9%	45,0%

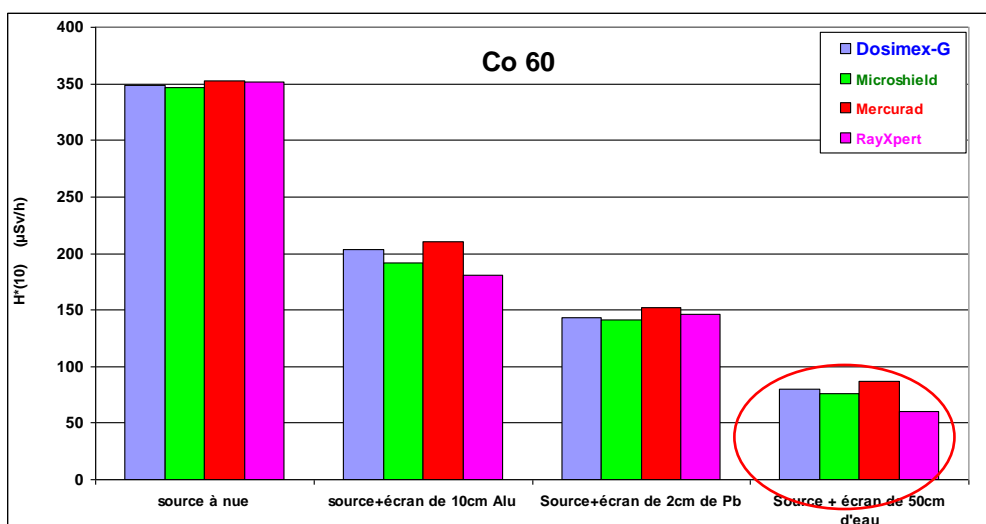
Tableau 6: Débit de dose sources ponctuelles + écran



Graphe 7



Graphe 8



Graphe 9



SYNTHESE DES RESULTAT SCENARIO 3

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 15 %

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 15 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 20 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPert© V 1.4

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 19 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4: écart moyen 28 %.
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : écart moyen 30 %.

- Moyenne totale sur l'ensemble des écarts : 21 %
- Après suppression des valeurs aberrantes : 10 %

Conclusion : Des écarts importants apparaissent :

Avec l'américium 241 entre Microshield® et les autres logiciels. Ces écarts sont pour l'essentiel liés à des différences dans les tables d'émissions gamma et X. Microshield® ne prend en compte que les émissions de faibles énergies de l'américium 241, effectivement prédominantes en termes de dose en l'absence de tout écran. Avec la présence d'écran, notamment de plomb, ces émissions sont rapidement et quasi-totalement atténuées (*atténuation égale à $3 \cdot 10^{-4}$ avec 1 mm de Pb seulement*). Seules les émissions de faibles intensités, mais de fortes énergies, contribuent alors à la dose. Ces émissions étant absentes dans la base Microshield®, le facteur d'erreur est astronomique (10^{21}).

Avec l'Américium toujours avec l'écran de 50 cm d'eau : on constate une surestimation des DED entre les 3 codes déterministes et RayXpert. Cette surestimation provient une fois de plus l'utilisation du Buid-up infini, égal par exemple à 144 pour le 59 keV dans 50 cm d'eau.

Nota : on retrouve ici le facteur 2 existant entre le résultat donné par Mercurad™ et les autres codes, pour la source Am241 nue (cf. scenario1). Rappelons que cet écart provient de la non prise en compte des émissions XL et gamma de faibles énergies regroupées autour de 17 keV et une intensité totale élevée de l'ordre de 40 %. Plus encore que pour l'émission de 59 keV, cette émission disparaît rapidement en présence du moindre écran.

D'autres différences significatives apparaissent pour les 3 codes déterministes par rapport à la valeur donnée par RayXpert© avec le cas de la source de Césium 137 avec un écran de 50 cm d'eau.



L'origine de ces écarts positifs (surestimation) provient de la mise en œuvre dans ces codes déterministes de facteur de correction de build-up majorants. En effet ces facteurs prennent en compte une situation où pour une épaisseur donnée, les effets de reconstruction du faisceau sont majorants : écran d'épaisseur « infinie », source et point dose collés à l'écran.

SCENARIO 4 : COMPARAISONS BUILD-UP CALCULES PAR DOSIMEX-GX 2.0 ET MICROSHIELD® :

ECRAN MONOCOUCHE

$\mu.x$	BU Ecran Eau ($\rho=1$)			BU Ecran Beton ($\rho=2,35$)			BU Ecran Fer ($\rho=7,86$)			BU Ecran Plomb ($\rho=11,34$)		
	1,25 MeV	0,6 MeV	0,25 MeV	1,25 MeV	0,6 MeV	0,25 MeV	1,25 MeV	0,6 MeV	0,25 MeV	1,25 MeV	0,6 MeV	0,25 MeV
2	3,3	4,5	7,2	3,0	3,8	4,8	2,7	3,1	2,8	1,7	1,5	1,2
6	10,8	20,8	51,3	9,1	14,3	20,3	7,6	9,5	7,0	2,9	2,0	1,3
10	20,9	49,3	162,9	17,3	31,8	48,8	14,0	19,0	12,1	4,0	2,4	1,4
15	36,7	104,0	449,8	30,0	63,6	107,9	23,7	34,8	19,5	5,4	2,8	1,5
20	55,5	179,0	979,1	44,9	107,0	199,3	34,9	54,8	27,9	6,8	3,1	1,5

MICROSHIELD®												
$\mu.x$	BU Ecran Eau ($\rho=1$)			BU Ecran Beton ($\rho=2,35$)			BU Ecran Fer ($\rho=7,86$)			BU Ecran Plomb ($\rho=11,34$)		
	1,25 MeV	0,60 MeV	0,25 MeV	1,25 MeV	0,60 MeV	0,25 MeV	1,25 MeV	0,60 MeV	0,25 MeV	1,25 MeV	0,60 MeV	0,25 MeV
2	3,4	4,6	7,4	3,1	3,9	5	2,8	3,1	2,9	1,7	1,5	1,2
6	10,6	21	51,3	9,1	14,4	21	7,6	9,6	7,2	2,9	2	1,3
10	20,3	49,6	161,1	17,1	32	50,8	13,9	19,1	12,3	4,1	2,4	1,3
15	35,1	104,3	438,3	29,2	63,9	113,1	23,5	34,9	19,6	5,4	2,8	1,4
20	52,3	179,3	942,5	43,3	107,3	210,8	34,4	55	27,6	6,8	3,1	1,4

Tableau 7: Valeurs de build-up pour DOSIMEX-GX et MICROSHIELD®

ECART MOYEN ENTRE BUILD-UP MICROSHIELD® ET BUILD-UP DOSIMEX-GX : **2 %**

Ces écarts peu significatifs sont liés à des méthodes d'interpolation différentes entre les mêmes valeurs issues de l'ANSI/ANSI 6.4.3 (1993).

Dans une version précédente de DOSIMEX, des écarts plus importants apparaissaient, à faible énergies et dans des milieux de faible Z, entre les build-up de DOSIMEX et MICROSHIELD®, malgré la référence commune au document ANSI/ANS.

Cela était possible car ce document propose différentes méthodes pour calculer le build-up. Entre autres, les tables n°5.2 de l'ANSI/ANS proposent de calculer ces build-up à partir d'une modélisation de Taylor. Les paramètres de ces modèles sont calculés à partir de valeurs tabulées de build-up présentées dans le même document (tables n° 3). La première version de DOSIMEX mettait en œuvre les modélisations de Taylor, alors que MICROSHIELD® utilise directement une interpolation cubique entre les valeurs tabulées de build-up.

Dans la version actuelle, DOSIMEX utilise une interpolation logarithmique entre ces mêmes valeurs, ce qui explique la faible différence sur l'ensemble des valeurs. Par abus de langage, la référence aux build-up de l'ANSI/ANS est toujours appelée « Modèle de Taylor » dans DOSIMEX-GX 2.0.



ECRANS MULTICOUCHES

La méthode utilisée ici permet de prendre en compte un grand nombre d'écran ; le principe repose sur la méthode de l'écran équivalent :

On calcule pour une énergie donnée dans chaque écran « i » le nombre de longueur d'atténuation μx_i . On prend ensuite comme matériau équivalent celui pour lequel ce nombre est maximum. Puis est défini un écran dans ce même matériau avec une épaisseur correspondant à la somme des μx_i de tous les écrans.

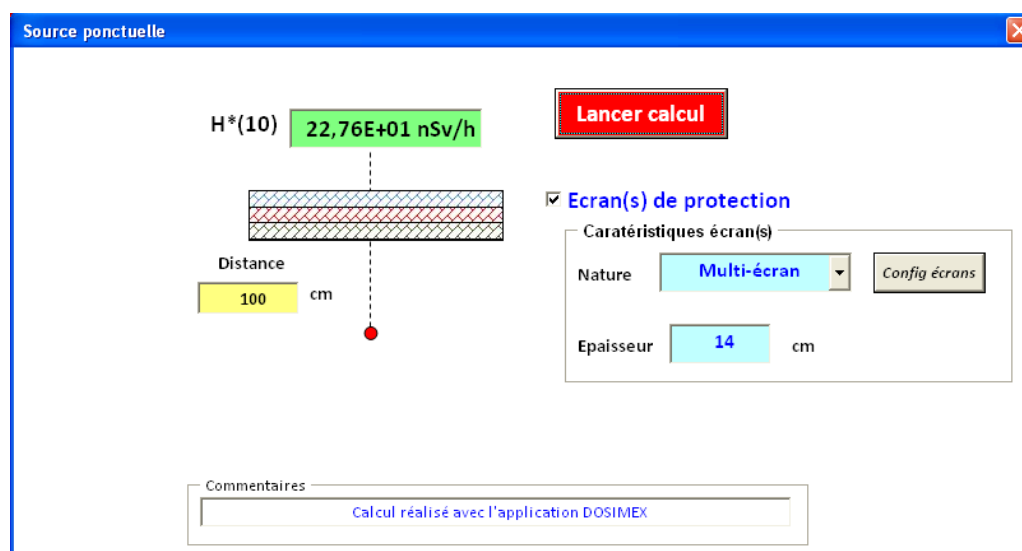


Figure 9: Boîte de dialogue DOSIMEX-GX pour source ponctuelle+ multi-écran .

Comparaison par rapport à MICROSHIELD® avec des radionucléides sensiblement monoénergétiques :

	Radionucléide	Choix Microshield©	BU Microshield©	BU Dosimex
50 cm eau /50 cm Al	Co 57	Al	52	51
50 cm eau /0,2 cm Pb	Co 57	Eau	14	12
20 cm béton /3 cmPb	Co 60	Béton	6.6	6.6
10 cm eau /3 cm Fe/1 cm Pb	Co 57	Fer	5.33	5.33
	Cs 137	Fer	5.46	5.48
	Co 60	Fer	3.26	3.34

Tableau 8

Les résultats entre ces deux codes sont très proches. On notera toutefois que MICROSHIELD® demande à l'utilisateur de définir le matériau équivalent, qui sera alors le même à toutes les énergies. Dans DOSIMEX-GX, ce choix n'est pas arbitraire mais résulte d'un calcul. Le choix du matériau équivalent est alors susceptible de varier d'une énergie à l'autre. Cette méthode permet de limiter considérablement les erreurs d'estimations du build-up final.

SCENARIO 5 : INFLUENCE DE LA GEOMETRIE SOURCE

Différentes géométries de sources ont été comparées :

1. une source linéaire de 100 cm de longueur,
2. une source disque de 100 cm de rayon,
3. une source cylindrique de 10 cm de rayon et 20 cm de hauteur constituée d'aluminium ;

Les calculs ont été effectués pour trois sources radioactives de 1 GBq respectivement d'américium 241, césium 137 et cobalt 60, toujours à une distance de 100 cm.

Pour les sources cylindriques, deux résultats de débit d'équivalent de dose sont fournis par DOSIMEX-GX, l'un perpendiculaire à l'axe de révolution (*point 1*) avec un décalage nul (*voir manuel sur la fonction « décalage »*) et l'autre sur l'axe de révolution (*point 2*)

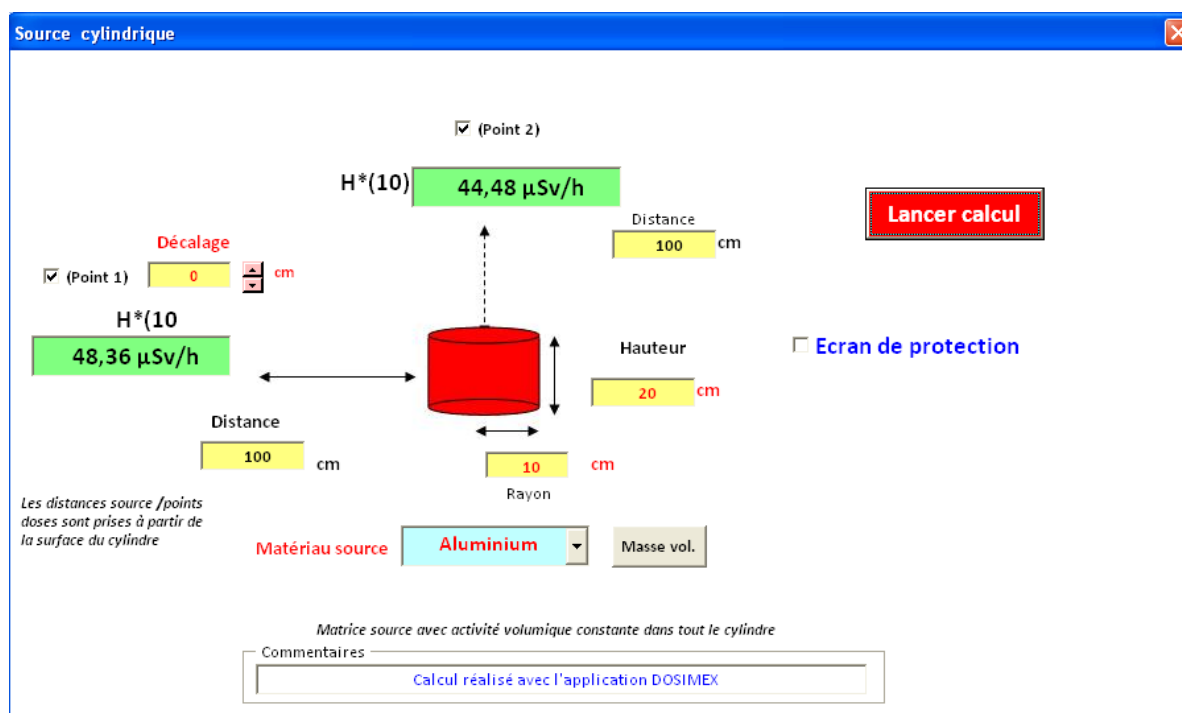


Figure 10: Boîte de dialogue DOSIMEX-GX pour source cylindrique (1 GBq Cs 137) avec décalage nul



Source 1 GBq, d=100 cm H*(10) (μSv.h-1)					Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
Config.	Dosimex-G	Microshield	Mercurad	RayXpert©	Dosimex/ μshield	Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	μShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
Am 241	Fil	12,45	6,2	5,7	11,9			8,8%	4,6%	
	Disque	9,32	4,7	4,3	9,5			9,3%	1,9%	
	Cylindre Pt1	0,94	0,9	0,96	0,77	4,4%	2,1%	6,2%	22,1%	16,9%
	Cylindre Pt2	0,74	0,89	0,84	0,69	16,9%	11,9%	6,0%	7,2%	29,0%
Cs 137	Fil	86	75	86	83	14,7%	0,0%	12,8%	3,6%	9,6%
	Disque	64	65	64	63	1,5%	0,0%	1,6%	1,6%	3,2%
	Cylindre Pt1	48	44	50	41	9,1%	4,0%	12,0%	17,1%	7,3%
	Cylindre Pt2	44	42	46	37	4,8%	4,3%	8,7%	18,9%	13,5%
Co 60	Fil	323	322	327	326	0,3%	1,2%	1,5%	0,9%	1,2%
	Disque	242	240	245	244	0,8%	1,2%	2,0%	0,8%	1,6%
	Cylindre Pt1	195	186	188	173	4,8%	3,7%	1,1%	12,7%	7,5%
	Cylindre Pt2	185	173	206	156	6,9%	10,2%	16,0%	18,6%	10,9%

Tableau 9 : Débit de dose sources de géométries diverses et comparaisons avec MICROSHIELD® et MERCURAD™



SYNTHESE DES RESULTAT SCENARIO 6

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

(entre parenthèse les résultats hors cas aberrants avec l'Am 241)

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 14 % (6 %)
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 12 % (4 %)
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 7 % (7 %)

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT© V 1.4

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 9 % (9 %)
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4: : écart moyen 17 %. (10 %)
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : : écart moyen 20 %.(14 %)

- **Moyenne totale sur l'ensemble des écarts : 13% (9 %)**

On retrouve, avec la source fil et disque, le problème rencontré avec l'Am 241 pour lequel Microshield® et Mercurad™ ne prennent pas en compte les émissions XL de faibles énergies mais de forte intensité. Ce problème disparaît avec la source volumique en raison de l'autoabsorption importante pour ces énergies. En dehors de ce cas déjà signalé et identifié, on constate un bon accord pour ces différentes géométries entre ces 4 codes.

SCENARIO 6 : COUPLAGES SOURCES VOLUMIQUES + ECRAN

Des comparaisons ont été réalisées avec des sources cylindriques de plus grandes dimensions en l'absence puis en présence d'écran :

- Source cylindrique de 100 cm de hauteur et de 20 cm de rayon en aluminium
- Ecrans :
 - 10 cm d'aluminium ;
 - 2 cm de plomb ;
 - 15 cm d'eau.
- Radionucléides : 1 GBq de Césium 137 puis de Cobalt 60
- Point dose à 100 cm de la surface du cylindre

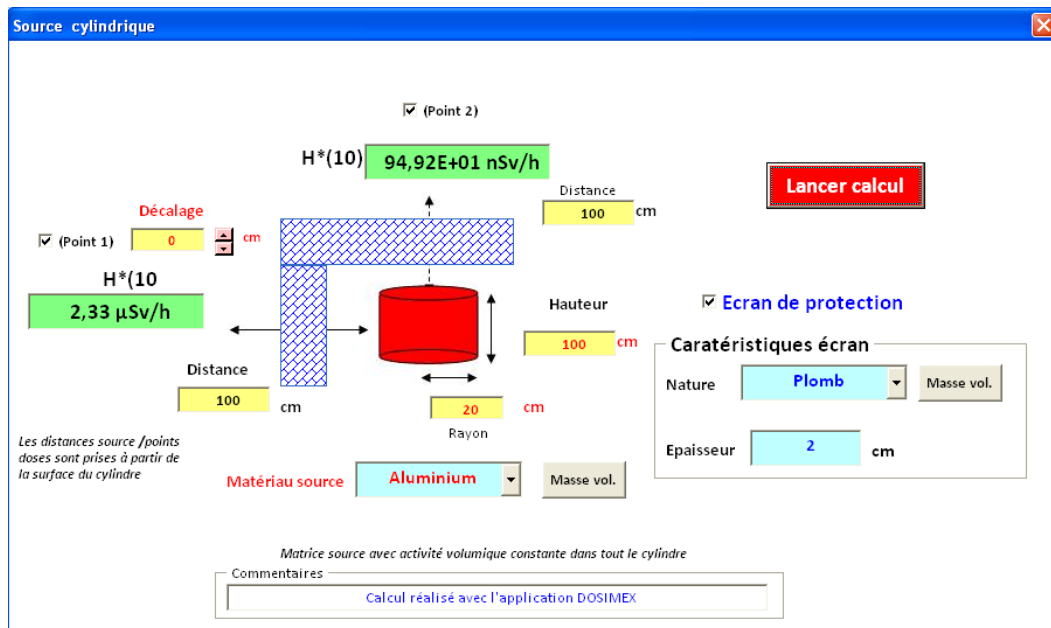


Figure 11: Boite de dialogue DOSIMEX-GX pour source cylindrique 1 GBq Cs 137+ 2 cm Pb.

Source	Conf.	H*(10) (µSv/h)				Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
		DOSIMEX-GX	Microshield	Mercurad	RayXpert®	Dosimex/ µshield	Dosimex/ mercurad	µShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	µShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
		Latéral	latéral	latéral	latéral						
Cs137	Source nue	24	22	24	21,5	9,1%	0,0%	8,3%	11,6%	2,3%	11,6%
	Source + 2cm de Pb	2,3	4,1	1,7	1,8	43,9%	35,3%	58,5%	27,8%	56,1%	5,6%
	Source + 15 cm d'eau	14	11	15	10	27,3%	6,7%	26,7%	40,0%	10,0%	50,0%
Co60	Source à nue	101	96	104	90	5,2%	2,9%	7,7%	12,2%	6,7%	15,6%
	Source + 2cm de Pb	32	44	29	28	27,3%	10,3%	51,7%	14,3%	57,1%	3,6%
	Source + 15m d'eau	68	55	69	50,10	23,6%	1,4%	20,3%	35,7%	9,8%	37,7%

Tableau 10 : Débit de dose sources cylindriques + écran calculé latéralement (point 1)



Source	Configuration	H*(10) (µSv/h)				Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
		DOSIMEX-GX	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert©	Dosimex/ µshield	Dosimex/ mercurad	µShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	µShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
		Axe cyl.	Axe cyl.	Axe cyl	Axe cyl.						
Cs137	Source nue	9,6	9	7,6	8,3	6,7%	26,3%	18,4%	15,7%	8,4%	8,4%
	Source + 2cm de Pb	0,95	2,4	0,72	0,71	60,4%	31,9%	70,0%	33,8%	70,4%	1,4%
	Source + 15 cm d'eau	5,7	4,7	6,4	4,2	21,3%	10,9%	26,6%	35,7%	11,9%	52,4%
Co60	Source à nue	40	39	35	36	2,6%	14,3%	11,4%	11,1%	8,3%	2,8%
	Source + 2cm de Pb	13	18	12	11	27,8%	8,3%	50,0%	18,2%	63,6%	9,1%
	Source + 15m d'eau	27	22	29	21	22,7%	6,9%	24,1%	28,6%	4,8%	38,1%

Tableau 11 : Débit de dose sources cylindriques+ écran calculé sur l'axe central

SYNTHESE DES RESULTAT SCENARIO 7

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 24 %
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 13 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 56 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT© V 1.4

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 24%
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4:: écart moyen 50 %.
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : : écart moyen 20 %.

- Moyenne totale sur l'ensemble des écarts : 23 %
- Après suppression des valeurs aberrantes : 16 %

Microshield® surestime le débit de dose avec l'écran de 2 cm de plomb d'un facteur de l'ordre de 3 avec le Cs 137 et 1,6 avec le Cobalt 60. De façon générale on constate une surestimation des 3 codes déterministes vs RayXpert liée à une surestimation du build-up dans un écran.



SCENARIO 7 : INFLUENCE DU MATERIAU

Ces comparaisons ont été réalisées pour :

- Valider la géométrie sphérique
- Tester les différents matériaux mis en œuvre (13 matériaux prédéfinis dans la norme ANSI)
- Comparer le build-up de Taylor avec le build-up de Berger linéaire.

La configuration est :

- sphère pleine de rayon 20 cm
- point dose à 100 cm du bord de la sphère
- 1 GBq de Co60.

Calcul débit de dose Sphère

La distance source /point dose est prise à partir de la surface de la sphère

$H^*(10)$ 184,65 $\mu\text{Sv/h}$

Lancer calcul

Distance 100 cm

Rayon intérieur 0 cm

Rayon extérieur 20 cm

Matériau source Eau Masse vol.

Ecran de protection

Sphère pleine ($R_{\text{int.}}=0$) : matrice source avec activité volumique constante.
Sphère creuse ($R_{\text{int.}}>0$) : activité volumique constante dans la couronne . la partie interne est considérée comme vide.

Commentaires
Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

Figure 12: Boite de dialogue DOSIMEX-GX pour source sphérique eau (1 GBq Co 60).

Les différents matériaux sont mis en œuvre avec leur masse volumique de référence (modifiables dans DOSIMEX-GX).



Matériau (masse vol. réf.)	H*(10) (μSv/h)				Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
	Dosimex- BU Taylor	Microshield	Mercurad™	RayXpert®	Dosimex/ μshield	Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	μShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
Air (1,3.10 ⁻³)	244	243	247	244	0,4%	1,2%	1,6%	0,0%	0,4%	1,2%
Eau (1)	184	180	191	170	2,2%	3,7%	5,8%	8,2%	5,9%	12,4%
Aluminium (2,7)	107	108	118	102	0,9%	9,3%	8,5%	4,9%	5,9%	15,7%
Béton (2,35)	117	116	126	114	0,9%	7,1%	7,9%	2,6%	1,8%	10,5%
Fer(7,86)	36	40	44	42	10,0%	18,2%	9,1%	14,3%	4,8%	4,8%
Plomb (11,34)	16	19	21	18	15,8%	23,8%	9,5%	11,1%	5,6%	16,7%
Uranium (19)	8	10	11	10	20,0%	27,3%	9,1%	20,0%	0,0%	10,0%
Beryllium (1,85)	174	NC	181	150	NC	3,9%	NC	16,0%	NC	20,7%
Carbone (2,25)	133	131	141	115	1,5%	5,7%	7,1%	15,7%	13,9%	22,6%
Sodium (0,97)	191	NC	200	171	NC	4,5%	NC	11,7%	NC	17,0%
Silicium (2,2)	121	NC	134	115	NC	9,7%	NC	5,2%	NC	16,5%
Tunstène (19,25)	10	12	13	13	16,7%	23,1%	7,7%	23,1%	7,7%	0,0%
Etain (6,52)	41	44	49	45	6,8%	16,3%	10,2%	8,9%	2,2%	8,9%

Tableau 12 : Débit de dose source sphérique vs matériaux. Build-up de Taylor



H*(10) (μSv/h) Build-up de Berger					Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
Matériau (masse vol. réf.)	Dosimex- GX BU Berger	Microshiel d*	Mercurad™	RayXpert©	Dosimex/ μshield	Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	μShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
Air (1,3.10 ⁻³)	243	243	247	244	0,0%	1,6%	1,6%	0,4%	0,4%	1,2%
Eau (1)	180	180	191	170	0,0%	5,8%	5,8%	5,9%	5,9%	12,4%
Aluminium (2,7)	105	108	118	102	2,8%	11,0%	8,5%	2,9%	5,9%	15,7%
Béton (2,35)	117	116	126	114	0,9%	7,1%	7,9%	2,6%	1,8%	10,5%
Fer(7,86)	38	40	44	42	5,0%	13,6%	9,1%	9,5%	4,8%	4,8%
Plomb (11,34)	24	19	21	18	26,3%	14,3%	9,5%	33,3%	5,6%	16,7%
Uranium (19)	13	10	11	10	30,0%	18,2%	9,1%	30,0%	0,0%	10,0%
Beryllium (1,85)	148	NC	181	150	NC	18,2%	NC	1,3%	NC	20,7%
Carbone (2,25)	119	131	141	115	9,2%	15,6%	7,1%	3,5%	13,9%	22,6%
Sodium (0,97)	193	NC	200	171	NC	3,5%	NC	12,9%	NC	17,0%
Silicium (2,2)	121	NC	134	115	NC	9,7%	NC	5,2%	NC	16,5%
Tunstène (19,25)	14	12	13	13	16,7%	7,7%	7,7%	7,7%	7,7%	0,0%
Etain (6,52)	49	44	49	45	11,4%		10,2%	8,9%	2,2%	8,9%

Tableau 13 : Débit de dose source sphérique vs matériaux. Build-up de Berger

SYNTHESE DES RESULTAT SCENARIO 8

Avec le build-up de TAYLOR

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES » (BU DE TAYLOR)

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 8 %
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 12 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 8 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT© V 1.4

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 11 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4: écart moyen 5 %.
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : écart moyen 12 %.



Avec le build-up de BERGER

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES » (**BU DE BERGER**)

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 10 %
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 10 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 8 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT© V 1.4

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4 : écart moyen 10 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4 : écart moyen 5 %.
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : écart moyen 12 %.

- Moyenne totale sur l'ensemble des écarts : 9,3 %
- Aucune valeur aberrante

Ces résultats montrent une bonne cohérence entre les 4 codes pour les matériaux utilisés. Les calculs effectués avec le build-up de Berger linéaire montrent que, malgré sa grande rusticité, les résultats obtenus dans cette configuration sont tout autant recevables.

ILLUSTRATION DES EFFETS DE BUILD-UP

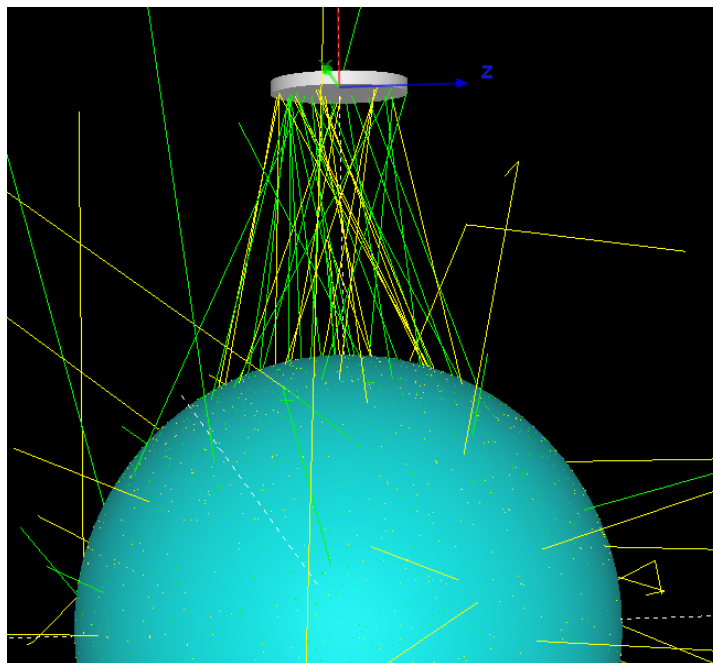


Figure 13 : Tracking RayXpert avec une sphère en eau.

Les traits jaunes montrent les photons secondaires diffusés en proportions importantes (build-up moyen de 2,2).

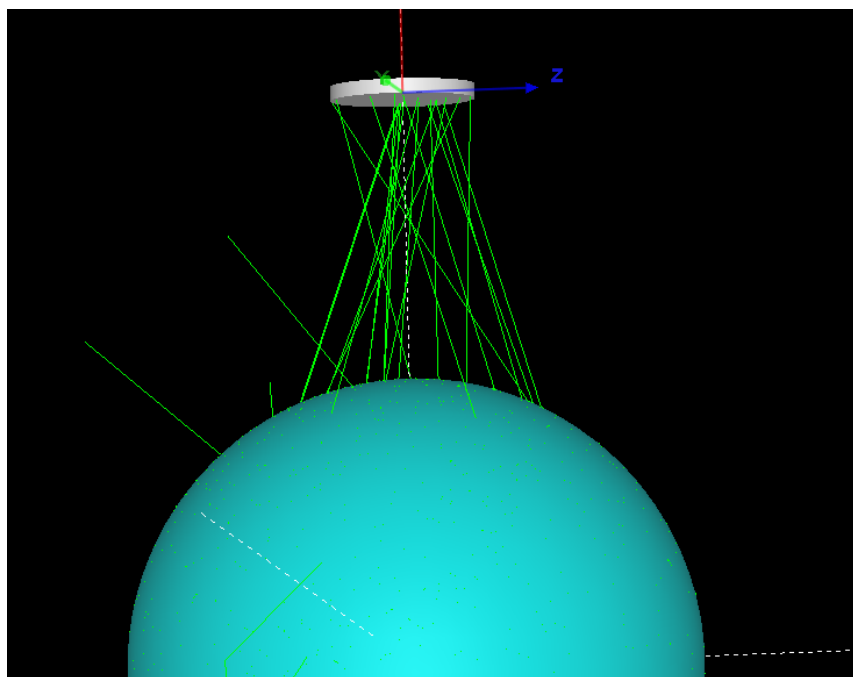


Figure 14 : Tracking RayXpert avec une sphère en plomb.

On constate que les effets de diffusion sont quasi-inexistants (build-up moyen de 1,3).

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

Les caractéristiques du maillage des sources étendues, linéiques, surfaciques ou volumiques, ont une influence déterminante sur le résultat du calcul. De façon générale, le maillage doit être suffisamment fin pour être adapté au transport des photons dans le matériau, ou dit différemment, de l'ordre de grandeur des libres parcours moyens. Les problèmes surgissent lorsque les dimensions de la source deviennent significativement importantes. Dans un tel cas, un maillage uniforme (*figure 15 a*) adapté impose un grand nombre de mailles sur chaque axe d'intégration, ce qui peut générer rapidement des temps de calculs rédhibitoires. A titre d'exemple, le libre parcours moyen des photons de 59 keV (Am241) dans le plomb est égal à 180 μm . En considérant seulement deux axes d'intégration, un cylindre de 10 cm de rayon et de hauteur nécessiterait plus d'un million de voxels pour être correctement modélisé. Une solution intéressante, ne nécessitant qu'un nombre assez faible de mailles, est un maillage en puissance (*figure 15 b*) selon la loi $\Delta H_n = a^n \Delta H_0$, avec

- ΔH_0 : la largeur de la première maille, en regard du point dose
- ΔH_n : la largeur de la n^{ième} maille
- a : la raison de la loi en puissance

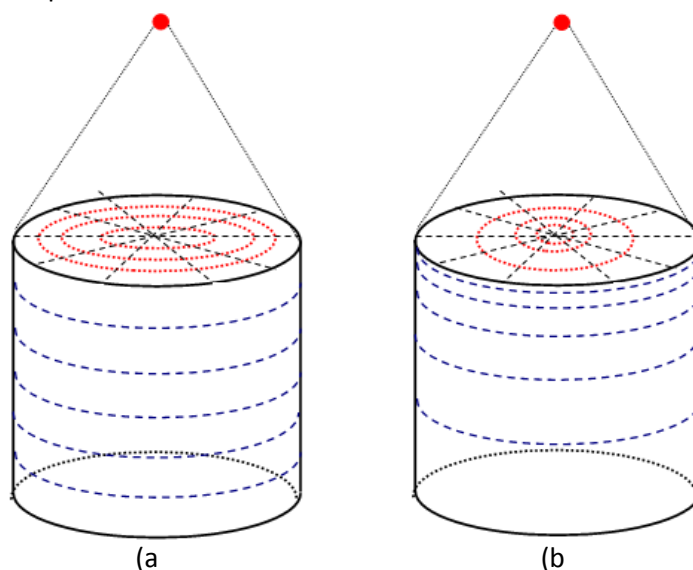


Figure 15: Maillage uniforme (a) et maillage en puissance (b) pour un cylindre

La valeur ΔH_0 de la première maille est une fraction de la moyenne harmonique des libres parcours moyens des photons, pondérée par l'intensité d'émission et l'activité.

La valeur de la raison a est calculée par un solveur interne pour assurer la relation $\sum_n \Delta H_n = H_{tot}$.

Les limites de ce solveur vont d'une épaisseur minimale de 0,01 cm à une épaisseur maximale d'environ 10^{25} cm.

Pour un cylindre en plomb chargé en américium 241, un maillage en puissance adapté à un cylindre en plomb de 100 cm de hauteur, avec un nombre de mailles égal seulement à 15, et obtenu dans DOSIMEX-GX, est le suivant (*1^{ère} colonne*) :



N° maille	ΔH_n (cm)	
	Am 241	Co 60
1	0,007	0,62
2	0,013	0,80
3	0,025	1,03
4	0,046	1,34
5	0,086	1,74
6	0,16	2,25
7	0,30	2,92
8	0,57	3,79
9	1,07	4,91
10	2,01	6,37
11	3,77	8,26
12	7,07	10,71
13	13,27	13,89
14	24,91	18,01
15	46,73	23,35

Tableau 14 : Maillage en puissance pour A241 et Co 60 cylindre plomb hauteur 1 m

On constate que les premières couches, déterminantes, sont maillées très finement, alors que le fond du cylindre est maillé très grossièrement, en proportion inverse de son apport réel à la dose totale.

La même méthode de maillage adapté au cobalt 60 (2^{ème} colonne) dans la même géométrie donne un maillage plus uniforme, en raison de libres parcours moyens significativement plus élevés (1,5 cm).

L'intérêt d'un maillage en puissance adapté peut être mis en évidence assez simplement. On considère le débit de dose généré par un cylindre en plomb avec une activité volumique constante en Am 241, pour une hauteur de cylindre de plus en plus grande, le débit de dose étant toujours calculé à une même distance de la surface (voir figure 16).

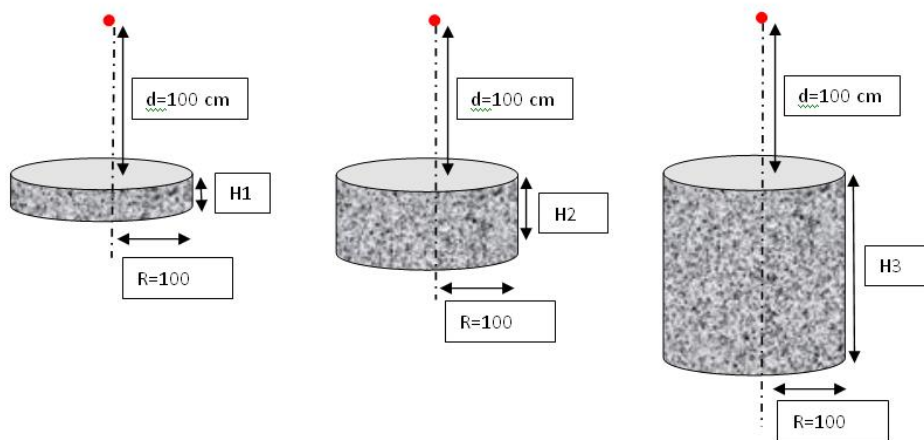


Figure 16: configuration calcul débit de dose Am 241 avec variation hauteur cylindre en plomb



En partant d'une très faible hauteur de cylindre, 100 μm , jusqu'à des épaisseurs très élevées, 100 cm, on peut s'attendre, pour des considérations physiques évidentes, à observer un débit de dose qui augmente puis fini par se stabiliser lorsque la composante à 59 keV des tranches rajoutées successivement est quasi-totalement atténuée par les premières couches en surface (*l'atténuation corrigée pour 2 mm de plomb est égale à 2.10^{-5}*). L'augmentation liée aux photons de plus fortes énergies, moins atténués, devrait rester pour l'essentiel masquée par la composante surfacique initiale de 59 keV.

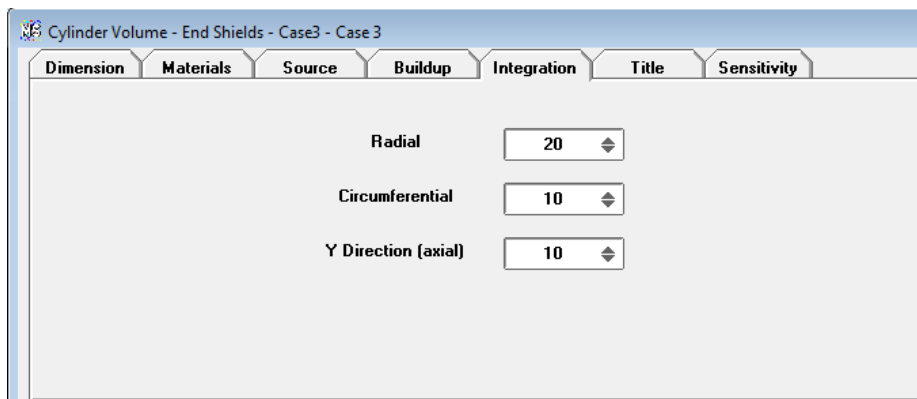
Mais en aucun cas, la dose ne devrait baisser lorsque la hauteur du cylindre augmente ! (*ce qui serait le cas si l'on faisait un calcul avec non pas une activité volumique constante, mais une activité totale constante*).

Le calcul réalisé avec DOSIMEX montre qu'effectivement le débit de dose augmente rapidement puis se stabilise à partir d'une épaisseur de 0,07 cm. On constate une légère baisse, peu significative ($\approx 7\%$), lorsque l'on passe de 0,07 cm à 1 m.

Avec Microshield® et Mercurad™, des problèmes peuvent apparaître si l'opérateur n'est pas conscient de ce type de problème. En effet les options d'intégrations par défaut (cas 1) conduisent à des erreurs significatives lorsque l'épaisseur de plomb augmente. L'opérateur a la possibilité de modifier ces paramètres d'intégrations permettant de pallier ces problèmes (cas 2).

CAS 1 : RESULTATS AVEC OPTIONS PAR DEFAUT

Option par défaut de Microshield® : Nombre de mailles limité



Option par défaut de Mercurad™ : découpage uniforme

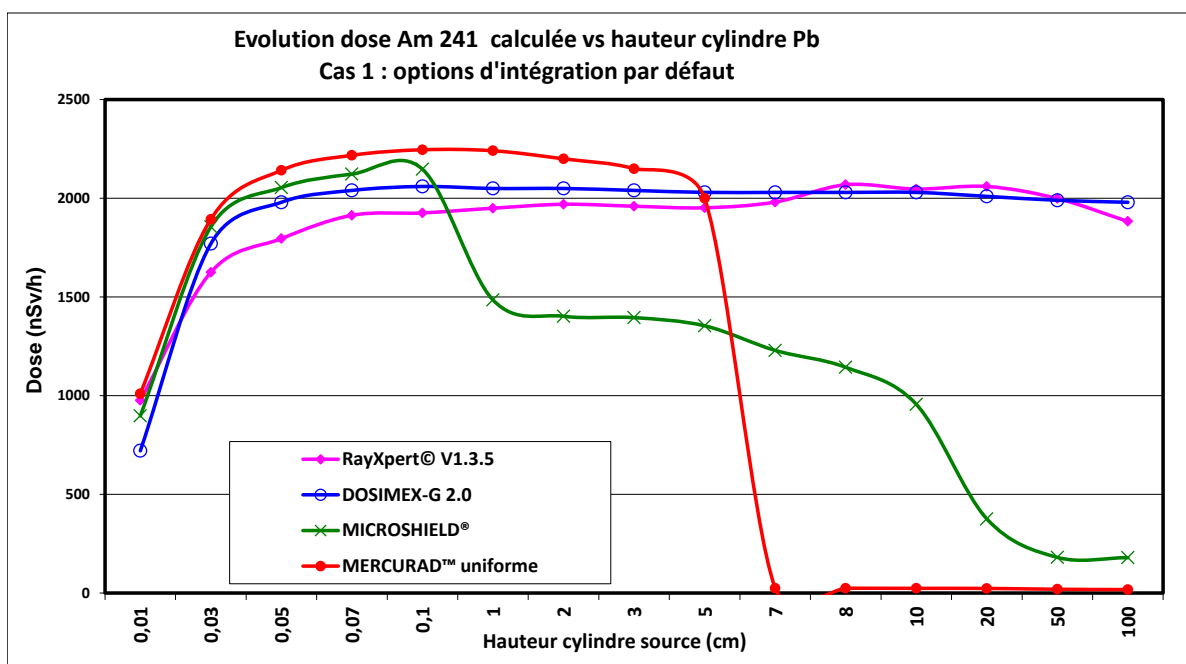
Image

Sur la même variation d'épaisseur, le débit de dose calculé par Microshield® chute de façon significative d'un facteur de l'ordre de 10. Mercurad est affligé du même défaut et chute d'un facteur 100.



H*(10) (µSv/h)					Dosimex vs Microshield	Benchmark vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
hauteur cylindre (cm)	DOSIMEX-GX	MICROSHIELD® Options par défaut	MERCURAD™ Maillage uniforme	RayXpert©	Dosimex/µshield	Dosimex/mercurad	µShield/mercurad	Dosimex/rayXpert	µShield/rayXpert	mercurad/RayXpert
0,01	721	878	1010	976	17,9%	28,6%	13,1%	26,1%	10,0%	3,5%
0,03	1770	1813	1894	1625	2,4%	6,5%	4,3%	8,9%	11,6%	16,6%
0,05	1980	2008	2142	1796	1,4%	7,6%	6,3%	10,2%	11,8%	19,3%
0,07	2040	2075	2218	1914	1,7%	8,0%	6,4%	6,6%	8,4%	15,9%
0,1	2060	2112	2246	1926	2,5%	8,3%	6,0%	7,0%	9,7%	16,6%
1	2050	1480	2241	1950	27,8%	8,5%	51,4%	5,1%	24,1%	14,9%
2	2050	1383	2200	1970	32,5%	6,8%	59,1%	4,1%	29,8%	11,7%
3	2040	1376	2150	1960	32,5%	5,1%	56,3%	4,1%	29,8%	9,7%
5	2030	1336	2000	1952	34,2%	1,5%	49,7%	4,0%	31,6%	2,5%
7	2030	1212	25	1981	40,3%	98,8%	97,9%	2,5%	38,8%	98,7%
8	2030	1128	25	2069	44,4%	98,8%	97,8%	1,9%	45,5%	98,8%
10	2030	943	24	2047	53,5%	98,8%	97,5%	0,8%	53,9%	98,8%
20	2010	371	24	2060	81,5%	98,8%	93,5%	2,4%	82,0%	98,8%
50	1990	178	20	1999	91,1%	99,0%	88,8%	0,5%	91,1%	99,0%
100	1980	177	18	1883	91,1%	99,1%	89,8%	5,2%	90,6%	99,0%

Tableau 15



Graphe 10

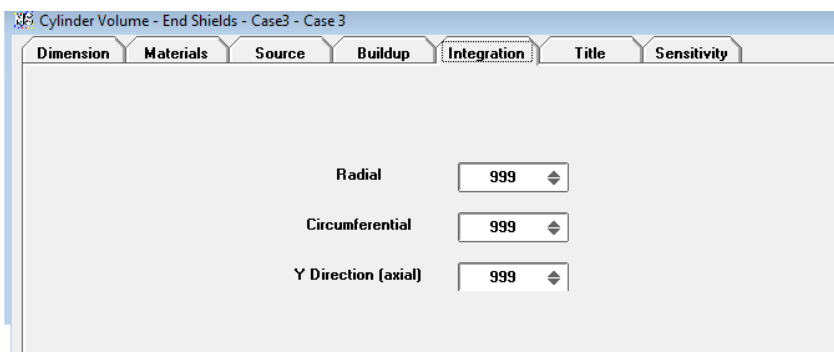
Nota : ces résultats ne sont pas pris en compte dans le benchmarking final



CAS 2 : RESULTATS AVEC OPTIONS OPTIMISEES

✓ Option optimisée de Microshield® : Nombre de mailles maximum

Microshield® offre la possibilité d'affiner le maillage avec un découpage maximum en 999 mailles sur chaque axe :



✓ Option optimisée de Mercurad™ : découpage en puissance

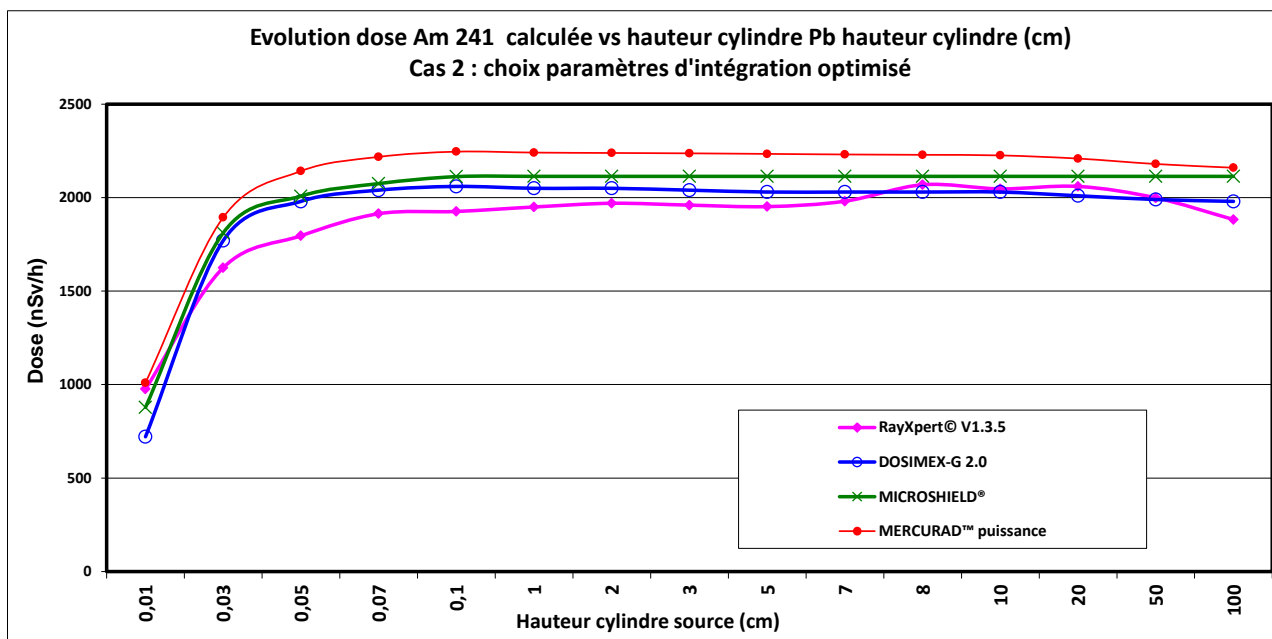
Le maillage uniforme de MERCURAD est celui proposé par défaut à l'utilisateur. Ce code propose toutefois un maillage en puissance qui permet d'assurer la stabilité du calcul au-delà de 50 livres parcours moyens.

Image

Avec ces options optimisées, les résultats redeviennent cohérents :

H*(10) (μSv/h)					Dosimex vs Microshield	Benchmark vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
hauteur cylindre (cm)	DOSIMEX-GX	MICROSHIELD Option optimisé®	MERCURAD™ maillage puissance	RayXpert©	Dosimex/μshield	Dosimex/mercurad	μShield/mercurad	Dosimex/rayXpert	μShiel/rayXpert	mercurad/RayXpert
0,01	721	878	1010	976	17,9%	28,6%	13,1%	26,1%	10,0%	3,5%
0,03	1770	1811	1894	1625	2,3%	6,5%	4,4%	8,9%	11,5%	16,6%
0,05	1980	2008	2142	1796	1,4%	7,6%	6,2%	10,2%	11,8%	19,3%
0,07	2040	2075	2218	1914	1,7%	8,0%	6,4%	6,6%	8,4%	15,9%
0,1	2060	2112	2246	1926	2,5%	8,3%	5,9%	7,0%	9,7%	16,6%
1	2050	2114	2241	2040	3,0%	8,5%	5,7%	0,5%	3,6%	9,9%
2	2050	2114	2239	1970	3,0%	8,4%	5,6%	4,1%	7,3%	13,7%
3	2040	2114	2237	1960	3,5%	8,8%	5,5%	4,1%	7,8%	14,1%
5	2030	2114	2234	1952	4,0%	9,1%	5,4%	4,0%	8,3%	14,4%
7	2030	2114	2231	1981	4,0%	9,0%	5,3%	2,5%	6,7%	12,6%
8	2030	2114	2229	2069	4,0%	8,9%	5,2%	1,9%	2,2%	7,7%
10	2030	2114	2226	2047	4,0%	8,8%	5,0%	0,8%	3,3%	8,7%
20	2010	2114	2209	2060	4,9%	9,0%	4,3%	2,4%	2,6%	7,2%
50	1990	2114	2180	1999	5,9%	8,7%	3,0%	0,5%	5,7%	9,1%
100	1980	2114	2160	1883	6,3%	8,3%	2,1%	5,2%	12,3%	14,7%

Tableau 16



Graph 11 : Débit de dose Am 241 vs hauteur cylindre plomb et comparaisons avec MICROSHIELD®, MERCURAD™ et RayXpert®

SYNTHESE DES RESULTATS SCENARIO 9

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

Avec options optimisées pour Microshield® et Mercurad™

- Entre **DOSIMEX-GX 2.0** et **MERCURAD™** : écart moyen 10 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MERCURAD™** : écart moyen 39 %
- Entre **DOSIMEX-GX 2.0** et **MICROSHIELD® V.9** : de l'ordre de 38 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT® V 1.4

Avec options optimisées pour Microshield® et Mercurad™

- Entre **DOSIMEX-GX 2.0** et **RayXpert® 1.4** : écart moyen 6 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **RayXpert® 1.4** : écart moyen 38 %.
- Entre **MERCURAD™** et **RayXpert® 1.4** : écart moyen 12 %.

- **Moyenne totale sur l'ensemble des écarts : 7 %**
- **Aucune valeur aberrante avec les options optimisées**

L'approche proposée par DOSIMEX-GX assure ainsi à l'utilisateur d'obtenir des résultats recevables, quelles que soient les dimensions de la source, sans d'une part devoir se préoccuper de savoir si le maillage est adapté ou non à ces dimensions, et d'autre part devoir choisir entre une méthode ou une autre.



APPLICATION : La capacité de DOSIMEX-GX à prendre en compte des dimensions élevées permet par exemple de retrouver l'ordre de grandeur des facteurs de conversion activité surfacique-débit de dose à 1 m donné par le Federal Guidance pour des surfaces « infinies ».

Source disque

$H^*(10)$ **10,31E+01 nSv/h** **Lancer calcul**

Distance **100** cm

Rayon **1E8** cm

Ecran de protection

Caractéristiques écran

Nature **Air** Masse vol.

Epaisseur **100** cm

Activité surfacique constante sur tout le disque

Commentaires
Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

Figure 17: Boite de dialogue DOSIMEX-GX pour calcul coefficient conversion activité surfacique-débit de dose à 1 m (1 Bq.cm⁻² en Co 60, R=10⁸ cm)

Les calculs effectués avec DOSIMEX-GX, avec un écran d'air de 1 m et pour des rayons entre 10⁴ et 10⁸ cm (1000 km) affichent là encore des valeurs stabilisées :

Radionucléide	Federal Guidance	DOSIMEX-GX
Cesium 137	21 nSv.h ⁻¹ .Bq ⁻¹ .cm ²	27 nSv.h ⁻¹ .Bq ⁻¹ .cm ²
Cobalt60	87 nSv.h ⁻¹ .Bq ⁻¹ .cm ²	103nSv.h ⁻¹ .Bq ⁻¹ .cm ²

Tableau 17 : coefficients conversion activité surfacique-débit de dose à 1 m

SCENARIO 9 : GEOMETRIE PARALLELEPIPEDIQUE DE GRANDE DIMENSION AVEC ECRAN

Ce scenario permet de valider la géométrie parallélépipédique introduite avec la version 1.3.1.

- Matrice source:
100 cm × 100 cm × 50 cm en fer
- Radionucléide : Yttrium 88, 1 TBq
- Distances détecteur : 100 cm par rapport à la surface
- Cas 1 : sans écran
- Cas 2 : avec écran : 20 cm de béton

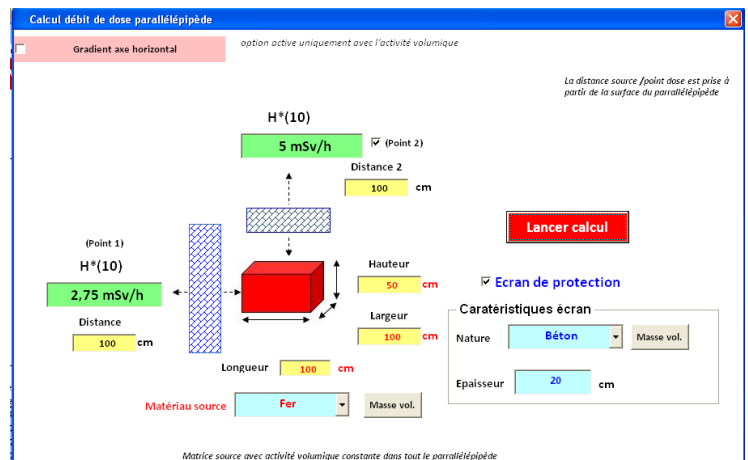


Figure 18: Boite de dialogue DOSIMEX-GX pour géométrie source parallélépipédique

	H*(10) (mSv/h)				Dosimex vs Microshield		Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
	DOSIMEX-GX	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	Dosimex/ μshield	Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	μShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert	
Pt1 (sans écran)	13,8	12	13,17	13,8	15,0%	4,8%	8,9%	0,0%	13,0%	4,6%	
Pt2 (sans écran)	25,9	22,2	24,44	26,4	16,7%	6,0%	9,2%	1,9%	15,9%	7,4%	
Pt1 (avec écran)	2,75	2,21	2,8	2,6	28,5%	1,4%	21,1%	9,2%	15,0%	7,7%	
Pt2 (avec écran)	5,04	3,9	5,02	4,4	29,2%	0,4%	22,3%	14,5%	11,4%	14,1%	

Tableau 18

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

- Entre **DOSIMEX-GX 2.0** et **MERCURAD™** : écart moyen 3 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MERCURAD™** : écart moyen 15 %
- Entre **DOSIMEX-GX 2.0** et **MICROSHIELD® V 9** : écart moyen 18 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT® V 1.4

- Entre **DOSIMEX-GX 2.0** et **RayXpert® 1.4** : écart moyen 6 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **RayXpert® 1.4** : écart moyen 14 %.
- Entre **MERCURAD™** et **RayXpert® 1.4** : écart moyen 8 %.

- Moyenne totale sur l'ensemble des écarts : 12 %
- Aucune valeur aberrante

Malgré des dimensions importantes de la source et de l'écran, on constate une excellente cohérence entre les 4 codes.

SCENARIO 10 : MODELISATION MULTIRADIONUCLEIDES

Scenario.10.1 CONTAINER SOLIDE DE DECHETS VITRIFIES

Une modélisation simplifiée d'un container source déchets vitrifié CSDV a été réalisé suivant le schéma ci-dessous :

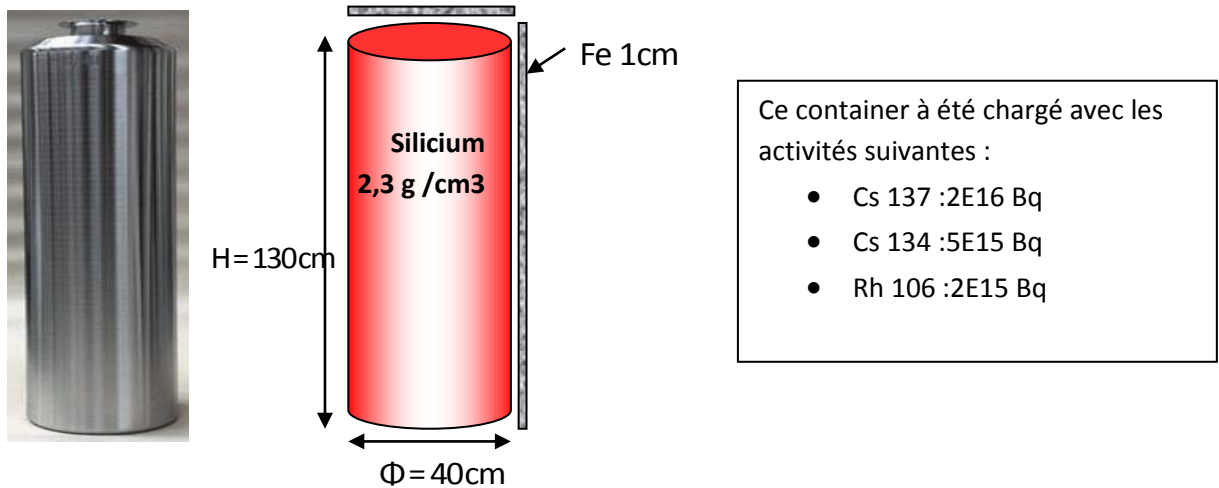


Figure 19

Les débits de d'équivalent de dose dans l'air on été calculés à 1 m du container (Si) sur l'axe vertical et sur l'axe transverse médian, successivement sans protection puis avec un écran de 15 cm de plomb :

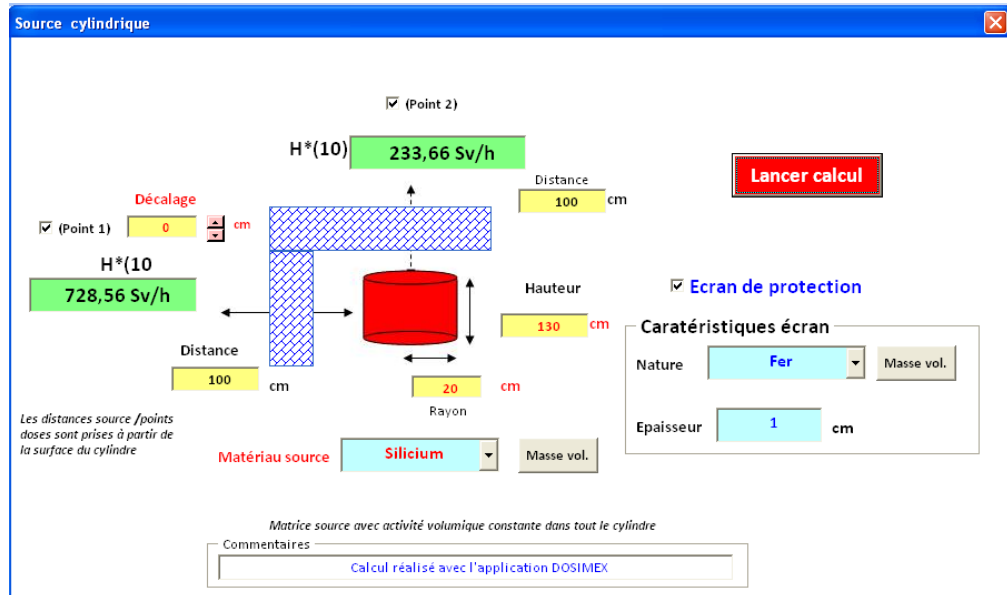


Figure 20: Boite de dialogue DOSIMEX-GX pour CSDV sans écran

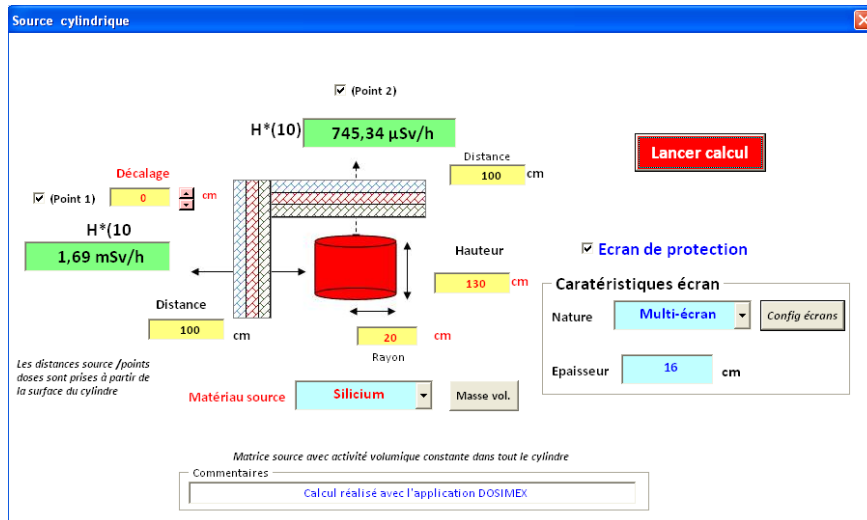


Figure 21: Boite de dialogue DOSIMEX-GX pour CSDV avec écran de plomb

Le cas avec écran de plomb a été modélisé en faisant appel à l’option multiécran : 1 cm de fer et 15 cm de plomb

CSDV sans protection en Sv/h et avec écran Pb 15 en mSv/h (H*(10))					Dosimex vs Microshield		Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
Points	DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert©	Dosimex/ μshield	Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	μShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert	
Pt 1 Sans écran Pb	728 Sv/h	544 Sv/h	748 Sv/h	465 Sv/h	33,8%	2,7%	27,3%	36,1%	17,0%	37,8%	
Pt2 Sans écran Pb	233 Sv/h	196 Sv/h	246 Sv/h	168 Sv/h	18,9%	5,3%	20,3%	38,7%	16,7%	46,4%	
Pt 1 Avec écran Pb	1,69 mSv/h	1,00 mSv/h	1,26 mSv/h	0,62 mSv/h	69,0%	34,1%	20,6%	63,4%	61,6%	50,9%	
Pt2 Avec écran Pb	0,75 mSv/h	0,54 mSv/h	1,02 mSv/h	0,43 mSv/h	38,9%	26,5%	47,1%	76,1%	26,8%	58,2%	

Tableau 19

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 40 %
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 17 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 29 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT© V 1.4

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 53%
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4: écart moyen 30 %.
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : écart moyen 48 %.

On retrouve des valeurs surestimées avec les codes déterministes et notamment ici pour Dosimex-GX et Mercurad™ avec l’écran de 15 cm de Plomb.



Scenario.10.2 CONTAMINATION MUR BETON (REACTEUR ULYSSE)

Dans le cadre du mémoire de master MNE « *Dose rate calculation for future ULYSSE reactor dismantling* » réalisé par Slavica Ivanovic (CEA /INSTN/SAclay, Septembre 2014), un cas particulier a fait l'objet d'un benchmarking plus complet.

La source est un mur en béton irradié par activation neutronique :

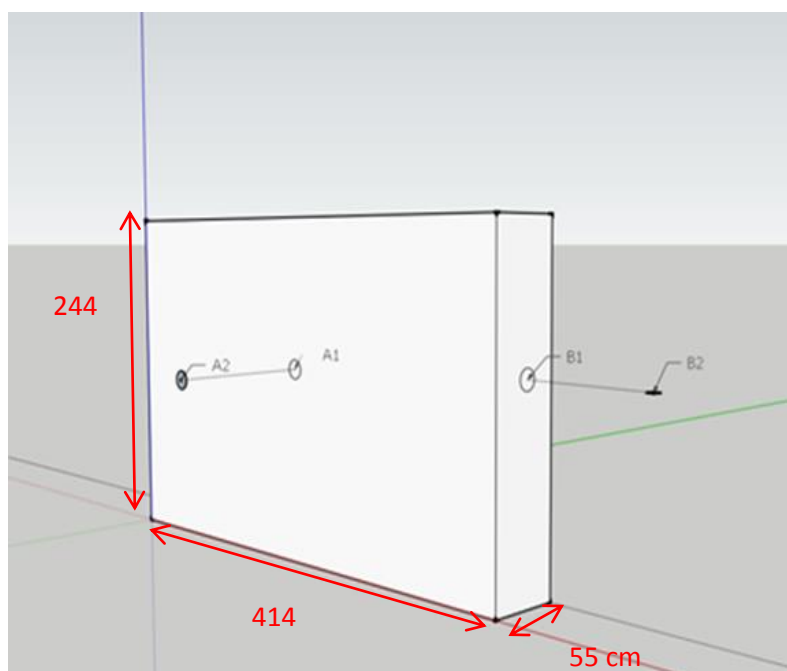


Figure 22

Le terme source utilisé est le suivant

Co60	Eu152	Eu154	Ba133
3,95E+08 Bq	5,02E+10 Bq	2,23E+09 Bq	4,22E+10 Bq

Tableau 20

Les calculs ont été réalisés dans une hypothèse de contamination homogène (*pour le cas plus réaliste avec gradient exponentiel voir § 1.10.1*) avec deux densités du béton différentes :

- Béton léger 2,3 g/cm³
- Béton lourd : 3,5 g/cm³

H*(10) (µSv/h) CAS BETON LOURD (3,5 g/cm3)					Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
Béton lourd	DOSIMEX- GX	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®	Dosimex/ µshield	Dosimex/ mercurad	µShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	µShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
Point A1	1124	1131	938	923	0,6%	19,8%	20,6%	21,8%	22,5%	1,6%
Point A2	559	541	467	480	3,3%	19,7%	15,8%	16,5%	12,7%	2,7%
Point B1	1092	809	892	1075	35,0%	22,4%	9,3%	1,6%	24,7%	17,0%
Point B2	142	145	118	135	2,1%	20,3%	22,9%	5,2%	7,4%	12,6%



Tableau 21

H*(10) (µSv/h) CAS BETON LEGER (2,3 g/cm3)					Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
Béton léger	DOSIMEX- GX	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert©	Dosimex/ µshield	Dosimex/ mercurad	µShield/ mercurad	Dosimex/ rayXpert	µShiel/ rayXpert	mercurad/ RayXpert
Point A1	1720	1729	1238	1493	0,5%	38,9%	39,7%	15,2%	15,8%	17,1%
Point A2	841	813	627	740	3,4%	34,1%	29,7%	13,6%	9,9%	15,3%
Point B1	1640	1392	1194	1300	17,8%	37,4%	16,6%	26,2%	7,1%	8,2%
Point B2	210	208	158	193	1,0%	32,9%	31,6%	8,8%	7,8%	18,1%

Tableau 22

BETON NORMAL (2,3 g /cm³)

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 5 %
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 36 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 29 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT© V 1.4

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 16 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4: de l'ordre de 10 %.
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : de l'ordre de 15 %

BETON LOURD (3,5 g /cm³)

BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 8 %
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 21 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 17 %

BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT© V 1.4

- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert© 1.4: écart moyen 11 %
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert© 1.4: écart moyen 17 %.
- Entre MERCURAD™ et RayXpert© 1.4 : écart moyen 8 %.



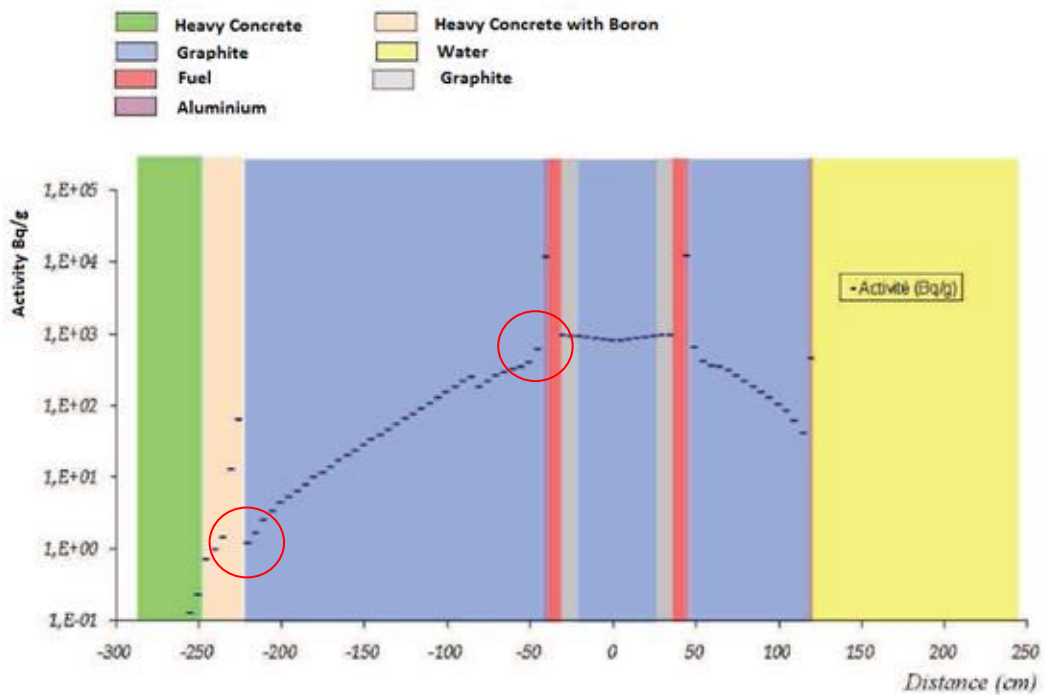
Malgré des dimensions de sources élevées, on constate ici une bonne cohérence entre les 4 codes. On notera que les valeurs de débits de dose sont dans le rapport inverse des densités des béton lourds et légers avec une moyenne de 1,5.



Scenario.10.3 VALIDATION OPTION GRADIENT (RAJOUTE AVEC LA VERSION 1.4)

Le profil d'activité pour la géométrie parallélépipède a pu être testé dans le cadre du mémoire « Dose rate calculation for future ULYSSE reactor dismantling » (Slavica Ivanovic, CEA /INSTN/SAclay, Septembre 2014).

Ce scénario reprend les caractéristiques du mur en béton léger, en considérant non plus une activité volumique constante mais un gradient d'activité exponentiel généré par un phénomène d'activation neutronique. Seul le code Mercure dispose de cette option ayant permis de vérifier cette option de Dosimex-G. Le calcul est réalisé sur le point A2 coté activité maximale et coté activité minimale.



Graph 12

Le calcul de débit de dose a été validé à l'aide du Code Mercure avec les résultats ci-dessous :

	Code	maximum	Minimum
Densité : 3,5 g/cm ³	Mercure	926 µSv/h	14 µSv/h
Point A1	Dosimex	905 µSv/h	12 µSv/h
	Ecart relatif	-2%	-12%

Tableau 23

Ce résultat montre que cette option de Dosimex-GX 2.0 disponible sur la géométrie parallélépipède est recevable.



SCENARIO 11 : VALIDATION « EFFET DE CIEL »

L'effet de ciel calculé analytiquement avec Dosimex (section efficaces différentielles de Klein et Nishina, atténuation dans l'écran ...) a été comparé avec le logiciel RayXpert® de la société TRAD (cf. <http://www.trad.fr/RayXpert-R.html>)

Calcul sous DOSIMEX :

- Source Mono E 100 keV
- Activité 1,26 E15 Bq
- Distance 100 cm (Débit fluence 1E10 phot/s/cm²)
- Surface éclairée: 100 cm²
- Angle : 45 °
- Distance détecteur : 20 cm

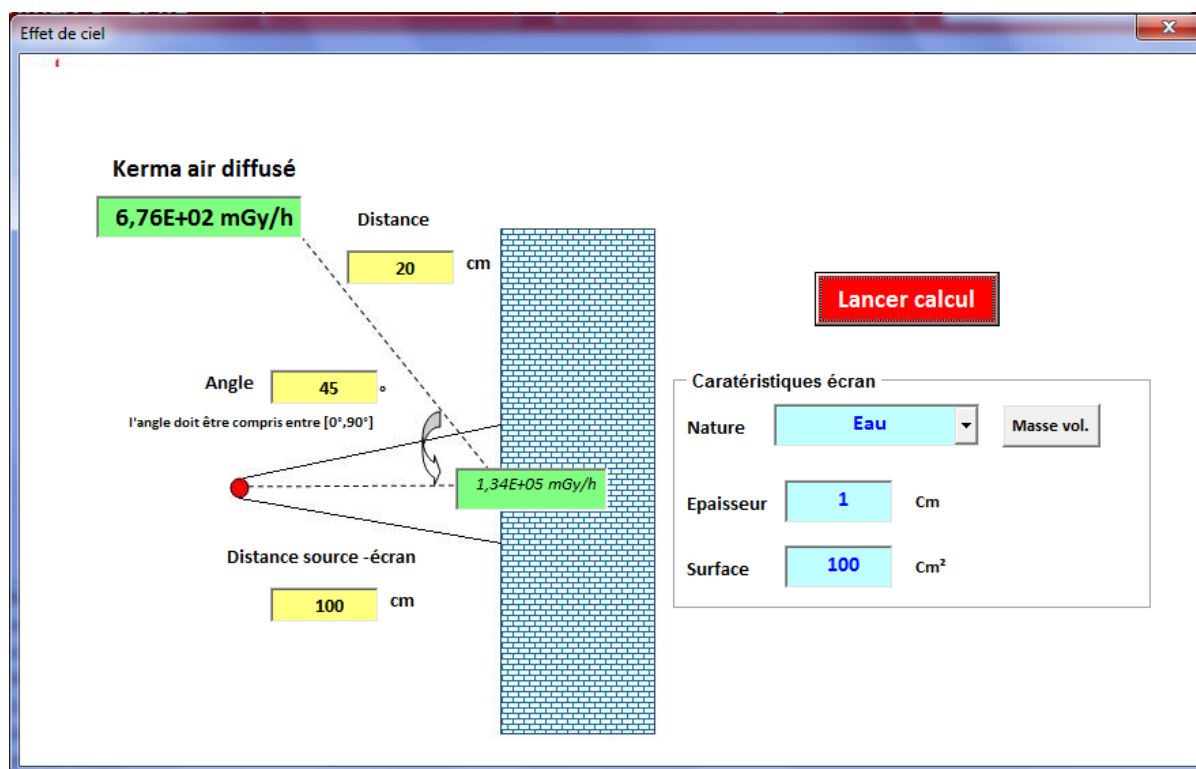


Figure 23

La modélisation réalisée sous RayXpert met en œuvre un faisceau monodirectionnel et monoénergétique. Ce choix permet de maîtriser la surface éclairée (100 cm²) sans imposer une collimation.

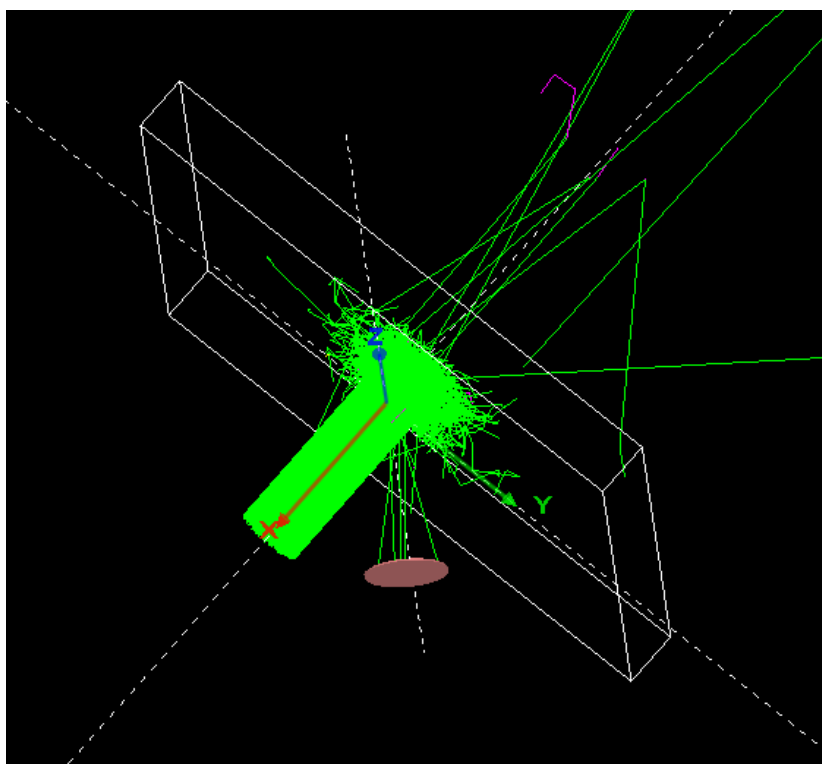


Figure 24

	DOSIMEX-GX	RayXpert®	Ecart relatif
1 cm eau 100 keV	117 mSv/h	100 mSv/h	15%
10 cm eau 100 keV	581 mSv/h	320 mSv/h	45%
20 cm eau 100 keV	614 mSv/h	332 mSv/h	46%

10 cm béton 200 keV	499 mSv/h	338 mSv/h	32%
20 cm béton 100 keV	337 mSv/h	343 mSv/h	2%
10 cm béton 400 keV	532 mSv/h	422 mSv/h	21%

0,01 cm Pb 200 keV	8 mSv/h	31 mSv/h	74%
--------------------	---------	----------	-----

0,1 cm Pb 500 keV	37 mSv/h	28 mSv/h	32%
1 cm 500 keV	42 mSv/h	35 mSv/h	20%

Tableau 24

Malgré une modélisation délicate, diffusion angulaire, atténuation du faisceau incident dans la cible et absorption des photons diffusés, les résultats montrent que l'ordre de grandeur de l'effet de ciel calculé par Dosimex-GX est acceptable.



SCENARIO 12 : VALIDATION « RAYONNEMENT DE FREINAGE »

A) VALIDATION VS RAYXPERT©

- Be 10 (Qmax 556 keV)
- 1 GBq
- Fe : 0,1 cm
- D=10 cm

Estimation DED rayonnement de freinage

Caractéristiques de la source bêta

Z du radionucléide ?

Energie bêta max (keV) Bêta moins
 Bêta plus

Intensité d'émission (%)

Activité (Bq)

Nature de l'absorbant d'électron

Ep. absorbant (cm)

Distance (cm)

Ecran de protection vs ray. frein.

(L'épaisseur d'absorbant proposée correspond au parcours maximum des électrons dans le matériau choisi)

Figure 25

Matériau absorbant	RayXpert©	Dosimex-GX 2.0	Ecart relatif
Plomb	2,5 µSv/h	10,6 µSv/h	76%
Fer	4,8 µSv/h	9,8 µSv/h	51%
Alu	8,1 µSv/h	7,5 µSv/h	8%

Tableau 25

Les résultats restent dans l'ordre de grandeur. Les écarts proviennent probablement d'effet d'autoabsorption des photons X de faibles énergies du spectre, effets croissant depuis l'Aluminium, avec un excellent accord, jusqu'au Plomb, avec l'écart le plus élevé.

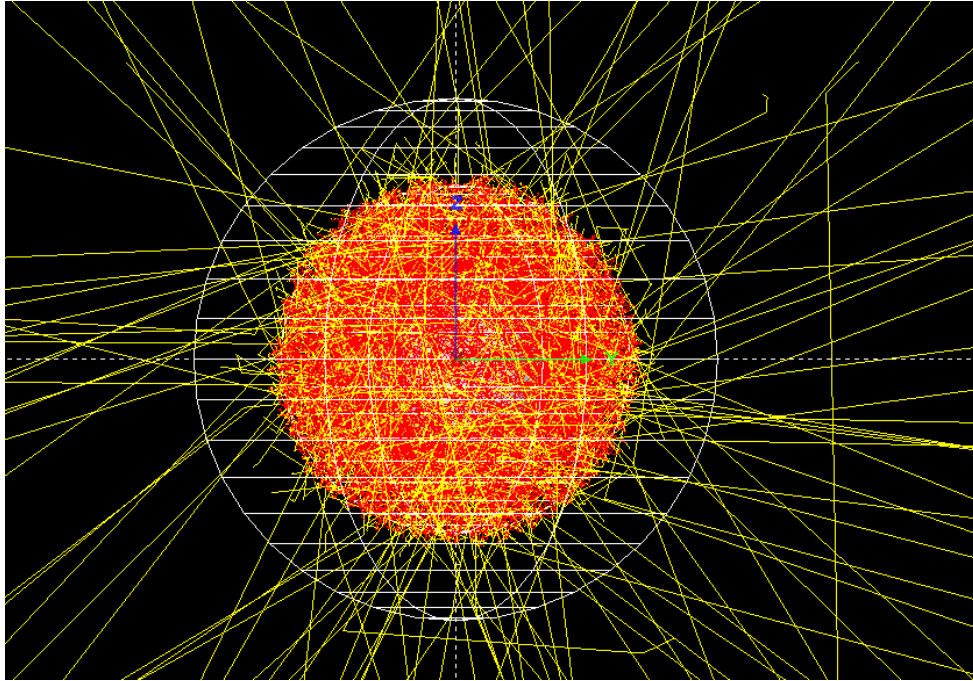


Figure 26 :Tracking RayXpert© : rayonnement de freinage



B) VALIDATION VS MESURE SUR SOURCE Y 90 (QMAX 2275 KEV)

Etude d'un cas concret (AREVA NC la Hague)

- Radionucléide : Y 90
- Activité : 93TBQ
- Absorbant : enveloppe acier 8,5 mm
- Protection biologique : 10 cm Pb
- Distance 100 cm



Estimation DED rayonnement de freinage

Choix
 Radionucléides enregistrés 90Y Sources personnalisés

Activité (Bq) 93E12

Nature de l'absorbant d'électron
Fer

Ep. absorbant (cm) 0,85

Distance (cm) 100

H*(10)
73,88 μGy/h

Ecran de protection vs ray. frein.

Caratéristiques écran
 Nature Plomb
 Epaisseur 10 cm

(L'épaisseur d'absorbant proposée correspond au parcours maximum des électrons dans le matériau choisi)

Figure 27

- ✓ Valeur mesurée : 60 $\mu\text{Sv/h}$ à 1 m
- ✓ Valeur calculée par Dosimex-GX 2.0: 73 $\mu\text{Sv/h}$ à 1 m

SCENARIO 13 : FONCTION « DECALAGE » SUR SOURCE CYLINDRIQUE ET FIL.

Cette fonction a été introduite avec la version Dosimex-GX 2.0. (voir manuel). Les 2 configurations testées sont les suivantes :

- Source cylindrique
- Matrice eau
- Rayon 50 cm
- Hauteur 100 cm
- Radionucléide Co 60
- Activité 10 GBq
- Configuration 1 : distance=10 cm
- Configuration 2 : distance=100 cm

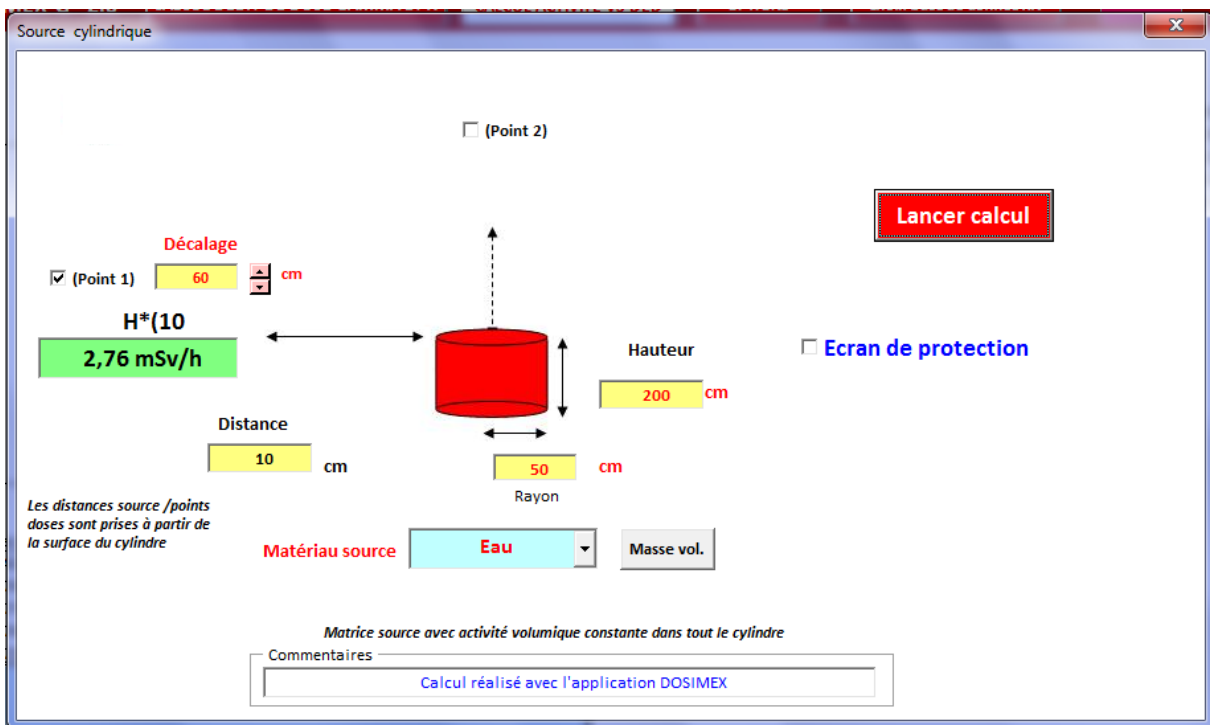
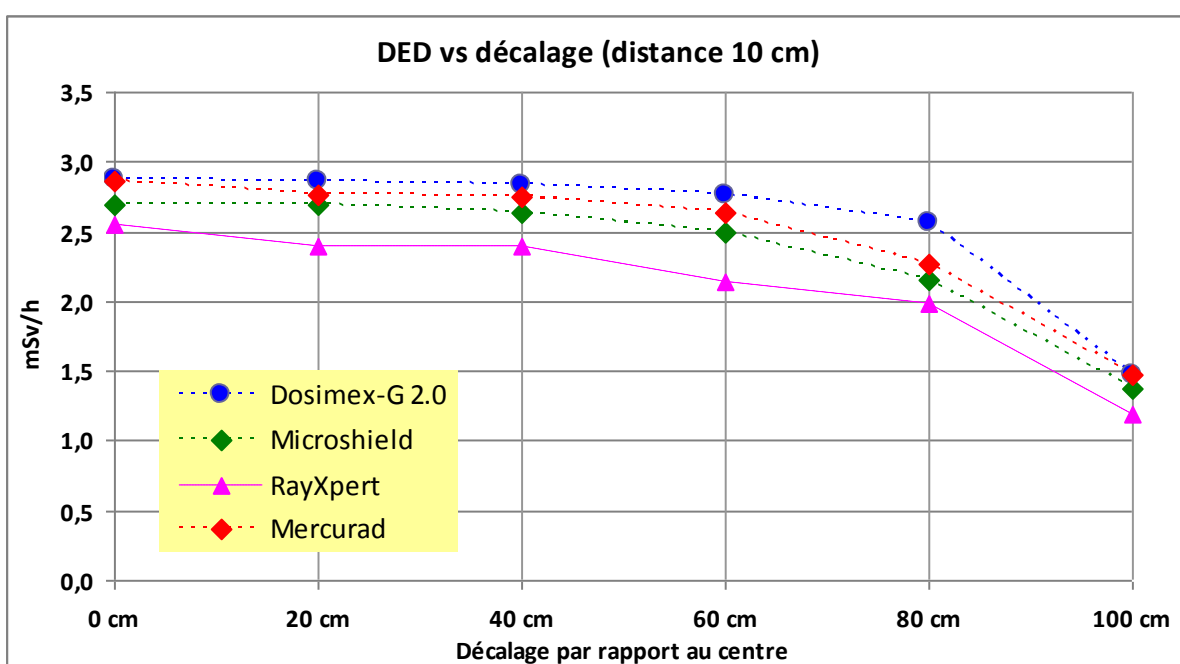


Figure 28 : configuration 1 avec décalage de 60 cm



R=50; H=200 ; A=10 GBq; Co 60; d=10 cm; Eau (mSv/h)					Dosimex vs Microshield	Benchmark vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
Décalage	DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®		Dosimex/ mercurad	µShield/ mercurad	Dosimex /RayXpert	Microshiel vs RayXpert	mercurad vs RayXpert
0 cm	2,87	2,70	2,86	2,55	6,4%	0,3%	5,7%	12,5%	5,8%	12,2%
20 cm	2,86	2,69	2,76	2,4	6,4%	3,6%	2,7%	19,2%	11,9%	15,0%
40 cm	2,83	2,63	2,75	2,39	7,6%	2,9%	4,4%	18,4%	10,0%	15,1%
60 cm	2,76	2,49	2,64	2,14	10,7%	4,5%	5,6%	29,0%	16,5%	23,4%
80 cm	2,56	2,15	2,27	1,99	19,0%	12,8%	5,3%	28,6%	8,1%	14,1%
100 cm	1,48	1,38	1,47	1,194	7,3%	0,7%	6,1%	24,0%	15,6%	23,1%



Cas 1 : Distance source 10 cm

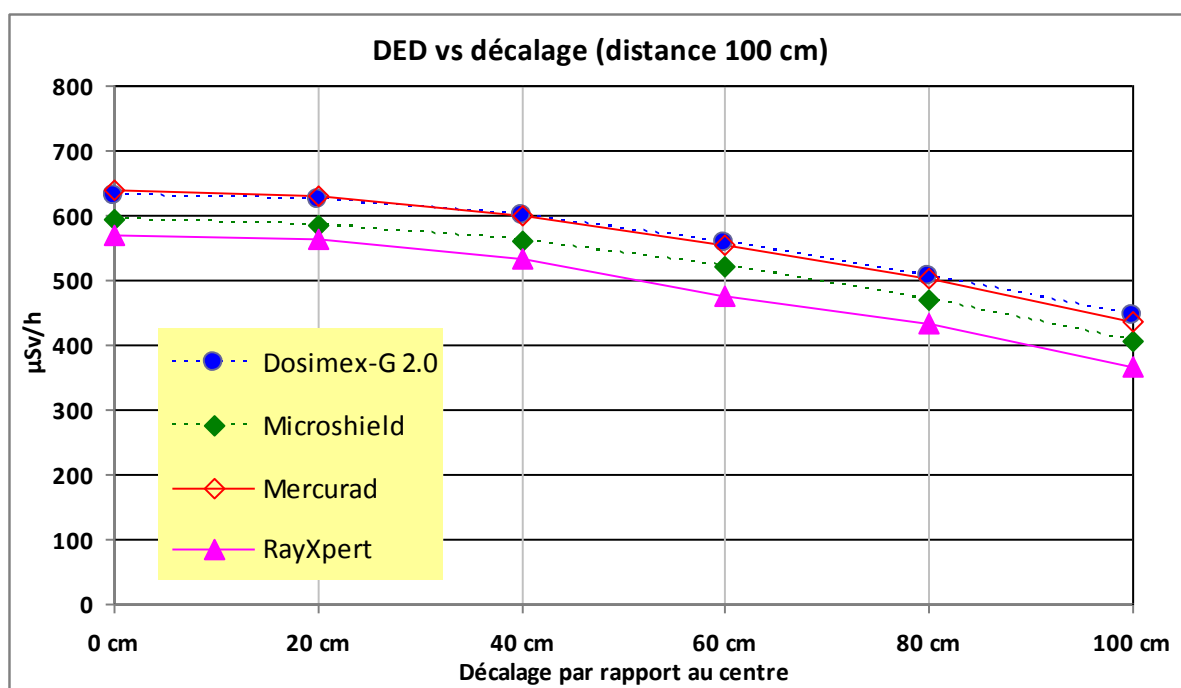
- BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 9 %
 - Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 4%
 - Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 5%

- BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT® V 1.4
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert® 1.4: écart moyen 22%
 - Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert® 1.4: écart moyen 11%.
 - Entre MERCURAD™ et RayXpert® 1.4 : écart moyen 17%.



R=50; H=200 ; A=10 GBq; Co 60; d=100 cm; Eau (μSv/h)					Dosimex vs Microshield	Benchmak vs Mercurad		Benchmark vs RayXpert		
Décalage	DOSIMEX-G	MICROSHIELD®	MERCURAD™	RayXpert®		Dosimex/ mercurad	μShield/ mercurad	Dosimex /RayXpert	Microshiel vs RayXpert	mercurad vs RayXpert
0 cm	631	593	640	569	6,4%	1,4%	7,3%	10,9%	4,3%	12,5%
20 cm	623	584	630	564	6,7%	1,1%	7,3%	10,5%	3,6%	11,7%
40 cm	599	560	600	532	6,9%	0,2%	6,6%	12,6%	5,3%	12,8%
60 cm	559	521	554	477	7,2%	0,9%	5,9%	17,2%	9,3%	16,1%
80 cm	506	470	502	432	7,7%	0,8%	6,4%	17,1%	8,8%	16,2%
100 cm	445	406	437	367	9,7%	1,8%	7,1%	21,3%	10,6%	19,1%

Tableau 19



Cas 2 : Distance source 100 cm

- BENCHMARKING DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 7%
 - Entre DOSIMEX-GX 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 1%
 - Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 7%

- BENCHMARKING ABSOLU VS RAYXPRT® V 1.4
- Entre DOSIMEX-GX 2.0 et RayXpert® 1.4: écart moyen 15%
 - Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert® 1.4: écart moyen 7%.
 - Entre MERCURAD™ et RayXpert® 1.4 : écart moyen 15%.



Partie II. CONCLUSION : VALIDATION DOSIMEX-GX 2.0 POUR LES SOURCE GAMMA

A) SYNTHÈSE DES ÉCARTS IMPORTANTS : TABLEAU DES RAPPORTS DOSIMEX-GX 2.0, MICROSHIELD® ET MERCURAD™ SUR RAYXPert©

PRISE EN COMPTE DES RAPPORTS SUPÉRIEURS 10 (SURESTIMATION) OU INFÉRIEURS À 1/10 (SOUS-ESTIMATION)

- Valeur en rouge : sous-estimation par rapport à RayXpert
- Valeur en bleu : sur-estimation par rapport à RayXpert

Dosimex/RayXpert	Microshield /RayXpert	Mercurad /RayXpert
/	Cf252 + 1 cm Pb $\frac{1}{8E19}$	Cf252 + 1 cm Pb $\frac{1}{1,4E9}$
/	Am 241 ponctuel + 2 cm Pb $\frac{1}{1,6E16}$	Pu 8 source ponctuelle $\frac{1}{329}$
/	Cf252 sans écran $\frac{1}{42,5}$	Pu9 source ponctuelle $\frac{1}{42,0}$
Am 241 +50 cm d'eau 8,8	Am 241 +50 cm d'eau 7	Am 241 +50 cm d'eau 6,5

TABLEAU 26 : PERTE DE L'ORDRE DE GRANDEUR : RAPPORT > 10 OU < 1 /10.

Ces écarts particulièrement élevés apparaissent essentiellement avec les radionucléides de nombres de masses élevés avec des tables d'émissions souvent complexes avec :

- Des émissions X_L très intenses mais parfois non prises en compte car de faibles énergies (< 20 keV) conduisant alors à des écarts importants en source ponctuelle ou surfacique sans écran.
- À l'inverse des émissions peu intenses mais d'énergies élevées conduisant à des écarts importants, lorsqu'elles sont négligées, en présence d'écran épais.

Un soin particulier a été apporté en ce sens à la base de données utilisée dans la version 2.0 de Dosimex-GX.

On retrouve aussi un cas particulièrement significatif où le Build-up infini surestime particulièrement le build-up réel. Il est important de rappeler que le build-up infini est calculé pour une source et un point dose collé à l'écran, ce qui n'est pas le cas ici.



RAPPORTS COMPRIS ENTRE 1,5 ET 10 (SURESTIMATION) OU ENTRE 1/1,5 ET 1 /10 (SOUS-ESTIMATION)

Dosimex/RayXpert	Microshiel /RayXpert	Mercurad /RayXpert
CSDV pt 1 + 15 cm de pb 2,73	Cs137 Cylindre axe + 2 cm Pb 3,38	CSDV pt 2 + 15 cm Pb 2,39
Am241 ponctuel + 50 cm d'eau 2,24	Cs137 Cylindre latéral + 2 cm Pb 2,78	Am 241 source ponctuelle sans écran 2,22
CSDV pt 2 + 15 cm Pb 1,76	Am241 ponctuel + 50 cm d'eau 1,79	CSDV pt 1 + 15 cm Pb 2,04
CSDV pt 1 sans écran 1,56	Co60 cylindre latéral +2 cm Pb 1,79	Cs137 ponctuel + 50 cm d'eau 1,77
Cs137 ponctuel + 50 cm d'eau 1,50	CSDV pt 1 + 15 cm Pb 1,62	Am241 ponctuel + 50 cm d'eau 1,64
/	Source ponctuelle Cs 135 à 0,5 cm sans écran 1,59	CSDV pt 1 sans écran 1,61
/	Co60 cylindre lax+2 cm Pb 1,57	Source ponctuelle Cs 135 à 0,5 cm sans écran 1,59
/	Pu 9 source ponctuelle 1/1,6	Cs137 Cylindre axe + 15 cm eau 1,52
/	Cs137 ponctuel + 50 cm d'eau 1,54	Cs137 Cylindre latéral + 15 cm eau 1,50

TABLEAU 27 : RESULTATS DANS L'ORDRE DE GRANDEUR MAIS ECARTS RELATIF > 50 %

La plupart des écarts proviennent de surestimations liées à un facteur de build-up « infini ».



B) SYNTHÈSE DES ÉCARTS RELATIFS MOYENS

Pour l'ensemble des comparaisons portant sur 150 configurations différentes ayant nécessité 610 calculs répartis entre DOSIMEX-GX 2.0, MICROSHIELD® V 9, MERCURAD™ et RAYXPRT® V 1.4.

BENCHMARKING FINAL DANS LA CATEGORIE « CODES DETERMINISTES »

*(en rouge entre parenthèses valeurs moyennes après élimination des écarts aberrants
Cf. tableau 26)*

- Entre DOSIMEX-G 2.0 et MICROSHIELD® V 9 : écart moyen 14 % (9 %)
- Entre DOSIMEX-G 2.0 et MERCURAD™ : écart moyen 12 % (9 %)
- Entre MICROSHIELD® V.9 et MERCURAD™ : écart moyen 14 % (10 %)

BENCHMARKING FINAL VS RAYXPRT® V 1.4

*(en rouge entre parenthèses valeurs moyennes après élimination des écarts aberrants
cf tableau 26)*

- Entre DOSIMEX-G 2.0 et RayXpert® 1.4: écart moyen 11 % (9 %)
- Entre MICROSHIELD® V.9 et RayXpert® 1.4: écart moyen 16 % (8 %)
- Entre MERCURAD™ et RayXpert® 1.4 : écart moyen 17 % (10 %)

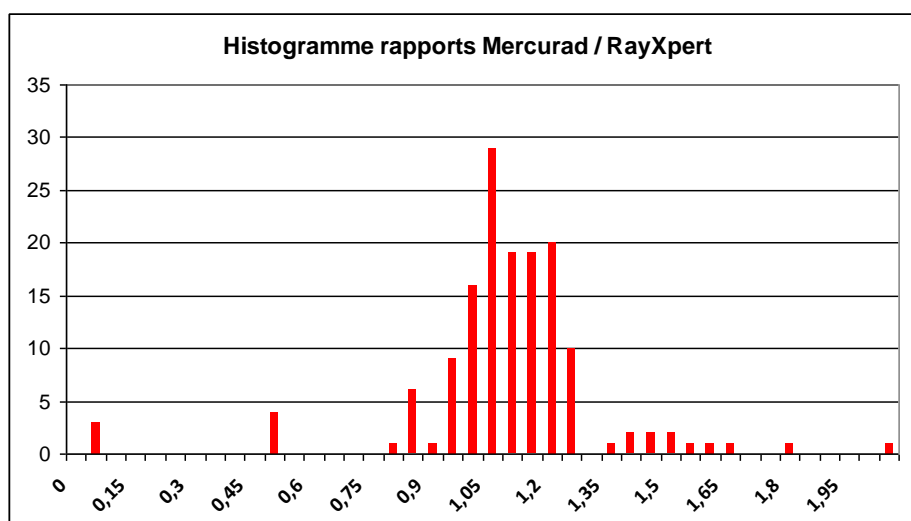
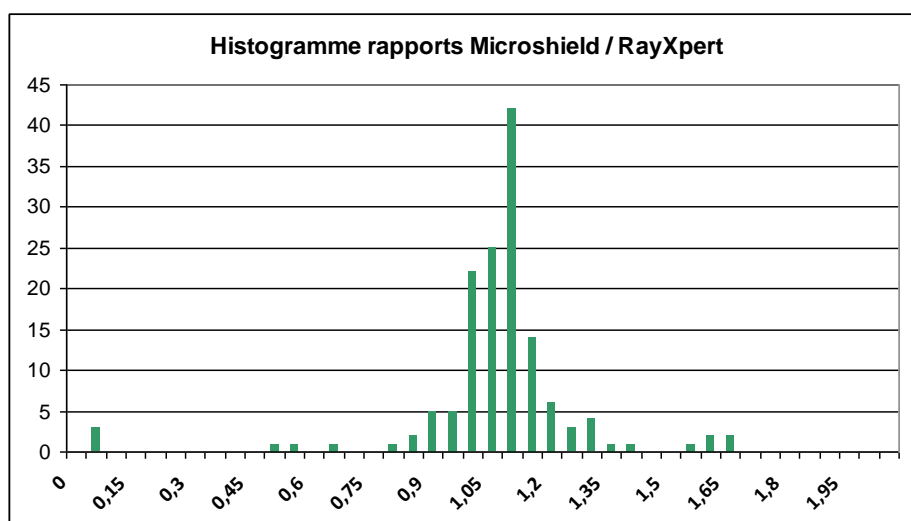
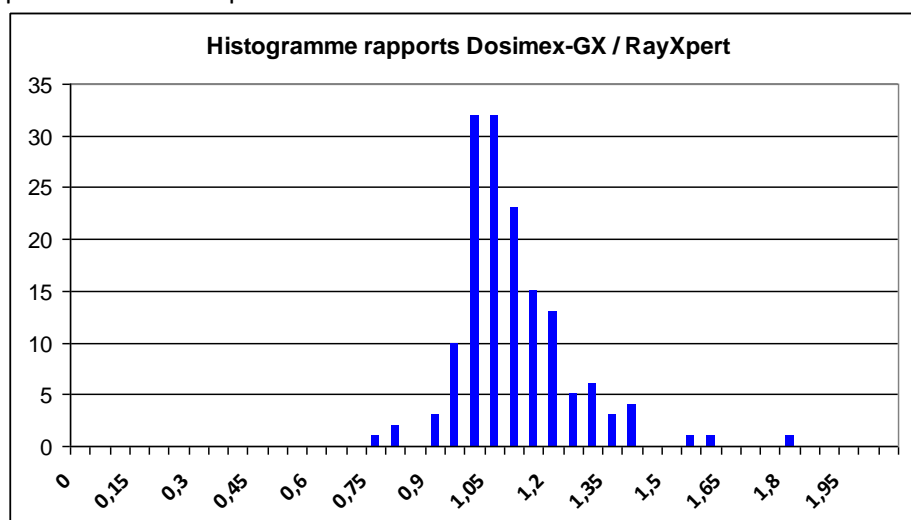
N'apparaissent pas dans ces résultats : build-up (scenario 4), effet de ciel (scenario 11) et rayonnement de freinage (scenario 12) ainsi que les comparaisons avec le gradient d'activité.

On notera que dans le benchmarking absolu vs RayXpert, c'est Dosimex-GX 2.0 qui présente un écart relatif moyen le plus faible (11 %), avec un très faible impact des écarts maximum (9 % au lieu de 11 %) après élimination des valeurs aberrantes recensées dans le tableau 27.

Il est possible que d'autres configurations permettent de modifier ces écarts, et le classement qualitatif qui en résulte. Il appartient à l'utilisateur de décider si ces résultats démontrent ou non que DOSIMEX-GX 2.0 est un code fiable pouvant être utilisé dans des études de radioprotection.



Les histogrammes des rapports entre les 3 codes déterministes et RayXpert montrent aussi une moindre dispersion des écarts pour Dosimex-GX 2.0 :





Partie III. VALIDATION MODELISATION GENERATEUR X

SCENARIO 1 : COMPARAISON VS MCNP

Les valeurs obtenues dans le mode de calcul physique (option « calcul direct » en termes de kerma dans l'air et de débit de dose ambiant $H^*(10)$ dans le faisceau primaire) ont été comparées à des résultats obtenus avec MCNP (réf : *Physique appliquée à l'exposition externe : Dosimétrie et radioprotection, Rodolphe Antoni et Laurent Bourgois, Springer 2012*).

Les valeurs sont données en débit d'équivalent de dose ambiant en $mSv.mn^{-1}$ à 1 m du foyer et une intensité de 1 mA. Les valeurs ainsi obtenues correspondent au concept de rendement défini dans la norme NF C 15-160 exprimé en $mSv.m^2mn^{-1}.mA^{-1}$.

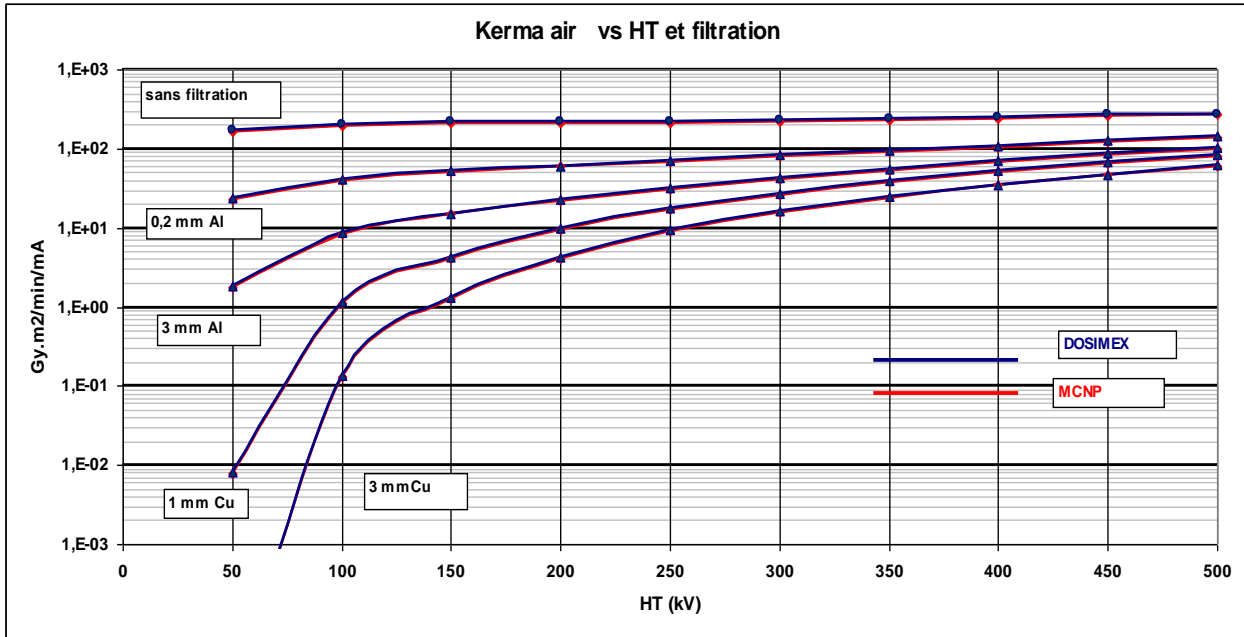
Remarque importante : la norme exprime le rendement en termes d'équivalents de dose (mSv), mais les valeurs correspondent au kerma dans l'air.

A. KERMA DANS L'AIR :

	Sans filtration	0,2Al	0,5Al	1Al	2Al	3Al	0,2Cu	0,5Cu	1Cu	2Cu	3Cu	
KERMA DOSIMEX	50 kV	171	24	11,6	6,3	3,1	1,9	0,531	0,076	0,00813	2,30E-04	1,00E-05
	100 kV	204	41	25,3	17,0	11,3	8,7	5,22	2,55	1,17	0,357	0,136
	150 kV	216,04	52	35	26	19	15	11,15	6,95	4,28	2,17	1,29
	200 kV	219,50	61	44	34	27	23	19	13,61	9,73	6,12	4,28
	250 kV	222,23	71	54	44	37	32	28,61	22,38	17,4	12,24	9,28
	300 kV	227,46	83	66	56	48	43	40	33	27,13	20,38	16,19
	350 kV	238,60	96	79	70	61	56	61	46	38,8	30,45	25
	400 kV	250,29	110	93	83	75	70	68	60	52	42,25	35,4
	450 kV	268,20	127	111	101	92	86	85	76	67,5	56	47,6
	500 kV	277,00	146	130	120	110	103	104	94	84,6	71,2	61,36

KERMA MCNP	50 kV	148	24,9	11,5	6,08	3,03	1,85	0,562	9,05E-02	1,11E-02	3,62E-04	1,82E-05
	100 kV	199	48,9	25,8	16,5	10,4	7,76	3,99	1,82	0,854	0,373	0,163
	150 kV	223	66,1	40	28,5	19,7	15,7	10,1	5,76	3,48	1,86	1,16
	200 kV	232	78,5	50,9	38,7	29,3	24,8	17,7	11,7	8,17	5,66	4,05
	250 kV	249	95	66,5	53,3	41,9	35,9	27,6	19,6	14,6	10,2	7,86
	300 kV	255	108	80	66,2	54,3	47,9	39	29,3	22,6	16,7	13,6
	350 kV	262	123	95,4	81,9	69,7	62,2	52,5	40,9	33,5	25,6	21,1
	400 kV	270	136	109	94,8	82,1	75	64,5	51,9	42,3	33,7	28,7
	450 kV	286	156	129	115	101	93,2	83,3	68,4	57,2	45,8	38,7
	500 kV	302	174	147	133	120	112	101	85,4	72,6	58,8	50,4

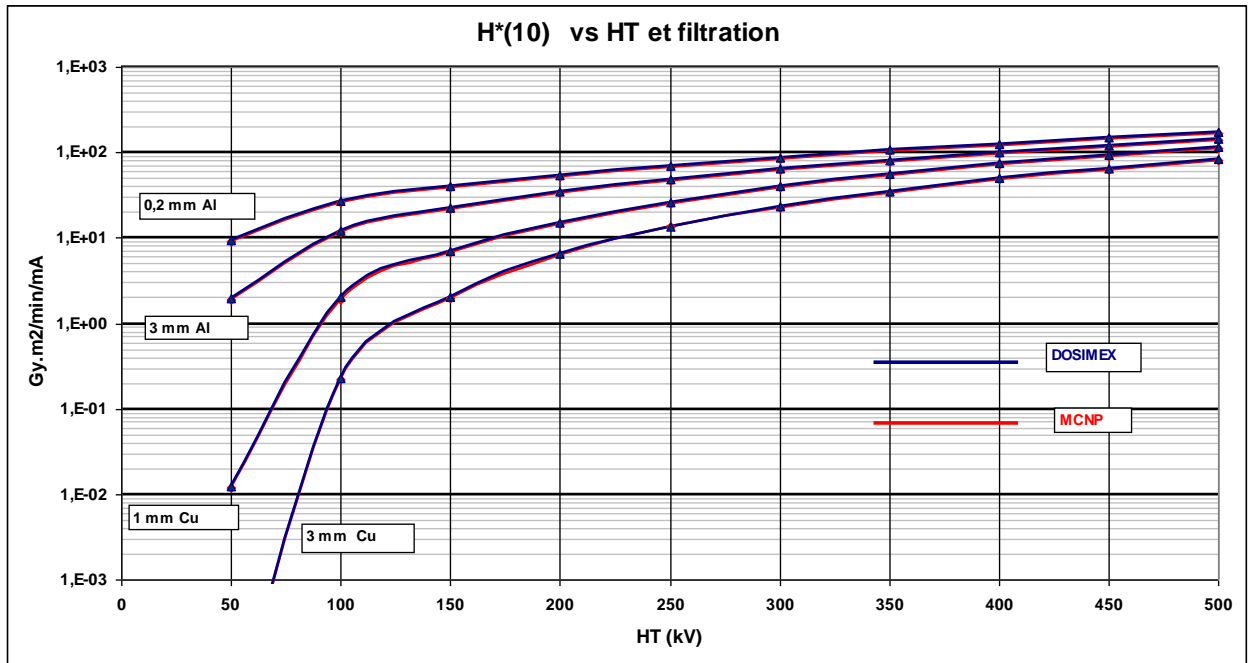
L'écart moyen algébrique est égal à -0,7 %, ce qui dénote une absence significative de biais, et un écart moyen absolue égal à 13 %, écart admissible dans une optique de radioprotection.



B. DEBITS DE DOSE AMBIANT H*(10) :

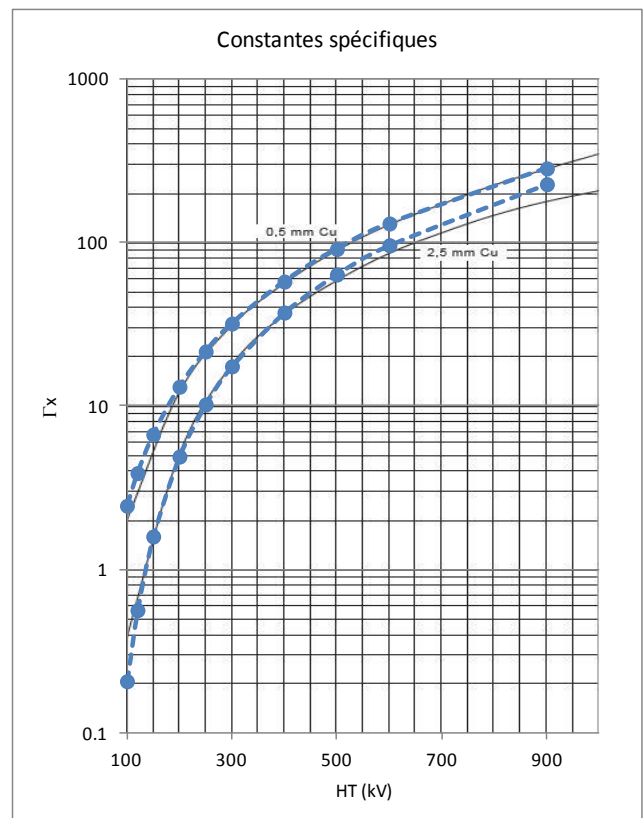
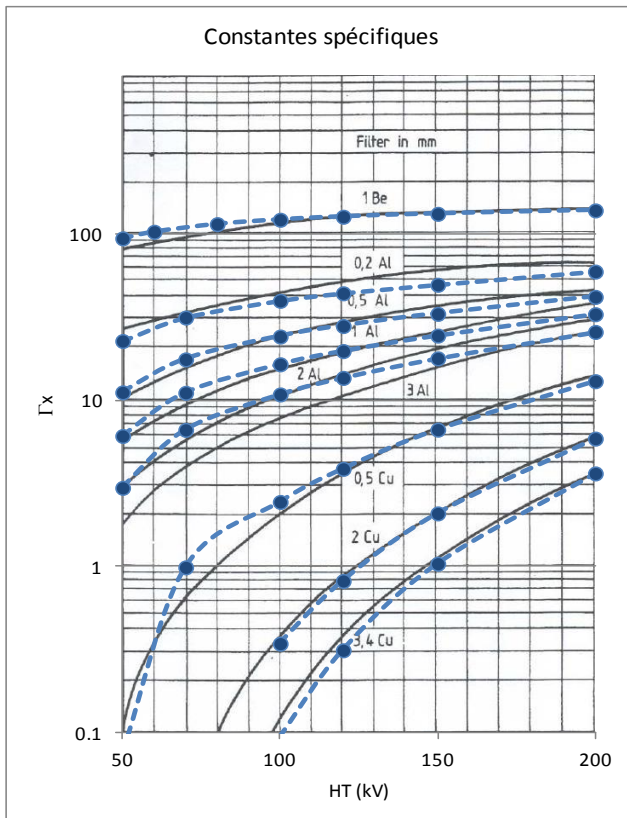
		Sans filtration	0,2Al	0,5Al	1Al	2Al	3Al	0,2Cu	0,5Cu	1Cu	2Cu	3Cu
H*(10) DOSIMEX	50 kV	12,23	9,21	7,23	5,03	3	1,99	0,68	0,11	1,26E-02	3,73E-04	1,60E-05
	100 kV	30,3	26,2	22,31	18,3	14	11,4	7,6	3,8	1,8	0,56	2,21E-01
	150 kV	44,24	39,7	35,14	30,3	25	21,4	16,7	10,7	6,7	3,5	2,1
	200 kV	58,2	53,5	48,7	43,5	37	33,2	28,6	21	15,1	9,6	6,7
	250 kV	73,6	68,8	63,9	58,4	51,5	46,9	42,9	34	26,5	18,7	14,1
	300 kV	91,1	86,2	81	75,2	68	62,6	59,5	49,5	40,6	30,5	24
	350 kV	110,3	103,3	100	94	86	80,2	78,2	67,3	57	44,6	36,3
	400 kV	131,1	126,2	120	114,6	106	99,7	99	87,2	75	60,9	50,7
	450 kV	154,2	149,1	143,7	137	128	121,1	121,7	109	96	79,3	67,12
	500 kV	179,3	174	168,5	161,7	151	144	146,5	133	118	99,6	85,4

H*(10) (MCNP)	50 kV	10,1	7,69	6	4,35	2,75	1,87	0,675	0,128	1,69E-02	5,72E-04	2,92E-05
	100 kV	27,3	23,1	19,4	15,9	12,2	9,94	5,97	3,02	1,46	0,641	0,279
	150 kV	46	40,7	36,3	31,3	25,3	21,8	15,7	9,5	5,78	3,05	1,89
	200 kV	62,8	57,4	52,4	46,7	39,7	35,7	27,6	19	13,2	8,92	5,63
	250 kV	84,4	79,5	73,8	67,2	58,2	52,1	42,9	31,1	23	15,6	12
	300 kV	104	99,7	94	86,7	76,8	70,3	60,1	45,6	34,8	25,2	20,2
	350 kV	125	123	117	110	99,3	91,4	80,2	62,8	50,6	37,8	30,8
	400 kV	146	144	137	129	118	110	97,4	78,6	63	49,1	41,2
	450 kV	183	174	167	158	146	137	125	102	84,2	66,1	55,2
	500 kV	207	202	194	185	172	163	150	126	105	83,7	70,9



L'écart moyen algébrique est égal à 1 %, et l'écart moyen absolu égal à 13 %.

Les valeurs de rendements en kerma air obtenues par le modèle de calcul intégré à l'application DOSIMEX ont été graphiquement comparées aux résultats référencés par la norme (figure 2a et figure 3 NF C 15-160 mars 2011) :





SCENARIO 2 : COMPARAISONS RENDEMENTS POUR LES ANODES AUTRES QUE TUNGSTENE :

H*(10) à 50 kV sans filtration	Dosimex (mGy.m2/mn/mA)	Mcnp (mGy.m2/mn/mA)
W	12,23	10
Mo	11,26	13
Rh	11,88	12
Cu	5,9	4,6

Pour le Kerma on a en théorie $K(\text{Cu})/K(\text{W})=0,4$ et $K(\text{Mo})/K(\text{W})=0,8$ entre 50 et 200 kV.

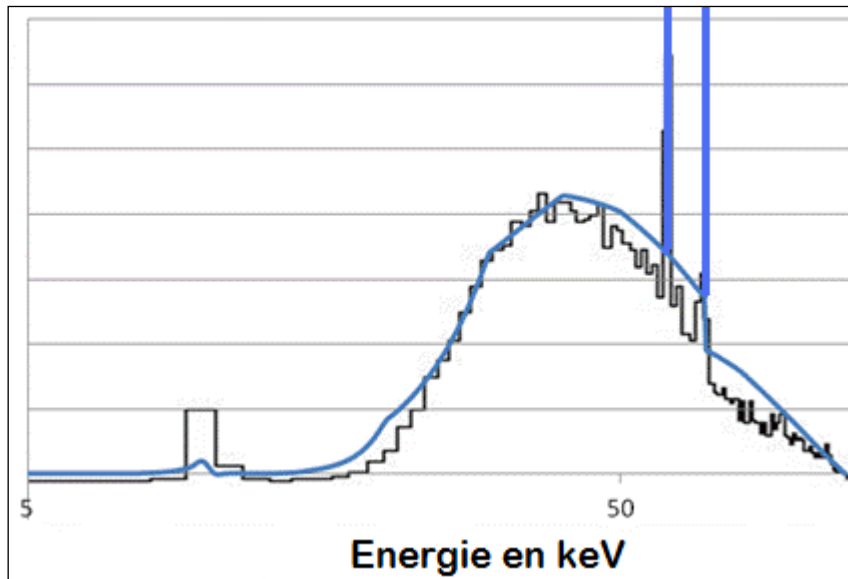
Pour dosimex on a :

Dosimex	K à 50 kV sans filtration	150 kV sans filtration	200 kV sans filtration	Rapport par rapport au W		
W	175.6	220	223	1	1	1
Mo	145.53	154	152	0,82	0,7	0,7
Cu	111	109	105	0,6	0,5	0,5



SCENARIO 3 : COMPARATIF SPECTRE

Des essais ont été réalisés pour confirmer la correspondance spectrale des résultats obtenus avec DOSIMEX-GX. Le spectre ci-après a été obtenu pour une simulation de spectre X de 120 kV sans filtration et a été confronté à un résultat MCNP réalisé par Laurent Bourgeois.



Les pics de fluorescence X du tungstène constituant l'anode semblent plus grands sur le spectre Dosimex-GX que sur le spectre MCNP. Cet effet n'est qu'un artefact généré par des discrétisations numériques différentes entre ces deux codes.



SCENARIO 4 : VALIDATION DED RAYONNEMENT DIFFUSE

La valeur de la dose diffusée dépend fortement des distances, de la nature et des dimensions du diffuseur et de la surface éclairée, ainsi que de la nature de la filtration. La norme NF c15-160 s'appuie sur des **coefficients de diffusion k^2** (rapport du kerma air moyen diffusé à 1 m au kerma air au niveau de l'objet éclairé à 1 m de distance du foyer) en fonction de la HT.

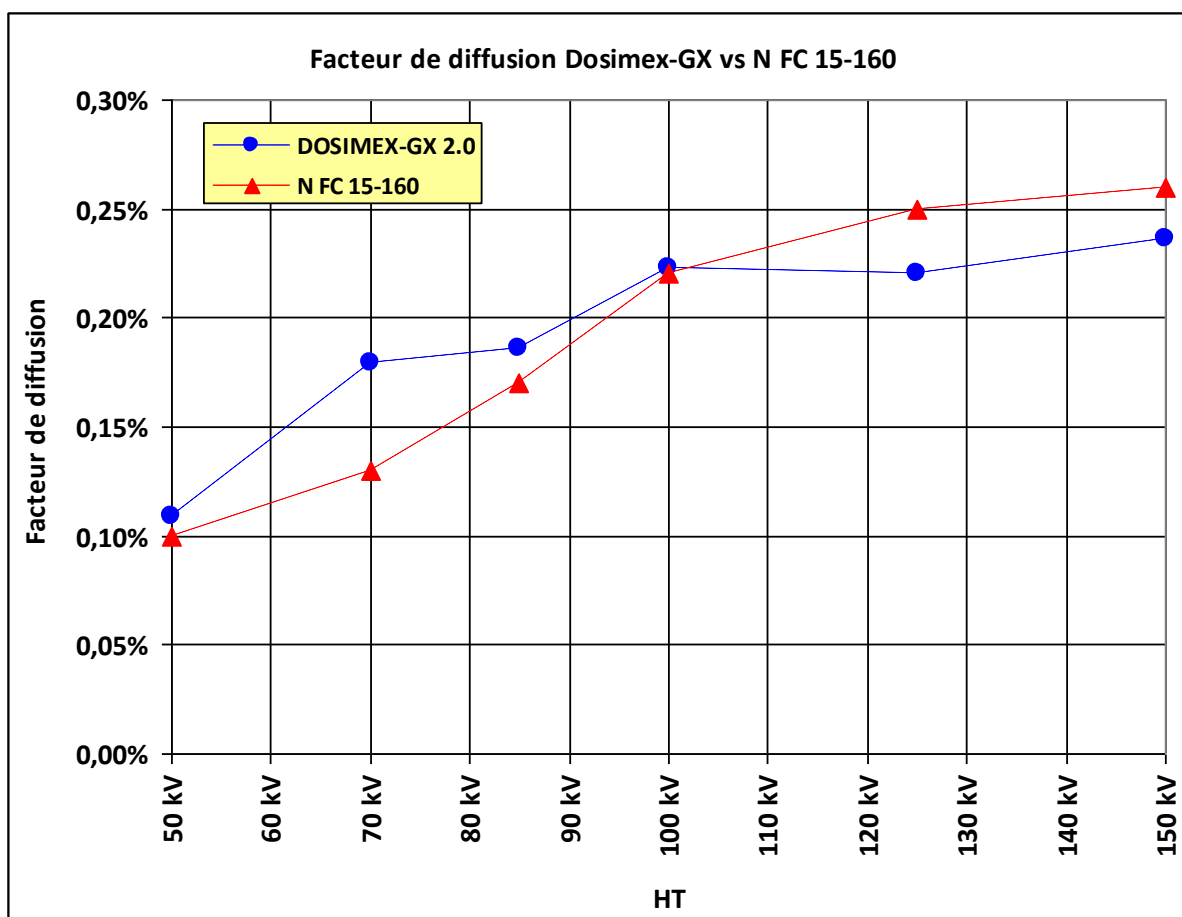
La nature, la forme et les dimensions de l'objet diffuseur, la surface éclairée ainsi que la nature de la filtration ne sont pas précisées.

En supposant que le milieu diffuseur est un individu et en prenant les paramètres suivants :

- Milieu écran : eau (patient)
- Epaisseur 200 mm
- Surface éclairée (champ) de 300 cm²
- Filtration de 2 mm d'Aluminium
- Angle 45 ° (mode calcul rapide)

On obtient les valeurs suivantes :

Haute tension (kV)	Valeur du coefficient de diffusion (k^2)		Ecart relatif
	Dosimex-GX 2.0	Norme NF C15-160 tableau 3a	
50	0,109%	0,10%	9%
70	0,179%	0,13%	38%
85	0,186%	0,17%	9%
100	0,223%	0,22%	1%
125	0,220%	0,25%	-12%
150	0,236%	0,26%	-9%



On constate que les ordres de grandeur sont très proches : entre 0,1 % et 0,2 % à 1 m



Partie IV. VALIDATION OPTION « NORME NF C15-160 » DE DOSIMEX-GX

L'application DOSIMEX-GX a également été confrontée, pour la partie calcul selon la NFC15160 à de multiples cas de figure, proposés par des experts du domaine. L'exemple ci-après vous présente les résultats obtenus par les experts du domaine et par l'application DOSIMEX-GX :

On considère un scanographe de 140 kv de tension nominale et filtré par 7 mm d'aluminium. Ce générateur présente une charge de travail de 30000 mA.min par semaine. L'objectif est de calculer la dimension de protection à mettre en œuvre :

- pour la protection contre le faisceau primaire, avec une distance **a** foyer-paroi de 2 m, un facteur d'occupation $t=1$ et une limitation de débit d'équivalent de dose de 0,02 mSv/semaine.
- pour une paroi séparant un local exposée au rayonnement de fuite et au rayonnement diffusé. Pour le rayonnement diffusé, la distance **b** foyer-diffuseur est égale à 0,9 m, et la distance **d** diffuseur-paroi est égale à 0,5 m. Pour le rayonnement de fuite, la distance **c** foyer-paroi est égale à 0,5 m ($c=d$). Le facteur d'occupation est toujours égal à 1, mais la limite en termes de débit d'équivalent de dose est égale ici à 0,12 mSv/semaine.

La feuille de calcul-ci-dessous propose les résultats obtenus par les experts du domaine dans une application stricte de la norme NF C15-160 (calculs de type « abaques »).

Calcul effectué par :		Etablissement:	
Fonction :		Adresse :	
Date :			
Application : Domaine médical: Scanographie		Service :	
Installateur :		Local :	
Appareil :		HT nominale (kV) : 140	
Type :		HT max utilisée (kV) : 140	
PARAMETRES UTILISES POUR LES CALCULS :		Filtration : Matériau : Al Epaisseur (mm) : 7	
		Largeur du faisceau (cm) : 4 (cas du scanner)	
	Valeur proposée par la norme	Valeur retenue pour le calcul	
Γ_x (mSv.m ² /mA.min) :	6,4	6,4	
k (m ²) :	0,00032	0,00032	
C_d (mSv.m ² /h) :	1	1	
f :	1,00	1,00	
Q (mA.min/h) :	900	900	
W (mA.min par semaine) :	30000	Voir partie "Mode d'utilisation"	
		MODE D'UTILISATION :	
		Intensité maximale (mA) :	
		Durée d'utilisation maximale hebdomadaire (min par semaine) :	
		Durée d'utilisation maximale horaire (min par heure) :	
		Charge de travail maximale hebdomadaire (mA.min par semaine) : 30000	
		Charge de travail maximale horaire (mA.min par heure) : 1	

Paroi	Zone	H _{max} mSv	W mA.min	T	Rayonnement primaire				Rayonnement diffusé				Rayonnement de fuite				e mmPb	Protection existante			Protection à ajouter			Hauteur (m) ou Surf. (m ²)
					R	a	F _p	e _p mmPb	b	d	F _s	e _s mmPb	c	F _d	e _d mmPb	Nature		Ep. mm	Eq. Pb mm	Nature	Ep. mm			
	Publique	0,02	30000	1	1	2	2E+06	5,4			0	SO			0	SO	SO			0,0		SO		
	Publique	0,02	30000	1			0	SO			0	SO			0	SO	SO			0,0		SO		
	Surveillée	0,12	30000	1			0	SO	0,9	0,8	989,06	2,1	1,5	123,46	2	2,4			0,0		SO			
	Surveillée	0,12	30000	1			0	SO	0,9	0,5	2532	2,5	0,5	1111,1	2,9	3,2			0,0		SO			
	Surveillée	0,12	30000	1			0	SO	0,5	3,8	142,03	1,4	3,8	19,237	1,3	1,7			0,0		SO			



On obtient ainsi, dans une application rigoureuse de la norme NF C15-160, une valeur de **5,4 mm** de plomb pour le rayonnement primaire et **3,2 mm** de plomb pour le rayonnement diffusé et de fuite.

COMPARAISON AVEC DOSIMEX-GX :

- POUR LE RAYONNEMENT PRIMAIRE :

Le résultat obtenu avec DOSIMEX-GX dans le mode de calcul NF C15-160 (03-2011) est le suivant:

Secteur d'activité :	Medical	Calcul effectué par :	DOSIMEX				
Domaine :	scanographie	Date :	07/10/2013 22:21:10				
Appareil :	Appareil						
HT utilisée (kV) :	140	Local adjacent :	Autre				
Filtration :	Aluminium 7mm	T occupation :	1				
Γ_R (mGy/min/mA) :	6.41E+00	Paroi :	Platre	Equivalent Pb			
Largeur Faisceau l (cm) :	4	Epaisseur (mm) :	0	0			
W (mA.min/sem) :	30000	Hmax (mSv/sem) :	0,02				
Rayonnement primaire	R 1		a 2		Hp×T (mSv/sem) 4.81E+04	Fp 2.41E+06	Xpb 5.4
Rayonnement diffusé	k (m2) -	b -	d -		Hs×T (mSv/sem) -	Fs -	Xpb -
Rayonnement de fuite	f 1	c -	Q -	Cg -	Hg×T (mSv/sem) -	Fg -	Xpb -
Epaisseur équivalente de protection de plomb calculée (mm)							5.4
Epaisseur équivalente de protection de plomb à ajouter (mm)							5.4

On retrouve une épaisseur de **5,4 mm** conforme à l'application de la norme

Dans les options Methode alternative* Dosimex on obtient dans les deux cas une épaisseur à ajouter de **5,5 mm**.



- POUR LE RAYONNEMENT DIFFUSE ET DE FUITE:

Dans la configuration nominale NF C15-160 (03-2011) on obtient le résultat suivant :

Secteur d'activité :	Medical	Calcul effectué par :	DOSIMEX				
Domaine :	scanographie	Date :	07/10/2013 22:21:10				
Appareil :	Appareil						
HT utilisée (kV) :	140	Local adjacent :	Autre				
Filtration :	Aluminium 7mm	T occupation :	1				
Γ_R (mGy/min/mA) :	6.41E+00	Paroi :	Platre	Equivalent Pb			
Largeur Faisceau l (cm) :	4	Epaisseur (mm) :	0	0			
W (mA min/foyer) :	2000	Hmax (mSv/sem) :	0,12				
<input type="radio"/> NF C15-160 (03-2011)							
Rayonnement primaire	a		H _p ×T (mSv/sem)	F _p	X _{Pb}		
	1		-	-	-		
Rayonnement diffusé	k (m2)	b	d	H _s ×T (mSv/sem)	F _s	X _{Pb}	
	3.20E-04	0,9	0,5	3.04E+02	2.53E+03	2.5	
Rayonnement de fuite	f	c	Q	C _g	H _g ×T (mSv/sem)	F _g	X _{Pb}
	1	0,5	900	1	1.33E+02	1.11E+03	2.88
Epaisseur équivalente de protection de plomb calculée (mm)						3.18	
Epaisseur équivalente de protection de plomb à ajouter (mm)						3.18	

Le résultat final est une épaisseur de **3,18 mm** de plomb, conforme là encore à l'application stricte de la norme.

Avec l'option Methode alternative* on obtient la même valeur de 3,18 mm

Avec l'option Dosimex on obtient une valeur légèrement différente de 3,10 mm

Rappelons ici que la méthode alternative à l'avantage de proposer une règle des épaisseurs plus fine que la règle proposée dans la NF C15-160 de mars 2011, et que l'option Dosimex permet d'effectuer des calculs pour des cas en dehors des abaques de la norme.

Environ 40 configurations différentes ont été ainsi testées, et les résultats, dans l'option « NF C215-160 », ont tous été strictement conformes à une application stricte de la norme.