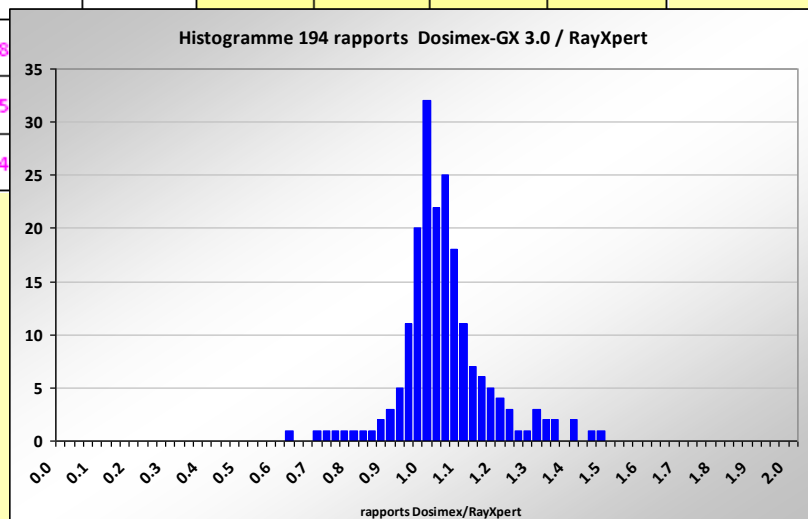
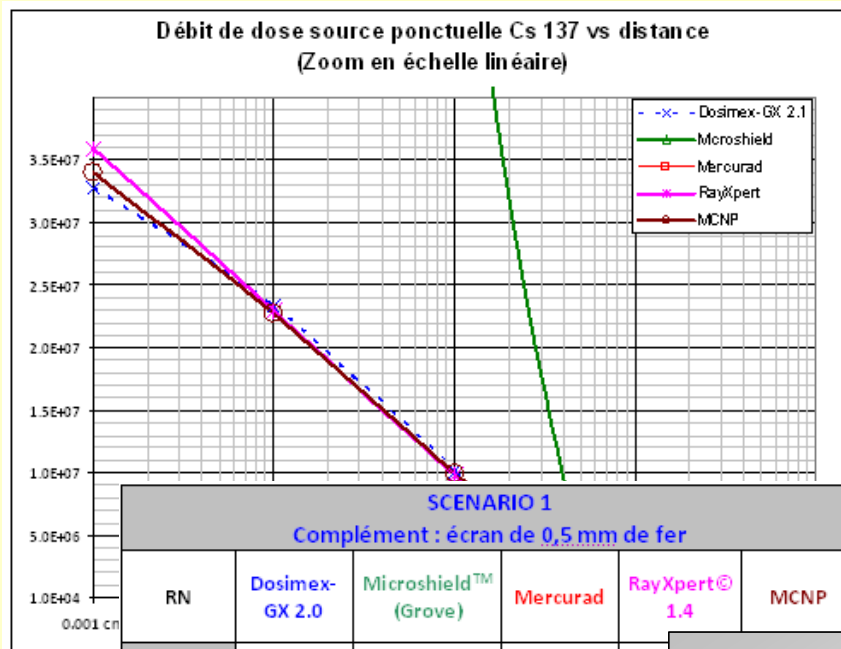




## DOSIMEX-GX 3.0

✓ **DOSSIER DE VALIDATION EMISSION GAMMA  
(RADIONUCLÉIDES)**



**Alain VIVIER, Gérald LOPEZ**  
**SEPTEMBRE 2019**

## Table des matières

### **PARTIE I. DOSSIER VALIDATION DOSIMEX-GX 3.0 POUR LES SOURCES GAMMA ..... 3**

|                                                                                                        |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| PRÉAMBULE : CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA VALIDATION POUR LA PARTIE « SOURCES GAMMA » DE DOSIMEX-GX 3.0 ..... | 3 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

#### **PARTIE 1 :BENCHMARK VS MICROSHIELD, MERCURAD, RAYXPRT, MCNP**

|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>SCENARIO 1 : COMPARAISONS DES RÉSULTATS POUR 33 RADIONUCLÉIDES PRINCIPAUX .....</b>        | <b>8</b>  |
| <i>Scenario.1.1 Source ponctuelles sans écran.....</i>                                        | <i>8</i>  |
| <i>Scenario.1.2 Calculs complémentaires avec écrans .....</i>                                 | <i>11</i> |
| <b>SCENARIO 2 : EVOLUTION DES RÉSULTATS EN FONCTION DE LA DISTANCE .....</b>                  | <b>13</b> |
| <b>SCENARIO 3 : SOURCES PONCTUELLES AVEC ÉCRAN. IMPACT DU BUILD-UP .....</b>                  | <b>24</b> |
| <b>SCENARIO 4 : INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE SOURCE.....</b>                                     | <b>30</b> |
| <b>SCENARIO 5 : COUPLAGES SOURCES VOLUMIQUES + ÉCRAN .....</b>                                | <b>33</b> |
| <b>SCENARIO 6 : INFLUENCE DU MATÉRIAU .....</b>                                               | <b>37</b> |
| <b>SCENARIO 7 : MAILLAGE EN PUISSANCE ADAPTATIF ET PRISE EN COMPTE DES GRANDES DIMENSIONS</b> | <b>41</b> |
| <b>SCENARIO 8 : GÉOMÉTRIE PARALLÉLÉPIPÈDE DE GRANDE DIMENSION AVEC ET SANS ECRAN .....</b>    | <b>49</b> |
| <b>SCENARIO 9 : MODÉLISATION MULTIRADIONUCLÉIDES.....</b>                                     | <b>52</b> |
| <i>Scenario.9.1 Container solide de déchets vitrifiés (CSDV).....</i>                         | <i>52</i> |
| <i>Scenario.9.2 Contamination mur béton (réacteur Ulysse).....</i>                            | <i>54</i> |
| <i>Scenario.9.3 Validation option gradient d'activité (rajouté avec la version 1.4).....</i>  | <i>56</i> |
| <b>SCENARIO 10 : VALIDATION « EFFET DE CIEL ».....</b>                                        | <b>59</b> |
| <i>Scenario.10.1 effet de ciel vs divers matériaux) .....</i>                                 | <i>59</i> |
| <i>Scenario.10.2 Calcul effet de ciel dans une chicane de blockaus de gammagraphie .....</i>  | <i>61</i> |

#### **PARTIE 2 :COMPARAISONS VS RAYXPRT**

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>SCENARIO 11 : VALIDATION « RAYONNEMENT DE FREINAGE » .....</b>                       | <b>63</b> |
| <b>SCENARIO 12 : ECRAN CYLINDRIQUE . OPTION DOSIMEX-GX 2.1 AVRIL 2017 .....</b>         | <b>67</b> |
| <b>SCENARIO 13 : MATRICE CYLINDRIQUE ÉVIDÉ. ....</b>                                    | <b>70</b> |
| A. Matrice Cylindre évidé, matériau air .....                                           | 70        |
| B. Matrice Cylindre évidé, matériau fer .....                                           | 71        |
| <b>SCENARIO 14 : PRIMAIRE RÉACTEUR CONTAMINÉ EN FACE INTERNE .....</b>                  | <b>72</b> |
| <b>SCENARIO 15 : MESURE DED INTERNE TUYAU .....</b>                                     | <b>75</b> |
| <b>SCENARIO 16 : FONCTION « DÉCALAGE » SUR SOURCE CYLINDRIQUE ET FIL. ....</b>          | <b>77</b> |
| <b>SCENARIO 17 : CALCUL BLOCKHAUS AVEC UNE SOURCE D'IRIDIUM DE CO 60 DE 50 CI .....</b> | <b>80</b> |

### **PARTIE II. SYNTHÈSE VALIDATION DOSIMEX-GX 3.0 POUR LES SOURCES GAMMA ..... 82**

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A. Synthèse benchmark Dosimex-GX 3.0, Microshiel <sup>®</sup> , Mercurad <sup>™</sup> et RayXpert <sup>©</sup> vs MCNPX..... | 82 |
| B. Synthèse des écarts importants : Tableau des rapports.....                                                                | 83 |
| C. Histogrammes des rapports vs MCNP .....                                                                                   | 85 |
| D. Synthèse des résultats Dosimex vs RayXpert (sc 1 à 16) .....                                                              | 87 |
| E. mémoires de stage de fin d'étude mettant en jeu Dosimex-GX.....                                                           | 88 |

# Partie I.

## DOSSIER VALIDATION DOSIMEX-GX 3.0 POUR LES SOURCES GAMMA

PRÉAMBULE : CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA VALIDATION POUR LA PARTIE « SOURCES GAMMA » DE DOSIMEX-GX 3.0

Afin de qualifier le code **DOSIMEX-GX 3.0**, un grand nombre de configurations, 196 réparties sur 17 scénarios génériques, ont été testées.

✓ Sur ces 196 configurations 143 ont fait l'objet d'un benchmark vs 4 autres codes :

❖ 2 codes déterministes :

○ MICROSHIELD® V 9

○ MERCURAD™

❖ 2 codes de types Monte-Carlo :

○ RayXpert© 1.5

○ MCNP 4c2

C'est ce dernier code, MCNP, qui est considéré comme le code de référence pour ce benchmark

- Les calculs ont été réalisés sur Dosimex-GX et sur Microshield par nous-mêmes.
- Les calculs sur Mercurad ont été réalisés à l'Ecole des Applications Militaires de l'Energie Atomique (EAMEA Cherbourg) par Mr Jean-Lionel TROLET.
- Les calculs avec RayXpert ont pour l'essentiel été réalisés par nous-mêmes et ont été l'occasion d'un travail de collaboration avec les concepteurs de ce code (Société TRAD, Toulouse). A noter que ce code a lui-même bénéficié de nombreuses validations vs MCNP : <https://www.rayxpert.com/http-www-rayxpert-com-fiches-validation-du-logiciel-v1-6.html>
- Les calculs sur MCNP ont été réalisés à la demande de l'INSTN à la cellule calcul de la BU AREVA Projets (AREVA NP, site de la Hague). Les résultats sont présentés dans la Note [Technique NT 101682 42 001 A](#)

✓ Les 53 autres configurations ont été comparées à RayXpert seulement.

Cette validation aura donc nécessité au total 810 valeurs de calculs réparties sur 5 codes différents

**Le résultat essentiel de cette campagne de validation est le suivant : l'écart relatif quadratique moyen, toutes valeurs confondues (196 au total), est égal à 12,5 %, avec 90 % des résultats présentant un écart inférieurs à 20 % (voir le détail des conclusions en partie II)**

Nous avons enfin référencé 4 mémoires de fin d'étude dont l'objectif principal ou secondaire était de valider Dosimex-GX (voir dernière page de ce document)

Les 196 configurations se répartissent suivants les 17 scenarios génériques suivants:

#### 1 : BENCHMARK VS MCNP

- Scenarior 1 :** La qualité des résultats en fonction des radionucléides (*33 RN différents en sources ponctuelles à 10 cm*)
- Scenarior 2 :** L'évolution des résultats en fonction de la distance (*source ponctuelle de Cs 137*)
- Scenarior 3 :** Sources ponctuelles + écran.
- Scenarior 4 :** L'influence de la géométrie de la source de rayonnement (*sources volumiques, surfaciques, linéiques*)
- Scenarior 5 :** Le couplage source volumique+écran (*sources cylindriques + écran eau ou plomb*)
- Scenarior 6 :** L'influence de la nature des matériaux sur l'autoabsorption dans des sources volumiques (*source sphérique*).
- Scenarior 7 :** La capacité à prendre en compte des dimensions de sources très élevées (*Am 241 + source cylindrique en plomb*).
- Scenarior 8 :** La validation de la géométrie parallélépipédique introduite avec la version 1.3
- Scenarior 9 :** Validation pour une source multi-radionucléides (CSDV et mur béton) et gradient d'activité (mur béton activé, comparaison avec le code Mercure)

#### 2 : COMPARAISONS DOSIMEX VS RAYXPERT©

- Scenarior 10 :** L'effet de ciel
- Scenarior 11 :** Le rayonnement de freinage généré par l'émission Bêta
- Scenarior 12 :** Ecran cylindrique (« tuyau ») avec la géométrie cylindre. Option implémentée dans la version Dosimex-GX 2.1 (avril 2017)
- Scenarior 13 :** Matrice cylindrique évidée.
- Scenarior 14 :** Primaire réacteur contaminé en surface interne.
- Scenarior 15 :** Décalage sur source cylindrique et fil
- Scenarior 16 :** La fonction décalage sur source cylindrique et fil
- Scenarior 17 :** Calcul Blockhaus avec une source de Co de 50 Ci

## GESTION DES ÉCARTS

Les écarts relatifs sont calculés par rapport au code de référence sur les valeurs de débit d'équivalent de dose, en général  $\dot{H}^*(10)$ , :

$$\bar{e}_{(\%)} = \frac{(\dot{H}_i - \dot{H}_{\text{iref}})}{\dot{H}_{\text{iref}}}$$

Lorsque les scénarios comportent plusieurs jeux de données, comme par exemple pour le scénario 1 avec 33 radionucléides différents, nous calculons alors **l'écart quadratique moyen (EQM)**:

$$\overline{\text{eqm}}_{(\%)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \bar{e}_{i(\%)}^2}{n}}$$

Cet indicateur statistique majoré les autres indicateurs statistiques de dispersion tel que l'écart-type population ou échantillon. En effet l'écart quadratique moyen prend en compte la dispersion des valeurs autour de la moyenne mais aussi l'écart moyen par rapport à 0, obtenu avec la moyenne algébrique des valeurs.

A termes cet écart quadratique moyen calculé sur l'ensemble des configurations testées permet de quantifier la « précision » moyenne globale des codes (voir page ) ou encore une incertitude moyenne que l'on peut associer à tous les résultats n'apparaissant pas dans ce document.

Pour la synthèse finale des résultats, nous donnons aussi cet écart quadratique moyen pour le calcul en écart relatif.

Nous utiliserons aussi pour cette synthèse le rapport entre le code testé et le code de référence :

$$r = \frac{\dot{H}_{\text{testé}}}{\dot{H}_{\text{ref}}}$$

Cette quantité permet alors de construire des histogrammes pour l'ensemble des valeurs, histogrammes qui permettent de mieux saisir la qualité intrinsèques des codes

Pour ces données nous donnerons aussi l'écart algébrique moyen, révélateur d'un biais d'ensemble, et l'écart-type, qui représente la dispersion autour de cette moyenne.

## GESTION DES VALEURS JUGÉES ABERRANTES

De façon relativement arbitraire, nous avons décidé de qualifier comme « aberrantes » des valeurs pour lesquelles les écarts relatifs supérieurs, en valeur absolues, à 50 %.

Ces cas particuliers sont soulignés par des cellules de couleur rose :

-87%

Pour être qualifiés de valeurs aberrantes, il est nécessaire que de telles valeurs soient relativement peu nombreuses (voir *tableau synthèse en partie II*) :

- ❖ Pour DOSIMEX –GX : 1 valeur aberrante sur l'ensemble des 196 valeurs, soit 0,5 % des cas
- ❖ Pour MICROSHIELD : 13 valeurs aberrantes sur 133 valeurs, soit 10 % des cas
- ❖ Pour MERCURAD : 13 valeurs aberrantes sur 139 soit 9 % des cas
- ❖ Pour RayXpert : aucune valeur aberrante

Au-delà de cet aspect statistique, nous nous sommes attachés à donner l'origine de ces valeurs aberrantes : défaut de la table d'émission, build-up etc....

Ces études nous ont permis, au fil des années, à recalibrer nos codes, notamment par exemple sur les tables d'émissions ou encore sur les facteurs de build-up dans les milieux de faible numéro atomique, pour lesquels les valeurs de références (ANS/ANSI) n'ont cessé de donner des valeurs aberrantes largement surestimées (voir *annexe N*)

## 1 : BENCHMARK DOSIMEX-GX, MICROSHIELD, MERCURAD, RAYXPERT, MCNP



## SCENARIO 1 : COMPARAISONS DES RÉSULTATS POUR 33 RADIONUCLÉIDES PRINCIPAUX

### Scenario.1.1 SOURCE PONCTUELLES SANS ÉCRAN

Les 33 radionucléides testés ici ont été pris :

- Sur la liste des radionucléides cités dans le [mémento de la radioprotection EDF](#)
- Dans le document « Catégorisation des sources radioactives », [guide de sûreté n° RS-G-1.9, AIEA \(2011\)](#)
- 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).

Source ponctuelle

$H^*(10)$  9,23 mSv/h

Lancer calcul

☐ Ecran(s) de protection

Distance 10 cm

Commentaires  
Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

(1 GBq Cs 137).

| SCENARIO 1 33 RN source ponctuelle 1 GBq à 10 cm<br>mSv/h |                    |                         |          |                  |       | Ecart relatif vs MCNPX |        |          |          |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|----------|------------------|-------|------------------------|--------|----------|----------|
| RN                                                        | Dosimex-<br>GX 3.0 | Microshield™<br>(Grove) | Mercurad | RayXpert®<br>1.5 | MCNPX | Dosimex                | µShiel | mercurad | RayXpert |
| Ag110m                                                    | 41.50              | 40.68                   | 42.96    | 42.60            | 42.00 | -1.2%                  | -3.1%  | 2.3%     | 1.4%     |
| N16                                                       | 37.42              | 38.52                   | 38.34    | 39.70            | 37.50 | -0.2%                  | 2.7%   | 2.2%     | 5.9%     |
| Y88                                                       | 37.25              | 37.91                   | 36.40    | 38.40            | 37.00 | 0.7%                   | 2.5%   | -1.6%    | 3.8%     |
| Co60                                                      | 34.80              | 35.03                   | 35.34    | 35.00            | 34.80 | 0.0%                   | 0.7%   | 1.6%     | 0.6%     |
| La140                                                     | 31.70              | 31.93                   | 32.32    | 31.70            | 32.10 | -1.2%                  | -0.5%  | 0.7%     | -1.2%    |
| Sb124                                                     | 26.20              | 25.73                   | 26.64    | 26.60            | 26.40 | -0.8%                  | -2.5%  | 0.9%     | 0.8%     |
| Cs134                                                     | 24.70              | 24.70                   | 24.82    | 25.50            | 24.80 | -0.4%                  | -0.4%  | 0.1%     | 2.8%     |
| Nb94                                                      | 24.40              | 24.76                   | 24.72    | 24.90            | 24.40 | 0.0%                   | 1.5%   | 1.3%     | 2.0%     |
| Fe59                                                      | 16.80              | 16.92                   | 17.05    | 17.40            | 16.80 | 0.0%                   | 0.7%   | 1.5%     | 3.6%     |
| F18                                                       | 16.50              | 16.62                   | 17.08    | 15.51            | 16.60 | -0.6%                  | 0.1%   | 2.9%     | -6.6%    |
| Co58                                                      | 15.30              | 15.42                   | 15.41    | 14.70            | 15.40 | -0.6%                  | 0.1%   | 0.1%     | -4.5%    |
| Ir192                                                     | 13.85              | 14.57                   | 13.88    | 14.50            | 14.00 | -1.1%                  | 4.1%   | -0.9%    | 3.6%     |
| Mn54                                                      | 12.90              | 12.98                   | 13.00    | 12.00            | 13.00 | -0.8%                  | -0.2%  | 0.0%     | -7.7%    |
| Cs137                                                     | 9.23               | 9.52                    | 9.27     | 8.98             | 9.26  | -0.3%                  | 2.8%   | 0.1%     | -3.0%    |
| Ba133                                                     | 8.84               | 8.69                    | 9.06     | 8.93             | 8.98  | -1.6%                  | -3.2%  | 0.9%     | -0.6%    |
| In111                                                     | 8.82               | 8.83                    | 8.97     | 8.67             | 9.08  | -2.9%                  | -2.8%  | -1.2%    | -4.5%    |
| Zn65                                                      | 8.40               | 8.44                    | 8.50     | 7.97             | 8.32  | 1.0%                   | 1.4%   | 2.2%     | -4.2%    |
| Se75                                                      | 6.89               | 6.83                    | 6.63     | 6.86             | 6.97  | -1.1%                  | -2.0%  | -4.9%    | -1.6%    |
| I131                                                      | 6.46               | 6.70                    | 6.57     | 6.11             | 6.60  | -2.1%                  | 1.5%   | -0.5%    | -7.4%    |
| Cf252                                                     | 5.80               | 0.14                    | 5.48     | 5.96             | 5.71  | 1.6%                   | -97.5% | -4.0%    | 4.4%     |
| I125                                                      | 3.52               | 3.45                    | 3.61     | 3.64             | 3.50  | 0.6%                   | -1.4%  | 3.1%     | 4.0%     |
| Rh106                                                     | 3.30               | 3.39                    | 3.38     | 3.19             | 3.33  | -0.9%                  | 1.8%   | 1.5%     | -4.2%    |
| U235                                                      | 3.56               | 3.65                    | 2.78     | 3.36             | 3.61  | -1.4%                  | 1.1%   | -23.0%   | -6.9%    |
| Mo99                                                      | 2.41               | 2.30                    | 2.43     | 2.56             | 2.40  | 0.4%                   | -4.2%  | 1.3%     | 6.7%     |
| Tc99m                                                     | 2.33               | 2.50                    | 2.34     | 2.47             | 2.49  | -6.4%                  | 0.4%   | -6.0%    | -0.8%    |
| Bi212                                                     | 1.63               | 2.39                    | 1.63     | 1.73             | 1.63  | 0.0%                   | 46.6%  | 0.0%     | 6.1%     |
| Xe133                                                     | 1.56               | 1.63                    | 1.23     | 1.62             | 1.64  | -4.9%                  | -0.6%  | -25.0%   | -1.2%    |
| Am 241                                                    | 1.39               | 1.60                    | 0.60     | 1.33             | 1.38  | 0.7%                   | 15.9%  | -56.5%   | -3.6%    |
| Cr51                                                      | 0.540              | 0.520                   | 0.540    | 0.540            | 0.550 | -1.8%                  | -5.5%  | -1.8%    | -1.8%    |
| Pu238                                                     | 0.240              | 0.320                   | 0.001    | 0.220            | 0.230 | 4.3%                   | 39.1%  | -99.6%   | -4.3%    |
| Ra226                                                     | 0.135              | 0.160                   | 0.120    | 0.133            | 0.139 | -2.9%                  | 15.1%  | -13.7%   | -4.3%    |
| Pu239                                                     | 0.099              | 0.040                   | 0.002    | 0.092            | 0.100 | -1.4%                  | -60.0% | -98.5%   | -8.0%    |
| Kr85                                                      | 0.038              | 0.037                   | 0.037    | 0.035            | 0.037 | 2.7%                   | 0.0%   | 0.0%     | -5.4%    |
| Ecart quadratique moyen                                   |                    |                         |          |                  |       | 2.0%                   | 23.3%  | 27.3%    | 4.4%     |
| Ecart quadratique moyen hors<br>résultats aberrants       |                    |                         |          |                  |       | 2.0%                   | 8.5%   | 7.0%     | 4.4%     |

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

## ANALYSE DES RÉSULTATS :

Ce premier scenario montre que d'une part :

- Des bons résultats obtenus avec Dosimex GX 3.0 avec un **écart quadratique moyen égal à 2 %**. Cette valeur doit être comparée à l'écart quadratique moyen de 20 % pour l'ensemble des codes tous résultats confondus, écart qui passe à 8 % si l'on exclue les 6 cas aberrants obtenus avec Microshield et Mercurad
- Des écarts effectivement très élevés (*facteur 40 à 270 en termes de rapports*) qui apparaissent avec 4 radionucléides particuliers : Cf252 (*cf graphe 2*), Am241 (*cf graphe 3*), Pu238 et Pu239 (*cf graphe 4*).

Il est important d'identifier la cause 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 continue, 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, conforme aux données Laraweb 2019.*

Ce premier scenario 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 mise 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.



## Scenario.1.2

### CALCULS COMPLÉMENTAIRES AVEC ÉCRANS

#### 1) Cas précédent Pu8, PU 9 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©):

| SCENARIO 1<br>Complément : écran de 0,5 mm de fer |                       |                      |          |               |          | Ecart relatifs vs MCNPX |        |          |          |
|---------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------|----------|-------------------------|--------|----------|----------|
| RN                                                | Dosimex-GX 2.0        | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert© 1.4 | MCNP     | Dosimex                 | μShiel | mercurad | RayXpert |
| Pu238                                             | 3.89E-04              | 3.98E-04             | 4.22E-04 | 3.85E-04      | 4.10E-04 | -5.1%                   | -2.9%  | 2.9%     | -6.1%    |
| Pu239                                             | 1,07 <sup>E</sup> -03 | 8.32E-04             | 1.12E-03 | 9.54E-04      | 1.22E-03 | -12,3%                  | -31.8% | -8.2%    | -21.8%   |
| Am 241                                            | 3.69E-01              | 3.67E-01             | 3.97E-01 | 3.48E-01      | 3.60E-01 | 2.5%                    | 1.9%   | 10.3%    | -3.3%    |

Tableau 2 :Pu8, PU 9 et Am 241, avec rajout d'un écran de 0,5 mm de fer

%

#### 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 :

| SCENARIO 1<br>Compléments : Cf 252. 1 GBq avec 1 cm Pb . d=10 cm |                |                      |          |               |      | Ecart relatifs vs MCNPX |         |          |          |
|------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------|---------------|------|-------------------------|---------|----------|----------|
| RN                                                               | Dosimex-GX 2.0 | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert© 1.4 | MCNP | Dosimex                 | μShiel  | mercurad | RayXpert |
| Cf 252.                                                          | 2.76           | 3.83E-20             | 2.13E-09 | 2.90          | 2.81 | -1.8%                   | -100.0% | -100.0%  | 3.2%     |

Tableau 3

## SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SCENARIO 1

*Pour les 37 configurations (calculs sans écran et avec écran) soit 185 valeurs de DED et 148 écarts vs MCNPX (tableaux 1 +2 +3) on obtient :*

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX**: écart quadratique moyen 3 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX**: :écart quadratique moyen 28%. *(-3 valeurs aberrantes : 10 %)*
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX**: : écart quadratique moyen %. 31% *(-4 valeurs aberrantes : 7 %)*
  - Entre **RayXpert© 1.4** et **MCNPX**: : écart quadratique moyen %.6 %
- Moyenne quadratique sur l'ensemble des écarts pour tous les codes : 21 %
- Après suppression des valeurs extrêmes : 8 %

### Conclusion :

Pour ces conditions géométriques simples (absence de matière) les résultats pour Dosimex-GX 3.0 sont excellents. Notons que dans ce type de calculs les écarts proviennent en général d'écarts dans les tables d'émissions

## SCENARIO 2 : EVOLUTION DES RÉSULTATS 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.

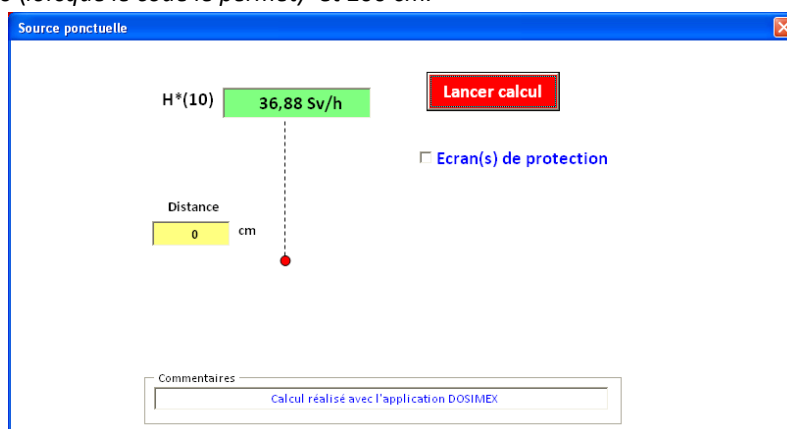
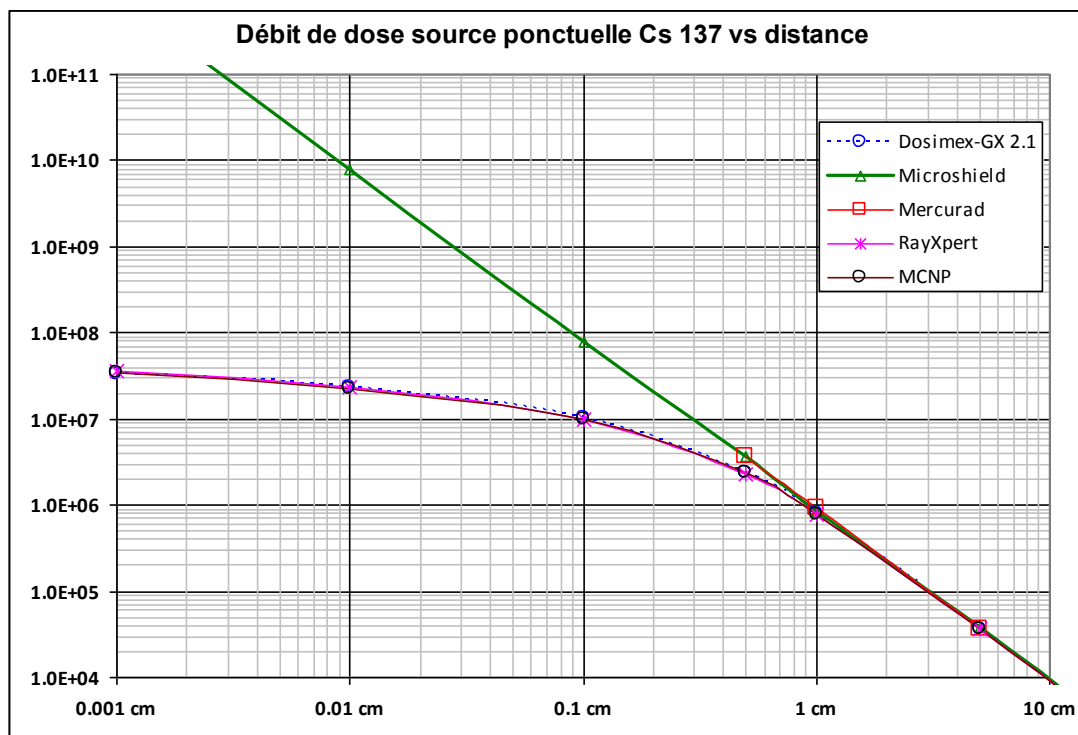


Figure 2: Boîte de dialogue DOSIMEX-GX pour source ponctuelle nue au contact(1 GBq Cs 137).

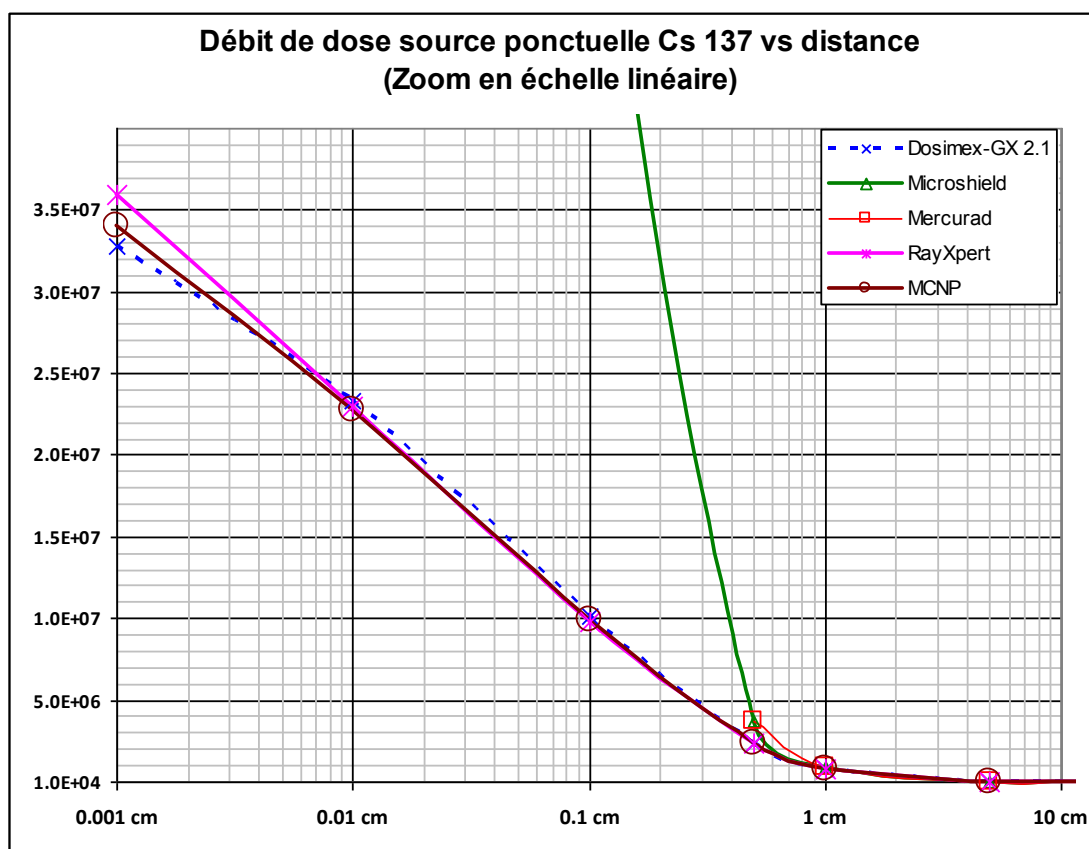
Le tableau suivant synthétise les résultats obtenus :

| Source ponctuelle Cs 137 1 GBq<br>H*(10) en µSv/h |                |                      |          |               |         | Ecart relatif vs MCNPX |             |          |          |
|---------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------|---------------|---------|------------------------|-------------|----------|----------|
| Distance (cm)                                     | Dosimex-GX 3.0 | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert® 1.4 | MCNP    | Dosimex                | Microshield | Mercurad | RayXpert |
| 0                                                 | 3.8E+07        | NC                   | NC       | 3.8E+07       | 3.6E+07 | 5.9%                   | NC          | NC       | 5.9%     |
| 0.001                                             | 3.3E+07        | 7.9E+11              | NC       | 3.6E+07       | 3.4E+07 | -3.4%                  | NC          | NC       | 5.9%     |
| 0.01                                              | 2.3E+07        | 7.9E+09              | NC       | 2.3E+07       | 2.3E+07 | 2.2%                   | NC          | NC       | 0.9%     |
| 0.1                                               | 1.0E+07        | 7.9E+07              | NC       | 9.9E+06       | 9.9E+06 | 1.7%                   | NC          | NC       | -1.0%    |
| 0.5                                               | 2.4E+06        | 3.7E+06              | 3.7E+06  | 2.3E+06       | 2.3E+06 | 1.9%                   | 57.9%       | 57.9%    | -1.0%    |
| 1                                                 | 8.0E+05        | 8.6E+05              | 9.3E+05  | 7.8E+05       | 7.9E+05 | 1.8%                   | 9.0%        | 17.4%    | -1.1%    |
| 5                                                 | 3.7E+04        | 3.8E+04              | 3.7E+04  | 3.6E+04       | 3.6E+04 | 1.5%                   | 5.0%        | 2.3%     | -0.2%    |
| 15                                                | 4.1E+03        | 4.2E+03              | 4.1E+03  | 4.1E+03       | 4.0E+03 | 1.7%                   | 4.4%        | 1.7%     | 0.2%     |
| 30                                                | 1.0E+03        | 1.1E+03              | 1.0E+03  | 1.0E+03       | 1.0E+03 | 1.6%                   | 4.2%        | 1.9%     | -0.1%    |
| 50                                                | 3.7E+02        | 3.8E+02              | 3.7E+02  | 3.7E+02       | 3.6E+02 | 1.5%                   | 3.9%        | 1.7%     | 2.6%     |
| 100                                               | 9.2E+01        | 9.5E+01              | 9.3E+01  | 9.3E+01       | 9.1E+01 | 1.8%                   | 4.1%        | 2.0%     | 2.2%     |
| 150                                               | 4.1E+01        | 4.2E+01              | 4.1E+01  | 4.0E+01       | 4.0E+01 | 1.9%                   | 3.9%        | 2.2%     | -1.3%    |
| 200                                               | 2.3E+01        | 2.4E+01              | 2.3E+01  | 2.3E+01       | 2.3E+01 | 2.2%                   | 3.9%        | 2.4%     | -0.1%    |
| Ecart quadratique moyen (valeurs d ≥ 0)           |                |                      |          |               |         | 2.5%                   | NC          | NC       | 2.6%     |
| Ecart quadratique moyen (valeurs d ≥ 0,5 cm)      |                |                      |          |               |         | 1.8%                   | 19.9%       | 20.2%    | 1.3%     |
| Ecart quadratique moyen (valeurs d ≥ 1 cm)        |                |                      |          |               |         | 1.7%                   | 4.8%        | 6.1%     | 1.3%     |

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



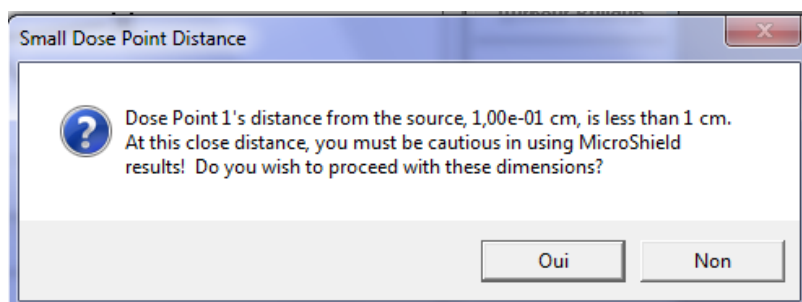
Graph 5: Evolution  $H^*(10)$  source ponctuelle versus distance avec MICROSHIELD® MERCURAD™ et RayXpert©



ANALYSE DES RÉSULTATS

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® averti l'utilisateur pour des distances inférieures à 1 cm :



L'application DOSIMEX-GX calcule la fluence avec une surface élémentaire de  $1 \text{ cm}^2$ , 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 À TRÈS FAIBLES DISTANCES. MÉTHODE MISE EN ŒUVRE PAR DOSIMEX-GX 3.0.

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

Considérons une **source ponctuelle** contenant un radionucléide émetteur de photons d'énergie  $E_\gamma$  et d'intensité  $I_\gamma$ . Le nombre de photon émis par la source durant un temps d'exposition  $T_{\text{exp}}$  est égal à :  $N = A I_\gamma T_{\text{exp}}$ . L'objectif est de déterminer le débit de dose généré 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'isotropie<sup>1</sup> 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.

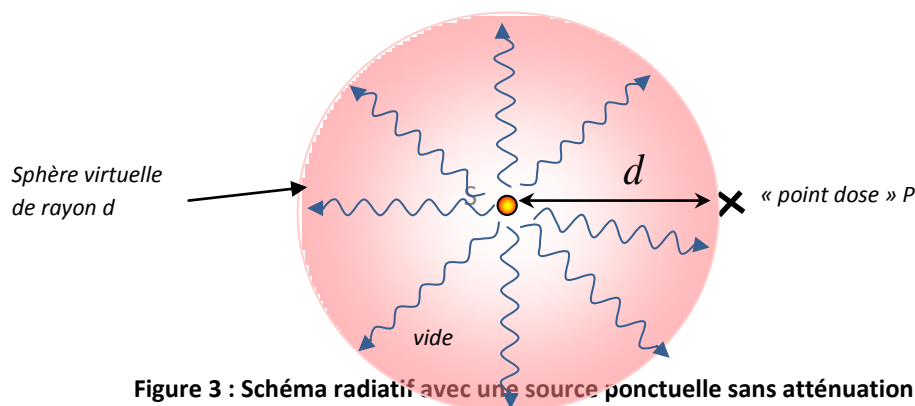


Figure 3 : Schéma radiatif avec une source ponctuelle sans atténuation

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 :

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

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

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  $1\text{cm}^2$  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**<sup>2</sup> et notée  $\Omega/4\pi$ ,  $\Omega$  étant l'angle solide et  $4\pi$  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

<sup>1</sup> Toutes les directions sont équiprobables

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



sphère virtuelle à une surface au moins supérieures à  $1 \text{ cm}^2$ . Dans le cas inverse, on verrait apparaître un nombre de particules incidentes par  $\text{cm}^2$  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  $\text{cm}^2$  par seconde.*

## b) Calcul réaliste avec un détecteur non ponctuel

Pour éviter de telles **singularités**<sup>3</sup>, il faut calculer le rendement géométrique avec un disque de  $1\text{ cm}^2$  placé à une distance  $d$  centré sur l'axe source–point dose, et perpendiculaire à cet axe.

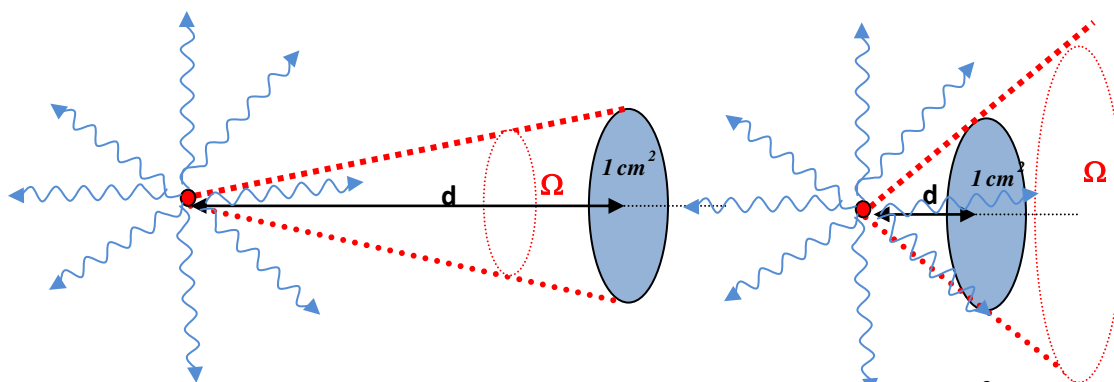


Figure 4 : Calcul de la fluence à l'aide d'une surface normalisée de  $1\text{ cm}^2$ .

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 :

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

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  $1\text{ cm}^2$  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 ( $h=0,01\text{ mm}$ ) de surface de  $1\text{ cm}^2$  (rayon  $r_0 = 0,564\text{ cm}$ , voir figure 5 ...)

<sup>3</sup> 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).

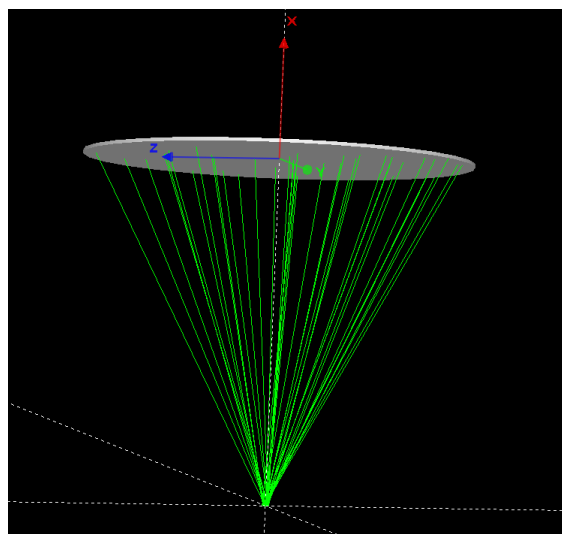


Figure 5 : détecteur normalisé de 1 cm<sup>2</sup> et d'épaisseur 0,01 mm à une distance de 1 cm, éclairage homogène. Tracking réalisé avec RayXpert© (avec accord de la Société TRAD)

*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 cm<sup>2</sup>.*

### 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 cm<sup>2</sup>. 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  $\alpha$  (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)

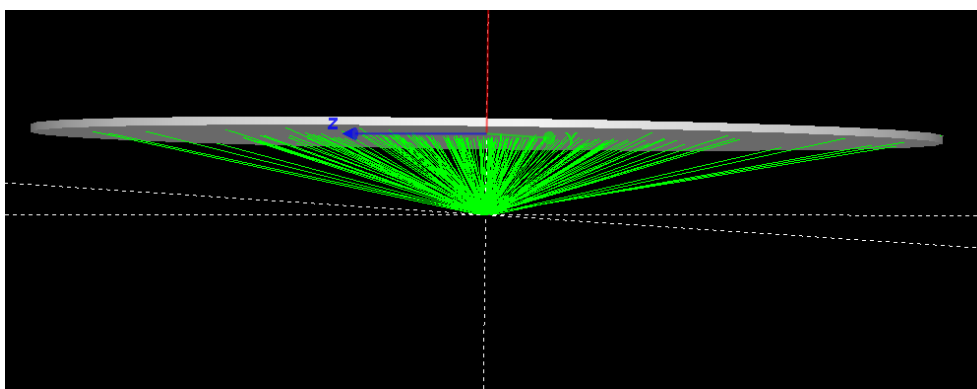


Figure 6 :détecteur normalisé à 0,1 cm. Tracking réalisé avec RayXpert (avec accord de la Société TRAD)



Calcul du cosinus moyen de l'angle d'incidence :

$$\overline{\cos\alpha} = \int_0^{\alpha_{\max}} \cos\alpha \, dS \bigg/ \int_0^{\alpha_{\max}} dS \text{ avec } dS = 2\pi y \, d\alpha \text{ et } y = d \, \text{tg}\alpha \text{ soit}$$

$$\overline{\cos\alpha} = \int_0^{\alpha_{\max}} \cos\alpha \, \text{tg}\alpha \, d\alpha \bigg/ \int_0^{\alpha_{\max}} \text{tg}\alpha \, d\alpha .$$

On obtient tout calcul fait :

$$\overline{\cos\alpha} = \frac{\cos\alpha_{\max} - 1}{\ln(\cos\alpha_{\max})}$$

Soit un coefficient de correction angulaire :

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

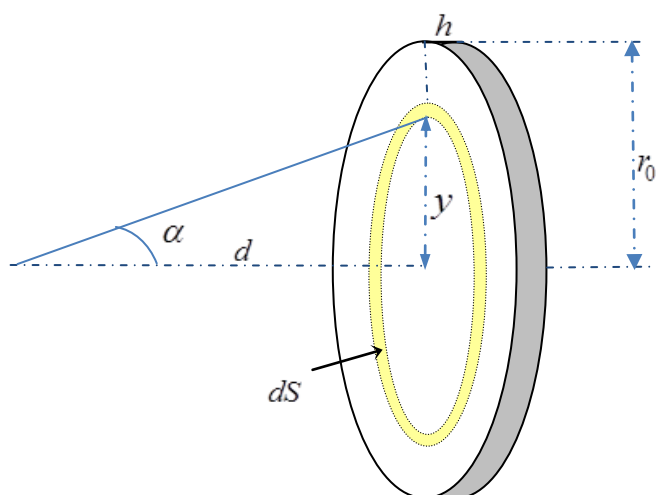


Figure 7 : schéma d'intégration pour le calcul du cosinus moyen



### 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 :

$$\alpha_{\max}(d) = \text{Arctg}\left(\frac{r_0}{d+h}\right).$$

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 :

$$\alpha_{\max}(d) = \text{Arctg}\left(\frac{0,564}{d+0,001}\right)$$

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

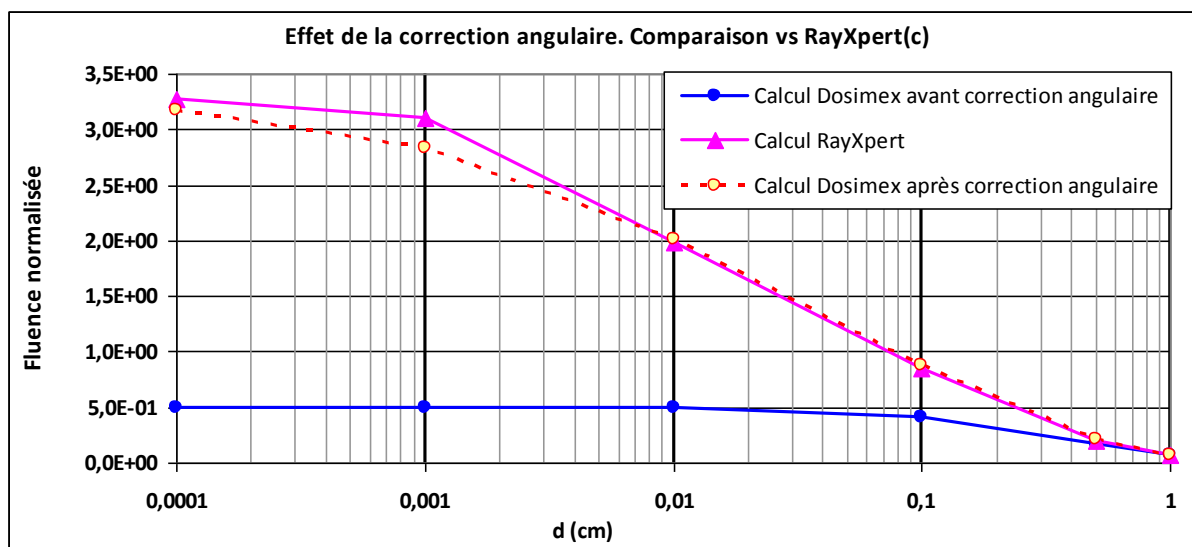
$$\varphi(P) = \frac{1}{2} \times \left( 1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + \frac{1}{\pi}}} \right) \frac{\ln(\cos \alpha_{\max})}{\cos \alpha_{\max} - 1} A I_{\gamma} \quad (\text{relation 3})$$

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  $4\pi$  ( $A I_{\gamma} = 1$ ) :

| Débit de fluence (gamma/cm2/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

## SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 2

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 2,5 % (calculée jusqu'à 0 cm)
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 19,9 % (calculée jusqu'à 0,5 cm)
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 20,2 %. (calculée jusqu'à 0,5 cm)
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 2,6% ( calculée jusqu'à 0 cm)

### Conclusion :

En dehors des distances inférieures à 1 cm, on constate que les écarts sont faibles entres les 5 codes, de **l'ordre de 3 %**. La méthode déterministe originale mise en œuvre par Dosimex-GX 2.0 évite l'apparition de valeurs élevées non réalistes en dessous de 1 cm et permet de retrouver les valeurs obtenues par les codes Monte-Carlo jusqu'au contact.

### SCENARIO 3 : SOURCES PONCTUELLES AVEC ÉCRAN. IMPACT DU BUILD-UP

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 ponctuelle de 1GBq 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

The screenshot shows the 'Source ponctuelle' dialog box in DOSIMEX-GX. It features a diagram of a point source (red dot) at a distance of 100 cm from a detector (blue hatched rectangle). The calculated dose rate  $H^*(10)$  is 10.09  $\mu\text{Sv/h}$ . A red button labeled 'Lancer calcul' is in the top right. A section titled 'Ecran(s) de protection' is checked, showing 'Eau' as the screen material with a thickness of 50 cm. A comment box at the bottom states 'Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX'.

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



|        |                                    | SCENARIO 3 sources ponctuelles 1 GBq à 100 cm<br>H*(10) en µSv/h |                    |                                                     |          |                  | Ecart relatifs vs MCNPX |         |        |          |          |
|--------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------|----------|------------------|-------------------------|---------|--------|----------|----------|
|        |                                    | RN                                                               | Dosimex-<br>GX 3.0 | Microshield                                         | Mercurad | RayXpert©<br>1.4 | MCNP                    | Dosimex | µShiel | mercurad | RayXpert |
| Am 241 | Source nue                         | 13.4                                                             | 16                 | 6.1                                                 | 13.3     | 13.3             | 0.8%                    | 20.3%   | -54.1% | 0.0%     |          |
|        | source+écran<br>de 10cm Alu        | 2.32E-02                                                         | 3.30E-02           | 3.70E-02                                            | 1.67E-02 | 1.77E-02         | 31.1%                   | 86.4%   | 109.0% | -5.6%    |          |
|        | Source+écran<br>de 2cm de Pb       | 1.30E-04                                                         | 7.40E-21           | 1.00E-04                                            | 1.40E-04 | 1.44E-04         | -9.7%                   | -100.0% | -30.6% | -2.8%    |          |
|        | Source +<br>écran de<br>50cm d'eau | 1.53E-02                                                         | 4.09E-02           | 3.75E-02                                            | 1.10E-02 | 1.33E-02         | 15.0%                   | 207.5%  | 182.0% | -17.3%   |          |
| Cs 137 | source à nue                       | 92.5                                                             | 93.6               | 92.8                                                | 90.7     | 90.8             | 1.9%                    | 3.1%    | 2.2%   | -0.1%    |          |
|        | source+écran<br>de 10cm Alu        | 38.45                                                            | 45.3               | 51.7                                                | 35.9     | 35.5             | 8.3%                    | 27.6%   | 45.6%  | 1.1%     |          |
|        | Source+écran<br>de 2cm de Pb       | 13.3                                                             | 14.16              | 13.7                                                | 13.1     | 13               | 2.3%                    | 8.9%    | 5.4%   | 0.8%     |          |
|        | Source +<br>écran de<br>50cm d'eau | 10.1                                                             | 14.4               | 16.5                                                | 9.33     | 9.2              | 9.8%                    | 56.5%   | 79.3%  | 1.4%     |          |
| Co 60  | source à nue                       | 349                                                              | 347                | 353                                                 | 352      | 347              | 0.6%                    | 0.0%    | 1.7%   | 1.4%     |          |
|        | source+écran<br>de 10cm Alu        | 183                                                              | 192                | 210                                                 | 181      | 174              | 5.2%                    | 10.3%   | 20.7%  | 4.0%     |          |
|        | Source+écran<br>de 2cm de Pb       | 143                                                              | 141                | 152                                                 | 146      | 145              | -1.4%                   | -2.8%   | 4.8%   | 0.7%     |          |
|        | Source +<br>écran de<br>50cm d'eau | 63                                                               | 76                 | 87                                                  | 60       | 60.3             | 4.5%                    | 26.2%   | 44.3%  | -0.5%    |          |
|        |                                    |                                                                  |                    | Ecart quadratique moyen                             |          |                  | 11%                     | 74%     | 71%    | 5%       |          |
|        |                                    |                                                                  |                    | Ecart quadratique moyen hors<br>résultats aberrants |          |                  | 11%                     | 16%     | 31%    | 5%       |          |

On constate ici des écarts importants systématique pour les 2 codes déterministes Microshield, et Mercurad vs les 2 codes Monte-Carlo de références RayXpert, MCNP, notamment avec l'Am 241.

Ces écarts sont pour l'essentiel lié à la méthode de correction des effets de diffusion à l'aide d'un coefficient de build-up (Document ANSI/ANS 6.4.3, 1991).

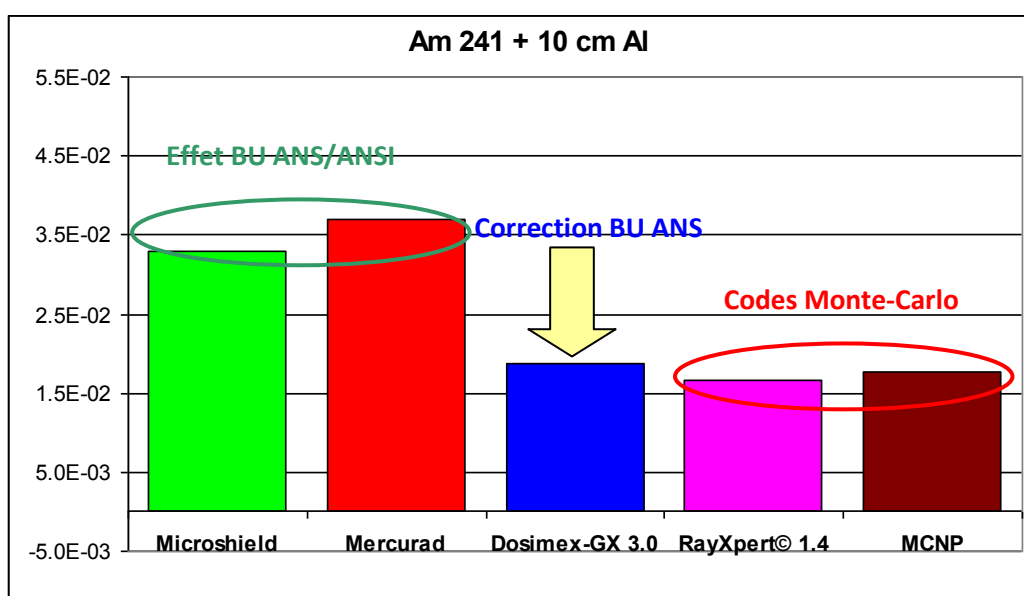
## EFFET DE BUILD-UP AVEC L'Am 241 :

L'Américium 241 a été choisit ici car c'est un émetteur de faible énergie (*composante principale à 59 KeV*). Les effets de Build-up sont maximisés en choisissant des matériaux de faibles numéros atomiques tels que l'Aluminium et l'eau.

Pour 10 cm d'aluminium à 59 keV le nombre de longueur de relaxation  $n$  est égal à 6,8 et le facteur de Build-up « infini » est égal à **5,8** (ANSI/ANS 6.4.3 ). On constate que pour les codes déterministe un tel facteur surestime les valeurs plus réalistes obtenus avec des codes de type Monte-Carlo d'un facteur 2 environ.

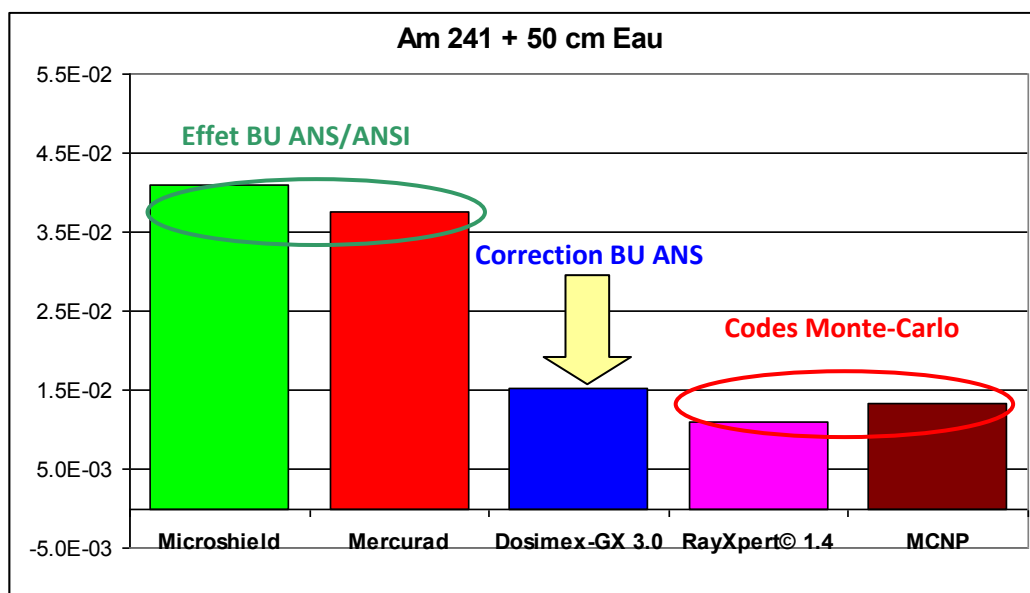
Pour la version DOSIMEX-GX 3.0, et après des années d'études (*voir annexe N*) et de validation, nous avons décidé de recalcr les facteurs de Build-up non pas avec des facteurs had-hoc, mais avec des fonctions de corrections monotones fonction du facteur de la longueur de relaxation  $\mu x$ . Une telle opération s'assimile à un réétalonnage vs les codes de références.

Ainsi pour 10 cm d'aluminium à 59 keV le build-up est pris désormais à 2,7



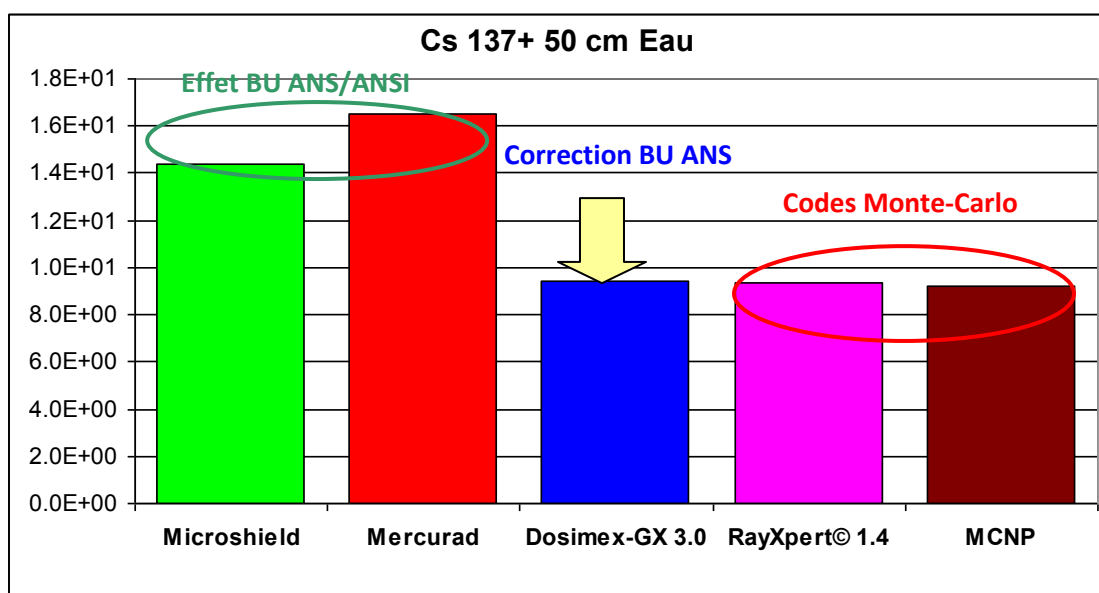
Pour 50 cm d'eau à 59 keV le nombre de longueur de relaxation  $n$  est égal à 9,7 et le facteur de Build-up « infini »  $ANS/ANSI$  est égal à 87. On retrouve le même effet d'écart systématique entre code déterministes et codes Monte-Carlo avec un facteur de l'ordre de 3:

Les fonctions de corrections introduites avec Dosimex donnent désormais dans ce cas là un facteur de build-up égal à 41



SOURCE DE Cs 137 AVEC L'ÉCRAN D'EAU

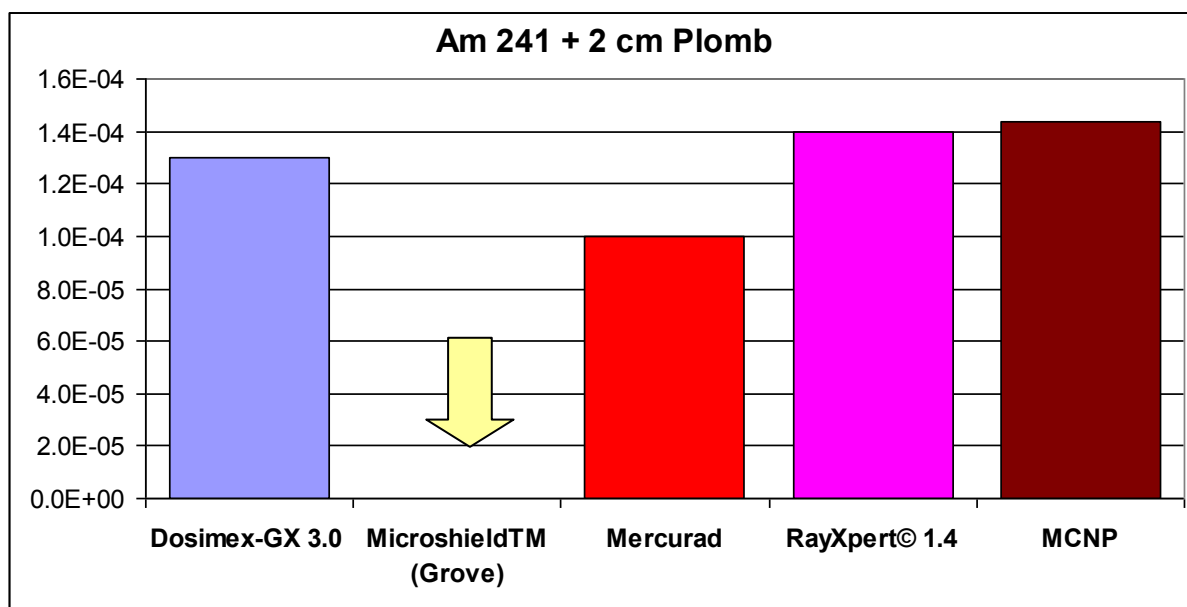
Pour 50 cm d'eau à 661 keV le nombre de longueur de relaxation  $n$  est égal à 4,3 et le facteur de Build-up « infini »  $ANS/ANSI$  est égal à 11. La correction apportée à Dosimex-GX 3.0 fait passer ce coefficient à 7,5



# **EFFET AVEC L'ÉCRAN DE PLOMB AVEC L'AM 241:**

L'écart de Microshield® par rapport aux 4 autres codes est, plus que notable : astronomique avec facteur de  $10^{-21}$ .

Cet écart est lié 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 atténués (*atténuation égale à  $3.10^{-4}$  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 effectivement rédhibitoires.



### SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 3

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 11 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 74 % ( **16 % hors valeurs aberrantes**)
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : écart moyen 71 %. ( **31% hors valeurs aberrantes**)
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : écart moyen 5 %

#### Conclusion :

Les écarts obtenus ici pour Microshield et Mercurad peuvent surprendre, mais ils sont liés à l'utilisation de facteurs tabulés pour les coefficients de Build-up qui se retrouvent pour tous les codes déterministes. Rappelons ici que les exemples choisis, hors Co 60, tendent à maximiser les surestimations rencontrés avec ces facteurs de build-up. C'est ce type de calculs, avec d'autres, qui nous ont amenés à apporter des corrections aux facteurs de build-up

*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 élevé de l'ordre de 40 %. Plus encore que pour l'émission de 59 keV, cette émission disparaît rapidement en présence du moindre écran.*

## SCENARIO 4 : INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE 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*)

Source cylindrique

Décalage (0 <=> mi-hauteur)  cm

☒ (Point 2)  $H^*(10)$  **173.12  $\mu\text{Sv/h}$**

☒ (Point 1)  $H^*(10)$  **183.65  $\mu\text{Sv/h}$**

Distance pt 2  cm

Distance pt 1  cm

Hauteur  cm

Rayon externe  cm

Rayon interne  cm

Matériau source **Aluminium** Masse vol.

☐ Ecran(s) de protection

**Lancer calcul**

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre source

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre  
Si le rayon interne est non nul, l'activité est répartie dans la couronne cylindrique compris entre Rint. et Rext

Commentaires

dialogue DOSIMEX-GX pour source cylindrique (1 GBq Co 60) avec décalage nul



|                         |              | H*(10) en $\mu\text{Sv/h}$ |                      |          |               |       |         |                    |          |          |
|-------------------------|--------------|----------------------------|----------------------|----------|---------------|-------|---------|--------------------|----------|----------|
|                         | RN           | Dosimex-GX 3.0             | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert® 1.4 | MCNP  | Dosimex | $\mu\text{Shield}$ | Mercurad | RayXpert |
| Am 241                  | Fil          | 12.45                      | 6.2                  | 5.7      | 11.9          | 12.39 | 0.5%    | -50.0%             | -54.0%   | -4.0%    |
|                         | Disque       | 9.32                       | 4.7                  | 4.3      | 9.5           | 8.99  | 3.7%    | -47.7%             | -52.2%   | 5.7%     |
|                         | Cylindre Pt1 | 0.799                      | 0.9                  | 0.96     | 0.77          | 0.79  | 1.1%    | 13.9%              | 21.5%    | -2.5%    |
|                         | Cylindre Pt2 | 0.644                      | 0.89                 | 0.84     | 0.69          | 0.7   | -8.0%   | 27.1%              | 20.0%    | -1.4%    |
| Cs 137                  | Fil          | 86                         | 75                   | 86       | 83            | 85    | 1.2%    | -11.8%             | 1.2%     | -2.4%    |
|                         | Disque       | 64                         | 65                   | 64       | 63            | 63    | 1.6%    | 3.2%               | 1.6%     | 0.0%     |
|                         | Cylindre Pt1 | 44.53                      | 46                   | 50       | 41            | 40    | 11.3%   | 15.0%              | 25.0%    | 2.5%     |
|                         | Cylindre Pt2 | 40.5                       | 42                   | 46       | 37            | 36    | 12.5%   | 16.7%              | 27.8%    | 2.8%     |
| Co 60                   | Fil          | 323                        | 322                  | 327      | 326           | 322   | 0.3%    | 0.0%               | 1.6%     | 1.2%     |
|                         | Disque       | 242                        | 240                  | 245      | 244           | 236   | 2.5%    | 1.7%               | 3.8%     | 3.4%     |
|                         | Cylindre Pt1 | 183                        | 186                  | 188      | 173           | 171   | 7.0%    | 8.8%               | 9.9%     | 1.2%     |
|                         | Cylindre Pt2 | 173                        | 173                  | 206      | 156           | 155   | 11.6%   | 11.6%              | 32.9%    | 0.6%     |
| Ecart quadratique moyen |              |                            |                      |          |               |       | 6.8%    | 23.4%              | 27.5%    | 2.7%     |

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



#### SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 4

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 6,8 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 23,4 %
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : écart moyen 27,5 %.
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : écart moyen 2,7 %

#### Conclusion :

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 5 codes.

Dans ce benchmark vs MCNP, et pour des géométries qui se complexifient, on constate un excellent accord entre RayXpert et MCNP, qui mettent en œuvre des principes de calculs similaires





**Source cylindrique**

☒ (Point 2)

Décalage  
(0 <=> mi-hauteur)

0 cm

☒ (Point 1)

$H^*(10)$

58.67  $\mu\text{Sv/h}$

$H^*(10)$

23.37  $\mu\text{Sv/h}$

Distance pt 2

100 cm

Distance pt 1

100 cm

Hauteur

100 cm

Rayon externe

20 cm

Rayon interne

0 cm

Matériau source

Aluminium

Masse vol.

Caractéristiques écran

☒ Ecran(s) de protection

Nature

Eau

Masse vol.

Epaisseur

15 cm

☐ Ecran cylindrique (vs pt 1)

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre source

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre  
Si le rayon interne est non nul, l'activité est répartie dans la couronne cylindrique compris entre Rint. et Rext

Commentaires

Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

**Lancer calcul**



| SCENARIO 5 : cylindre + écran ; latéral (point1)<br>H*(10) en $\mu\text{Sv/h}$ |                      |                      |          |               |      |     | Ecart relatifs vs MCNPX |                    |          |          |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------|---------------|------|-----|-------------------------|--------------------|----------|----------|
| RN                                                                             | Dosimex-GX 2.0       | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert© 1.4 | MCNP |     | Dosimex                 | $\mu\text{Shield}$ | Mercurad | RayXpert |
| Cs 137                                                                         | Source nue           | 21.11                | 22       | 24            | 21.5 | 20  | 6%                      | 10%                | 20%      | 8%       |
|                                                                                | Source + 2cm de Pb   | 2.16                 | 4.1      | 1.7           | 1.8  | 1.6 | 35%                     | 156%               | 6%       | 13%      |
|                                                                                | Source + 15 cm d'eau | 11.81                | 11       | 15            | 10   | 11  | 7%                      | 0%                 | 36%      | -9%      |
| Co 60                                                                          | Source à nue         | 92.7                 | 96       | 104           | 90   | 90  | 3%                      | 7%                 | 16%      | 0%       |
|                                                                                | Source + 2cm de Pb   | 36.67                | 44       | 29            | 28   | 26  | 41%                     | 69%                | 12%      | 8%       |
|                                                                                | Source + 15m d'eau   | 58.67                | 55       | 69            | 50.1 | 54  | 9%                      | 2%                 | 28%      | -7%      |
| Ecart quadratique moyen                                                        |                      |                      |          |               |      |     | 23%                     | 70%                | 22%      | 8%       |

Tableau 9 : Débit de dose sources cylindriques + écran calculé latéralement (point 1)

| SCENARIO 5 : cylindre + écran ; axe central (point 2)<br>H*(10) en $\mu\text{Sv/h}$ |                      |                      |          |               |      |      | Ecart relatifs vs MCNPX |                    |          |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------|---------------|------|------|-------------------------|--------------------|----------|----------|
| RN                                                                                  | Dosimex-GX 2.0       | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert© 1.4 | MCNP |      | Dosimex                 | $\mu\text{Shield}$ | Mercurad | RayXpert |
| Cs137                                                                               | Source nue           | 8.16                 | 9        | 7.6           | 8.3  | 8    | 2%                      | 13%                | -5%      | 4%       |
|                                                                                     | Source + 2cm de Pb   | 0.866                | 2.4      | 0.72          | 0.71 | 0.75 | 15%                     | 220%               | -4%      | -5%      |
|                                                                                     | Source + 15 cm d'eau | 4.65                 | 4.7      | 6.4           | 5.4  | 5.5  | -15%                    | -15%               | 16%      | -2%      |
| Co 60                                                                               | Source à nue         | 36.6                 | 39       | 35            | 36   | 35   | 5%                      | 11%                | 0%       | 3%       |
|                                                                                     | Source + 2cm de Pb   | 12.6                 | 18       | 12            | 11   | 12   | 5%                      | 50%                | 0%       | -8%      |
|                                                                                     | Source + 15m d'eau   | 23.37                | 22       | 29            | 24.2 | 26   | -10%                    | -15%               | 12%      | -7%      |
| Ecart quadratique moyen                                                             |                      |                      |          |               |      |      | 10%                     | 93%                | 9%       | 5%       |

Tableau 10 : Débit de dose sources cylindriques + écran sur l'axe de symétrie (point 2)



### SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 5

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 13 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 82% (- 2 valeurs aberrantes 29 %)
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 17 %.
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 7 %

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 déterministe vs RayXpert liée là encore à une surestimation du build-up dans un écran.



## SCENARIO 6 : INFLUENCE DU MATÉRIAU

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 20cm
- 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

Distance: 100 cm

Rayon intérieur: 0 cm

Rayon extérieur: 20 cm

Matériau source: Eau

Masse vol.

$H^*(10)$  172.91  $\mu\text{Sv/h}$

Lancer calcul

☐ Ecran de protection

Sphère pleine (R int.=0) : matrice source avec activité volumique constante.  
Sphère creuse (R int.>0) : activité volumique constante dans la couronne, la partie interne est considérée comme vide.

Commentaires: Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

Les différents matériaux sont mis en œuvre avec leur masses volumique de références (*modifiables dans DOSIMEX-GX*)



| Build-up de Taylor (ANS/ANSI 1991)<br>Sphère Matériaux Divers |                    |                         |          |                  |      | Ecart relatif vs MCNPX |         |          |          |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|----------|------------------|------|------------------------|---------|----------|----------|
| Matériau<br>(densité)                                         | Dosimex-<br>GX 2.0 | Microshield™<br>(Grove) | Mercurad | RayXpert®<br>1.4 | MCNP | Dosimex                | μShield | Mercurad | RayXpert |
| Air (1.3.10-3)                                                | 244                | 243                     | 247      | 244              | 243  | 0.4%                   | 0.0%    | 1.6%     | 0.4%     |
| Eau (1)                                                       | 175                | 180                     | 191      | 170              | 164  | 6.7%                   | 9.8%    | 16.5%    | 3.7%     |
| Aluminium<br>(2.7)                                            | 97.5               | 108                     | 118      | 102              | 99   | -1.5%                  | 9.1%    | 19.2%    | 3.0%     |
| Béton (2.35)                                                  | 117                | 116                     | 126      | 114              | 107  | 9.3%                   | 8.4%    | 17.8%    | 6.5%     |
| Fer(7.86)                                                     | 36                 | 40                      | 44       | 42               | 38   | -5.3%                  | 5.3%    | 15.8%    | 10.5%    |
| Plomb<br>(11.34)                                              | 16                 | 19                      | 21       | 18               | 19   | -15.8%                 | 0.0%    | 10.5%    | -5.3%    |
| Uranium<br>(19)                                               | 8                  | 10                      | 11       | 10               | 10   | -20.0%                 | 0.0%    | 10.0%    | 0.0%     |
| Beryllium<br>(1.85)                                           | 174                | NC                      | 181      | 150              | 138  | 26.1%                  | NC      | 31.2%    | 8.7%     |
| Carbone<br>(2.25)                                             | 133                | 131                     | 141      | 115              | 113  | 17.7%                  | 15.9%   | 24.8%    | 1.8%     |
| Sodium<br>(0.97)                                              | 191                | NC                      | 200      | 171              | 174  | 9.8%                   | NC      | 14.9%    | -1.7%    |
| Silicium<br>(2.2)                                             | 111                | NC                      | 134      | 115              | 112  | -0.9%                  | NC      | 19.6%    | 2.7%     |
| Tunstène<br>(19.25)                                           | 10                 | 12                      | 13       | 13               | 13   | -23.1%                 | -7.7%   | 0.0%     | 0.0%     |
| Etain (6.52)                                                  | 41                 | 44                      | 49       | 45               | 44   | -6.8%                  | 0.0%    | 11.4%    | 2.3%     |
| Ecart quadratique moyen                                       |                    |                         |          |                  |      | 14.2%                  | 8%      | 17%      | 5%       |

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



| Build-up de Berger (1+ $\mu$ x)<br>Sphère Matériaux Divers |                    |                         |          |                  |      | Ecart relatif vs MCNPX |              |          |          |
|------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|----------|------------------|------|------------------------|--------------|----------|----------|
| Matériau<br>(densité)                                      | Dosimex-<br>GX 2.0 | Microshield™<br>(Grove) | Mercurad | RayXpert®<br>1.4 | MCNP | Dosimex                | $\mu$ Shield | Mercurad | RayXpert |
| Air (1.3.10-3)                                             | 243                | 243                     | 247      | 244              | 243  | 0.0%                   | 0.0%         | 1.6%     | 0.4%     |
| Eau (1)                                                    | 180                | 180                     | 191      | 170              | 164  | 9.8%                   | 9.8%         | 16.5%    | 3.7%     |
| Aluminium<br>(2.7)                                         | 105                | 108                     | 118      | 102              | 99   | 6.1%                   | 9.1%         | 19.2%    | 3.0%     |
| Béton (2.35)                                               | 117                | 116                     | 126      | 114              | 107  | 9.3%                   | 8.4%         | 17.8%    | 6.5%     |
| Fer(7.86)                                                  | 38                 | 40                      | 44       | 42               | 38   | 0.0%                   | 5.3%         | 15.8%    | 10.5%    |
| Plomb<br>(11.34)                                           | 24                 | 19                      | 21       | 18               | 19   | 26.3%                  | 0.0%         | 10.5%    | -5.3%    |
| Uranium<br>(19)                                            | 13                 | 10                      | 11       | 10               | 10   | 30.0%                  | 0.0%         | 10.0%    | 0.0%     |
| Beryllium<br>(1.85)                                        | 148                | NC                      | 181      | 150              | 138  | 7.2%                   | NC           | 31.2%    | 8.7%     |
| Carbone<br>(2.25)                                          | 119                | 131                     | 141      | 115              | 113  | 5.3%                   | 15.9%        | 24.8%    | 1.8%     |
| Sodium<br>(0.97)                                           | 193                | NC                      | 200      | 171              | 174  | 10.9%                  | NC           | 14.9%    | -1.7%    |
| Silicium<br>(2.2)                                          | 121                | NC                      | 134      | 115              | 112  | 8.0%                   | NC           | 19.6%    | 2.7%     |
| Tunstène<br>(19.25)                                        | 14                 | 12                      | 13       | 13               | 13   | 7.7%                   | -7.7%        | 0.0%     | 0.0%     |
| Etain (6.52)                                               | 49                 | 44                      | 49       | 45               | 44   | 11.4%                  | 0.0%         | 11.4%    | 2.3%     |
| Ecart quadratique moyen                                    |                    |                         |          |                  |      | 13%                    | 8%           | 17%      | 5%       |

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



### SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 6

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 14 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 8 %
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 17 %.
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 5 %

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.



## SCENARIO 7 :      MAILLAGE EN PUISSANCE ADAPTATIF ET PRISE EN COMPTE DES GRANDES DIMENSIONS

### PRÉSENTATION DU PROBLÈME.

Le premier retour client qui nous est parvenu, en 2012, faisait état d'un étrange problème :

Notre utilisateur (IRSN) constatait lors de ses calculs que le DED diminuait lorsque la distance de calcul diminuait, ce qui est un résultat a priori surprenant (*mais pas toujours impossible !*). Après un instant de grande solitude, le problème est devenu évident lorsque cet utilisateur nous a donné les dimensions de sa source : c'était un silo de 9 m de haut et de 5 m de diamètre !

Il devenait alors évident que notre découpage du volume de la matrice source en 15x15x15 sur les 3 axes d'intégration nous donnait dès lors des éléments de volumes (voxel) trop volumineux (*globalement des cubes de 60 cm de côté !*), générant ainsi des aberrations géométriques rédhibitoires (*atténuation, angles d'incidences etc...*). Notre intégration numérique était dès lors gravement en défaut.

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  $\mu\text{m}$ . 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 maille, est un maillage en puissance (*figure 15 b*) selon la loi  $\Delta H_n = a^n \times \Delta H_0$ , avec :

- $\Delta H_0$  : la largeur de la première maille, en regard du point dose
- $\Delta H_n$  : la largeur de la  $n^{\text{ième}}$  maille
- $a$  : la raison de la loi en puissance

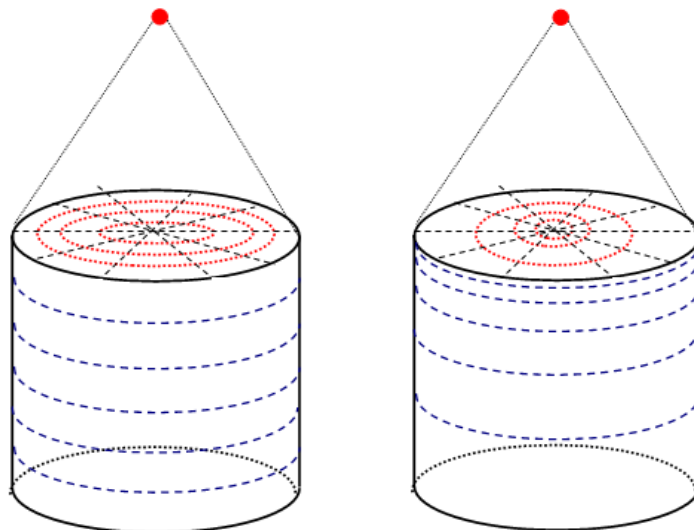


Figure 15: Maillage uniforme (a) et maillage en puissance (b) pour un cylindre

**Adaptation du découpage vs l'énergie des photons :** la valeur  $\Delta H_0$  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 (en cas de RN multiples).

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<sup>ère</sup> colonne):

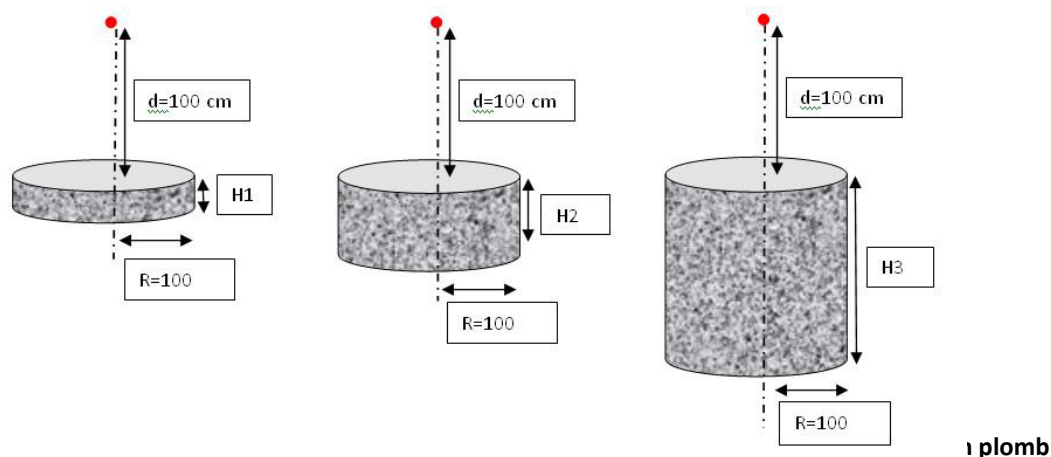
| N° maille | $\Delta H_n$ (cm) |       |
|-----------|-------------------|-------|
|           | Am 241            | Co 60 |
| 1         | 0,007             | 0,62  |
| 2         | 0,013             | 0,80  |
| 3         | 0,025             | 1,03  |
| 4         | 0,046             | 1,34  |
| 5         | 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 1m

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 (en l'occurrence ici pour la dernière couche infiniment négligeable)

La même méthode de maillage adapté au cobalt 60 (2<sup>ème</sup> 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).



En partant d'une très faible hauteur de cylindre, 100  $\mu\text{m}$ , 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 atténué par les premières couches en surface (*l'atténuation corrigée pour 2 mm de plomb est égale à  $2 \cdot 10^{-5}$* ). 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.

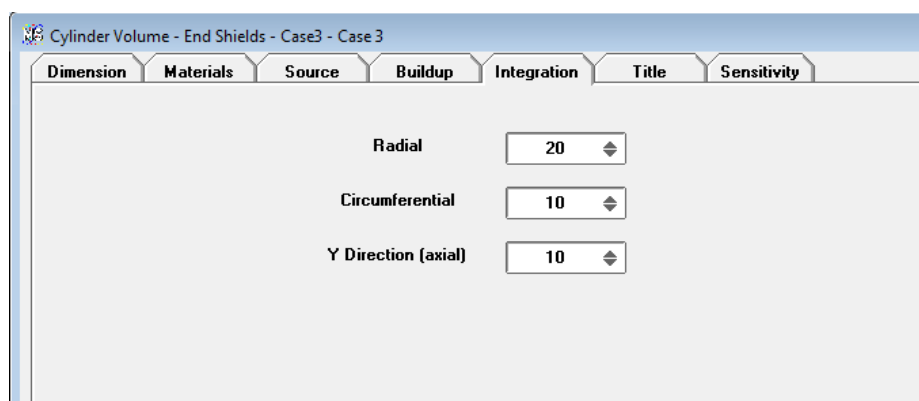
Mais en aucun cas, la dose ne devrait baisser lorsque la hauteur du cylindre augmente !(ce qui serait le cas si l'on faisait un calcul avec non pas une activité volumique constante, mais une activité totale constante)

Le calcul réalisé avec DOSIMEX montre (voir pages suivantes) 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 : RÉSULTATS AVEC OPTIONS PAR DÉFAUT POUR MICROSHIELD ET MERCURAD

**Option par défaut de Microshield® : Nombre de mailles limité**



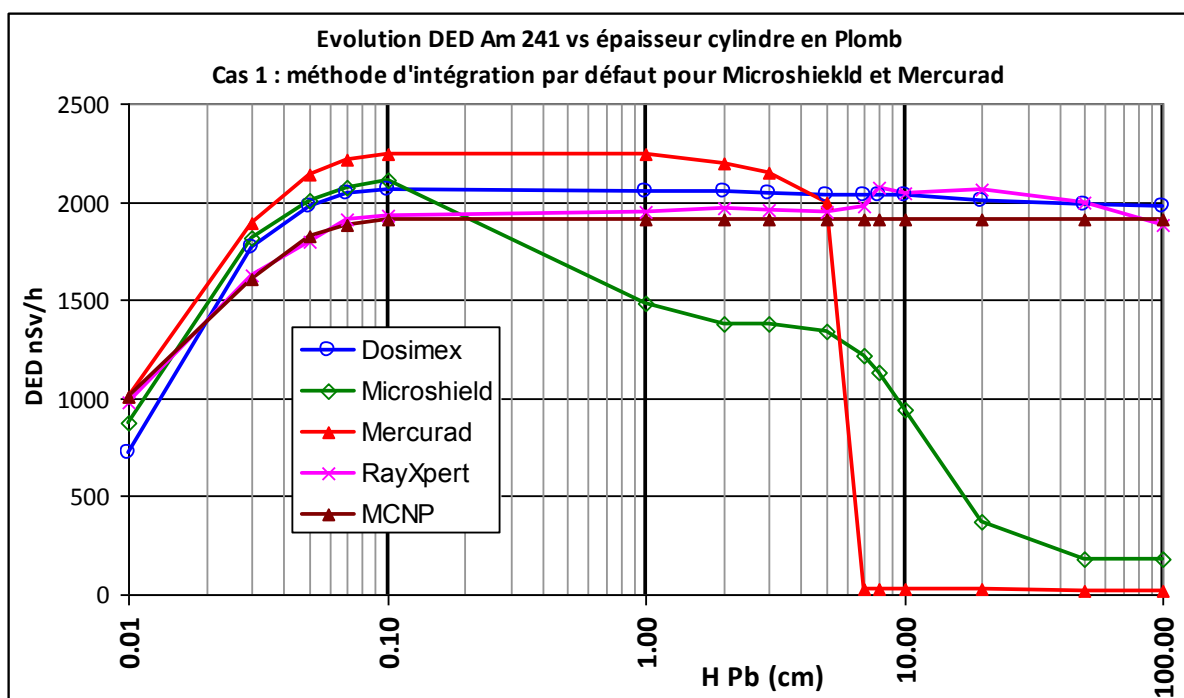
Option par défaut de Mercurad™ : découpage uniforme

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.

| Scénario 7 version 1 vs Microshield et Mercurad |                |                      |          |               |      | Ecart relatif vs MCNPX |         |          |          |
|-------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------|---------------|------|------------------------|---------|----------|----------|
| Tonneau Pb                                      |                |                      |          |               |      |                        |         |          |          |
| Epaisseur Pb (cm)                               | Dosimex-GX 2.0 | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert® 1.4 | MCNP | Dosimex                | μShield | Mercurad | RayXpert |
| 0,01                                            | 721            | 878                  | 1010     | 976           | 1008 | -28%                   | -13%    | 0%       | -3%      |
| 0,03                                            | 1770           | 1813                 | 1894     | 1625          | 1607 | 10%                    | 13%     | 18%      | 1%       |
| 0,05                                            | 1960           | 2008                 | 2142     | 1796          | 1822 | 9%                     | 10%     | 18%      | -1%      |
| 0,07                                            | 2040           | 2075                 | 2218     | 1914          | 1886 | 8%                     | 10%     | 18%      | 1%       |
| 0,1                                             | 2060           | 2112                 | 2246     | 1926          | 1908 | 8%                     | 11%     | 18%      | 1%       |
| 1                                               | 2050           | 1480                 | 2241     | 1950          | 1913 | 7%                     | -23%    | 17%      | 2%       |
| 2                                               | 2050           | 1383                 | 2200     | 1970          | 1913 | 7%                     | -28%    | 15%      | 3%       |
| 3                                               | 2040           | 1376                 | 2150     | 1960          | 1913 | 7%                     | -28%    | 12%      | 2%       |
| 5                                               | 2030           | 1336                 | 2000     | 1952          | 1913 | 6%                     | -30%    | 5%       | 2%       |
| 7                                               | 2030           | 1212                 | 25       | 1961          | 1913 | 6%                     | -37%    | -99%     | 4%       |
| 8                                               | 2030           | 1128                 | 25       | 2069          | 1913 | 6%                     | -41%    | -99%     | 8%       |
| 10                                              | 2030           | 943                  | 24       | 2047          | 1913 | 6%                     | -51%    | -99%     | 7%       |
| 20                                              | 2010           | 371                  | 24       | 2060          | 1913 | 5%                     | -81%    | -99%     | 8%       |
| 50                                              | 1990           | 178                  | 20       | 1999          | 1913 | 4%                     | -91%    | -99%     | 4%       |
| 100                                             | 1960           | 177                  | 18       | 1883          | 1913 | 4%                     | -91%    | -99%     | -2%      |
| Ecart quadratique moyen                         |                |                      |          |               |      | 10%                    | 46%     | 64%      | 4%       |

Tableau 15



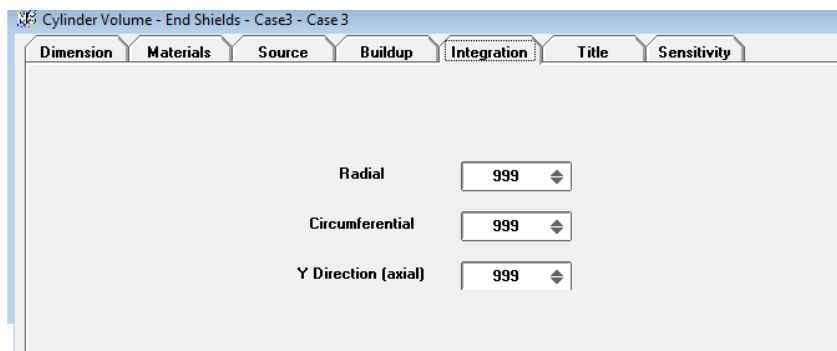
Graphe 10

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

#### CAS 2 : RÉSULTATS AVEC OPTIONS OPTIMISÉES (CHOIX VALIDÉ PAR L'OPÉRATEUR)

##### ✓ 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

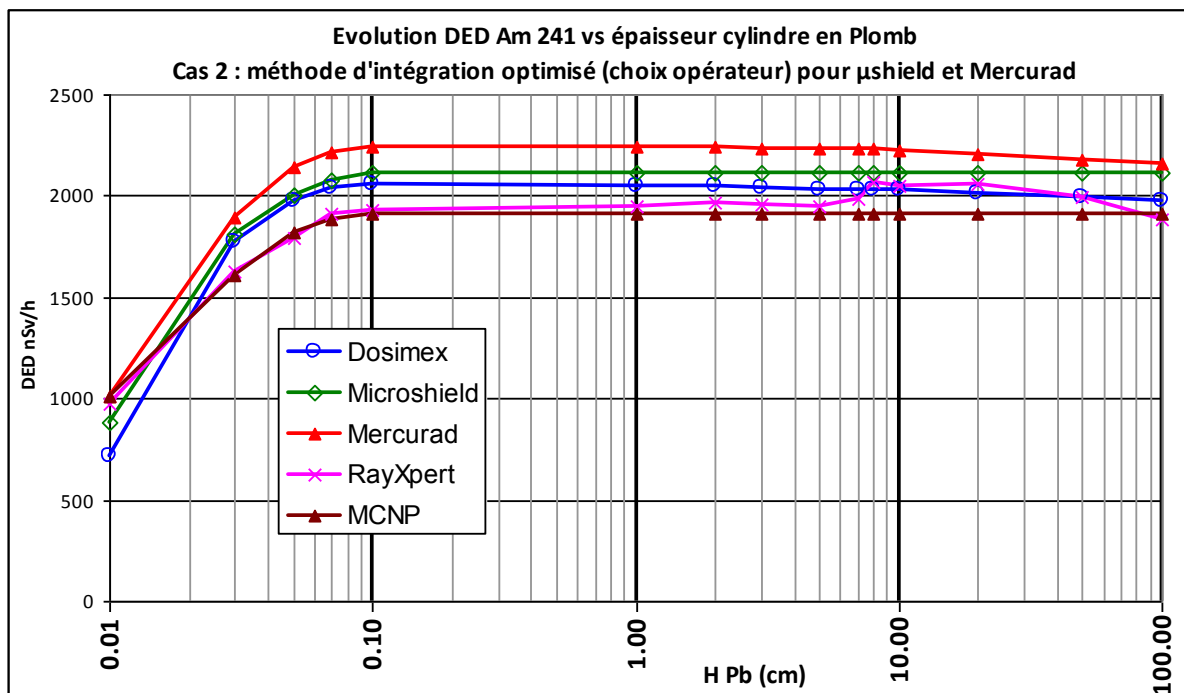
Le maillage uniforme de MERCURAD est celui proposé par défaut à l'utilisateur. Ce code propose toutefois un maillage en puissance qui permet d'assurer la stabilité du calcul au-delà de 50 libre parcours moyen.

Avec ces options optimisées, les résultats redeviennent cohérents :



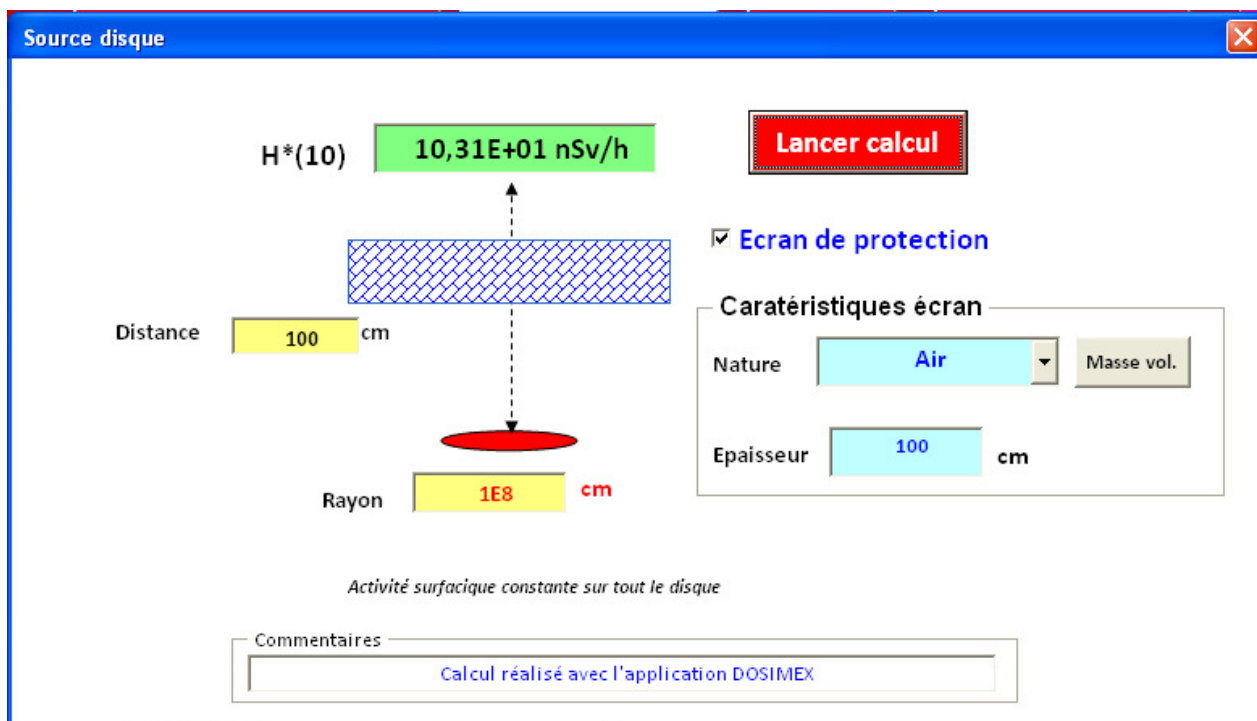
| Scenario 7 version 2 vs Microshield et Mercurad<br>Tonneau Pb chargé en Am 241 |                |                      |          |               |      | Ecart relatif vs MCNPX |         |          |          |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------|---------------|------|------------------------|---------|----------|----------|
| RN                                                                             | Dosimex-GX 2.0 | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert® 1.4 | MCNP | Dosimex                | μShield | Mercurad | RayXpert |
| 0,01                                                                           | 721            | 878                  | 1010     | 976           | 1008 | -28%                   | -13%    | 0%       | -3%      |
| 0,03                                                                           | 1770           | 1811                 | 1894     | 1625          | 1607 | 10%                    | 13%     | 18%      | 1%       |
| 0,05                                                                           | 1960           | 2008                 | 2142     | 1796          | 1822 | 9%                     | 10%     | 18%      | -1%      |
| 0,07                                                                           | 2040           | 2075                 | 2218     | 1914          | 1886 | 8%                     | 10%     | 18%      | 1%       |
| 0,1                                                                            | 2060           | 2112                 | 2246     | 1926          | 1908 | 8%                     | 11%     | 18%      | 1%       |
| 1                                                                              | 2050           | 2114                 | 2241     | 2040          | 1913 | 7%                     | 11%     | 17%      | 7%       |
| 2                                                                              | 2050           | 2114                 | 2239     | 1970          | 1913 | 7%                     | 11%     | 17%      | 3%       |
| 3                                                                              | 2040           | 2114                 | 2237     | 1960          | 1913 | 7%                     | 11%     | 17%      | 2%       |
| 5                                                                              | 2030           | 2114                 | 2234     | 1952          | 1913 | 6%                     | 11%     | 17%      | 2%       |
| 7                                                                              | 2030           | 2114                 | 2231     | 1961          | 1913 | 6%                     | 11%     | 17%      | 4%       |
| 8                                                                              | 2030           | 2114                 | 2229     | 2069          | 1913 | 6%                     | 11%     | 17%      | 8%       |
| 10                                                                             | 2030           | 2114                 | 2226     | 2047          | 1913 | 6%                     | 11%     | 16%      | 7%       |
| 20                                                                             | 2010           | 2114                 | 2209     | 2060          | 1913 | 5%                     | 11%     | 15%      | 8%       |
| 50                                                                             | 1990           | 2114                 | 2180     | 1999          | 1913 | 4%                     | 11%     | 14%      | 4%       |
| 100                                                                            | 1960           | 2114                 | 2160     | 1883          | 1913 | 4%                     | 11%     | 13%      | -2%      |
| Ecart quadratique moyen                                                        |                |                      |          |               |      | 10%                    | 11%     | 16%      | 4%       |

Tableau 16



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

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



**Figure 17:** Boîte de dialogue DOSIMEX-GX pour calcul coefficient conversion activité surfacique-débit de dose à 1m (1 Bq.cm<sup>-2</sup> en Co 60, R=10<sup>8</sup> cm)

Les calculs effectués avec DOSIMEX-GX, avec un écran d'air de 1 m et pour des rayons entre 10<sup>4</sup> et 10<sup>8</sup> cm (1000 km) affichent là encore des valeurs stabilisées :

| Radionucléide | Federal Guidance                                          | DOSIMEX-GX                                                |
|---------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Cesium 137    | 21 nSv.h <sup>-1</sup> .Bq <sup>-1</sup> .cm <sup>2</sup> | 27 nSv.h <sup>-1</sup> .Bq <sup>-1</sup> .cm <sup>2</sup> |
| Cobalt60      | 87 nSv.h <sup>-1</sup> .Bq <sup>-1</sup> .cm <sup>2</sup> | 103nSv.h <sup>-1</sup> .Bq <sup>-1</sup> .cm <sup>2</sup> |

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



### SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 7

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 10 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 11% (*méthode par défaut : 46 %*)
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 16 %. (*méthode par défaut : 64 %*)
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 4 %

L'approche proposée par DOSIMEX-GX assure ainsi à l'utilisateur d'obtenir des résultats recevables, quelques 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.

## SCENARIO 8 : GÉOMÉTRIE PARALLÉLÉPIPÈDE DE GRANDE DIMENSION AVEC ET SANS ECRAN

Ce scénario permet de valider la géométrie parallélépipédique introduite avec la version 1.3.1. avec une matrice de grande dimension (lpm de 2,8 cm à 1836 keV vs 100 cm)

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

Calcul débit de dose parallélépipède

☐ Gradient axe horizontal option active uniquement avec l'activité volumique

*La distance source /point dose est prise à partir de la surface du parallélépipède*

**H\*(10)**  
5 mSv/h ☒ (Point 2)

Distance 2  
100 cm

(Point 1)  
H\*(10)  
2,75 mSv/h  
Distance  
100 cm

Hauteur  
50 cm

Largeur  
100 cm

Longueur  
100 cm

Matériau source  
Fer

☒ Ecran de protection

Caractéristiques écran

Nature  
Béton

Epaisseur  
20 cm

**Lancer calcul**

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le parallélépipède

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



| Scenario 8 : parallélépipède fer + Y 88 sans écran<br>H*(10) en mSv/h |     |                    |                         |          |                  |       | Ecart relatif vs MCNPX |         |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|--------------------|-------------------------|----------|------------------|-------|------------------------|---------|----------|----------|
|                                                                       |     | Dosimex-<br>GX 2.0 | Microshield™<br>(Grove) | Mercurad | RayXpert®<br>1.4 | MCNP  | Dosimex                | μShield | Mercurad | RayXpert |
| Sans écran                                                            | Pt1 | 13.43              | 12                      | 13.17    | 13.8             | 13.68 | -1.8%                  | -12.3%  | -3.7%    | 0.9%     |
|                                                                       | Pt2 | 25.9               | 22.2                    | 24.44    | 26.4             | 25.6  | 1.2%                   | -13.3%  | -4.5%    | 3.1%     |
| Ecart quadratique moyen                                               |     |                    |                         |          |                  |       | 2%                     | 13%     | 4%       | 2%       |

| Scenario 8 : parallélépipède fer + Y 88 avec écran<br>H*(10) en mSv/h |     |                    |                         |          |                  |      | Ecart relatif vs MCNPX |         |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|--------------------|-------------------------|----------|------------------|------|------------------------|---------|----------|----------|
|                                                                       |     | Dosimex-<br>GX 2.0 | Microshield™<br>(Grove) | Mercurad | RayXpert®<br>1.4 | MCNP | Dosimex                | μShield | Mercurad | RayXpert |
| Avec écran 20 cm<br>béton                                             | Pt1 | 2.84               | 2.21                    | 2.8      | 2.6              | 2.6  | 9.2%                   | -15.0%  | 7.7%     | 0.0%     |
|                                                                       | Pt2 | 5.04               | 3.9                     | 5.02     | 4.4              | 4.24 | 18.9%                  | -8.0%   | 18.4%    | 3.8%     |
| Ecart quadratique moyen                                               |     |                    |                         |          |                  |      | 15%                    | 12%     | 14%      | 3%       |

## SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 8

### SANS ÉCRAN

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 2 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 13%
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 4 %.
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 2 %

## SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 8

### AVEC ÉCRAN

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 15 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 12%
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 14 %.
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 3 %

On retrouve ici une légère surestimation dans le cas avec écran due au Build-up

## SCENARIO 9 :

### MODÉLISATION MULTIRADIONUCLÉIDES

#### Scenario.9.1

#### CONTAINER SOLIDE DE DECHETS VITRIFIES (CSDV)

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

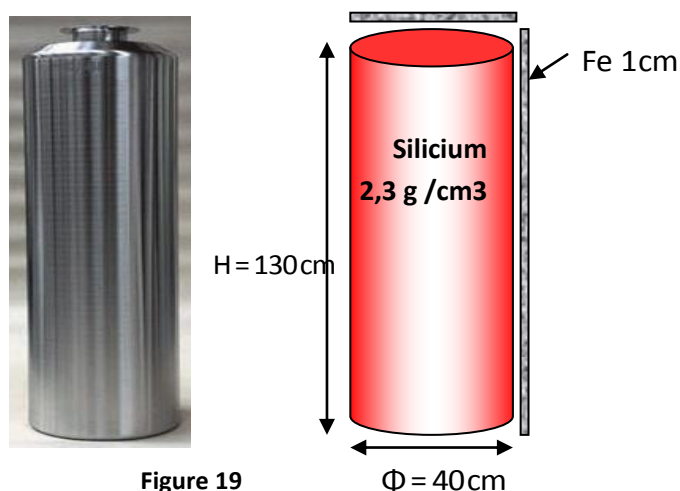


Figure 19

Ce container à été chargé avec les activités suivantes :

- Cs 137 :2E16 Bq
- Cs 134 :5E15 Bq
- Rh 106 :2E15 Bq

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 :

Source cylindrique

☒ (Point 2)

Décalage (0 <=> mi-hauteur)

0 cm

☒ (Point 1)

H\*(10)

663.33 Sv/h

Distance pt 1

100 cm

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre source.

Matériau source

Silicium

Masse vol.

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre  
Si le rayon interne est non nul, l'activité est répartie dans la couronne cylindrique compris entre Rint. et Rext

Commentaires

Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

☒ (Point 2)

H\*(10)

211.44 Sv/h

Distance pt 2

100 cm

Hauteur

130 cm

Rayon externe

20 cm

Rayon interne

0 cm

☒ Ecran(s) de protection

Caractéristiques écran

Nature

Fer

Masse vol.

Epaisseur

1 cm

☐ Ecran cylindrique (vs pt 1)

Lancer calcul

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

Source cylindrique

☒ (Point 2)

Décalage  
(0 <=> mi-hauteur)  
0 cm

☒ (Point 1)

H\*(10)  
1.73 mSv/h

H\*(10)  
730.15 µSv/h

Distance pt 2  
100 cm

Distance pt 1  
100 cm

Hauteur  
130 cm

Rayon externe  
20 cm

Rayon interne  
0 cm

Matériau source  
Silicium

Masse vol.

Caractéristiques écran

Nature  
Multi-écran

Epaisseur  
16 cm

☐ Ecran cylindrique (vs pt 1)

Lancer calcul

Commentaires  
Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre source

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre  
Si le rayon interne est non nul, l'activité est répartie dans la couronne cylindrique compris entre Rint. et Rext

Figure 21: Boîte 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

| Scenario 9<br>CSDV       |      |                |                      |            |               |            | Ecart relatif vs MCNPX |         |          |          |
|--------------------------|------|----------------|----------------------|------------|---------------|------------|------------------------|---------|----------|----------|
|                          | RN   | Dosimex-GX 3.0 | Microshield™ (Grove) | Mercurad   | RayXpert® 1.4 | MCNP       | Dosimex                | µShield | Mercurad | RayXpert |
| Sans protection          | Pt 1 | 663 Sv/h       | 544 Sv/h             | 748 Sv/h   | 465 Sv/h      | 449 Sv/h   | 48%                    | 21%     | 67%      | 4%       |
|                          | Pt2  | 211 Sv/h       | 196 Sv/h             | 246 Sv/h   | 168 Sv/h      | 164 Sv/h   | 29%                    | 20%     | 50%      | 2%       |
| Avec protection 15 cm Pb | Pt 1 | 1.73 mSv/h     | 1.00 mSv/h           | 1.26 mSv/h | 1.30 mSv/h    | 1.27 mSv/h | 36%                    | -21%    | -1%      | 2%       |
|                          | Pt2  | 0.73 mSv/h     | 0.54 mSv/h           | 1.02 mSv/h | 0.50 mSv/h    | 0.48 mSv/h | 52%                    | 13%     | 113%     | 4%       |
| Ecart quadratique moyen  |      |                |                      |            |               |            | 42%                    | 19%     | 70%      | 3%       |

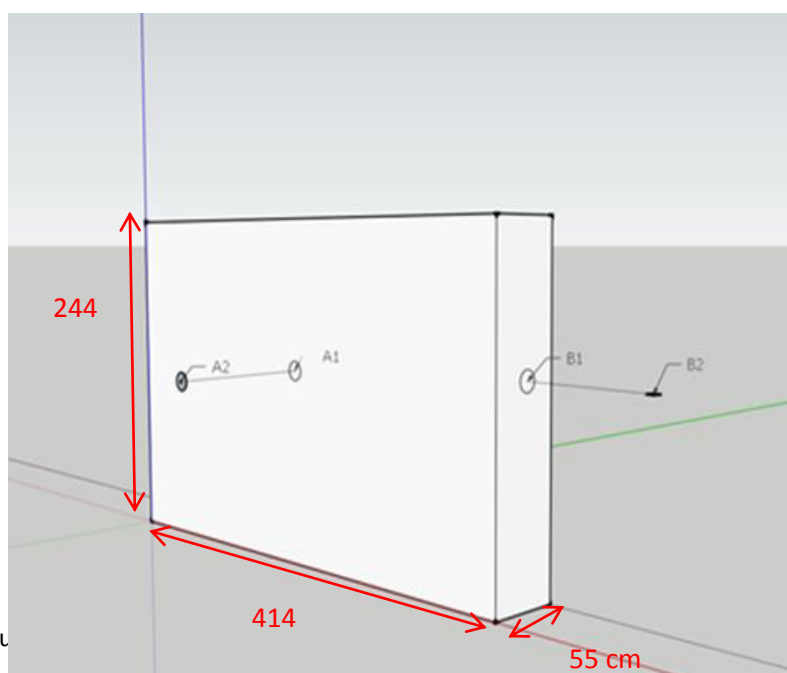
Tableau 19

## Scenario.9.2

## CONTAMINATION MUR BÉTON (RÉACTEUR 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 :



Le terme source u

|             |             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 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 § I.10.1) avec deux densité du béton différentes :

- Béton léger 2,3 g/cm<sup>3</sup>
- Béton lourd : 3,5 g/cm<sup>3</sup>

Les distances de calculs sont de 1 cm (points A1 et B1) et de 100 cm (points A2 et B2)



| Scenario 9 Cas béton lourd (3,5 g/cm <sup>3</sup> )<br>H*(10) (μSv/h) |                |                      |          |               |      | Ecart relatif vs MCNPX |         |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------|---------------|------|------------------------|---------|----------|----------|
| RN                                                                    | Dosimex-GX 3.0 | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert® 1.4 | MCNP | Dosimex                | μShield | Mercurad | RayXpert |
| Point A1                                                              | 967            | 1131                 | 938      | 923           | 1055 | -8.3%                  | 7.2%    | -11.1%   | -12.5%   |
| Point A2                                                              | 481            | 541                  | 467      | 480           | 526  | -8.6%                  | 2.9%    | -11.2%   | -8.7%    |
| Point B1                                                              | 941            | 809                  | 892      | 1075          | 979  | -3.9%                  | -17.4%  | -8.9%    | 9.8%     |
| Point B2                                                              | 123            | 145                  | 118      | 135           | 136  | -9.6%                  | 6.6%    | -13.2%   | -0.7%    |
| Ecart quadratique moyen                                               |                |                      |          |               |      | 8%                     | 10%     | 11%      | 9%       |

Tableau 21

| Scenario 9 Cas béton léger (2,3 g/cm <sup>3</sup> )<br>H*(10) (μSv/h) |                |                      |          |               |      | Ecart relatif vs MCNPX |         |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------|---------------|------|------------------------|---------|----------|----------|
| RN                                                                    | Dosimex-GX 3.0 | Microshield™ (Grove) | Mercurad | RayXpert® 1.4 | MCNP | Dosimex                | μShield | Mercurad | RayXpert |
| Point A1                                                              | 1450           | 1729                 | 1238     | 1493          | 1589 | -8.7%                  | 8.8%    | -22.1%   | -6.0%    |
| Point A2                                                              | 710            | 813                  | 627      | 740           | 791  | -10.2%                 | 2.8%    | -20.7%   | -6.4%    |
| Point B1                                                              | 1390           | 1392                 | 1196     | 1300          | 1480 | -6.1%                  | -5.9%   | -19.3%   | -12.2%   |
| Point B2                                                              | 179            | 208                  | 158      | 193           | 199  | -10.1%                 | 4.5%    | -20.6%   | -3.0%    |
| Ecart quadratique moyen                                               |                |                      |          |               |      | 9%                     | 6%      | 21%      | 8%       |

Tableau 22



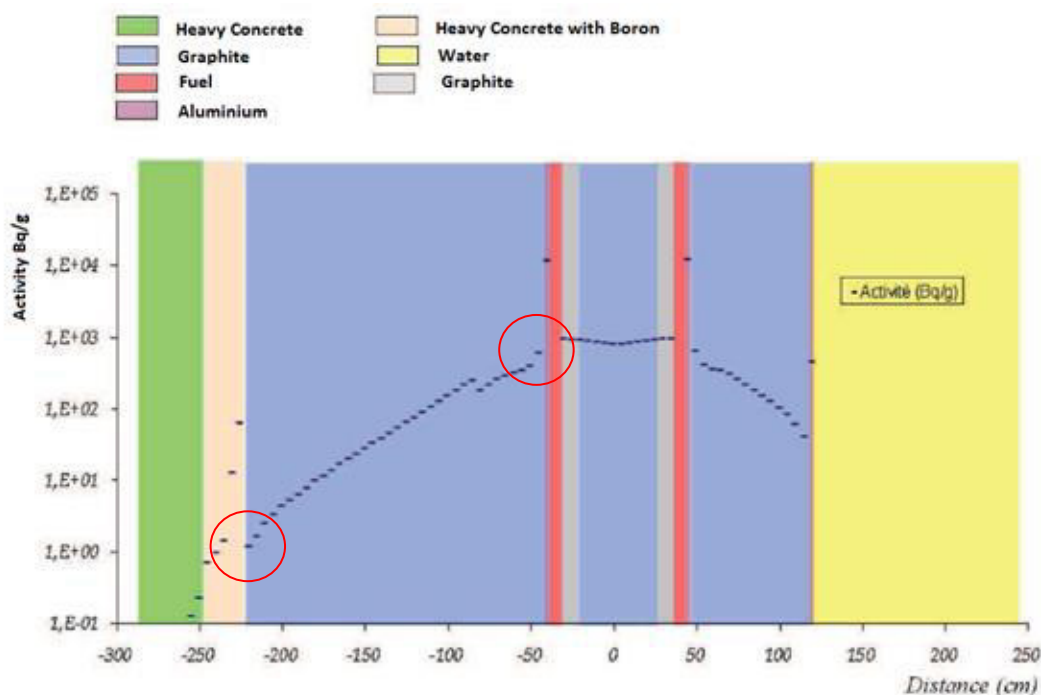
### Scenario.9.3

#### VALIDATION OPTION GRADIENT D'ACTIVITÉ (RAJOUTÉ 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 Dosiemx-G. le calcul est réalisé sur le point A2 coté activité maximale et coté activité minimale.



Graphe 12

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

| Densité :<br>3,5 g/cm <sup>3</sup><br><br>Point A1 | Code          | maximum              | Minimum             |
|----------------------------------------------------|---------------|----------------------|---------------------|
|                                                    | Mercure       | 926 $\mu\text{Sv/h}$ | 14 $\mu\text{Sv/h}$ |
|                                                    | Dosimex       | 905 $\mu\text{Sv/h}$ | 12 $\mu\text{Sv/h}$ |
|                                                    | Ecart relatif | -2%                  | -12%                |

Tableau 23

Ce résultat montre que cette option de Dosimex-GX3.0 disponible sur la géométrie parallélépipède est recevable.



## SYNTHÈSE DES RÉSULTAT SCENARIO 9

### CSDV

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 45 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 19 %
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 70 %.
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 3 %

### BETON NORMAL (2,3 g /cm<sup>3</sup>)

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 8 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 10 %
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 11 %.
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 9 %

### BETON LOURD (3,5 g /cm<sup>3</sup>)

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart moyen 8 %
- Entre **MICROSHIELD® V.9** et **MCNPX** écart moyen 6 %
- Entre **MERCURAD™** et **MCNPX** : : écart moyen 21 %.
- Entre **RayXpert© 1.4™** et **MCNPX** : : écart moyen 6 %

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, comme attendu, dans le rapport inverse des densités des bétons lourds et légers) avec une moyenne de 1,5.

## 2 : COMPARAISONS DOSIMEX-GX VS RAYXPERT



## SCENARIO 10 :

VALIDATION « EFFET DE CIEL »

### Scenario.10.1

EFFET DE CIEL VS DIVERS MATÉRIAUX)

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> )

Scénario :

- Radionucléides : Cs 137 puis Co 60
- Source Mono E 100 keV
- Activité 1 GBQ Bq
- Nature écrans testés : eau , Aluminium, béton, plomb
- Distance source écran : 45 cm
- Distance écran (au droit de la source) –point dose : 63 cm
- Angle : 45 °

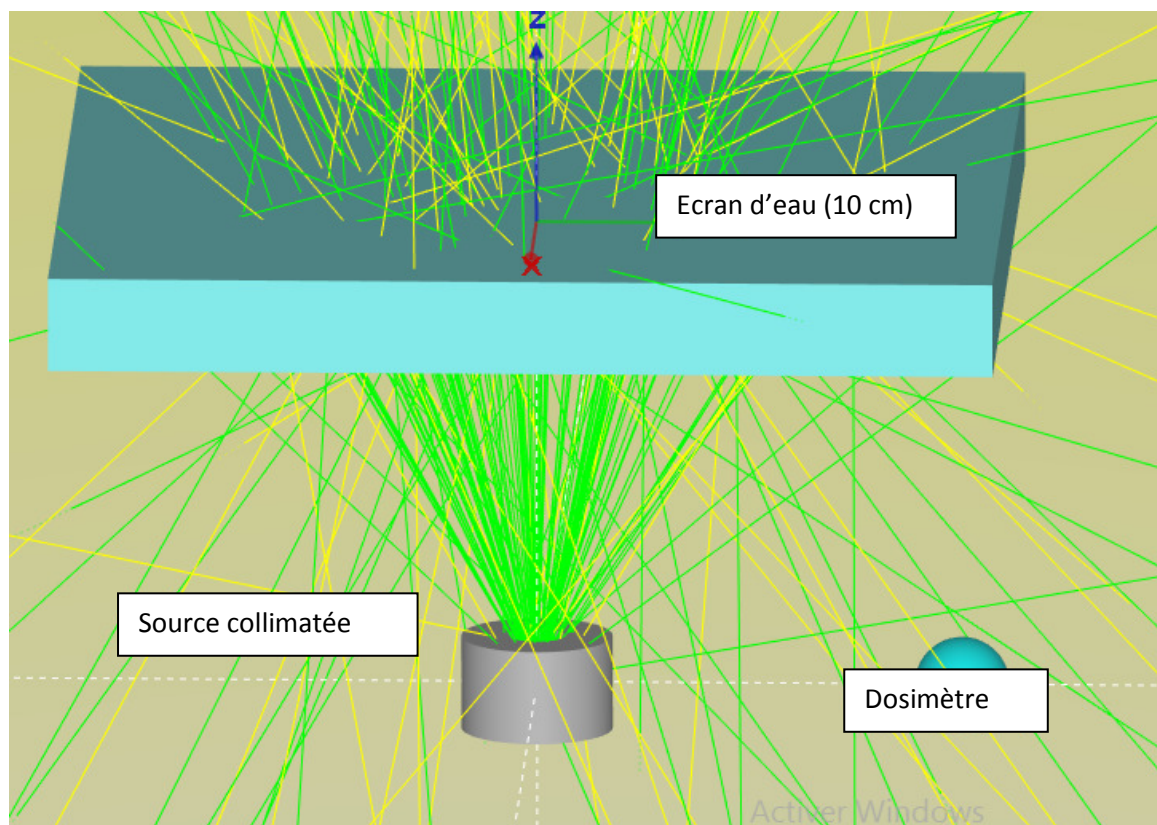


Figure 23 : tracking RayXpert- écran d'eau (vert : photons gamma, jaune : X bremsstrahlung )

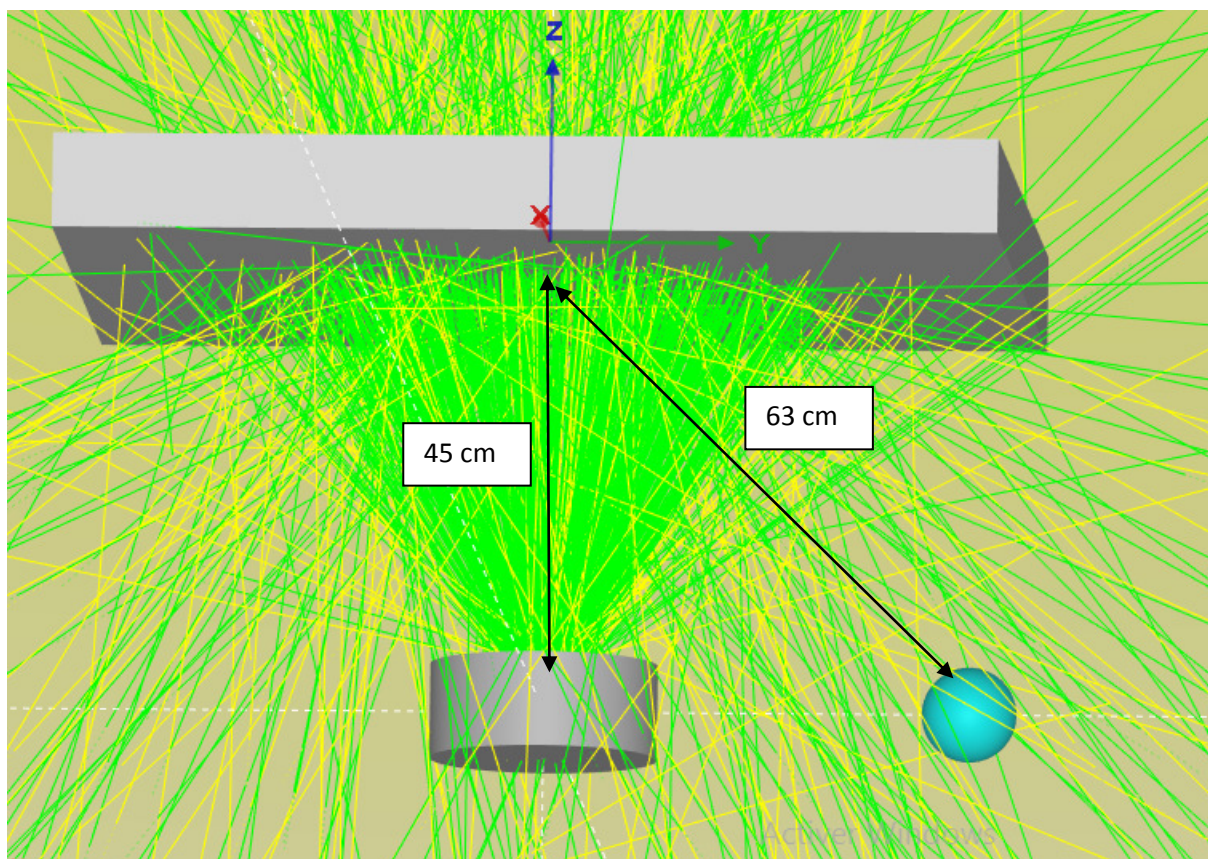


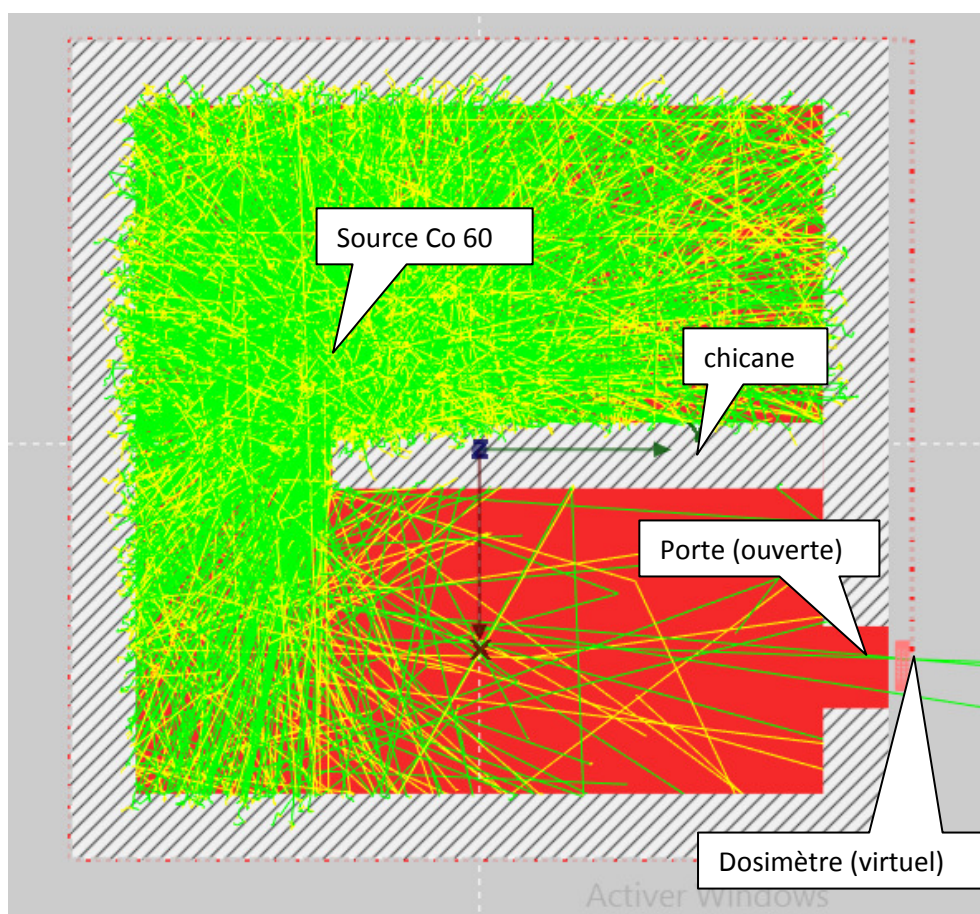
Figure 23 : tracking RayXpert- écran de plomb (vert : photons gamma, jaune : X bremsstrahlung )

| Scénario 11 : effet de ciel |           |                       |                       |               |
|-----------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|---------------|
|                             | Ecran     | DOSIMEX-GX            | RayXpert®             | Ecart relatif |
| Cs 137                      | Eau       | 3.67 $\mu\text{Sv/h}$ | 3.62 $\mu\text{Sv/h}$ | 1%            |
|                             | Aluminium | 4.37 $\mu\text{Sv/h}$ | 4.51 $\mu\text{Sv/h}$ | -3%           |
|                             | Béton     | 4.18 $\mu\text{Sv/h}$ | 4.28 $\mu\text{Sv/h}$ | -2%           |
|                             | Plomb     | 0.52 $\mu\text{Sv/h}$ | 0.43 $\mu\text{Sv/h}$ | 21%           |
| Co 60                       | Eau       | 6.72 $\mu\text{Sv/h}$ | 6.47 $\mu\text{Sv/h}$ | 4%            |
|                             | Aluminium | 9.01 $\mu\text{Sv/h}$ | 9.22 $\mu\text{Sv/h}$ | -2%           |
|                             | Béton     | 8.61 $\mu\text{Sv/h}$ | 9.42 $\mu\text{Sv/h}$ | -9%           |
|                             | Plomb     | 1.00 $\mu\text{Sv/h}$ | 1,01 $\mu\text{Sv/h}$ | 1%            |
|                             |           |                       | EQM                   | 8%            |

Tableau 24

## Scenario.10.2

## CALCUL EFFET DE CIEL DANS UNE CHICANE DE BLOCKAUS DE GAMMAGRAPHIE



Effet de ciel

**H\*(10)**  
**1.57E+02  $\mu\text{Sv/h}$**

Facteur de diffusion en dose  
**2.89E-03**

Distance  
**880 cm**

Angle  
**45 °**  
 l'angle doit être compris entre [0°,89°]

Distance source -écran  
**345 cm**

**5.42E+01 mSv/h**

**Lancer calcul**

Caractéristiques écran

Nature **Béton** Masse vol.

Epaisseur **60 cm**

Surface **2,2E5 cm<sup>2</sup>**



| Calcul<br>chicane | DOSIMEX-<br>GX       | RayXpert®            | Ecart relatif |
|-------------------|----------------------|----------------------|---------------|
| Co 60 50 Ci       | 231 $\mu\text{Sv/h}$ | 236 $\mu\text{Sv/h}$ | -2%           |
| Ir 192 120 Ci     | 488 $\mu\text{Sv/h}$ | 506 $\mu\text{Sv/h}$ | -4%           |
| Se 75 80 Ci       | 200 $\mu\text{Sv/h}$ | 206 $\mu\text{Sv/h}$ | -3%           |
|                   |                      | EQM                  | 3%            |

## SCENARIO 11 : VALIDATION « RAYONNEMENT DE FREINAGE »

### A) VALIDATION VS RAYXPERT

Le rayonnement de freinage pour l'option implémentée dans Dosimex-GX permet de calculer le DED du au le rayonnement de freinage généré par les électrons émis une source Bêta ponctuelle. Les Bétas sont arrêtés par un absorbant de dimension minimale égale à la portée des électrons dans ce milieu.

Pour notre étude nous avons utilisé l'Oxygène 15, émetteur Bêta + avec  $Q_{max}=1735\text{keV}$ , sans tenir compte de l'annihilation des positons après leur arrêt (option possible dans Dosimex-GX)

- Activité : 1 GBq
- Absorbants :
  - Eau 1Cm
  - Aluminium 4 mm
  - Fer 1,2 mm
  - Plomb 1 mm

Estimation DED rayonnement de freinage

Choix : ☒ Radionucléides enregistrés 150 ☐ Sources personnalisées

Activité (Bq) : 1E9

Distance (cm) : 10

Nature de l'absorbant d'électron : Plomb

Ep. absorbant (cm) : 0.1

H\*(10) : 273.86  $\mu\text{Sv/h}$

☐ Ecran de protection vs ray. frein.

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

Figure 25 : résultat Dosimex-GX 3.0 avec l'absorbant en eau

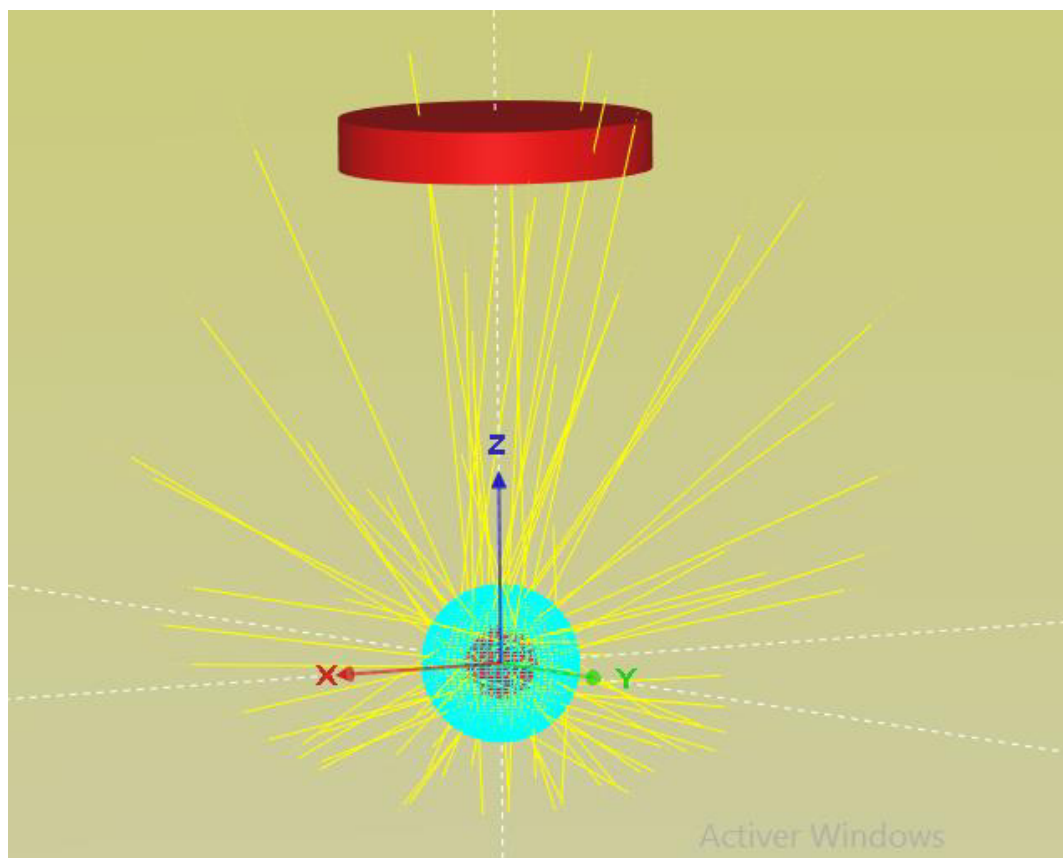


Figure 26 :Tracking RayXpert© : rayonnement de freinage dans l'eau

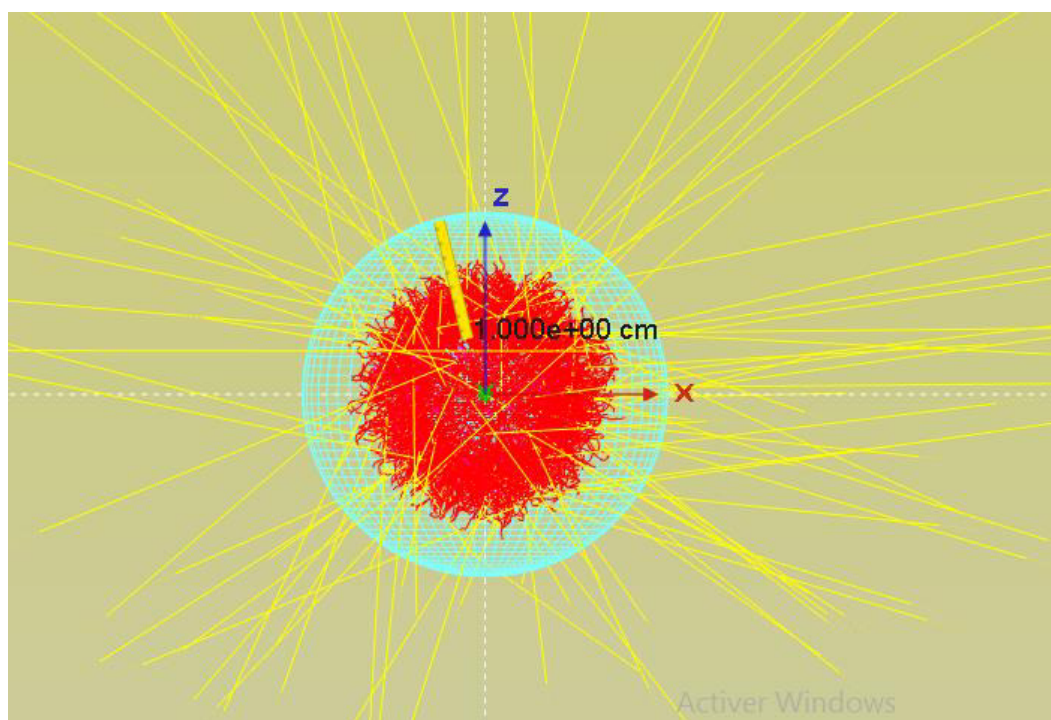


Figure 26 :Tracking RayXpert© : zoom sur la source (rouge : électrons, jaune : RX)



| SC 11 : rayonnement de freinage ave O15 ;<br>1 GBq ; d = 5 cm |                      |                      |               |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------|
| Absorbant                                                     | Dosimex              | RayXpert             | Ecart relatif |
| Eau (1 cm)                                                    | 27 $\mu\text{Sv/h}$  | 43 $\mu\text{Sv/h}$  | -38%          |
| Plomb (1 mm)                                                  | 274 $\mu\text{Sv/h}$ | 210 $\mu\text{Sv/h}$ | 31%           |
| Fer 1.2 mm                                                    | 128 $\mu\text{Sv/h}$ | 112 $\mu\text{Sv/h}$ | 14%           |
| Alu (4 mm)                                                    | 53 $\mu\text{Sv/h}$  | 73 $\mu\text{Sv/h}$  | -28%          |
| Ecart quadratique moyen                                       |                      |                      | 29%           |

Tableau 25

Compte-tenu de la complexité des calculs : transformation d'un spectre continu électrons vers un spectre continu en RX + autoatténuation de ces derniers dans l'absorbant, ces résultats sont plus qu'acceptables, ils sont inespérés !



## 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.

Caractéristiques écran

Nature Plomb

Epaisseur 10 cm

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

- ✓ Valeur mesurée : 60 µSv/h à 1 m
- ✓ Valeur calculée par Dosimex-GX 2.0: 73 µSv/h à 1 m

## SCENARIO 12 : ECRAN CYLINDRIQUE . OPTION DOSIMEX-GX 2.1 AVRIL 2017

### Scenario 1 : tuyauterie industrielle matrice cylindrique pleine

- Source cylindrique
- Rayon 15 cm (Rint=0)
- Hauteur 50 cm
- Radionucléide Cs 137
- Ecran cylindrique (tuyau) : 3 cm Pb
- Activité 1 TBq
- Distance : 30 cm
- Configuration 1 : matrice air
- Configuration 2 : matrice eau

#### Calcul Dosimex

Source cylindrique

☐ (Point 2)

Décalage (0=mi-hauteur)

☒ (Point 1) 0 cm

H\*(10) 6,8 mSv/h

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre

30 cm Distance

15 cm Rayon

50 cm Hauteur

Matériau source Eau

Masse vol.

☒ Ecran de protection

Caractéristiques écran

Nature Plomb

Masse vol.

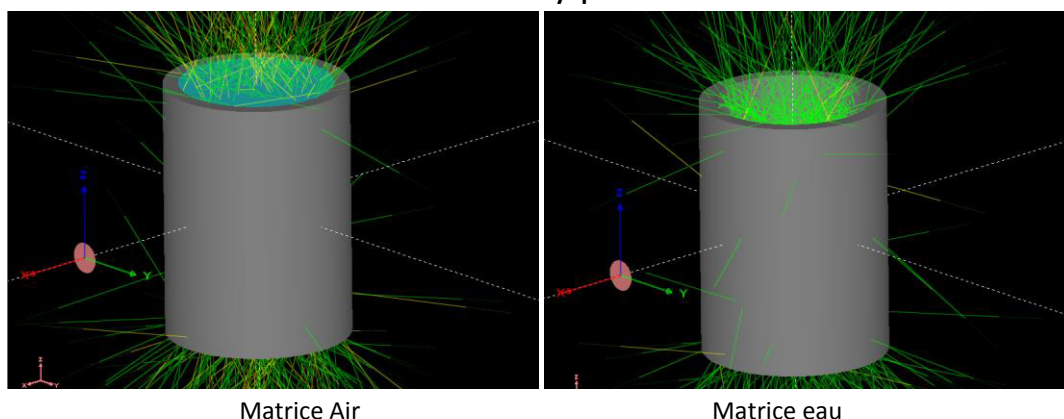
Epaisseur 3 cm

☒ Ecran cylindrique

Lancer calcul

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre

#### Calcul RayXpert



| Tuyau épaisseur 3 cm Plomb H=50 cm, R=15 cm matrice eau 1TBq Cs 137 distance 30 cm |                |              |               |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------|---------------|
| Configuration                                                                      | Dosimex-GX 2.1 | RayXpert 1.5 | Ecart-relatif |
| Air                                                                                | 12,2 mSv/h     | 13 mSv/h     | -6%           |
| Eau                                                                                | 6,8 mSv/h      | 6,4 mSv/h    | 6%            |

## Scénario 2 : seringue Technétium. Evaluation de l'efficacité d'un protège-seringue cylindrique de

- Source cylindrique
- Rayon 1 cm
- Hauteur 5 cm
- Radionucléide TC 99m
- Activité 800 MBq
- Distances : 1cm et 0,1 cm
- Configuration 1 : sans écran
- Configuration 2 : avec protège seringue 1 mm tungstène

### Calcul Dosimex 1 cm avec protège seringue

Source cylindrique

☒ (Point 1)  cm

Décalage (0=mi-hauteur)

cm

☐ (Point 2)

**Lancer calcul**

**H\*(10)**

**0,55mSv/h**

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre

Distance  cm

Rayon  cm

Hauteur  cm

Matériau source  Masse vol.

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre

☒ Ecran de protection

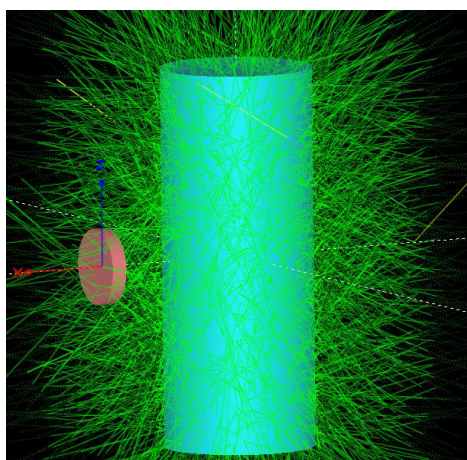
Caractéristiques écran

Nature  Masse vol.

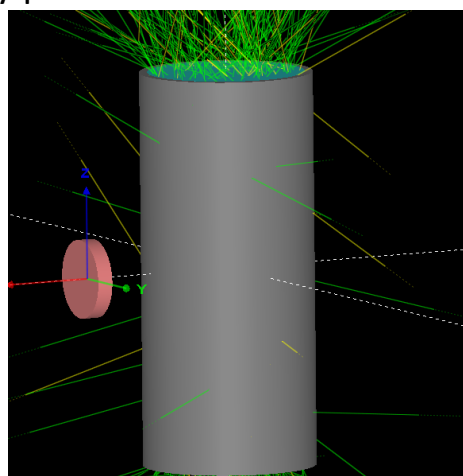
Epaisseur  cm

☒ Ecran cylindrique

### Calcul RayXpert



Sans protège seringue



Avec protège-seringue (1 mm W)

| Seringue TC 99m 800 MBq d=1 cm |                |              |               |
|--------------------------------|----------------|--------------|---------------|
| Configuration                  | Dosimex-GX 3.0 | RayXpert 1.5 | Ecart-relatif |
| Sans protège seringue          | 35 mSv/h       | 33 mSv/h     | 7,3%          |
| Avec protège-seringue (1 mm W) | 0,387 mSv/h    | 0,475 mSv/h  | 25,7%         |
| <i>Facteur d'atténuation</i>   | <i>59</i>      | <i>69</i>    | <i>-14,6%</i> |

| Seringue TC 99m 800 MBq d=0,1 cm |                |              |               |
|----------------------------------|----------------|--------------|---------------|
| Configuration                    | Dosimex-GX 2.1 | RayXpert 1.5 | Ecart-relatif |
| Sans protège seringue            | 83,9 mSv/h     | 79,8 mSv/h   | 5,1%          |
| Avec protège-seringue (1 mm W)   | 0,783 mSv/h    | 0,897 mSv/h  | -12,7%        |
| <i>Facteur d'atténuation</i>     | <i>107</i>     | <i>89</i>    | <i>20,4%</i>  |

## SCENARIO 13 : MATRICE CYLINDRIQUE ÉVIDÉ.

### A. MATRICE CYLINDRE ÉVIDÉ, MATÉRIAU AIR

Ce scénario avec un matériau peu absorbant permet de juger de la qualité du calcul géométrique du cylindre évidé

- Matrice matériau air
- H=60 cm
- Rext=30 cm
- 1TBq Cobalt 60
- Distance Dosimètre point 1 et point 2 : 10 cm

Source cylindrique

Calcul Dosimex cylindre creux  
Epaisseur 1 cm

$H^*(10)$  1,66 Sv/h

Décalage (0=mi-hauteur)

☒ (Point 1) 0 cm

Distance 10 cm

$H^*(10)$  3,08 Sv/h

10 cm Distance

60 cm Hauteur

30 cm Rayon externe

29 cm Rayon interne

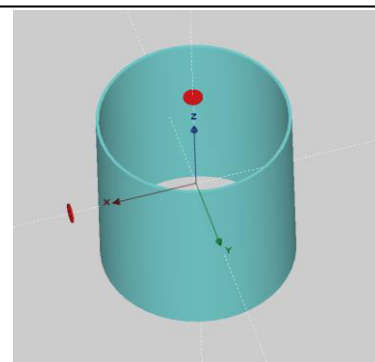
Matériau source Air

Masse vol.

Avec ou sans écran, les distances sont toujours prises à partir de la surface de la matrice source

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre

Calcul RayXpert cylindre creux  
Epaisseur 1 cm



| Cylindre air H =60 cm, Co 60 1TBq, d= 10 cm |                |          |          |          |                |         |
|---------------------------------------------|----------------|----------|----------|----------|----------------|---------|
| Epaisseur                                   | Dosimex-GX 2.1 |          | RayXpert |          | Ecart relatifs |         |
|                                             | Point 1        | Point 2  | Point 1  | Point 2  | Point 1        | Point 2 |
| e=1 cm                                      | 3,1 Sv/h       | 1,7 Sv/h | 3 Sv/h   | 1,7 Sv/h | 3%             | -3%     |
| e=5 cm                                      | 2,8 Sv/h       | 1,8 Sv/h | 2,9 Sv/h | 1,9 Sv/h | -1%            | -3%     |
| e=10 cm                                     | 2,6 Sv/h       | 2 Sv/h   | 2,7 Sv/h | 2 Sv/h   | -1%            | -4%     |
| e=20 cm                                     | 2,4 Sv/h       | 2,4 Sv/h | 2,4 Sv/h | 2,4 Sv/h | 0%             | -4%     |
| Matrice pleine                              | 2,4 Sv/h       | 2,6 Sv/h | 2,4 Sv/h | 2,7 Sv/h | -1%            | -3%     |

## B. MATRICE CYLINDRE ÉVIDÉ, MATÉRIAU FER

Le calcul avec le matériau en fer permet de qualifier le calcul d'autoabsorption dans la matrice évidée

Source cylindrique

☒ (Point 2)

$H^*(10)$  970,68 mSv/h

Décalage (0=mi-hauteur)

☒ (Point 1) 0 cm

Distance 10 cm

$H^*(10)$  917,06 mSv/h

Hauteur 60 cm

Distance 10 cm

Rayon externe 30 cm

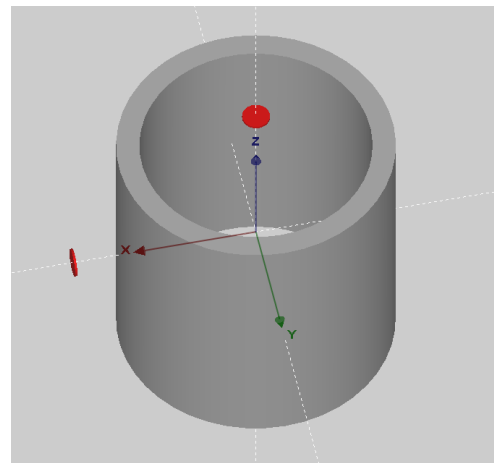
Rayon interne 25 cm

Matériau source Fer

Masse vol.

Avec ou sans écran, les distances sont toujours prises à partir de la surface de la matrice source

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre



| CylindreFer H =60 cm, Co 60 1TBq, d= 10 cm |                |           |            |            |                |         |
|--------------------------------------------|----------------|-----------|------------|------------|----------------|---------|
| Epaisseur                                  | Dosimex-GX 2.1 |           | RayXpert   |            | Ecart relatifs |         |
|                                            | Point 1        | Point 2   | Point 1    | Point 2    | Point 1        | Point 2 |
| e=5 cm                                     | 0,91 Sv/h      | 0,97 Sv/h | 0,948 Sv/h | 1,09 Sv/h  | -4%            | -11%    |
| e=10 cm                                    | 0,52 Sv/h      | 0,62 Sv/h | 0,556 Sv/h | 0,732 Sv/h | -6%            | -15%    |

## SCENARIO 14 :      PRIMAIRE RÉACTEUR CONTAMINÉ EN FACE INTERNE

Le cas réel traité ici est de comparer, dans une démarche ALARA, le DED généré par un tuyau de primaire réacteur contaminé en surface interne avec et sans eau

Les dimensions de tuyau sont (REP 1300 MW):

- Longueur 560 cm
- Diamètre intérieur= 74 cm
  - Epaisseur =6,5 cm d'acier
- DED calculées à 1 m puis au contact de la surface du tuyau
- contamination surfacique interne : Co 60 54 kBq/cm2 (1,41 E10 Bq)



A      CALCUL A 100 CM

Résultat avec Dosimex –GX 3.0  
Tuyau vide : 93,9  $\mu\text{Sv/h}$

Source cylindrique

Décalage (0 <=> mi-hauteur) : 0 cm

(Point 1) ☒ (Point 2) ☐

H\*(10) : 93.87  $\mu\text{Sv/h}$

Hauteur : 560 cm

Distance pt 1 : 106,5 cm

Rayon externe : 37 cm

Rayon interne : 36,5 cm

Matériau source : Air

Caractéristiques écran : Nature Fer, Epaisseur 6,5 cm, Ecran cylindrique (vs pt 1) ☒

Lancer calcul

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre source

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre. Si le rayon interne est non nul, l'activité est répartie dans la couronne cylindrique comprise entre Rint. et Rext.

Tube rempli d'eau ☐

Commentaires

Résultat avec Dosimex –GX 3.0  
Tuyau plein : 56,3  $\mu\text{Sv/h}$

Source cylindrique

Décalage (0 <=> mi-hauteur) : 0 cm

(Point 1) ☒ (Point 2) ☐

H\*(10) : 56.32  $\mu\text{Sv/h}$

Hauteur : 560 cm

Distance pt 1 : 106,5 cm

Rayon externe : 37 cm

Rayon interne : 36,5 cm

Matériau source : Air

Caractéristiques écran : Nature Fer, Epaisseur 6,5 cm, Ecran cylindrique (vs pt 1) ☒

Lancer calcul

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre source

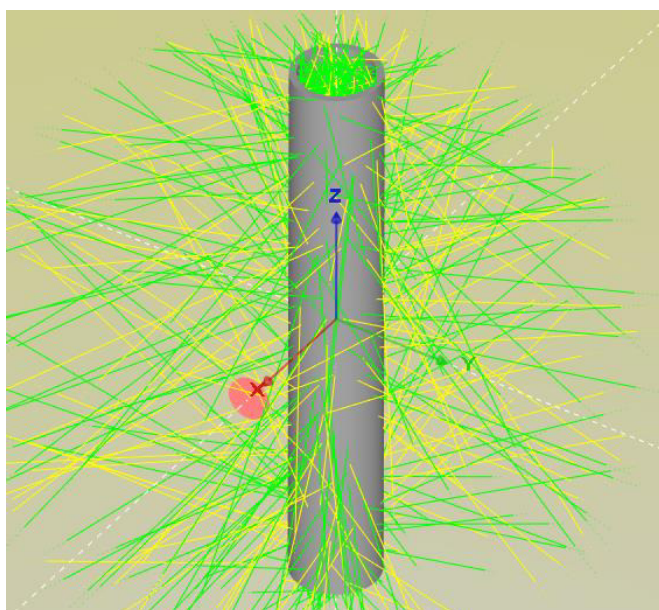
Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre. Si le rayon interne est non nul, l'activité est répartie dans la couronne cylindrique comprise entre Rint. et Rext.

Tube rempli d'eau ☒

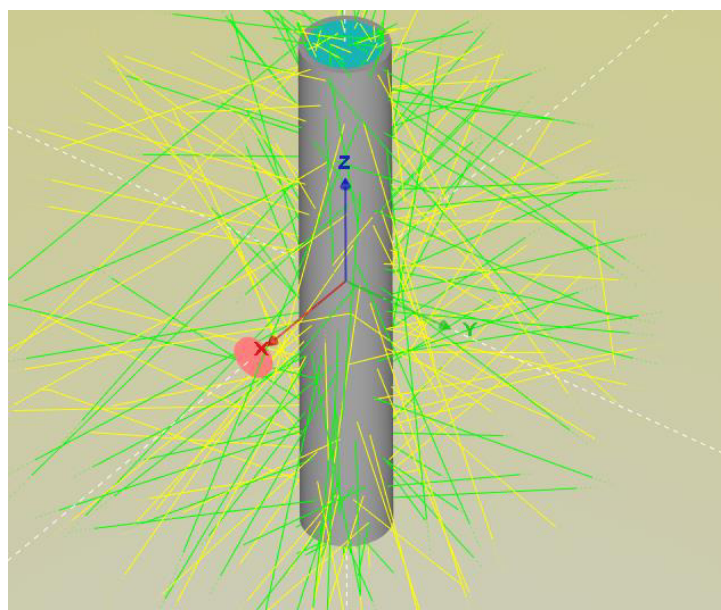
Commentaires : Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

Calculs avec RayXpert :

Tuyau vide



tuyau en eau



| d=100 cm                     | DOSIMEX-GX 3.0        | RayXpert              | Ecart relatif |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| Sans eau                     | 93.9 $\mu\text{Sv/h}$ | 92.8 $\mu\text{Sv/h}$ | 1.2%          |
| Avec eau (74 cm)             | 56.3 $\mu\text{Sv/h}$ | 50.7 $\mu\text{Sv/h}$ | 11.0%         |
| <i>Facteur d'atténuation</i> | <b>1.67</b>           | <b>1.83</b>           | -8.9%         |

## B CALCUL AU CONTACT

**Source cylindrique**

☐ (Point 2)

Décalage  
(0 <=> mi-hauteur)

0 cm

☒ (Point 1)

H\*(10)

195.5  $\mu\text{Sv/h}$

Distance pt 1

9 cm

Les distances source /points doses sont toujours prises à partir de la surface du cylindre source

Rayon externe

36,5 cm

Rayon interne

36 cm

☒ Tube rempli d'eau

Matériau source

Air

Masse vol.

Matrice source avec activité volumique constante dans tout le cylindre  
Si le rayon interne est non nul, l'activité est répartie dans la couronne cylindrique comprise entre Rint. et Rext

Commentaires

Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

☐ Ecran(s) de protection

Caractéristiques écran

Nature

Fer

Masse vol.

Epaisseur

6,5 cm

☒ Ecran cylindrique (vs pt 1)

Lancer calcul

Hauteur

560 cm

| Contact                      | DOSIMEX-GX 3.0        | RayXpert              | Ecart relatif |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| Sans eau                     | 345. $\mu\text{Sv/h}$ | 340. $\mu\text{Sv/h}$ | 1.5%          |
| Avec eau (74 cm)             | 195. $\mu\text{Sv/h}$ | 175. $\mu\text{Sv/h}$ | 11.4%         |
| <i>Facteur d'atténuation</i> | <b>1.77</b>           | <b>1.94</b>           | <b>-8.9%</b>  |

On constate, dans les 2 cas, et malgré une géométrie relativement complexe, une excellente adéquation. Le calcul en eau est là encore révélateur, avec des écarts positifs de l'ordre de 10 %, est là encore révélateur du build-up élevé et pessimiste dans l'eau

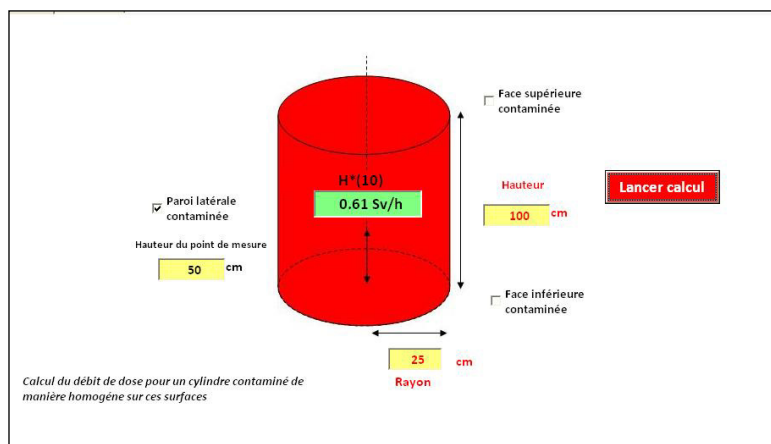
## SCENARIO 15 : MESURE DED INTERNE TUYAU

Cylindre contaminé sur sa surface interne :

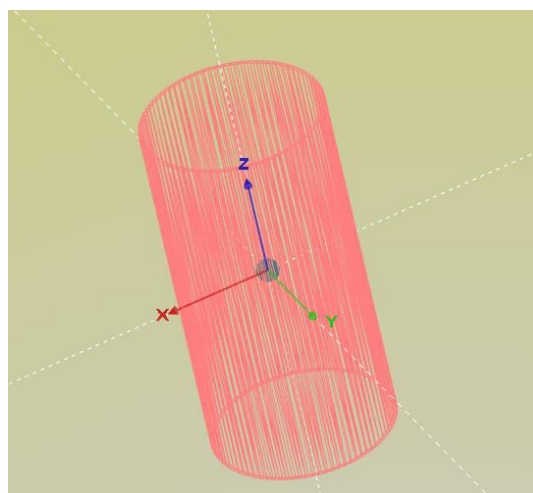
Radionucléide : Se 75 ; 1 TBq

Hauteur cylindre 100 ; rayon 25 cm

DED calculé à mi-hauteur (50 cm), à  $\frac{3}{4}$  (75 cm)  
et en limite du cylindre (100 cm)



Simulation RayXpert :



| Hauteur                 | DOSIMEX-GX<br>3.0 | RayXpert  | Ecart relatif |
|-------------------------|-------------------|-----------|---------------|
| 50 cm                   | 610 mSv/h         | 634 mSv/h | -3.8%         |
| 75 cm                   | 560 mSv/h         | 575 mSv/h | -2.6%         |
| 100 cm                  | 366 mSv/h         | 344 mSv/h | 6.4%          |
| Ecart quadratique moyen |                   |           | 5%            |

## SCENARIO 16 : FONCTION « DÉCALAGE » 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

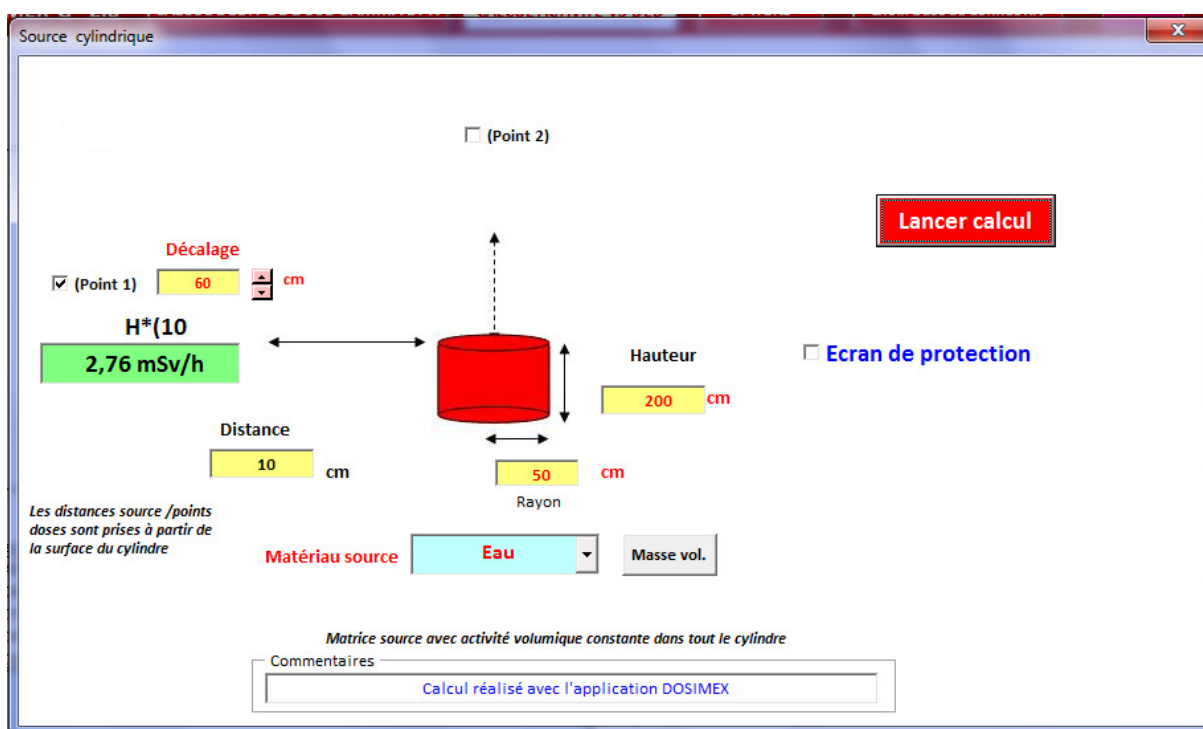
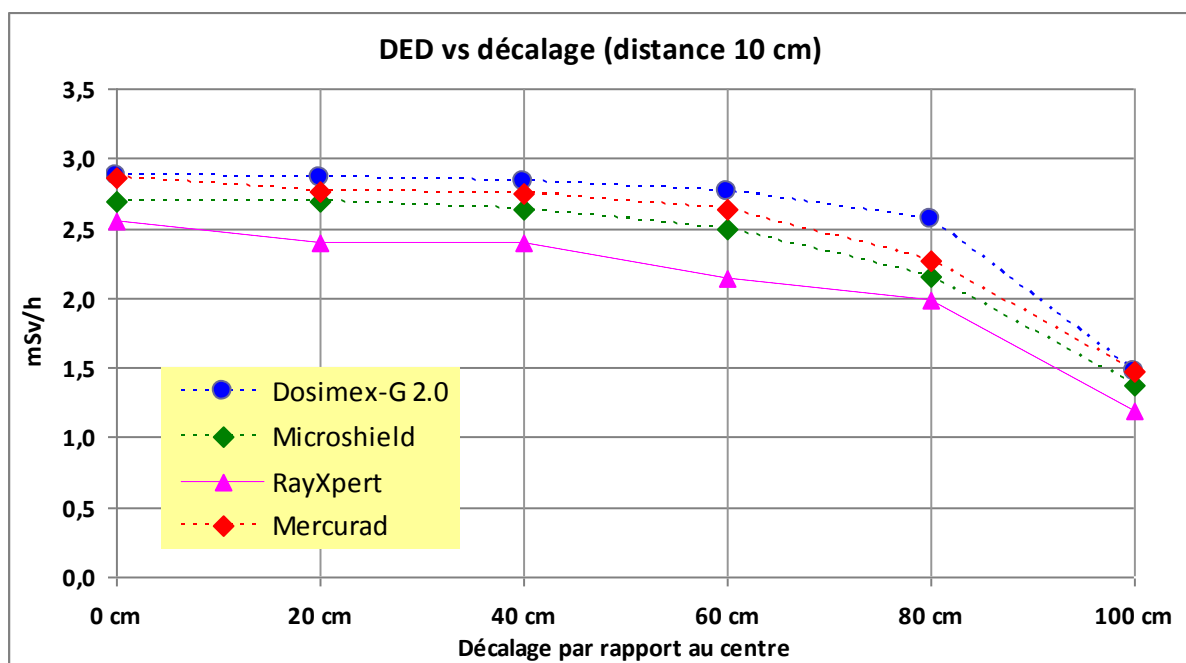


Figure 28 : configuration 1 avec décalage de 60 cm

| R=50; H=200 ; A=10 GBq; Co 60; d=10 cm; Eau (mSv/h) |               |                  |                            |               | Benchmark vs RayXpert    |                               |                            |
|-----------------------------------------------------|---------------|------------------|----------------------------|---------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Décalage                                            | DOSIMEX<br>-G | MICROSHIELD<br>® | MERCURAD <sup>T</sup><br>M | RayXpert<br>© | Dosimex<br>/RayXper<br>t | Microshie<br>l vs<br>RayXpert | mercurad<br>vs<br>RayXpert |
| 0 cm                                                | 2.87          | 2.7              | 2.86                       | 2.55          | 13%                      | 6%                            | 12%                        |
| 20 cm                                               | 2.86          | 2.69             | 2.76                       | 2.4           | 19%                      | 12%                           | 15%                        |
| 40 cm                                               | 2.83          | 2.63             | 2.75                       | 2.39          | 18%                      | 10%                           | 15%                        |
| 60 cm                                               | 2.76          | 2.49             | 2.64                       | 2.14          | 29%                      | 16%                           | 23%                        |
| 80 cm                                               | 2.56          | 2.15             | 2.27                       | 1.99          | 29%                      | 8%                            | 14%                        |
| 100 cm                                              | 1.48          | 1.38             | 1.47                       | 1.19          | 24%                      | 16%                           | 23%                        |
| Ecart quadratique moyen                             |               |                  |                            |               | 23%                      | 12%                           | 18%                        |



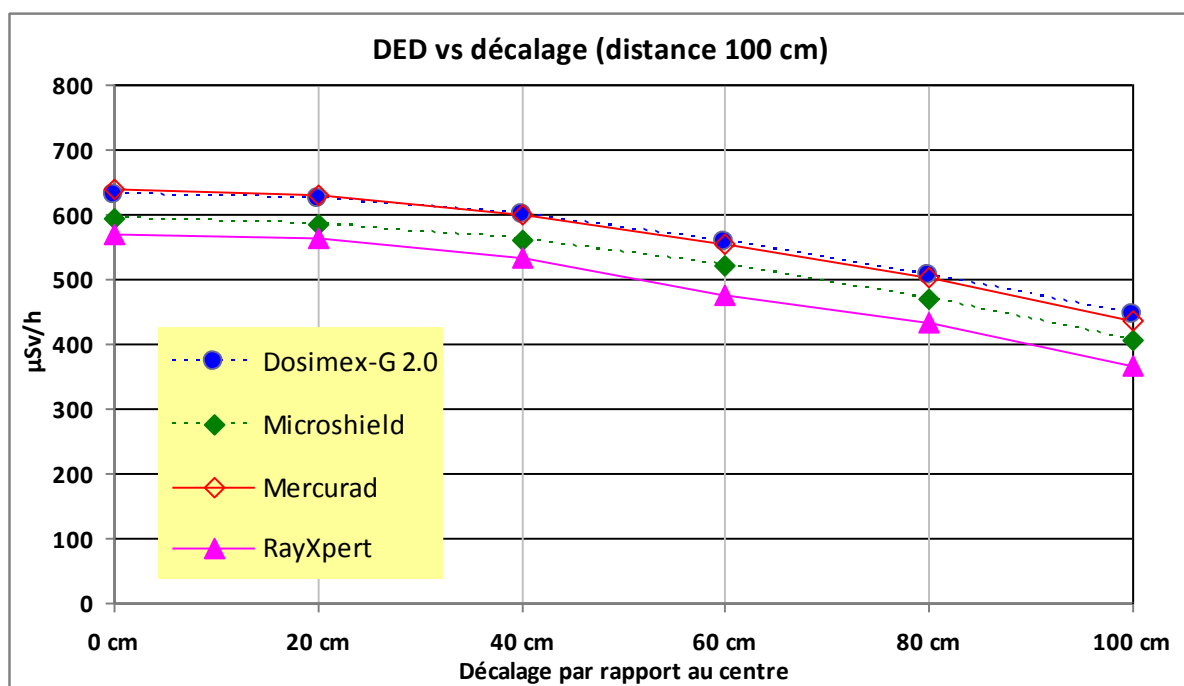
BENCHMARK RAYXPERT© V 1.4

Cas 1 : Distance source 10 cm

- 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 18%.

| R=50; H=200 ; A=10 GBq; Co 60; d=100 cm; Eau (μSv/h) |               |                          |                                    |                                    | Benchmark vs RayXpert    |                               |                             |
|------------------------------------------------------|---------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Décalage                                             | DOSIMEX<br>-G | MICROSHIELD <sup>®</sup> | MERCURAD <sup>™</sup> <sub>M</sub> | RayXpert <sup>®</sup> <sub>©</sub> | Dosimex<br>/RayXper<br>t | Microshie<br>l vs<br>RayXpert | mercura<br>d vs<br>RayXpert |
| 0 cm                                                 | 631           | 593                      | 640                                | 569                                | 11%                      | 4%                            | 12%                         |
| 20 cm                                                | 623           | 584                      | 630                                | 564                                | 10%                      | 4%                            | 12%                         |
| 40 cm                                                | 599           | 560                      | 600                                | 532                                | 13%                      | 5%                            | 13%                         |
| 60 cm                                                | 559           | 521                      | 554                                | 477                                | 17%                      | 9%                            | 16%                         |
| 80 cm                                                | 506           | 470                      | 502                                | 432                                | 17%                      | 9%                            | 16%                         |
| 100 cm                                               | 445           | 406                      | 437                                | 367                                | 21%                      | 11%                           | 19%                         |
| Ecart quadratique moyen                              |               |                          |                                    |                                    | 15%                      | 7%                            | 15%                         |

Tableau 19



BENCHMARK VS RAYXPRT© V 1.4

Cas 2 : Distance source 100 cm

- 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%.

## SCENARIO 17 : CALCUL BLOCKHAUS AVEC UNE SOURCE D'IRIDIUM DE Co 60 DE 50 Ci

Pour des calculs opérationnels nous avons du déterminer l'épaisseur de béton nécessaire pour obtenir 0,5  $\mu\text{Sv}$  d'une source de Cobalt 60 de 50 Ci (1,85 TBq)

Pour des raisons de validation opérationnelles, nous avons du valider ces calculs par un code Monte-Carlo. Les temps de calculs devenant rapidement très élevés (plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures)) pour des épaisseurs de l'ordre du mètre, nous avons tout d'abord comparé les DED pour des épaisseurs plus faibles :

|                           |                             |                           |                           |               |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| d= 100 cm<br><br>Co 50 Ci | 0 cm (référence)            | 6.45E+06 $\mu\text{Sv/h}$ | 6.49E+06 $\mu\text{Sv/h}$ | Ecart relatif |
|                           | 40 cm béton (2,35)          | 3.84E+04 $\mu\text{Sv/h}$ | 4.37E+04 $\mu\text{Sv/h}$ |               |
|                           | Facteur d'atténuation 40 cm | 168                       | 149                       | 13%           |
|                           | 80 cm béton (2,35)          | 133 $\mu\text{Sv/h}$      | 177 $\mu\text{Sv/h}$      |               |
|                           | Facteur d'atténuation 40 cm | 5.E+04                    | 4.E+04                    | 32%           |
|                           | 100 cm béton (2,35)         | 14.6 $\mu\text{Sv/h}$     | 12.3 $\mu\text{Sv/h}$     |               |
|                           | Facteur d'atténuation 40 cm | 4.42E+05                  | 5.27E+05                  | -16%          |

La qualité des résultats nous a permis alors de tâtonner pour obtenir un DED de l'ordre de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ , obtenant alors des épaisseurs nécessaires supérieure à 1 m :

Source ponctuelle

H\*(10) 4.35E+02 nSv/h

Facteur d'atténuation

Distance 125 cm

Lancer calcul

Facteur d'atténuation 9.49E+05

☒ Ecran(s) de protection

Caractéristiques écran(s)

Nature Béton Masse vol.

Epaisseur 125 cm

Spectre gamma

| Radionucléide | Isotope | E (keV)  | I (%)     | contributor DeD total |
|---------------|---------|----------|-----------|-----------------------|
| Co            | 60      | 1332 keV | 99.9826 % | 75.41 %               |
| Co            | 60      | 1173 keV | 99.85 %   | 24.57 %               |
| Co            | 60      | 2158 keV | 0.0012 %  | 0.02 %                |

Commentaires

Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

En tenant compte d'une distance de consigne imposant à la source d'être à plus de 50 cm du mur de protection ;, on obtient un DED inférieur à 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  avec une marge raisonnable de sécurité :

Un tel calcul sous RayXpert aurait nécessité un nombre d'heures considérables sur un ordinateur « normal », ou alors de disposer d'un ordinateur de très grande puissance de calcul (multi-cœurs ou cluster), alors que le calcul avec Dosimex est instantané

## Partie II. SYNTHÈSE VALIDATION DOSIMEX-GX 3.0 POUR LES SOURCES GAMMA

### A. SYNTHÈSE BENCHMARK DOSIMEX-GX 3.0, MICROSHIELD<sup>®</sup>, MERCURAD<sup>™</sup> ET RAYXPRT<sup>©</sup> VS MCNPX

Sur 143 configurations réparties en 9 scenarios on obtient :

#### BENCHMARK VS MCNP TOUTES VALEURS CONFONDUES

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart quadratique moyen 12 %
- Entre **MICROSHIELD<sup>®</sup> V.9** et **MCNPX** écart quadratique moyen 38 %
- Entre **MERCURAD<sup>™</sup>** et **MCNPX** : : écart quadratique moyen 32 %.
- Entre **RayXpert<sup>©</sup> 1.5** et **MCNPX** : : écart quadratique moyen 5 %

#### BENCHMARK VS MCNP HORS VALEURS ABERRANTES (VOIR TABLEAU PAGE SUIVANTE)

- Entre **DOSIMEX-GX 3.0** et **MCNPX** : écart quadratique moyen 11,2 % (**1 valeurs ab.**)
- Entre **MICROSHIELD<sup>®</sup> V.9** et **MCNPX** écart quadratique moyen 12 % (**14 valeurs ab.**)
- Entre **MERCURAD<sup>™</sup>** et **MCNPX** : : écart quadratique moyen 17 %. (**10 valeurs ab.**)

Il est possible que d'autres configurations permettent de modifier ces écarts moyens et le classement qualitatif qui en résulte. Le scénarios initialement choisis n'ont pas été triés et conservés pour favoriser Dosimex-GX. Au-delà du fait qu'une telle démarche de biaisage nous serait apparue intellectuellement insupportable, cela nous aurait demandé plus de travail encore !

Il appartient à l'utilisateur de décider si ces résultats démontrent ou non que DOSIMEX-GX 3.0 est un code fiable pouvant être utilisé dans ses propres études de radioprotection.

**B. SYNTHÈSE DES ÉCARTS IMPORTANTS : TABLEAU DES RAPPORTS**

|      | Dosimex/MCNP                       | Microshield /MCNP                                          | Mercurad/MCNP                                              |
|------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| SC1  | /                                  | Cf252 source ponctuelle : <b>1/40</b>                      | Am 241 source ponctuelle <b>1/2,3</b>                      |
| SC1  | /                                  | /                                                          | Pu 8 source ponctuelle : <b>1/270</b>                      |
| SC1  |                                    | Pu9 source ponctuelle : <b>1/2,5</b>                       | Pu9 source ponctuelle : <b>1/66</b>                        |
| SC1  | /                                  | Cf252 + 1 cm Pb : <b>1/8E19</b>                            | Cf252 + 1 cm Pb : <b>1/1,4E9</b>                           |
| SC2  | /                                  | Source ponctuelle Cs 137 à 0,5 cm sans écran : <b>1,59</b> | Source ponctuelle Cs 135 à 0,5 cm sans écran : <b>1,59</b> |
| SC3  | /                                  | Am 241 +10 cm Alu : <b>1,86</b>                            | Am 241 +10 cm Alu : <b>2,09</b>                            |
| SC3  |                                    | Am 241 + 2 cm Pb : <b>1/1,9E16</b>                         |                                                            |
| SC3  | /                                  | Am 241 +50 cm d'eau : <b>3,08</b>                          | Am 241 +50 cm d'eau : <b>2,82</b>                          |
| SC3  | /                                  | Cs137 ponct.+ 50 cm eau : <b>1,57</b>                      | Cs137 ponct.+ 50 cm eau : <b>1,79</b>                      |
| SC4  | /                                  | Am 241 fil : <b>2.0</b>                                    | Am 241 fil : <b>2.2</b>                                    |
| SC4  | /                                  | /                                                          | Am 241 disque : <b>2.1</b>                                 |
| SC5  | /                                  | Cs137 Cyl.pt 1 + 2 cm Pb : <b>2,56</b>                     | /                                                          |
| SC5  | /                                  | Co60 Cyl.pt 1 +2 cm Pb : <b>1,69</b>                       | /                                                          |
| SC5  | /                                  | Cs137 Cyl.pt 2 + 2 cm Pb : <b>3,20</b>                     | /                                                          |
| SC5  | /                                  | Co60 Cyl.pt 2 +2 cm Pb : <b>1,50</b>                       | /                                                          |
| SC 9 | CSDV pt 1 avec écran : <b>1,52</b> | /                                                          | CSDV pt 1 sans écran : <b>1,67</b>                         |
| SC 9 |                                    |                                                            | CSDV pt 2 sans écran : <b>1,50</b>                         |
| SC 9 | /                                  | /                                                          | CSDV pt 2 avec écran : <b>2,13</b>                         |

**TABLEAU 27 : RÉSULTATS ABERRANTS BENCHMARK**

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

On constate donc :

- ❖ Pour DOSIMEX –GX : 1 valeurs aberrantes soit moins de 1 % des cas
- ❖ Pour MICROSHIELD : 13 valeurs aberrantes soit 10 % des cas
- ❖ Pour MERCURAD : 13 valeurs aberrantes soit 70 % des cas
- ❖ Pour RayXpert : aucune valeur aberrante

Des rapports particulièrement faibles, inférieur à **1/10**, apparaissent pour Microshield et Mercurad avec des radionucléides de nombres de masses élevés et des tables d'émissions souvent complexes. L'origine de ces écarts proviennent essentiellement de :

- Des émissions  $X_L$  très intenses mais parfois non prises en comptes car de faibles énergies (< 20 keV) conduisant alors à des écarts important en sources ponctuelle ou surfacique sans écran.
- A 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 « Radionucléides » utilisée dans la version 3.0 de Dosimex-GX pour éviter de tels résultats

On notera que pour Dosimex la valeur aberrante est en surestimation et le rapport maximum est égal à **1,52** (respectivement **3,08** et **2,82** pour Microshield et Mercurad)

Pour l'essentiel ces surestimations proviennent des facteurs normalisés de build-up à faible énergies et dans des milieux légers.

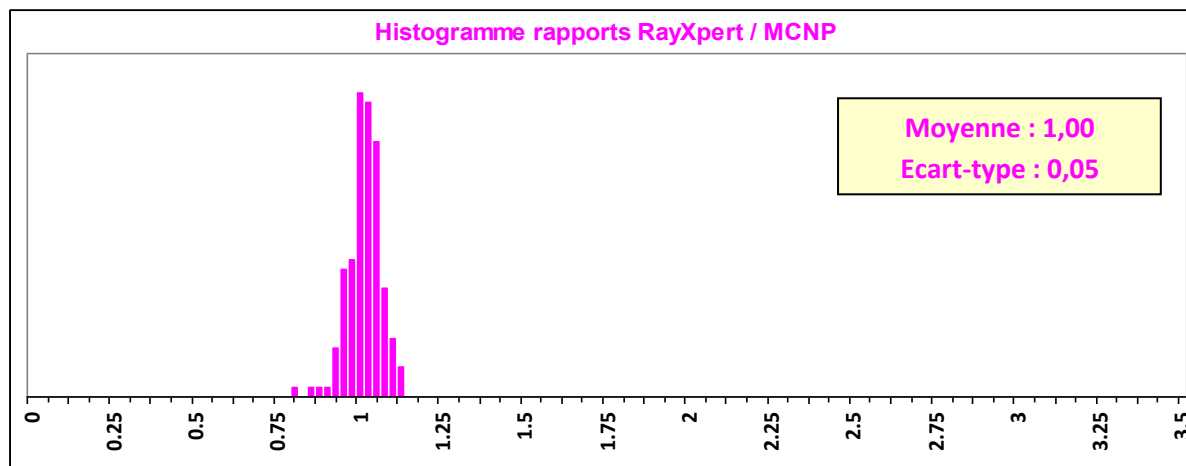
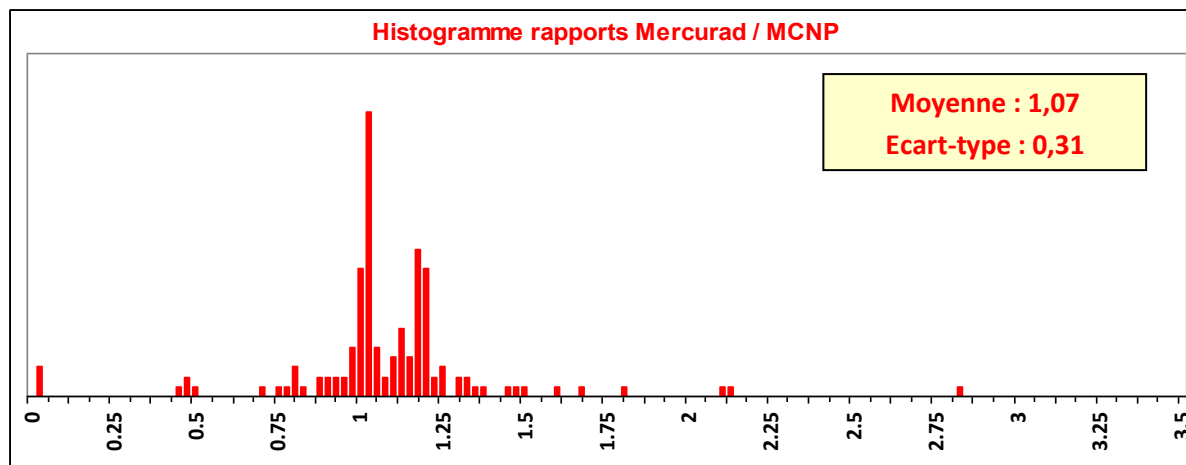
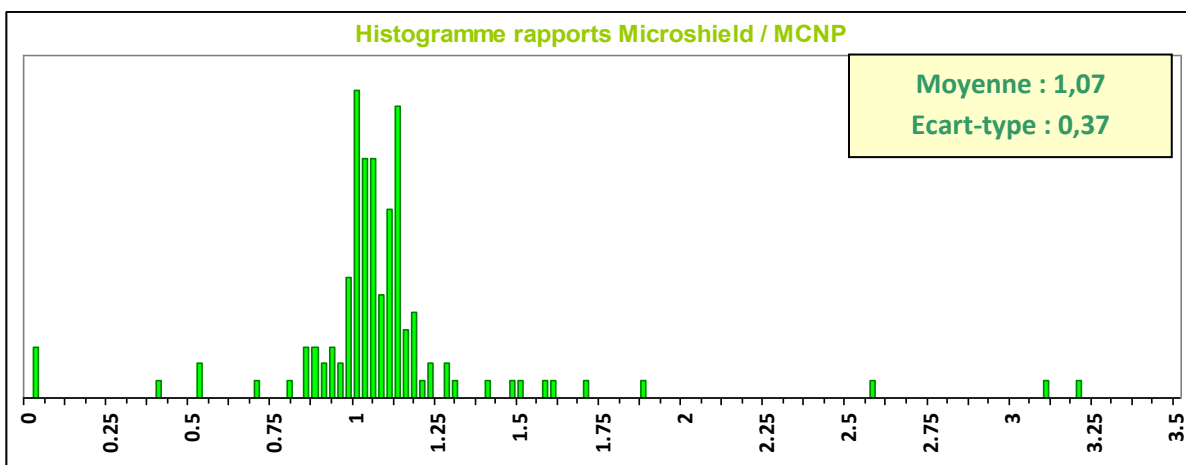
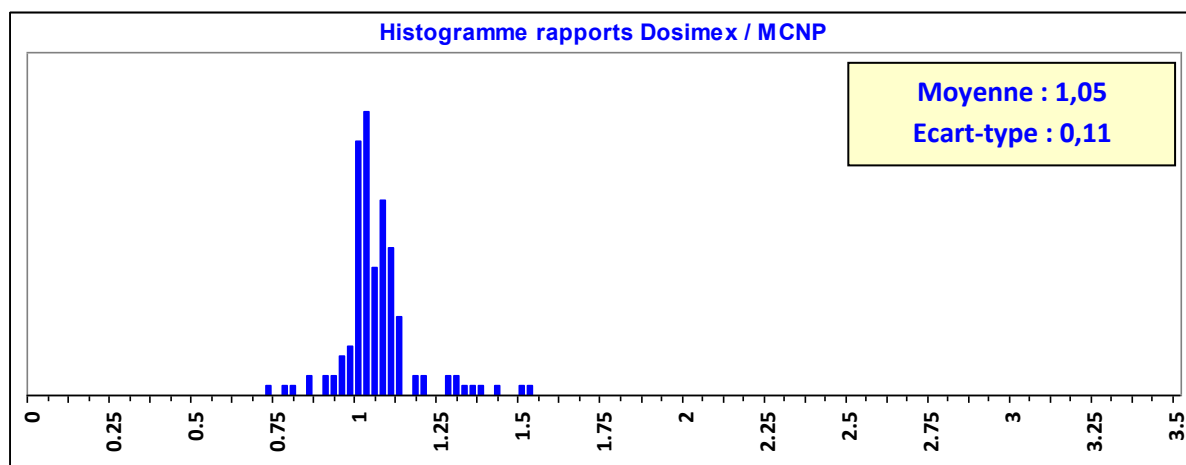
### C. HISTOGRAMMES DES RAPPORTS VS MCNP

L'histogramme des rapports vs MCNP pour chaque code est une autre façon de présenter l'ensemble des résultats, qui permet d'apprécier visuellement la qualité des résultats en termes de justesse, de dispersion et de cas aberrants:

Avec une telle représentation (*voir page suivante*), il est intéressant de présenter la moyenne des résultats suivants 2 paramètres statistiques :

- La moyenne algébrique, permettant de juger de l'écart d'ensemble (justesse ou biais)
- L'écart-type, permettant de juger de la dispersion autour de la moyenne algébrique.

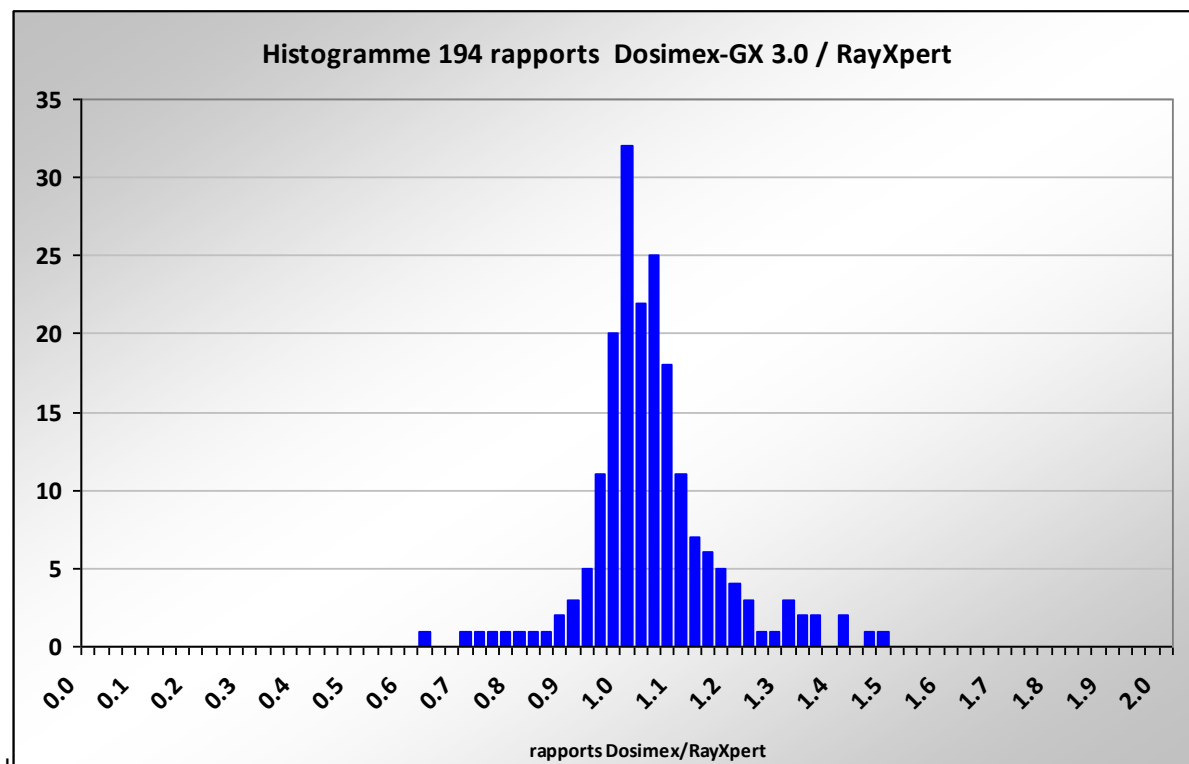
Le lecteur pourra vérifier que l'écart quadratique moyen utilisé auparavant est bien la racine carrée de la somme quadratique de ces 2 paramètres statistiques



#### D. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DOSIMEX VS RAYXPert (sc 1 à 16)

L'ensemble des valeurs testées et comparées à RayXpert forment un échantillon de 196 valeurs .

L'histogramme des rapports Dosimex-GX/RayXpert est présenté ci-dessous



Les paramètres statistiques sur ces 196 valeurs sont les suivants :

- Moyenne : **1,034** , représentatif d'une légère tendance moyenne à la surestimation (+3,4 %)
- Ecart-type : **0,12**, soit encore une dispersion relative de **12 %** autour de la moyenne
- Ecart relatif quadratique moyen : **12,5 %**, représentatif de la dispersion moyenne autour de 1
- Valeur minimale (sous-estimation) : **0,62**, obtenue dans le scénario 11 avec le rayonnement de freinage dans l'eau
- Valeur maximale (surestimation): **1,46** correspondant au cas du CSDV (*scénario 91, point 2 avec écran*)

*Nota : ce dernier cas représente aussi le seul cas aberrant (rapport 1,52) obtenu dans le benchmark, mais la valeur de 0,73 mSv/h est rapportée ici à 0,50 mSv/h (rayXpert) au lieu de 0,48 mSv/h (MCNP).*

**On peut ainsi, dans le cas d'un calcul n'intervenant pas dans ce dossier de validation, annoncer avec un bon degré de confiance une incertitude de l'ordre de 13% pour un calcul quelconque effectué avec Dosimex-GX 3.0 ( 37 % et 31 % respectivement avec Microshield et Mercurad)**

## E. MÉMOIRES DE STAGE DE FIN D'ÉTUDE METTANT EN JEU DOSIMEX-GX

