

# DOSIMEX 3.2



## DOSIMEX-GX 3.2

### ✓ MANUEL MODELE PHYSIQUE GENERATEUR X

**Alimentation**

HT utilisation (kV)

Intensité (mA)

✓ Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min

✓ **Filtration inhérente ou gaine (Acier)**

Nature

Epaisseur  mm

✓ **Filtration additionnelle ou gaine (Plomb)**

Nature

Epaisseur  mm

Distance (b)  m

angle rétrodiffusion (< 90°) ou transmission (> 90°)

Distance (d)  m

Facteur d'atténuation Fp sur le primaire (BU inclus + effet de distance)

Facteur d'atténuation Fs sur le diffusé (BU inclus)

Le spectre présenté est le spectre devant l'écran

Le spectre présenté est le spectre derrière l'écran

✓ **Ecran (e)** ☒ **Lancer calcul**

Facteur de diffusion en dose  $\epsilon = H_s/H_p$

Facteur de diffusion en dose  $k = \epsilon \cdot d^2$   m<sup>2</sup>

Facteur de diffusion normalisé  $\alpha = k/S$

7.88E+02 nSv/h **H\*(10)s (diffusé)**

✓ **Ecran de protection sur diffusé**

Ecran sur le diffusé

Nature

Epaisseur  mm

✓ **Calcul de diffusion ou transmission**

Epaisseur (e) minimale de saturation en diffusion

Ecran sur le faisceau primaire

Nature

Epaisseur (e)  mm

Surface (S)  cm<sup>2</sup>

1.02E+08 nSv/h **H\*(10)p (primaire)**

2.65E+04 μSv/h

3.86E+00

Débit de dose calculé derrière l'écran

Alain VIVIER, Gérald LOPEZ

JUILLET 2021

## SOMMAIRE

|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| <b>I- 1 :</b> | <b>PREAMBULE : LA MODELISATION DES GENERATEURS X DANS DOSIMEX .....</b>                      | <b>3</b>  |
| <b>I- 2 :</b> | <b>CHOIX SOURCES GAMMA OU GENERATEUR X .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>I- 3 :</b> | <b>CALCUL DANS LE FAISCEAU PRIMAIRE .....</b>  | <b>6</b>  |
| I.3.1         | Possibilité de calculs .....   | 7         |
| I.3.2         | Paramètres d'entrée .....  | 7         |
| I.3.3         | Paramètres de sortie .....   | 9         |
| I.3.4         | Mode « Dose » et NF C 15-160.....  | 11        |
| <b>I- 4 :</b> | <b>CALCUL DANS LE FAISCEAU PRIMAIRE DERRIERE UN ECRAN ET FACTEURS<br/>D'ATTENUATION.....</b> | <b>14</b> |
| I.4.1         | Ecran sur le trajet du faisceau primaire .....   | 14        |
| I.4.2         | Définition des facteurs d'atténuation .....  | 15        |
| I.4.3         | Les différents facteur d'atténuation .....   | 16        |
| <b>I- 5 :</b> | <b>CALCUL DANS LE FAISCEAU DIFFUSE PAR UN ECRAN .....</b>                                    | <b>21</b> |
| I.5.1         | Paramètres d'entrée .....  | 21        |
| I.5.2         | Résultats obtenus sur le calcul de diffusion .....   | 23        |
| I.5.3         | EN L'ABSENCE D'ECRAN SUR LE TRAJET DU DIFFUSE .....  | 23        |
| I.5.4         | EN PRESENCE D'ECRAN SUR LE TRAJET DU DIFFUSE .....   | 25        |
| <b>I- 6 :</b> | <b>GESTION DES BUILD-UP .....</b>  | <b>28</b> |
| I.6.1         | Build –up sur l'écran primaire .....   | 28        |
| I.6.2         | Build-up sur le diffusé.....   | 30        |
| I.6.3         | Validation calcul de build-up .....  | 32        |
| <b>I- 7 :</b> | <b>CALCUL DE FUITE DE GAINÉ .....</b>  | <b>36</b> |

## I- 1 : PREAMBULE : LA MODELISATION DES GENERATEURS X DANS DOSIMEX

Dans le développement du pack Dosimex, l'option « générateur X » n'a cessé de prendre de l'importance pour 2 raisons :

- ✓ D'une part, le parc des générateurs X, tous milieux confondus (médical, industriel, recherche, sécurité) prend une très grande place dans le domaine général de l'utilisation des rayonnements ionisants.
- ✓ D'autre part, l'application de la norme NF C 15-160 de mars 2011 est susceptible en l'état de poser des problèmes aux utilisateurs, notamment pour les applications hors médical.

A la décharge des auteurs de cette norme, qui ont réalisé un travail de synthèse remarquable, il s'avère en effet assez délicat de recenser dans un document n'excédant pas quelques dizaines de pages toutes les situations que l'on peut rencontrer dans une problématique de radioprotection autour des générateurs X.

En effet le nombre de paramètres d'entrées est très élevé, chacun étant susceptible d'affecter le résultat final dans des proportions élevées. Pour l'essentiel ces paramètres sont :

Pour les calculs dans le faisceau primaire

- La haute tension (kV)
- L'intensité (mA)
- La nature de l'anode
- La nature et l'épaisseur des filtrations (0,1 ou 2 écrans)
- La distance (b)
- La nature de l'écran (ou cible) sur le trajet du faisceau primaire

Pour le calcul sur le rayonnement diffusé, en plus des paramètres précédents il faut prendre en considération :

- La nature de l'écran diffuseur
- Son épaisseur
- Sa surface
- L'angle de diffusion
- La distance (d)
- La nature et l'épaisseur d'un écran éventuel sur le trajet du diffusé

Le nombre de combinaisons de ces divers paramètres étant par nature infini, on comprend qu'il peut être difficile de résumer cela par un nombre forcément restreint d'abaques. Sans parler des paramètres de sortie qui peuvent s'exprimer en diverses grandeurs (kerma air, équivalent de dose divers...)

L'autre grande difficulté des calculs autour des générateurs X est lié au fait que l'on travaille ici non pas sur des émissions discrètes (monoénergétiques) comme c'est le cas avec les radionucléides, mais sur des **spectres X continues** allant de 0 jusque à l'énergie maximale des électrons du tube (kV).

C'est la force essentielle de Dosimex que de prendre en compte un spectre X continue, discrétisé en 270 « tranches minces », chaque tranche étant gérée indépendamment des autres. Nous n'utilisons donc pas, comme cela peut être le cas dans des approches déterministes, les valeurs moyennes des spectres pour les coefficients d'atténuation, les facteurs de build-up etc.... La prise en compte du spectre complet nous permet d'obtenir des valeurs fiables sur les facteurs d'atténuations par exemple.

L'autre point fort de Dosimex est celui du **calcul de la diffusion** des photons X par l'écran placé sur le trajet du faisceau primaire. Le calcul est une double intégrale, à la fois sur le volume de la cible et sur la distribution en énergie, de la formule de Klein et Nishina pour la prise en compte de la diffusion Compton. Dans cette dernière version, nous avons de plus réussi à implémenter la fluorescence X qui dans certains cas, avec le plomb par exemple, est la composante essentielle du rayonnement diffusé.

Nous y avons été fort heureusement poussé par un rapport CEA-R : « *Évaluation par calcul Monte-Carlo des facteurs de diffusion en termes d'équivalent de dose, des rayonnements issus d'un générateur X, pour le calcul des équivalents de dose secondaires. Constitution d'une base de données* » (Laurent Bourgois, Stéphanie Ménard, [rapport CEA-R 6452 2017](#))

Ce rapport a nécessité, plus de 4000 calculs MCNP de diffusion de faisceaux primaire X dans divers matériaux (5) pour diverses HT (10), angles de diffusion (5) et filtrations (8) (*là encore un travail remarquable*). De telles valeurs de références faisaient auparavant cruellement défaut. De plus, pour moitié ces valeurs sont exprimées en termes de  $H^*(10)$ .

Nous avons ainsi pu constater que les valeurs calculées avec Dosimex présentaient d'une part une absence de biais en moyenne ainsi qu'un écart moyen de l'ordre de 16 % vs MCNP ([voir dossier de validation pour le détail](#)) Nous sommes donc maintenant en mesure d'offrir à nos utilisateurs un outil fiable et validé, couvrant un aspect important dans cette problématique de radioprotection autour des générateurs X.

En effet les échanges avec nos utilisateurs nous ont montré que la composante la plus fréquente à prendre en considération pour l'aspect radioprotection était la composante diffusée, la composante primaire étant souvent écrantée par l'appareillage.

Pour terminer ce préambule, nous avons choisi par simplicité d'utilisation de fondre le manuel et le dossier de validation en un seul document. Et ce d'autant plus que la partie validation, **qui s'appuie désormais sur environ 520 point de comparaisons** (vs MCNP ou NF c15-160) permet de mieux comprendre certains aspects de la modélisation du générateur X et sa logique d'utilisation.

**Nota : il est possible d'obtenir directement les valeur de dose et non plus de débit de dose en saisissant la charge W en mA.min au lieu de l'intensité en mA. Ce mode permet de se mettre dans les conditions d'utilisation de la NF C 15-160 basée sur des doses et des charges hebdomadaires (p 10)**

# FONCTIONNALITÉS PRINCIPALES DE LA MODÉLISATION GÉNÉRATEUR X

Paramètres de fonctionnement du générateur X, anode, filtration(s)..  
 HT utilisation (kV) 100  
 Intensité (mA) 1

Calcul DED diffusé et atténuation par un écran sur le trajet du diffusé

Caractéristiques écran sur le trajet du diffusé

générateur X

Alimentation

HT utilisation (kV) 100

Intensité (mA) 1

☒ Déclencher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min

☒ Filtration inhérente ou gaine (Acier)

Nature Aluminium

Épaisseur 1 mm

☒ Filtration additionnelle ou gaine (Plomb)

Nature Cuivre

Épaisseur 1 mm

Distance (a) 1 m

angle rétrodiffusion (< 90°) ou transmission (> 90°) 45°

Distance (d) 1 m

Facteur d'atténuation  $F_s$  sur le diffusé (BU inclus) 4.42E+02

Facteur de diffusion en dose  $\epsilon = H_s/H_p$  7.71

Facteur de diffusion en dose  $k = \epsilon \cdot d^2$  7.71 m2

Facteur de diffusion normalisé  $\alpha = k/S$  1.918

7.88E+02 nSv/h  $H^*(10)_s$  (diffusé)

Le spectre présenté est le spectre derrière l'écran

☒ Écran de protection sur diffusé

Écran sur le diffusé

Nature Plomb

Épaisseur 1 mm

☒ Calcul de diffusion ou transmission

Épaisseur (e) minimale de saturation en diffusion 118.2

Distance (b) 1 m

1.02E+08 nSv/h  $H^*(10)_p$  (primaire)

☒ Écran (e)

2.65E+04 µSv/h

3.86E+00

Facteur d'atténuation  $F_p$  sur le primaire (BU inclus + effet de distance)

Le spectre présenté est le spectre devant l'écran

Lancer calcul

Écran sur le faisceau primaire

Nature Eau

Épaisseur (e) 200 mm

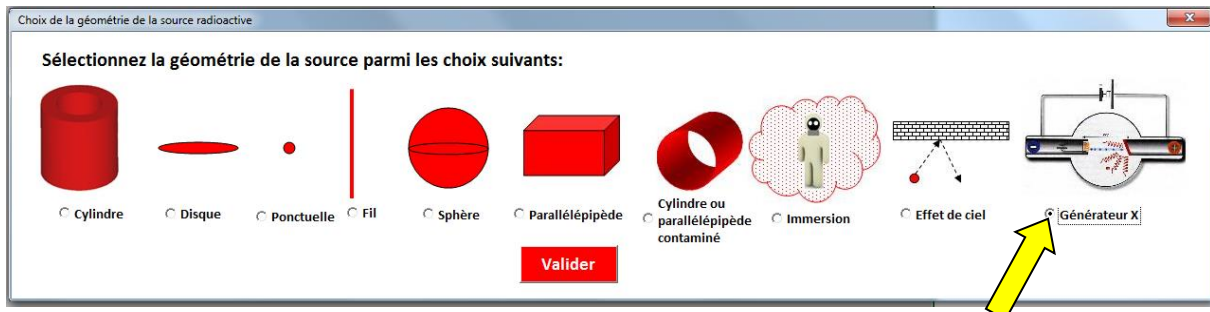
Surface (S) 400 cm2

Calcul DED dans le faisceau primaire devant et derrière un écran

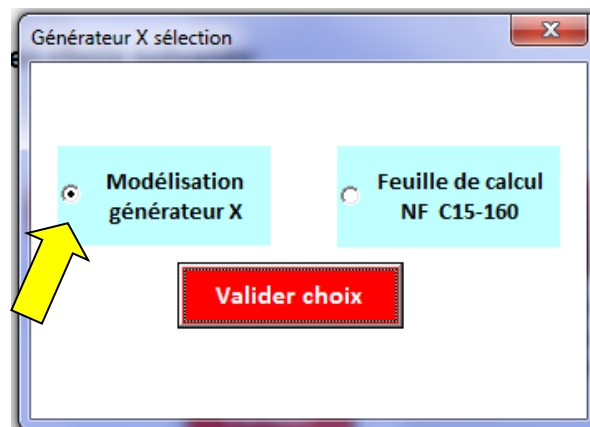
Caractéristique écran ou cible dans le faisceau primaire.

## I- 2 : CHOIX SOURCES GAMMA OU GENERATEUR X

La boîte de dialogue principale vous propose le générateur X comme sources de rayonnements :



En validant ce choix, une boîte de dialogue s'ouvre, permettant de choisir entre deux options :



- **Modélisation générateur X** : permet de déterminer le débit de dose primaire et diffusé en fonction des paramètres HT/Intensité/filtration du générateur X ainsi que des écrans mis en place.
- **Feuille de calcul NF C15-160** : permet d'obtenir tous les résultats demandés par la norme NF C 15-160 de mars 2018 intitulée : « *Installations pour la production et l'utilisation de rayonnements X – Exigences de radioprotection* ». L'utilisation de cette application est donnée à la fin du manuel

## I- 3 : CALCUL DANS LE FAISCEAU PRIMAIRE

### I.3.1 POSSIBILITE DE CALCULS

Cette option permet de calculer le débit de dose ( $H^*(10)$ , kerma air etc..) :

1. Dans le faisceau primaire
2. Dans le faisceau primaire derrière un écran
3. Dans le faisceau diffusé par un écran
4. Dans le faisceau diffusé derrière un écran

! : À partir de la version 2.2, la grandeur principale affichée dans la boîte de dialogue est exprimé en débit d'équivalent de dose (DED) ambiant  $H^*(10)$ , et non plus en kerma air comme auparavant pour les 2 raisons suivantes :

1. Le kerma air n'est pas une grandeur opérationnelle ou de protection, mais une grandeur à usage métrologique
2. Selon toute vraisemblance, les futures normes reviendront elles aussi à une grandeur opérationnelle

### I.3.2 PARAMETRES D'ENTREE

Dans ce mode, il suffit de renseigner :

1. La valeur de la haute tension (kV)
2. L'intensité électronique (mA) ou la charge W (mA.min) en mode « dose »
3. La nature de l'anode (*par défaut le tableau se positionne sur une anode en tungstène W*)
4. Nature et épaisseur de la filtration (*avec possibilité de 2 écrans de filtration*)
5. La distance anode-écran notée **b** (m). conformément à la norme NF c 15-160

(1) HT utilisation (kV) : 100

(2) Intensité (mA) : 1

(3) Anode : W

(4) Filtration inhérente ou gaine (Acier) : Nature Aluminium, Epaisseur 2 mm

(5) Distance (b) : 1 m

☒ Décrocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min

☐ Ecran (e)

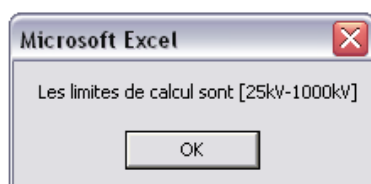
Lancer calcul

A décrocher pour passer en mode « dose » au lieu de « débit de dose » en saisissant W en mA.min



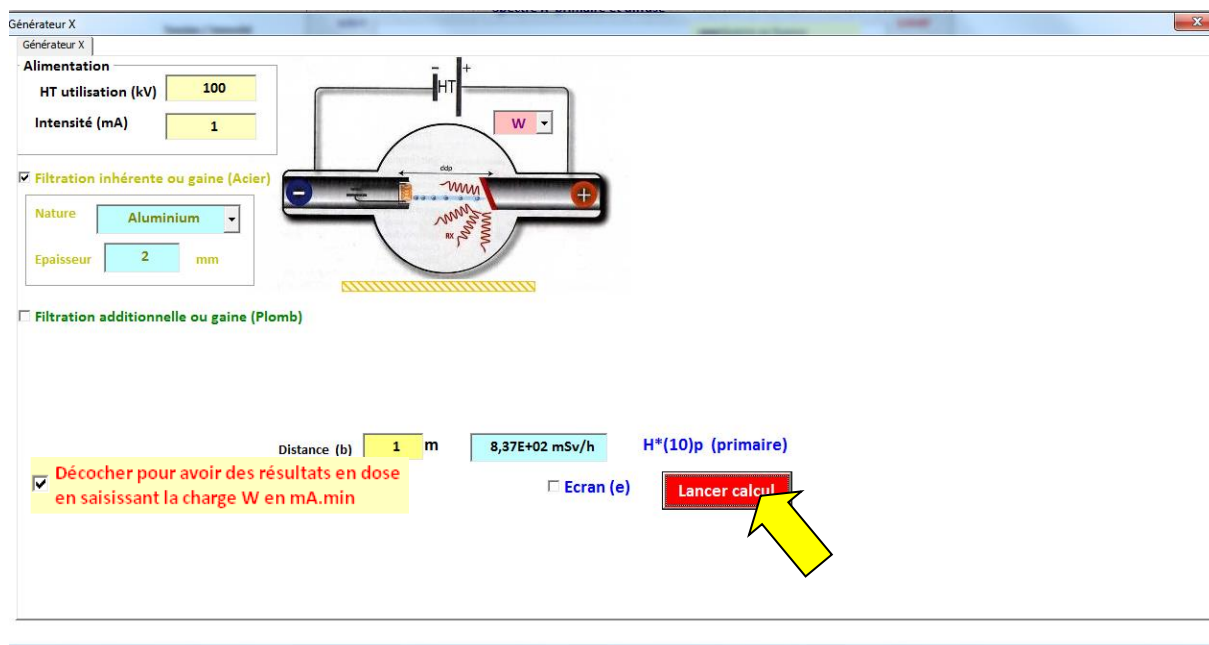


Les hautes tensions prises en compte dans cette option vont de **25 kV à 1000 kV**. En cas de dépassement, un message d'alerte apparaît :



### 1.3.3 PARAMETRES DE SORTIE

Après avoir renseigné la distance entre l'anode et le point-dose notée « b » (cf NF C 15-160), vous pouvez lancer le calcul pour obtenir le DED dans le faisceau primaire



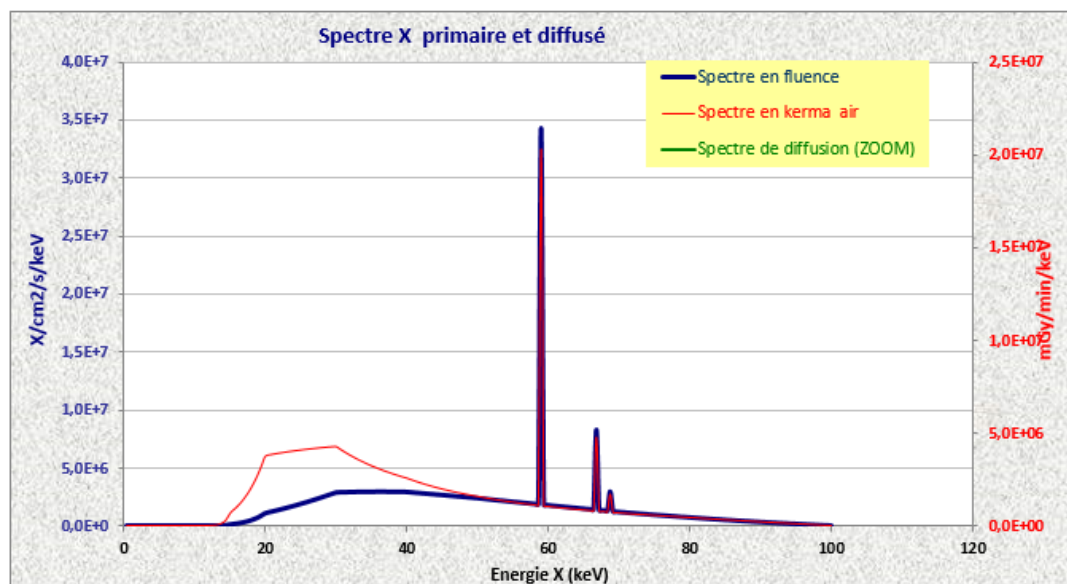
Les autres grandeurs opérationnelles  $H_p(10)$ ,  $H'(0,07)$  et  $H_p(3)$ , la grandeur de protection en dose efficace en irradiation antéro-postérieure  $E(AP)$  ainsi que le kerma air sont reportées sur la feuille de synthèse

|              | Avec Build-up  | Sans Build-up  | Build-up moyen |
|--------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Prim.</b> |                |                |                |
| Kerma        | 6,59E+02 mGy/h | 6,59E+02 mGy/h | 1              |
| $H^*(10)$    | 8,37E+02 mSv/h | 8,37E+02 mSv/h |                |
| $H'(0,07)$   | 8,85E+02 mSv/h | 8,85E+02 mSv/h |                |
| $H_p(10)$    | 8,83E+02 mSv/h | 8,83E+02 mSv/h |                |
| $H_p(3)$     | 8,87E+02 mSv/h | 8,87E+02 mSv/h |                |
| $E(AP)$      | 4,72E+02 mSv/h | 4,72E+02 mSv/h |                |

Remarque : en l'absence d'écran le build-up est naturellement égal à 1

D'autres informations intéressantes apparaissent aussi sur la feuille de synthèse :

➤ le spectre X en fluence et en débit de kerma :



➤ les paramètres d'entrées utilisés, les valeurs moyennes du spectre (*moyenne en fluence et moyenne en kerma air*)

➤ Le débit de fluence photons X (intégrale du spectre) à la distance b

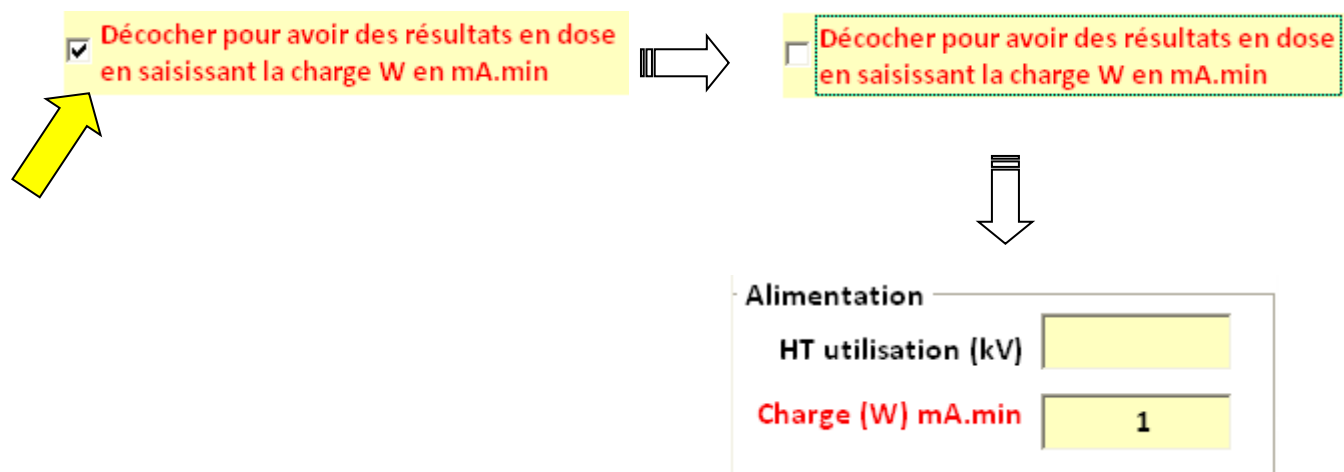
| Terme source                        |  |
|-------------------------------------|--|
| Source                              |  |
| Générateur X                        |  |
| Filtre inh. 2mm de Aluminium        | Tension / intensité<br>100kV / 1mA / Anode W (12°) |
| Energie X moyenne (Fluence)         | 48,83 keV  |
| Energie X moyenne (Kerma)           | 40,37 keV  |
| Fluence X totale au point de mesure | 3,68E+08/cm²/s                                     |
| Distance anode/DED primaire (m)     | b= 1   |

Rappelons ici que les résultats apparaissant sur la feuille de synthèse sont facilement recopiables à l'aide de la feuille « Copie résultats.xls », à la condition expresse d'ouvrir celle-ci avant Dosimex-GX.

### I.3.4 MODE « DOSE » ET NF C 15-160

L'intérêt du mode « Dose » permet de se rapprocher des conditions d'application de la norme NF C15-160 basée essentiellement sur la limitation des doses hebdomadaires pour une charge  $W$  (mA.min) donnée.

En décochant l'option « Décocher... » le champ de saisie de l'intensité change d'unité et passe en charge  $W$  en mA.min (*attention à ne pas confondre avec la charge souvent calculée en mA.s*)



Les résultats sont alors donnés en termes d'équivalent de dose correspondant à la charge utilisée  
Exemple avec un générateur X médical utilisé dans un examen d'abdomen

- HT : 80 kV
- $I = 300$  mA
- Anode : Tungstène
- Filtration : 2,5 mm Al
- Temps d'exposition : 0,3 s

Dans le mode « débit de dose on obtient, pour une distance de 80 cm:

**Alimentation**

HT utilisation (kV)

Intensité (mA)

☒ Filtration inhérente ou gaine (Acier)

Nature

Epaisseur  mm

Distance (b)  m

☒ Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min

En passant dans le mode « Dose » et en calculant la charge pour 1 tir (0,3 s) :  
 $W = 300 \times 0,3 / 60 = 1,5 \text{ mA.min}$

|  |  |   |  |  |
|--|--|---|--|--|
| Alimentation   |  | HT utilisation (kV) <input type="text" value="80"/><br>Charge (W) mA.min <input type="text" value="1,5"/> |  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Filtration inhérente ou gaine (Acier)                              |  | Nature <input type="text" value="Aluminium"/><br>Epaisseur <input type="text" value="2,5"/> mm            |  |  |
| <input type="checkbox"/> Filtration additionnelle ou gaine (Plomb)                                     |  | Distance (b) <input type="text" value="0,8"/> m   |  |  |
| <input type="checkbox"/> Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min |  | <input type="text" value="2.05E+01"/> mSv   |  |  |

On obtient une dose de 20 mSv pour un tir . Cette information peut –être intéressante en terme de radioprotection patient

Pour la norme NF C 15-160 il faut utiliser la charge hebdomadaire. En considérant 400 tirs par semaine, cette charge est égale à  $W = 1,5 \times 400 = 600 \text{ mA.min}$

On peut alors s’intéresser maintenant à la protection d’un local adjacent situé à 2 m derrière 10 cm de béton

|  |  |   |  |   |  |
|--|--|---|--|---|--|
| Alimentation   |  | HT utilisation (kV) <input type="text" value="80"/><br>Charge (W) mA.min <input type="text" value="600"/> |  |   |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Filtration inhérente ou gaine (Acier)                              |  | Nature <input type="text" value="Aluminium"/><br>Epaisseur <input type="text" value="2,5"/> mm            |  |   |  |
| <input type="checkbox"/> Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min |  | Distance (b) <input type="text" value="2"/> m   |  |   |  |
| Facteur d'atténuation Fp sur le primaire (BU inclus + effet de distance)                               |  | <input type="text" value="1.31E+03"/> mSv   |  |   |  |
| <input type="checkbox"/> Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min |  | <input type="text" value="1.46E+03"/> µSv   |  | <input checked="" type="checkbox"/> Ecran (e)   | <input type="text" value="8.95E+02"/>      |
| Débit de dose calculé derrière l'écran<br>Le spectre présenté est le spectre devant l'écran            |  | <input type="text" value="1.31E+03"/> mSv   |  | <input type="text" value="H*(10)p (primaire)"/> | <input type="text" value="Lancer calcul"/> |
| Ecran sur le faisceau primaire   |  | Nature <input type="text" value="Béton"/><br>Epaisseur (e) <input type="text" value="100"/> mm            |  |   |  |

On obtient une dose hebdomadaire de 1,46 mSv. Pour un taux d'occupation de 1, il faut obtenir 80  $\mu$ Sv par semaine. On peut alors chercher la surprotection en Plomb nécessaire et suffisante pour tenir cette limite (*choisir mode multi-écran*)

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
| <b>Alimentation</b><br>HT utilisation (kV) <input type="text" value="80"/><br>Charge (W) mA.min <input type="text" value="600"/>   |   |  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Filtration inhérente ou gaine (Acier)<br>Nature <input type="text" value="Aluminium"/><br>Epaisseur <input type="text" value="2,5"/> mm        |   |  |  |
| Distance (b) <input type="text" value="2"/> m  | <input type="text" value="1.31E+03"/> mSv | $H^*(10)p$ (primaire)  |  |
| <input type="checkbox"/> Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min<br>Facteur d'atténuation Fp sur le primaire (BU inclus + effet de distance) |   | <input checked="" type="checkbox"/> Ecran (e)<br><input type="text" value="4.43E+01"/> $\mu$ Sv<br><input type="text" value="2.95E+04"/> | Ecran sur le faisceau primaire -<br>Nature <input type="text" value="Multi-écran"/><br>Epaisseur (e) <input type="text" value="101"/> mm |
|  |   | <input type="button" value="Lancer calcul"/>   |  |

Débit de dose calculé derrière l'écran  
Le spectre présenté est le spectre devant l'écran

Avec 1 mm de plomb on obtient 44  $\mu$ Sv (les épaisseurs de plombs sont en général en mm ou demi-mm de plomb au minimum).

Ce type de calcul peut-être réitéré pour la diffusion et les fuites de gaines.

*Le mode « Dose » a été implémenté grâce à une astuce trouvée par le Dr Dominique Schiedts*

## I- 4 : CALCUL DANS LE FAISCEAU PRIMAIRE DERRIERE UN ECRAN ET FACTEURS D'ATTENUATION

### I.4.1 ECRAN SUR LE TRAJET DU FAISCEAU PRIMAIRE

On peut introduire un écran simple ou un multi-écran sur le trajet du faisceau primaire à la distance  $b$  en précisant sa nature et son épaisseur «  $e$  » (! unité en mm)

Alimentation  
HT utilisation (kV) 100  
Intensité (mA) 1

✓ Filtration inhérente ou gaine (Acier)  
Nature Aluminium  
Epaisseur 2 mm

Filtration additionnelle ou gaine (Plomb)

Distance (b) 1 m 8.37E+02 mSv/h  $H^*(10)p$  (primaire)

✓ Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge  $W$  en mA.min

✓ Ecran (e) Lancer calcul

Facteur d'atténuation  $F_p$  sur le primaire (BU inclus) -

Calcul de diffusion

Ecran sur le faisceau primaire  
Nature Multi-écran  
Epaisseur (e) Air, Eau, Aluminium, Béton, Fer, Plomb, Uranium

Le calcul donne comme information :

Alimentation  
HT utilisation (kV) 100  
Intensité (mA) 1

✓ Filtration inhérente ou gaine (Acier)  
Nature Aluminium  
Epaisseur 2 mm

Filtration additionnelle ou gaine (Plomb)

Distance (b) 1 m 8.37E+02 mSv/h  $H^*(10)p$  (primaire)

✓ Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge  $W$  en mA.min

✓ Ecran (e) Lancer calcul

Facteur d'atténuation  $F_p$  sur le primaire (BU inclus) 6.99E+00

Débit de dose calculé derrière l'écran 1.20E+02 mSv/h

Le spectre présenté est le spectre devant l'écran

Calcul de diffusion

Ecran sur le faisceau primaire  
Nature Eau  
Epaisseur (e) 200 mm

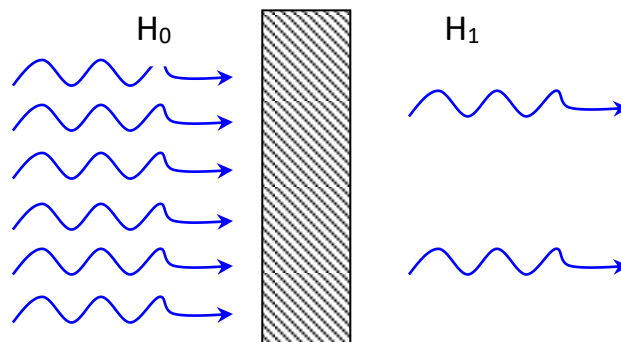
(a) 1.20E+02 mSv/h

(b) 6.99E+00

- Le débit d'équivalent de dose derrière l'écran
- Le facteur d'atténuation effectif total calculé comme le rapport de la dose sans écran à la dose en présence d'écran (*facteur supérieur ou égal à 1 sauf cas exceptionnel\**) derrière ce même écran. Ce facteur est noté  $F_p$  dans la norme NF C15-160, mais il n'a pas tout à fait ici la même signification (voir ci-dessous)

## I.4.2 DEFINITION DES FACTEURS D'ATTENUATION

Dans l'approche classique le facteur d'atténuation en dose (ou facteur de transmission) se définit comme le rapport entre le débit de dose derrière l'écran (faisceau atténué) et le débit de dose avant l'écran.



On peut écrire ici  $f = H_1/H_0 \Rightarrow H_1 = f H_0$  avec  $f < 1$  puisque en général  $H_1 < H_0$  (sauf cas très particuliers).

A titre d'exemple, dans un calcul d'atténuation en ligne droite avec correction de build-up l'atténuation  $f$  se calcule comme  $f = BU \cdot e^{-\mu x}$ . Sans correction de build-up on a alors  $f^* = e^{-\mu x} < f$  dans la mesure où l'on a toujours  $BU > 1$ .

Ce facteur d'atténuation peut s'exprimer sous la forme d'un quotient de la forme  $f = 1/F$ .

On introduit ainsi un facteur « diviseur » d'atténuation en considérant ici non pas  $f$  mais  $F$ . On parlera alors d'un facteur d'atténuation de 2 pour un écran moitié, de 10 pour un écran dixième etc.... De façon générale les facteurs d'atténuation  $F$  seront supérieurs à 1\*.

C'est sous cette forme que sont présentés les facteurs d'atténuation dans la norme NF C 15-160 et c'est ainsi que nous les présentons dans Dosimex, par souci de cohérence mais aussi parce que cette présentation est plus « parlante » dans une approche opérationnelle.

Dans cette acceptation inverse du facteur d'atténuation, on obtient pour une atténuation en ligne

droite avec correction de build :  $F = \frac{e^{\mu x}}{BU}$ .

Le facteur d'atténuation sans correction de build-up sera alors  $F^* = e^{\mu x} = BU \cdot F > F$ . Le facteur d'atténuation hors build-up sera donc plus élevé que le facteur d'atténuation build-up inclus. Cet aspect des choses est fondamental pour la suite.

*\* Dans certains cas exceptionnels (par exemple HT=100 kV et écran de 100 mm d'eau) le facteur d'atténuation total peut être inférieur à 1. Ceci est lié au fait que le build-up est légèrement plus élevé que le facteur d'atténuation en ligne droite.*



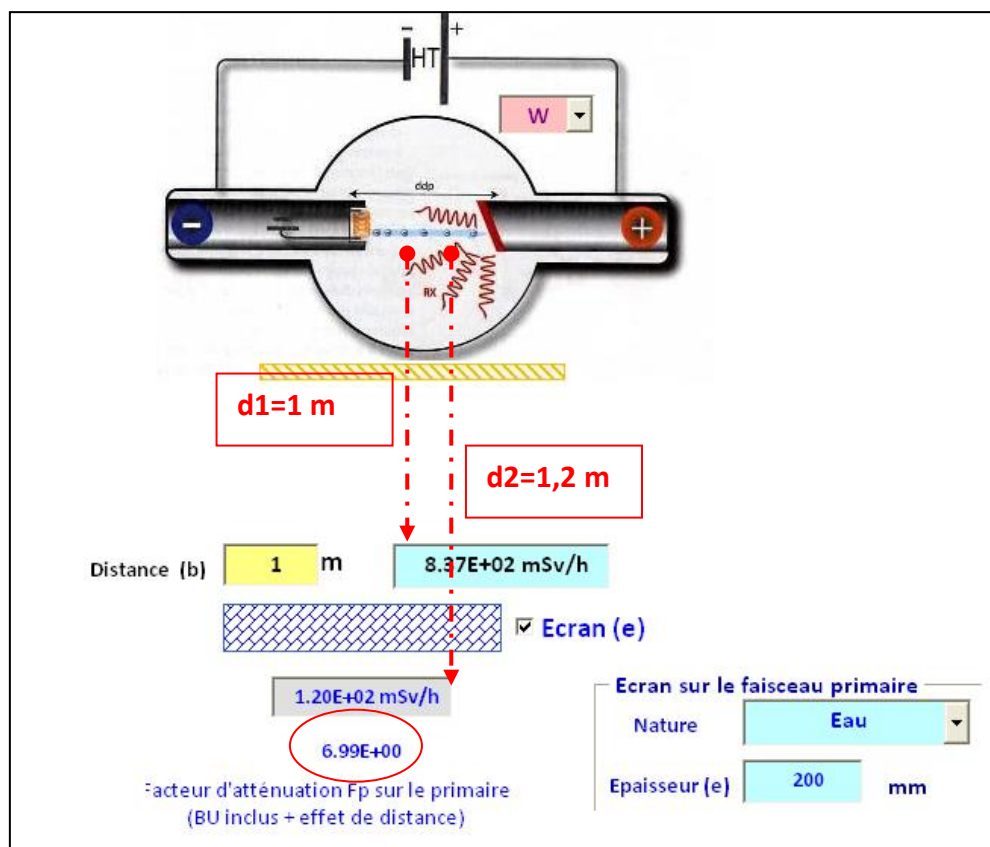
### I.4.3 LES DIFFERENTS FACTEUR D'ATTENUATION

Pour mieux être conforme à la géométrie et aux notations de la NF C 15-160, et dans un souci de simplicité pour l'utilisateur, la distance (b) est la distance entre l'anode et la face avant de l'écran, contrairement à la version précédente de Dosimex-GX (voir *Partie III 1.2 pour le modèle normatif*)

Ainsi le débit d'équivalent de dose calculé derrière l'écran se situe à la distance  $b+e/100$  (eu égard aux unités).

Il est donc important de comprendre que le facteur d'atténuation donné par Dosimex-GX 3.0 prend maintenant en compte, par construction, l'effet d'éloignement entre le débit de dose à l'entrée et le débit de dose en sortie d'écran

Dans l'exemple ci-dessous le débit à l'entrée est calculé à 1 m et le débit après écran est calculé à 1,2 m (écran d'eau de 200 mm) :



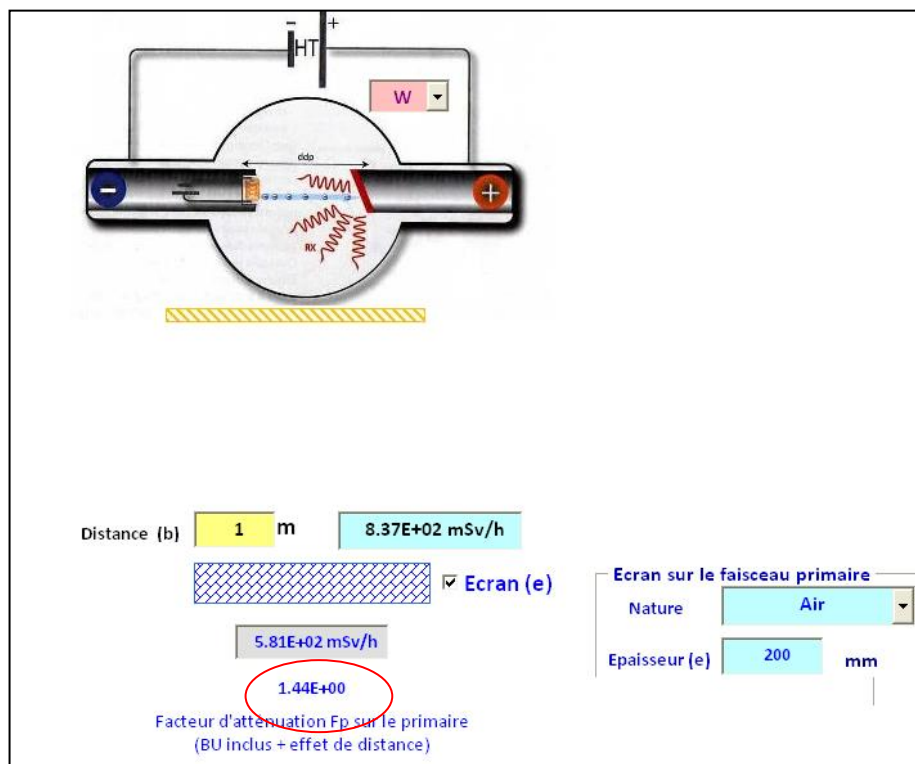
Toujours dans cet exemple, le facteur d'atténuation est égal à 6,99, mais il est constitué du produit de 2 facteurs : l'atténuation intrinsèque  $F_e$  du à l'écran lui-même, et l'atténuation  $F_d$  du à l'effet de distance avec la relation :

$$F_p = F_e F_d$$



En considérant un modèle type « source ponctuelle », le facteur d'atténuation lié uniquement à l'effet de distance est égal ici à  $F_d = d_2^2 / d_1^2 = 1,2^2 / 1^2 = 1,44$ , où l'on retrouve là encore un facteur d'atténuation supérieur à 1.

On retrouve bien cette valeur de 1,44 en prenant un écran d'air (avec une densité 100 fois plus faible que l'air normal, soit un quasi-vide), sachant alors que le facteur « écran »  $F_e$  est alors dans ce cas simplement égal à 1:

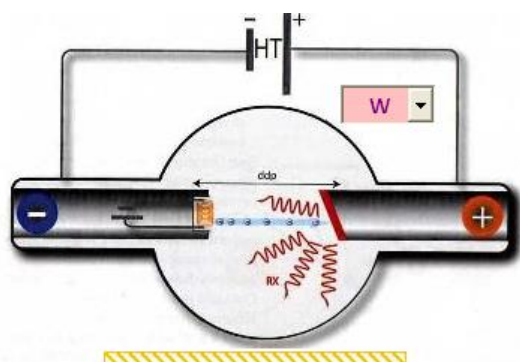


Dans notre exemple on peut alors en déduire que l'atténuation  $F_e$  due uniquement à l'épaisseur traversée (dans un modèle avec des photons monodirectionnels) devrait alors être égal à  $F_e = F_p / F_d = 6,99 / 1,44 = 4,85$ .

Remarque : ce facteur d'atténuation  $F_e$  peut être considéré comme l'atténuation intrinsèque apporté par la présence de l'écran, déduction faite de l'effet d'éloignement.

Cette atténuation intrinsèque peut être retrouvée soit en faisant une correction de distance comme précédemment, soit en prenant une distance (b) suffisamment grande pour que l'épaisseur d'écran (e) soit considérée comme négligeable :

C'est le cas dans cet exemple en prenant une distance  $b=100$  m, soit une atténuation en distance négligeable ( $F_d = d_2^2/d_1^2 = 100,2^2/100^2 = 1,004 \approx 1$ ) :



Distance (b) **100 m** **8.37E-02 mSv/h**

**1.72E+04 nSv/h** ☒ **Ecran (e)**

**4.88E+00**

Facteur d'atténuation Fp sur le primaire  
(BU inclus + effet de distance)

**Ecran sur le faisceau primaire**

Nature **Eau**

Epaisseur (e) **200 mm**

De plus le facteur d'atténuation donné sur la boîte de dialogue est maintenant donné en intégrant le build-up, contrairement à la version précédente de Dosimex-GX.

Le build-up moyen est calculé sur l'ensemble du spectre puis affiché dans la feuille de synthèse, avec le facteur d'atténuation total (BU +effet de distance)

| Primaire |               | Configuration avec écran de Eau de 200mm |                |                                    |
|----------|---------------|--|----------------|------------------------------------|
|          | Avec Build-up | Sans Build-up                            | Build-up moyen |                                    |
| Prim.    | Kerma         | 7.06E+01 mGy/h                           | 4.08E+00 mGy/h | 17,3                               |
|          | H* (10)       | 1.20E+02 mSv/h                           | 6.92E+00 mSv/h | Fp (BU inclus + effet de distance) |
|          | H' (0,07)     | 1.11E+02 mSv/h                           | 6.43E+00 mSv/h | 6,99E+00                           |
|          | Hp(10)        | 1.29E+02 mSv/h                           | 7.48E+00 mSv/h |                                    |
|          | Hp(3)         | 1.16E+02 mSv/h                           | 6.70E+00 mSv/h |                                    |
|          | E (AP)        | 9.01E+01 mSv/h                           | 5.21E+00 mSv/h |                                    |

Les valeurs de débits derrière l'écran sont ainsi données avec et sans build-up. **Il est rappelé que la norme NF C15-160 ne tient pas compte du build-up.**

Nous attirons ici l'attention de l'utilisateur sur le fait que l'on peut définir au total **4 valeurs différentes du facteur d'atténuation**, ou plus précisément des valeurs différentes pour 4 facteur d'atténuations ayant des signification différentes suivant les paramètres pris en considérations ou non.

On peut considérer le facteur d'atténuation total  $F_p$  comme étant formé par le produit de 3 facteurs :

- Le facteur d'atténuation en distance :  $F_d$
- Le facteur d'atténuation intrinsèque écran hors build-up :  $F_e^*$
- Le facteur de build-up BU

On peut alors définir :

- 1) Le facteur d'atténuation effectif total  $F_p = \frac{1}{BU} \cdot F_e^* \cdot F_d$  que l'on retrouve que la boîte de dialogue et sur la feuille de synthèse. Ce facteur prend en compte tous les effets physiques réels : atténuation en ligne droite par l'écran, build-up, effet de distance

- 2) Le facteur d'atténuation effectif hors BU  $F_p^*$  que l'on peut calculer à partir de  $F_p$  :

$$F_p^* = BU \cdot F_p (= F_e^* \cdot F_d)$$

- 3) Le facteur d'atténuation intrinsèque hors BU :  $F_e^*$  que l'on peut calculer à partir de  $F_p^*$  par correction de l'effet de distance

$$F_e^* = F_p^* / F_d = F_p^* \frac{b^2}{(b+e)^2} \text{ (attention aux unités)}$$

- 4) Le facteur d'atténuation intrinsèque total  $F_e$  prenant en compte l'effet de build-up et corrigé de l'effet de distance: que l'on peut calculer suivant  $F_e = \frac{1}{BU} F_e^*$

**Le facteur d'atténuation que l'on retrouve sur la NF C 15-160 est conforme dans l'esprit au facteur d'atténuation intrinsèque hors BU noté ici  $F_e^*$**

Insistons encore sur le fait que le même calcul que précédemment mais pour une distance  $b$  différente, par exemple 3 m, donnera un facteur d'atténuation total différent : 5,53 au lieu de 6,99 calculé à 1 m.

| Distance anode/DED primaire (m) |           | $b = 3$                                  |                           |                             |
|---------------------------------|-----------|--|---------------------------|-----------------------------|
| Primaire                        |           | Configuration avec écran de Eau de 200mm |                           |                             |
| Prim.                           |           | Avec Build-up                            | Sans Build-up             | Build-up moyen              |
|                                 | Kerma     | 9.93E+03 $\mu\text{Gy/h}$                | 5.74E+02 $\mu\text{Gy/h}$ | 17,3                        |
|                                 | H* (10)   | 1.68E+04 $\mu\text{Sv/h}$                | 9.73E+02 $\mu\text{Sv/h}$ | Fp (BU + effet de distance) |
|                                 | H' (0,07) | 1.56E+04 $\mu\text{Sv/h}$                | 9.04E+02 $\mu\text{Sv/h}$ | 5,53E+00                    |
|                                 | Hp(10)    | 1.82E+04 $\mu\text{Sv/h}$                | 1.05E+03 $\mu\text{Sv/h}$ |                             |
|                                 | Hp(3)     | 1.63E+04 $\mu\text{Sv/h}$                | 9.42E+02 $\mu\text{Sv/h}$ |                             |
|                                 | E (AP)    | 1.27E+04 $\mu\text{Sv/h}$                | 7.32E+02 $\mu\text{Sv/h}$ |                             |

La version précédente ne présentait cet effet car la valeur était toujours calculée au même point. L'écran était placé devant le point à la distance  $b$ , et non pas derrière, comme c'est le cas maintenant.

Mais cette géométrie présentait des difficultés d'interprétation bien plus délicate dans le calcul de la diffusion, et qui ne respectait pas la géométrie de la norme 15-160 reprise dans le rapport CEA-R 6457

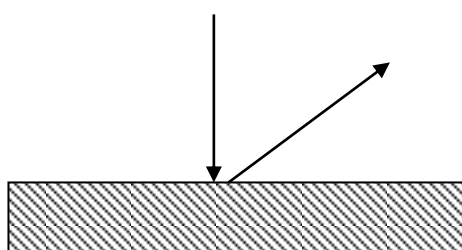
## I- 5 : CALCUL DANS LE FAISCEAU DIFFUSE PAR UN ECRAN

### I.5.1 PARAMETRES D'ENTREE

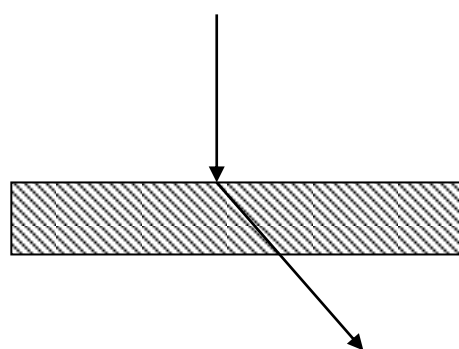
On peut calculer le débit de dose généré par le rayonnement diffusé par l'écran placé sur le parcours du faisceau primaire. Cet écran devient ainsi un « milieu diffuseur ».

Avec la version 3.0 il est désormais possible de calculer non seulement le rayonnement rétrodiffusé, cas qui correspond au scénario retenu dans la norme NFC 15-160, mais aussi le rayonnement diffusé vers l'avant au travers de l'écran (diffusion transmise). Les angles de diffusions possibles sont alors :

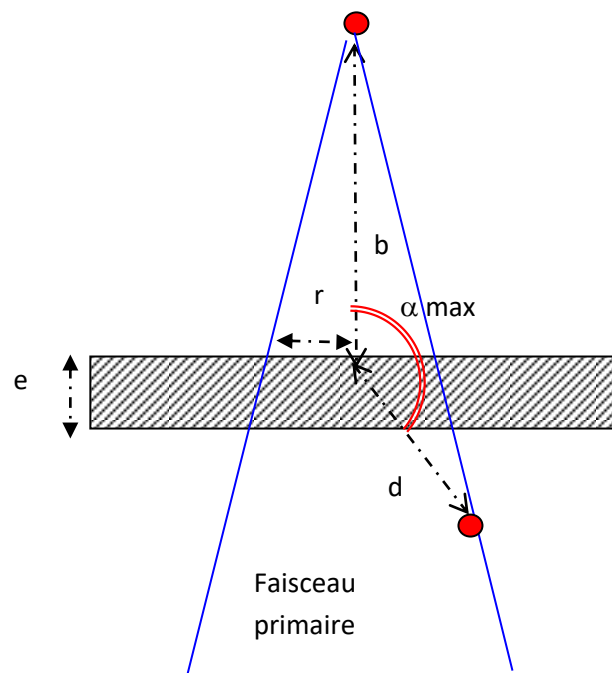
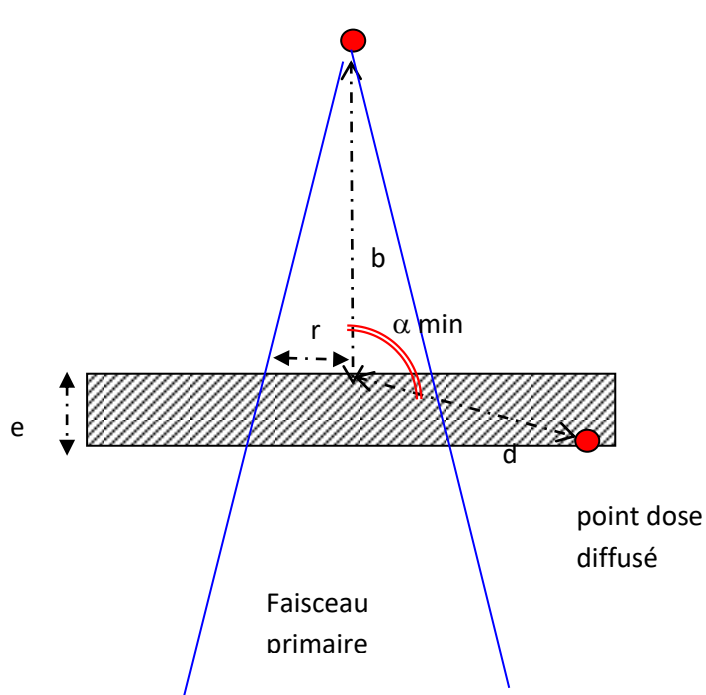
- $0^\circ$  à  $90^\circ$  pour le rétrodiffusé



- $> 90^\circ$  pour la diffusion transmise

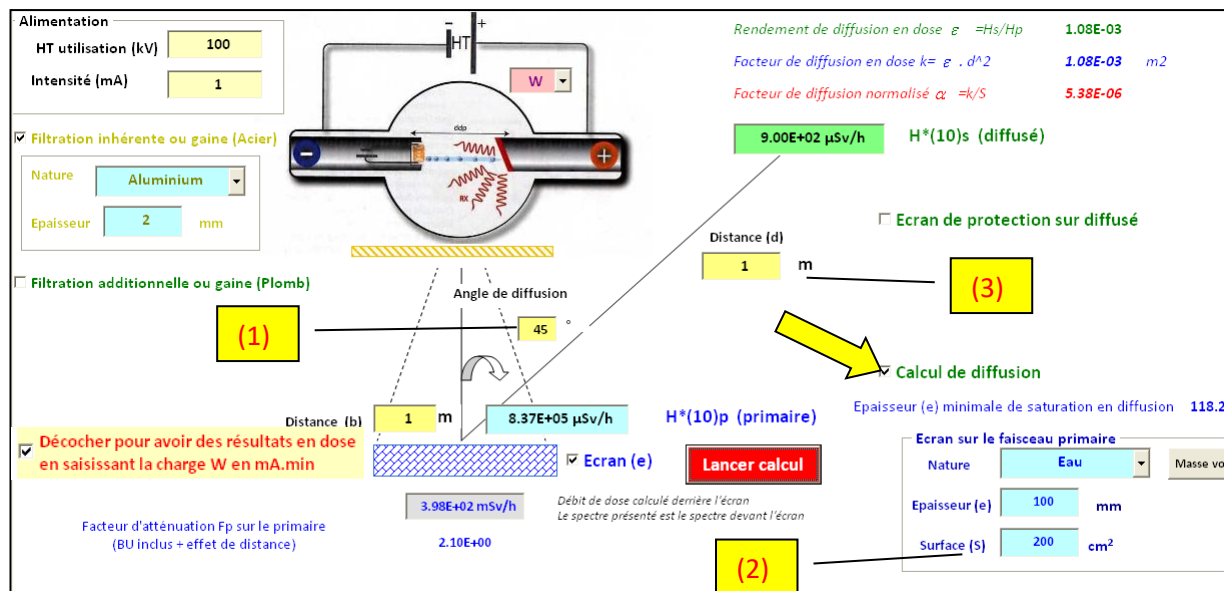


- Dans ce dernier cas il existe des contraintes sur les paramètres d'entrées permettant de s'assurer que le point de calcul n'est ni dans l'écran ni dans le faisceau primaire :



Après avoir cliqué sur « Calcul de diffusion », des champs de saisie apparaissent. Les informations complémentaires demandées sont :

- 1) L'angle de diffusion, entre l'axe d'incidence et l'axe des photons diffusés  $< 90^\circ$  pour le rétrodiffusé et  $> 90^\circ$  pour le diffusé transmis.
- 2) La surface (champ) du milieu diffuseur éclairée par le faisceau primaire
- 3) La distance  $d$  par rapport au centre de la face avant du diffuseur



Alimentation  
HT utilisation (kV) 100  
Intensité (mA) 1

☒ Filtration inhérente ou gaine (Acier)  
Nature Aluminium  
Epaisseur 2 mm

☐ Filtration supplémentaire ou gaine (Plomb)

Distance (l) 1 m  
Angle de diffusion 45°  
Distance (d) 1 m

Rendement de diffusion en dose  $\epsilon = H_s/H_p$  1.08E-03  
Facteur de diffusion en dose  $k = \epsilon \cdot d^2$  1.08E-03 m<sup>2</sup>  
Facteur de diffusion normalisé  $\alpha = k/S$  5.38E-06

9.00E+02 µSv/h H\*(10)s (diffusé)

Distance (d) 1 m

8.37E+05 µSv/h H\*(10)p (primaire)

3.98E+02 mSv/h H\*(10)

Facteur d'atténuation  $F_p$  sur le primaire (BU inclus + effet de distance) 2.10E+00

Calcul de diffusion

Ecran sur le faisceau primaire  
Nature Eau  
Epaisseur (e) 100 mm  
Surface (S) 200 cm<sup>2</sup>

Ecran de protection sur diffusé

Epaisseur (e) minimale de saturation en diffusion 118.26 mm

Débit de dose calculé derrière l'écran  
Le spectre présenté est le spectre devant l'écran

Lancer calcul

Remarque : conformément au schéma, un angle égal à  $0^\circ$  correspond à des rayons X rétrodiffusés vers l'anode.

Lorsque l'utilisateur choisit la nature de l'écran diffuseur, pour une HT donnée, une information supplémentaire apparaît :

Epaisseur (e) minimale de saturation en diffusion 118.26 mm

Cette épaisseur d'écran indique que pour des valeurs inférieures le débit de dose diffusé pourra être plus faible, alors qu'il ne devrait plus guère augmenter pour des valeurs supérieures (voir dossier de validation)

**Attention : le calcul de diffusion ne fonctionne pas si l'écran choisi est le multi-écran**

## I.5.2 RESULTATS OBTENUS SUR LE CALCUL DE DIFFUSION

### I.5.3 EN L'ABSENCE D'ECRAN SUR LE TRAJET DU DIFFUSE

Les résultats essentiels obtenus sur le diffusé sont :

- Le débit d'équivalent de dose à la distance **d** :

|                           |                   |
|---------------------------|-------------------|
| 9.00E+02 $\mu\text{Sv/h}$ | H*(10)s (diffusé) |
|---------------------------|-------------------|

- Des paramètres de diffusions :

|  |          |              |
|--|----------|--------------|
| Rendement de diffusion en dose $\varepsilon = H_s/H_p$   | 1.08E-03 |              |
| Facteur de diffusion en dose $k = \varepsilon \cdot d^2$ | 1.08E-03 | $\text{m}^2$ |
| Facteur de diffusion normalisé $\alpha = k/S$            | 5.38E-06 |              |

Ces divers paramètres et leurs intérêts respectifs sont explicités au § III.2.2. L'essentiel est de savoir qu'ils sont en relation avec le rapport **CEA-R 6452** et la norme **NF C15-160**

Pour l'essentiel ces trois paramètres sont définis par :

- $\varepsilon_{\text{diff}}$  : le rendement de diffusion en dose sans dimension, dépendant de la distance  $d_2$  et de la surface de l'écran.
- $k = \varepsilon_{\text{diff}} d_2^2$  : le facteur de diffusion en  $\text{m}^2$ , indépendant de  $d_2$  mais proportionnel (au 1<sup>er</sup> ordre) à la surface de l'écran. C'est la grandeur qui est utilisée dans la norme NFC 15-160 (mais appliquée au kerma air)
- $\alpha = k/S = \varepsilon_{\text{diff}} / S d_2^2$ , le facteur de diffusion normalisé (sous-entendu ramené à l'unité de surface), sans dimension, indépendant de la surface et de la distance  $d_2$ . C'est le coefficient utilisé dans le rapport CEA-R 6452 et utilisé dans le cadre de la validation, **sous condition de saturation**.

Voir explications partie III.

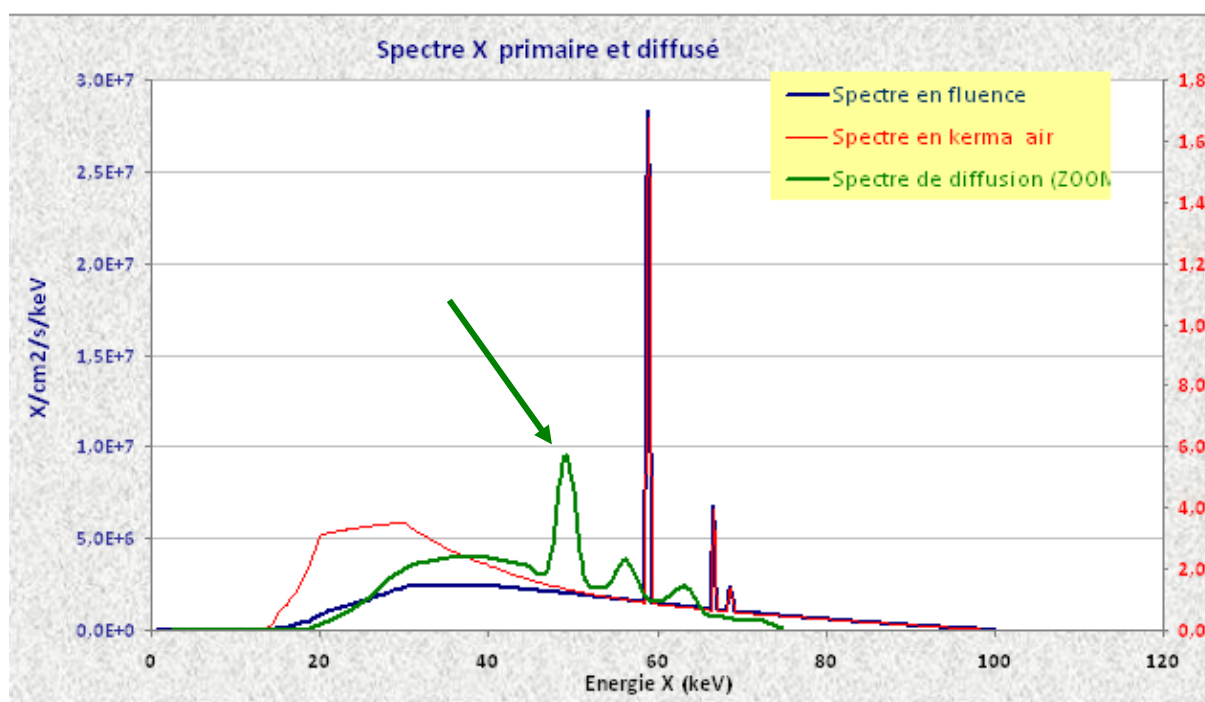
On retrouve sur la feuille de synthèse :

- les autres grandeurs radiométriques pour la composante diffusée ainsi que les 3 paramètres de diffusions cités précédemment :

|       | Avec Build-up | Sans Build-up  | Build-up moyen       |             |
|-------|---------------|----------------|----------------------|-------------|
| Prim. | Kerma         | 4.00E+01 mGy/h | 6.07                 |             |
|       | H*(10)        | 6.56E+01 mSv/h | Fp (BU + eff. dist.) |             |
|       | H'(0,07)      | 6.16E+01 mSv/h | 2.10E+00             |             |
|       | Hp(10)        | 7.02E+01 mSv/h |                      |             |
|       | Hp(3)         | 6.39E+01 mSv/h |                      |             |
|       | E (AP)        | 4.68E+01 mSv/h | BU diff. (1)         |             |
| Diff. | Kerma         | 3.86E+02 µGy/h | 1.68                 | Rend. diff. |
|       | H*(10)        | 5.35E+02 µSv/h | Fs                   | 1.08E-03    |
|       | H'(0,07)      | 5.36E+02 µSv/h |                      | k (m²)      |
|       | Hp(10)        | 5.59E+02 µSv/h |                      | 1.08E-03    |
|       | Hp(3)         | 5.47E+02 µSv/h |                      | alpha       |
|       | E (AP)        | 3.07E+02 µSv/h |                      | 5.38E-06    |

- Le spectre de la composante diffusée.

La hauteur (ou surface) de ce spectre n'est pas en proportion réelle de la composante diffusée par rapport au spectre de la composante primaire. Elle est ici normalisée (zoomée) pour être visible.



On constate, à partir des pics de fluorescence du tungstène, un glissement vers le bas des énergies des photons diffusés, conformément au phénomène de diffusion Compton (voir *IRM photon gamma ongle Compton*). Ce glissement dépend de l'angle de diffusion choisi.

Cet effet n'est pas sans conséquence notamment sur les facteurs d'atténuation et les coefficients de build-up qui seront alors différents pour un même écran sur le primaire et sur le diffusé



## 1.5.4 EN PRESENCE D'ECRAN SUR LE TRAJET DU DIFFUSE

On peut placer un écran sur le trajet du diffusé :

**Alimentation**

HT utilisation (kV)

Intensité (mA)

☒ **Filtration inhérente ou gaine (Acier)**

Nature

Epaisseur  mm

**Filtration additionnelle ou gaine (Plomb)**

☒ **Décocher pour avoir des résultats en dose en saisissant la charge W en mA.min**

Facteur d'atténuation Fp sur le primaire (BU inclus + effet de distance)

Distance (b)  m

Angle de diffusion  °

Distance  m

Facteur d'atténuation Fs sur le diffusé (BU inclus) **1.71E+03**

☒ **Ecran (e)**

**Lancer calcul**

Rendement de diffusion en dose  $\epsilon = H_s/H_p$  **7.86E-07**

Facteur de diffusion en dose  $k = \epsilon \cdot d^2$  **7.86E-07** m2

Facteur de diffusion normalisé  $\alpha = k/S$  **3.93E-09**

**6.58E+02 nSv/h** **H\*(10)s (diffusé)**

Le spectre présenté est le spectre derrière l'écran

☒ **Ecran sur le diffusé**

Nature  Masse

Epaisseur  mm

☒ **Calcul de diffusion**

Epaisseur (e) minimale de saturation en diffusion **1**

**Ecran sur le faisceau primaire**

Nature  Mas

Epaisseur (e)  mm

Surface (S)  cm<sup>2</sup>

8.37E+08 nSv/h **H\*(10)p (primaire)**

3.98E+02 mSv/h **2.10E+00**

Débit de dose calculé derrière l'écran

Le spectre présenté est le spectre devant l'écran

Contrairement au cas de l'écran sur le primaire, le débit d'équivalent de dose est pris ici à la même distance avec ou sans écran. Ainsi le calcul d'atténuation ne prend pas en compte l'effet de distance.

Le facteur d'atténuation donné dans la boîte de dialogue est donc un facteur d'atténuation intrinsèque prenant en compte le build-up note **F<sub>s</sub>** :

Facteur d'atténuation Fs  
sur le diffusé (BU inclus)

**1.71E+03**

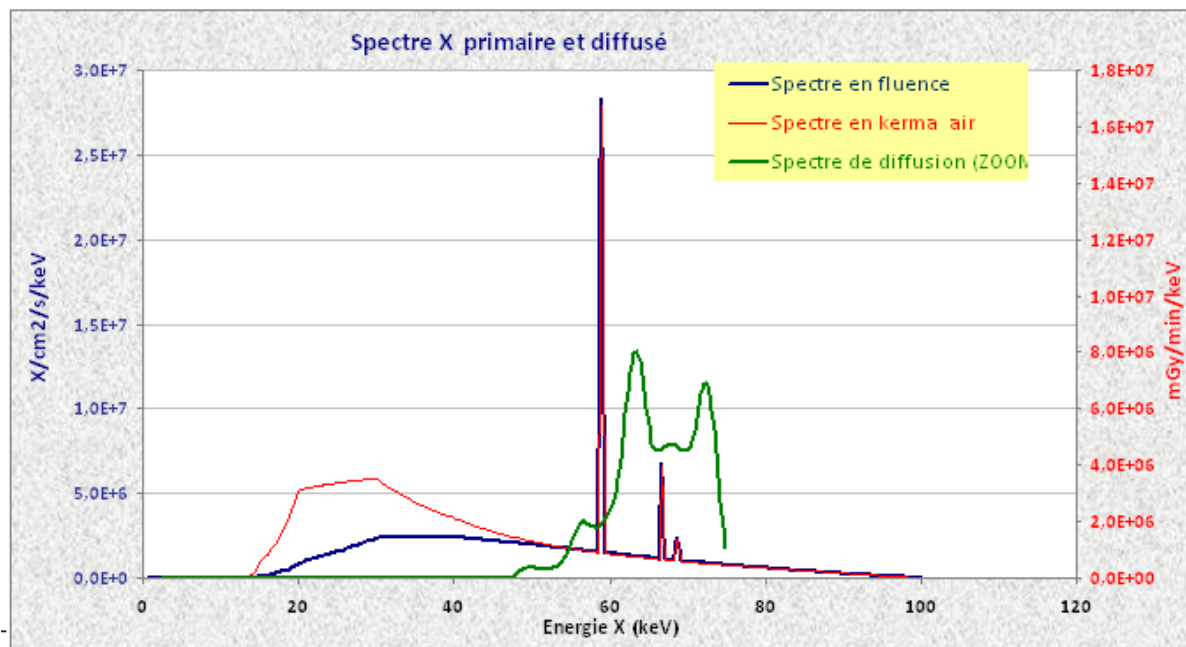
Ce facteur d'atténuation ainsi que le facteur de build-up sont données dans la feuille de synthèse :

|       |          | Avec Build-up  | Sans Build-up  | Build-up moyen       |                     |
|-------|----------|----------------|----------------|----------------------|---------------------|
| Prim. | Kerma    | 2.94E+02 mGy/h | 5.09E+01 mGy/h | 5.78                 |                     |
|       | H*(10)   | 4.76E+02 mSv/h | 8.23E+01 mSv/h | Fp (BU + eff. dist.) |                     |
|       | H'(0,07) | 4.49E+02 mSv/h | 7.77E+01 mSv/h | 3.75E+00             |                     |
|       | Hp(10)   | 5.08E+02 mSv/h | 8.79E+01 mSv/h |                      |                     |
|       | Hp(3)    | 4.66E+02 mSv/h | 8.06E+01 mSv/h |                      |                     |
|       | E (AP)   | 3.33E+02 mSv/h | 5.76E+01 mSv/h | BU diff. (1+2)       |                     |
| Diff. | Kerma    | 4.35E+02 nGy/h | 4.02E+02 nGy/h | 1.08                 | Rend. diff.         |
|       | H*(10)   | 7.56E+02 nSv/h | 6.99E+02 nSv/h | Fs                   | 4.23E-07            |
|       | H'(0,07) | 7.04E+02 nSv/h | 6.51E+02 nSv/h | 2.77E+03             | k (m <sup>2</sup> ) |
|       | Hp(10)   | 8.17E+02 nSv/h | 7.56E+02 nSv/h |                      | 4.23E-07            |
|       | Hp(3)    | 7.30E+02 nSv/h | 6.76E+02 nSv/h |                      | alpha               |
|       | E (AP)   | 5.91E+02 nSv/h | 5.47E+02 nSv/h |                      | 2.12E-09            |

Pour les valeurs de build-up dans ce cas particulier de la diffusion dans un premier écran et de l'atténuation dans un second, voir chapitre suivante.

Le spectre du rayonnement diffusé est alors le spectre derrière l'écran, contrairement au spectre primaire qui est toujours celui avant écran.

Sur l'exemple présent, on constate le fort durcissement du spectre derrière 1 mm de Plomb.



Rappelons ici encore que la hauteur du spectre n'est pas, pour des raisons évidentes de lisibilité, au prorata de sa valeur réelle par rapport au spectre primaire ou au spectre précédent sans écran.

## I- 6 : GESTION DES BUILD-UP

### I.6.1 BUILD –UP SUR L’ECRAN PRIMAIRE

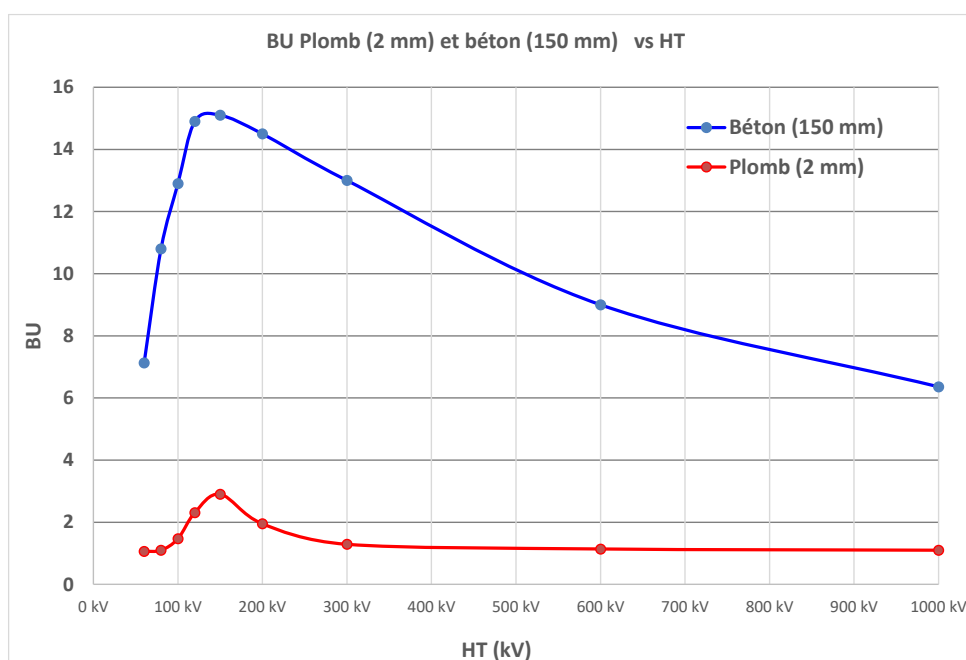
Nous donnons ci-dessous quelques valeurs de build up calculé dans le béton et le Plomb, à titre indicatif. Nous rappelons encore ici que la norme NF C 15-160 ne tient pas compte du build-up.

*Pour plus d’information sur le concept de build-up voir « Calcul de dose ... » § 6.1.6.3 p 258 et annexe N.*

Remarque : le build-up donné ici est un build-up moyen en dose obtenu sur le spectre continue. Il est obtenu en calculant dans un premier temps le build-up pour chaque énergie du spectre discrétisé de la même façon que sur les calculs monoénergétiques pour les gamma. La valeur moyenne est calculée comme une moyenne de l’ensemble de ces build-up pondérés par la dose correspondante pour chaque énergie (*concept de moyenne en dose*)

Valeurs de build-up dans un mur en béton de 150 mm d’épaisseur et dans un écran de Plomb de 2 mm d’épaisseur :

| HT      | Béton 150 mm | Plomb 2 mm |
|---------|--------------|------------|
| 60 kV   | 7,13         | 1,06       |
| 80 kV   | 10,8         | 1,1        |
| 100 kV  | 12,9         | 1,47       |
| 120 kV  | 14,9         | 2,31       |
| 150 kV  | 15,1         | 2,9        |
| 200 kV  | 14,5         | 1,95       |
| 300 kV  | 13           | 1,29       |
| 600 kV  | 9            | 1,14       |
| 1000 kV | 6,36         | 1,1        |

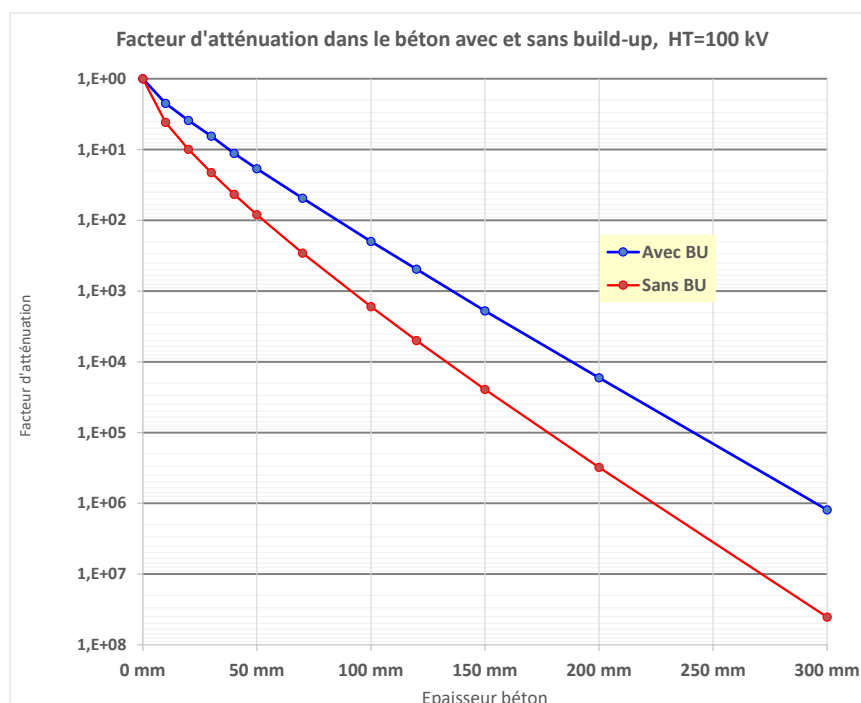


Le build-up reste modeste dans le plomb, mais pour autant il n'est pas toujours négligeable et peut monter jusqu'à un facteur 3, et plus encore si l'on augmente l'épaisseur de plomb bien entendu

Dans le béton, milieux plus diffusant, le build-up est élevé et largement non négligeable

Toujours à titre indicatif, nous donnons ci-dessous les courbes d'atténuation dans le béton pour une HT de 100 kV, l'une calculée avec build-up et l'autre sans build-up. Pour nous affranchir de l'effet de distance avec un écran d'épaisseur variable, les calculs ont été effectués avec une distance  $b$  de 100 m.

| épaisseur (mm) | BU    | Fp (BU inclus) | F*p (hors BU) |
|----------------|-------|----------------|---------------|
| 0              | 1     | 1              | 1             |
| 10             | 1,86  | 2,22           | 4,1           |
| 20             | 2,57  | 3,87           | 9,9           |
| 30             | 3,28  | 6,47           | 21            |
| 40             | 3,8   | 11,3           | 42            |
| 50             | 4,47  | 18,6           | 83            |
| 70             | 5,98  | 48,6           | 290           |
| 100            | 8,35  | 199            | 1661          |
| 120            | 10,19 | 491            | 5003          |
| 150            | 12,88 | 1,90E+03       | 2,4 E+04      |
| 200            | 18,46 | 1,68E+04       | 3,1E+05       |
| 300            | 32,6  | 1,24E+06       | 4,0E+07       |



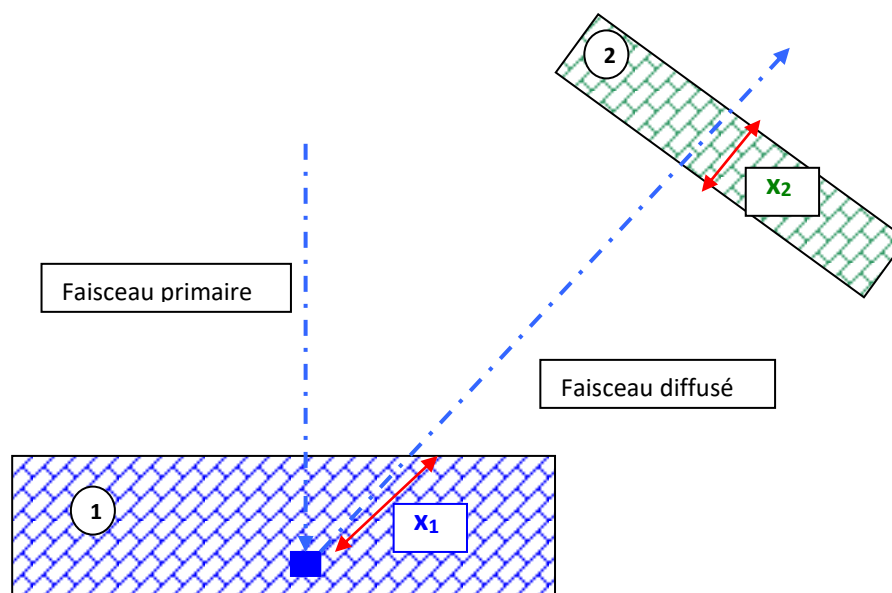
On constate que la courbe d'atténuation hors build-up est très optimiste, et minimise ainsi le calcul du débit de dose derrière l'écran dans des proportions qui augmente avec l'épaisseur d'écran

## I.6.2 BUILD-UP SUR LE DIFFUSE

Le build-up sur le faisceau diffusé est calculé suivant les mêmes principes que pour une source volumique et un écran.

Ici l'écran diffuseur placé sur le trajet du primaire (**écran 1**) joue le rôle de source de rayonnement diffusé. Chaque élément de volume de cet écran se comporte comme un volume élémentaire émetteur de rayonnement X (*obtenu dans le calcul de diffusion, voir plus loin*). Hors ce rayonnement diffusé subit un phénomène d'autoabsorption mais aussi de diffusion sur son trajet  $x_1$  dans l'écran avant d'émerger. Cet effet de diffusion (*c'est-à-dire effectivement de diffusion sur le rayonnement diffusé, nous sommes bien en présence ici d'un phénomène de multi-diffusion*) est pris en compte par le facteur de build-up calculé de façon classique en fonction de la nature de l'écran, de l'énergie des photons et de la valeur de  $x_1$ .

Ce facteur de build-up est alors combiné de façon usuelle avec le facteur de build-up du rayonnement émergeant traversant l'écran 2.



Le build-up ainsi obtenu, et affiché dans la feuille de synthèse, n'est pas le build-up intrinsèque de l'écran sur le trajet du diffusé, mais tient compte du build-up dans l'écran diffuseur. Cet effet a 2 conséquences :

- **Conséquence 1** : En l'absence d'écran 2 sur le trajet du diffusé, une valeur de build-up différent de 1 est affichée sur la feuille de synthèse. C'est alors dans ce cas le build-up en réémission calculé dans l'écran 1. Il est noté  $BU(1)$ .
- **Conséquence 2** : En présence d'un écran sur le diffusé, la valeur du build-up affiché dans la feuille de synthèse, noté alors  $BU(1+2)$  peut varier dans des proportions considérables en fonction de la nature de l'écran diffuseur (1)

Exemple : calcul avec HT=100 kV de la valeur BU(1+2) pour un écran (2) de 100 mm d'eau placé sur le trajet du diffusé pour deux écran diffuseurs différent : un écran (1) d'eau de 400 mm d'épaisseur (très diffusant) puis un écran de plomb de 1 mm d'épaisseur (peu diffusant).

|       |          | Primaire<br>Diffusé | Configuration avec écran de Eau de 400mm<br>Configuration avec écran Eau de 100mm |                |                      |
|-------|----------|---------------------|---|----------------|----------------------|
|       |          |                     | Avec Build-up   | Sans Build-up  | Build-up moyen       |
| Prim. | Kerma    |                     | 4.42E+03 µGy/h  | 6.78E+01 µGy/h | 65,12                |
|       | H*(10)   |                     | 7.58E+03 µSv/h  | 1.16E+02 µSv/h | Fp (BU + eff. dist.) |
|       | H'(0,07) |                     | 7.03E+03 µSv/h  | 1.08E+02 µSv/h | 2,36E+02             |
|       | Hp(10)   |                     | 8.26E+03 µSv/h  | 1.27E+02 µSv/h |                      |
|       | Hp(3)    |                     | 7.33E+03 µSv/h  | 1.13E+02 µSv/h |                      |
|       | E (AP)   |                     | 5.92E+03 µSv/h  | 9.09E+01 µSv/h | BU diff. (1+2)       |
| Diff. | Kerma    |                     | 5.12E+02 µGy/h  | 7.60E+01 µGy/h | 6,73 Rend. diff.     |
|       | H*(10)   |                     | 8.18E+02 µSv/h  | 1.21E+02 µSv/h | Fs 4,58E-04          |
|       | H'(0,07) |                     | 7.69E+02 µSv/h  | 1.14E+02 µSv/h | 4,99E+00 k (m²)      |
|       | Hp(10)   |                     | 8.59E+02 µSv/h  | 1.28E+02 µSv/h | 4,58E-04             |
|       | Hp(3)    |                     | 7.98E+02 nSv/h  | 1.19E+02 µSv/h | alpha                |
|       | E (AP)   |                     | 5.34E+02 nSv/h  | 7.94E+01 µSv/h | 1,15E-06             |

|       |          | Primaire<br>Diffusé | Configuration avec écran de Plomb de 0,1mm<br>Configuration avec écran Eau de 100mm |                |                      |
|-------|----------|---------------------|---|----------------|----------------------|
|       |          |                     | Avec Build-up   | Sans Build-up  | Build-up moyen       |
| Prim. | Kerma    |                     | 1.93E+02 mGy/h  | 1.87E+02 mGy/h | 1,04                 |
|       | H*(10)   |                     | 3.18E+02 mSv/h  | 3.05E+02 mSv/h | Fp (BU + eff. dist.) |
|       | H'(0,07) |                     | 2.98E+02 mSv/h  | 2.86E+02 mSv/h | 5,62E+00             |
|       | Hp(10)   |                     | 3.40E+02 mSv/h  | 3.27E+02 mSv/h |                      |
|       | Hp(3)    |                     | 3.09E+02 mSv/h  | 2.97E+02 mSv/h |                      |
|       | E (AP)   |                     | 2.26E+02 mSv/h  | 2.18E+02 mSv/h | BU diff. (1+2)       |
| Diff. | Kerma    |                     | 9.98E+00 µGy/h  | 2.62E+00 µGy/h | 3,80 Rend. diff.     |
|       | H*(10)   |                     | 1.64E+01 µSv/h  | 4.31E+00 µSv/h | Fs 9,17E-06          |
|       | H'(0,07) |                     | 1.52E+01 µSv/h  | 4.01E+00 µSv/h | 1,31E+01 k (m²)      |
|       | Hp(10)   |                     | 1.74E+01 µSv/h  | 4.58E+00 µSv/h | 9,17E-06             |
|       | Hp(3)    |                     | 1.59E+01 nSv/h  | 4.18E+00 µSv/h | alpha                |
|       | E (AP)   |                     | 1.13E+01 nSv/h  | 2.99E+00 µSv/h | 2,29E-08             |

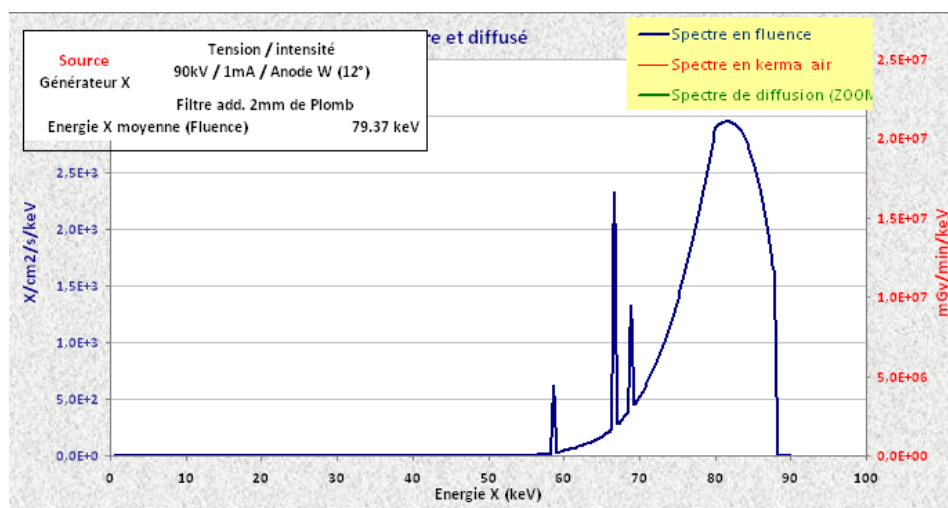
Ce constat permet de dégager une méthode pour estimer le build-up moyen intrinsèque de l'écran 2 si nécessaire : il faut mettre en place un écran 1 très mince en termes de libre parcours moyen devant l'écran 2.

Il ne faut pas oublier que c'est avant tout la valeur  $\mu x$  (nombre de longueur de relaxation ou épaisseur de l'écran en unité de libre parcours moyen) qui est pris en considération pour la combinaison des build-up

## I.6.3 VALIDATION CALCUL DE BUILD-UP

### I.6.3.1 Sur le spectre primaire

La remarque précédente nous a permis une validation *a minima* des valeurs de build-up ainsi obtenus. Tout d'abord, n'ayant aucune référence sur des build-up moyennés sur des spectres continus, nous avons durci le spectre primaire en utilisant une fenêtre d'entrée de 2 mm de plomb pour une HT de 90 keV. On obtient ainsi un spectre très piqué centré sur une énergie moyenne de 80 keV :



En utilisant ce spectre primaire pour calculer le build-up pour un écran de 100 mm d'eau :

L'interface de simulation permet de configurer les paramètres de calcul. Les paramètres d'alimentation sont fixés à 90 kV et 1 mA. La filtration inhérente est en acier, et la filtration supplémentaire est en plomb avec une épaisseur de 2 mm. La distance (b) est de 1 m. L'unité d'affichage est en Sv/h. Le calcul de diffusion est activé. L'écran est configuré avec une nature d'eau et une épaisseur de 100 mm. Les résultats affichés sont :  $H^*(10)_p$  (primaire) =  $2.10E-01$  mSv/h, et le débit de dose calculé derrière l'écran =  $2.43E+02$   $\mu$ Sv/h. Le facteur d'atténuation  $F_p$  est de  $8.68E-01$ . Un bouton "Lancer calcul" est visible.

On obtient un build-up de 8,11 :

| Primaire   | Configuration avec écran de Eau de 100mm |                     |                      |
|------------|--|---------------------|----------------------|
|            | Avec Build-up                            | Sans Build-up       | Build-up moyen       |
| Kerma      | 1.41E+02 $\mu$ Gy/h                      | 1.74E+01 $\mu$ Gy/h | 8,11                 |
| $H^*(10)$  | 2.43E+02 $\mu$ Sv/h                      | 2.99E+01 $\mu$ Sv/h | Fp (BU + eff. dist.) |
| $H'(0,07)$ | 2.23E+02 $\mu$ Sv/h                      | 2.75E+01 $\mu$ Sv/h | 8,68E-01             |
| $H_p(10)$  | 2.69E+02 $\mu$ Sv/h                      | 3.32E+01 $\mu$ Sv/h |                      |
| $H_p(3)$   | 2.36E+02 $\mu$ Sv/h                      | 2.91E+01 $\mu$ Sv/h |                      |
| E (AP)     | 1.99E+02 $\mu$ Sv/h                      | 2.45E+01 $\mu$ Sv/h |                      |



Ce résultat est à rapprocher du calcul sur une valeur monoénergétique avec l'option « build-up » de Dosimex-GX :

Calcul Build-up et atténuation

Energie gamma

80

keV

Nature de l'écran

Eau

Epaisseur de l'écran

10

cm

☐ 2ème écran accolé

Calculer

Ecran 1

Calcul  $\mu_{xx}$

1.75E+00

Build-up (B)

8.1

Facteur de transmission F  
[e(- $\mu x$ )] :

1.73E-01

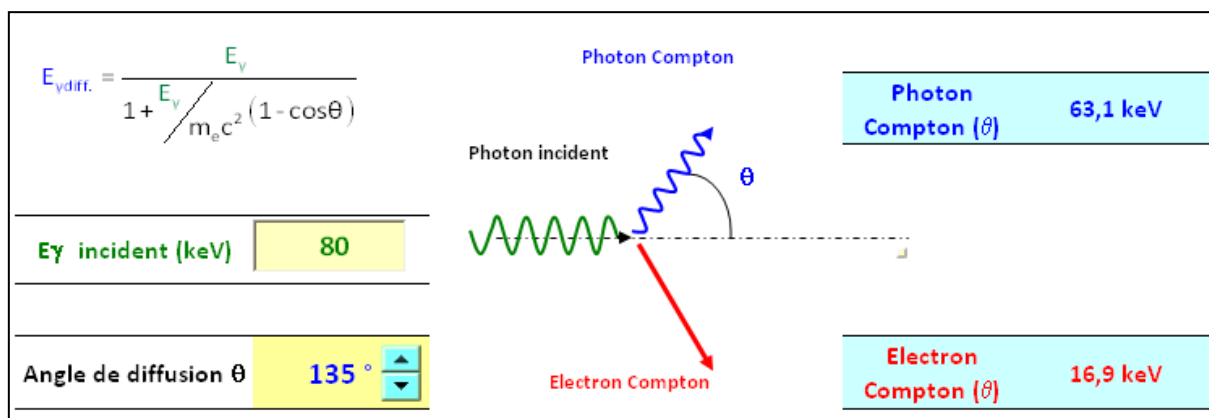
FxB :

1.40E+00

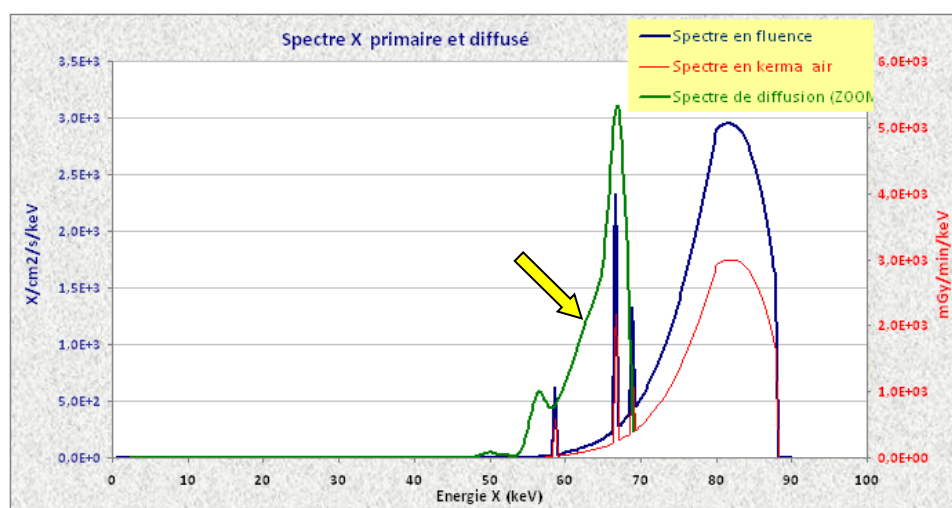
Rappelons ici que ces valeurs de build-up sont obtenus par interpolation logarithmique des valeurs de référence tabulé dans le document ANS/ANSI (*voir dossier de validation gamma*)

### I.6.3.2 Build-up sur le diffusé

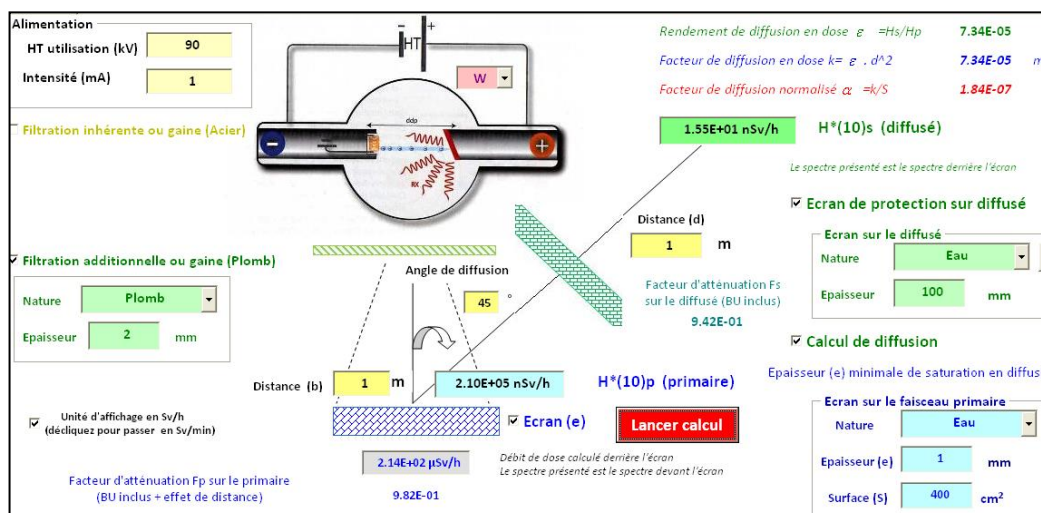
En utilisant ce même spectre primaire très durci à 80 keV, on peut s'attendre pour une rétrodiffusion à 45 ° (soit encore 135 ° compté en sens inverse) à un spectre quasi-monoénergétique à 63 keV (cf *IRM Photon onglet Compton*):



Ce qui est cohérent avec le spectre diffusé obtenus avec Dosimex-GX



En prenant un écran diffuseur(1) très mince (1 mm d'eau) devant l'écran (2) placé sur le trajet du diffusé :



On obtient alors une bonne estimation du build-up intrinsèque de l'écran de 100 mm sur le diffusé :

|       |          | Primaire                  | Configuration avec écran de Eau de 1mm |                              |
|-------|----------|---------------------------|--|------------------------------|
|       |          | Diffusé                   | Configuration avec écran Eau de 100mm  |                              |
| Prim. |          | Avec Build-up             | Sans Build-up                          | Build-up moyen               |
|       | Kerma    | 1.25E+02 $\mu\text{Gy/h}$ | 1.20E+02 $\mu\text{Gy/h}$              | 1,04                         |
|       | H*(10)   | 2.14E+02 $\mu\text{Sv/h}$ | 2.06E+02 $\mu\text{Sv/h}$              | Fp (BU + eff. dist.)         |
|       | H'(0,07) | 1.97E+02 $\mu\text{Sv/h}$ | 1.90E+02 $\mu\text{Sv/h}$              | 9,82E-01                     |
|       | Hp(10)   | 2.38E+02 $\mu\text{Sv/h}$ | 2.29E+02 $\mu\text{Sv/h}$              |                              |
|       | Hp(3)    | 2.09E+02 $\mu\text{Sv/h}$ | 2.01E+02 $\mu\text{Sv/h}$              |                              |
| Diff. | E (AP)   | 1.76E+02 $\mu\text{Sv/h}$ | 1.69E+02 $\mu\text{Sv/h}$              | BU diff. (1+2)               |
|       | Kerma    | 8.86E+00 nGy/h            | 1.22E+00 nGy/h                         | 7,25 Rend. diff.             |
|       | H*(10)   | 1.55E+01 nSv/h            | 2.13E+00 nSv/h                         | Fs 7,34E-05                  |
|       | H'(0,07) | 1.44E+01 nSv/h            | 1.98E+00 nSv/h                         | 9,42E-01 k (m <sup>2</sup> ) |
|       | Hp(10)   | 1.66E+01 nSv/h            | 2.29E+00 nSv/h                         | 7,34E-05                     |
|       | Hp(3)    | 1.49E+01 nSv/h            | 2.06E+00 nSv/h                         | alpha                        |
| Diff. | E (AP)   | 1.20E+01 nSv/h            | 1.66E+00 nSv/h                         | 1,84E-07                     |

Valeur confirmée par le calcul en monoénergétique :

Calcul Build-up et atténuation

Energie gamma

63

keV

Nature de l'écran

Eau

Epaisseur de l'écran

10

cm

☐ 2ème écran accolé

Calculer

Ecran 1

Calcul  $\mu_{xx}$

1.89E+00

Build-up (B)

7.25

Facteur de transmission F

[e<sup>- $\mu_x$ ]</sup> :

1.51E-01

FxB :

1.09E+00

On peut alors noter que pour un même écran, suivant qu'il soit placé sur la traject du primaire ou du diffusé, le build-up est différent car les spectres incidents sont différents. Il en est de même pour les facteurs d'atténuation intrinsèques qui seront en général, pour un même écran, plus élevés sur le diffusé que sur le primaire, toujours en raison du glissement du spectre diffusé vers des énergies plus faibles.

## I- 7 : CALCUL DE FUITE DE GAINÉ

L'une des 3 composantes prises en considération dans la norme NF 15-160 est celle de la fuite de gaine. Le modèle utilisé dans la norme repose sur des paramètres rarement connus et quelque peu ésotériques. Les valeurs prises par défaut dans la norme conduisent assez souvent à des résultats pessimistes (*i.e. des DED supérieurs à la réalité*)

Or, sur le plan physique, le rayonnement de gaine est simplement conditionné par la nature et l'épaisseur de ladite gaine qui entoure et protège le tube X (*hors collimateur*), en général de l'acier souvent doublé avec du plomb. On notera que dans ces conditions le spectre de fuite de gaine est un spectre très durci quasi-monoénergétique avec une valeur proche de la valeur maximale du spectre (HT).

Cet aspect conditionne les facteurs d'atténuations sur la composante de fuite de gaine, facteurs plus faibles que sur le spectre primaire.

Pour connaître le débit d'équivalent de dose dû à la fuite de gaine il suffit de remplacer les filtrations placées sur le collimateur (*un trou dans la gaine*) par les épaisseurs correspondantes en acier et/ou en plomb :

☒ **Filtration inhérente ou gaine (Acier)**

Nature

Acier Inox

Epaisseur

2

mm

☒ **Filtration additionnelle ou gaine (Plomb)**

Nature

Plomb

Epaisseur

3

mm

Les résultats obtenus dans ces conditions sont plus réalistes que les valeurs obtenus (*implicitement*) dans la norme.

*Remarque : il n'est pas toujours facile de disposer des plans en coupe du tube et de sa gaine, il ne faut pas hésiter à insister auprès du distributeur ou du fabricant pour connaître l'épaisseur et la nature de la gaine.*

