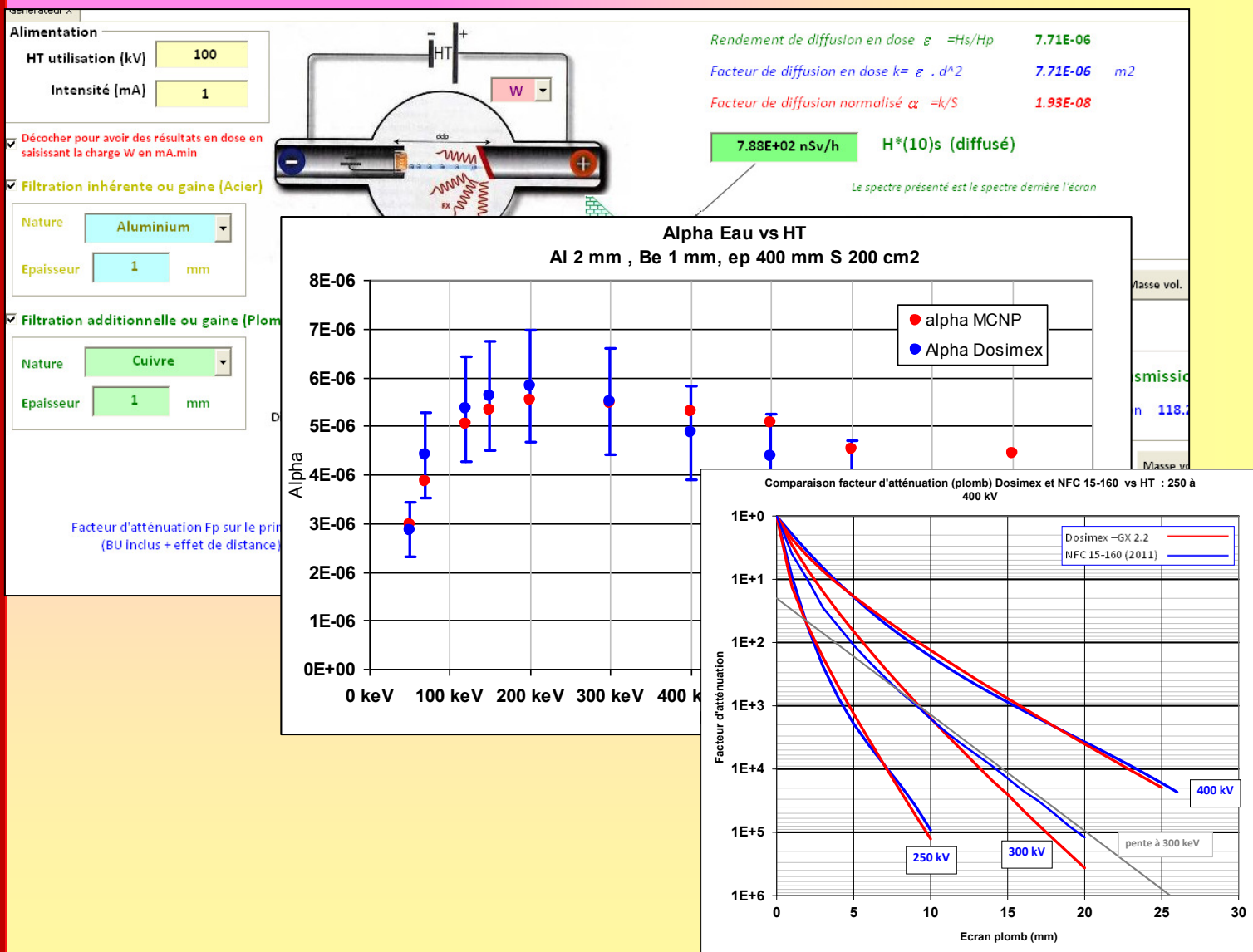




DOSIMEX-GX 3.0

✓ DOSSIER DE VALIDATION GÉNÉRATEUR X



Alain VIVIER, Gérald LOPEZ
SEPTEMBRE 2019

SOMMAIRE

PARTIE I.	VALIDATION DÉBIT DE DOSE DANS LE PRIMAIRE	4
I- 1 :	CONTEXTE DE LA COMPARAISON	4
I- 2 :	DÉBIT DE DOSE $H^*(10)$ DANS LE FAISCEAU PRIMAIRE:	5
I.2.1	Comparaison des rendements	5
I.2.2	Analyse des rapports DOSIMEX/MCNP en termes de $H^*(10)$	7
I- 3 :	DÉBITS DE DOSE AMBIANT EN KERMA AIR DANS LE FAISCEAU PRIMAIRE:	8
I.3.1	Comparaisons des rendement en Kerma air(mGy/mn).....	8
I.3.2	Analyse des rapports DOSIMEX/MCNP en Kerma air.....	10
I- 4 :	COMPARAISONS RENDEMENTS POUR LES ANODES AUTRES QUE TUNGSTÈNE :	11
I- 5 :	COMPARATIF SPECTRE	12
PARTIE II.	VALIDATION RAYONNEMENT DIFFUSE	13
II- 1 :	CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA VALIDATION AVEC LE RAPPORT CEA-R 6452	13
II- 2 :	MODÈLE SIMPLIFIÉ DE DIFFUSION VS NF C 15-160.....	14
II- 3 :	MÉTHODE MISE EN ŒUVRE PAR DOSIMEX-GX 3.0 POUR LE CALCUL DU RAYONNEMENT DIFFUSÉ. 16	
II.3.1	SCHÉMA DE PRINCIPE : DIFFUSION DANS UN ÉLÉMENT DE VOLUME.	16
II.3.2	RECHERCHE DE FACTEURS DE DIFFUSIONS PERTINENTS	18
II.3.3	Impact de l'épaisseur de cible et recherche d'une épaisseur de saturation.....	19
II- 4 :	CALCULS DIFFUSION DOSIMEX VS MCNP	20
II.4.1	Les cas étudiés	20
II.4.2	Synthèse des rapports Dosimex/MCNP pour les coefficients alpha	32
II- 5 :	VALIDATION VS FACTEUR DE DIFFUSION NORME NFC 15-160 (2011)	33
PARTIE III.	VALIDATION ATTÉNUATION PAR UN ÉCRAN.....	35
III- 1 :	REMARQUES SUR LES FACTEURS D'ATTÉNUATION AVEC UN SPECTRE X CONTINU	35
III- 2 :	VARIABILITÉ DU FACTEUR D'ATTÉNUATION EN FONCTION DE LA FILTRATION.....	38
III- 3 :	COMPARAISONS FACTEURS D'ATTÉNUATIONS DOSIMEX-GX 3.0 VS NFC 15-160 VERSION 201140	
III.3.1	Basses énergies (cf fig 4 NF C 15-160 mars 2011).....	40
III.3.2	Moyennes énergies (cf fig 5 NF C 15-160 mars 2011).....	41
III.3.3	Hautes énergies (cf fig 6 NF C 15-160 mars 2011)	42
III.3.4	Tableaux facteurs d'atténuation Dosimex-GX et N FC 15_160 (2011).....	43
III.3.5	Analyse des résultats pour la version 2011	46
III- 4 :	COMPARAISONS FACTEURS D'ATTÉNUATIONS DOSIMEX-GX 3.0 VS NFC 15-160 VERSION 201848	
III.4.1	Facteurs d'atténuation dans le béton (NF C 15-160 2018).....	49
III.4.2	Facteurs d'atténuation dans le plomb de 120 à 300 kV (NF C 15-160, 2018).....	50
III.4.3	Facteurs d'atténuation dans le plomb de 400 à 800 kV (NF C 15-160 2018).....	51
III.4.4	Analyse des résultats pour la version 2018	52

PRÉAMBULE : CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA VALIDATION DU MODÈLE « GÉNÉRATEUR X » DE DOSIMEX-GX 3.0

Ce dossier de validation s'attache à démontrer la fiabilité du modèle « générateur X » de Dosimex - GX-3.0. met en œuvre 1000 point de comparaisons sur les débits de dose sur le primaire, le rayonnement diffusé et les facteurs d'atténuations de 50 à 800 kV.

Ce dossier s'articule sur 3 axes de validation :

➤ **Axe 1 : Validation du calcul de débit de dose dans le faisceau primaire :**

Les points de comparaisons portent sur 154 valeurs en termes de kerma air et autant en termes d'équivalent de dose $H^*(10)$. Nous bénéficions pour cela de 308 valeurs de références MCNP reprises dans l'ouvrage *Applied Physics of External Radiation Exposure* (Rodolphe Antoni et Laurent Bourgois, Springer 2017, <https://www.springer.com/gp/book/9783319486581>)

➤ **Axe 2 : Validation du calcul de débit d'équivalent de dose dans le rayonnement diffusé par un écran :**

Là encore nous avons pu récemment disposer du rapport CEA-R 6452 ([Évaluation par calcul Monte-Carlo des facteurs de diffusion en termes d'équivalent de dose des rayonnements issus d'un générateur X ...](#)), Laurent Bourgois, Stéphanie Ménard, 2017) nous ayant permis de valider notre modèle sur 97 points de comparaisons.

➤ **Axe 3 : Validation des coefficients d'atténuation dans le plomb et dans le béton:**

Nous nous sommes appuyés ici d'une part sur des valeurs tirées de la norme NFC 15-160 de mars 2011 mais aussi, pour la version 2018, sur l'article de référence de Laurent Bourgois et Stéphanie Ménard : [*Dose equivalent transmission data for shielding industrial x-ray facilities up to 800 kV \(journal of radiological protection, 2018\)*](#) .

Concernant les comparaisons vs MCNP (405 valeurs), le résultat essentiel de cette campagne de validation est le suivant : l'écart relatif quadratique moyen, toutes valeurs confondues, est égal à 16 %, avec 94 % des résultats présentant un écart inférieurs à 25 % (voir le détail dans le chapitre final).

Concernant les facteurs d'atténuations, et malgré l'imprécision de certaines valeurs de références (2011), l'écart moyen sur 600 point de comparaisons est de l'ordre de 30 %, ce qui, pour des grandeurs mettant en jeu des exponentielles et des facteurs d'atténuation allant jusqu'à plus de 10^{11} , reste acceptable

AU TOTAL, CE DOSSIER DE VALIDATION MET EN ŒUVRE 980 POINTS DE COMPARAISONS AVEC, EN TERMES DE RAPPORT, UNE MOYENNE DE 0,95 UN ÉCART-TYPE DE L'ORDRE DE 23 %

Partie I. VALIDATION DÉBIT DE DOSE DANS LE PRIMAIRE

I- 1 : CONTEXTE DE LA COMPARAISON

Jusqu'à la version 2.0 nous ne disposions que de valeurs de références allant de 50 à 500 kV (110 valeurs). Pour la version 3.0 nous avons pu bénéficier de 44 points supplémentaires allant de 600 à 900 keV, toujours pour 11 filtrations différentes

Les valeurs sont données en débit d'équivalent de dose ambiant en mGy.mn^{-1} pour le kerma air et en mSv.mn^{-1} pour $H^*(10)$, à 1 m du foyer et une intensité de 1 mA. Les valeurs ainsi obtenues correspondent au concept de **rendement** Γ_R défini dans la norme NF C 15-160 exprimé en $\text{mSv.m}^2.\text{mn}^{-1}.\text{mA}^{-1}$.

Ces comparaisons portent sur un jeu de 154 valeurs en kerma air et 154 valeurs en $H^*(10)$ pour 10 valeurs différentes de hautes tensions et 11 filtrations différentes, soit un total de 308 valeurs testées.

Remarque : la norme NFC 15 -160 de 2011 exprimait le rendement en termes d'équivalents de dose (Sv), mais les valeurs correspondent en réalité implicitement au kerma dans l'air (Gy) . la norme de 2018 a corrigé cette erreur et les valeurs sont données maintenant en termes de $H^*(10)$. La version 3.0 donne, dans la boîte de dialogue principale, les valeurs en $H^*(10)$.

I- 2 : DÉBIT DE DOSE H*(10) DANS LE FAISCEAU PRIMAIRE:

I.2.1 COMPARAISON DES RENDEMENTS

Les valeurs obtenues (154) ci-dessous en mSv.mn⁻¹ sont calculées à une distance de 1 m et une intensité de 1 mA avec les filtrations correspondantes. Rappelons que ce sont ces rendements calculés avec MCNP qui sont utilisés dans la norme NFC 15-160 version 2018

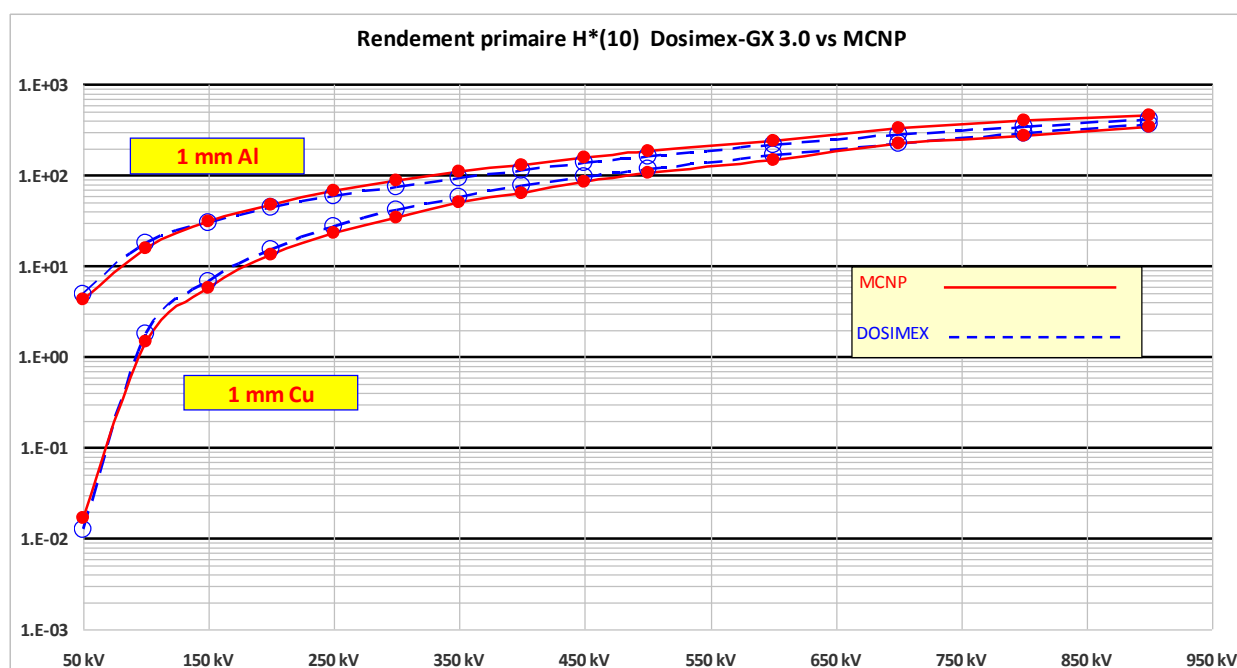
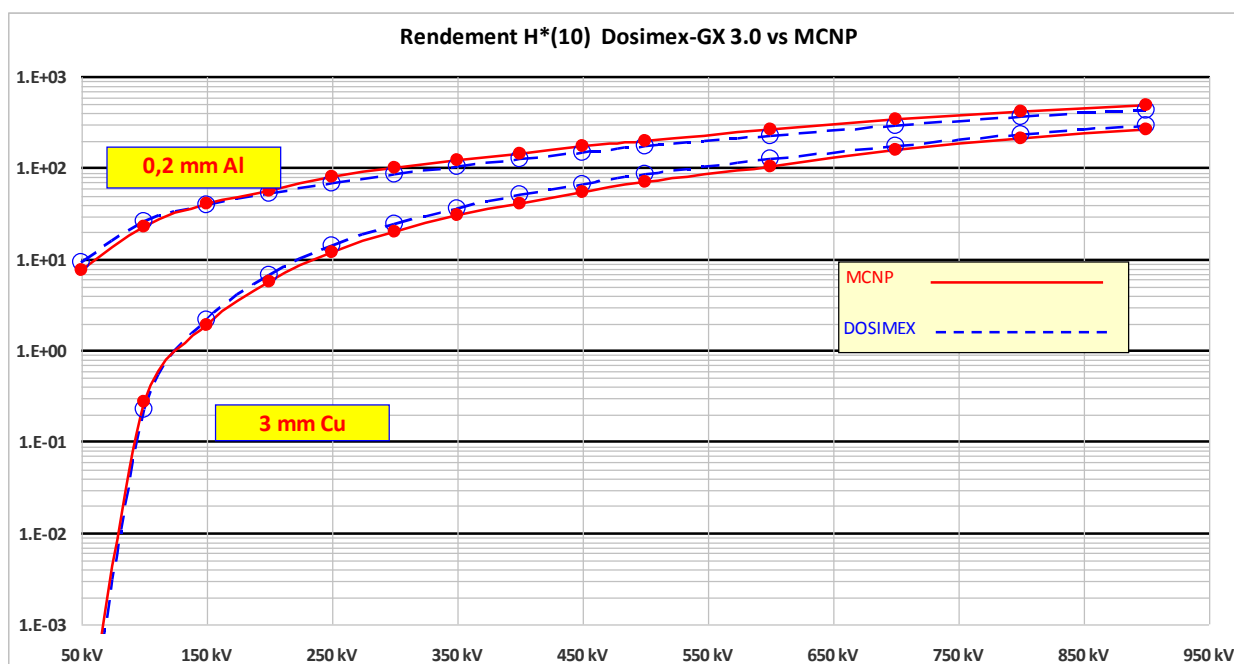
Rendement primaire H*(10) MCNP (mSv/mn à 1 m pour 1 mA)

HT (kV)	None	0.2 mm Al	0.5 mm Al	1 mm Al	2 mm Al	3 mm Al	0.2 mm Cu	0.5 mm Cu	1 mm Cu	2 mm Cu	3 mm Cu
	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min
50	1.01E+01	7.69E+00	6.00E+00	4.35E+00	2.75E+00	1.87E+00	6.75E-01	1.28E-01	1.69E-02	5.72E-04	2.92E-05
100	2.73E+01	2.31E+01	1.94E+01	1.59E+01	1.22E+01	9.94E+00	5.97E+00	3.02E+00	1.46E+00	6.41E-01	2.79E-01
150	4.60E+01	4.07E+01	3.63E+01	3.13E+01	2.53E+01	2.18E+01	1.57E+01	9.50E+00	5.78E+00	3.05E+00	1.89E+00
200	6.28E+01	5.74E+01	5.24E+01	4.67E+01	3.97E+01	3.57E+01	2.76E+01	1.90E+01	1.32E+01	8.92E+00	5.63E+00
250	8.44E+01	7.95E+01	7.38E+01	6.72E+01	5.82E+01	5.20E+01	4.29E+01	3.11E+01	2.30E+01	1.56E+01	1.20E+01
300	1.04E+02	9.97E+01	9.40E+01	8.67E+01	7.68E+01	7.03E+01	6.01E+01	4.56E+01	3.48E+01	2.52E+01	2.02E+01
350	1.25E+02	1.23E+02	1.17E+02	1.10E+02	9.93E+01	9.14E+01	8.02E+01	6.28E+01	5.06E+01	3.78E+01	3.08E+01
400	1.46E+02	1.44E+02	1.37E+02	1.29E+02	1.18E+02	1.10E+02	9.74E+01	7.86E+01	6.30E+01	4.91E+01	4.12E+01
450	1.83E+02	1.74E+02	1.67E+02	1.58E+02	1.46E+02	1.37E+02	1.25E+02	1.02E+02	8.42E+01	6.61E+01	5.52E+01
500	2.07E+02	2.02E+02	1.94E+02	1.85E+02	1.72E+02	1.63E+02	1.50E+02	1.26E+02	1.05E+02	8.37E+01	7.09E+01
600	2.69E+02	2.62E+02	2.54E+02	2.43E+02	2.30E+02	2.18E+02	2.03E+02	1.73E+02	1.49E+02	1.22E+02	1.05E+02
700	3.55E+02	3.48E+02	3.43E+02	3.33E+02	3.17E+02	3.02E+02	2.88E+02	2.54E+02	2.22E+02	1.87E+02	1.61E+02
800	4.22E+02	4.15E+02	4.07E+02	3.97E+02	3.79E+02	3.65E+02	3.52E+02	3.13E+02	2.77E+02	2.41E+02	2.14E+02
900	5.02E+02	4.91E+02	4.84E+02	4.59E+02	4.59E+02	4.44E+02	4.24E+02	3.81E+02	3.43E+02	2.95E+02	2.66E+02

Rendement primaire H*(10) DOSIMEX-GX 3.0 (mSv/mn à 1 m pour 1 mA)

HT (kV)	None	0.2 mm Al	0.5 mm Al	1 mm Al	2 mm Al	3 mm Al	0.2 mm Cu	0.5 mm Cu	1 mm Cu	2 mm Cu	3 mm Cu
	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min
50	1.18E+01	9.34E+00	7.07E+00	4.96E+00	2.95E+00	1.99E+00	6.78E-01	1.12E-01	1.27E-02	3.74E-04	1.65E-05
100	2.97E+01	2.59E+01	2.21E+01	1.82E+01	1.39E+01	1.14E+01	7.60E+00	3.86E+00	1.82E+00	5.18E-01	2.30E-01
150	4.38E+01	3.95E+01	3.51E+01	3.05E+01	2.50E+01	2.17E+01	1.70E+01	1.09E+01	6.88E+00	3.57E+00	2.14E+00
200	5.81E+01	5.35E+01	4.89E+01	4.38E+01	3.76E+01	3.36E+01	2.90E+01	2.13E+01	1.54E+01	9.74E+00	6.79E+00
250	7.35E+01	6.89E+01	6.41E+01	5.88E+01	5.20E+01	4.74E+01	4.33E+01	3.44E+01	2.69E+01	1.89E+01	1.42E+01
300	9.09E+01	8.62E+01	8.13E+01	7.56E+01	6.83E+01	6.31E+01	6.00E+01	4.99E+01	4.10E+01	3.07E+01	2.42E+01
350	1.11E+02	1.06E+02	1.00E+02	9.45E+01	8.65E+01	8.07E+01	7.87E+01	6.78E+01	5.74E+01	4.48E+01	3.65E+01
400	1.31E+02	1.26E+02	1.21E+02	1.15E+02	1.07E+02	1.00E+02	9.95E+01	8.77E+01	7.60E+01	6.11E+01	5.08E+01
450	1.54E+02	1.49E+02	1.44E+02	1.38E+02	1.29E+02	1.22E+02	1.22E+02	1.10E+02	9.67E+01	7.95E+01	6.73E+01
500	1.79E+02	1.74E+02	1.69E+02	1.62E+02	1.52E+02	1.45E+02	1.47E+02	1.34E+02	1.19E+02	9.99E+01	8.56E+01
600	2.35E+02	2.30E+02	2.24E+02	2.17E+02	2.06E+02	1.97E+02	2.02E+02	1.87E+02	1.70E+02	1.46E+02	1.28E+02
700	2.98E+02	2.93E+02	2.86E+02	2.78E+02	2.66E+02	2.56E+02	2.65E+02	2.48E+02	2.28E+02	2.28E+02	1.76E+02
800	3.68E+02	3.62E+02	3.56E+02	3.47E+02	3.33E+02	3.21E+02	3.34E+02	3.15E+02	2.93E+02	2.93E+02	2.32E+02
900	4.44E+02	4.38E+02	4.31E+02	4.22E+02	4.06E+02	3.93E+02	4.09E+02	3.89E+02	3.64E+02	3.64E+02	2.93E+02

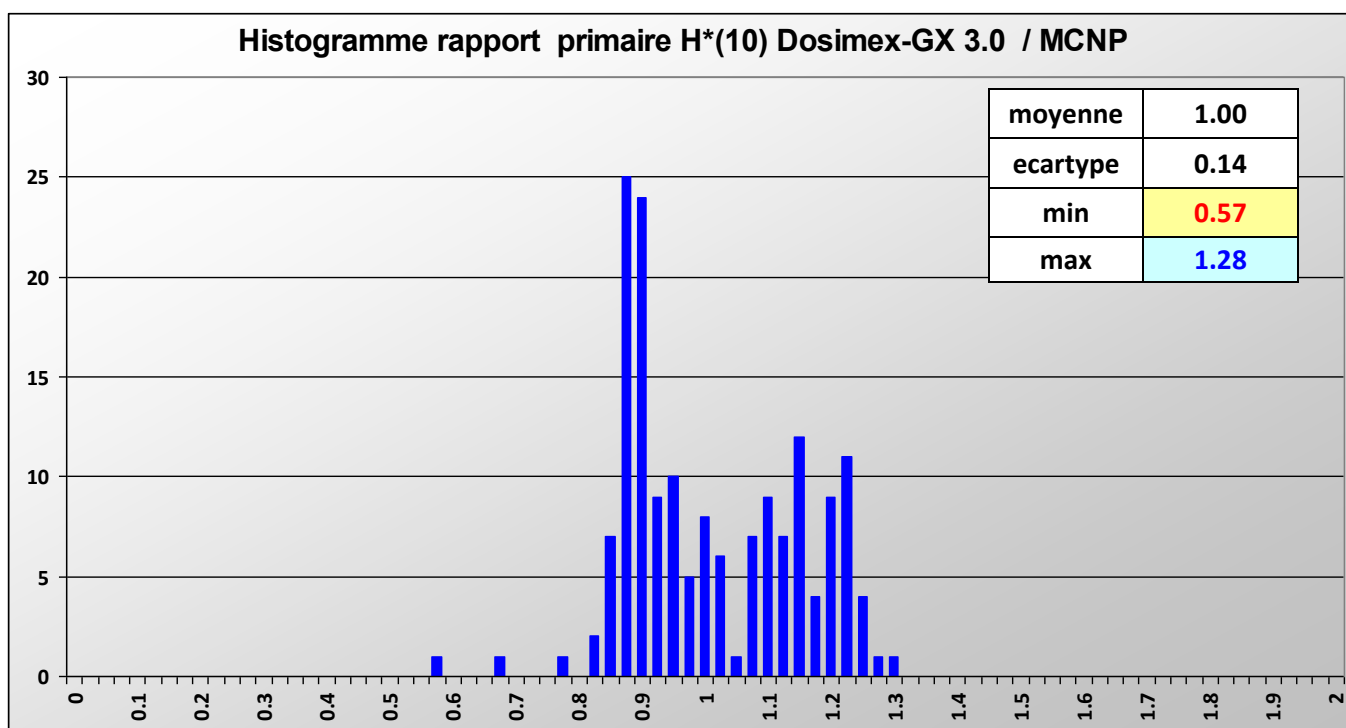
Ci-dessous à titre d'exemples les graphes pour 4 filtrations différentes :



Conclusion : L'écart quadratique moyen sur ces 154 points de comparaisons est égal à 14 %.

1.2.2 ANALYSE DES RAPPORTS DOSIMEX/MCNP EN TERMES DE $H^*(10)$

Rapport rendement DOSIMEX-GX / MCNP											
HT (kV)	None	0.2 mm Al	0.5 mm Al	1 mm Al	2 mm Al	3 mm Al	0.2 mm Cu	0.5 mm Cu	1 mm Cu	2 mm Cu	3 mm Cu
	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min
50	1.17	1.21	1.18	1.14	1.07	1.06	1.00	0.88	0.75	0.65	0.57
100	1.09	1.12	1.14	1.14	1.14	1.15	1.27	1.28	1.25	0.81	0.82
150	0.95	0.97	0.97	0.97	0.99	1.00	1.08	1.15	1.19	1.17	1.13
200	0.93	0.93	0.93	0.94	0.95	0.94	1.05	1.12	1.17	1.09	1.21
250	0.87	0.87	0.87	0.88	0.89	0.91	1.01	1.11	1.17	1.21	1.18
300	0.87	0.86	0.86	0.87	0.89	0.90	1.00	1.09	1.18	1.22	1.20
350	0.89	0.86	0.85	0.86	0.87	0.88	0.98	1.08	1.13	1.19	1.19
400	0.90	0.88	0.88	0.89	0.91	0.91	1.02	1.12	1.21	1.24	1.23
450	0.84	0.86	0.86	0.87	0.88	0.89	0.98	1.08	1.15	1.20	1.22
500	0.86	0.86	0.87	0.88	0.88	0.89	0.98	1.06	1.13	1.19	1.21
600	0.87	0.88	0.88	0.89	0.90	0.90	1.00	1.08	1.14	1.20	1.22
700	0.84	0.84	0.83	0.83	0.84	0.85	0.92	0.98	1.03	1.22	1.09
800	0.87	0.87	0.87	0.87	0.88	0.88	0.95	1.01	1.06	1.22	1.08
900	0.88	0.89	0.89	0.92	0.88	0.89	0.96	1.02	1.06	1.23	1.10



Pour ces 154 valeurs, l'écart moyen algébrique est égal à -1,00 ce qui dénote une absence significative de biais, et un écart type de 14 %. (où l'on retrouve ainsi l'écart quadratique moyen de 14 %)

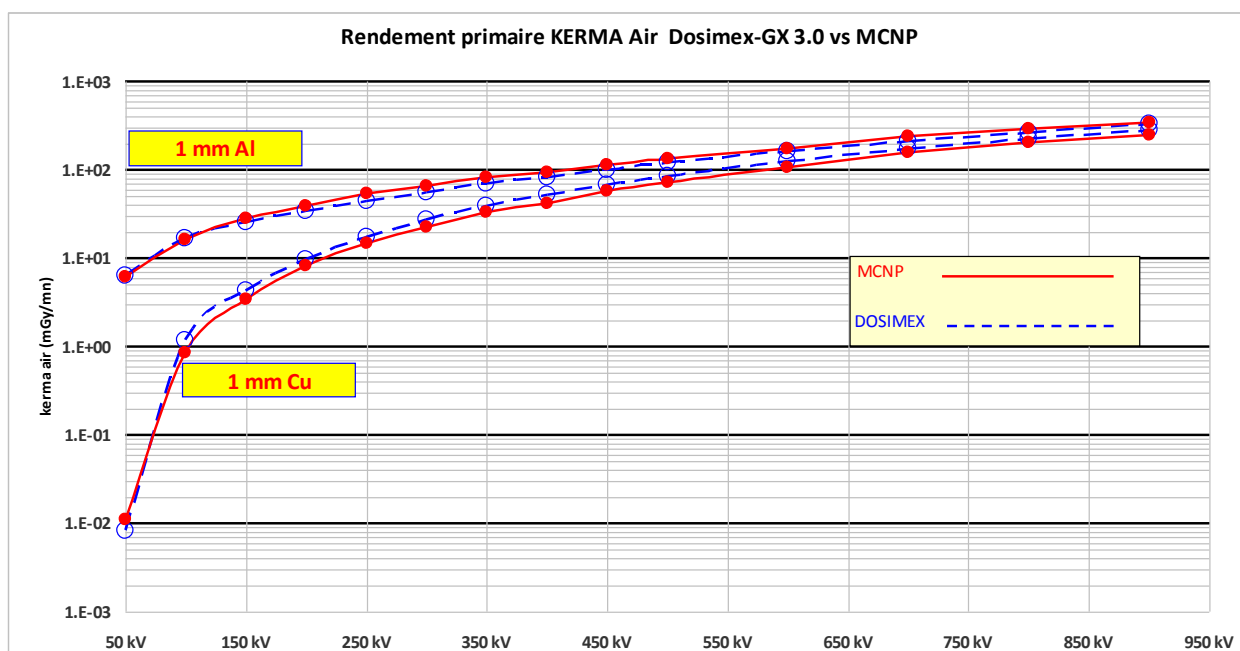
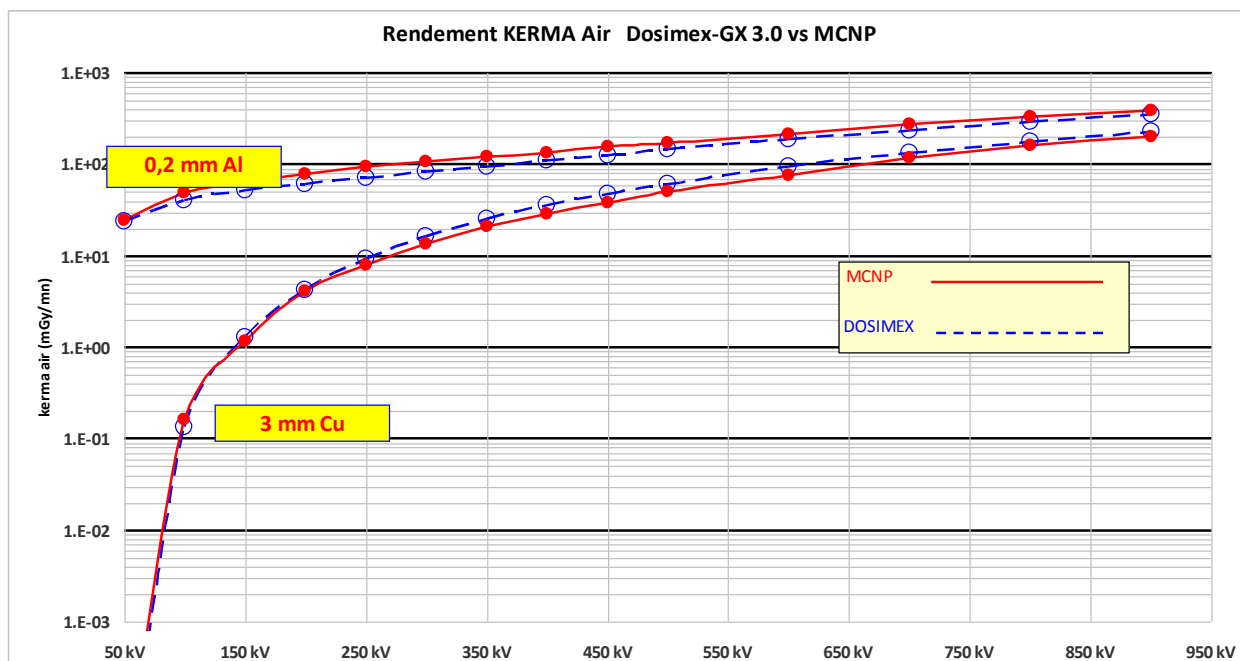
I- 3 : DÉBITS DE DOSE AMBIANT EN KERMA AIR DANS LE FAISCEAU PRIMAIRE:

I.3.1 COMPARAISONS DES RENDEMENT EN KERMA AIR(MGY/MN)

Les rendements en kerma air étaient utilisés (à tort) dans la version 2011 de la norme NF C 15-160

Rendement primaire KERMA Air MCNP (mSv/mn à 1 m pour 1 mA)											
HT (kV)	None	0.2 mm Al	0.5 mm Al	1 mm Al	2 mm Al	3 mm Al	0.2 mm Cu	0.5 mm Cu	1 mm Cu	2 mm Cu	3 mm Cu
	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min
50	1.48E+02	2.49E+01	1.15E+01	6.08E+00	3.03E+00	1.85E+00	5.62E-01	9.05E-02	1.11E-02	3.62E-04	1.82E-05
100	1.99E+02	4.89E+01	2.58E+01	1.65E+01	1.04E+01	7.76E+00	3.99E+00	1.82E+00	8.54E-01	3.73E-01	1.63E-01
150	2.23E+02	6.61E+01	4.00E+01	2.85E+01	1.97E+01	1.57E+01	1.01E+01	5.76E+00	3.48E+00	1.86E+00	1.16E+00
200	2.32E+02	7.85E+01	5.09E+01	3.87E+01	2.93E+01	2.48E+01	1.77E+01	1.17E+01	8.17E+00	5.66E+00	4.05E+00
250	2.40E+02	9.50E+01	6.65E+01	5.33E+01	4.19E+01	3.59E+01	2.76E+01	1.96E+01	1.46E+01	1.02E+01	7.86E+00
300	2.55E+02	1.08E+02	8.00E+01	6.62E+01	5.43E+01	4.79E+01	3.90E+01	2.93E+01	2.26E+01	1.67E+01	1.36E+01
350	2.62E+02	1.23E+02	9.54E+01	8.19E+01	6.97E+01	6.22E+01	5.25E+01	4.09E+01	3.35E+01	2.56E+01	2.11E+01
400	2.70E+02	1.36E+02	1.09E+02	9.48E+01	8.21E+01	7.50E+01	6.45E+01	5.19E+01	4.23E+01	3.37E+01	2.87E+01
450	2.86E+02	1.56E+02	1.29E+02	1.15E+02	1.01E+02	9.32E+01	8.33E+01	6.84E+01	5.72E+01	4.58E+01	3.87E+01
500	3.02E+02	1.74E+02	1.47E+02	1.33E+02	1.20E+02	1.12E+02	1.01E+02	8.54E+01	7.26E+01	5.88E+01	5.04E+01
600	3.45E+02	2.17E+02	1.90E+02	1.75E+02	1.61E+02	1.51E+02	1.39E+02	1.20E+02	1.05E+02	8.73E+01	7.63E+01
700	4.16E+02	2.80E+02	2.55E+02	2.41E+02	2.25E+02	2.13E+02	2.02E+02	1.79E+02	1.59E+02	1.36E+02	1.19E+02
800	4.96E+02	3.32E+02	3.04E+02	2.89E+02	2.72E+02	2.60E+02	2.50E+02	2.25E+02	2.02E+02	1.79E+02	1.60E+02
900	5.17E+02	3.85E+02	3.60E+02	3.45E+02	3.31E+02	3.19E+02	3.04E+02	2.77E+02	2.52E+02	2.21E+02	2.00E+02

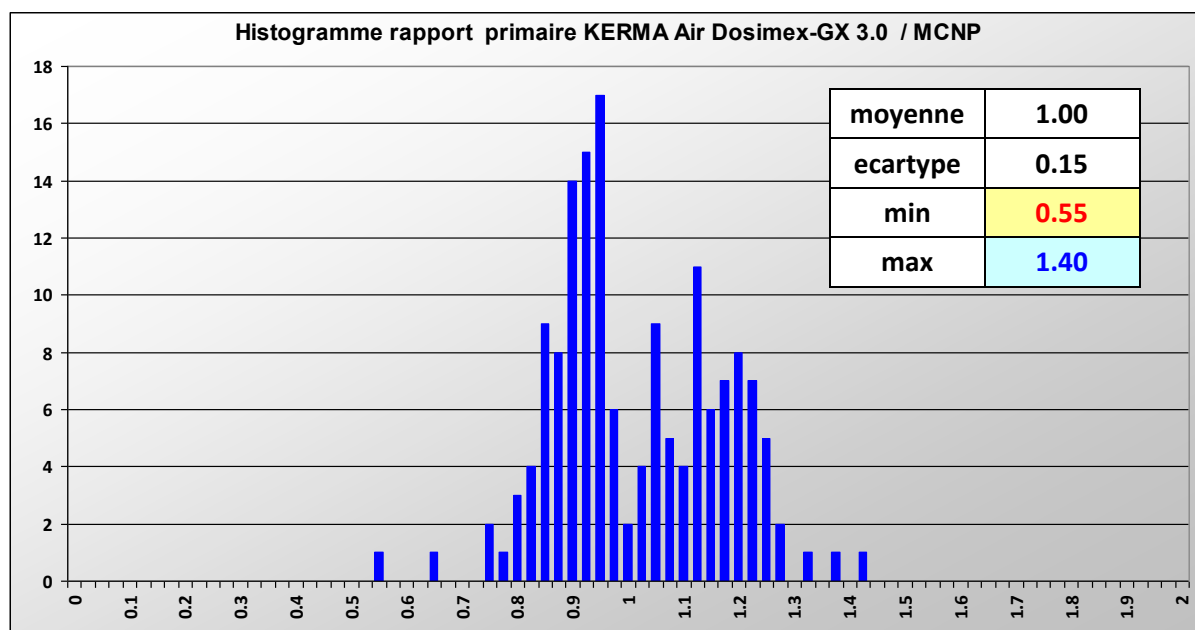
Rendement primaire KERMA Air DOSIMEX-GX 3.0 (mSv/mn à 1 m pour 1 mA)											
HT (kV)	None	0.2 mm Al	0.5 mm Al	1 mm Al	2 mm Al	3 mm Al	0.2 mm Cu	0.5 mm Cu	1 mm Cu	2 mm Cu	3 mm Cu
	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min	mGy/min
50	1.71E+02	2.40E+01	1.16E+01	6.30E+00	3.10E+00	1.90E+00	5.31E-01	7.60E-02	8.13E-03	2.30E-04	1.00E-05
100	2.04E+02	4.10E+01	2.53E+01	1.70E+01	1.13E+01	8.70E+00	5.22E+00	2.55E+00	1.17E+00	3.57E-01	1.36E-01
150	2.16E+02	5.20E+01	3.50E+01	2.60E+01	1.90E+01	1.50E+01	1.12E+01	6.95E+00	4.28E+00	2.17E+00	1.29E+00
200	2.20E+02	6.10E+01	4.40E+01	3.40E+01	2.70E+01	2.30E+01	1.90E+01	1.36E+01	9.73E+00	6.12E+00	4.28E+00
250	2.22E+02	7.10E+01	5.40E+01	4.40E+01	3.70E+01	3.20E+01	2.86E+01	2.24E+01	1.74E+01	1.22E+01	9.28E+00
300	2.27E+02	8.30E+01	6.60E+01	5.60E+01	4.80E+01	4.30E+01	4.00E+01	3.30E+01	2.71E+01	2.04E+01	1.62E+01
350	2.39E+02	9.60E+01	7.90E+01	7.00E+01	6.10E+01	5.60E+01	6.10E+01	4.60E+01	3.88E+01	3.05E+01	2.50E+01
400	2.50E+02	1.10E+02	9.30E+01	8.30E+01	7.50E+01	7.00E+01	6.80E+01	6.00E+01	5.20E+01	4.23E+01	3.54E+01
450	2.68E+02	1.27E+02	1.11E+02	1.01E+02	9.20E+01	8.60E+01	8.50E+01	7.60E+01	6.75E+01	5.60E+01	4.76E+01
500	2.81E+02	1.46E+02	1.30E+02	1.20E+02	1.10E+02	1.03E+02	1.04E+02	9.40E+01	8.46E+01	7.12E+01	6.14E+01
600	3.15E+02	1.89E+02	1.72E+02	1.62E+02	1.51E+02	1.44E+02	1.48E+02	1.37E+02	1.26E+02	1.09E+02	9.58E+01
700	3.62E+02	2.38E+02	2.22E+02	2.11E+02	1.99E+02	1.91E+02	1.97E+02	1.86E+02	1.72E+02	1.51E+02	1.35E+02
800	4.17E+02	2.94E+02	2.77E+02	2.66E+02	2.53E+02	2.44E+02	2.53E+02	2.40E+02	2.24E+02	2.00E+02	1.79E+02
900	4.79E+02	3.55E+02	3.39E+02	3.27E+02	3.13E+02	3.02E+02	3.14E+02	3.00E+02	2.82E+02	2.54E+02	2.30E+02



Conclusion : L'écart quadratique moyen sur ces 154 points de comparaisons est égal à 15 %

1.3.2 ANALYSE DES RAPPORTS DOSIMEX/MCNP EN KERMA AIR

Rapport rendement DOSIMEX-GX / MCNP											
HT (kV)	None	0.2 mm Al	0.5 mm Al	1 mm Al	2 mm Al	3 mm Al	0.2 mm Cu	0.5 mm Cu	1 mm Cu	2 mm Cu	3 mm Cu
	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min	mSv/min
50	1.16	0.96	1.01	1.04	1.02	1.03	0.94	0.84	0.73	0.64	0.55
100	1.03	0.84	0.98	1.03	1.09	1.12	1.31	1.40	1.37	0.96	0.83
150	0.97	0.79	0.88	0.91	0.96	0.96	1.10	1.21	1.23	1.17	1.11
200	0.95	0.78	0.86	0.88	0.92	0.93	1.07	1.16	1.19	1.08	1.06
250	0.93	0.75	0.81	0.83	0.88	0.89	1.04	1.14	1.19	1.20	1.18
300	0.89	0.77	0.83	0.85	0.88	0.90	1.03	1.13	1.20	1.22	1.19
350	0.91	0.78	0.83	0.85	0.88	0.90	1.16	1.12	1.16	1.19	1.18
400	0.93	0.81	0.85	0.88	0.91	0.93	1.05	1.16	1.23	1.25	1.23
450	0.94	0.81	0.86	0.88	0.91	0.92	1.02	1.11	1.18	1.22	1.23
500	0.93	0.84	0.88	0.90	0.92	0.92	1.03	1.10	1.17	1.21	1.22
600	0.91	0.87	0.91	0.93	0.94	0.95	1.06	1.14	1.20	1.25	1.26
700	0.87	0.85	0.87	0.88	0.88	0.90	0.98	1.04	1.08	1.11	1.13
800	0.84	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	1.01	1.07	1.11	1.12	1.12
900	0.93	0.92	0.94	0.95	0.95	0.95	1.03	1.08	1.12	1.15	1.15



L'écart algébrique moyen pour ces 154 valeurs est égal à 1 %, et l'écart absolu moyen à 15 %.

Comme précédemment, on constate que les écarts maximum sont apparaissent avec une filtration en cuivre.

I- 4 : COMPARAISONS RENDEMENTS POUR LES ANODES AUTRES QUE TUNGSTÈNE :

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

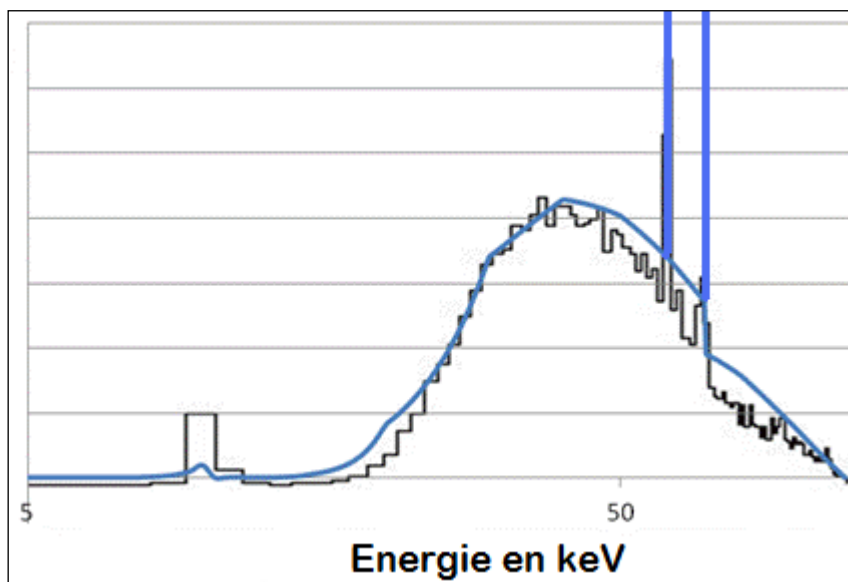
Pour le Kerma on a en théorie $K(\text{Cu})/K(\text{W})=0,4$ et $K(\text{Mo})/K(\text{W})=0,8$ entre 50 et 200kV.

Pour Dosimex on a :

	W	Mo	Cu	Mo / W(0,8)	Cu / W(0,4)
K à 50kV sans filtration	175.6	145.53	111	0.83	0.63
150kV sans filtration	220	154	109	0.70	0.50
200kV sans filtration	223	152	105	0.68	0.47

I- 5 : COMPARATIF SPECTRE

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



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

Partie II. VALIDATION RAYONNEMENT DIFFUSE

II- 1 : CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA VALIDATION AVEC LE RAPPORT CEA-R 6452

Les valeurs de référence utilisées pour les débits d'équivalents de dose en diffusé sont prises dans le rapport CEA-R 6452 :

« Évaluation par calcul Monte-Carlo des facteurs de diffusion en termes d'équivalent de dose des rayonnements issus d'un générateur X ... »

(Laurent Bourgois, Stéphanie Ménard, 2017)

Ce rapport ([lien](#)) s'appuie sur plus de 4000 calculs réalisés avec MCNP de diffusion sur un écran, pour divers matériaux, filtration et angles de diffusions !

Pour chaque configuration le rapport donne un « facteur de diffusion α » qui est directement calculé, dans la version 2.2, en termes de $H^*(10)$, permettant ainsi une vérification rapide pour les utilisateurs.

Ce facteur de diffusion s'inscrit dans le cadre d'un modèle particulier que l'on retrouve dans la norme NFC 15-160 et qui est repris dans le rapport CEA-R.

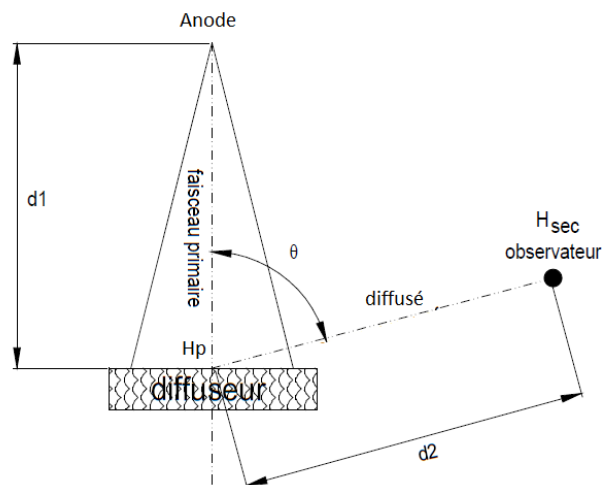
Ce modèle simplifié nécessite une discussion préalable exposée ci-après

Dans le rapport, il est de plus calculé en termes de rapport de kerma air, mais aussi d'équivalent de dose $H^*(10)$.



II- 2 : MODÈLE SIMPLIFIÉ DE DIFFUSION VS NF C 15-160

Pour le calcul de la diffusion, le rapport CEA-R 6452 reprend le schéma suivant proposé dans la norme NFC 15-160 :



Ce schéma s'accompagne d'un modèle simplifié qui peut se mettre sous la forme :

$$\dot{H}_s = \frac{\Gamma_R k}{d_1^2 d_2^2} \quad (1)$$

Dans ce modèle, la quantité $\frac{\Gamma_R}{d_1^2}$ représente le débit d'équivalent de dose \dot{H}_p générée par le faisceau primaire au niveau de la surface d'entrée de l'écran à la distance d_1 , avec Γ_R le « rendement » normalisé à une distance de 1 m mais surtout exprimé comme il se doit en Sv.m².

Le facteur k se définit alors comme $k = \frac{\dot{H}_s d_2^2}{\dot{H}_p}$ (2)

L'équation (1) montre alors que la dimension de k est en m². Par contre il présente l'intérêt de ne pas dépendre de d_2 . En effet, dans le cas où les distances de calculs sont suffisamment élevées pour pouvoir considérer l'écran comme une source ponctuelle secondaire de rayonnement diffusé, la quantité $\dot{H}_s d_2^2$ peut s'entendre comme le débit de dose à une distance unitaire de 1 m, compte-tenu de la relation valable avec une source ponctuelle:

$$\dot{H}_s(d_2) = \frac{\dot{H}_s(1m)}{d_2^2} \quad (3)$$

Remarque : sur le plan dimensionnel la relation (3) doit s'entendre comme $\frac{\dot{H}_s(d_2)}{1(m^2)} = \frac{\dot{H}_s(1m)}{d_2^2}$.

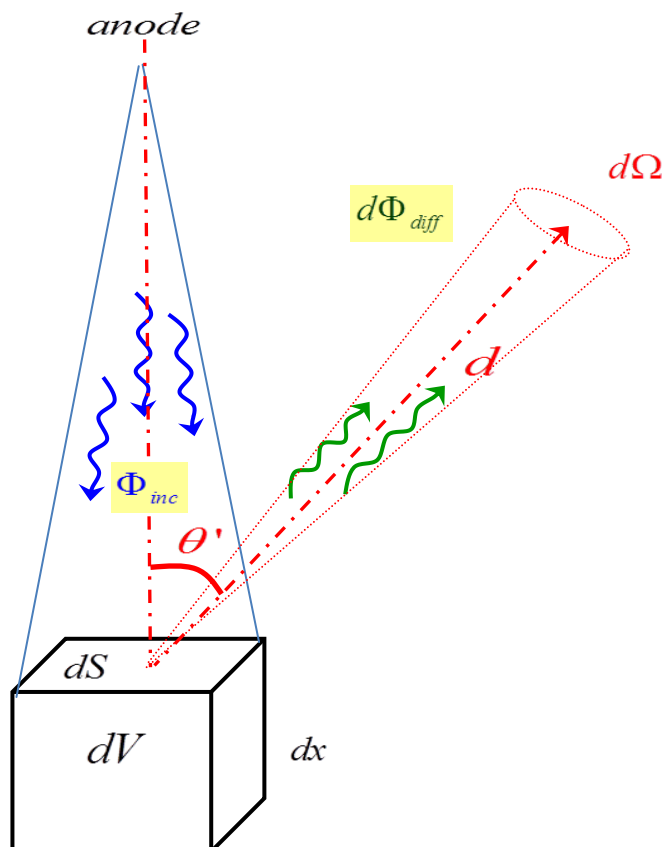
Dans cette acceptation on comprend alors que k s'écrit $k = \frac{\dot{H}_s d_2^2}{\dot{H}_p} = \frac{\dot{H}_s (1m) \times 1m^2}{\dot{H}_p}$ où l'on retrouve bien la dimension de k en m^2 mais aussi et surtout le fait que dans l'acceptation d'un modèle ponctuel, k est indépendant de d_2 .

Remarque : le modèle ponctuel (1) sous-entend que les dimensions de la cible sont petites devant la distance d_2 . Si cette conditions n'est pas respectée, alors le modèle (1) devient inadapté car il ne tient pas compte d'effets géométriques du par exemple aux dimensions latérales de la cible, voire à sa forme particulière.

Dans Dosimex, ainsi que dans MCNP, le calcul tient compte des dimensions de la cible - surface et épaisseur- considérée comme un cylindre. Ainsi, en toute rigueur, k dépend (*au second ordre*) de d_2 et cet effet peut être notable à de courtes distances. L'aspect ponctuel peut être accepté pour une distance $d_2 = 1m$ et une surface éclairée de 200 cm^2 , ce qui correspond à un disque de 8 cm de rayon. Ce sont les paramètres utilisés pour les calculs sous MCNP et repris avec Dosimex dans le cadre de cette validation. Nous reviendrons ultérieurement sur l'épaisseur de la cible qui peut aussi influencer le résultat.

II- 3 : MÉTHODE MISE EN ŒUVRE PAR DOSIMEX-GX 3.0 POUR LE CALCUL DU RAYONNEMENT DIFFUSÉ.

II.3.1 SCHÉMA DE PRINCIPE : DIFFUSION DANS UN ÉLÉMENT DE VOLUME.



Les dimensions de la cible étant faibles devant le libre parcours moyen, on peut considérer que la fluence est homogène dans le volume cible de volume élémentaire $dV = dx \, dS$. Dans ces conditions, on peut montrer que le nombre de photons diffusés dans tout l'espace est égal à :

$$dN_{\text{diff.}} = \mu_{\text{Compt.}} \Phi_{\text{inc.}} dV \quad (1)$$

Avec $\mu_{\text{Compt.}}$ le coefficient d'atténuation linéique Compton du matériau pour l'énergie des photons incidents encore égal à $\mu_{\text{Compt.}} = n \sigma_{\text{Compt.}}$ avec :

- n : la densité de la cible en nombre de noyau
- $\sigma_{\text{Compt.}}$: la section efficace Compton (*i.e. tous angles confondus*)

Si la diffusion était isotrope, la fluence diffusée par cet élément de cible à une distance d serait égale à :

$$d\Phi_{\text{diff}} = \frac{dN_{\text{diff.}}}{4\pi d^2} = n \frac{\sigma_{\text{Compt.}}}{4\pi d^2} \Phi_{\text{inc.}} dV = n \frac{\sigma_{\text{Compt.}}}{4\pi} \Phi_{\text{inc.}} dV d\Omega \quad (2a)$$

Soit encore, en tenant compte du fait que $\frac{1}{d^2}$ est égal à l'élément d'angle solide $d\Omega$ (pour un pseudo-dosimètre de 1 cm^2):

$$d\Phi_{\text{diff}} = n \frac{\sigma_{\text{Compt.}}}{4\pi} \Phi_{\text{inc.}} dV d\Omega \quad (2b)$$

En prenant en compte le caractère non-isotrope de la diffusion Compton au travers de la section efficace différentielle de Klein et Nishina, fonction de l'angle de diffusion et de l'énergie des photons, on peut écrire :

$$\frac{d\sigma_{e^-, \text{Compt.}}}{d\Omega}(\theta) = \frac{1}{2} r_0^2 \frac{1 + \cos^2\theta}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)^2} \left[1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)(1 + \alpha(1 - \cos\theta))} \right] \text{ avec } \alpha = \frac{E_\gamma}{m_e c^2}$$

La relation (2b) devient alors :

$$d\Phi_{\text{diff}}(\theta) = n \frac{d\sigma_{e^-, \text{Compt.}}}{d\Omega}(\theta) \Phi_{\text{inc.}} d\Omega dV = n \frac{d\sigma_{e^-, \text{Compt.}}}{d\Omega}(\theta) \Phi_{\text{inc.}} d\Omega dx dS \quad (3)$$

Remarque : par rapport au schéma de principe ci-dessus, l'angle θ considéré dans la formule ci-dessus est égal à $\theta = 180^\circ - \theta'$

Le calcul complet du rayonnement diffusé pour une cible de grande dimension (*plusieurs livres parcours moyens*) se fait en intégrant cette relation sur toutes les énergies du spectre X mais surtout sur toute la surface de la cible et toute la profondeur, en tenant compte de l'absorption du faisceau incident et de l'autoabsorption du rayonnement diffusé.

Cette relation montre, pour des distances assez grandes devant les dimensions de la cible, que la fluence incidente est, entre autres, proportionnelle à la surface irradiée S de la cible.

Le Code DOSIMEX-GX 3.0 met en œuvre ce modèle, **ainsi qu'un modèle similaire pour prendre en compte la fluorescence X**, pour calculer le spectre en énergie et la fluence diffusée à un angle et une distance donnée en fonction :

- De la nature de la cible
- De son épaisseur
- De sa surface

Ecran

Nature	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; display: inline-block;">Eau</div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; display: inline-block;">Masse vol.</div>
Epaisseur	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; display: inline-block;">200</div> mm	
Surface	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; display: inline-block;">20</div> cm ²	

Dans ce cadre, on peut alors écrire en première approximation $k = \alpha S$, avec $\alpha = k/S$ un facteur ne dépendant plus (*au 1^{er} ordre*) de la surface. C'est ce coefficient α qui est introduit et calculé dans le rapport CEA-R 6452

II.3.2 RECHERCHE DE FACTEURS DE DIFFUSIONS PERTINENTS

Si l'on cherche à établir un « facteur de diffusion » fondamental, l'on pourrait écrire, en oubliant pour l'instant le concept de dose, la relation élémentaire suivante pour un centre diffuseur :

$$E_{\text{diff}} = k' E_{\text{inc}}$$

L'énergie diffusée, sous-entendu dans une direction donnée, est proportionnelle à l'énergie incidente sur le diffuseur. C'est à ce niveau que l'on comprend que la distance d_1 n'est pas, elle non plus, un paramètre pertinent du problème de diffusion : peu importe d'où arrive l'énergie E_{inc} ! Et pour l'instant on ne se soucie pas non plus de la distance d_2

Le coefficient k' ainsi défini est alors un pur « rendement de diffusion en énergie » sans dimension et mieux encore « universel » (*i.e. indépendant des distances, mais bien entendu dépendant des énergies des photons, de la nature du matériau, de son volume etc...*)

Pour réintroduire le concept de dose tout en gardant une telle indépendance on peut écrire :

$H_s(d_2) \times d_2^2 = k H_p$, équation analogue à la relation (1), où l'on voit là encore que la dimension de k est en m^2 .

Pour conserver un rapport sans dimensions, nous calculons dans Dosimex la quantité sans dimension $\frac{H_s(d_2)}{H_p(\text{écran})}$, appelé ici « **rendement de diffusion en dose** » et noté ϵ_{diff} , en référence à la notation utilisée pour les rendements (*efficacité*) de détection.

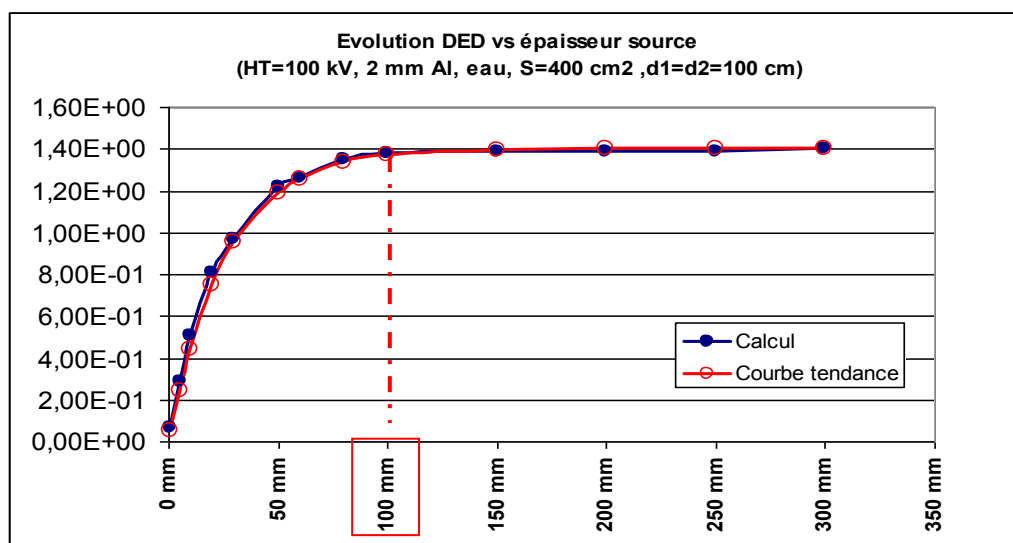
Nous pouvons ainsi définir 3 « indicateurs » de diffusion implémentés dans Dosimex :

- ϵ_{diff} : le rendement de diffusion en dose sans dimension, dépendant de la distance d_2 et de la surface de l'écran.
- $k = \epsilon_{\text{diff}} d_2^2$: le facteur de diffusion en m^2 , indépendant de d_2 mais proportionnel (au 1^{er} 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*)
- $\alpha = k/S = \epsilon_{\text{diff}} / S d_2^2$, 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**.

II.3.3 IMPACT DE L'ÉPAISSEUR DE CIBLE ET RECHERCHE D'UNE ÉPAISSEUR DE SATURATION

Les 3 facteurs ainsi définis, et notamment α , dépendent de l'épaisseur de la cible tant que l'on n'atteint pas une épaisseur de saturation. Une petite étude va nous permettre de définir un paramètre assurant à l'opérateur que les conditions de saturations sont atteintes ou non. Cette étude est menée avec un diffuseur en eau pour une HT donné

Lorsque l'on augmente progressivement l'épaisseur de la cible on obtient une courbe de saturation typiquement exponentielle. Pour une HT de 100 kV le coefficient de l'exponentielle, assimilé à un coefficient μ d'atténuation linéique, correspondant alors à un libre parcours moyen (**lpm**) de 2,6 cm. Avec 3 lpm nous sommes à 5 % de la saturation, soit une épaisseur minimale pour cette hypothèse de 8 cm environ



Dans l'eau on obtient un lpm de 2,6 cm pour une énergie de 28 keV, soit 1/3 environ de l'énergie max. En prenant ainsi une épaisseur de 10 cm environ on peut considérer que la saturation est atteinte, à peu de chose près.

Une étude similaire avec le plomb donne un résultat similaire : la courbe d'atténuation correspond à un libre parcours moyen de 0,045 mm obtenu dans le plomb avec une énergie de 33 keV, là encore proche de 1/3 de l'énergie max. Nous pouvons ainsi calculer aisément et proposer à l'utilisateur un indicateur de saturation de l'ordre de grandeur de 3,5 lpm (*par précaution*), avec un lpm calculé à 1/3 de l'énergie max.

Dans Dosimex GX 2.2, lorsque l'on choisit un milieu diffusant, le code calcule directement la valeur de 3,5 lpm dans le milieu choisi pour une énergie égale au tiers de la HT.

☒ **Calcul de diffusion**

Épaisseur (e) minimale de saturation en diffusion **118,26mm**

Ecran sur le faisceau primaire

Nature	Eau	Masse vol.
--------	------------	------------

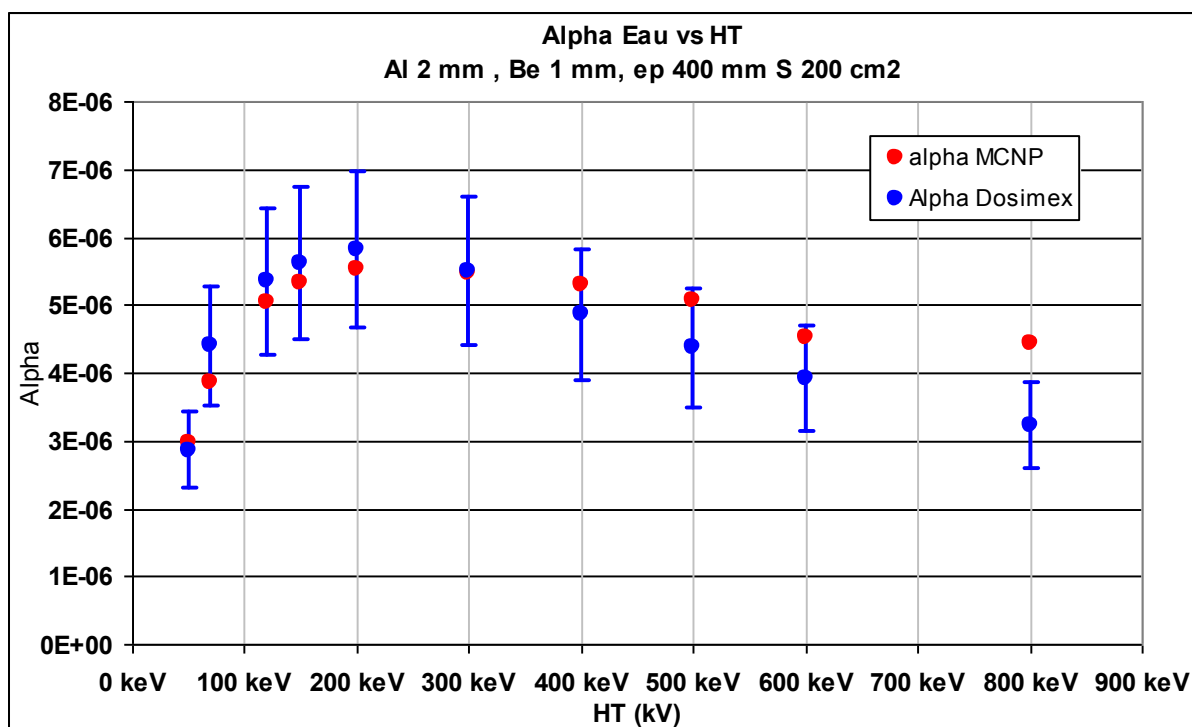
Ainsi pour une HT de 800 kV il faudrait prendre au moins 32 cm d'eau et 3 mm de Pb pour être proche de la saturation à 5 % près

II- 4 : CALCULS DIFFUSION DOSIMEX VS MCNP

II.4.1 LES CAS ÉTUDIÉS

- ❖ **Cas 1 à 5** : Matériaux Eau, TNT, Béton, Fer et Plomb à 45° pour toutes les 10 HT proposées (50, 70, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800 kV) avec une filtration de 2 mm d'Al et 1 mm de béryllium et une surface irradiée de 200 cm² (idem MCNP).
- ❖ **Cas 6** : Idem cas 1 pour Idem matériau avec un angle d'incidence de 60 %
- ❖ **Cas 7** : Idem cas 1 pour matériau eau avec un angle d'incidence de 10 %
- ❖ **Cas 8** : Idem cas 1 pour matériau eau avec 3 mm d'Al au lieu de 2 mm
- ❖ **Cas 9** : matériau eau, HT 50 keV, angle 45 ° avec 1 mm de Be pour des épaisseurs d'Al de 1 à 6 mm
- ❖ **Cas 10** : matériau Plomb, 1 mm Be + 2 mm Al, HT =50kV, pour des angles de 10 ° à 90 ° (85° pour Dosimex)
- ❖ **Cas 11** : matériau Eau 1 mm Be + 2 mm Al pour des angles de 10 ° à 90 ° (85 ° pour Dosimex)

CAS 1 : EAU, 45° FILTRATION 2 MM AL+ 1 MM BE, S= 200 CM2vs HT

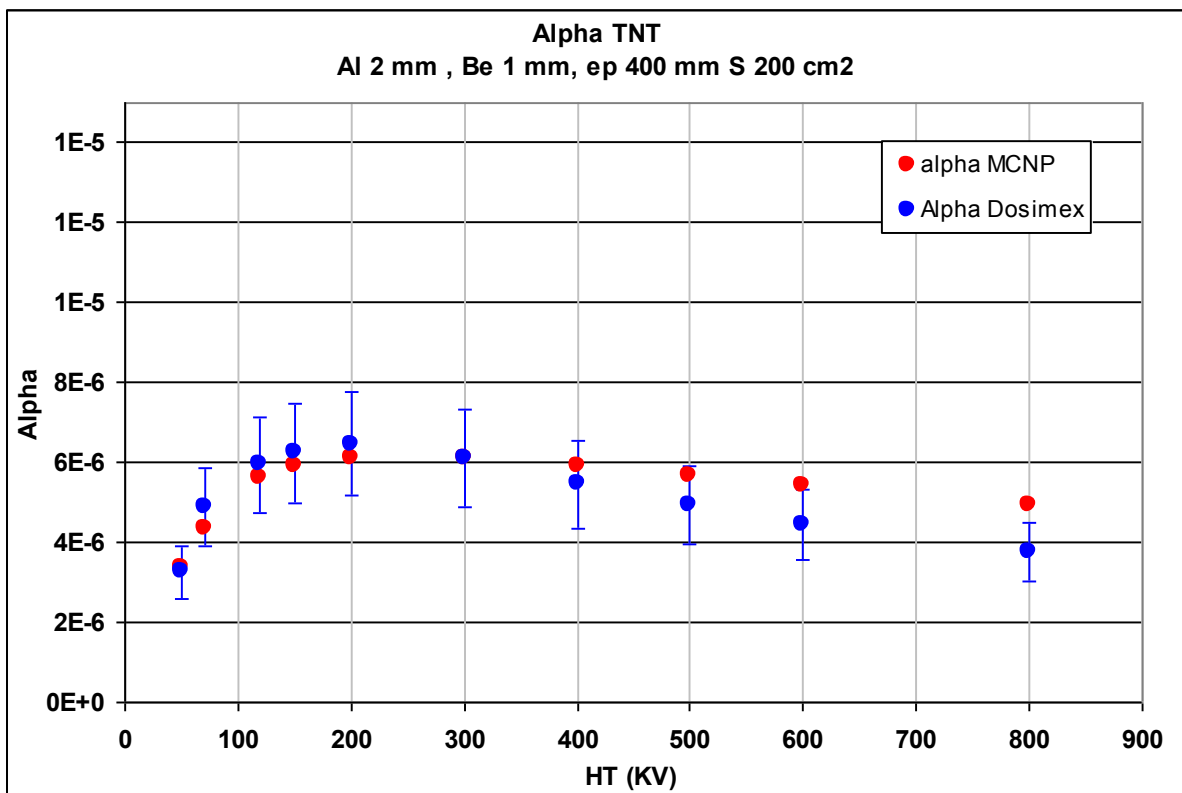


Des barres d'erreurs (+/- 20 %) encadrent les valeurs Dosimex

tension	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
50 keV	2.97E-06	2.86E-06	-4%
70 keV	3.87E-06	4.39E-06	13%
120 keV	5.04E-06	5.34E-06	6%
150 keV	5.31E-06	5.62E-06	6%
200 keV	5.52E-06	5.81E-06	5%
300 keV	5.48E-06	5.49E-06	0%
400 keV	5.30E-06	4.85E-06	-8%
500 keV	5.07E-06	4.36E-06	-14%
600 keV	4.51E-06	3.92E-06	-13%
800 keV	4.42E-06	3.22E-06	-27%
Ecart quadratique moyen			12%

Conclusion partielle pour l'eau : on constate une bonne adéquation entre les 2 modèles, avec une bonne reproduction de la variation des coefficients alpha vs HT .

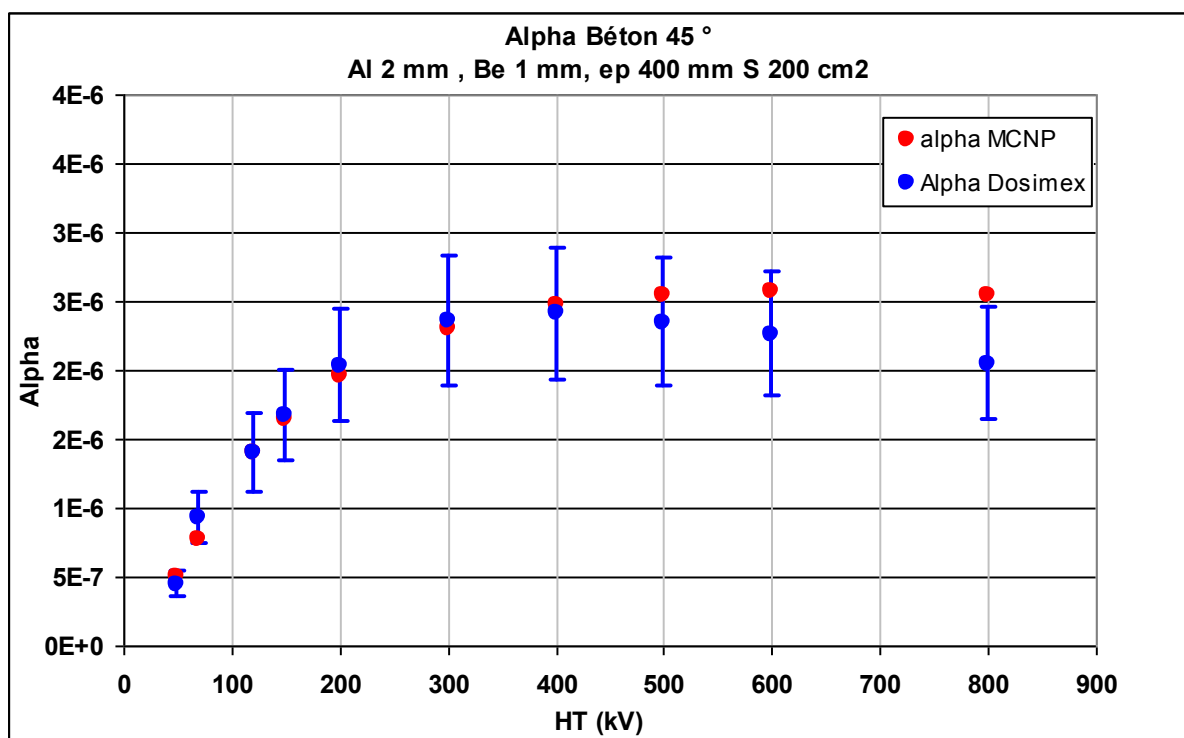
CAS 2 : **TNT**, 45° FILTRATION 2 MM AL+ 1 MM BE, S= 200 CM2vs HT



	tension	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
3.79E-06	50	3.37E-06	3.25E-06	-4%
4.76E-06	70	4.36E-06	4.89E-06	12%
5.03E-06	120	5.63E-06	5.94E-06	6%
4.99E-06	150	5.92E-06	6.25E-06	6%
4.73E-06	200	6.13E-06	6.46E-06	5%
4.08E-06	300	6.12E-06	6.12E-06	0%
3.51E-06	400	5.90E-06	5.45E-06	-8%
3.06E-06	500	5.65E-06	4.92E-06	-13%
2.71E-06	600	5.40E-06	4.45E-06	-18%
2.21E-06	800	4.92E-06	3.76E-06	-24%
Ecart quadratique moyen				12%

Conclusion partielle pour le TNT : idem cas précédent

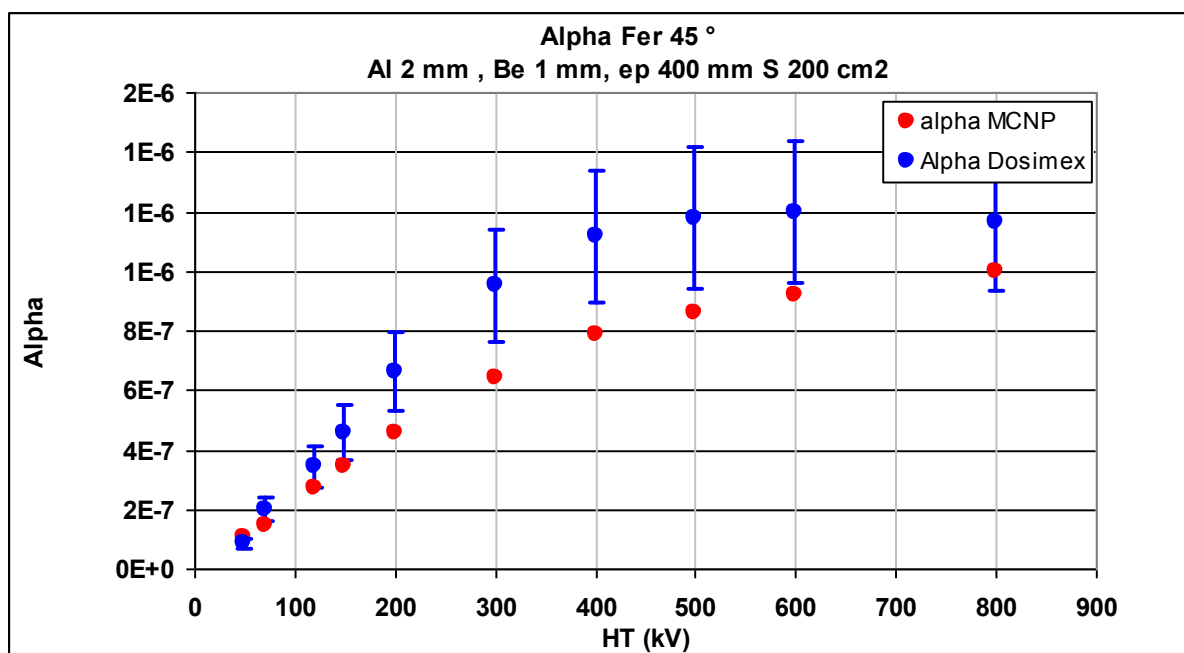
CAS 3 : **BÉTON**, 45° FILTRATION 2 MM AL+ 1 MM BE, S= 200 CM2vs HT



tension	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
50	5.04E-07	4.50E-07	-11%
70	7.71E-07	9.27E-07	20%
120	1.40E-06	1.40E-06	0%
150	1.65E-06	1.67E-06	1%
200	1.96E-06	2.03E-06	4%
300	2.30E-06	2.36E-06	3%
400	2.47E-06	2.41E-06	-2%
500	2.54E-06	2.35E-06	-7%
600	2.57E-06	2.26E-06	-12%
800	2.55E-06	2.05E-06	-20%
Ecart quadratique moyen			11%

Conclusion partielle pour le béton : on retrouve à nouveau ici une bonne adéquation entre les deux codes. Le béton est référencé pour les build-up de Taylor

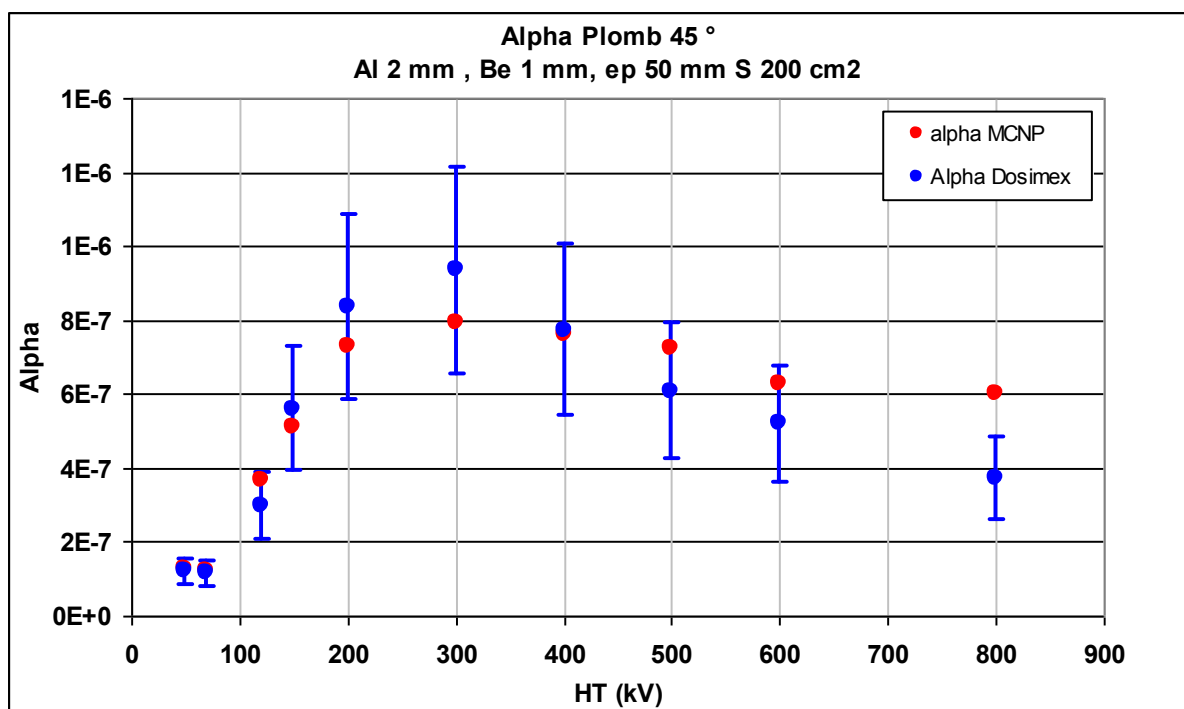
CAS 4 : **FER**, 45° FILTRATION 2 MM AL+ 1 MM BE, S= 200 CM2vs HT



tension	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
50	1,08E-07	8,48E-08	-21%
70	1,48E-07	1,96E-07	32%
120	2,70E-07	3,42E-07	27%
150	3,43E-07	4,58E-07	34%
200	4,56E-07	6,63E-07	45%
300	6,43E-07	9,50E-07	48%
400	7,87E-07	1,11E-06	42%
500	8,59E-07	1,18E-06	37%
600	9,22E-07	1,20E-06	30%
800	1,00E-06	1,17E-06	17%
Ecart moyen			29%

Conclusion partielle pour le fer : on constate une légère surestimation pour la diffusion dans le fer, tout en restant significativement dans l'ordre de grandeur

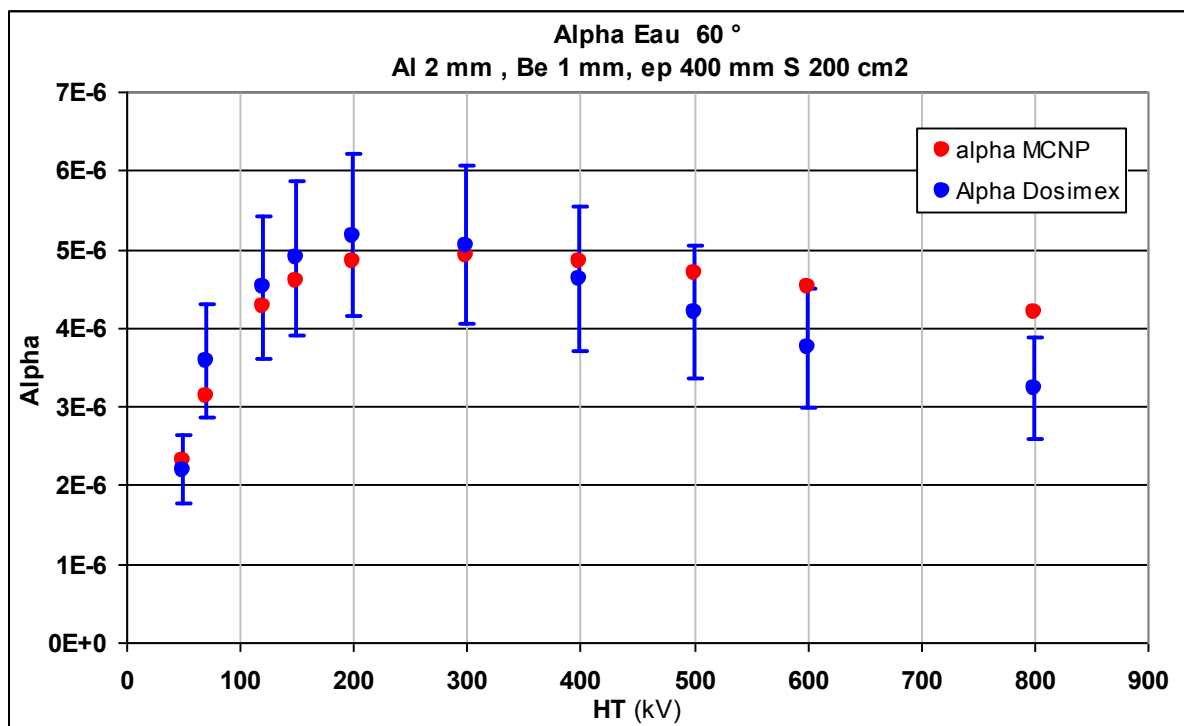
CAS 5: **PLOMB**, 45° FILTRATION 2 MM AL+ 1 MM BE, S= 200 CM2VS HT



tension	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
50	1.27E-07	1.23E-07	-3%
70	1.25E-07	1.20E-07	-4%
120	3.67E-07	3.14E-07	-14%
150	5.12E-07	5.88E-07	15%
200	7.29E-07	8.76E-07	20%
300	7.92E-07	9.82E-07	24%
400	7.63E-07	8.12E-07	6%
500	7.23E-07	6.39E-07	-12%
600	6.28E-07	5.47E-07	-13%
800	6.01E-07	3.93E-07	-35%
Ecart quadratique moyen			17%

Conclusion partielle sur le plomb : on constate une excellente adéquation entre les 2 codes. A noter que le calcul de diffusion dans le plomb a nécessité d'implémenter dans Dosimex-GX 3.0 le mécanisme de fluorescence X, composante essentielle de la diffusion dans de tels matériaux (Z élevé), notamment à ces énergies relativement basses.

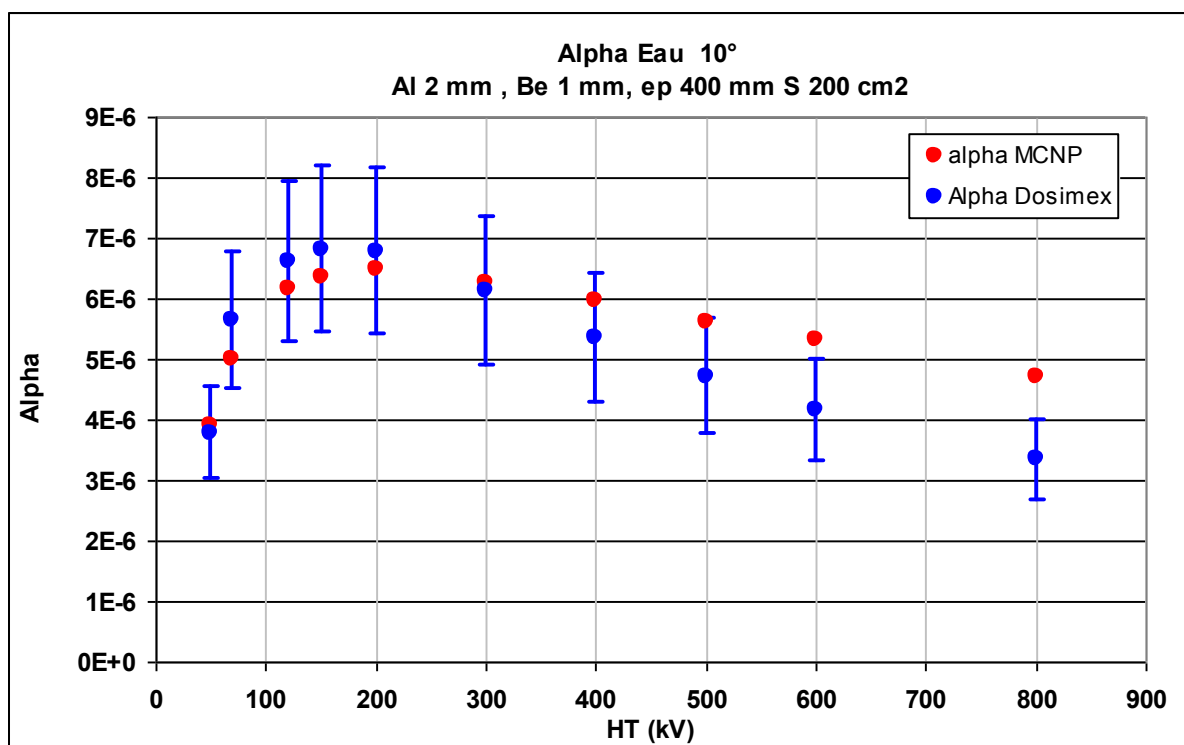
CAS 6 : EAU, 60°, FILTRATION 2 MM AL+ 1 MM BE, S= 200 CM2VS HT



tension	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
50	2.32E-06	2.19E-06	-6%
70	3.13E-06	3.57E-06	14%
120	4.28E-06	4.51E-06	5%
150	4.58E-06	4.88E-06	7%
200	4.83E-06	5.17E-06	7%
300	4.91E-06	5.05E-06	3%
400	4.84E-06	4.61E-06	-5%
500	4.68E-06	4.19E-06	-10%
600	4.51E-06	3.74E-06	-17%
800	4.19E-06	3.22E-06	-23%
Ecart quadratique moyen			11%

Conclusion partielle : on retrouve à nouveau avec l'eau une excellente adéquation avec toujours un léger décrochage pour les valeurs élevées de HT

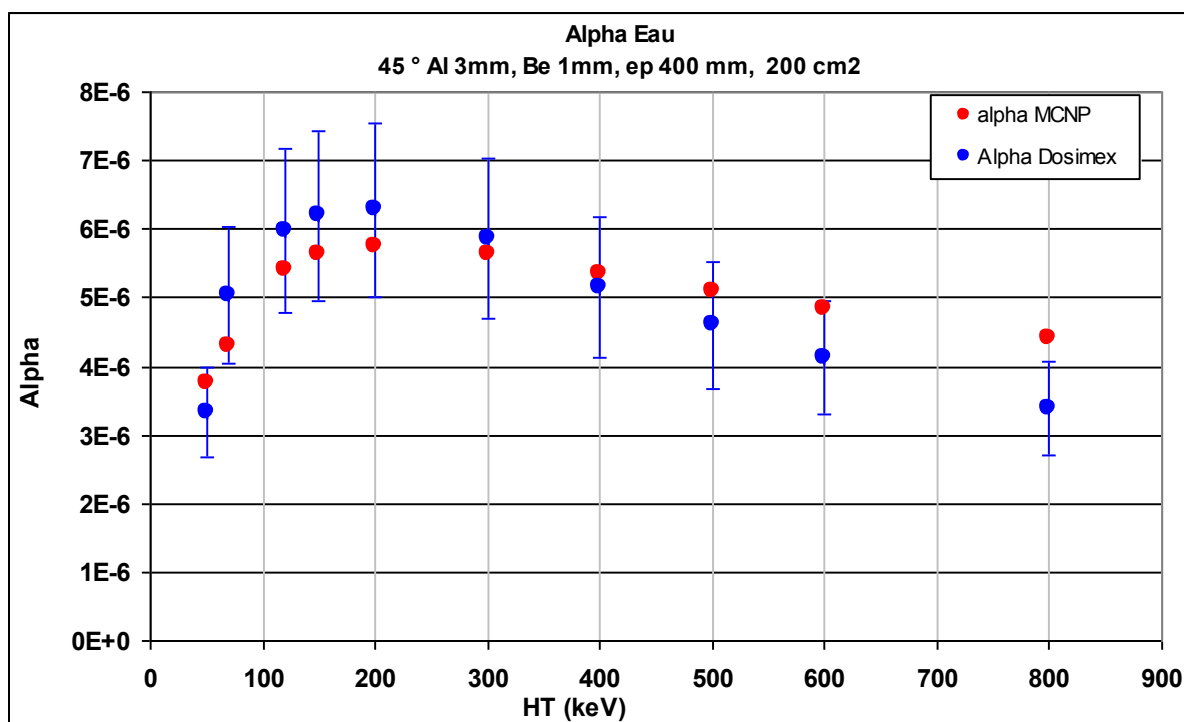
CAS 7 : EAU, 10°, FILTRATION 2 MM AL+ 1 MM BE, S= 200 CM2VS HT



tension	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
50	3.89E-06	3.78E-06	-3%
70	4.99E-06	5.64E-06	13%
120	6.15E-06	6.61E-06	7%
150	6.36E-06	6.82E-06	7%
200	6.47E-06	6.79E-06	5%
300	6.27E-06	6.14E-06	-2%
400	5.96E-06	5.36E-06	-10%
500	5.62E-06	4.72E-06	-16%
600	5.31E-06	4.17E-06	-21%
800	4.70E-06	3.34E-06	-29%
Ecart quadratique moyen			14%

Conclusion partielle : idem cas précédent.

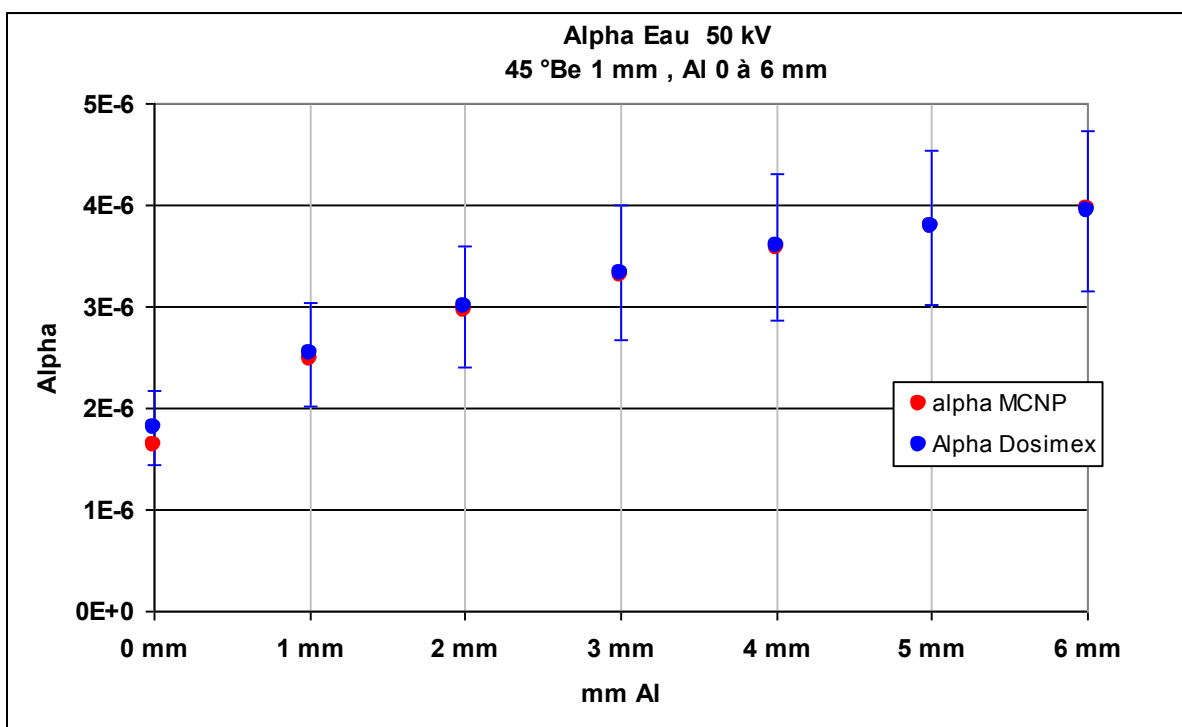
CAS 8 : EAU, 45°, FILTRATION 3 MM AL+ 1 MM BE, S= 200 CM2VS



tension	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
50	3.76E-06	3.33E-06	-11%
70	4.29E-06	5.04E-06	17%
120	5.40E-06	5.97E-06	11%
150	5.64E-06	6.20E-06	10%
200	5.76E-06	6.28E-06	9%
300	5.63E-06	5.86E-06	4%
400	5.36E-06	5.16E-06	-4%
500	5.10E-06	4.60E-06	-10%
600	4.85E-06	4.13E-06	-15%
800	4.40E-06	3.39E-06	-23%
Ecart quadratique moyen			13%

Conclusion partielle : idem cas précédent.

CAS 9 : MATÉRIAU EAU, HT 50 KEV, ANGLE 45 ° AVEC 1 MM DE BE POUR DES ÉPAISSEURS D'AL DE 0 À 6 MM

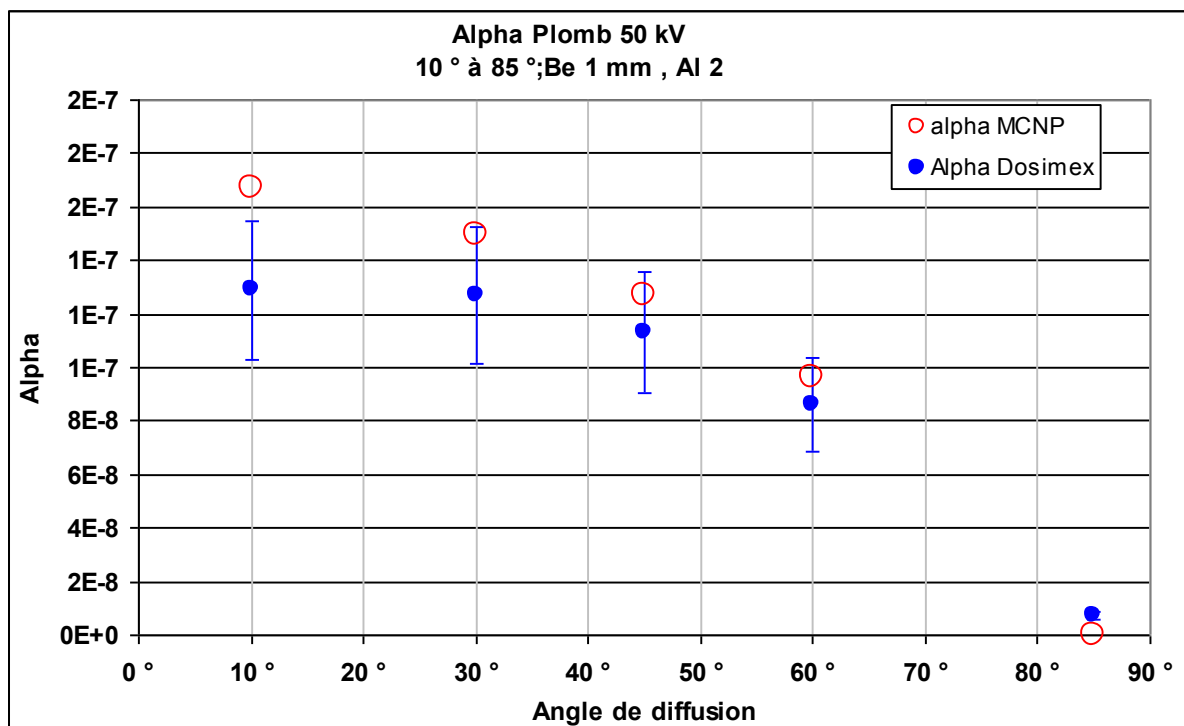


Al	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
0	1.63E-06	1.81E-06	11%
1	2.49E-06	2.53E-06	2%
2	2.97E-06	3.00E-06	1%
3	3.31E-06	3.33E-06	1%
4	3.58E-06	3.59E-06	0%
5	3.79E-06	3.78E-06	0%
6	3.97E-06	3.94E-06	-1%
Ecart quadratique moyen			4%

Conclusion partielle : on obtient une bonne sensibilité des résultats en fonction du filtrage. On peut noter un rapport égal à 2,4 entre l'absence d'Aluminium et une filtration de 6 mm d'aluminium, ce qui montre la sensibilité des résultats en fonction du spectre incident, bien reproduite par Dosimex.

CAS 10 : MATÉRIAU PLOMB, HT=50 kV, 1 MM BE + 2 MM AL POUR DES ANGLES DE 10 ° À 85 °

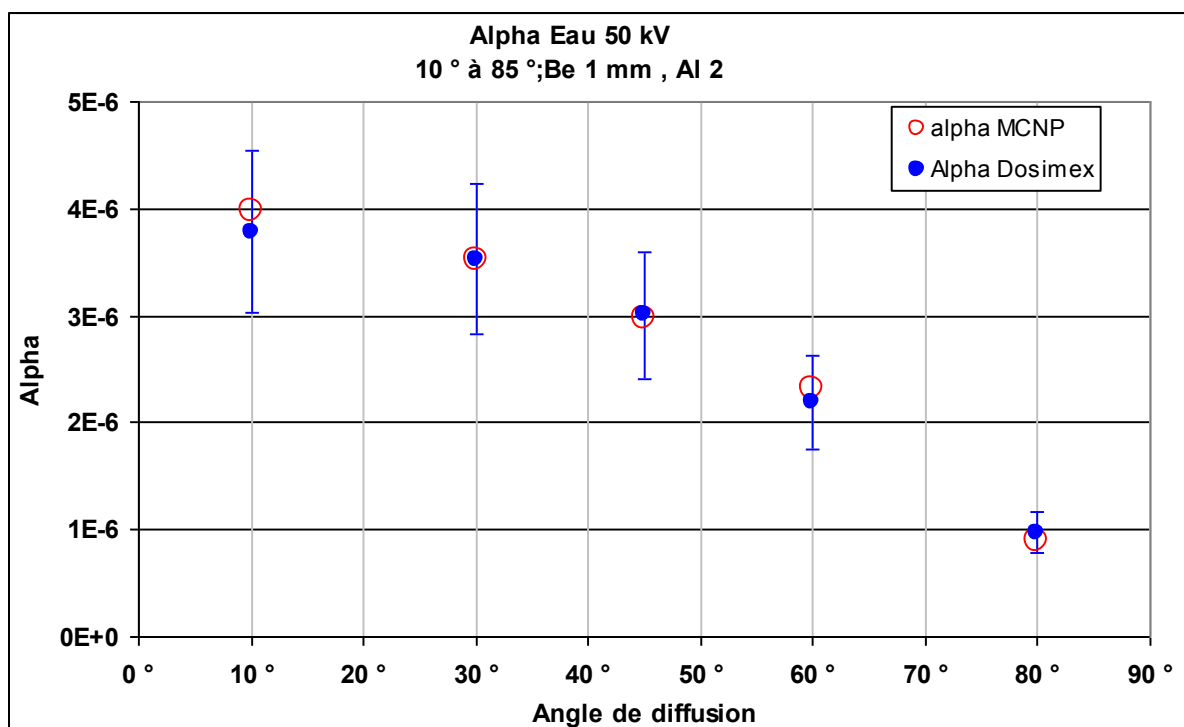
Remarque : avec Dosimex l'angle maximum a été pris à 85° et non pas 90 °, voir § 1.5



Angle	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
10 °	1.67E-07	1.44E-07	-14%
30 °	1.50E-07	1.40E-07	-7%
45 °	1.27E-07	1.23E-07	-3%
60 °	9.66E-08	9.27E-08	-4%
85 °	0.00E+00	7.77E-09	NC
Ecart quadratique moyen			8%

Conclusion partielle : l'évolution angulaire est bien reproduite, y compris pour des angles élevés. Pour le plomb cela est lié au fait que la composante émergente par le côté est négligeable (cf §1.5).

Cas 11 : matériau **Eau**, 1 mm Be + 2 mm Al, HT=50 kV, pour des angles de 10 ° à 90 °



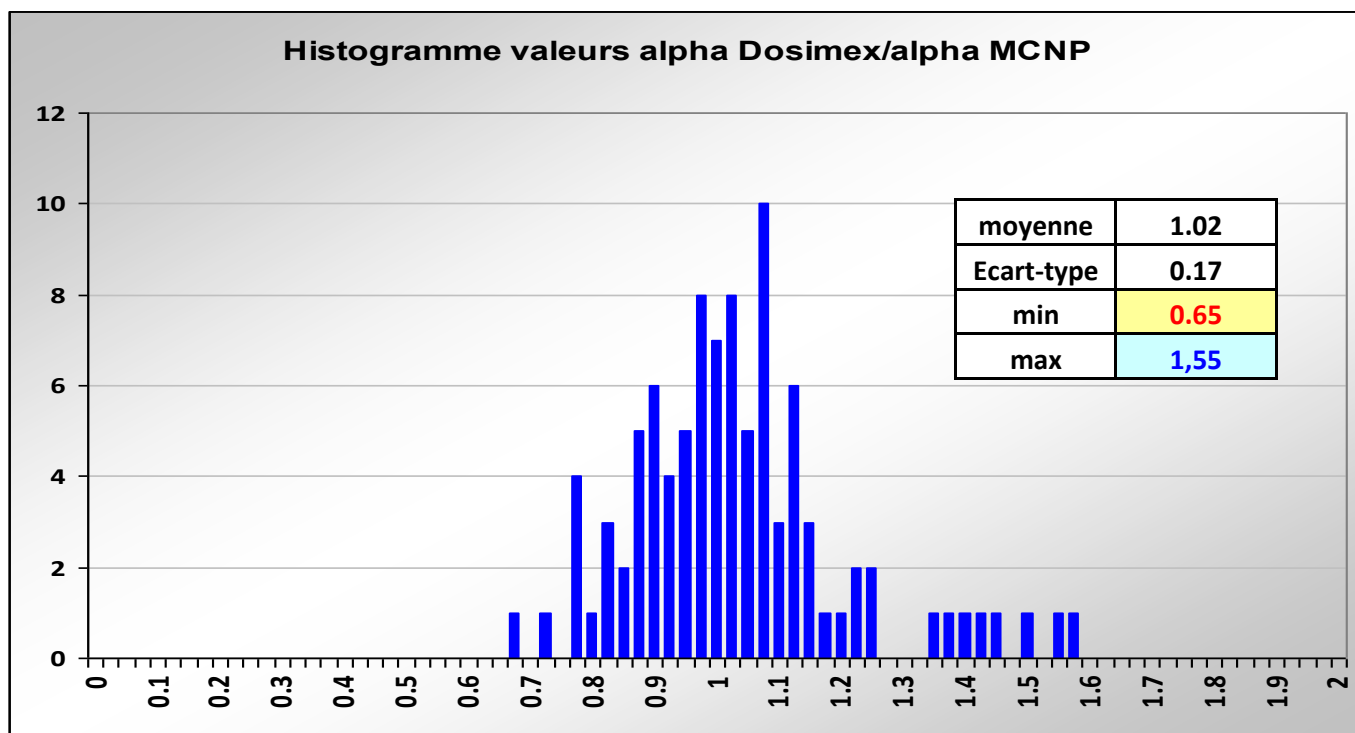
Angle	α MCNP	α Dosimex	Ecart relatif
10 °	3.98E-06	3.78E-06	-5%
30 °	3.52E-06	3.53E-06	0%
45 °	2.97E-06	3.00E-06	1%
60 °	2.32E-06	2.19E-06	-6%
80 °	8.89E-07	9.76E-07	10%
Ecart quadratique moyen			6%

Conclusion partielle : l'évolution angulaire est bien reproduite, y compris aux angles élevés (90 ° pour MCNP et 85 ° pour Dosimex) où l'écart relatif n'est guère que de 33 %.

II.4.2 SYNTHÈSE DES RAPPORTS DOSIMEX/MCNP POUR LES COEFFICIENTS ALPHA

Pour l'ensemble des cas précédents, soit 95 calculs de coefficients alpha, on obtient :

	Cas 1 Eau	Cas 2 TNT	Cas 3 Béton	Cas 4 Fer	Cas 5 Plomb	Cas 6 Eau	Cas 7 Eau	Cas 8 Eau	Cas 9 Eau	Cas 10 Eau	Cas 11 Plomb	
	1.01	0.96	0.89	0.82	0.99	0.94	0.97	0.89	1.11	0.86	0.95	
	1.19	1.12	1.2	1.39	0.96	1.14	1.13	1.17	1.02	0.93	1	
	1.11	1.06	1	1.33	0.86	1.05	1.07	1.11	1.01	0.97	1.01	
	1.11	1.06	1.01	1.4	1.15	1.07	1.07	1.1	1.01	0.96	0.94	
	1.11	1.05	1.04	1.53	1.2	1.07	1.05	1.09	1		1.1	
	1.05	1	1.03	1.55	1.24	1.03	0.98	1.04	1			
	0.97	0.92	0.98	1.49	1.06	0.95	0.9	0.96	0.99			
	0.91	0.87	0.93	1.44	0.88	0.9	0.84	0.9				
	0.92	0.82	0.88	1.36	0.87	0.83	0.79	0.85				
	0.77	0.76	0.8	1.23	0.65	0.77	0.71	0.77				Total
Moyenne	1.02	0.96	0.976	1.354	0.986	0.975	0.951	0.988	1.02	0.93	1	1.02
Ecart-type	0.13	0.12	0.11	0.21	0.18	0.12	0.14	0.13	0.04	0.05	0.06	0.17



La moyenne des rapports dénote une absence d'écart systématique pour un écart moyen de l'ordre de **17 %**. tous matériaux confondus, et respectivement 13 % et 11 % seulement avec les milieux eau et béton, les plus impliqués dans la diffusion (eau pour le patient et béton pour les murs)

Pour une modélisation déterministe aussi complexe (spectre continue, diffusion Compton + fluorescence X dans un volume), un tel résultat, par rapport à MCNP, dépassent là encore nos espérances !

L'écart négatif le plus élevé se retrouve avec le Plomb pour 800 kV et l'écart positif le plus élevé avec le fer (voir conclusion cas 4).

II- 5 : VALIDATION VS FACTEUR DE DIFFUSION NORME NFC 15-160 (2011)

La valeur de la dose diffusée dépend fortement des distances, de la nature et des dimensions du diffuseur et de la surface éclairée, ainsi que de la nature de la filtration. La norme NFC 15-160 s'appuie sur des **coefficients de diffusion k** (*rapport du kerma air moyen diffusé à 1 m au kerma air au niveau de l'objet éclairé à 1m de distance du foyer*) en fonction de la HT.

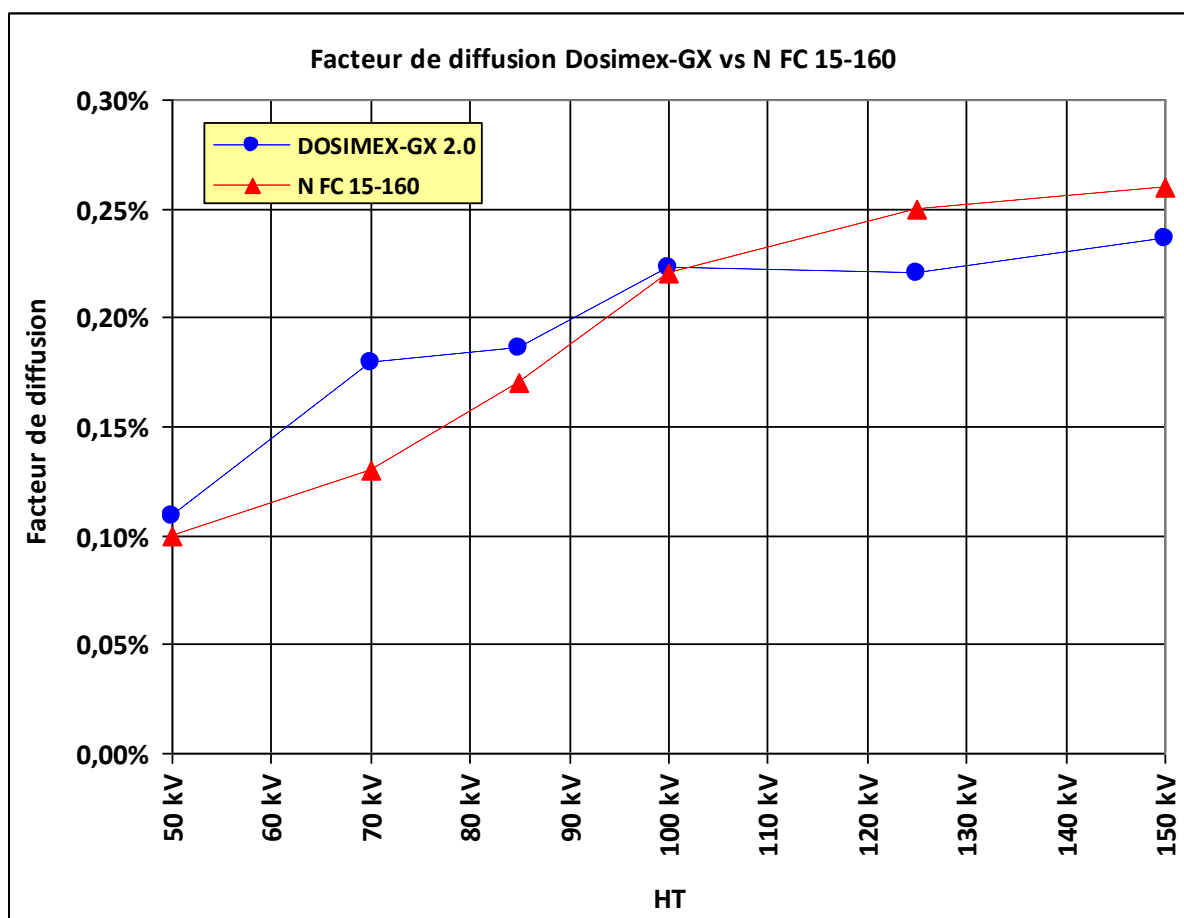
La nature, la forme et les dimensions de l'objet diffuseur, la surface éclairée ainsi que la nature de la filtration ne sont pas précisées.

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

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

On obtient les valeurs suivantes :

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



On obtient, pour ces quelques valeurs données dans la NFC 15-160 (2011) un écart algébrique moyen de 6% et un écart absolu moyen de 13 %.

Ces résultats sont à rapprocher de l'ensemble des résultats obtenus précédemment.

Partie III. VALIDATION ATTÉNUATION PAR UN ÉCRAN

III- 1 : REMARQUES SUR LES FACTEURS D'ATTÉNUATION AVEC UN SPECTRE X CONTINU

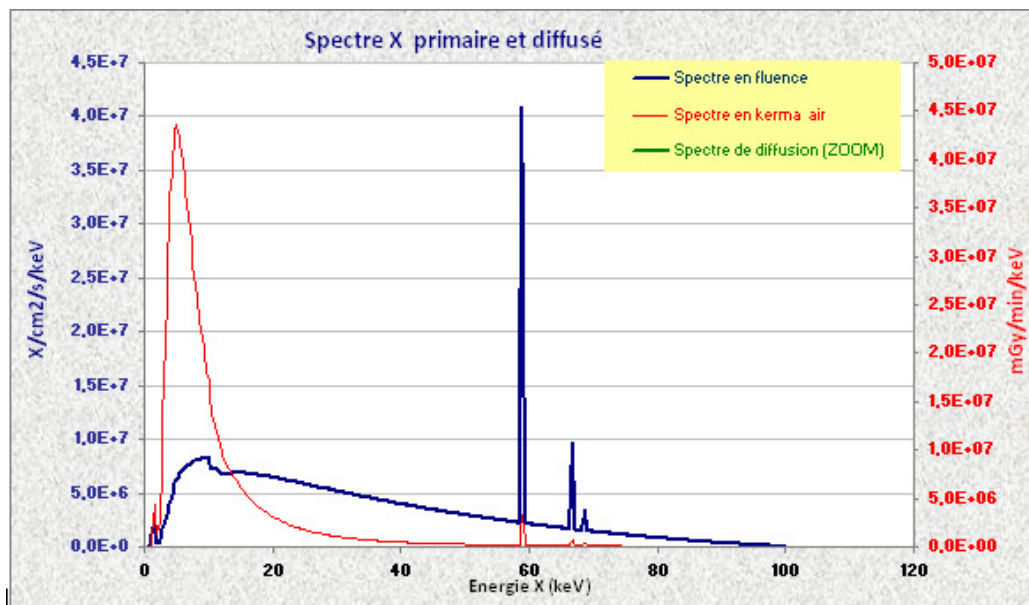
L'objectif de cette partie est de comparer les facteurs d'atténuations dans des écrans de plomb de diverses épaisseurs et pour diverses HT proposés dans la norme NFC 15-160.

Plusieurs remarques s'imposent ici :

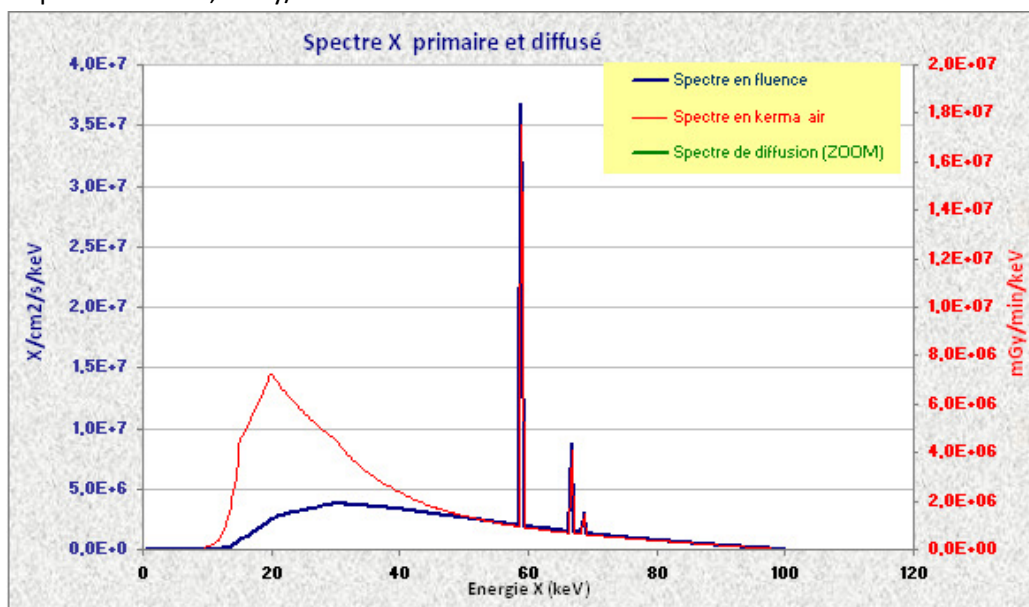
- ❖ **Remarque 1 :** pour pouvoir être comparés aux valeurs de la norme, ces facteurs d'atténuations sont calculés en termes de kerma air, et non pas en termes de $H^*(10)$ (ou de fluence). Dans Dosimex GX 2.2 la boîte de dialogue principale présente des coefficients calculés en termes de $H^*(10)$.
- ❖ **Remarque 2 :** Les coefficients d'atténuation présentés dans la norme ne tiennent pas compte du Build-up, qui peut aisément aller jusqu'à à un facteur 2 dans le plomb (120 kV, 2 mm de Pb) à 15 dans le béton (120 kV, 150 mm de béton), et qui devrait donc diminuer d'autant le facteur de diffusion. Ils correspondent donc au facteur d'atténuation intrinsèque hors BU F_e^* défini au chapitre I.2.2.C. Ce sont ces facteurs d'atténuations qui sont testés ici, mais il ne faut pas oublier qu'ils sont peu ou prou surestimés (*et donc les débits derrière l'écran sous-estimés*)
- ❖ **Remarque 3 :** les courbes proposées dans la norme ne précisent pas les filtrations utilisées, qui impactent pourtant fortement le facteur d'atténuation. La raison est simple : le facteur d'atténuation représente le rapport de la dose sans écran à la dose avec écran. Or la dose sans écran prend en compte des photons X de faibles énergies, photons qui tendent à disparaître rapidement lorsque l'épaisseur d'écran augmente. Les facteurs de conversion fluence/kerma air sont de plus très élevés pour ces photons de faibles énergies qui contribuent alors fortement à la dose avant écran.

Illustration : le graphe ci-dessous, extrait de Dosimex, présente le graphe en fluence (courbe bleu) d'émission X pour une HT de 100 keV sans filtration. La courbe en rouge est le spectre en kerma air : spectre en fluence convolué avec le coefficient de conversion fluence/kerma ICRU 57. On constate alors le poids prédominant des faibles énergies, autour de 10 keV, dans le kerma air.

Calculé à 1 m et pour 1 mA, le débit de kerma air est égal à 12,5 Gy/h alors que le débit d'équivalent de dose $H^*(10)$ n'est plus guère que de 1,8 Sv/h.



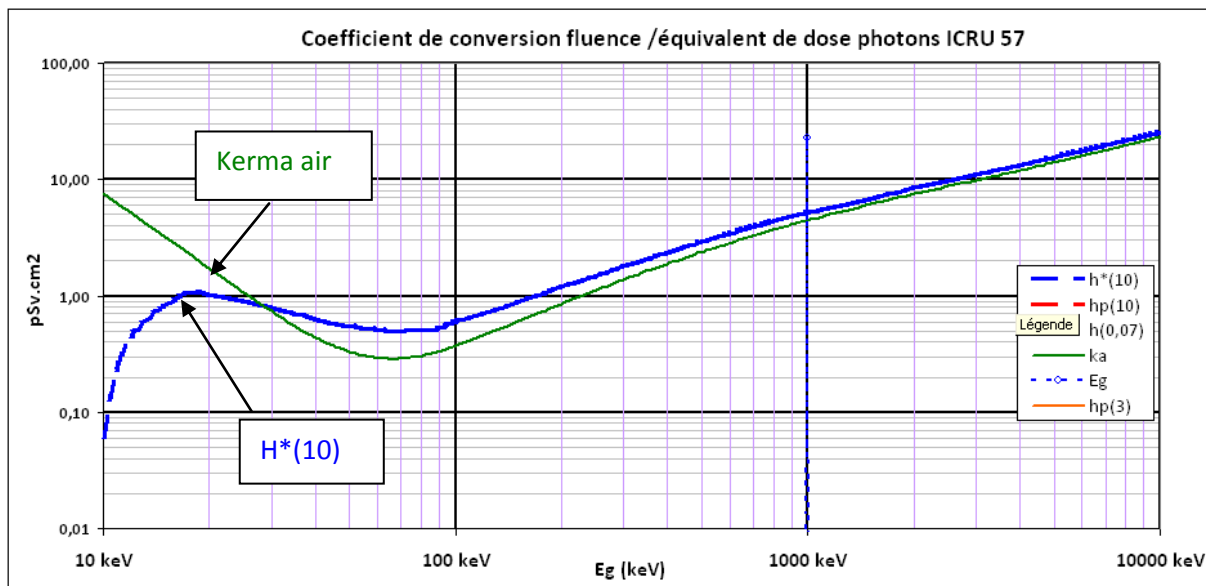
Ci-dessous, le spectre obtenu en rajoutant une filtration de 1 mm d'Aluminium. La présence de cette fenêtre filtre les basses énergies et le spectre en kerma air est notablement modifié. Le débit de kerma air passe ainsi à 0,10 Gy/h seulement



Ainsi, dans les calculs d'atténuation en kerma air, le coefficient d'atténuation sera plus élevé, pour un même écran, si la valeur devant l'écran correspond à un spectre non filtré.

A noter que pour les calculs en termes de $H^*(10)$, cet effet disparaît car les coefficients de conversion fluence/ équivalent de dose $H^*(10)$ sont plus faibles à basses énergies que pour les coefficients en termes de kerma air (*effet de filtration par les 10 premiers mm de tissus*)

Graphique coefficient de conversion fluence /kerma air et fluence/ $H^*(10)$ (Cf « coefficients ICRU 57 » pack pédagogique Dosimex) :



Dans ce premier exemple, on constate par exemple qu'avec une filtration de 1 mm d'aluminium, $H^*(10)$ est alors égal à 1,1 Sv/h, pour un kerma air très proche de 1,0 Gy/h. Alors que sans filtration si le kerma air était égal à 12,5 Gy/h, $H^*(10)$ ne valait que 1,8 Sv/h, soit 7 fois plus faible.

Cet effet est lié au fait que $H^*(10)$ est calculé sous 10 mm de tissus, épaisseur suffisante pour filtrer efficacement les faibles énergies : libre parcours moyen de photons de 10 keV dans l'eau = 2 mm.

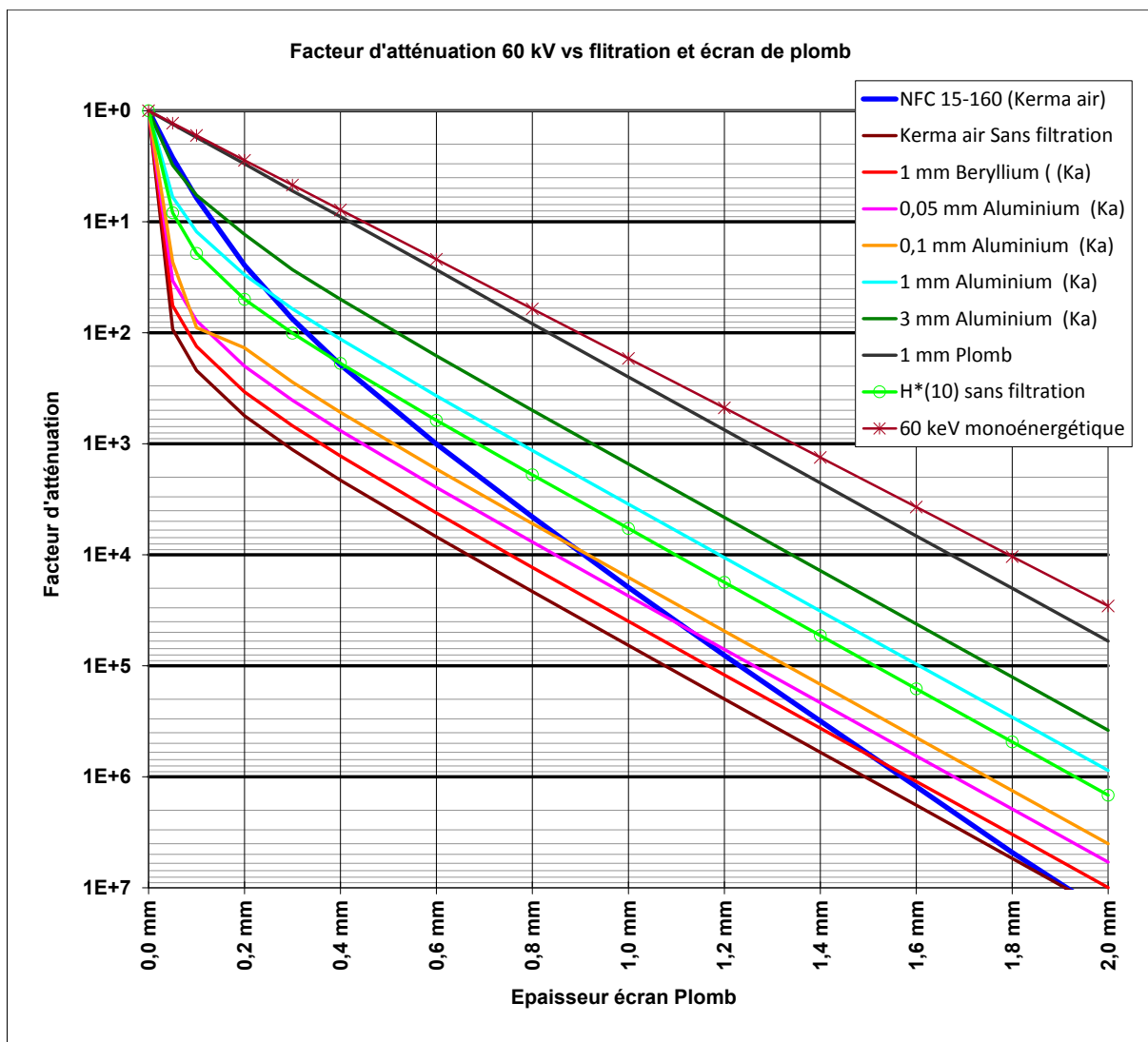
Remarque : sur un plan pratique de radioprotection en imagerie médicale X, cette composante à basse énergie est d'une part inutile car elle n'émerge pas et ne participe donc pas à la construction de l'image, et d'autre part est susceptible de générer des doses surfaciques très élevées. C'est la raison de la présence de fenêtres de filtration.

III- 2 : VARIABILITÉ DU FACTEUR D'ATTÉNUATION EN FONCTION DE LA FILTRATION

Les courbes ci-dessous, toutes calculées pour une HT de 60 kV, montrent la grande variabilité du facteur d'atténuation dans le plomb pour diverses filtrations, allant du cas sans filtration à une filtration élevée de 1 mm de plomb, susceptible de représenter la protection apportée par la gaine. Dans ce dernier cas, on retrouve une atténuation quasi-analogue au cas de photons monoénergétiques proche de l'énergie maximale (spectre très durci) :

Remarque : dans le graphe ci-dessous nous avons porté la courbe d'atténuation (une droite parfaite sur un schéma log-log) pour des photons de 60 keV dans le plomb suivant la fonction classique $e^{\mu x}$ (l'inverse du facteur d'atténuation $e^{-\mu x}$) avec $\mu = 51,3 \text{ cm}^{-1}$ calculé avec les données X COM /NIST. On notera que la pente ainsi obtenue correspond, tout en étant légèrement plus faible dans la mesure où le spectre X, même très durci, n'est pas parfaitement monoénergétique, aux pentes obtenues avec Dosimex-GX à partir d'épaisseurs d'écrans suffisantes, et à l'inverse s'éloigne significativement de la pente donnée dans la NFC-15-160. Ainsi les écarts significatifs obtenus avec cette dernière montre que l'erreur est dans le camp de la norme

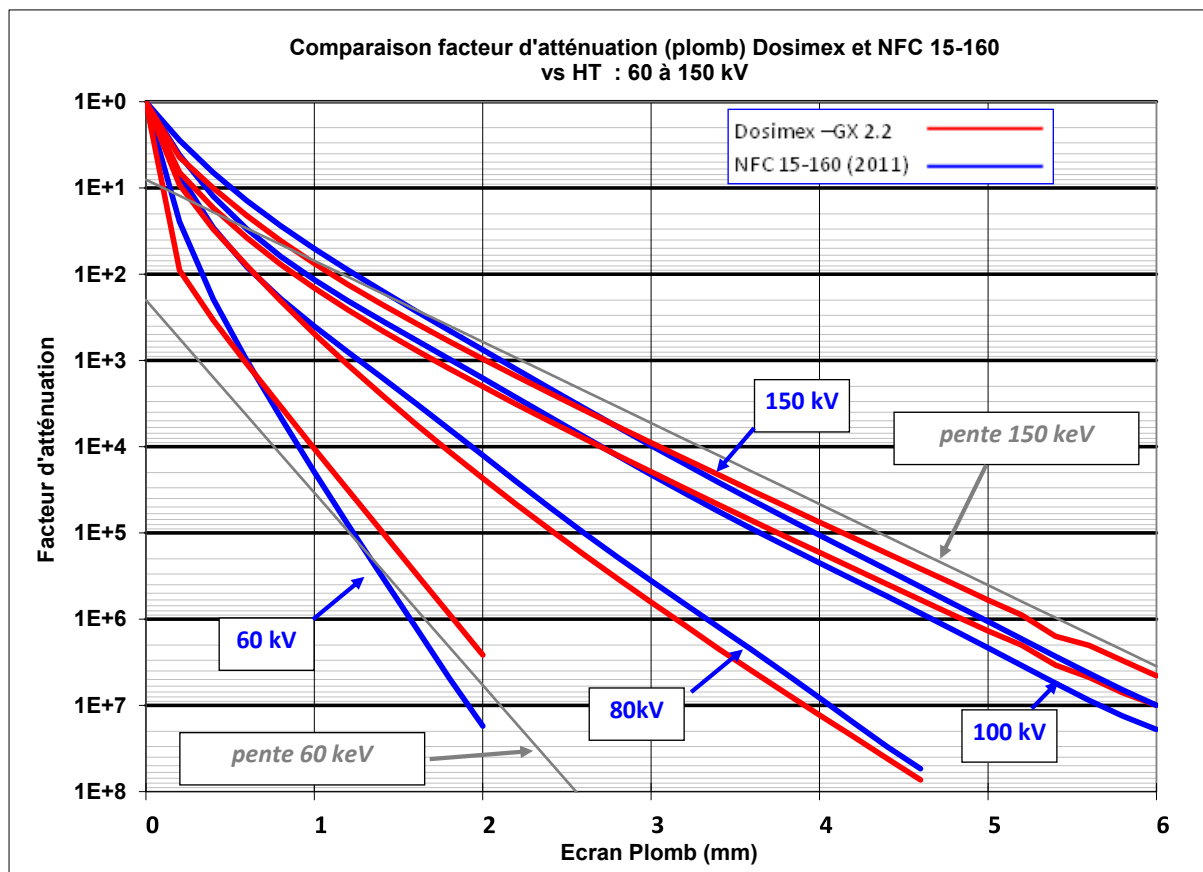
Entre le cas sans filtration et cette dernière filtration très dure, les coefficients d'atténuation, pour un même écran de plomb, sont susceptibles de varier d'un facteur de l'ordre de 240. On voit donc l'importance de spécifier la nature et l'épaisseur de la filtration. Ce que ne fait pas la norme NFC 15-160 (2011).



On notera enfin les valeurs d'atténuation calculées en termes de $H^*(10)$ sans filtration initiale. On retrouve alors une courbe proche de la courbe calculée en termes de kerma air pour une filtration de 1 mm d'aluminium

III- 3 : COMPARAISONS FACTEURS D'ATTÉNUATIONS DOSIMEX-GX 3.0 vs NFC 15-160 VERSION 2011

III.3.1 BASSES ÉNERGIES (CF FIG 4 NF C 15-160 MARS 2011)

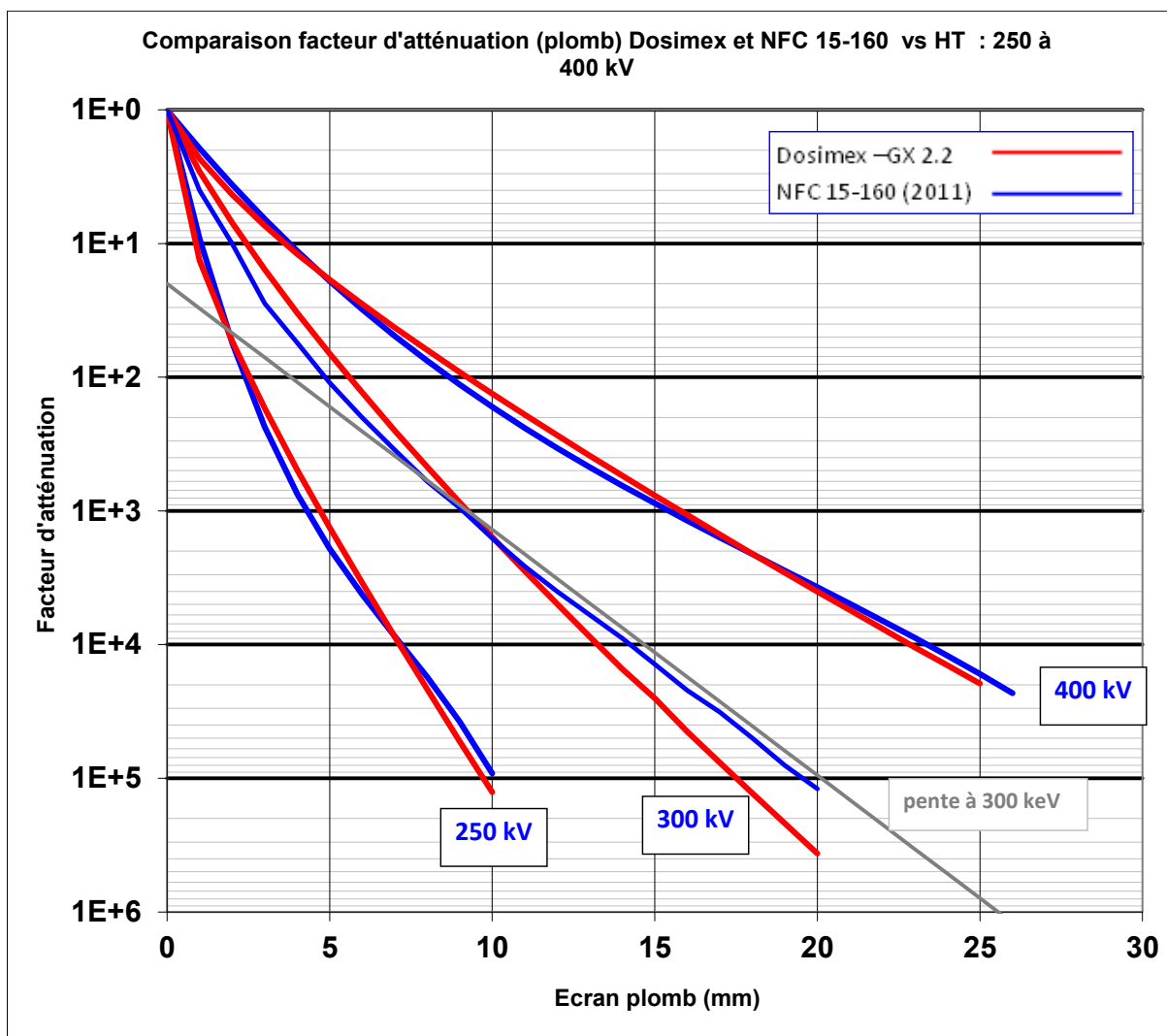


On retrouve ici la bonne corrélation entre la pente pour 60 keV en monoénergétique vs Dosimex-GX, pente non respectée par la norme, ce qui explique les écarts constatés. Ainsi la norme surestime d'un facteur 10 l'atténuation apportée par 1 mm de Plomb et à termes sous-estime le débit de dose.

La même situation se retrouve, mais moins marquée, pour les autres énergies, comme par exemple à 150 keV.

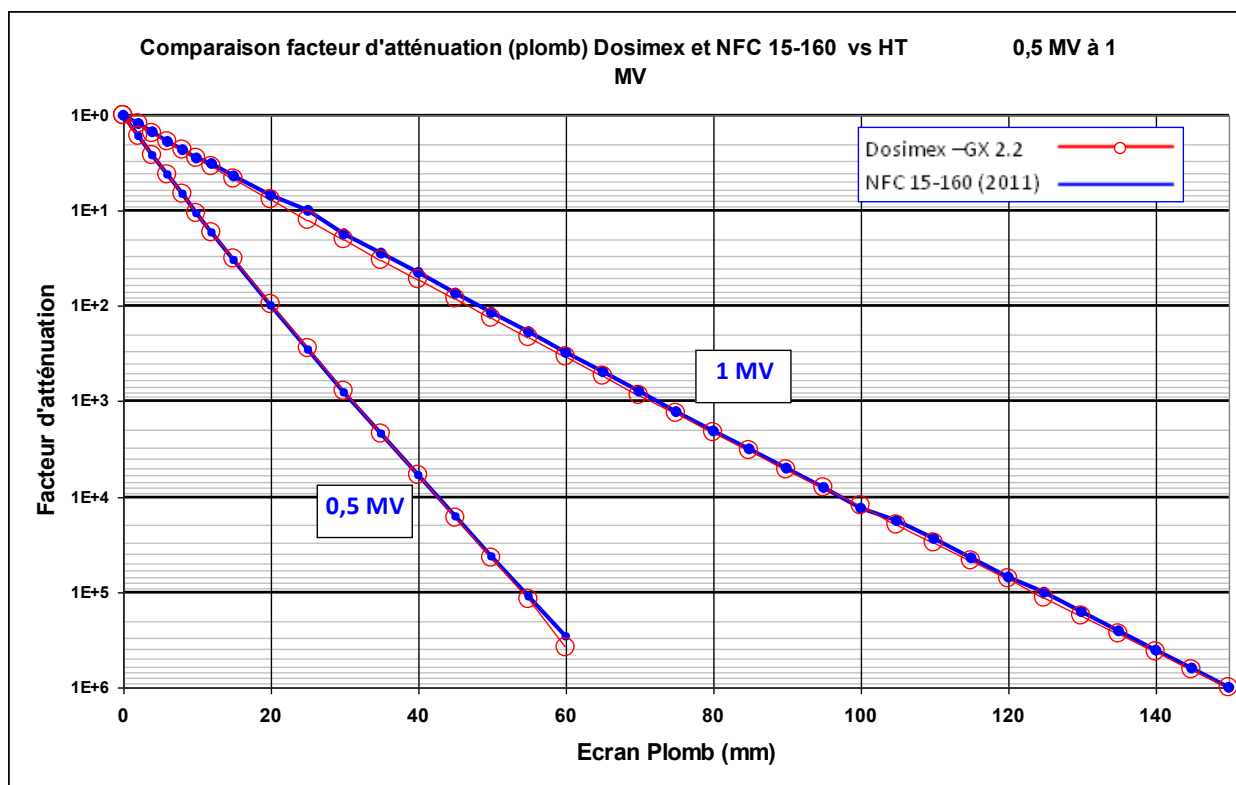
Nota : les valeurs numériques sont données plus loin en annexe

III.3.2 MOYENNES ÉNERGIES (CF FIG 5 NF C 15-160 MARS 2011)



On retrouve à 300 kV des écarts significatif entre Dosimex-GX, qui suit bien la pente à 300 keV à partir d'écran suffisamment épais (10 mm), et la norme 15-160 qui ne respecte pas cette pente.

III.3.3 HAUTES ÉNERGIES (CF FIG 6 NF C 15-160 MARS 2011)



Ici l'adéquation est bien meilleure entre la norme NFC et Dosimex-GX.

La courbe pour 500 kV suit une pente correspondant en monoénergétique à environ 450 kV, et celle à 1 MV suit une pente monoénergétique de l'ordre de 0,9 MeV

III.3.4 TABLEAUX FACTEURS D'ATTÉNUATION DOSIMEX-GX ET N FC 15_160 (2011)

mm Pb	60 kV		80 kV		100 kV		150 kV	
	NFC 15-160 60 kV	Dosimex 60kV Filt. :0,1 mm Al	NFC 15-160 80 keV	Dosimex 80 kV filt. :3 mm Al	NFC 15-160 100 kV	Dosimex 100 kV Filt. :3 mm Al	NFC 15-160 150 kV	Dosimex 150 kV Filt. :3 mm Al
0,0	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
0,2	2,46E+01	9,00E+01	7,06E+00	9,20E+00	4,14E+00	6,60E+00	2,79E+00	4,40E+00
0,4	1,95E+02	3,40E+02	2,88E+01	3,00E+01	1,25E+01	1,70E+01	6,65E+00	1,00E+01
0,6	1,01E+03	1,10E+03	8,27E+01	8,00E+01	3,01E+01	3,80E+01	1,41E+01	2,10E+01
0,8	4,56E+03	3,42E+03	1,92E+02	2,04E+02	6,21E+01	7,70E+01	2,74E+01	4,10E+01
1,0	1,96E+04	1,05E+04	4,01E+02	4,90E+02	1,16E+02	1,44E+02	5,05E+01	7,50E+01
1,2	8,02E+04	3,17E+04	7,97E+02	1,13E+03	2,03E+02	2,59E+02	8,95E+01	1,32E+02
1,4	3,14E+05	9,58E+04	1,57E+03	2,50E+03	3,45E+02	4,47E+02	1,55E+02	2,23E+02
1,6	1,22E+06	2,90E+05	3,11E+03	5,43E+03	5,77E+02	7,51E+02	2,64E+02	3,69E+02
1,8	4,79E+06	8,69E+05	6,24E+03	1,14E+04	9,62E+02	1,24E+03	4,47E+02	5,99E+02
2,0	1,74E+07	2,61E+06	1,26E+04	2,33E+04	1,61E+03	2,00E+03	7,54E+02	9,60E+02
2,2			2,54E+04	4,67E+04	2,70E+03	3,22E+03	1,27E+03	1,52E+03
2,4			5,08E+04	9,18E+04	4,53E+03	5,11E+03	2,12E+03	2,39E+03
2,6			9,96E+04	1,78E+05	7,62E+03	8,00E+03	3,54E+03	3,74E+03
2,8			1,91E+05	3,38E+05	1,27E+04	1,26E+04	5,88E+03	5,81E+03
3,0			3,60E+05	6,37E+05	2,11E+04	1,96E+04	9,71E+03	8,98E+03
3,2			6,68E+05	1,18E+06	3,47E+04	3,04E+04	1,59E+04	1,38E+04
3,4			1,23E+06	2,20E+06	5,62E+04	4,69E+04	2,59E+04	2,12E+04
3,6			2,29E+06	4,00E+06	8,99E+04	7,21E+04	4,17E+04	3,24E+04
3,8			4,29E+06	7,22E+06	1,42E+05	1,11E+05	6,68E+04	4,94E+04
4,0			8,20E+06	1,30E+07	2,23E+05	1,69E+05	1,06E+05	7,52E+04
4,2			1,58E+07	2,30E+07	3,48E+05	2,58E+05	1,69E+05	1,14E+05
4,4			3,01E+07	4,13E+07	5,44E+05	3,93E+05	2,67E+05	1,73E+05
4,6			5,44E+07	7,30E+07	8,53E+05	5,98E+05	4,23E+05	2,61E+05
4,8					1,35E+06	9,07E+05	6,72E+05	3,94E+05
5,0					2,15E+06	1,37E+06	1,07E+06	6,00E+05
5,2					3,45E+06	2,00E+06	1,70E+06	8,95E+05
5,4					5,53E+06	3,40E+06	2,70E+06	1,58E+06
5,6					8,74E+06	4,73E+06	4,26E+06	2,02E+06
5,8					1,33E+07	7,13E+06	6,62E+06	3,03E+06
6,0					1,90E+07	1,00E+07	9,99E+06	4,54E+06

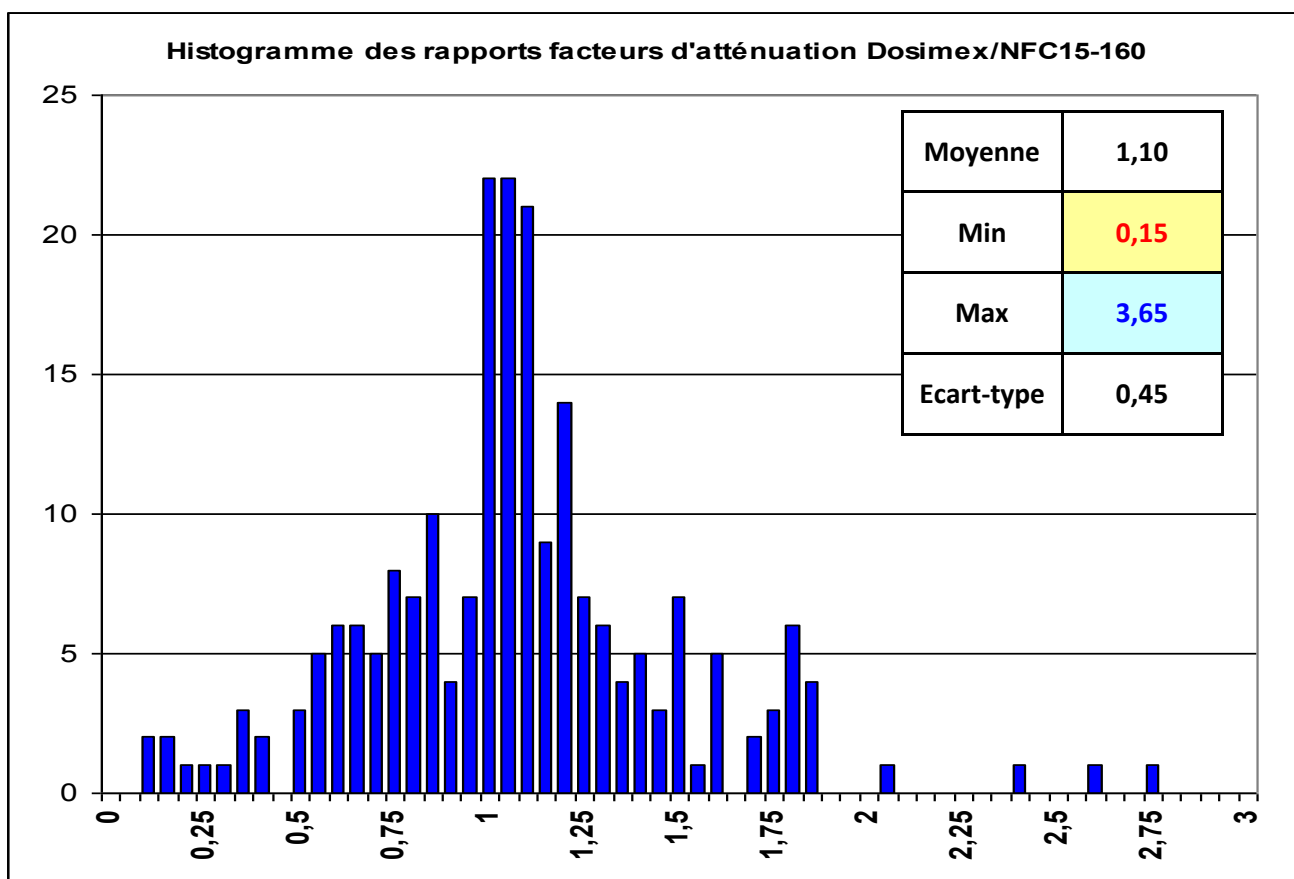
	250 kV		300 kV		400 kV	
mm Pb	NFC 15-160 250 kV	Dosimex250kV Filt. :3 mm Al	NFC 15-160 300 keV	Dosimex 80 kV filt. :1 mm Pb	NFC 15-160 100 kV	Dosimex 100 kV Filt. :0,5 mm Pb
0	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1	9,21E+00	1,34E+01	4,00E+00	2,90E+00	1,95E+00	2,32E+00
2	5,55E+01	5,40E+01	1,00E+01	7,00E+00	3,64E+00	4,31E+00
3	2,35E+02	1,70E+02	2,80E+01	1,56E+01	6,54E+00	7,34E+00
4	7,47E+02	4,93E+02	5,50E+01	3,30E+01	1,14E+01	1,20E+01
5	1,91E+03	1,33E+03	1,10E+02	6,64E+01	1,91E+01	1,86E+01
6	4,23E+03	3,45E+03	2,00E+02	1,30E+02	3,10E+01	2,83E+01
7	8,64E+03	8,73E+03	3,50E+02	2,50E+02	4,91E+01	4,25E+01
8	1,75E+04	2,16E+04	6,00E+02	4,68E+02	7,55E+01	6,27E+01
9	3,76E+04	5,28E+04	9,50E+02	8,63E+02	1,13E+02	9,16E+01
10	9,20E+04	1,27E+05	1,60E+03	1,57E+03	1,66E+02	1,33E+02
11			2,60E+03	2,81E+03	2,40E+02	1,90E+02
12			4,00E+03	4,97E+03	3,39E+02	2,72E+02
13			6,00E+03	8,72E+03	4,71E+02	3,86E+02
14			9,00E+03	1,52E+04	6,47E+02	5,45E+02
15			1,40E+04	2,52E+04	8,79E+02	7,67E+02
16			2,20E+04	4,48E+04	1,18E+03	1,07E+03
17			3,20E+04	7,63E+04	1,58E+03	1,50E+03
18			5,00E+04	1,29E+05	2,10E+03	2,09E+03
19			8,00E+04	2,18E+05	2,79E+03	2,90E+03
20			1,20E+05	3,65E+05	3,71E+03	4,01E+03
21					4,94E+03	5,53E+03
22					6,61E+03	7,61E+03
23					8,90E+03	1,05E+04
24					1,21E+04	1,43E+04
25					1,66E+04	1,96E+04
26					2,31E+04	2,67E+04
27					3,27E+04	3,64E+04
28					4,71E+04	4,95E+04

	0,5 MV		1 MV	
mm	NFC 15-160 500 kV	Dosimex 0,5 MV Filt. :15 mm Pb	NFC 15-160 300 keV	Dosimex 1 MV filt. :40 mm Pb
0	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
2	1,63E+00	1,64E+00	1,23E+00	1,23E+00
4	2,64E+00	2,65E+00	1,51E+00	1,52E+00
6	4,24E+00	4,25E+00	1,86E+00	1,87E+00
8	6,76E+00	6,74E+00	2,28E+00	2,29E+00
10	1,07E+01	1,06E+01	2,80E+00	2,81E+00
12	1,69E+01	1,67E+01	3,21E+00	3,44E+00
15	3,31E+01	3,23E+01	4,29E+00	4,65E+00
20	9,87E+01	9,55E+01	7,00E+00	7,65E+00
25	2,86E+02	2,76E+02	1,00E+01	1,25E+01
30	8,05E+02	7,82E+02	1,74E+01	2,03E+01
35	2,22E+03	2,18E+03	2,80E+01	3,30E+01
40	6,02E+03	6,02E+03	4,51E+01	5,30E+01
45	1,61E+04	1,64E+04	7,27E+01	8,40E+01
50	4,25E+04	4,44E+04	1,17E+02	1,35E+02
55	1,12E+05	1,19E+05	1,88E+02	2,14E+02
60	2,94E+05	3,79E+05	3,03E+02	3,40E+02
65			4,88E+02	5,38E+02
70			7,86E+02	8,50E+02
75			1,27E+03	1,34E+03
80			2,04E+03	2,10E+03
85			3,16E+03	3,29E+03
90			5,07E+03	5,14E+03
95			8,14E+03	8,03E+03
100			1,31E+04	1,25E+04
105			1,80E+04	1,95E+04
110			2,78E+04	3,03E+04
115			4,43E+04	4,70E+04
120			7,05E+04	7,29E+04
125			1,01E+05	1,13E+05
130			1,60E+05	1,75E+05
135			2,53E+05	2,70E+05
140			4,02E+05	4,16E+05
145			6,37E+05	6,41E+05
150			1,01E+06	9,87E+05

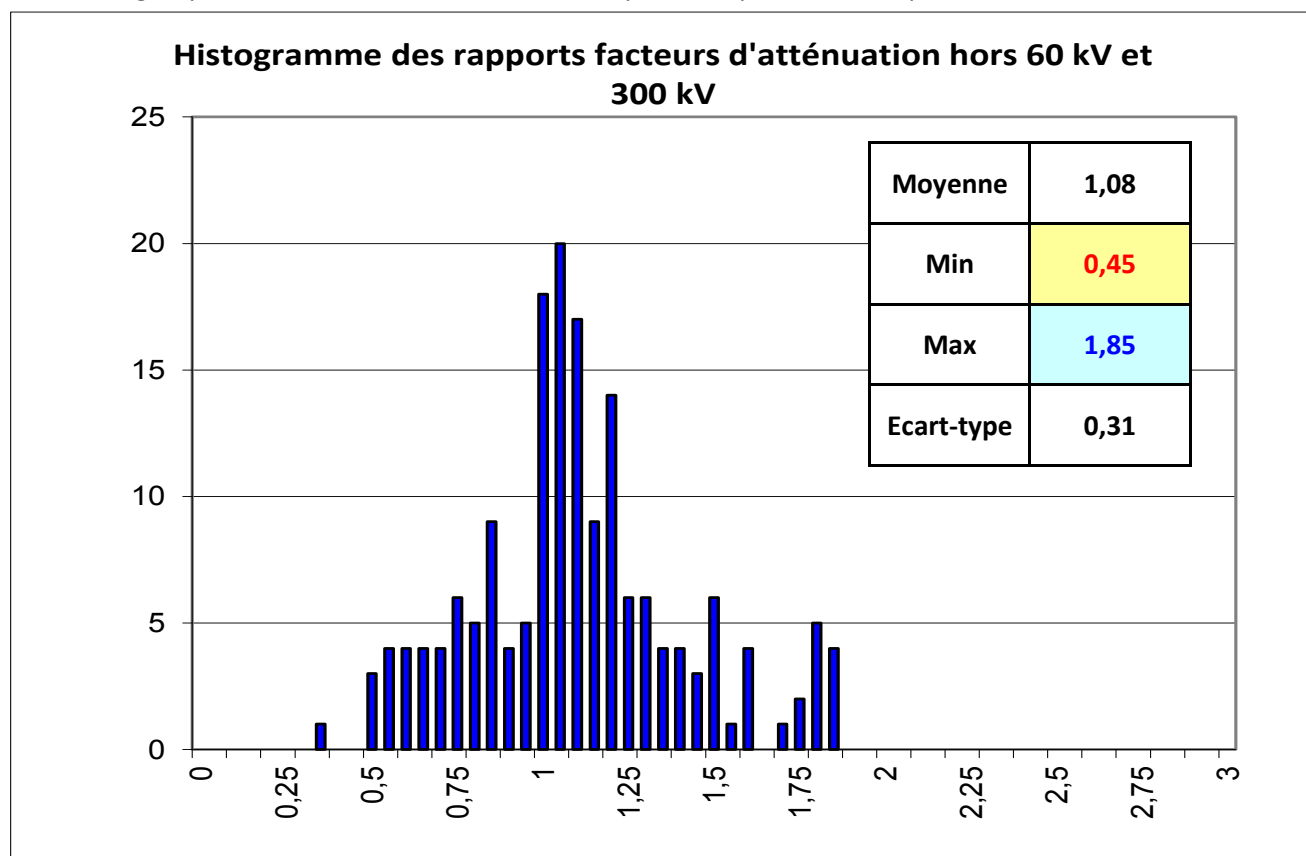
III.3.5 ANALYSE DES RÉSULTATS POUR LA VERSION 2011

Pour 202 rapports de facteurs d'atténuation Dosimex/Nf C 15160 obtenus à partir des tableaux précédents:

	60 kV	80 kV	100 kV	150 kV	250 kV	300 kV	400 kV	0,5 MV	1 MV
	3,65	1,30	1,60	1,58	1,46	0,73	1,19	1,00	1,00
	1,74	1,04	1,36	1,50	0,97	0,70	1,19	1,01	1,01
	1,09	0,97	1,26	1,49	0,72	0,56	1,12	1,01	1,01
	0,75	1,06	1,24	1,49	0,66	0,60	1,06	1,00	1,00
	0,54	1,22	1,24	1,48	0,70	0,60	0,98	1,00	1,00
	0,40	1,42	1,27	1,47	0,82	0,65	0,91	0,99	1,07
	0,30	1,59	1,30	1,44	1,01	0,71	0,87	0,99	1,08
	0,24	1,74	1,30	1,40	1,23	0,78	0,83	0,98	1,09
	0,18	1,83	1,29	1,34	1,40	0,91	0,81	0,97	1,25
	0,15	1,85	1,24	1,27	1,38	0,98	0,80	0,97	1,17
		1,84	1,19	1,20		1,08	0,79	0,97	1,18
		1,81	1,13	1,13		1,24	0,80	0,98	1,17
		1,79	1,05	1,06		1,45	0,82	1,00	1,16
		1,77	0,99	0,99		1,69	0,84	1,02	1,15
		1,77	0,93	0,92		1,80	0,87	1,04	1,14
		1,77	0,88	0,87		2,04	0,90	1,06	1,12
		1,78	0,84	0,82		2,38	0,95	1,29	1,10
		1,75	0,80	0,78		2,58	0,99		1,08
		1,68	0,78	0,74		2,73	1,04		1,06
		1,59	0,76	0,71		3,04	1,08		1,03
		1,45	0,74	0,67			1,12		1,04
		1,37	0,72	0,65			1,15		1,01
		1,34	0,70	0,62			1,18		0,99
			0,67	0,59			1,18		0,96
			0,64	0,56			1,18		1,08
			0,58	0,53			1,16		1,09
			0,61	0,58			1,11		1,06
			0,54	0,47			1,05		1,03
			0,54	0,46					1,12
			0,53	0,45					1,10
									1,07
									1,04
									1,01
									0,98
Moyenne	0,90	1,55	0,96	0,98	1,04	1,36	1,00	1,02	1,08
Ecart-type	1,09	0,28	0,31	0,39	0,31	0,81	0,15	0,08	0,07



En ne tenant pas compte des résultats à 60 keV et à 300 keV où les valeurs de références ne suivent pas, de façon générale à partir d'épaisseurs élevées de plomb, les pentes de références en monoénergétiques, on obtient les résultats suivant pour 172 points de comparaisons :



III- 4 : COMPARAISONS FACTEURS D'ATTÉNUATIONS DOSIMEX-GX 3.0 vs NFC 15-160 VERSION 2018

PRÉAMBULE :

Les valeurs de référence sont issues de l'article de Laurent Bourgois et Stéphanie Ménard et correspondent aux abaques de la norme NFC 15-160 version 2018. De fait ces atténuations sont maintenant calculées en termes d'équivalent de dose $H^*(10)$. Une autre nouveauté est le un jeu de données pour l'atténuation dans le béton .

IOP Publishing | Society for Radiological Protection
Journal of Radiological Protection

J. Radiol. Prot. **38** (2018) 471–479 (9pp)
<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aaae20>


Dose equivalent transmission data for shielding industrial x-ray facilities up to 800 kV

L Bourgois and S Ménard

CEA, DAM, DIF, Bruyères-le-Châtel, 91297 Arpajon Cedex, France

E-mail: laurent.bourgois@cea.fr

Received 10 November 2017, revised 24 January 2018
 Accepted for publication 9 February 2018
 Published 13 March 2018

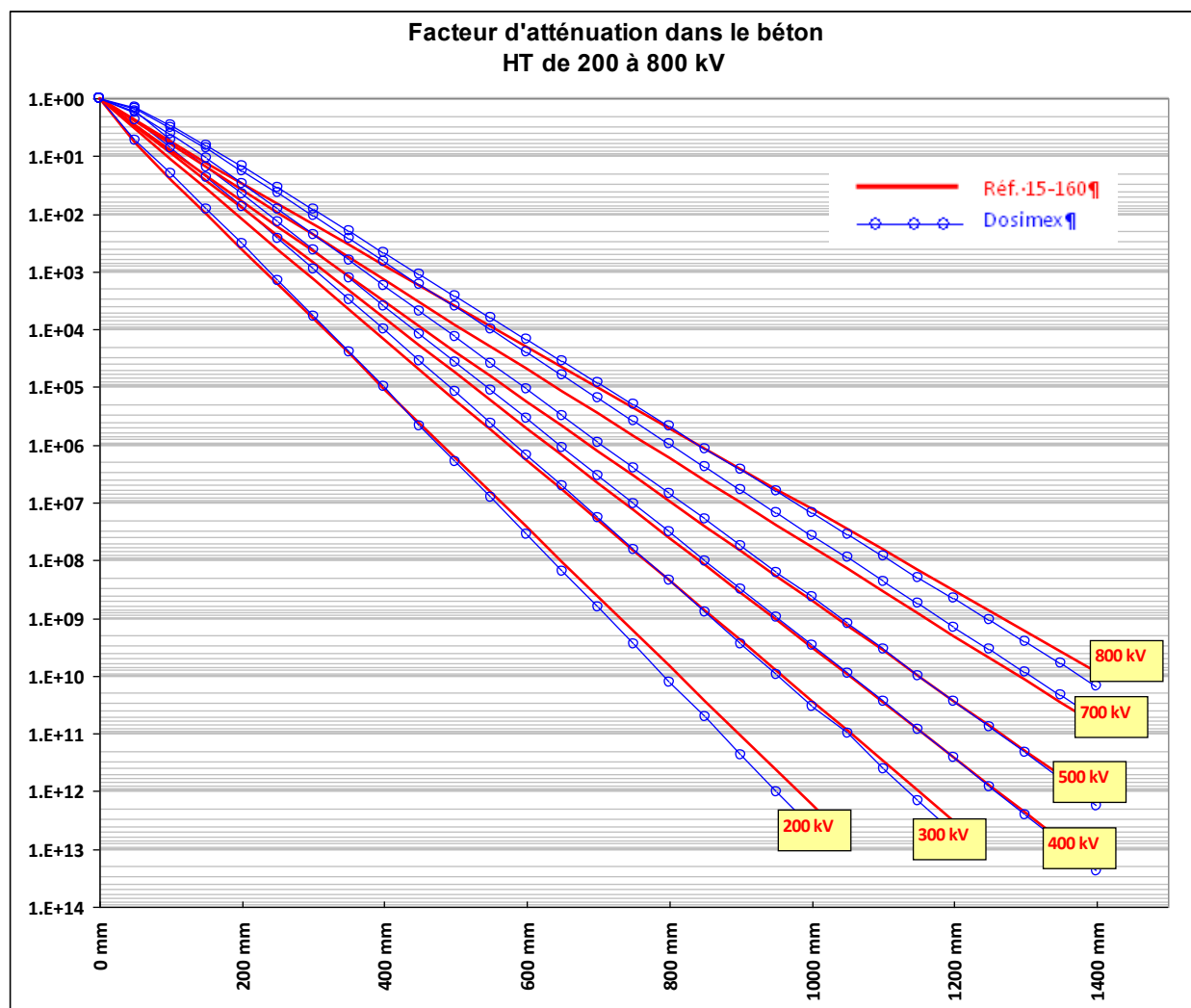


CrossMark

Abstract

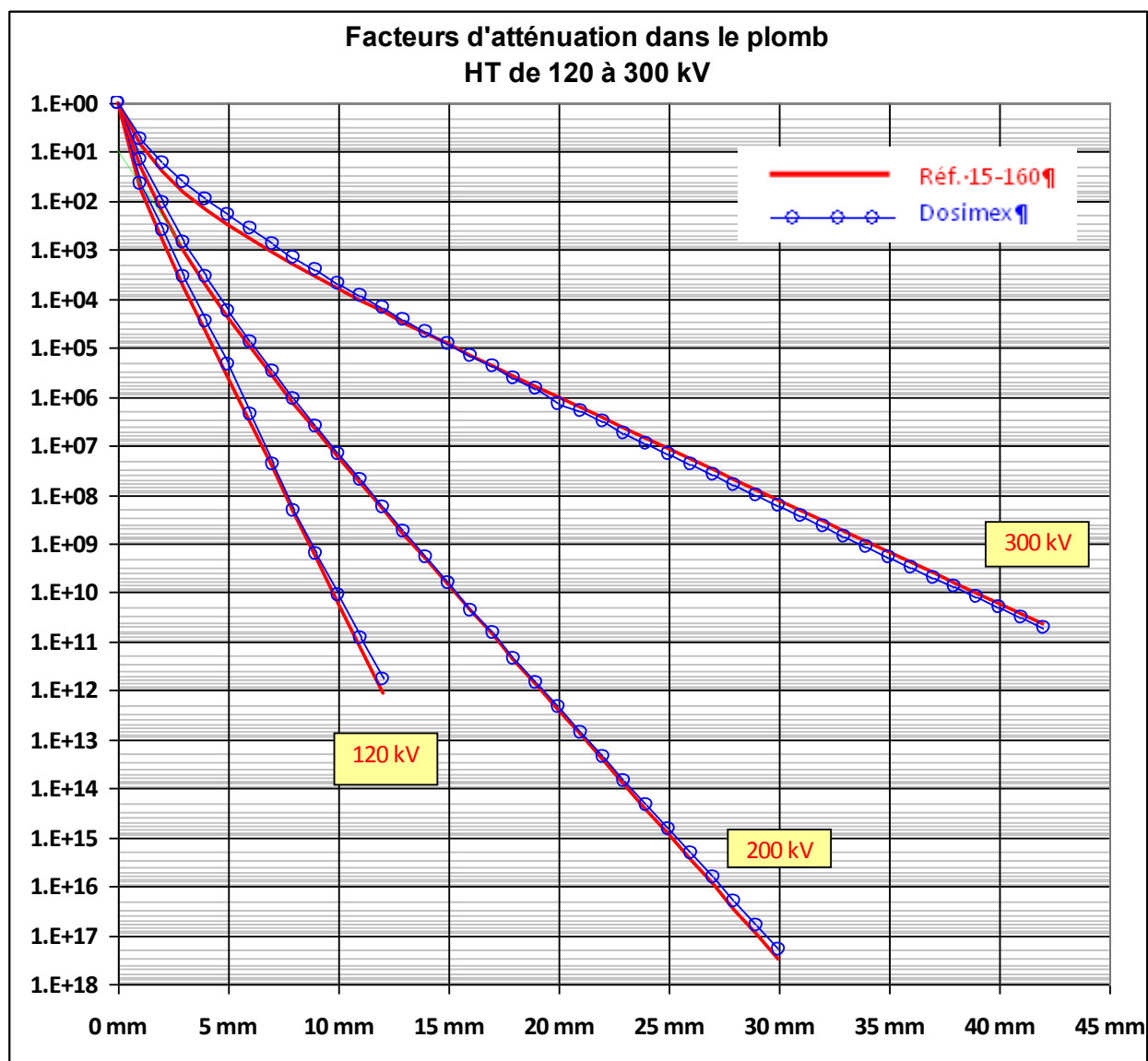
The transmission factors used to calculate radiation shielding around an industrial x-ray device are determined using the MCNP6 code. The transmission factors are given for high voltages ranging between 120 and 800 kV for lead and between 200 and 800 kV for concrete. In view of the high usage intensity of industrial devices, the transmission factors are evaluated up to 1.10^{-10} . The parameters used in the classic equation of Archer *et al* are derived from the transmission data calculated here. This type of data exists in the literature, but only for voltages lower than 150 kV to meet the design demands for facilities used in the medical field. In addition, this study markedly supplements the existing data, in particular for industrial and research installations.

III.4.1 FACTEURS D'ATTÉNUATION DANS LE BÉTON (NF C 15-160 2018)



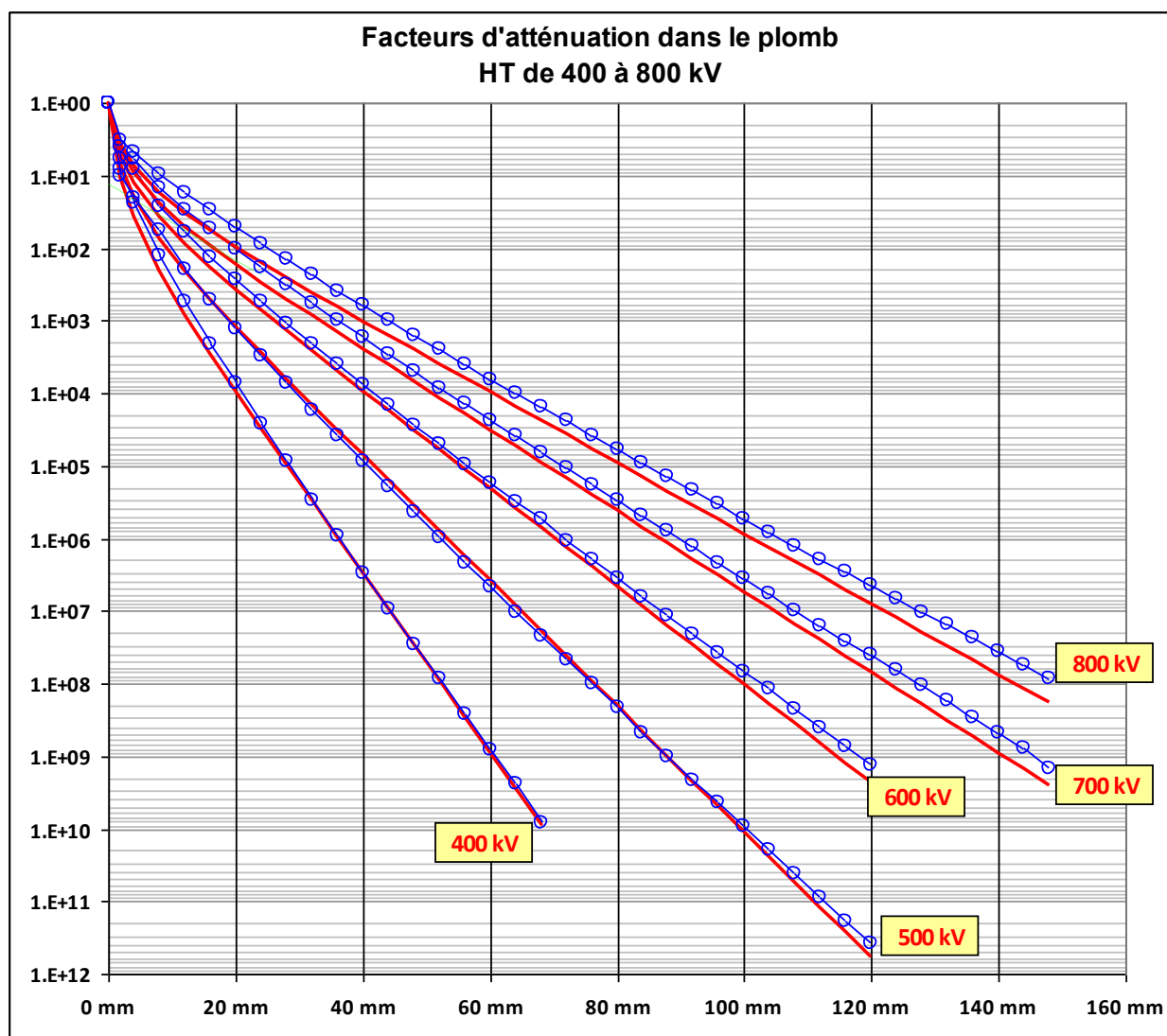
Malgré des atténuations calculées sur des spectres continus et pour des épaisseurs pouvant dépasser 1 m de béton, l'adéquation est excellente. L'écart quadratique moyen sur 185 valeurs est égal à 35 % seulement.

III.4.2 FACTEURS D'ATTÉNUATION DANS LE PLOMB DE 120 À 300 kV (NF C 15-160, 2018)



L'écart quadratique moyen sur 83 valeurs est égal à 26 % .

III.4.3 FACTEURS D'ATTÉNUATION DANS LE PLOMB DE 400 À 800 kV (NF C 15-160 2018)



L'écart quadratique moyen sur 161 valeurs est égal à 29 % .

III.4.4 ANALYSE DES RÉSULTATS POUR LA VERSION 2018

Statistiques sur 202 rapports de facteurs d'atténuation Dosimex/Nf C 15160 :

Rapport facteur d'atténuation Dosimex/NF C 15-160 pour le Béton						Rapport facteur d'atténuation Dosimex/NF C 15-160 pour le Plomb							
200 kV	300 kV	400 kV	500 kV	700 kV	800 kV	120 kV	200 kV	300 kV	400 kV	500 kV	600 kV	700 kV	800 kV
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.88	0.69	0.54	0.61	0.60	0.61	0.79	0.76	0.77	0.77	1.43	1.12	0.95	0.87
0.79	0.63	0.59	0.52	0.51	0.52	0.62	0.61	0.66	0.65	1.08	0.66	0.65	0.68
0.79	0.62	0.57	0.49	0.48	0.50	0.64	0.63	0.62	0.61	0.79	0.70	0.61	0.56
0.81	0.62	0.56	0.48	0.46	0.50	0.59	0.66	0.61	0.65	0.94	0.69	0.58	0.53
0.88	0.63	0.58	0.50	0.46	0.52	0.56	0.71	0.61	0.71	0.98	0.70	0.59	0.53
0.92	0.65	0.59	0.51	0.46	0.54	0.68	0.76	0.63	0.78	1.03	0.71	0.60	0.54
0.92	0.67	0.60	0.52	0.47	0.57	0.83	0.79	0.65	0.85	1.09	0.75	0.62	0.55
0.94	0.67	0.61	0.54	0.47	0.60	0.90	0.82	0.68	0.91	1.13	0.77	0.64	0.57
1.13	0.70	0.62	0.55	0.48	0.63	0.81	0.82	0.72	0.96	1.17	0.79	0.66	0.58
1.14	0.74	0.64	0.57	0.49	0.66	0.70	0.85	0.76	0.99	1.20	0.82	0.69	0.60
1.18	0.79	0.67	0.59	0.50	0.70	0.61	0.88	0.80	1.02	1.24	0.83	0.69	0.61
1.36	0.81	0.70	0.62	0.51	0.73	0.51	0.91	0.84	1.00	1.24	0.84	0.71	0.62
1.48	0.85	0.72	0.65	0.52	0.77		0.91	0.88	0.96	1.24	0.85	0.72	0.63
1.49	0.91	0.74	0.69	0.54	0.82		0.89	0.92	0.93	1.24	0.85	0.73	0.64
1.69	0.96	0.77	0.71	0.55	0.87		0.93	0.96	0.91	1.25	0.85	0.73	0.65
1.90	1.00	0.79	0.73	0.56	0.92		1.05	1.00	0.91	1.24	0.86	0.74	0.66
1.87	1.07	0.83	0.77	0.59	1.00		0.93	1.04	0.84	1.20	0.83	0.73	0.65
2.10	1.13	0.85	0.81	0.60	1.02		0.91	1.07	0.95	1.16	0.77	0.72	0.65
2.39	1.19	0.88	0.85	0.62	1.07		0.86	1.10		1.12	0.80	0.73	0.66
2.44	1.25	0.90	0.86	0.63	1.13		0.87	1.38		1.08	0.79	0.74	0.66
	1.08	0.95	0.90	0.64	1.18		0.86	1.15		1.05	0.77	0.71	0.65
	1.40	0.97	0.93	0.68	1.29		0.83	1.18		1.04	0.76	0.69	0.64
	1.48	0.99	1.00	0.65	1.36		0.79	1.26		1.01	0.74	0.68	0.63
	1.55	1.02	1.02	0.70	1.35		0.78	1.22		0.95	0.71	0.68	0.62
		1.07	1.05	0.71	1.43		0.77	1.23		0.89	0.68	0.67	0.62
		1.10	1.09	0.72	1.49		0.75	1.23		0.84	0.65	0.67	0.62
		1.11	1.14	0.74	1.59		0.72	1.24		0.79	0.63	0.66	0.62
		1.15	1.22	0.77	1.72		0.67	1.25		0.76	0.62	0.65	0.60
							0.66	1.25		0.73	0.61	0.65	0.59
							0.64	1.25		0.71	0.60	0.62	0.57
								1.26		0.66	0.58	0.59	0.55
								1.26				0.57	0.54
								1.26				0.55	0.52
								1.27				0.54	0.51
								1.26				0.53	0.49
								1.25				0.53	0.48
								1.24				0.52	0.48
								1.22				0.61	0.47

En bleu les rapports supérieurs à 1,5 (8 cas), en rouge les rapports inférieurs à 0,5 (12 cas)

Pour l'ensemble des cas la moyenne est égale à 0,83, montrant une tendance à une légère sous-estimation des facteurs d'atténuations avec Dosimex, ce qui va dans le sens de la radioprotection puisque ainsi les DED derrière écran sont alors légèrement surestimés

