

Analyse de l'Effet du PMMA sur la Production de Particules Secondaires

Simulation Geant4 – Source ^{152}Eu – 25×10^6 événements

2 janvier 2026

1 Configurations comparées

Trois configurations ont été simulées pour isoler l'effet de chaque composant :

Table 1: Matériaux des différentes configurations

Configuration	PMMA (5 mm)	Feuille (20 μm)	Eau (5 mm)
Air (référence)	Air	Air	Air
Tungstène seul	Air	Tungstène	Air
PMMA + Tungstène	PMMA	Tungstène	Air

2 Effet du PMMA sur le PreContainerPlane

Le PreContainerPlane est situé juste avant la région d'eau, après le bloc de PMMA. C'est ici que l'effet du PMMA est le plus visible.

2.1 Photons entrant dans l'eau

Table 2: Statistiques des photons au PreContainerPlane

Observable	Air	W seul	PMMA + W	Variation
Mean $\langle N_\gamma \rangle$	1.155	1.155	1.129	−2.3%
Std Dev	0.990	0.990	0.982	−0.8%
Énergie moyenne	1124 keV	1124 keV	1111 keV	−1.2%
Std Dev énergie	783 keV	783 keV	774 keV	−1.1%
Entries ($E > 0$)	2.79×10^7	2.79×10^7	2.76×10^7	−1.1%

Interprétation : Le PMMA (5 mm, $\rho \approx 1.18 \text{ g/cm}^3$) absorbe environ **2–3%** des photons incidents et réduit légèrement leur énergie moyenne par diffusion Compton. Cet effet est modéré car le PMMA est un matériau de faible Z (H, C, O).

2.2 Électrons entrant dans l'eau – Changement majeur

Table 3: Statistiques des électrons au PreContainerPlane

Observable	Air	W seul	PMMA + W	Facteur
Mean $\langle N_{e-} \rangle$	3.99×10^{-4}	3.99×10^{-4}	4.86×10^{-3}	$\times 12.2$
Std Dev	0.0208	0.0208	0.0735	$\times 3.5$
Énergie moyenne	346 keV	346 keV	478 keV	$\times 1.38$
Std Dev énergie	333 keV	333 keV	273 keV	$\times 0.82$
Entries ($E > 0$)	9 607	9 607	114 723	$\times 11.9$

Résultat majeur :

Le PMMA produit 12 fois plus d'électrons que l'air !

Mean : $3.99 \times 10^{-4} \rightarrow 4.86 \times 10^{-3}$ (facteur $\times 12.2$)

Entries : 9 607 \rightarrow 114 723 (facteur $\times 11.9$)

Origine physique des électrons :

- **Effet Compton** : Processus dominant dans le PMMA pour les photons de 100 keV à 1 MeV
- **Composition** : Le PMMA ($C_5H_8O_2$) contient des éléments légers favorisant le Compton
- **Énergie plus élevée** : 478 keV vs 346 keV indique des électrons Compton de haute énergie
- **Épaisseur** : 5 mm de PMMA offre suffisamment de matière pour les interactions

3 Effet sur le PostContainerPlane

3.1 Photons transmis

Table 4: Statistiques des photons transmis au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Variation
Mean $\langle N_\gamma \rangle$	1.027	1.000	-2.6%
Std Dev	0.943	0.933	-1.1%
Énergie moyenne	1069 keV	1058 keV	-1.0%
Entries	2.57×10^7	2.45×10^7	-4.7%

3.2 Photons rétrodiffusés (backscatter)

Table 5: Statistiques des photons backscatter au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Variation
Mean $\langle N_\gamma \rangle$	8.11×10^{-3}	8.08×10^{-3}	$\sim 0\%$
Std Dev	0.0956	0.0954	$\sim 0\%$
Énergie moyenne	80,7 keV	81,1 keV	$\sim 0\%$
Entries	189 338	188 544	$\sim 0\%$

Observation importante : Le backscatter des photons est **identique** dans les deux configurations. Il est entièrement dominé par la **fluorescence X du tungstène** (pic à 60–80 keV), et le PMMA n’a aucune influence sur ce processus.

3.3 Électrons transmis

Table 6: Statistiques des électrons transmis au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Facteur
Mean $\langle N_{e-} \rangle$	4.13×10^{-4}	4.18×10^{-3}	$\times 10.1$
Std Dev	0.0210	0.0681	$\times 3.2$
Énergie moyenne	290 keV	477 keV	$\times 1.64$
Entries	9 973	99 092	$\times 9.9$

3.4 Électrons rétrodiffusés (backscatter)

Table 7: Statistiques des électrons backscatter au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Facteur
Mean $\langle N_{e-} \rangle$	1.66×10^{-3}	3.38×10^{-3}	$\times 2.0$
Std Dev	0.0453	0.0648	$\times 1.4$
Énergie moyenne	156 keV	267 keV	$\times 1.71$
Entries	37 350	75 342	$\times 2.0$

4 Analyse des figures

4.1 Figure PreContainer (4 panneaux)

Photons (panneaux supérieurs) :

- Distribution du nombre de photons similaire mais légèrement décalée vers la gauche
- Mean = 1.129 (vs 1.155 sans PMMA) : perte de $\sim 2\%$
- Spectre d’énergie quasi-identique avec pics des raies Eu-152 visibles

Électrons (panneaux inférieurs) – Changement majeur :

- Distribution beaucoup plus étendue : jusqu’à $N_{e-} = 5$ (vs 3–4 sans PMMA)
- Nombre d’entrées $\times 12$: 114 723 vs 9 607
- Spectre d’énergie en forme de “bosse” caractéristique de l’effet Compton
- Pic vers 500–600 keV avec coupure nette à ~ 1400 keV (bord Compton)

4.2 Figure Comparaison Pre/Post (photons)

- **Perte de photons** : $(1.129 - 1.000)/1.129 = 11.4\%$ (vs 11.1% sans PMMA)
- Les spectres Pre et Post sont quasi-superposés
- La forme spectrale n’est pas modifiée par le passage à travers l’eau (en air) et le tungstène

4.3 Figure Photons backscatter

- Pic de fluorescence X du tungstène toujours dominant à **60–80 keV**
- Raies K_α (58–59 keV) et K_β (67–69 keV) du W

- **Identique** à la configuration sans PMMA → le tungstène domine le backscatter γ
- Queue Compton jusqu'à ~ 1200 keV

4.4 Figure Électrons transmis

- Spectre très différent de la configuration sans PMMA
- Forme en “bosse” avec pic à ~ 500 keV
- Queue jusqu'à ~ 1500 keV (électrons Compton de haute énergie)
- Entries : 99 092 (vs 9 973 sans PMMA) → facteur $\times 10$

4.5 Figure Électrons backscatter

- Distribution plus large : jusqu'à $N_{e^-} = 8$ (vs 7 sans PMMA)
- Spectre d'énergie élargi avec pic à $\sim 200\text{--}300$ keV
- Queue étendue jusqu'à ~ 2500 keV (vs 1800 keV sans PMMA)
- Doublement du nombre d'électrons backscatter : 75 342 vs 37 350

5 Tableau récapitulatif

Table 8: Synthèse de l'effet du PMMA sur toutes les observables

Plan	Observable	W seul	PMMA + W	Facteur
PreContainer	Photons (Mean)	1.155	1.129	$\times 0.98$
	Électrons (Mean)	3.99×10^{-4}	4.86×10^{-3}	$\times 12.2$
PostContainer transmis	Photons (Mean)	1.027	1.000	$\times 0.97$
	Électrons (Mean)	4.13×10^{-4}	4.18×10^{-3}	$\times 10.1$
PostContainer backscatter	Photons (Mean)	8.11×10^{-3}	8.08×10^{-3}	$\times 1.0$
	Électrons (Mean)	1.66×10^{-3}	3.38×10^{-3}	$\times 2.0$

6 Conclusions

1. **Production massive d'électrons Compton** : Le PMMA (5 mm) multiplie par **12** le nombre d'électrons entrant dans la région d'eau. C'est l'effet le plus significatif observé.
2. **Électrons de haute énergie** : L'énergie moyenne des électrons augmente de 346 keV à 478 keV, indiquant une production dominée par l'effet Compton avec des photons de haute énergie.
3. **Spectre Compton caractéristique** : Le spectre des électrons présente une forme en “bosse” avec une coupure nette correspondant au bord Compton des raies gamma de l'Eu-152.
4. **Photons peu affectés** : Le PMMA n'absorbe que $\sim 2\text{--}3\%$ des photons et ne modifie pas significativement leur spectre d'énergie.
5. **Backscatter photon inchangé** : La fluorescence X du tungstène (60–80 keV) domine complètement le backscatter des photons, indépendamment du PMMA.
6. **Backscatter électron doublé** : Le doublement des électrons backscatter ($\times 2$) est une conséquence directe de l'augmentation des électrons incidents sur le tungstène.

Implication pour la dosimétrie : La présence du PMMA modifie considérablement le spectre de particules chargées atteignant l'eau. Les électrons Compton produits dans le PMMA contribueront significativement à la dose déposée dans les premiers millimètres d'eau, un effet qui sera visible lorsque le matériau "eau" sera activé dans la simulation.