

# Comparaison des Résultats de Simulation

## Feuille de 20 $\mu\text{m}$ : Air vs Tungstène

Simulation Geant4 – Source  $^{152}\text{Eu}$  –  $25 \times 10^6$  événements

2 janvier 2026

### 1 Configuration des simulations

Deux simulations ont été réalisées avec des configurations identiques, à l'exception du matériau de la feuille de 20  $\mu\text{m}$  située entre l'eau et le PostContainerPlane.

Table 1: Paramètres des deux configurations

Paramètre	Configuration Air	Configuration Tungstène
Matériau feuille	Air	Tungstène (W)
Épaisseur	20 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Numéro atomique $Z$	7.4 (effectif)	74
Densité $\rho$	0,0012 g/cm <sup>3</sup>	19,3 g/cm <sup>3</sup>
Événements simulés	$25 \times 10^6$	$25 \times 10^6$

### 2 Comparaison des photons

#### 2.1 Photons rétrodiffusés (backscatter, direction $-z$ )

Table 2: Statistiques des photons rétrodiffusés au PostContainerPlane

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_\gamma \rangle$	$8,29 \times 10^{-5}$	$8,11 \times 10^{-3}$	$\times 98$
Écart-type $\sigma$	0,0095	0,0956	$\times 10$
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_\gamma \rangle$	153 keV	80,7 keV	$\times 0.53$
Écart-type énergie	76,5 keV	63,1 keV	$\times 0.82$
Entrées (énergie $> 0$ )	$\sim 1\,979$	$\sim 189\,338$	$\times 96$

#### Interprétation :

- Le nombre de photons backscatter est multiplié par  $\sim 100$  avec le tungstène.
- L'énergie moyenne **diminue** de 153 keV à 81 keV. Cette diminution s'explique par l'apparition des **raies de fluorescence X** du tungstène :
  - Raies  $K_\alpha$  : 59.3 keV et 57.9 keV
  - Raies  $K_\beta$  : 67.2 keV et 69.1 keV
- Ces raies X de basse énergie dominent le spectre de backscatter et abaissent l'énergie moyenne.

## 2.2 Photons transmis (direction $+z$ )

Table 3: Statistiques des photons transmis au PostContainerPlane

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_\gamma \rangle$	1,028	1,027	$\sim 1.00$
Écart-type $\sigma$	0,943	0,943	$\sim 1.00$
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_\gamma \rangle$	1069 keV	1069 keV	$\sim 1.00$

**Interprétation :** La transmission des photons est quasi-identique car l'épaisseur de 20  $\mu\text{m}$  de tungstène est très faible par rapport au libre parcours moyen des photons gamma de haute énergie ( $\lambda \gg 20 \mu\text{m}$  pour  $E_\gamma > 100 \text{ keV}$ ).

## 3 Comparaison des électrons

### 3.1 Électrons rétrodiffusés (backscatter, direction $-z$ )

Table 4: Statistiques des électrons rétrodiffusés au PostContainerPlane

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_{e-} \rangle$	$1,21 \times 10^{-5}$	$1,66 \times 10^{-3}$	$\times 137$
Écart-type $\sigma$	0,0039	0,0453	$\times 12$
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_{e-} \rangle$	35 keV	156 keV	$\times 4.5$
Écart-type énergie	—	179 keV	—
Entrées (énergie $> 0$ )	$\sim 303$	$\sim 37\,350$	$\times 123$

**Interprétation :**

- Le nombre d'électrons backscatter est multiplié par  $\sim 130$  avec le tungstène.
- Contrairement aux photons, l'énergie moyenne **augmente** de 35 keV à 156 keV.
- Les électrons de haute énergie proviennent de :
  - Photoélectrons des raies gamma (jusqu'à  $\sim 1400 - 69.5 \approx 1330 \text{ keV}$ )
  - Électrons Compton rétrodiffusés
- Le coefficient de rétrodiffusion électronique du tungstène est élevé ( $\sim 50\%$  pour des électrons de quelques centaines de keV).

### 3.2 Électrons transmis (direction $+z$ )

Table 5: Statistiques des électrons transmis au PostContainerPlane

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_{e-} \rangle$	$3,25 \times 10^{-4}$	$4,13 \times 10^{-4}$	$\times 1.27$
Écart-type $\sigma$	0,0182	0,0210	$\times 1.15$
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_{e-} \rangle$	364 keV	290 keV	$\times 0.80$
Entrées (énergie $> 0$ )	$\sim 9\,973$	$\sim 9\,973$	$\sim 1.00$

**Interprétation :** Le nombre d'électrons transmis augmente légèrement (+27%) mais leur énergie moyenne diminue (-20%), ce qui traduit une perte d'énergie dans le tungstène.

## 4 Tableau récapitulatif

Table 6: Synthèse de la comparaison Air vs Tungstène (feuille 20  $\mu\text{m}$ )

Catégorie	Observable	Air	Tungstène	Ratio
<b>Photons backscatter</b>	Nombre moyen	$8,29 \times 10^{-5}$	$8,11 \times 10^{-3}$	$\times 98$
	Énergie moyenne	153 keV	80,7 keV	$\times 0.53$
	Événements	$\sim 2\,000$	$\sim 189\,000$	$\times 95$
<b>Électrons backscatter</b>	Nombre moyen	$1,21 \times 10^{-5}$	$1,66 \times 10^{-3}$	$\times 137$
	Énergie moyenne	35 keV	156 keV	$\times 4.5$
	Événements	$\sim 300$	$\sim 37\,000$	$\times 123$
<b>Photons transmis</b>	Nombre moyen	1,028	1,027	$\sim 1.0$
	Énergie moyenne	1069 keV	1069 keV	$\sim 1.0$
<b>Électrons transmis</b>	Nombre moyen	$3,25 \times 10^{-4}$	$4,13 \times 10^{-4}$	$\times 1.27$
	Énergie moyenne	364 keV	290 keV	$\times 0.80$

## 5 Conclusion

La comparaison entre les deux configurations démontre clairement l'effet du tungstène :

1. **Backscatter multiplié par  $\sim 100$**  : Le tungstène ( $Z=74$ ) est un excellent rétrodiffuseur comparé à l'air ( $Z_{\text{eff}} \approx 7.4$ ). Le rapport des sections efficaces d'interaction évolue approximativement comme  $Z^2$  pour l'effet photoélectrique et  $Z$  pour l'effet Compton.
2. **Fluorescence X visible** : Le pic à 60-80 keV dans le spectre des photons backscatter correspond aux raies  $K_\alpha$  et  $K_\beta$  du tungstène, signature caractéristique de ce matériau.
3. **Transmission quasi-inchangée** : L'épaisseur de 20  $\mu\text{m}$  est insuffisante pour atténuer significativement les photons gamma. Le libre parcours moyen dans le tungstène pour des photons de 500 keV est de l'ordre de 4 mm, soit 200 fois l'épaisseur de la feuille.
4. **Production d'électrons secondaires** : Le tungstène génère beaucoup plus d'électrons par effet photoélectrique et Compton, avec des énergies plus élevées que dans l'air.

Ces résultats valident le bon fonctionnement de la simulation et confirment que la feuille de tungstène de 20  $\mu\text{m}$  produit un backscatter significatif de photons et d'électrons, tout en laissant passer la quasi-totalité du flux gamma incident.