

# Analyse des Figures de Simulation

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

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

2 janvier 2026

### 1 Figure 1 : PreContainer (particules entrant dans l'eau)

Cette figure présente 4 histogrammes pour les particules traversant le PreContainerPlane (direction  $+z$ , entrant dans l'eau).

#### 1.1 Photons entrant

| Paramètre                       | Valeur             |
|---------------------------------|--------------------|
| Entries                         | $2.5 \times 10^7$  |
| Mean $\langle N_\gamma \rangle$ | 1.155              |
| Std Dev                         | 0.9902             |
| Entries (énergie > 0)           | $2.79 \times 10^7$ |
| Énergie moyenne                 | 1124 keV           |
| Std Dev énergie                 | 783,4 keV          |

Analyse :

- **Distribution** : Pic principal à  $N_\gamma = 1$ , décroissance jusqu'à  $N_\gamma \approx 8$ .
- **Interprétation** : En moyenne  $\sim 1.15$  photon par désintégration de  $^{152}\text{Eu}$  entre dans la région d'eau.
- **Spectre d'énergie** : Distribution large de 0 à  $\sim 7000$  keV, reflétant le spectre multi-raies de l'Eu-152.

#### 1.2 Électrons entrant

| Paramètre                     | Valeur                 |
|-------------------------------|------------------------|
| Entries                       | $2.5 \times 10^7$      |
| Mean $\langle N_{e-} \rangle$ | $3.985 \times 10^{-4}$ |
| Std Dev                       | 0.02076                |
| Entries (énergie > 0)         | 9 607                  |
| Énergie moyenne               | 346 keV                |
| Std Dev énergie               | 333,4 keV              |

Analyse :

- **Distribution** : Très majoritairement  $N_{e-} = 0$ , quelques événements avec 1–4 électrons.
- **Taux** : Seulement 9 607 événements sur 25 millions ont au moins un électron.
- **Interprétation** : Électrons secondaires créés en amont (Compton, photoélectrique dans le filtre/PMMA actuellement en air).

## 2 Figure 2 : PostContainer – Photons transmis

### 2.1 Nombre de photons transmis

| Paramètre                       | Valeur            |
|---------------------------------|-------------------|
| Entries                         | $2.5 \times 10^7$ |
| Mean $\langle N_\gamma \rangle$ | 1.027             |
| Std Dev                         | 0.9432            |

Comparaison avec PreContainer :

- Mean passe de 1.155 à 1.027, soit une **perte de 11%**.
- Cette perte est due à l'échappement latéral ( $\sim 10\%$ ), au backscatter ( $\sim 0.8\%$ ) et à l'absorption ( $< 0.1\%$ ).

### 2.2 Spectre d'énergie des photons transmis

| Paramètre       | Valeur             |
|-----------------|--------------------|
| Entries         | $2.57 \times 10^7$ |
| Énergie moyenne | 1069 keV           |
| Std Dev         | 750,7 keV          |

Analyse :

- **Structure** : Spectre quasi-identique au PreContainer (pics des raies Eu-152 visibles).
- **Interprétation** : Les photons transmis conservent leur énergie car 20  $\mu\text{m}$  de W est insuffisant pour une atténuation significative des photons gamma de haute énergie.

## 3 Figure 3 : PostContainer – Photons rétrodiffusés (backscatter)

### 3.1 Nombre de photons backscatter

| Paramètre                       | Valeur                 |
|---------------------------------|------------------------|
| Entries                         | $2.5 \times 10^7$      |
| Mean $\langle N_\gamma \rangle$ | $8.114 \times 10^{-3}$ |
| Std Dev                         | 0.09559                |

Analyse :

- **Distribution** : Majorité à 0, pic à 1, queue jusqu'à  $\sim 5$  photons.
- **Taux de backscatter** :  $\sim 0.8\%$  des événements ont au moins 1 photon rétrodiffusé.

### 3.2 Spectre d'énergie des photons backscatter

| Paramètre       | Valeur    |
|-----------------|-----------|
| Entries         | 189 338   |
| Énergie moyenne | 80,74 keV |
| Std Dev         | 63,09 keV |

**Analyse du spectre :**

- **Pic dominant à 60–80 keV** : Raies de fluorescence K du tungstène :
  - $K_{\alpha 1} = 59.32$  keV,  $K_{\alpha 2} = 57.98$  keV
  - $K_{\beta 1} = 67.24$  keV,  $K_{\beta 3} = 66.95$  keV
  - $K_{\beta 2} = 69.10$  keV
- **Queue jusqu'à ~1200 keV** : Photons Compton rétrodiffusés.
- **Interprétation** : La fluorescence X du tungstène domine le spectre de backscatter, ce qui explique l'énergie moyenne basse (80.7 keV).

**4 Figure 4 : PostContainer – Électrons transmis****4.1 Nombre d'électrons transmis**

| Paramètre                     | Valeur                 |
|-------------------------------|------------------------|
| Entries                       | $2.5 \times 10^7$      |
| Mean $\langle N_{e-} \rangle$ | $4.127 \times 10^{-4}$ |
| Std Dev                       | 0.02104                |

**Comparaison avec PreContainer :**

- Mean passe de  $3.985 \times 10^{-4}$  à  $4.127 \times 10^{-4}$ , soit une **augmentation de 4%**.
- **Interprétation** : Production nette d'électrons dans le tungstène (effet photoélectrique, Compton).

**4.2 Spectre d'énergie des électrons transmis**

| Paramètre       | Valeur    |
|-----------------|-----------|
| Entries         | 9 973     |
| Énergie moyenne | 290,5 keV |
| Std Dev         | 281,4 keV |

**Analyse du spectre :**

- **Pic à basse énergie (50–150 keV)** : Électrons ayant perdu de l'énergie dans le tungstène.
- **Distribution jusqu'à ~1000 keV** : Électrons Compton de haute énergie.
- **Énergie moyenne réduite** : 290 keV vs 346 keV au PreContainer (**–16%**).
- **Interprétation** : Les électrons perdent de l'énergie en traversant le tungstène par ionisation et rayonnement de freinage.

**5 Figure 5 : PostContainer – Électrons rétrodiffusés (backscatter)****5.1 Nombre d'électrons backscatter**

| Paramètre                     | Valeur                 |
|-------------------------------|------------------------|
| Entries                       | $2.5 \times 10^7$      |
| Mean $\langle N_{e-} \rangle$ | $1.662 \times 10^{-3}$ |
| Std Dev                       | 0.04527                |

**Analyse :**

- **Distribution** : Pic à 0, décroissance jusqu'à  $\sim 7$  électrons.
- **Taux** :  $\sim 0.17\%$  des événements ont au moins 1 électron rétrodiffusé.
- **Comparaison Air $\rightarrow$ W** : Facteur  $\times 137$  (de  $1.21 \times 10^{-5}$  à  $1.66 \times 10^{-3}$ ).

**5.2 Spectre d'énergie des électrons backscatter**

| Paramètre       | Valeur    |
|-----------------|-----------|
| Entries         | 37 350    |
| Énergie moyenne | 156 keV   |
| Std Dev         | 179,4 keV |

**Analyse du spectre :**

- **Pic principal à  $\sim 100\text{--}150$  keV** : Photoélectrons et électrons Compton rétrodiffusés.
- **Queue étendue jusqu'à  $\sim 1800$  keV** : Électrons de haute énergie.
- **Distribution large** : Plus étendue que pour les photons backscatter.
- **Interprétation** : Le tungstène ( $Z=74$ ) possède un coefficient de rétrodiffusion électronique élevé ( $\sim 50\%$  pour des électrons de quelques centaines de keV).

**6 Figure 6 : Comparaison PreContainer vs PostContainer (Photons)**

Cette figure superpose les distributions du PreContainer (orange) et du PostContainer (cyan) pour les photons.

**6.1 Comparaison du nombre de photons**

| Plan                  | Mean         | Std Dev |
|-----------------------|--------------|---------|
| PreContainer (orange) | 1.155        | 0.9902  |
| PostContainer (cyan)  | 1.027        | 0.9432  |
| <b>Perte</b>          | <b>11.1%</b> |         |

**Causes de la perte :**

- Échappement latéral :  $\sim 10\%$
- Backscatter :  $\sim 0.8\%$
- Absorption :  $< 0.1\%$

**6.2 Comparaison des spectres d'énergie**

| Plan             | Entries                    | Mean                       | Std Dev                    |
|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| PreContainer     | $2.79 \times 10^7$         | 1124 keV                   | 783,4 keV                  |
| PostContainer    | $2.57 \times 10^7$         | 1069 keV                   | 750,7 keV                  |
| <b>Variation</b> | <b><math>-7.9\%</math></b> | <b><math>-4.9\%</math></b> | <b><math>-4.2\%</math></b> |

**Analyse :**

- **Les deux spectres sont quasi-superposés** : Pas de modification significative de la forme spectrale.
- **Perte d'énergie moyenne** :  $(1124 - 1069)/1124 = 4.9\%$ .
- **Interprétation** : La feuille de 20  $\mu\text{m}$  de W est transparente aux photons gamma de haute énergie. 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.

## 7 Tableau récapitulatif des statistiques

Table 1: Synthèse des statistiques pour toutes les figures

| Figure        | Particule             | Direction | Mean                  | Entries ( $E>0$ )  | $\langle E \rangle$ |
|---------------|-----------------------|-----------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| PreContainer  | Photons               | $+z$      | 1.155                 | $2.79 \times 10^7$ | 1124 keV            |
| PreContainer  | Électrons             | $+z$      | $3.99 \times 10^{-4}$ | 9 607              | 346 keV             |
| PostContainer | Photons transmis      | $+z$      | 1.027                 | $2.57 \times 10^7$ | 1069 keV            |
| PostContainer | Photons backscatter   | $-z$      | $8.11 \times 10^{-3}$ | 189 338            | 80,7 keV            |
| PostContainer | Électrons transmis    | $+z$      | $4.13 \times 10^{-4}$ | 9 973              | 290 keV             |
| PostContainer | Électrons backscatter | $-z$      | $1.66 \times 10^{-3}$ | 37 350             | 156 keV             |

## 8 Conclusions de l'analyse des figures

1. **Fluorescence X du tungstène** : Le pic à 60–80 keV dans le spectre des photons backscatter est la signature caractéristique des raies K du tungstène ( $K_\alpha$  à 58–59 keV,  $K_\beta$  à 67–69 keV).
2. **Backscatter significatif** :  $\sim 189\,000$  photons et  $\sim 37\,000$  électrons rétrodiffusés sur 25 millions d'événements, soit des taux de 0.8% et 0.17% respectivement.
3. **Transmission élevée** : La feuille de 20  $\mu\text{m}$  de W laisse passer  $>99\%$  des photons gamma incidents. La perte de 11% observée est principalement due à l'échappement latéral géométrique.
4. **Production d'électrons secondaires** : Le tungstène génère des électrons par effet photoélectrique et Compton, visible dans l'augmentation de 4% du nombre d'électrons transmis par rapport au PreContainer.
5. **Cohérence physique** : Les spectres d'énergie sont conformes aux attentes théoriques pour les interactions photon-matière dans un matériau de Z élevé :
  - Fluorescence X dominante dans le backscatter photon
  - Coefficient de rétrodiffusion électronique élevé ( $\sim 50\%$ )
  - Perte d'énergie des électrons transmis par ionisation

**Remarque** : 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 (dominé par la fluorescence X) et d'électrons, tout en laissant passer la quasi-totalité du flux gamma incident.