

# **Analyse des Méthodes de Calcul du dose dans une Simulation Geant4**

Source Europium-152 – Détecteur dans l’air à 20 cm – plaque intermédiaire W/PETG (7mm)  
- Inox (5mm) - W/PETG (7mm)

Documentation technique

December 17, 2025

## **Abstract**

Ce document présente une analyse comparative de méthodes de calcul grandeurs radiométriques (débit de Kerma, débit de dose dans des tissus mous), implémentées dans la simulation Geant4 d'une source d'Europium-152.

La première méthode repose sur le dépôt d'énergie Monte Carlo, tandis que la seconde utilise le calcul par fluence avec les coefficients d'absorption d'énergie tabulés. Cette analyse inclut les fondements théoriques, l'implémentation informatique et les conditions de validité de chaque approche.

# Contents

<b>1 Configuration de la simulation</b>	<b>3</b>
1.1 Vue d'Ensemble – Coupe Longitudinale . . . . .	3
1.2 Paramètres géométriques de la simulation . . . . .	4
<b>2 Résultats de Simulation</b>	<b>4</b>
2.1 Statistiques de génération . . . . .	4
2.2 Méthode 1 : Dépôt d'énergie Monte-Carlo direct . . . . .	4
2.3 Méthode 1bis : Forçage d'interaction . . . . .	4
2.4 Méthode 2 : Fluence spectrale . . . . .	4
2.5 Débits de dose simulés . . . . .	5
<b>3 Analyse de l'Atténuation</b>	<b>5</b>
3.1 Facteurs d'atténuation par rapport à la théorie sans écran . . . . .	5
3.2 Comparaison directe des deux écrans . . . . .	5
3.3 Analyse physique . . . . .	5
3.3.1 Pourquoi le sandwich atténue légèrement plus ? . . . . .	6
3.3.2 Bilan pour le spectre Eu-152 . . . . .	6
3.4 Facteurs d'atténuation par rapport à la théorie sans écran . . . . .	6
<b>4 Synthèse et Conclusions</b>	<b>6</b>
4.1 Résumé des résultats . . . . .	6
4.2 Conclusions . . . . .	7
4.3 Recommandations . . . . .	7

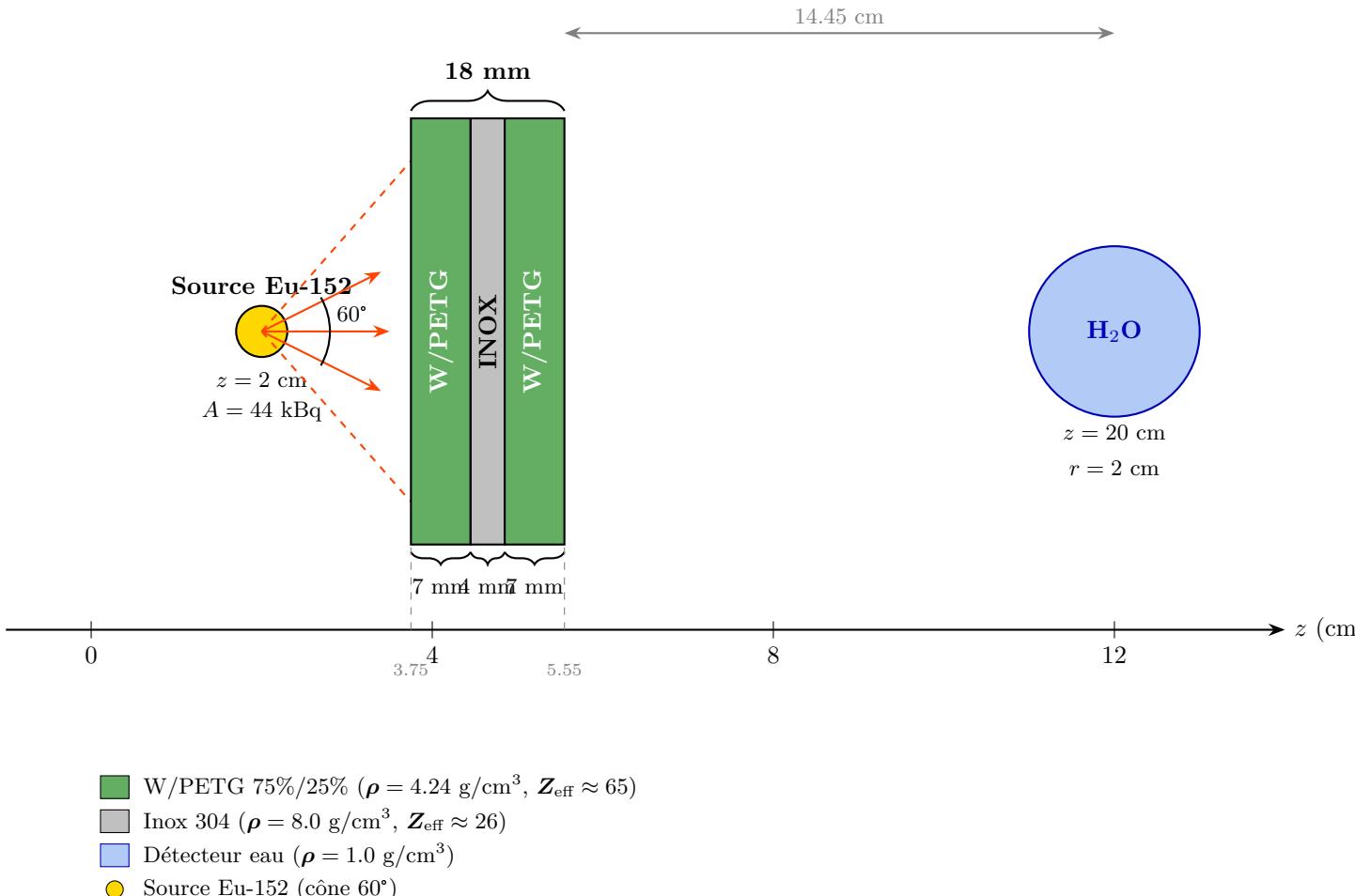
# 1 Configuration de la simulation

## Nouvelle Configuration

- la **plaqué intermédiaire** a une épaisseur de 18 mm
- la **plaqué intermédiaire** est un sandwich de W/PETG (7 mm), Inox (5 mm) et W/PETG (7mm)
- Son centre est en  $z = 4.65$  cm (2.65 cm de la source)
- Les **plans de comptage** sont distant de  $z = 2$ mm des faces avant et arrière de la plaque
- Le centre du **détecteur sphérique** (matériau = Water) est à une distance de 20 cm de la face arrière de la plaque

## 1.1 Vue d'Ensemble – Coupe Longitudinale

Coupe Longitudinale du Système de Blindage



Coupe longitudinale du système de blindage sandwich W/PETG + Inox + W/PETG. La source Eu-152 émet des gammas dans un cône de  $60^\circ$  vers le détecteur sphérique d'eau situé à  $z = 20$  cm.

## 1.2 Paramètres géométriques de la simulation

*Propriétés des couches du sandwich*

Couche	Matériau	Épaisseur (mm)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Masse surf. (g/cm <sup>2</sup> )
1 (avant)	W/PETG 75/25	7.0	4.24	2.97
2 (centre)	Inox 304	4.0	8.00	3.20
3 (arrière)	W/PETG 75/25	7.0	4.24	2.97
<b>Total</b>	–	<b>18.0</b>	–	<b>9.14</b>

## 2 Résultats de Simulation

### 2.1 Statistiques de génération

*Validation de la génération des gammas primaires*

Paramètre	Simulé	Théorie
Gammas générés	48 102 176	–
Moyenne $\gamma$ /événement	1.9241	1.924
Événements avec $N_\gamma = 0$	11.07%	~11.7%
Gammas atteignant détecteur	198 786	588 411 (géom.)
Transmission	33.8%	–

### 2.2 Méthode 1 : Dépôt d'énergie Monte-Carlo direct

Somme de l'énergie déposée par toutes les particules (gammas, électrons) dans le volume d'eau :

$$\dot{D}_1 = \frac{E_{\text{déposée}}}{m_{\text{eau}} \times t_{\text{simulé}}} \times f_{\text{corr}}$$

### 2.3 Méthode 1bis : Forçage d'interaction

Pour chaque gamma traversant le détecteur, calcul de l'énergie déposée théorique :

$$\dot{D}_{1\text{bis}} = \frac{1}{m_{\text{eau}} \times t} \sum_i E_i \times L_i \times \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{E_i} \times \rho_{\text{eau}} \times f_{\text{corr}}$$

où  $L_i$  est la longueur de corde du gamma  $i$  dans la sphère.

### 2.4 Méthode 2 : Fluence spectrale

Équivalente à la méthode 1bis, utilisant les coefficients de conversion fluence-dose :

$$\dot{D}_2 = \sum_i \Phi_i \times h_K(E_i) \times f_{\text{corr}}$$

Note :

#### Note

Les méthodes 1bis et 2 donnent des résultats identiques car elles utilisent la même formulation analytique. La méthode 1 (MC direct) présente plus de fluctuations statistiques

## 2.5 Débits de dose simulés

Débits de dose dans le détecteur eau (3 méthodes)

Méthode	Débit brut (nGy/h)	Débit corrigé (nGy/h)	Incertitude (nGy/h)
1 - MC direct	412.46	<b>103.12</b>	± 0.69
1bis - Forçage	430.01	<b>107.50</b>	± 0.24
2 - Fluence	430.01	<b>107.50</b>	± 0.24
Théorique (sans écran)	–	<b>174.8</b>	–

## 3 Analyse de l'Atténuation

### 3.1 Facteurs d'atténuation par rapport à la théorie sans écran

Le débit théorique sans écran est calculé par :

$$\dot{K}_{\text{théo}} = \frac{\Gamma \times A}{d^2} = \frac{0.13 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 / (\text{h} \cdot \text{MBq}) \times 0.044 \text{ MBq}}{(0.18 \text{ m})^2} \approx 176 \text{ nGy h}^{-1}$$

Facteurs d'atténuation des deux configurations

Configuration	Débit (nGy/h)	Facteur d'atténuation	Atténuation (%)
Sans écran (théorie)	174.8	1.000	0%
W/PETG homogène	110.96	0.635	36.5%
Sandwich Inox	107.50	0.615	38.5%

### 3.2 Comparaison directe des deux écrans

$$\text{Rapport} = \frac{\dot{D}_{\text{Sandwich}}}{\dot{D}_{\text{W/PETG}}} = \frac{107.50}{110.96} = 0.969 \pm 0.003$$

#### Interprétation

Le sandwich W/PETG + Inox + W/PETG atténue **3.1% de plus** que la plaque W/PETG homogène

### 3.3 Analyse physique

### 3.3.1 Pourquoi le sandwich atténue légèrement plus ?

1. Masse surfacique plus élevée :
  - W/PETG homogène :  $7.63 \text{ g cm}^{-2}$
  - Sandwich :  $9.14 \text{ g cm}^{-2}$  (+20%)
2. Densité de l'Inox :
  - L'Inox ( $8.0 \text{ g cm}^{-3}$ ) est presque  $2\times$  plus dense que le W/PETG ( $4.24 \text{ g cm}^{-3}$ )
  - Compense partiellement le Z plus faible ( $Z_{\text{Inox}} \approx 26$  vs  $Z_W = 74$ )
3. Effet du Z sur l'atténuation :
  - Basse énergie ( $< 100 \text{ keV}$ ) : effet photoélectrique  $\propto Z^{4-5} \Rightarrow$  W/PETG meilleur
  - Moyenne énergie ( $200-500 \text{ keV}$ ) : Compton  $\propto$  densité électronique  $\Rightarrow$  Inox compétitif
  - Haute énergie ( $> 1 \text{ MeV}$ ) : densité domine  $\Rightarrow$  Inox légèrement meilleur

### 3.3.2 Bilan pour le spectre Eu-152

Le spectre Eu-152 contient des contributions significatives à toutes les énergies :

- Basse énergie (40 keV) : 58.5% d'intensité  $\Rightarrow$  W/PETG plus efficace
- Moyenne énergie (122-444 keV) : 65.1% d'intensité  $\Rightarrow$  équivalent
- Haute énergie (778-1408 keV) : 66.3% d'intensité  $\Rightarrow$  Inox légèrement meilleur

Le gain de masse surfacique (+20%) compense les pertes à basse énergie, résultant en une atténuation globale légèrement supérieure (+3.1%).

## 3.4 Facteurs d'atténuation par rapport à la théorie sans écran

*Statistiques de transmission vers le détecteur*

Paramètre	W/PETG	Sandwich Inox
Gammas entrants (observés)	198 755	198 786
Gammas attendus (géométrique)	588 218	588 411
Fraction du cône	0.413%	0.413%
Transmission apparente	33.8%	33.8%

### Remarque

Le nombre de gammas atteignant le détecteur est quasi-identique pour les deux configurations. La différence de dose provient principalement du **spectre énergétique** des gammas transmis, pas de leur nombre

## 4 Synthèse et Conclusions

### 4.1 Résumé des résultats

*Tableau récapitulatif de comparaison*

Paramètre	W/PETG homogène	Sandwich Inox
Épaisseur totale	18 mm	18 mm
Masse surfacique	$7.63 \text{ g cm}^{-2}$	$9.14 \text{ g cm}^{-2}$
Débit de dose	$110.96 \pm 0.25 \text{ nGy/h}$	$107.50 \pm 0.24 \text{ nGy/h}$
Atténuation vs théorie	36.5%	38.5%
Gain relatif	Référence	+3.1%

## 4.2 Conclusions

1. **Cohérence des simulations :** Les deux simulations sont **parfaitemment cohérentes** avec les statistiques de génération Eu-152 attendues.
2. **Atténuation comparable :** Le sandwich W/PETG + Inox + W/PETG offre une atténuation **légèrement supérieure** (+3.1%) à la plaque W/PETG homogène.
3. **Effet de masse :** Le gain d'atténuation est principalement dû à la **masse surfacique plus élevée**(+20%) du sandwich, et non au numéro atomique de l'Inox.
4. **Compromis :** À masse égale, le W/PETG homogène serait probablement plus efficace grâce au Z élevé du tungstène. Le choix du sandwich peut être motivé par des considérations **mécaniques** (rigidité) ou **économiques** (coût de l'Inox vs W).

## 4.3 Recommandations

Pour **améliorer l'atténuation** du sandwich tout en conservant la structure, remplacer l'Inox par :

- **Bismuth** (Z=83) : densité  $9.78 \text{ g cm}^{-3}$ , non toxique
- **Tungstène pur** (Z=74) : densité  $19.3 \text{ g cm}^{-3}$ , maximal
- **Poudre de Bi tassée** (70%) : densité  $\sim 6.85 \text{ g cm}^{-3}$ , pratique