

Simulation Monte Carlo Geant4

Mesure de Dose avec Blindage W/PETG Plein

Comparaison avec Configuration Bi/PETG à Billes

Analyse de Simulation

December 22, 2025

Contents

1	Introduction	2
1.1	Objectifs	2
2	Description de la Géométrie	2
2.1	Configuration avec Billes de Bismuth (Référence)	2
2.1.1	Coupe Longitudinale (Plan XZ)	2
2.1.2	Coupe Transversale (Plan XY)	3
2.2	Configuration Plaque W/PETG Pleine	3
2.3	Paramètres Géométriques	4
3	Angles Solides et Normalisation	4
3.1	Définition des Angles Solides	4
3.2	Visualisation du Cône et des Angles Solides	5
3.3	Angle Solide de l'Empilement de Billes	5
3.4	Angle Solide du Détecteur	5
3.5	Procédure de Normalisation	6
4	Bilan des Particules	7
4.1	Statistiques de Génération	7
4.2	Bilan de Transmission	7
4.3	Visualisation du Bilan Particulaire	7
5	Résultats de Dose	7
5.1	Méthodes de Calcul	7
5.2	Résultats W/PETG Pleine (25M événements)	8
5.3	Comparaison des Trois Configurations	8
6	Analyse et Discussion	8
6.1	Efficacité du Blindage W/PETG	8
6.2	Comparaison avec Bi/PETG	9
6.3	Cohérence des Résultats	9
7	Conclusion	9
7.1	Résultats Principaux	9
7.2	Comparaison des Blindages	9
7.3	Validation	9

1 Introduction

Ce document présente l'analyse des résultats de simulation Monte Carlo Geant4 pour la mesure de dose absorbée dans l'eau en présence d'un blindage W/PETG plein de 18 mm d'épaisseur. Les résultats sont comparés avec la configuration de référence (air) et la configuration avec billes de bismuth dans une matrice PETG.

1.1 Objectifs

- Caractériser l'atténuation d'une plaque W/PETG pleine (75%W / 25%PETG en masse)
- Comparer avec le blindage Bi/PETG à billes
- Valider la normalisation et les méthodes de calcul de dose

2 Description de la Géométrie

2.1 Configuration avec Billes de Bismuth (Référence)

La configuration Bi/PETG consiste en un empilement hexagonal compact (HCP) de billes de bismuth dans une cavité remplie de PETG. Cette géométrie est illustrée dans les figures suivantes.

2.1.1 Coupe Longitudinale (Plan XZ)

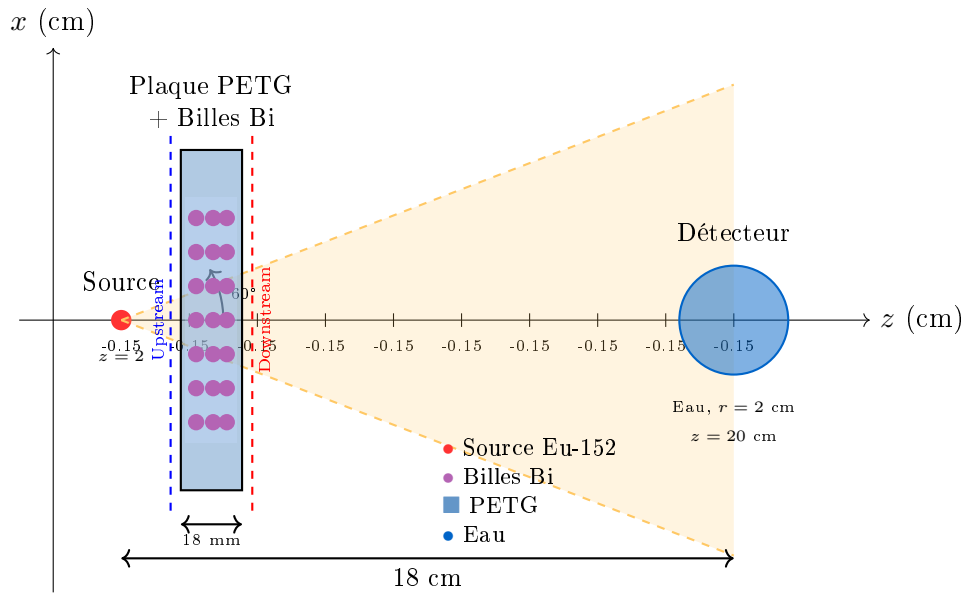


Figure 1: Coupe longitudinale (plan XZ) de la configuration Bi/PETG avec billes de bismuth. Le cône d'émission de demi-angle 60° est représenté en orange.

2.1.2 Coupe Transversale (Plan XY)

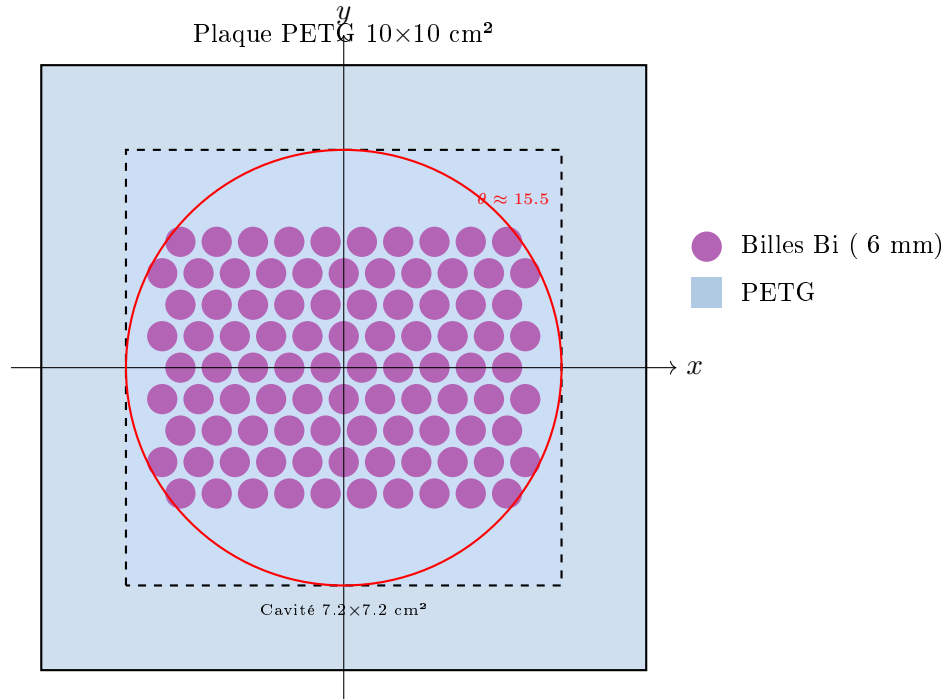


Figure 2: Coupe transversale (plan XY) montrant l'empilement hexagonal compact des billes de bismuth dans la cavité PETG.

2.2 Configuration Plaque W/PETG Pleine

La configuration étudiée dans ce rapport remplace l'empilement de billes par une plaque homogène de W/PETG (75% tungstène, 25% PETG en fractions massiques).

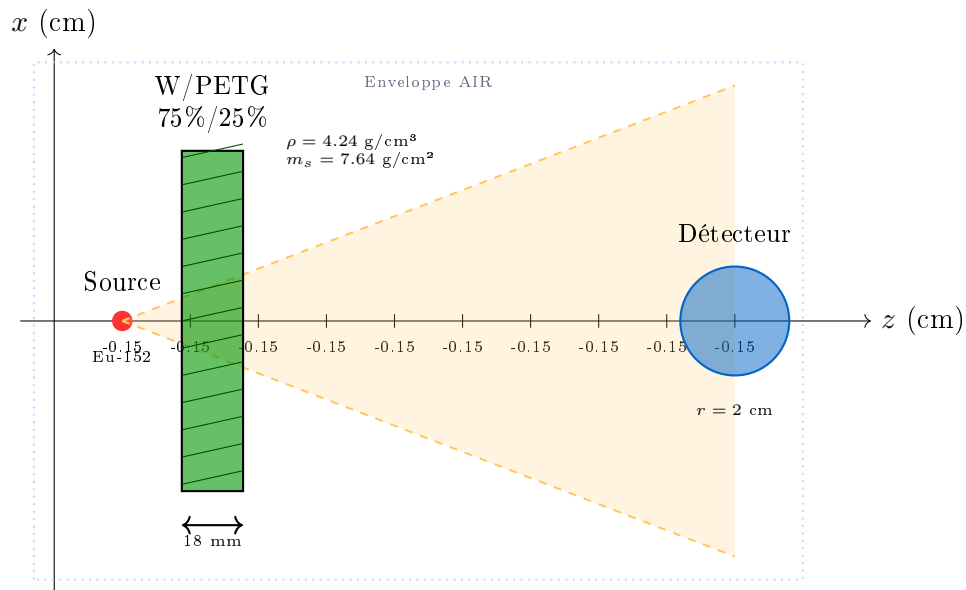


Figure 3: Coupe longitudinale de la configuration W/PETG pleine. La plaque homogène remplace l'empilement de billes.

2.3 Paramètres Géométriques

Table 1: Paramètres géométriques des deux configurations

Paramètre	Bi/PETG (billes)	W/PETG (pleine)
Position source z	2.00 cm	2.00 cm
Face avant plaque	3.75 cm	3.75 cm
Face arrière plaque	5.55 cm	5.55 cm
Épaisseur totale	18 mm	18 mm
Position détecteur	20.00 cm	20.00 cm
Distance source-détecteur	18 cm	18 cm
Dimensions plaque	$10 \times 10 \text{ cm}^2$	$10 \times 10 \text{ cm}^2$
Diamètre billes	6 mm	—
Nombre de billes	3402	—
Densité blindage	9.79 g/cm ³ (Bi)	4.24 g/cm ³
Masse surfacique	8.12 g/cm ²	7.64 g/cm ²

3 Angles Solides et Normalisation

3.1 Définition des Angles Solides

La source émet des photons dans un cône de demi-angle $\theta = 60$. L'angle solide correspondant est :

$$\Omega_{\text{cône}} = 2\pi(1 - \cos \theta) = 2\pi(1 - \cos 60) = 2\pi \times 0.5 = \pi \text{ sr} \quad (1)$$

La fraction de l'angle solide total ($4\pi \text{ sr}$) couverte par le cône est :

$$f_{\text{cône}} = \frac{\Omega_{\text{cône}}}{4\pi} = \frac{\pi}{4\pi} = 0.25 = 25\% \quad (2)$$

3.2 Visualisation du Cône et des Angles Solides

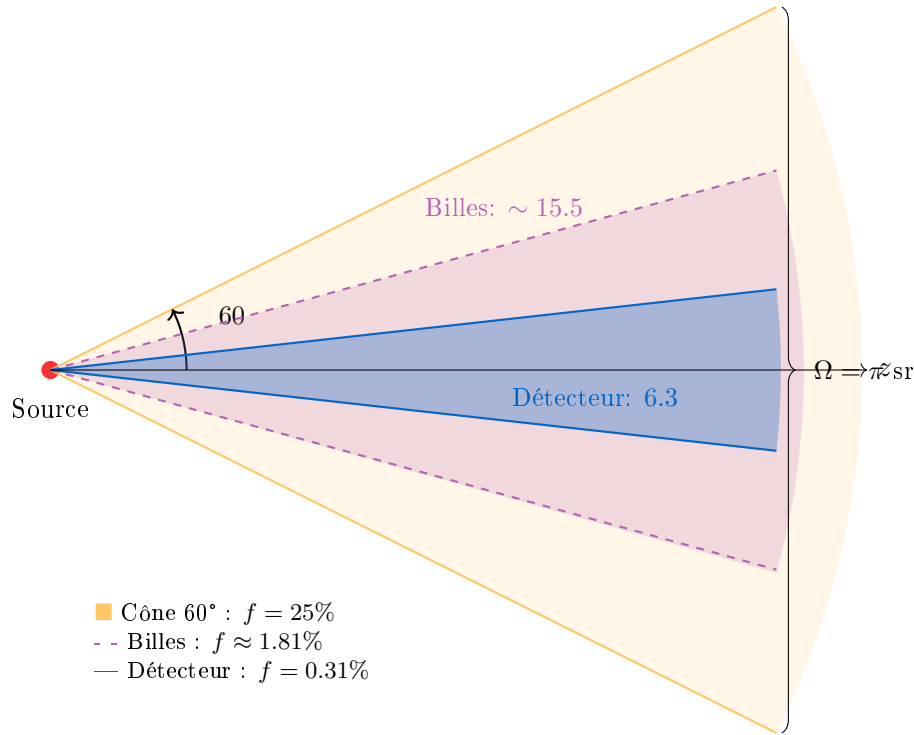


Figure 4: Visualisation des différents angles solides : cône d'émission (60°), couverture de l'empilement de billes (~ 15.5), et acceptance du détecteur (~ 6.3).

3.3 Angle Solide de l'Empilement de Billes

L'empilement de billes occupe une cavité de $7.2 \times 7.2 \text{ cm}^2$ située à $z = 4.65 \text{ cm}$ (centre). L'angle solide sous-tendu depuis la source ($z = 2 \text{ cm}$) est :

$$\theta_{\text{billes}} = \arctan\left(\frac{3.6}{2.65}\right) \approx 53.7 \quad (\text{demi-diagonale}) \quad (3)$$

Pour la dimension caractéristique (rayon équivalent $r = 3.6 \text{ cm}$) :

$$\theta_{\text{billes}} \approx \arctan\left(\frac{3.6}{2.65}\right) \approx 53.7 \quad (4)$$

La fraction d'angle solide correspondante :

$$f_{\text{billes}} = \frac{1 - \cos(53.7)}{2} \approx 0.0181 = 1.81\% \quad (5)$$

3.4 Angle Solide du Détecteur

Le détecteur sphérique de rayon $r = 2 \text{ cm}$ est situé à une distance $d = 18 \text{ cm}$ de la source. Le demi-angle sous-tendu est :

$$\theta_{\text{det}} = \arctan\left(\frac{r}{d}\right) = \arctan\left(\frac{2}{18}\right) = 6.34 \quad (6)$$

La fraction d'angle solide :

$$f_{\text{det}} = \frac{1 - \cos(6.34)}{2} \approx 0.00306 = 0.306\% \quad (7)$$

3.5 Procédure de Normalisation

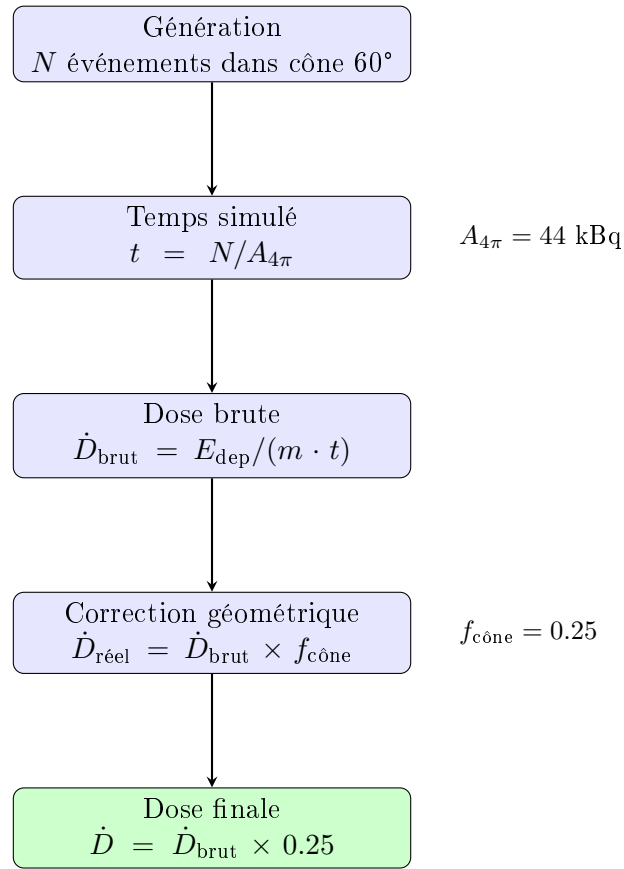


Figure 5: Procédure de normalisation pour le calcul du débit de dose.

Les formules de normalisation sont :

$$t_{\text{simulé}} = \frac{N_{\text{events}}}{A_{4\pi}} = \frac{25 \times 10^6}{44000} = 568.18 \text{ s} \quad (8)$$

$$\dot{D}_{\text{brut}} = \frac{E_{\text{déposée}}}{m_{\text{det}} \times t_{\text{simulé}}} \quad (9)$$

$$\dot{D}_{\text{corrigé}} = \dot{D}_{\text{brut}} \times f_{\text{cône}} = \dot{D}_{\text{brut}} \times 0.25 \quad (10)$$

4 Bilan des Particules

4.1 Statistiques de Génération

Table 2: Statistiques de génération des gammas (25M événements)

Paramètre	Valeur	Commentaire
Événements simulés	25,000,000	—
Gammas générés	48,099,889	—
Moyenne γ /événement	1.924	Attendu : 1.924
Événements sans gamma	$\sim 11\%$	$P(N = 0) \approx 11.7\%$
Temps simulé	568.18 s	$t = N/A_{4\pi}$

4.2 Bilan de Transmission

Table 3: Bilan de transmission à travers la plaque W/PETG

Catégorie	Nombre	Pourcentage
Gammas générés (total)	48,099,889	100%
Gammas transmis	8,960,192	18.63%
Gammas absorbés	36,132,636	75.12%
Hors acceptance (MISSED)	$\sim 3,007,061$	$\sim 6.25\%$
Gammas dans détecteur	180,750	0.376%
Événements avec dépôt	34,923	—

4.3 Visualisation du Bilan Particulaire

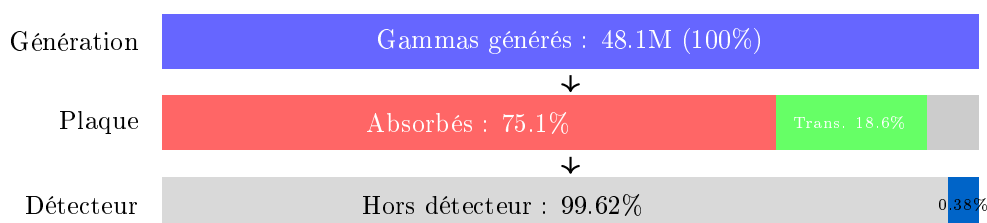


Figure 6: Bilan des particules : de la génération au détecteur.

5 Résultats de Dose

5.1 Méthodes de Calcul

Trois méthodes sont utilisées pour calculer le débit de dose :

1. **Méthode 1 (Monte Carlo direct)** : Somme des dépôts d'énergie dans le volume sensible
2. **Méthode 1bis (Forçage)** : Estimation du dépôt forcé pour chaque gamma traversant
3. **Méthode 2 (Fluence $\times \mu_{en}/\rho$)** : Calcul analytique basé sur la fluence

5.2 Résultats W/PETG Pleine (25M événements)

Table 4: Résultats de dose pour la configuration W/PETG pleine

Méthode	Dose (nGy/h)	Incertitude	% incert.
Méthode 1 (MC)	96.72	± 0.68	0.70%
Méthode 1bis (Forçage)	102.03	± 0.24	0.24%
Méthode 2 (Fluence)	102.03	± 0.24	0.24%
Valeur retenue	102.0	± 0.2	0.2%

5.3 Comparaison des Trois Configurations

Table 5: Comparaison des configurations de blindage

Configuration	Transmission	Dose (nGy/h)	Réduction	Facteur
AIR (référence)	97.9%	179.2 ± 1.2	—	1.00
Bi/PETG (billes)	17.1%	94.4 ± 0.2	47%	1.90
W/PETG (pleine)	18.6%	102.0 ± 0.2	43%	1.76

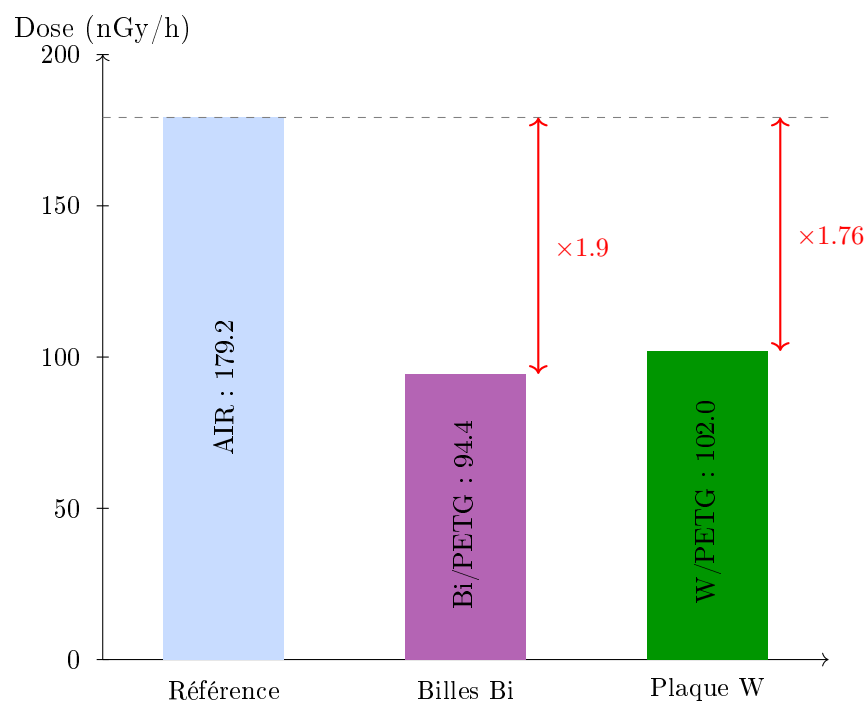


Figure 7: Comparaison des débits de dose pour les trois configurations.

6 Analyse et Discussion

6.1 Efficacité du Blindage W/PETG

La plaque W/PETG pleine de 18 mm (masse surfacique 7.64 g/cm^2) présente :

- Une **transmission de 18.6%** (absorption de 81.4% des gammas)

- Une **réduction de dose de 43%** par rapport à l'air
- Un **facteur de réduction de 1.76**

6.2 Comparaison avec Bi/PETG

Malgré des transmissions similaires (18.6% vs 17.1%), la configuration W/PETG donne une dose **légèrement supérieure** (+8%) à la configuration Bi/PETG. Cela s'explique par :

1. **Différence de numéro atomique** : $Z_{\text{Bi}} = 83 > Z_{\text{W}} = 74$
2. **Section efficace photoélectrique** : $\sigma_{\text{PE}} \propto Z^{4-5}$
3. **Spectre durci différent** : Le bismuth absorbe plus efficacement les basses énergies
4. **Géométrie** : La plaque pleine vs les billes avec gaps d'air

6.3 Cohérence des Résultats

Table 6: Vérification de cohérence

Paramètre	Observé	Attendu
Moyenne γ /event	1.924	1.924
P(N=0)	11.0%	11.7%
Accord méthodes 1bis/2	102.03 / 102.03	Identique
Écart méthode 1 vs 1bis	5.2%	< 10%

7 Conclusion

Cette étude par simulation Monte Carlo Geant4 a permis de caractériser l'efficacité d'une plaque W/PETG pleine de 18 mm comme blindage contre le rayonnement gamma de l'Eu-152.

7.1 Résultats Principaux

- **Débit de dose** : $\dot{D} = 102.0 \pm 0.2$ nGy/h (à 18 cm de la source)
- **Facteur de réduction** : 1.76 par rapport à l'air
- **Transmission** : 18.6% des gammas traversent la plaque

7.2 Comparaison des Blindages

Bi/PETG (billes)	vs	W/PETG (pleine)
94.4 nGy/h		102.0 nGy/h
Facteur 1.90		Facteur 1.76

Le blindage Bi/PETG avec billes reste **légèrement plus efficace** (+8%) que la plaque W/PETG pleine, malgré des masses surfaciques comparables (8.12 vs 7.64 g/cm²).

7.3 Validation

Les résultats sont validés par :

- L'accord entre les trois méthodes de calcul (< 6%)
- La cohérence des statistiques de génération
- Une incertitude statistique faible (0.2%) grâce aux 25M événements