

# Simulation Geant4 : Blindage Gamma Bi/PETG

Analyse Comparative AIR vs Blindage

Source Eu-152 (44 kBq) – Détecteur eau à 18 cm

December 22, 2025

## Contents

<b>1 Description de la géométrie</b>	<b>2</b>
1.1 Vue d'ensemble . . . . .	2
1.2 Structure du blindage . . . . .	2
1.3 Empilement hexagonal compact des billes . . . . .	2
1.4 Positions sur l'axe Z . . . . .	3
<b>2 Angles solides et normalisation</b>	<b>4</b>
2.1 Définition des angles solides . . . . .	4
2.2 Calcul des angles solides . . . . .	4
2.3 Principe de la normalisation . . . . .	4
2.3.1 Problème . . . . .	4
2.3.2 Méthode de normalisation . . . . .	5
<b>3 Bilan des particules générées et transmises</b>	<b>5</b>
3.1 Génération des gammas primaires . . . . .	5
3.2 Bilan comparatif AIR vs Bi/PETG . . . . .	6
<b>4 Résultats des simulations</b>	<b>6</b>
4.1 Débits de dose – Configuration AIR . . . . .	6
4.2 Débits de dose – Configuration Bi/PETG . . . . .	7
4.3 Comparaison et efficacité du blindage . . . . .	7
<b>5 Conclusions</b>	<b>7</b>

## 1 Description de la géométrie

### 1.1 Vue d'ensemble

La géométrie de simulation comprend une source ponctuelle d'Eu-152, un blindage composite (plaqué PETG avec billes de bismuth), et un détecteur sphérique d'eau simulant un tissu biologique.

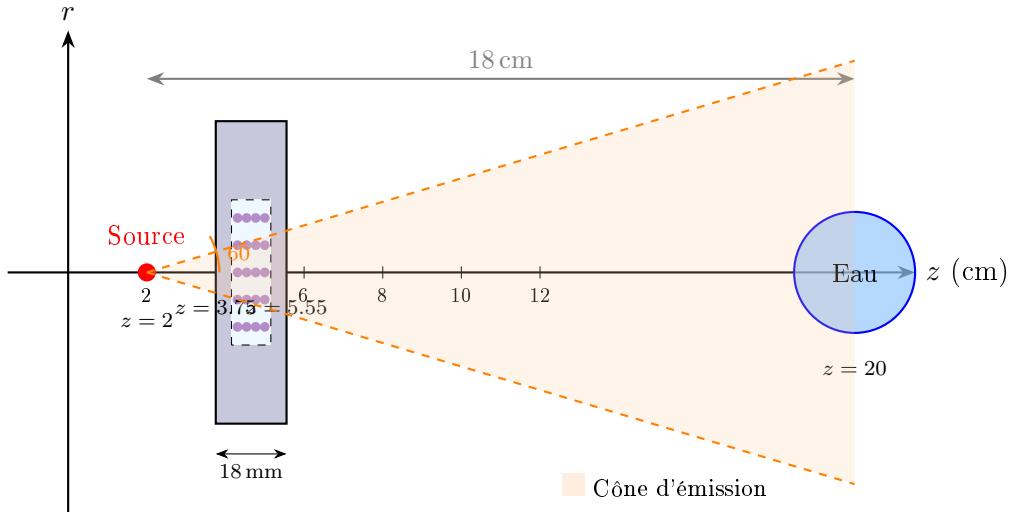


Figure 1: Vue longitudinale (coupe XZ) de la géométrie de simulation

### 1.2 Structure du blindage

Le blindage est constitué d'une plaque de PETG contenant une cavité remplie de billes de bismuth arrangeées en empilement hexagonal compact (HCP).

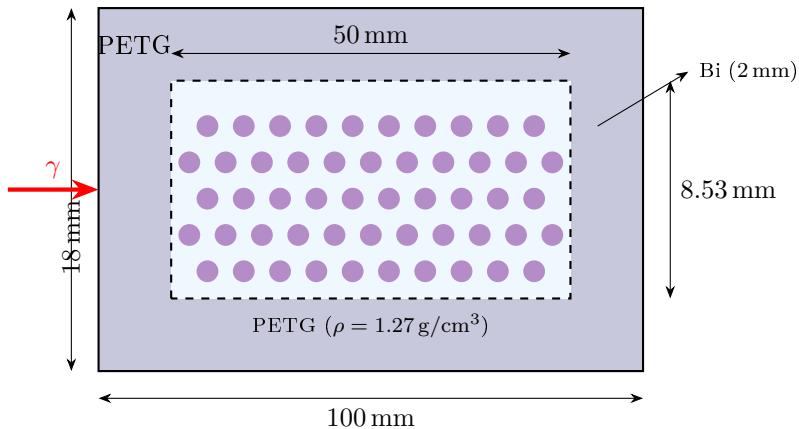


Figure 2: Coupe transversale du blindage : plaque PETG avec cavité contenant les billes de bismuth

### 1.3 Empilement hexagonal compact des billes

Les billes sont arrangeées en 5 plans selon un empilement hexagonal compact (HCP), alternant entre plans de type A (686 billes) et type B (672 billes).

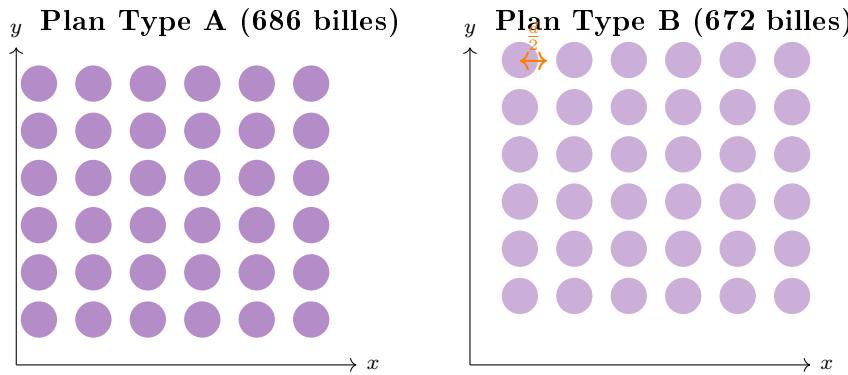


Figure 3: Vue de dessus des plans de billes : Type A et Type B (décalé de  $d/2$  en  $x$  et  $y$ )

Table 1: Caractéristiques de l'empilement de billes de bismuth

Paramètre	Description	Valeur
Diamètre billes	$d$	2.00 mm
Matériau	Bismuth (Z=83)	G4_Bi
Densité Bi	$\rho_{\text{Bi}}$	9.747 g/cm <sup>3</sup>
Plan 1 (Type A)	$z = -3.266 \text{ mm}$	686 billes
Plan 2 (Type B)	$z = -1.633 \text{ mm}$	672 billes
Plan 3 (Type A)	$z = 0.000 \text{ mm}$	686 billes
Plan 4 (Type B)	$z = 1.633 \text{ mm}$	672 billes
Plan 5 (Type A)	$z = 3.266 \text{ mm}$	686 billes
<b>Total</b>	5 plans HCP	<b>3402 billes</b>
Épaisseur totale		8.53 mm
Masse billes		138.90 g
Masse surfacique		1.39 g/cm <sup>2</sup>

#### 1.4 Positions sur l'axe Z

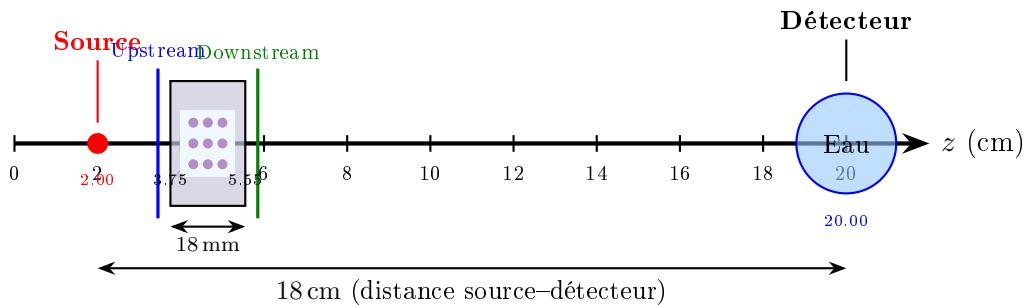


Figure 4: Positions des éléments sur l'axe Z (en cm)

## 2 Angles solides et normalisation

### 2.1 Définition des angles solides

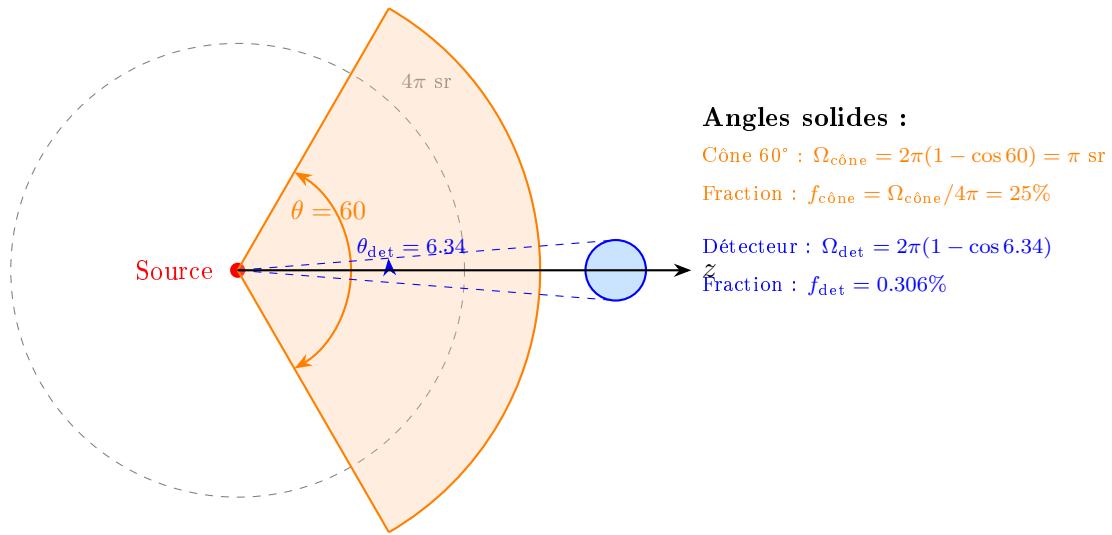


Figure 5: Visualisation des angles solides : cône d'émission ( $60^\circ$ ) et détecteur ( $6.34^\circ$ )

### 2.2 Calcul des angles solides

L'angle solide d'un cône de demi-angle  $\theta$  est donné par :

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta) \quad [\text{sr}] \quad (1)$$

La fraction d'angle solide par rapport à  $4\pi$  stéradians est :

$$f = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1 - \cos \theta}{2} \quad (2)$$

Table 2: Angles solides des différents éléments

Élément	Demi-angle $\theta$	Angle solide $\Omega$	Fraction $f$
Sphère complète	$180^\circ$	$4\pi \text{ sr}$	100%
Cône d'émission	$60^\circ$	$\pi \text{ sr}$	<b>25%</b>
Empilement billes*	$\sim 15.5^\circ$	0.227 sr	1.81%
Détecteur eau	$6.34^\circ$	0.0384 sr	0.306%

\* Calculé pour une cavité de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  à  $z = 4.65 \text{ cm}$  depuis la source à  $z = 2 \text{ cm}$

**Calcul de l'angle solide de l'empilement :** La cavité contenant les billes a des dimensions  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  et est centrée à  $z = 4.65 \text{ cm}$ . Depuis la source à  $z = 2 \text{ cm}$ , la distance est  $d = 2.65 \text{ cm}$ . Le demi-angle est :

$$\theta_{\text{billes}} = \arctan \left( \frac{25 \text{ mm}}{26.5 \text{ mm}} \right) \approx 43.3^\circ \quad (\text{pour un coin}) \quad (3)$$

Pour un carré, l'angle solide équivalent est approximativement celui d'un cône de demi-angle  $\sim 15.5^\circ$  inscrit.

### 2.3 Principe de la normalisation

#### 2.3.1 Problème

La simulation génère des gammes dans un cône de  $60^\circ$  (pas dans  $4\pi$ ) pour optimiser l'efficacité statistique. Il faut donc normaliser correctement pour obtenir des débits de dose réalistes.

### 2.3.2 Méthode de normalisation

1. Temps simulé basé sur l'activité  $4\pi$  :

$$t_{\text{sim}} = \frac{N_{\text{événements}}}{A_{4\pi}} \quad (4)$$

où  $A_{4\pi} = 44\,000 \text{ Bq}$  est l'activité totale de la source.

2. Facteur de correction géométrique :

$$f_{\text{cône}} = \frac{\Omega_{\text{cône}}}{4\pi} = \frac{1 - \cos(60)}{2} = 0.25 \quad (5)$$

3. Débit de dose corrigé :

$$\dot{D}_{\text{réel}} = \dot{D}_{\text{brut}} \times f_{\text{cône}} = \dot{D}_{\text{brut}} \times 0.25 \quad (6)$$

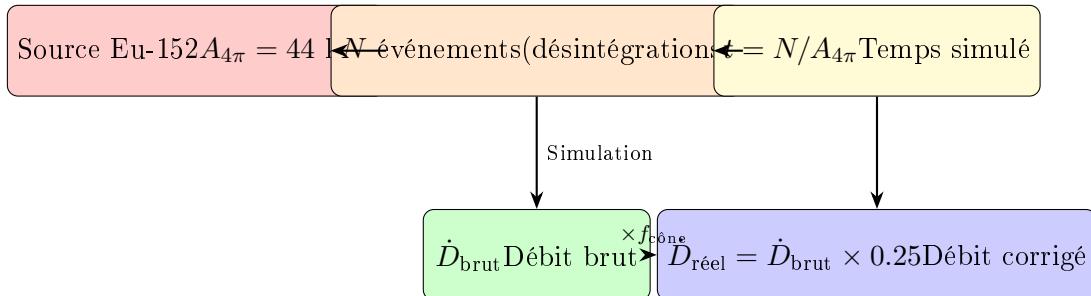


Figure 6: Schéma de la normalisation temporelle et correction géométrique

## 3 Bilan des particules générées et transmises

### 3.1 Génération des gammas primaires

Chaque désintégration de l'Eu-152 peut émettre plusieurs gammas selon un schéma de désexcitation complexe. Le nombre moyen de gammas par désintégration est  $\bar{n}_\gamma = 1.924$ .

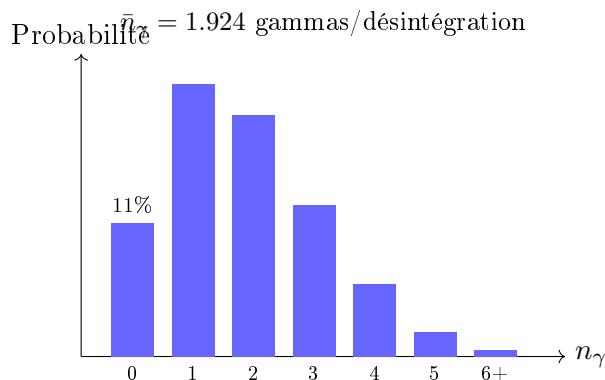


Figure 7: Distribution du nombre de gammas par désintégration (schématique)

### 3.2 Bilan comparatif AIR vs Bi/PETG

Table 3: Bilan des particules : génération et transmission

Paramètre	AIR	Bi/PETG
<i>Génération</i>		
Nombre d'événements	$1 \times 10^6$	$25 \times 10^6$
Gammas générés	1 922 741	48 097 193
Moyenne $\gamma$ /événement	1.923	1.924
Événements sans gamma	11.09%	11.08%
<i>Transmission à travers le blindage</i>		
Gammas transmis	1 882 778 (97.9%)	8 206 025 (17.1%)
Gammas absorbés	39 354 (2.0%)	37 208 628 (77.4%)
Gammas diffusés	~0.1%	~5.5%
<i>Détection (sphère d'eau)</i>		
Gammas entrant dans détecteur	23 612	160 538
Fraction du cône	1.23%	0.33%
Événements avec dépôt	7 069	30 610

Configuration AIR

Configuration Bi/PETG

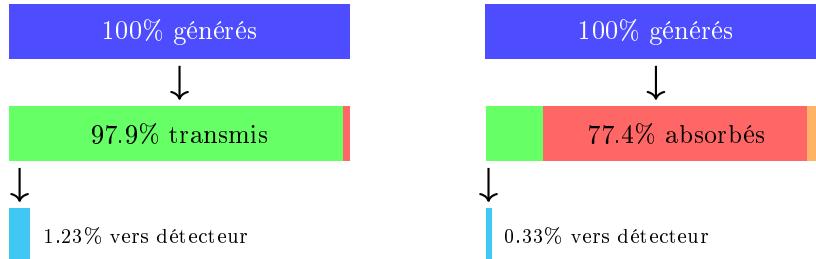


Figure 8: Comparaison visuelle du bilan des particules

## 4 Résultats des simulations

### 4.1 Débits de dose – Configuration AIR

Table 4: Débits de dose – Configuration AIR ( $1 \times 10^6$  événements)

	Méthode 1 (MC direct)	Méthode 1bis (Forçage)	Méthode 2 (Fluence $\times \mu_{en}/\rho$ )
Énergie totale (keV)	893 204	946 664	946 664
E/gamma (keV/ $\gamma$ )	0.465	0.492	0.492
Débit brut (nGy/h)	676.4	716.9	716.9
<b>Débit corrigé (nGy/h)</b>	<b><math>169.1 \pm 4.2</math></b>	<b><math>179.2 \pm 1.2</math></b>	<b><math>179.2 \pm 1.2</math></b>
Écart vs théorie (174.8)	3.3%	2.5%	2.5%

## 4.2 Débits de dose – Configuration Bi/PETG

Table 5: Débits de dose – Configuration Bi/PETG ( $25 \times 10^6$  événements)

	Méthode 1 (MC direct)	Méthode 1bis (Forçage)	Méthode 2 (Fluence $\times \mu_{en}/\rho$ )
Énergie totale (keV)	11 966 205	12 465 564	12 465 564
E/gamma (keV/ $\gamma$ )	0.249	0.259	0.259
Débit brut (nGy/h)	362.5	377.6	377.6
Débit corrigé (nGy/h)	<b>90.6 ± 0.7</b>	<b>94.4 ± 0.2</b>	<b>94.4 ± 0.2</b>

## 4.3 Comparaison et efficacité du blindage

Table 6: Comparaison AIR vs Bi/PETG et efficacité du blindage

Configuration	Méthode 1	Méthode 1bis	Méthode 2	Moyenne
AIR (simulé)	$169.1 \pm 4.2$	$179.2 \pm 1.2$	$179.2 \pm 1.2$	$\sim 176$ nGy/h
Bi/PETG (simulé)	$90.6 \pm 0.7$	$94.4 \pm 0.2$	$94.4 \pm 0.2$	$\sim 93$ nGy/h
Facteur de réduction	<b>1.87</b>	<b>1.90</b>	<b>1.90</b>	$\approx 1.9$
Réduction (%)	46%	47%	47%	$\approx 47\%$

## 5 Conclusions

- Validation du code :** La simulation AIR donne un débit de dose de  $179.2 \pm 1.2$  nGy/h, en excellent accord avec la valeur théorique de 174.8 nGy/h (écart 2.5%).
- Efficacité du blindage Bi/PETG :**
  - Réduction du débit de dose d'un facteur **1.9**
  - Réduction relative de **47%**
  - Absorption de 77.4% des gammas incidents
- Cohérence des méthodes :** Les trois méthodes de calcul donnent des résultats concordants (écart < 6%).
- Caractéristiques du blindage :**
  - 3402 billes de bismuth (2 mm) en empilement HCP
  - Masse surfacique totale : 8.12 g/cm<sup>2</sup>
  - Épaisseur totale : 18 mm (PETG + billes)