

Simulation Monte Carlo Geant4 Source X MiniX - Dosimétrie Eau

Rapport de synthèse des résultats

Nombre d'événements : 1 000 000

Code : Geant4 11.03-patch-01

Physics List : FTFP_BERT

Date : 30 janvier 2026

Résumé

Ce rapport présente les résultats d'une simulation Monte Carlo de la source X MiniX avec un million d'événements primaires. L'objectif est de caractériser la transmission du faisceau à travers le collimateur et de quantifier la dose déposée dans les anneaux d'eau concentriques du détecteur. Les résultats montrent une transmission de 1.36% après le collimateur et une dose totale de 10.95 nGy dans l'eau.

Table des matières

1	Configuration de la simulation	2
1.1	Géométrie	2
1.2	Plans de mesure	2
1.3	Anneaux d'eau	2
2	Transmission du faisceau	2
2.1	Statistiques par plan	2
2.2	Taux de transmission	3
3	Dosimétrie	3
3.1	Dose totale dans l'eau	3
3.2	Dose par anneau	3
3.3	Observations	3
3.4	Distribution statistique	3
4	Vérification et cohérence	4
4.1	Comparaison LOG vs ROOT	4
4.2	Vérification des histogrammes	4
5	Optimisations du code	4
5.1	Réduction de la verbosité	4
5.2	Messages conservés	5
6	Conclusions	5
6.1	Recommandations	5
A	Formules de conversion	5
A.1	Unités de dose	5
A.2	Calcul de la dose	5
B	Structure des ntuples	6

1 Configuration de la simulation

1.1 Géométrie

La simulation modélise la source X MiniX avec les éléments suivants :

- **Source** : Émission de photons X (spectre MiniX caractéristique)
- **Collimateur** : Aluminium + Laiton (ouverture 4 mm)
- **Plans de scoring** : 5 plans à différentes positions en z
- **Détecteur** : 5 anneaux d'eau concentriques (rayon 0–10 mm)

1.2 Plans de mesure

TABLE 1 – Configuration des plans de scoring

Ntuple	Position	Description
plane_passages	$z = 18$ mm	Après collimateur
ScorePlane2_passages	$z = 28$ mm	Plan intermédiaire 1
ScorePlane3_passages	$z = 38$ mm	Plan intermédiaire 2
WaterRings_passages	$z = 65$ – 68 mm	Couronnes d'eau
ScorePlane5_passages	$z = 70$ mm	Après conteneur

1.3 Anneaux d'eau

Le détecteur est constitué de 5 anneaux cylindriques d'eau de 3 mm d'épaisseur :

TABLE 2 – Configuration des anneaux d'eau

Anneau	r_{min} (mm)	r_{max} (mm)	Volume (mm ³)	Masse (g)
0	0	2	37.70	0.0377
1	2	4	113.10	0.1131
2	4	6	188.50	0.1885
3	6	8	263.89	0.2639
4	8	10	339.29	0.3393
Total	0	10	942.48	0.9425

2 Transmission du faisceau

2.1 Statistiques par plan

La transmission des particules à travers les différents plans de scoring est résumée dans le tableau 3.

TABLE 3 – Transmission des particules (1M événements primaires)

Plan	Total	Primaires	Secondaires	Transmission (%)
$z = 18$ mm (après collim.)	13 622	13 613	9	1.36
$z = 28$ mm	13 427	13 426	1	1.34
$z = 38$ mm	13 196	13 194	2	1.32
$z = 65$ – 68 mm (eau)	12 560	12 554	6	1.26
$z = 70$ mm (après eau)	2 688	2 686	2	0.27

2.2 Taux de transmission

Pour 10 000 événements primaires :

- Après collimateur : 136 ± 14 photons (1.36%)
- Atteignant l'eau : ~ 126 photons
- Sortant de l'eau : ~ 27 photons

L'atténuation dans l'eau est de $\sim 79\%$, ce qui correspond à un coefficient d'atténuation effectif cohérent avec les photons de basse énergie (< 50 keV).

3 Dosimétrie

3.1 Dose totale dans l'eau

TABLE 4 – Énergie déposée et dose dans l'eau (run complet)

Paramètre	Valeur	Unité
Énergie totale déposée	64 130	keV
Dose totale (run)	10 901	pGy
Dose totale (run)	10.90	nGy
Dose par 10k événements (moyenne)	109 ± 15	pGy

3.2 Dose par anneau

TABLE 5 – Dose déposée par anneau (run complet – 1M événements)

Anneau	Rayon (mm)	Énergie (keV)	Dose (pGy)	Dose (nGy)	Fraction (%)
0	0–2	3 627	15 411	15.41	23.1
1	2–4	11 802	16 717	16.72	25.1
2	4–6	20 382	17 322	17.32	26.0
3	6–8	26 842	16 295	16.30	24.5
4	8–10	1 478	698	0.70	1.0
Total	0–10	64 130	10 901	10.90	–

3.3 Observations

- La dose est relativement uniforme dans les anneaux 0–3 (15–17 nGy)
- L'anneau 4 (périphérique) reçoit très peu de dose (0.7 nGy, soit 1%)
- Le maximum de dose se situe dans l'anneau 2 (4–6 mm)
- Le profil de dose reflète la distribution spatiale du faisceau collimaté

3.4 Distribution statistique

Les histogrammes de dose par batch de 10 000 événements montrent une distribution quasi-gaussienne :

TABLE 6 – Statistiques des distributions de dose (par 10k événements)

Zone	Moyenne (pGy)	Écart-type (pGy)	CV (%)
Dose totale	109	15	14
Anneau 0	154	87	56
Anneau 1	167	45	27
Anneau 2	173	39	23
Anneau 3	164	31	19
Anneau 4	7	8	114

Le coefficient de variation (CV) élevé pour l’anneau 0 et 4 s’explique par le faible nombre de photons atteignant ces régions (centre et périphérie).

4 Vérification et cohérence

4.1 Comparaison LOG vs ROOT

Une vérification de cohérence a été effectuée entre les valeurs du fichier log et celles extraites du fichier ROOT :

TABLE 7 – Vérification de cohérence LOG vs ROOT

Paramètre	LOG	ROOT	Écart
Dose totale (pGy)	10 900.6	10 950.0	0.5%
Entrées plane_passages	13 622	13 622	0

Conclusion : Les valeurs sont parfaitement cohérentes entre les deux sources.

4.2 Vérification des histogrammes

- ✓ Histogrammes de dose correctement remplis (99 entrées)
- ✓ Plages adaptées en pGy (pas de débordement)
- ✓ Colonne `is_secondary` présente dans les ntuples
- ✓ Structure harmonisée (10 colonnes par ntuple)

5 Optimisations du code

5.1 Réduction de la verbosité

Le fichier log a été optimisé pour réduire sa taille tout en conservant les informations essentielles :

TABLE 8 – Réduction du fichier log

Métrique	Avant	Après
Nombre de lignes	~42 000	1 447
Taille du fichier	2.8 Mo	94 Ko
Réduction	96.6%	

5.2 Messages conservés

Les messages suivants ont été conservés pour le suivi de la simulation :

- [PROGRESS] : Avancement tous les 10 000 événements
- Résumé de fin de run (doses, compteurs, statistiques)
- Messages d'initialisation (géométrie, matériaux)
- Diagnostics limités (3–5 premiers événements)

6 Conclusions

Cette simulation de 1 million d'événements de la source MiniX a permis de :

1. **Caractériser la transmission** : 1.36% des photons traversent le collimateur, avec une atténuation de 79% dans l'eau.
2. **Quantifier la dose** : La dose totale déposée dans l'eau est de 10.9 nGy pour 1M d'événements, soit 109 pGy par 10 000 photons primaires.
3. **Établir le profil de dose** : La dose est relativement uniforme dans les anneaux 0–3 (15–17 nGy), avec un maximum dans l'anneau 2 (4–6 mm).
4. **Valider le code** : Les corrections apportées (structure des ntuples, unités des histogrammes) ont été vérifiées et validées.
5. **Optimiser le code** : La taille du fichier log a été réduite de 96.6% sans perte d'information utile.

6.1 Recommandations

Pour les simulations futures :

- Utiliser au minimum 1M événements pour des statistiques fiables
- Vérifier la cohérence LOG/ROOT après chaque modification du code
- Les unités de dose sont en pGy dans les histogrammes ROOT

A Formules de conversion

A.1 Unités de dose

$$1 \mu\text{Gy} = 1000 \text{ nGy} = 10^6 \text{ pGy} \quad (1)$$

$$1 \text{ nGy} = 1000 \text{ pGy} \quad (2)$$

A.2 Calcul de la dose

La dose est calculée selon :

$$D [\text{pGy}] = \frac{E_{\text{dep}} [\text{keV}] \times 0.1602}{m [\text{g}]} \quad (3)$$

où E_{dep} est l'énergie déposée et m la masse de l'anneau.

Le facteur de conversion provient de :

$$1 \text{ keV} = 1.602 \times 10^{-16} \text{ J} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ mJ} \quad (4)$$

et $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

B Structure des ntuples

Après harmonisation, tous les ntuples ont la structure suivante (10 colonnes) :

Col.	Nom	Type	Description
0	pdg	int	Code PDG ($22 = \gamma$, $11 = e^-$)
1	name	string	Nom de la particule
2	is_secondary	int	0 = primaire, 1 = secondaire
3	x_mm	double	Position X (mm)
4	y_mm	double	Position Y (mm)
5	z_mm	double	Position Z (mm)
6	ekin_keV	double	Énergie cinétique (keV)
7	trackID	int	Identifiant du track
8	parentID	int	ID du parent (0 = primaire)
9	creator_process	string	Processus créateur

TABLE 9 – Structure harmonisée des ntuples