

SIMULATION MONTE CARLO GEANT4

Statistiques de référence — Collimateur 3 mm*5 millions d'événements primaires*

Configuration : Al + Laiton + Porte-collimateur Inox 304

Tube à rayons X Amptek MiniX (1 keV to 50 keV, cône 60°)

February 7, 2026

1 Paramètres de la simulation

Table 1: Paramètres du run de référence.

Paramètre	Valeur
Code	Geant4 11.03-patch-01 (MT, 21 mars 2025)
Primaires générés	5 000 000 photons γ
Spectre d'émission	3,5 keV to 50 keV (anode W)
Géométrie d'émission	Cône de demi-angle 60°
Collimateur interne	Al ($\varnothing_{\text{int}} = 2,0 \text{ mm}$, ép. 25 μm)
Collimateur externe	Laiton ($\varnothing_{\text{int}} = 2,05 \text{ mm}$, ép. 2,1 mm)
Porte-collimateur	Inox 304 ($R_{\text{int}} = 3,17 \text{ mm}$, $R_{\text{ext}} = 5,9 \text{ mm}$)
Plan de scoring	ScorePlane1 à $z = 18 \text{ mm}$
Cible	Eau (couronnes concentriques, $z = 64 \text{ mm}$ to 69 mm)

2 Bilan global des photons

Sur les 5 000 000 photons primaires émis dans le cône de 60°, le tableau 2 résume le devenir de chaque particule.

Table 2: Bilan particule du run de référence.

Catégorie	Nombre	Fraction
Primaires générés	5 000 000	100 %
Absorbés (effet photoélectrique)	4 963 401	99,27 %
Transmis à ScorePlane1 (outward)	39 218	0,784 %
Secondaires atteignant ScorePlane1	15	3,0/M γ
<i>Contrôle</i> : phot + transmis	5 002 619	$\Delta = -2619^{\text{1}}$

Le taux de transmission de 0,784 % est cohérent avec l'estimation géométrique fondée sur l'angle solide du bore ($R = 1,5 \text{ mm}$, $z = 17,45 \text{ mm}$) :

$$f_{\text{géom}} = \frac{\Omega_{\text{bore}}}{\Omega_{\text{cône}}} = \frac{1 - \cos(\arctan \frac{R}{z})}{1 - \cos(60^\circ)} \approx 0,69 \% \quad (1)$$

¹Le surplus de ~ 2600 est dû aux interactions multiples (diffusion + absorption) et aux particules entrant puis ressortant de volumes intermédiaires.

Le rapport mesuré/prédit = $0,784/0,69 = 1,14$ est proche de l'unité ; le léger excès s'explique par la transmission à travers la paroi mince en aluminium ($25\text{ }\mu\text{m}$).

3 Absorption par matériau

La figure 1 et le tableau 3 détaillent la répartition de l'absorption par effet photoélectrique entre les différents matériaux de la géométrie.

Table 3: Répartition de l'absorption photoélectrique par matériau (4 963 401 absorptions).

Matériau	Absorptions	Fraction (%)
Laiton (Cu-Zn)	3 000 877	60,46
Aluminium	1 637 121	32,98
Béryllium (fenêtre)	276 383	5,57
Air (MyAir)	27 527	0,55
Tungstène (anode)	8006	0,16
Al_2O_3 (tube alumine)	7009	0,14
Inox 304 (porte-collimateur)	6478	0,13
Total	4 963 401	100,00

Le laiton absorbe à lui seul 60,5 % des photons, suivi de l'aluminium à 33,0 %. Ces deux matériaux constituent le système de collimation actuel et sont responsables de 93,4 % de l'atténuation totale. Le béryllium de la fenêtre de sortie du tube contribue à 5,6 %, essentiellement par absorption des photons de basse énergie ($E < 5\text{ keV}$). L'inox du porte-collimateur n'absorbe que 0,13 %, confirmant que le blindage est assuré quasi-intégralement par le laiton et l'aluminium.

4 Particules secondaires atteignant ScorePlane1

4.1 Vue d'ensemble

Sur 5 millions de primaires, seules **15 particules secondaires** atteignent le plan de scoring, soit un taux de 3,0 par million de γ émis. Ce chiffre extrêmement faible confirme l'efficacité du blindage en laiton : les fluorescences Cu K α et Zn K α (8 keV to 9 keV) ont un libre parcours moyen de $\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ dans le laiton et sont réabsorbées avant d'atteindre le bore.

4.2 Détail des 15 secondaires

Le tableau 4 résume les caractéristiques de chaque secondaire détecté.

4.3 Analyse par catégorie

Interprétation physique. Les 11 secondaires créées dans l'air ($z \approx 17\text{ mm to }19\text{ mm}$) sont des **photoélectrons** arrachés aux molécules de N₂/O₂ par les photons primaires transmis, juste après la sortie du collimateur. Leur énergie cinétique au vertex (3,3 keV to 22,7 keV) correspond à $E_\gamma - E_{\text{liaison}}$ avec $E_{\text{liaison}}^{\text{N,O}} \approx 0,4\text{ keV to }0,5\text{ keV}$.

Les 4 secondaires originaires de l'aluminium proviennent de la surface interne du tube ($z \approx 11\text{ mm to }16,5\text{ mm}$, $r \approx R_{\text{bore}}$). Parmi eux, 3 sont des photoélectrons ayant eu suffisamment d'énergie pour s'échapper du métal vers le bore, et 1 est un photon de Bremsstrahlung émis par un photoélectron énergétique ($E_\gamma = 16,6\text{ keV}$, né à $z = 11,4\text{ mm}$).

Point clé : **Aucune diffusion Compton** n'est observée parmi les secondaires détectées. C'est la conséquence directe de la section efficace photoélectrique dominante du laiton ($Z = 29$) : $\sigma_{\text{phot}}/\sigma_{\text{Compton}} \sim 500$ à 10 keV.

Table 4: Caractéristiques des 15 secondaires atteignant ScorePlane1.

#	Particule	Processus	Matériau	E_{plan} (keV)	z_{vertex} (mm)
0	e^-	phot	Air	6,1	18,0
1	e^-	phot	Air	18,7	17,7
2	e^-	phot	Air	4,2	17,9
3	e^-	phot	Al	18,8	16,5
4	e^-	phot	Air	3,3	17,8
5	e^-	phot	Air	1,7	17,9
6	e^-	phot	Air	8,7	17,9
7	e^-	phot	Air	8,8	17,2
8	e^-	phot	Air	6,5	19,1
9	γ	eBrem	Al	16,6	11,4
10	e^-	phot	Air	21,3	17,1
11	e^-	phot	Air	3,1	18,0
12	e^-	phot	Al	17,7	15,6
13	e^-	phot	Air	2,3	17,9
14	e^-	phot	Al	10,0	16,1

Table 5: Répartition des secondaires par type, processus et origine.

Critère	Catégorie	Nombre
Type de particule	e^- (photoélectron)	14
	γ (Bremsstrahlung)	1
Processus créateur	Effet photoélectrique (phot)	14
	Bremsstrahlung (eBrem)	1
Matériau d'origine	Air ($z > 16,95$ mm)	11
	Aluminium ($z \leq 16,95$ mm)	4
Énergie au plan	E_{moy}	9,9 keV
	$E_{\text{min}} - E_{\text{max}}$	1,7 keV to 21,3 keV

5 Dose déposée dans la cible eau

Table 6: Dose par anneau dans la cible eau (couronnes concentriques, épaisseur 5 mm).

Anneau	$r_{\text{min}} - r_{\text{max}}$ (mm)	$E_{\text{déposée}}$ (keV)	Dose (nGy)
0	0–2	19 390	82,4
1	2–4	61 001	86,4
2	4–6	98 893	84,0
3	6–8	5074	3,1
4	8–10	~ 0	~ 0
Total		184 914	31,4

La dose est remarquablement uniforme dans les anneaux 0, 1 et 2 (82 nGy to 86 nGy), avec une chute abrupte à l'anneau 3 (3,1 nGy, facteur $\times 27$ plus faible). Cela reflète la taille finie du faisceau collimaté : les primaires transmis forment un cône de demi-angle $\sim 4,9^\circ$, soit un diamètre de ~ 9 mm à $z = 66,5$ mm (centre de la cible).

Table 7: Comparaison des résultats entre le run 100 000 et le run 5 000 000 événements.

Grandeur	100k evt	5M evt	Ratio	Attendu
Primaires	100 000	5 000 000	$\times 50,0$	$\times 50$
Transmis	730	39 218	$\times 53,7$	$\times 50$
Taux transm.	0,73 %	0,78 %	—	=
Secondaires	0	15	∞	—

6 Vérification de scaling

Le scaling est satisfaisant ($\times 53,7$ au lieu de $\times 50$, soit $+7\%$), la légère déviation étant compatible avec les fluctuations statistiques ($\sigma_{\text{rel}} \approx 1/\sqrt{730} \approx 3,7\%$).

7 Schéma de la géométrie de référence

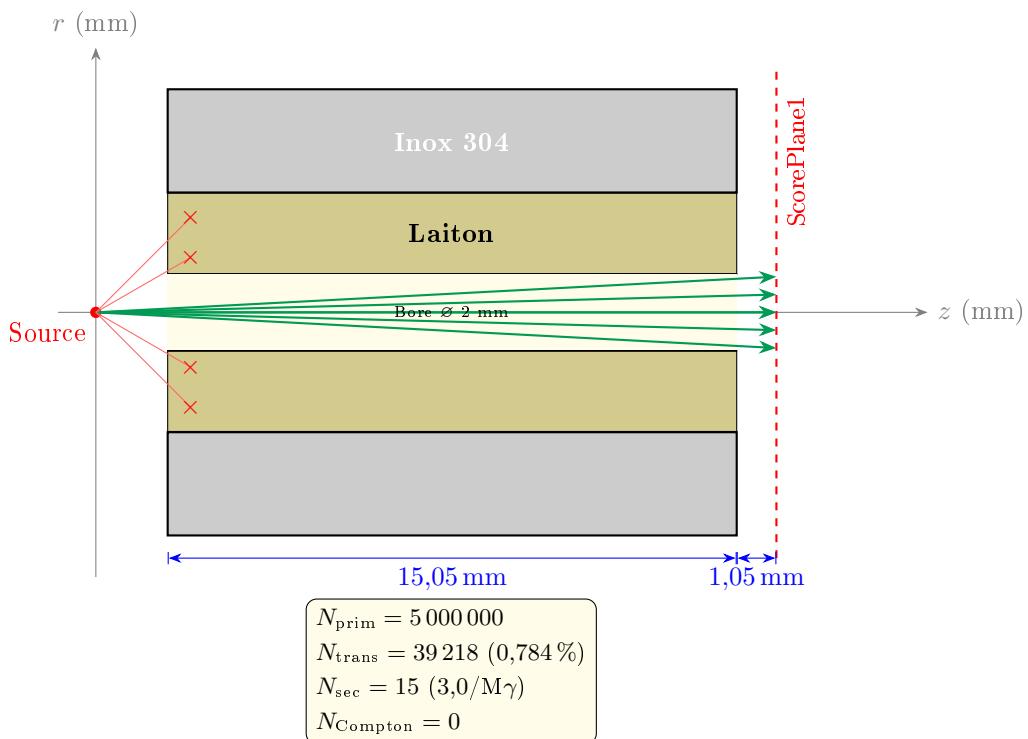


Figure 1: Coupe longitudinal (r, z) de la géométrie de référence. Les rayons verts représentent les photons transmis ($\theta < 3,2^\circ$), les croix rouges les absorptions photoélectriques.

8 Tableau de référence pour comparaison

Le tableau 8 rassemble toutes les grandeurs qui serviront de base de comparaison lors du test avec le collimateur conique en graphite.

Table 8: Grandeurs de référence (configuration Al + Laiton, collimateur 3 mm).

Grandeur	Valeur de référence
<i>Flux au ScorePlane1</i>	
Primaires générés	5 000 000
Transmis (outward)	39 218
Taux de transmission	0,784 %
Événements primaires uniques	39 203
<i>Secondaires au ScorePlane1</i>	
Total secondaires	15
dont e^- (phot, air)	11
dont e^- (phot, Al)	3
dont γ (eBrem, Al)	1
dont Compton	0
Taux secondaires	3,0 par million γ
$\langle E \rangle$ secondaires	9,9 keV
<i>Absorption</i>	
Laiton	60,5 %
Aluminium	33,0 %
Béryllium	5,6 %
Autres	1,0 %
<i>Dose dans l'eau</i>	
Dose totale	31,4 nGy
Anneau 0 (0 mm to 2 mm)	82,4 nGy
Anneau 1 (2 mm to 4 mm)	86,4 nGy
Anneau 2 (4 mm to 6 mm)	84,0 nGy
Anneau 3 (6 mm to 8 mm)	3,1 nGy

Critères de comparaison pour le cône graphite. Lors du run avec le collimateur conique en graphite (G4_GRAPHITE, $\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$, $Z = 6$), les indicateurs clés à surveiller seront :

1. **Nombre de transmis** : augmentation attendue due à la transparence du graphite.
2. **Nombre de secondaires Compton** : apparition de lignes `creator_process: compt` avec `vertex_volume: logicConeCompton` (absent dans la référence).
3. **Distribution angulaire** : les Compton forward devraient produire un halo autour du faisceau direct.
4. **Dose dans l'eau** : gain attendu sur les anneaux centraux si la focalisation Compton est efficace.
5. **Perte d'énergie** : à 10 keV, $\Delta E/E < 2\%$ par diffusion Compton (régime Thomson).