

PROPOSITION DE CONFIGURATION

Collimateur conique concentrateur Compton en graphite

Remplacement du système Al + Laiton par un cône en carbone pour la focalisation de rayons

X

Application : tube Amptek MiniX (1 keV to 50 keV, cône 60°)

February 7, 2026

1 Motivation et problématique

Le tube à rayons X Amptek MiniX émet un faisceau divergent dans un cône de demi-angle 60°. Le système de collimation actuel (tube aluminium + tube laiton, bore cylindrique Ø 3 mm) ne transmet que 0,78 % des photons primaires (run de référence, 5 000 000 événements). Les 99,2 % restants sont absorbés par effet photoélectrique, principalement dans le laiton (60,5 %) et l'aluminium (33 %).

Objectif : transformer le système de collimation en **concentrateur**, capable de rediriger les photons à grand angle vers l'axe du faisceau, même au prix d'une légère perte d'énergie. Le porte-collimateur en inox 304 est imposé et ne peut être modifié.

Idée : exploiter la **diffusion Compton** dans un matériau de bas numéro atomique Z comme mécanisme de redirection, en remplaçant les tubes métalliques par un cône unique en **graphite** (carbone, $Z = 6$).

2 Fondements physiques

2.1 Cinématique de la diffusion Compton

La diffusion Compton est la collision d'un photon avec un électron quasi-libre. L'énergie du photon diffusé est donnée par :

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

où E est l'énergie incidente, θ l'angle de diffusion et $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$. À basse énergie ($E \ll m_e c^2$), on se trouve dans le **régime Thomson** : la perte d'énergie est négligeable.

Le tableau 1 quantifie la perte d'énergie pour le spectre du MiniX :

Table 1: Perte d'énergie Compton $\Delta E/E$ (%) pour différents angles et énergies.

E (keV)	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 180^\circ$
5	0,1	0,5	1,0	1,9
10	0,3	1,0	1,9	3,8
20	0,5	1,9	3,8	7,3
50	1,3	4,7	8,9	16,4

Point clé : à 10 keV, même une rétrodiffusion complète ($\theta = 180^\circ$) ne coûte que 3,8 % d'énergie. Le Compton fonctionne ici comme une **réflexion quasi-élastique**.

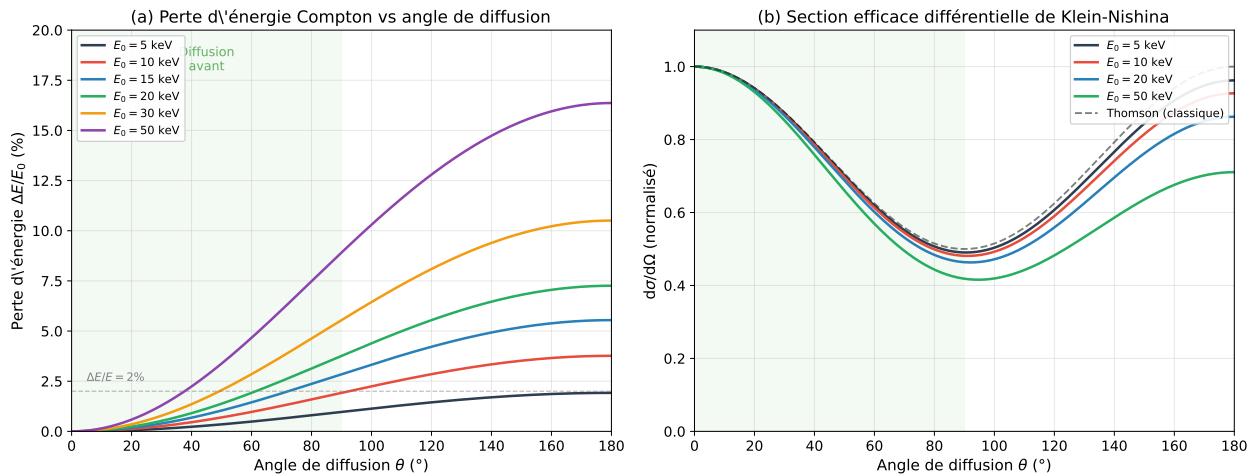


Figure 1: (a) Perte d'énergie relative $\Delta E/E$ en fonction de l'angle de diffusion pour plusieurs énergies incidentes. À 10 keV, $\Delta E < 2\%$ pour $\theta < 90^\circ$. (b) Section efficace différentielle de Klein-Nishina (normalisée). À basse énergie la distribution est quasi-isotrope (limite de Thomson), ce qui signifie qu'environ 50% des diffusions se font dans l'hémisphère avant.

2.2 Distribution angulaire : la formule de Klein-Nishina

La section efficace différentielle est donnée par :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} P(\theta)^2 \left[P(\theta) + \frac{1}{P(\theta)} - \sin^2 \theta \right] \quad \text{avec} \quad P(\theta) = \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

où $\alpha = E/(m_e c^2)$ et $r_e = 2,818 \times 10^{-13}$ cm. Comme le montre la figure 1b, à nos énergies ($\alpha < 0,1$) la distribution est quasi-isotrope. Cela signifie que **~50% des interactions Compton** produiront un photon diffusé dans l'hémisphère avant, exploitable pour la concentration.

Résumé physique : entre 5 keV to 50 keV, la diffusion Compton est (i) quasi-élastique ($\Delta E/E < 4\%$) et (ii) quasi-isotrope (~50% forward). C'est un mécanisme idéal pour rediriger des photons sans les détruire.

3 Choix du matériau

3.1 Critères de sélection

Pour que la diffusion Compton domine l'absorption photoélectrique, il faut :

1. **Z bas** — $\sigma_{\text{photo}} \propto Z^{4-5}$ tandis que $\sigma_{\text{Compton}} \propto Z$. Passer de $Z = 29$ (laiton) à $Z = 6$ (carbone) réduit le rapport photo/Compton d'un facteur $\sim (29/6)^4 \approx 550$.
2. **Densité suffisante** — pour obtenir une probabilité d'interaction significative dans ~ 2 mm de paroi.
3. **Tenue mécanique et thermique** — usinabilité, résistance à l'environnement du tube X.

3.2 Comparaison des matériaux candidats

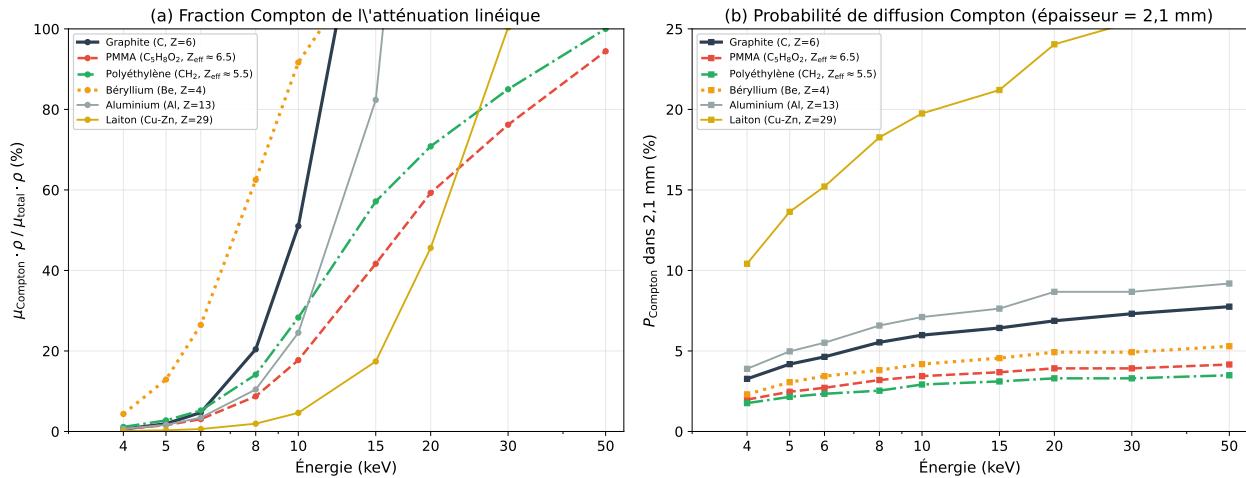


Figure 2: (a) Fraction de l'atténuation linéique due au Compton. Le graphite et le beryllium atteignent les fractions les plus élevées au-dessus de 10 keV. Le laiton reste dominé par le photoélectrique sur tout le spectre. (b) Probabilité de diffusion Compton dans 2,1 mm de paroi. Le graphite offre la probabilité la plus élevée en valeur absolue grâce à sa densité ($\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$).

Table 2: Propriétés des matériaux candidats pour le cône Compton (2,1 mm de paroi, $E = 10 \text{ keV}$).

Matériau	Z_{eff}	$\rho (\text{g/cm}^3)$	P_{Compt}	P_{photo}	Remarques
Graphite (C)	6	2,26	6,0%	32%	Meilleur compromis
Béryllium (Be)	4	1,85	4,2%	0,4%	Toxique, coûteux
PMMA	6,5	1,19	3,4%	14%	Fond à 160 °C
Polyéthylène	5,5	0,94	2,9%	7%	Trop léger, mou
B_4C	5,2	2,52	4,5%	18%	Très dur à usiner
Laiton (réf.)	29	8,73	$\ll 0,1\%$	> 99,9%	Tout est absorbé

Conclusion : le **graphite** (G4_GRAPHITE, $\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$, $Z = 6$) est le meilleur candidat. Il combine :

- le meilleur taux de Compton absolu (grâce à sa densité élevée parmi les bas- Z),
- une suppression forte du photoélectrique (Z^4 bas),
- une excellente tenue thermique ($> 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ sous atmosphère inerte),
- une bonne usinabilité.

3.3 Devenir d'un photon dans le graphite

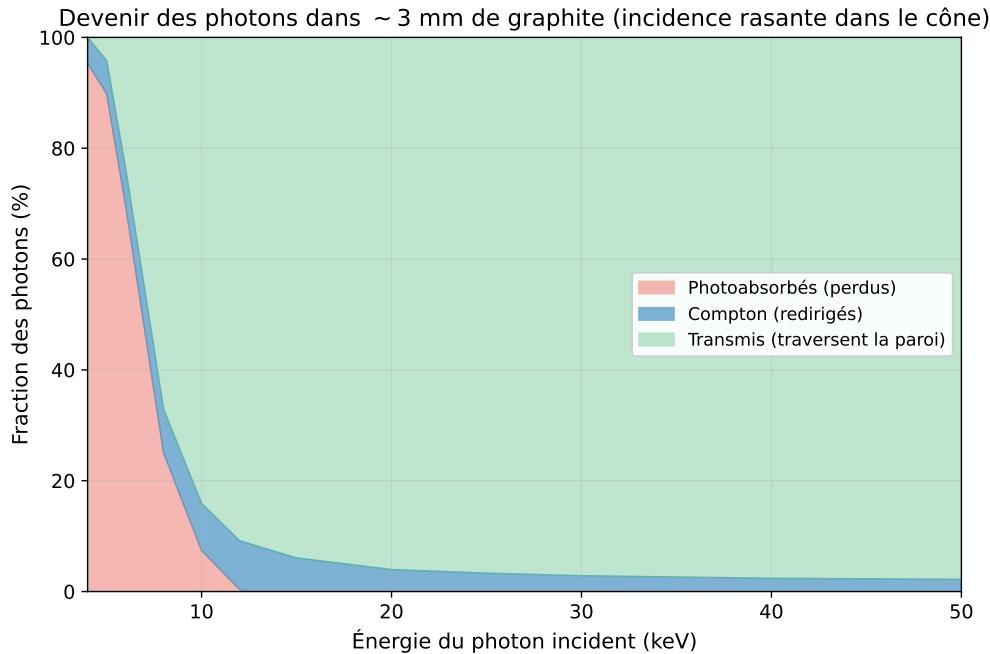


Figure 3: Répartition du devenir d'un photon traversant environ 3 mm de graphite (chemin effectif pour incidence rasante dans le cône). À 10 keV, environ 8% subissent un Compton, 60% sont photo-absorbés et 32% traversent sans interaction. Au-delà de 20 keV, le Compton devient le processus d'interaction dominant.

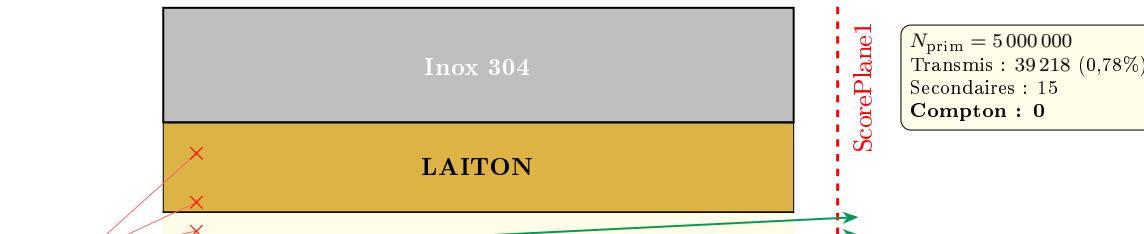
4 Géométrie proposée : le cône concentrateur

4.1 Principe de fonctionnement

L'idée est de remplacer le bore cylindrique (Al + Laiton) par un **bore conique** en graphite, élasé côté source et rétréci côté détecteur (figure 4). Le cône agit en trois zones :

1. **Zone de transmission directe ($\theta < 3,2^\circ$)** : les photons traversent le bore sans interaction → faisceau primaire inchangé.
2. **Zone de capture Compton ($3,2^\circ < \theta < 30^\circ$)** : les photons frappent la paroi interne du cône en graphite sous **incidence rasante**, traversant un chemin effectif de 3 mm to 15 mm. Une fraction significative subit une diffusion Compton et est redirigée vers l'avant avec > 98 % de son énergie.
3. **Zone d'absorption ($\theta > 30^\circ$)** : les photons traversent le graphite (trop mince à l'entrée) et sont absorbés par le porte-collimateur inox.

(a) Configuration actuelle — Bore cylindrique (Al + Laiton)



(b) Configuration proposée — Cône concentrateur Compton (graphite)

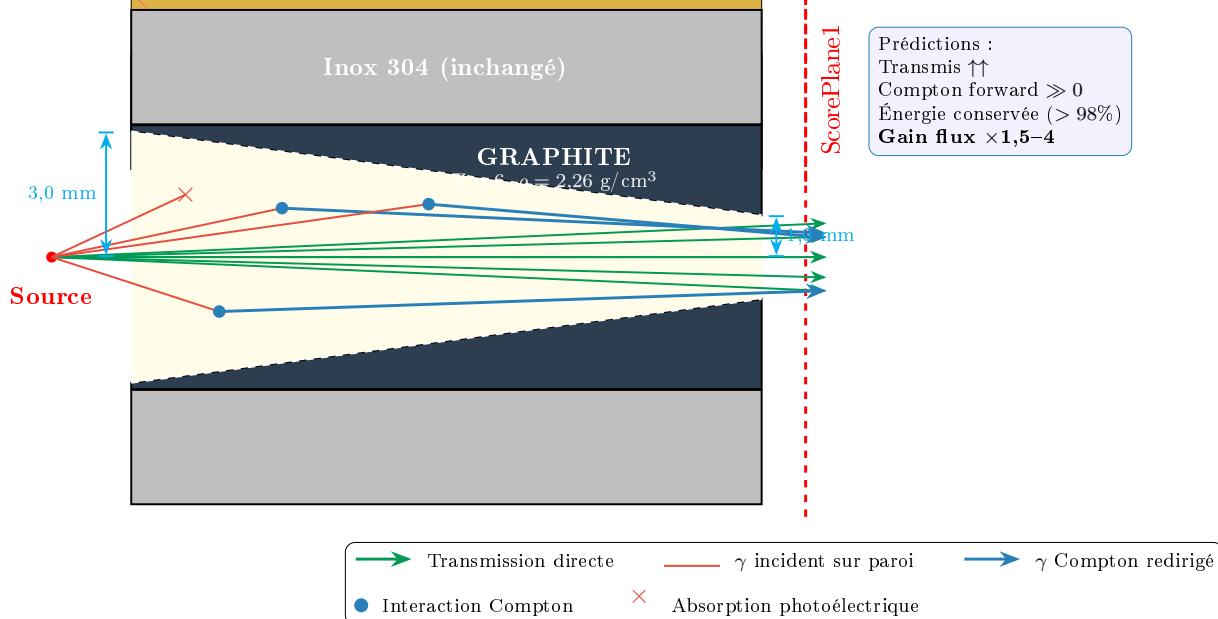


Figure 4: Coupe longitudinale (r, z) des deux configurations. (a) Système actuel : tous les photons hors du cône géométrique étroit sont absorbés dans le laiton. (b) Cône graphite : le bore conique intercepte les photons à angle intermédiaire, les diffuse par Compton et les redirige vers le plan de scoring.

4.2 Paramètres géométriques

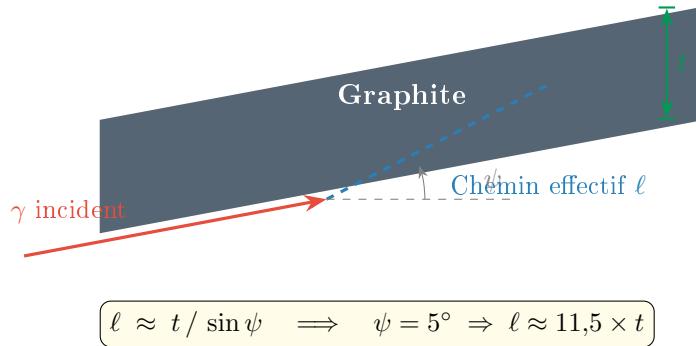
Le cône s'inscrit dans le volume libre à l'intérieur du porte-collimateur ($R_{\text{int}} = 3,17\text{ mm}$). Le tableau 3 donne les dimensions.

Table 3: Paramètres géométriques du cône concentrateur.

Paramètre	Valeur	Description
<i>Bore conique (surface interne)</i>		
$R_{\text{in},\text{entrée}}$	3,0 mm	Rayon côté source (large)
$R_{\text{in},\text{sortie}}$	1,0 mm	Rayon côté détecteur (étroit)
Demi-angle du cône	7,6°	$\alpha = \arctan \frac{R_{\text{in},e} - R_{\text{in},s}}{L}$
<i>Enveloppe extérieure</i>		
R_{ext}	3,15 mm	$= R_{\text{int,inox}} - 0,02 \text{ mm}$ (jeu)
<i>Dimensions axiales</i>		
$z_{\text{début}}$	1,90 mm	Face côté source
z_{fin}	16,95 mm	Face côté détecteur
Longueur	15,05 mm	
<i>Épaisseur de paroi</i>		
Côté entrée	0,15 mm	Mince — photons à grand angle traversent
Côté sortie	2,15 mm	Épaisse — bonne probabilité d'interaction
Matériau Geant4	G4_GRAPHITE	Carbone, $\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$

4.3 Incidence rasante et chemin optique effectif

Un aspect essentiel de la géométrie conique est l'**effet d'incidence rasante** : les photons à angle intermédiaire frappent la surface interne du cône sous un angle très faible par rapport à la surface, ce qui augmente considérablement le chemin optique dans le graphite. Schématiquement :



Pour un photon émis à $\theta \approx 8^\circ$ (proche du demi-angle du cône $\alpha = 7,6^\circ$), l'angle d'incidence sur la paroi est $\psi = \theta - \alpha \approx 0,4^\circ$, donnant un chemin de plusieurs centimètres dans le graphite ! Cela augmente dramatiquement la probabilité d'interaction Compton.

5 Estimation quantitative du gain

5.1 Bilan des photons

Pour 5 000 000 photons primaires :

Table 4: Budget de photons estimé pour le cône graphite.

Catégorie	Estimation	Note
Transmis direct ($\theta < 3,2^\circ$)	$\sim 39\ 000$	Identique à la référence
Interceptent le cône ($3,2^\circ < \theta < 30^\circ$)	$\sim 130\ 000$	Grande acceptance angulaire
→ Compton forward	~ 2500 to $15\ 000$	Redirigés vers le plan
→ Photo-absorbés	$\sim 25\ 000$ to $75\ 000$	Perdus dans le graphite
→ Traversent la paroi	$\sim 50\ 000$ to $100\ 000$	Absorbés par l'inox
Grand angle ($\theta > 30^\circ$)	$\sim 4\ 830\ 000$	Absorbés (inox + graphite)
Total sur ScorePlane1	$\sim 42\ 000$ to $54\ 000$	Gain $\times 1,1$ à $\times 1,4$

Note : ces estimations sont analytiques et approximatives. Seule la simulation Monte Carlo donnera la réponse définitive.

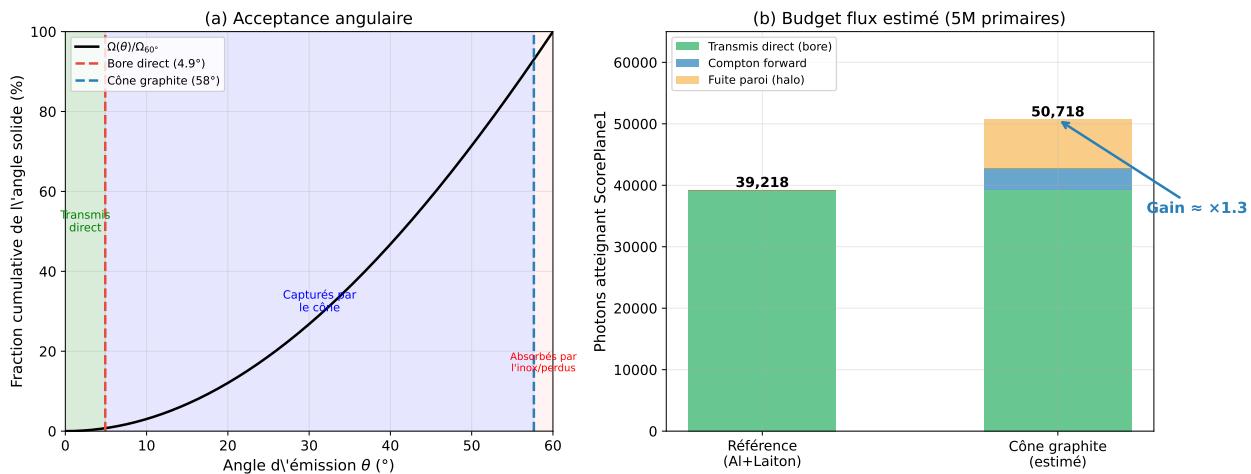


Figure 5: (a) Acceptance angulaire : le cône graphite capture les photons jusqu'à $\sim 58^\circ$ (quasi-totalité du cône d'émission), alors que le bore actuel ne laisse passer que $\theta < 4,9^\circ$. (b) Budget de flux estimé pour 5M primaires. Le gain principal vient des photons Compton forward et de la fuite à travers la paroi mince.

5.2 Comparaison synthétique

Table 5: Référence actuelle vs cône graphite (prédictions).

	Référence (Al + Laiton)	Cône graphite (prédict)
Collimateur	Cylindre $\varnothing 3$ mm	Cône $6 \rightarrow 2$ mm
Matériau	Al ($Z=13$) + Laiton ($Z \approx 29$)	Graphite ($Z=6$)
Transmis/5M	39 218	$\sim 42\ 000$ to $54\ 000$
Taux transm.	0,78%	$\sim 0,8$ – $1,1\%$
Compton	0	$\gg 0$
ΔE Compton	—	< 2% à 10 keV
Dose eau	31,4 nGy	↑ attendu

6 Implémentation Geant4

L'implémentation nécessite trois modifications minimales dans le code existant :

Table 6: Modifications apportées au code source Geant4.

#	Fichier	Modification
1	.hh	Ajout du membre <code>G4Material* MyGraphite</code>
2	.cc, <code>DefineMaterial()</code>	Chargement de "G4_GRAPHITE" via le NIST Manager
3	.cc, <code>ConstructGDML()</code>	Remplacement des sections Al3 mm et Laiton3 mm par un <code>G4Cons</code> paramétrique

Le solide `G4Cons` (cône tronqué creux) est défini par :

```
new G4Cons("solidConeCompton",
    coneRinEntry, coneRout,      // Rmin1, Rmax1 (source)
    coneRinExit, coneRout,       // Rmin2, Rmax2 (détecteur)
    coneHalfLen, 0.*deg, 360.*deg);
```

Pour tester un autre matériau, il suffit de modifier une seule ligne :

```
G4Material* coneMaterial = MyGraphite;
// Alternatives :
// -> nist->FindOrBuildMaterial("G4_PLEXIGLASS");
// -> nist->FindOrBuildMaterial("G4_POLYETHYLENE");
// -> nist->FindOrBuildMaterial("G4_BORON_CARBIDE");
```

7 Indicateurs de succès pour le run Geant4

Check-list d'analyse après le run avec cône graphite :

1. **Flux total sur ScorePlane1** — comparer à la référence (39 218/5M).
2. **Lignes [SECONDARY_ORIGIN]** — rechercher `creator_process: compt` avec `vertex_volume: logicConeCompton`. Leur nombre doit être $\gg 15$.
3. **Budget [LOSS][BY-MAT]** — le laiton et l'aluminium doivent disparaître, remplacés par `G4_GRAPHITE` et `StainlessSteel304`.
4. **Spectre en énergie** — les Compton forward doivent apparaître à $E \gtrsim 0,98 \times E_{\text{incident}}$, légèrement décalés.
5. **Distribution radiale** — les Compton redirigés créeront un **halo** autour du faisceau direct.
6. **Dose dans l'eau** — gain attendu dans les anneaux centraux.