

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 $m_e c^2 = 511$ 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**.

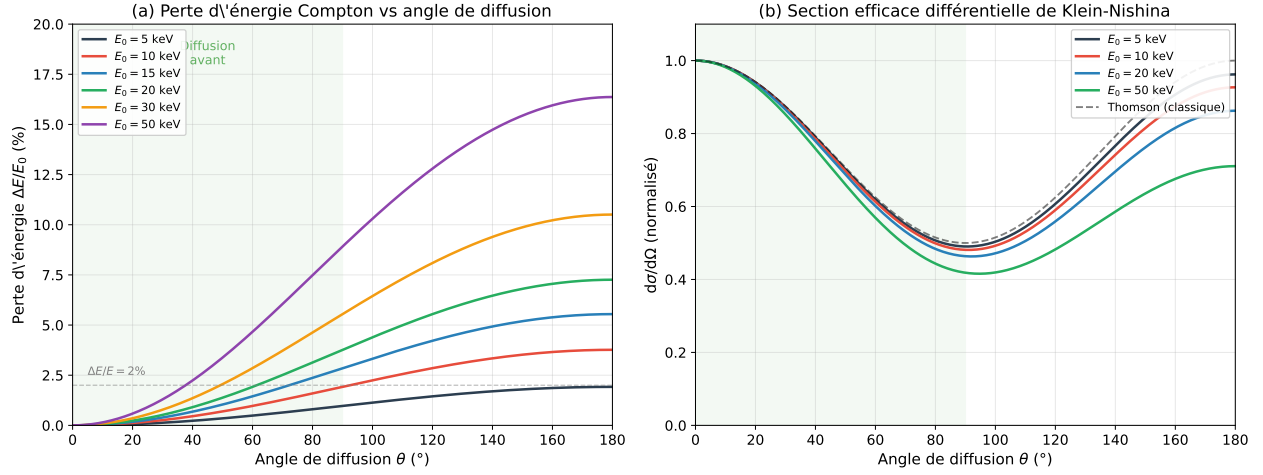


Figure 1: **(a)** Perte d'énergie relative $\Delta E/E$ en fonction de l'angle de diffusion pour plusieurs énergies incidentes. À 10 keV, $\Delta E < 2\%$ pour $\theta < 90^\circ$. **(b)** Section efficace différentielle de Klein-Nishina (normalisée). À basse énergie la distribution est quasi-isotrope (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 ($\sim 50\%$ 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

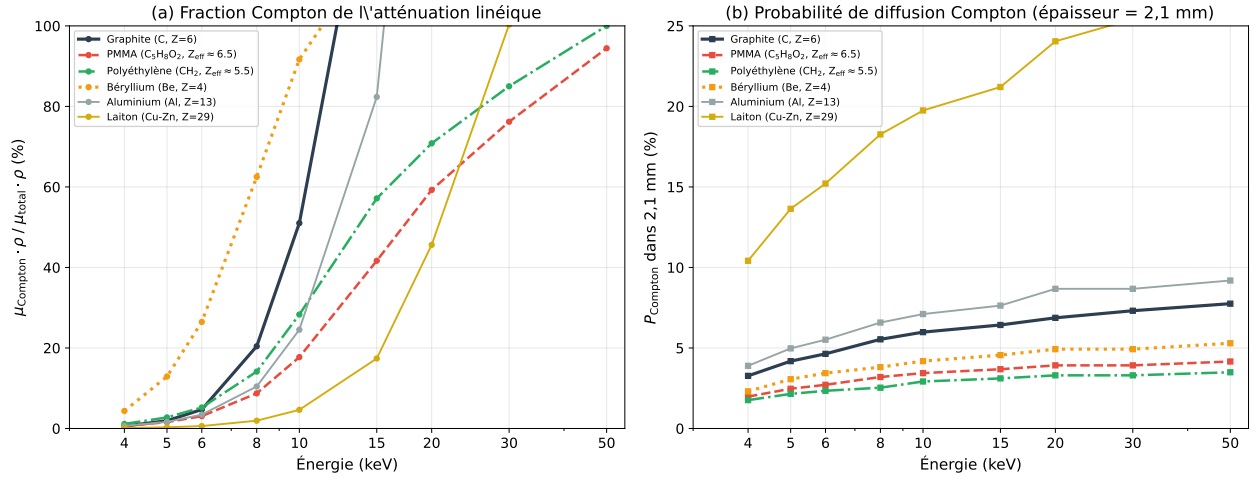


Figure 2: **(a)** Fraction de l'atténuation linéique due au Compton. Le graphite et le béryllium atteignent les fractions les plus élevées au-dessus de 10 keV. Le laiton reste dominé par le photoélectrique sur tout le spectre. **(b)** Probabilité de diffusion Compton dans 2,1 mm de paroi. Le graphite 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}	ρ (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 ₄ C	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 ($> 3000 \text{ °C}$ sous atmosphère inerte),
- une bonne usinabilité.

3.3 Devenir d'un photon dans le graphite

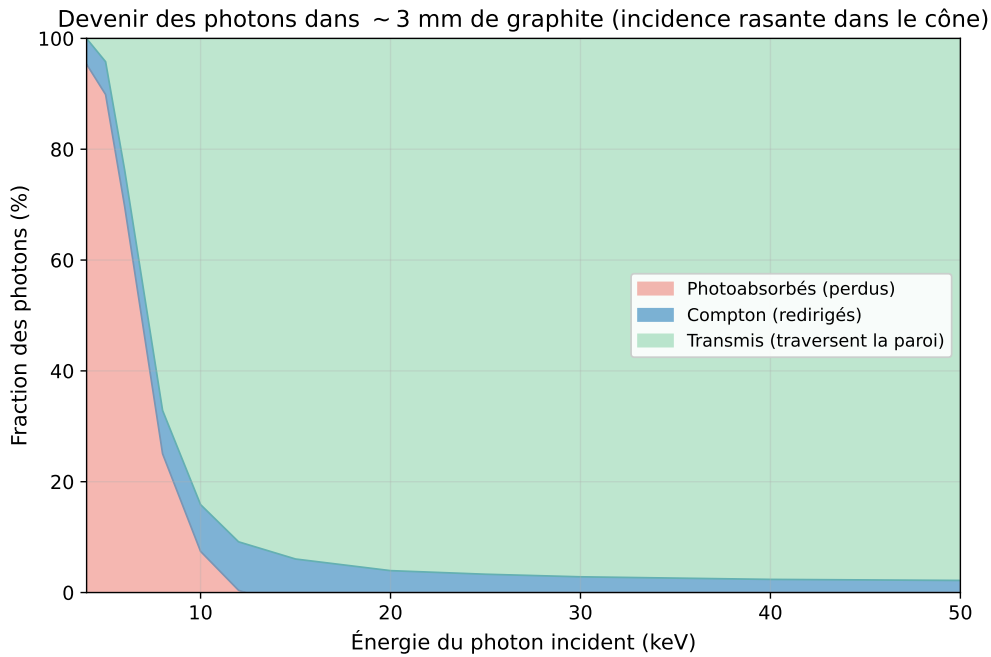


Figure 3: Répartition du devenir d'un photon traversant environ 3 mm de graphite (chemin effectif pour incidence rasante dans le cône). À 10 keV, environ 8% subissent un Compton, 60% sont photoabsorbés et 32% traversent sans interaction. Au-delà de 20 keV, le Compton devient le processus d'interaction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

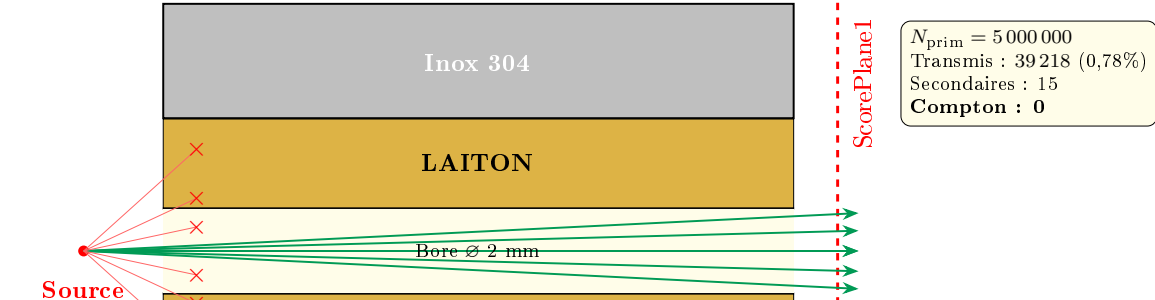
4 Géométrie proposée : le cône concentrateur

4.1 Principe de fonctionnement

L'idée est de remplacer le bore cylindrique (Al + Laiton) par un **bore conique** en graphite, élargi 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)

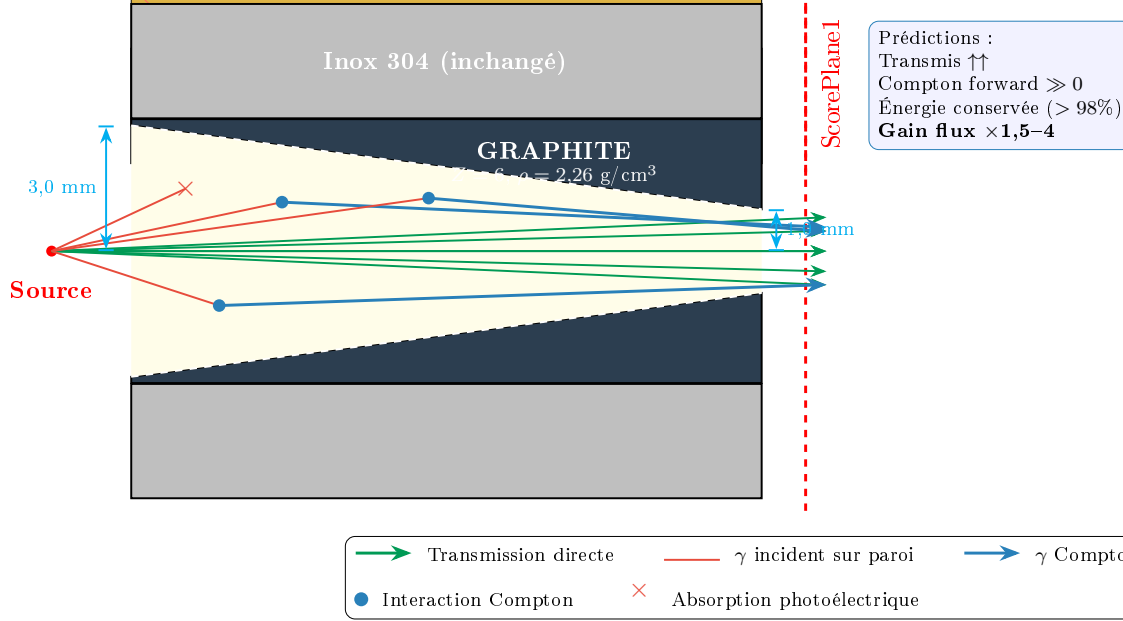


Figure 4: Coupe longitudinale (r, z) des deux configurations. (a) Système actuel : tous les photons hors du cône géométrique étroit sont absorbés dans le laiton. (b) Cône graphite : le bore conique intercepte les photons à angle intermédiaire, les diffuse par Compton et les redirige vers le plan de scoring.

4.2 Paramètres géométriques

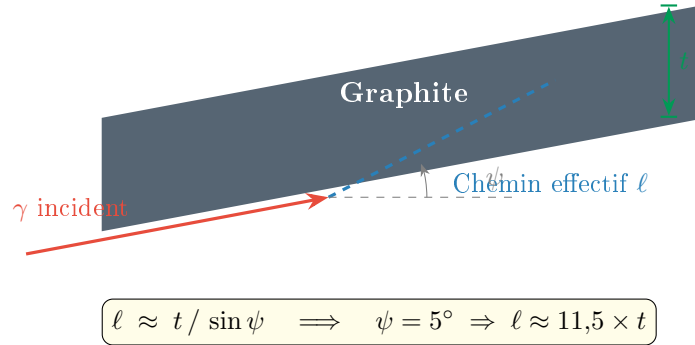
Le cône s'inscrit dans le volume libre à l'intérieur du porte-collimateur ($R_{\text{int}} = 3,17\text{ mm}$). Le tableau 3 donne les dimensions.

Table 3: Paramètres géométriques du cône concentrateur.

Paramètre	Valeur	Description
<i>Bore conique (surface interne)</i>		
$R_{\text{in,entrée}}$	3,0 mm	Rayon côté source (large)
$R_{\text{in,sortie}}$	1,0 mm	Rayon côté détecteur (étroit)
Demi-angle du cône	$7,6^\circ$	$\alpha = \arctan \frac{R_{\text{in,e}} - R_{\text{in,s}}}{L}$
<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.

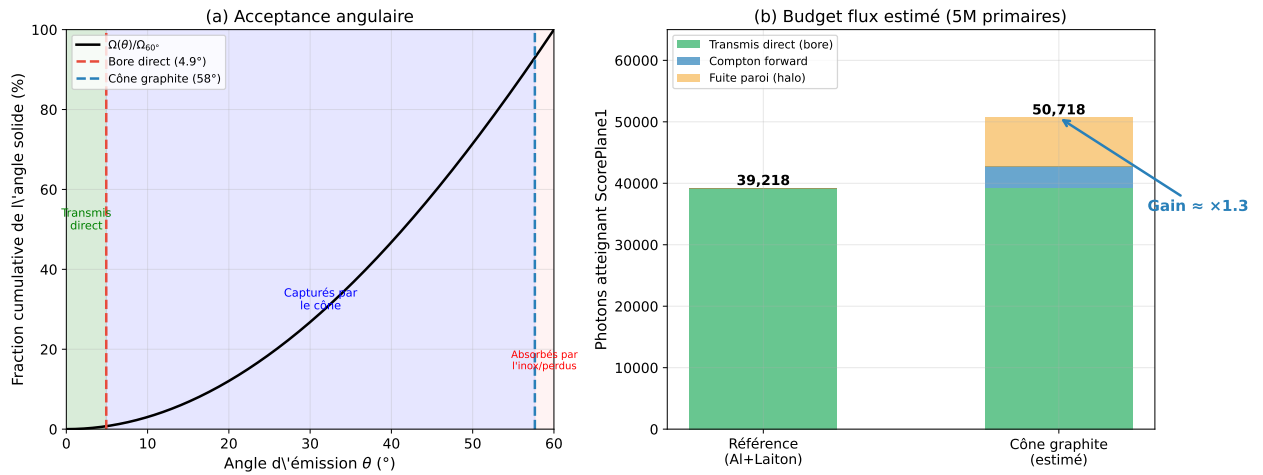


Figure 5: **(a)** Acceptance angulaire : le cône graphite capture les photons jusqu'à $\sim 58^\circ$ (quasi-totalité du cône d'émission), alors que le bore actuel ne laisse passer que $\theta < 4,9^\circ$. **(b)** Budget de flux estimé pour 5M primaires. Le gain principal vient des photons Compton forward 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 (prédit)
Collimateur	Cylindre \varnothing 3 mm	Cône 6→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 Al3mm et Laiton3mm 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.