

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 11, 2026

## 1 Motivation et problématique

Le système de collimation actuel (tube aluminium + tube laiton, bore cylindrique  $\varnothing 3$  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 :

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

où  $E$  est l'énergie incidente,  $\theta$  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**.

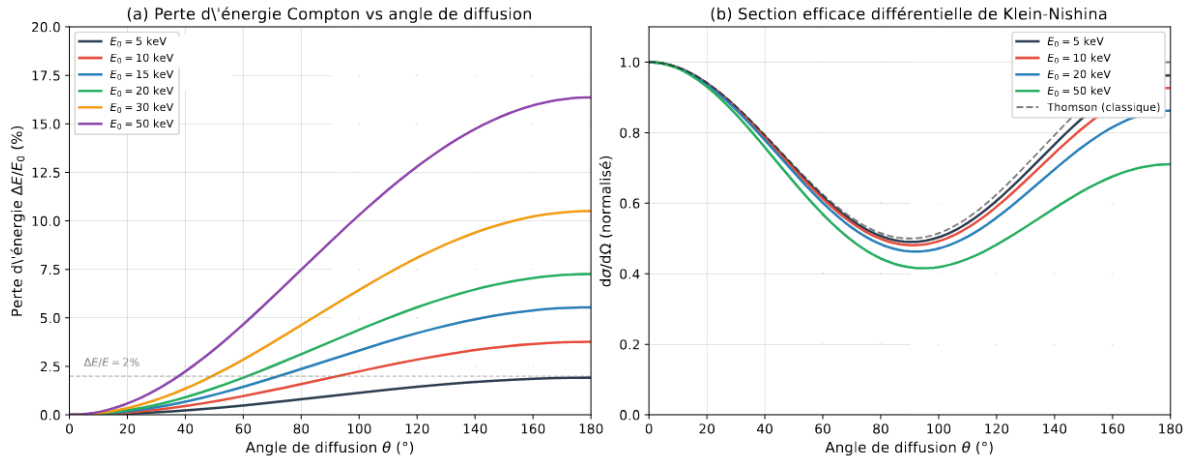
Le tableau suivant quantifie la perte d'énergie pour le spectre du MiniX :

*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**



(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 :

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

où  $\alpha = E/(m_e c^2)$  et  $r_e = 2,818 \times 10^{-13}$  cm. Comme le montre la figure précédente, 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

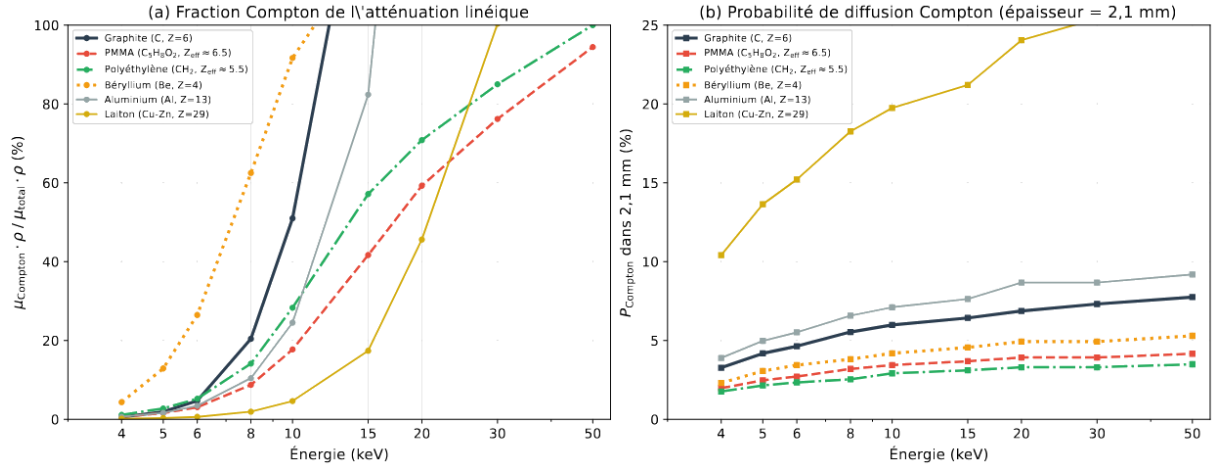
## 3 Choix du matériau

### 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  $\sim 2$  mm de paroi.

### 3.2 Comparaison des matériaux candidats



(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 ( $\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$ ).

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

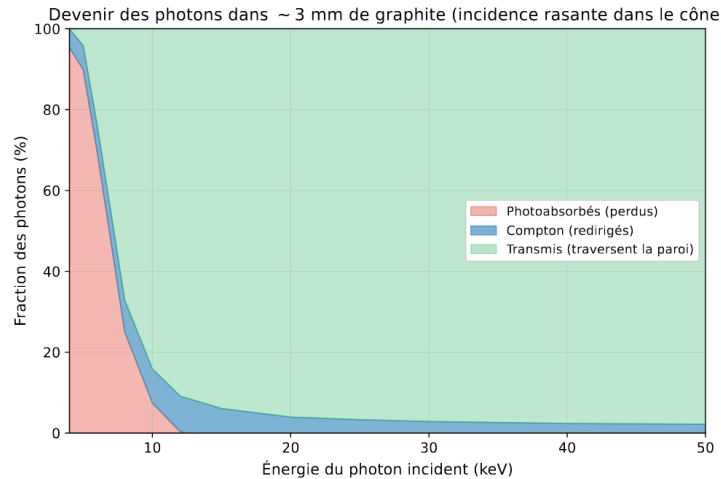
Matériau	$Z_{\text{eff}}$	$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$P_{\text{Compt}}$	$P_{\text{photo}}$	Remarques
<b>Graphite (C)</b>	<b>6</b>	<b>2,26</b>	<b>6,0%</b>	32%	<b>Meilleur compromis</b>
Béryllium (Be)	4	1,85	4,2%	0,4%	Toxique, coûteux
PMMA	6,5	1,19	3,4%	14%	Fond à 160 °C
Polyéthylène	5,5	0,94	2,9%	7%	Trop léger, mou
B <sub>4</sub> 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



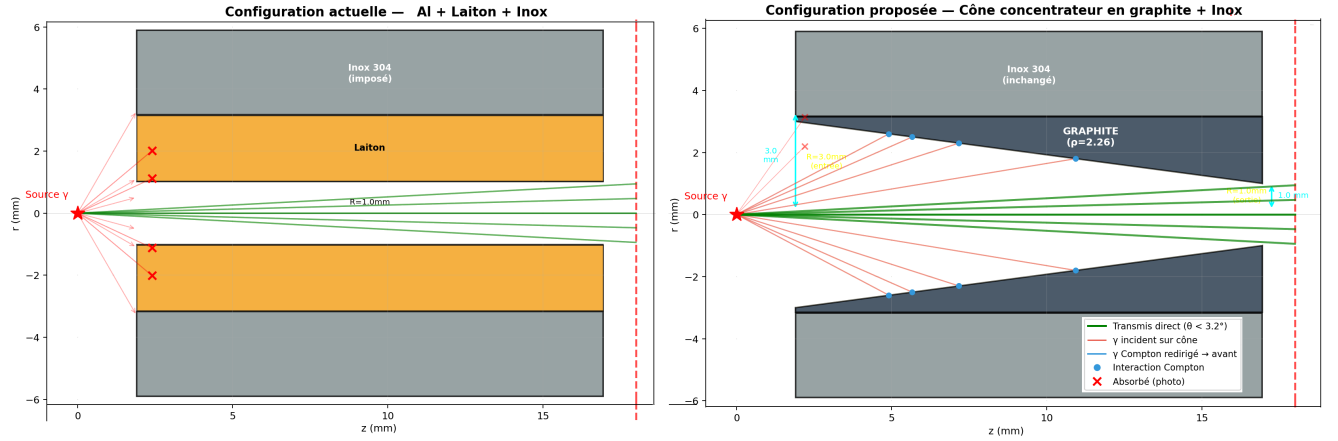
Répartition du devenir d'un photon traversant environ 3 mm de graphite (chemin effectif pour incidence rasante dans le cône). À 10 keV, environ 8% subissent un Compton, 60% sont photo-absorbés et 32% traversent sans interaction. Au-delà de 20 keV, le Compton devient le processus d'interaction dominant.

## 4 Géométrie proposée : le cône concentrateur

### 4.1 Principe de fonctionnement

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

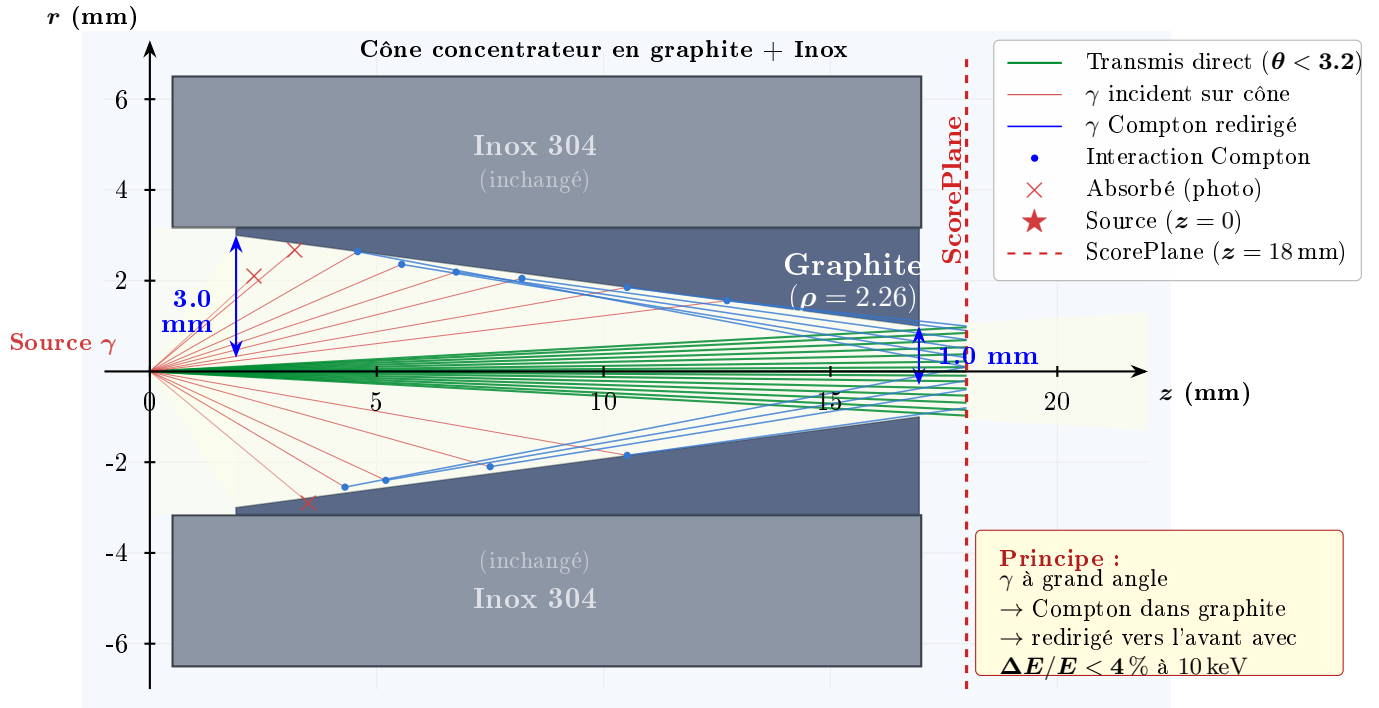
1. **Zone de transmission directe** ( $\theta < 3,2^\circ$ ) : les photons traversent le bore sans interaction  $\rightarrow$  faisceau primaire inchangé.
2. **Zone de capture Compton** ( $3,2^\circ < \theta < 30^\circ$ ) : les photons frappent la paroi interne du cône en graphite sous **incidence rasante**, 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.



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 ( $R_{\text{int}} = 3,17 \text{ mm}$ ).



Coupe  $(z, r)$  du cône Compton en graphite + Inconel 304. Vert : transmission directe ( $\theta < 3.2^\circ$ ). Rouge :  $\gamma$  incident sur le cône. Bleu :  $\gamma$  redirigé vers l'avant après diffusion Compton ( $\Delta E/E < 4\%$  à 10 keV). Croix : absorption photoélectrique.

Le tableau suivant donne les dimensions.

Paramètres géométriques du cône concentrateur.

Paramètre	Valeur	Description
<i>Collimateur 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°	$\alpha = \arctan \frac{R_{\text{in,e}} - R_{\text{in,s}}}{L}$
<i>Enveloppe extérieure</i>		
$R_{\text{ext}}$	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
$z_{\text{fin}}$	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, $\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$

Paramètres géométriques du cône Compton (G4Cons, graphite  $\rho = 2.21 \text{ g/cm}^3$ )

Paramètre	Valeur	Unité
$R_{\text{in}}^{\text{entrée}}$ (côté source, $z = 1.90 \text{ mm}$ )	3.00	mm
$R_{\text{in}}^{\text{sortie}}$ (côté détecteur, $z = 16.95 \text{ mm}$ )	1.00	mm
$R_{\text{ext}}$ (constant)	3.15	mm
$z_{\text{front}}$	1.90	mm
$z_{\text{back}}$	16.95	mm
$z_{\text{center}}$	9.425	mm
Longueur totale	15.05	mm
Demi-longueur	7.525	mm
Demi-angle d'ouverture $\alpha$	7.57	deg
Épaisseur entrée ( $R_{\text{ext}} - R_{\text{in}}^{\text{ent}}$ )	0.15	mm
Épaisseur sortie ( $R_{\text{ext}} - R_{\text{in}}^{\text{sort}}$ )	2.15	mm
Jeu avec porte-collimateur ( $R_{\text{int}}^{\text{PC}} - R_{\text{ext}}$ )	0.02	mm (nominal)
<i>Angle de transmission directe maximal :</i>		
$\theta_{\text{max}} = \arctan \left( \frac{R_{\text{in}}^{\text{sort}}}{z_{\text{back}}} \right) = \arctan \left( \frac{1.00}{16.95} \right) \approx 3.38$		

*Volumes principaux de la géométrie (extraits de DetectorConstruction.cc). Tous les composants GDML sont placés à (0,0,0) dans l'enveloppe. La symétrie cylindrique autour de l'axe  $z$  implique  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ .*

Composant	Matériau ( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	$z_{\min}$ (mm)	$z_{\max}$ (mm)	$R_{\min}$ (mm)	$R_{\max}$ (mm)
— <i>Enveloppe et monde</i> —					
Monde (G4Box)	Air	−300	+300	$300 \times 300 \text{ mm}^2$	
Enveloppe GDML (G4Box)	Air	−60	+60	$50 \times 50 \text{ mm}^2$	
— <i>Tube X MiniX (composants GDML, pos. (0, 0, 0))</i> —					
Enveloppe inox	304 (8.00)	(tessellé)		—	$\sim 6.5$
Tube alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (3.97)	(tessellé)		$\sim 3.8$	$\sim 5.2$
Vide anode/fenêtre	Vacuum	(tessellé)		0	$\sim 3.8$
Vide cathode/anode	Vacuum	(tessellé)		0	$\sim 3.8$
<b>Anode tungstène</b>	<b>W (19.35)</b>	<b>−0.001</b>	<b>0.000</b>	0	3.5
Fenêtre béryllium	Be (1.848)	(tessellé, $z \gtrsim 0$ )		0	$\sim 3.5$
Porte-collimateur	304 (8.00)	(tessellé)		3.17	$\sim 5.5$
— <i>Cône Compton (G4Cons)</i> —					
<b>Cône graphite</b>	<b>Graphite (2.21)</b>	<b>1.90</b>	<b>16.95</b>		
— <i>Plans de scoring</i> —					
ScorePlane (G4Box, 1 $\mu\text{m}$ )	Air	$z_c = 18.00$		$50 \times 50 \text{ mm}^2$	
ScorePlane2 (G4Box, 1 mm)	Air	27.50	28.50	$50 \times 50 \text{ mm}^2$	
ScorePlane3 (G4Box, 1 mm)	Air	37.50	38.50	$50 \times 50 \text{ mm}^2$	
ScorePlane5 (G4Box, 1 mm)	Air	69.50	70.50	$50 \times 50 \text{ mm}^2$	
— <i>Système de détection (couronnes d’eau + PVC)</i> —					
Fond PVC (G4Tubs)	PVC (1.30)	68.00	69.00	0	11.0
Paroi PVC (G4Tubs)	PVC (1.30)	65.00	68.00	10.0	11.0
Couronne 0 (G4Tubs)	H <sub>2</sub> O (1.00)	65.00	68.00	0	2.0
Couronne 1	H <sub>2</sub> O (1.00)	65.00	68.00	2.0	4.0
Couronne 2	H <sub>2</sub> O (1.00)	65.00	68.00	4.0	6.0
Couronne 3	H <sub>2</sub> O (1.00)	65.00	68.00	6.0	8.0
Couronne 4	H <sub>2</sub> O (1.00)	65.00	68.00	8.0	10.0

*Repères principaux le long de l'axe  $z$ , de la source au dernier plan de scoring.*

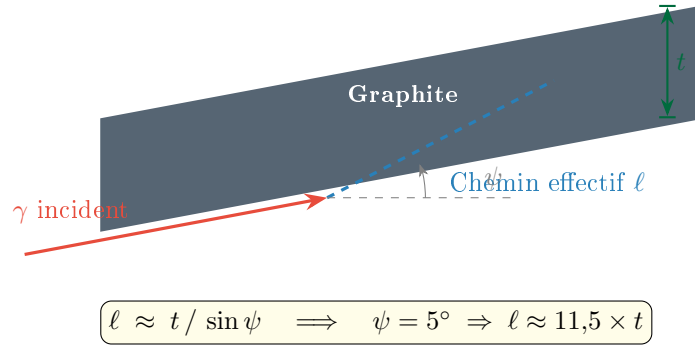
$z$ (mm)	Repère	Note
−0.001	Surface anode W	Source volumique ( $z \in [-0.001, 0]$ )
0.000	Origine ( $z = 0$ )	Interface anode / fenêtre Be
1.90	Face source du cône	$R_{\text{in}} = 3.00 \text{ mm}$
9.43	Centre du cône	Placement G4Cons
16.95	Face sortie du cône	$R_{\text{in}} = 1.00 \text{ mm}$
18.00	<b>ScorePlane</b>	Épaisseur 1 $\mu\text{m}$ (scoring principal)
28.00	ScorePlane2	Épaisseur 1 mm
38.00	ScorePlane3	Épaisseur 1 mm
65.00	Face avant eau	Couronnes $r \in [0, 10] \text{ mm}$
66.50	Centre couronnes	Placement G4Tubs
68.00	Face arrière eau	Contact PVC fond
68.50	Centre PVC fond	$R = [0, 11] \text{ mm}$
69.00	Surface ext. PVC	Fin du conteneur
70.00	<b>ScorePlane5</b>	Épaisseur 1 mm



### 4.3 Incidence rasante et chemin optique effectif

L'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

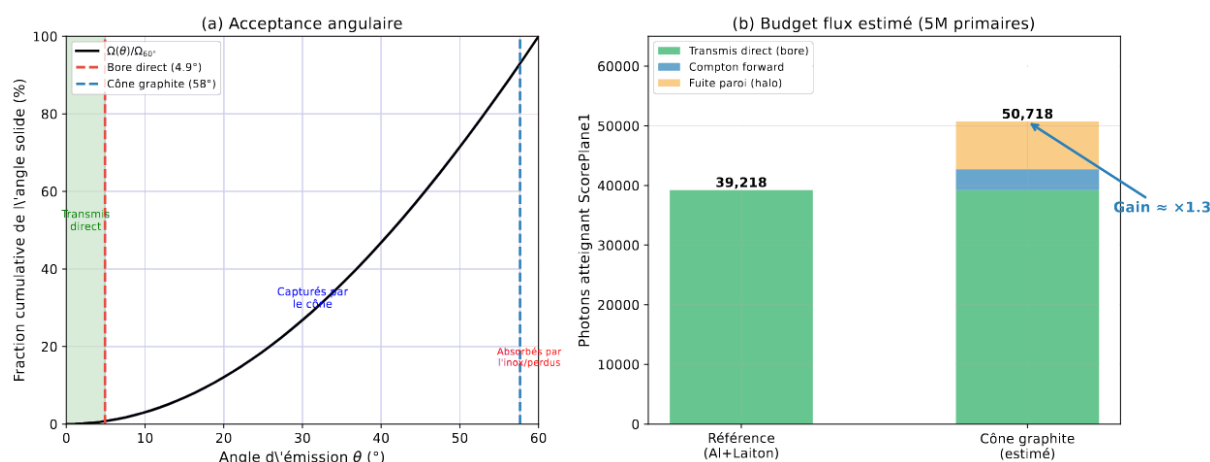
### 5.1 Bilan des photons

Pour 5 000 000 photons primaires :

*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 acceptation angulaire
→ Compton forward	$\sim 2500$ 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)
<b>Total sur ScorePlane1</b>	$\sim 42\,000$ to $54\,000$	<b>Gain</b> $\times 1,1$ à $\times 1,4$

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



(a) Acceptance angulaire : le cône graphite capture les photons jusqu'à  $\sim 58^\circ$  (quasi-totalité du cône d'émission), alors que le cône 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

Référence actuelle vs cône graphite (prédictions).

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

## 6 Implémentation Geant4

Modifications apportées au code source Geant4.

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

### 7.1 Contexte et motivation

Dans Geant4, lorsqu'un photon  $\gamma$  primaire subit une diffusion Compton, le **photon diffusé continue comme le même track** (même **trackID**, **parentID = 0**).

→ Seul l'électron de recul est créé en tant que secondaire (**creator\_process = "compt"**).

#### Conséquence

Au ScorePlane ( $z = 18$  mm), un photon redirigé par Compton dans le cône graphite est **indiscernable** d'un photon transmis directement à travers le canal.  
Les deux apparaissent comme **parentID = 0**, **creator\_process = "primary"**.

#### Objectif

Ajouter un marquage (flag) sur le track primaire pour distinguer les trois populations au ScorePlane

Cat.	Description	parentID	compton_in_cone
A	Primaire transmis directement	0	0
B	Primaire redirigé par Compton	0	1
C	Secondaire ( $e^-$ , $\gamma$ Brem...)	$\geq 1$	—

### 7.2 Fichiers modifiés

Fichier	Répertoire	Nature de la modification
MyTrackInfo.hh	include/	Ajout champs Compton
MyTrackInfo.cc	src/	Initialisation des nouveaux champs
SteppingAction.cc	src/	Détection Compton dans le cône
AnalysisManagerSetup.cc	src/	5 nouvelles colonnes ntuple
SurfaceSpectrumSD.cc	src/	Lecture flag + remplissage ntuple

Aucun autre fichier n'est modifié. Les fichiers .hh et .cc non listés ci-dessus restent inchangés.

### 7.3 Détail des modifications

**MyTrackInfo.hh / .cc → Stockage de l'information Compton** Quatre nouveaux champs privés sont ajoutés à la classe **MyTrackInfo** (qui hérite de **G4VUserTrackInformation** et est attachée à chaque **track**) :

Champ	Type	Init.	Description
fComptonInCone	G4bool	false	Flag : $\geq 1$ Compton dans le cône
fNComptonInCone	G4int	0	Nombre total de Compton dans le cône
fLastComptonPos	G4ThreeVector	(0,0,0)	Position de la dernière diffusion
fLastComptonEkin	G4double	0.	$E_{\text{kin}}$ avant la dernière diffusion

- Accesseurs publics correspondants : Set/Get/Has + IncrementNComptonInCone().
- L'include G4ThreeVector.hh est ajouté en en-tête.

**SteppingAction.cc → Détection du Compton dans le cône** Un nouveau bloc est inséré dans **UserSteppingAction()**, juste après la récupération des noms de matériaux (matNamePre, matNamePost).

**Condition de déclenchement** (les 3 conditions doivent être vraies simultanément) :

1. Le processus défini au post-step est "compt"
2. Le volume logique au pré-step est "logicConeCompton"
3. Le track est un primaire (parentID == 0)

**Actions :**

1. info->SetComptonInCone(true)
2. info->IncrementNComptonInCone()
3. info->SetLastComptonPos(postPoint->GetPosition())
4. info->SetLastComptonEkin(prePoint->GetKineticEnergy())

**Log :**

1. tag [STEP][COMPTON\_IN\_CONE]
2. 100 premiers puis 1 sur 10 000.
3. Protégé par mutex (G4AutoLock) pour la compatibilité multi-thread.

*Extrait de **SteppingAction.cc** (bloc ajouté)*

```

1 const G4VProcess* procDefined = postPoint->GetProcessDefinedStep();
2 if (procDefined && track->GetParentID() == 0
3     && procDefined->GetProcessName() == "compt"
4     && namePre == "logicConeCompton")
5 {
6     MyTrackInfo* info =
7         static_cast<MyTrackInfo*>(track->GetUserInformation());
8     if (info) {
9         info->SetComptonInCone(true);
10        info->IncrementNComptonInCone();
11        info->SetLastComptonPos(postPoint->GetPosition());
12        info->SetLastComptonEkin(prePoint->GetKineticEnergy());
13    }
14 }
```

**AnalysisManagerSetup.cc → Nouvelles colonnes du ntuple**

Cinq colonnes sont ajoutées au ntuple **plane\_passages**(indices 10 à 14), juste avant le **FinishNtuple**:

*Colonnes ajoutées dans **AnalysisManagerSetup.cc***

```

1 // [ADD] Colonnes Compton dans le cone graphite
2 CreateNtupleIColumn(id, "compton_in_cone"); // 10
3 CreateNtupleIColumn(id, "n_compton_cone"); // 11
4 CreateNtupleDColumn(id, "compton_x_mm"); // 12
5 CreateNtupleDColumn(id, "compton_y_mm"); // 13
6 CreateNtupleDColumn(id, "compton_z_mm"); // 14
```

**SurfaceSpectrumSD.cc** → **Lecture du flag et remplissage** Dans **ProcessHits()**, après le calcul de **is\_secondary**:

1. Récupération du MyTrackInfo attaché au track
2. Lecture de HasComptonInCone(), GetNComptonInCone(), GetLastComptonPos()
3. Remplissage des colonnes 10–14 du ntuple
4. Log [ScorePlane1][COMPTON\_REDIRECTED] (200 premiers puis 1 sur 5 000)

L'include **MyTrackInfo.hh** est ajouté en en-tête du fichier.

## 8 Structure complète du ntuple plane\_passages

Colonnes du ntuple **plane\_passages**(ScorePlane,  $z = 18$  mm). Les colonnes 0–9 sont inchangées. Les colonnes 10–14 (sur fond vert) sont ajoutées.

Col.	Type	Nom	Unité	Description
0	int	pdg	—	Code PDG ( $22 = \gamma$ , $11 = e^-$ )
1	string	name	—	Nom de la particule
2	int	is_secondary	—	0 = primaire, 1 = secondaire
3	double	x_mm	mm	Position $x$ au plan
4	double	y_mm	mm	Position $y$ au plan
5	double	z_mm	mm	Position $z$ au plan ( $\approx 18$ )
6	double	ekin_keV	keV	Énergie cinétique au plan
7	int	trackID	—	Identifiant du track
8	int	parentID	—	ID du parent (0 = primaire)
9	string	creator_process	—	Processus créateur
10	int	compton_in_cone	—	1 si $\geq 1$ Compton dans le cône, 0 sinon
11	int	n_compton_cone	—	Nombre de diffusions Compton dans le cône
12	double	compton_x_mm	mm	$x$ de la dernière diffusion Compton
13	double	compton_y_mm	mm	$y$ de la dernière diffusion Compton
14	double	compton_z_mm	mm	$z$ de la dernière diffusion Compton

- Les colonnes 12–14 valent (0,0,0) si `compton_in_cone = 0`.
- Si le photon subit plusieurs Compton dans le cône (`n_compton_cone > 1`), seule la position de la *dernière* diffusion est enregistrée.
- Les ntuples des autres plans (ScorePlane2, 3, 5) ne sont **pas modifiés**.

## 9 Classification des particules au ScorePlane

Classification des particules au ScorePlane.

Catégorie	parentID	is_sec	compton_in_cone	Filtre ROOT
Primaire transmis directement ( $\theta < 3.4$ )	0	0	0	<code>is_secondary==0</code> <code>compton_in_cone==0</code>
Primaire redirigé Compton	0	0	1	<code>is_secondary==0</code> <code>compton_in_cone==1</code>
Secondaire (photoélectron, Brem...)	$\geq 1$	1	—	<code>is_secondary==1</code>

Avec les nouvelles colonnes, chaque entrée du ntuple peut être classée sans ambiguïté :

## 10 Nouveaux tags dans le fichier .log

*Tags de log ajoutés.*

Tag	Source	Fréquence	Contenu
[STEP][COMPTON_IN_CONE]	SteppingAction	100 premiers, puis 1/10 000	Événement, trackID, $n_{\text{compt}}$ , $E_{\text{avant}}$ , $E_{\text{après}}$ , position
[ScorePlane1][COMPTON_REDIRECTED]	SurfaceSpectrumSD	200 premiers, puis 1/5 000	Particule, trackID, $E$ au plan, $n_{\text{compt}}$ , position Compton, position au plan

## 11 Exemples d'analyse ROOT

*Exemples de commandes ROOT/TTree::Draw*

```
// Spectre en energie des photons transmis directement
plane_passages->Draw("ekin_keV",
    "pdg==22 && is_secondary==0 && compton_in_cone==0")

// Spectre en energie des photons rediriges par Compton
plane_passages->Draw("ekin_keV",
    "pdg==22 && is_secondary==0 && compton_in_cone==1")

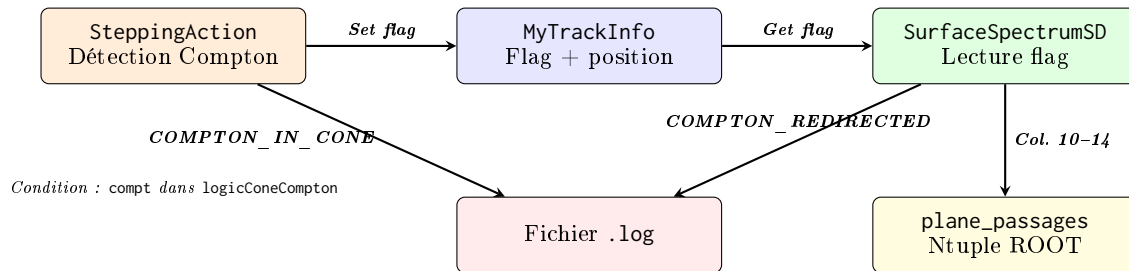
// Distribution en z des lieux de diffusion Compton
plane_passages->Draw("compton_z_mm",
    "compton_in_cone==1")

// Distribution radiale r = sqrt(x^2+y^2) des Compton
plane_passages->Draw("sqrt(compton_x_mm^2+compton_y_mm^2)",
    "compton_in_cone==1")

// Perte d'energie fractionnelle par Compton (si >0)
plane_passages->Draw("n_compton_cone",
    "compton_in_cone==1")

// Comptages
plane_passages->Draw("compton_in_cone",
    "pdg==22 && is_secondary==0")
// -> bin 0 = transmis directs, bin 1 = Compton rediriges
```

## 12 Schéma synoptique du flux de données



## 13 Enregistrement des photoabsorptions de primaires dans le graphite et l'inox

### 13.1 Contexte et objectif

Le code existant comptabilisait les pertes de primaires par processus et par matériau dans des maps globales (gLostByProc, gLostByMat), imprimées en fin de run sous les tags [LOSS][BY-PROC] et [LOSS][BY-MAT]. Ce mécanisme fournissait des **totaux agrégés** mais aucune information événement par événement (position, énergie, volume logique exact).

#### Objectif

Créer **deux ntuples** ROOT dédiés enregistrant **chaque absorption photoélectrique** individuelle d'un  $\gamma$  primaire :

- **abs\_graphite** → absorptions dans le cône graphite (logicConeCompton)
- **abs\_inox** → absorptions dans l'inox SS304 (porte-collimateur et enveloppe tube)

Chaque entrée conserve **la position** ( $x, y, z$ ), **l'énergie cinétique** au moment de l'absorption, et **l'historique Compton** dans le cône (flag + compteur), permettant de corréler absorption et diffusion antérieure.

### 13.2 Fichiers modifiés

**Trois fichiers** sont concernés par cet ajout. Les modifications précédentes (tracking Compton via MyTrackInfo, sont un prérequis.

Fichier	Rép.	Nature de la modification
AnalysisManagerSetup.hh	include/	Déclarations des getters des 2 nouveaux ntuples
AnalysisManagerSetup.cc	src/	Création des 2 ntuples + getters
SteppingAction.cc	src/	Remplissage des ntuples à la mort du primaire

Les fichiers MyTrackInfo.hh/.cc et SurfaceSpectrumSD.cc ne requièrent **aucune modification supplémentaire** par rapport à la synthèse précédente.

## 13.3 Détail des modifications

### AnalysisManagerSetup.hh / .cc — Création des ntuples

En-tête (.hh)  
Deux nouvelles déclarations de fonctions getter :

*Ajouts dans AnalysisManagerSetup.hh*

```
1 int GetAbsGraphiteNtupleId();
2 int GetAbsInoxNtupleId();
```

#### Source (.cc)

Deux variables statiques, deux blocs CreateNtuple et deux getters sont ajoutés.

Le ntuple abs\_graphite comporte 8 colonnes (indices 0–7) et le ntuple abs\_inox en comporte 9 (indices 0–8), la colonne supplémentaire étant le nom du volume logique (pour distinguer porte-collimateur d'enveloppe).

### SteppingAction.cc — Détection et remplissage

Nouvel include

*Include ajouté*

```
1 #include "AnalysisManagerSetup.hh"
```

#### Logique de remplissage

Un nouveau bloc do {...} while(0) est inséré dans la section [TRACE] Fin de piste PRIMAIRE, juste après le bloc [LOSS] existant (lignes ~1104).

Il se déclenche **uniquement** quand les conditions suivantes sont *toutes* réunies :

1. Le track est un primaire (parentID == 0) — déjà garanti par le bloc parent
2. Le track est mort (fStopAndKill) ou sort du monde
3. Le processus qui a tué le track est "phot" (effet photoélectrique)

Ensuite, le volume logique au pré-step détermine dans quel ntuple écrire :

- namePre == "logicConeCompton" → ntuple abs\_graphite
- materialPre == "StainlessSteel304" → ntuple abs\_inox

*Extrait du bloc de remplissage (cas graphite)*

```
1 if (!proc || proc->GetProcessName() != "phot") break;
2
3 const G4ThreeVector absPos = postPoint->GetPosition();
4 const G4double abs_ekin_keV = prePoint->GetKineticEnergy()/keV;
5
6 // Info Compton depuis MyTrackInfo
7 G4int had_compton = 0, n_compton = 0;
8 if (trackInfo) {
9     had_compton = trackInfo->HasComptonInCone() ? 1 : 0;
10    n_compton = trackInfo->GetNComptonInCone();
11 }
12
13 if (namePre == "logicConeCompton") {
14     const G4int id = GetAbsGraphiteNtupleId();
15     man->FillNtupleIColumn(id, 0, eventID);
16     man->FillNtupleIColumn(id, 1, track->GetTrackID());
17     man->FillNtupleDColumn(id, 2, abs_ekin_keV);
18     man->FillNtupleDColumn(id, 3, absPos.x()/mm);
19     man->FillNtupleDColumn(id, 4, absPos.y()/mm);
20     man->FillNtupleDColumn(id, 5, absPos.z()/mm);
21     man->FillNtupleIColumn(id, 6, had_compton);
22     man->FillNtupleIColumn(id, 7, n_compton);
23     man->AddNtupleRow(id);
24 }
```

Le cas **abs\_inox** est identique, avec en plus la colonne 6 de type **string** contenant le nom du volume logique (namePre), ce qui permet de distinguer le porte-collimateur de l'enveloppe inox.



## 13.4 Structure complète des ntuples

### Ntuple `abs_graphite`

Ntuple `abs_graphite` — *Photoabsorptions de primaires dans le cône graphite (logicConeCompton).*

Col	Type	Nom	Unité	Description
0	int	eventID	—	Numéro de l'événement
1	int	trackID	—	Identifiant du track
2	double	ekin_keV	keV	Énergie cinétique juste avant l'absorption
3	double	x_mm	mm	Position $x$ de l'absorption
4	double	y_mm	mm	Position $y$ de l'absorption
5	double	z_mm	mm	Position $z$ de l'absorption
6	int	had_compton_in_cone	—	1 si le $\gamma$ avait subi $\geq 1$ Compton dans le cône
7	int	n_compton_in_cone	—	Nombre de Compton dans le cône avant absorption

**Volume concerné :** logicConeCompton uniquement (G4Cons, graphite  $\rho = 1.7$  g/cm<sup>3</sup>,  $z \in [1.90; 16.95]$  mm).

### Ntuple `abs_inox`

Ntuple `abs_inox` — *Photoabsorptions de primaires dans l'inox SS304.*

Col.	Type	Nom	Unité	Description
0	int	eventID	—	Numéro de l'événement
1	int	trackID	—	Identifiant du track
2	double	ekin_keV	keV	Énergie cinétique juste avant l'absorption
3	double	x_mm	mm	Position $x$ de l'absorption
4	double	y_mm	mm	Position $y$ de l'absorption
5	double	z_mm	mm	Position $z$ de l'absorption
6	string	volume	—	Nom du volume logique (voir tableau ??)
7	int	had_compton_in_cone	—	1 si le $\gamma$ avait subi $\geq 1$ Compton dans le cône
8	int	n_compton_in_cone	—	Nombre de Compton dans le cône avant absorption

*Volumes logiques en inox SS304 distingués par la colonne volume.*

Valeur de volume	Pièce	Description
logicPorteCollimateur	Porte-collimateur	Paroi interne $R_{\text{int}} = 3.17$ mm
logicEnveloppeGDML	Enveloppe MiniX	Tube externe du collimateur

**Note :** le filtre se fait sur le matériau (StainlessSteel304), donc toute pièce en inox dans la géométrie est capturée. La colonne volume permet ensuite le tri.

### 13.5 Ntuple plane\_passages (rappel, modification précédente)

Pour mémoire, le ntuple `plane_passages` (ScorePlane,  $z = 18$  mm) a été étendu de 10 à 15 colonnes lors de la modification précédente (tracking Compton).

Les colonnes 10–14 permettent de distinguer les primaires directs des primaires redirigés par Compton au plan de scoring.

*Ntuple plane\_passages — structure complète (15 colonnes)*

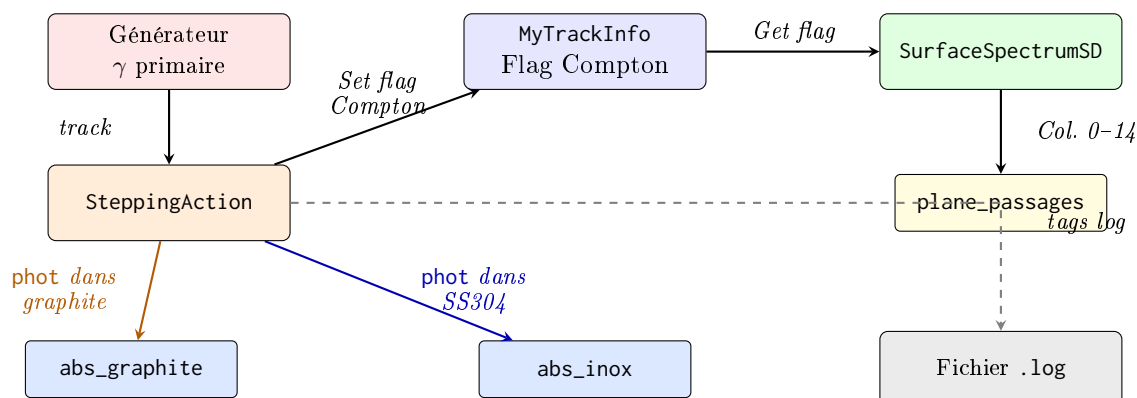
Col.	Type	Nom	Unité	Description
0	int	pdg	—	Code PDG
1	string	name	—	Nom particule
2	int	is_secondary	—	0 = primaire, 1 = secondaire
3	double	x_mm	mm	Position $x$ au plan
4	double	y_mm	mm	Position $y$ au plan
5	double	z_mm	mm	Position $z$ au plan
6	double	ekin_keV	keV	Énergie cinétique
7	int	trackID	—	Identifiant du track
8	int	parentID	—	ID du parent
9	string	creator_process	—	Processus créateur
10	int	compton_in_cone	—	1 si Compton dans le cône
11	int	n_compton_cone	—	Nombre de Compton dans le cône
12	double	compton_x_mm	mm	$x$ dernière diffusion Compton
13	double	compton_y_mm	mm	$y$ dernière diffusion Compton
14	double	compton_z_mm	mm	$z$ dernière diffusion Compton

### 13.6 Inventaire complet des ntuples dans le fichier ROOT

Liste complète des ntuples dans le fichier de sortie ROOT. Les deux derniers (fond coloré) sont ajoutés par cette modification.

#	Nom ntuple	Nb col.	Source	Contenu
1	plan e_passages	15	SurfaceSpectrumSD	Traversées ScorePlane ( $z = 18$ mm)
2	ScorePlane2_passages	9	ScorePlane2SD	Traversées ScorePlane2 ( $z = 28$ mm)
3	ScorePlane3_passages	9	ScorePlane3SD	Traversées ScorePlane3 ( $z = 38$ mm)
4	WaterRings_passages	9	ScorePlane4SD	Traversées plan anneaux d'eau
5	ScorePlane5_passages	9	ScorePlane5SD	Traversées ScorePlane5 ( $z = 70$ mm)
6	abs_graphite	8	SteppingAction	Photoabs. dans graphite
7	abs_inox	9	SteppingAction	Photoabs. dans inox SS304

## 13.7 Schéma synoptique du flux de données



Déclenchement : parentID==0  
process=="phot"  
trackStatus==fStopAndKill

## 13.8 Nouveaux tags dans le fichier .log

Tags de log ajoutés pour le suivi des photoabsorptions.

Tag	Source	Fréquence	Contenu
[STEP][ABS_GRAPHITE]	SteppingAction	50 premiers, puis 1/10 000	Événement, $E$ , position, flag Compton
[STEP][ABS_INOX]	SteppingAction	50 premiers, puis 1/10 000	Événement, $E$ , volume, position, flag Compton

## 13.9 Exemples d'analyse ROOT

### Ntuple **abs\_graphite**

```

// Spectre en energie des gamma absorbes dans le graphite
abs_graphite->Draw("ekin_keV")

// Carte (r, z) des absorptions dans le cone
abs_graphite->Draw("z_mm:sqrt(x_mm^2+y_mm^2)",
    "", "COLZ")

// Gamma ayant fait un Compton avant d'etre absorbes
abs_graphite->Draw("ekin_keV",
    "had_compton_in_cone==1")

// Profil z des absorptions directes vs post-Compton
abs_graphite->Draw("z_mm",
    "had_compton_in_cone==0", "", "SAME")
abs_graphite->Draw("z_mm",
    "had_compton_in_cone==1", "", "SAME")
  
```

## Ntuple abs\_inox

```
// Spectre dans le porte-collimateur uniquement
abs_inox->Draw("ekin_keV",
    "volume=="logicPorteCollimateur"")

// Spectre dans l'enveloppe uniquement
abs_inox->Draw("ekin_keV",
    "volume=="logicEnveloppeGDML"")

// Carte (x, z) de toutes les absorptions inox
abs_inox->Draw("z_mm:x_mm", "", "COLZ")

// Comparaison porte-collimateur vs enveloppe
abs_inox->Draw("ekin_keV",
    "volume=="logicPorteCollimateur"")
abs_inox->Draw("ekin_keV",
    "volume=="logicEnveloppeGDML"", "", "SAME")

// Gamma ayant suivi un Compton avant absorption inox
abs_inox->Draw("z_mm",
    "had_compton_in_cone==1")
```

## Analyses croisées

```
// Comptages totaux
cout << "Abs graphite : "
    << abs_graphite->GetEntries() << endl;
cout << "Abs inox : "
    << abs_inox->GetEntries() << endl;

// Fraction des gamma ayant subi un Compton avant absorption
cout << "Graphite post-Compton : "
    << abs_graphite->GetEntries("had_compton_in_cone==1")
    << " / " << abs_graphite->GetEntries() << endl;

// Rapport avec les transmis au ScorePlane
cout << "Transmis directs : "
    << plane_passages->GetEntries(
        "pdg==22 && is_secondary==0 && compton_in_cone==0")
    << endl;
cout << "Transmis Compton : "
    << plane_passages->GetEntries(
        "pdg==22 && is_secondary==0 && compton_in_cone==1")
    << endl;
```