

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**.

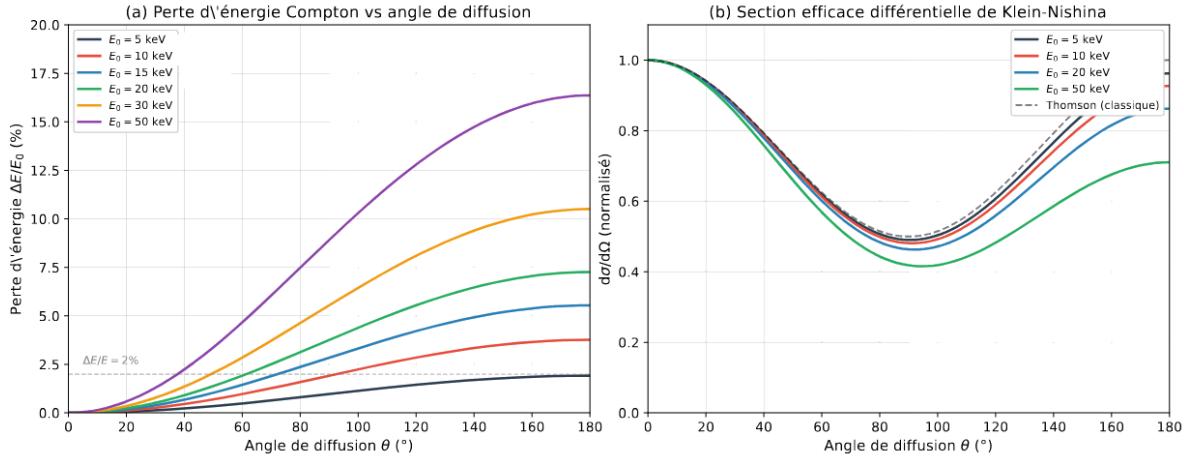
Le tableau suivant quantifie la perte d'énergie pour le spectre du MiniX :

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

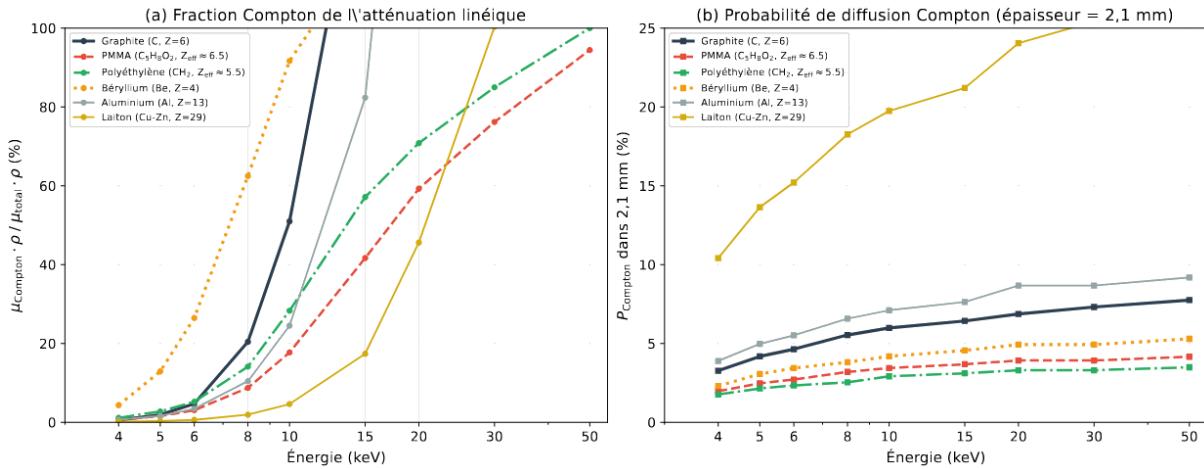
## 3 Choix du matériau

### 3.1 Critères de sélection

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

- 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  $\sim (29/6)^4 \approx 550$ .
- Densité suffisante** — pour obtenir une probabilité d'interaction significative dans ~2 mm de paroi.

### 3.2 Comparaison des matériaux candidats



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

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

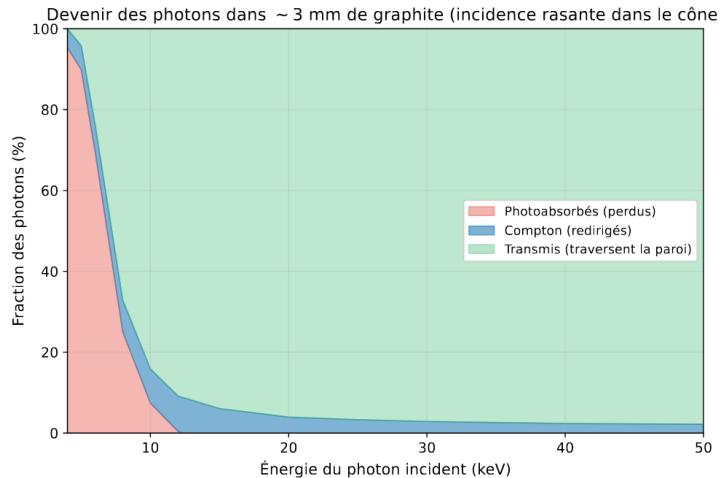
Matériau	$Z_{eff}$	$\rho (\text{g/cm}^3)$	$P_{Compt}$	$P_{photo}$	Remarques
Graphite (C)	<b>6</b>	<b>2,26</b>	<b>6,0%</b>	32%	Meilleur compromis
Béryllium (Be)	4	1,85	4,2%	0,4%	Toxique, coûteux
PMMA	6,5	1,19	3,4%	14%	Fond à 160 °C
Polyéthylène	5,5	0,94	2,9%	7%	Trop léger, mou
B <sub>4</sub> C	5,2	2,52	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 °C sous atmosphère inerte),
- une bonne usinabilité.

### 3.3 Devenir d'un photon dans le graphite



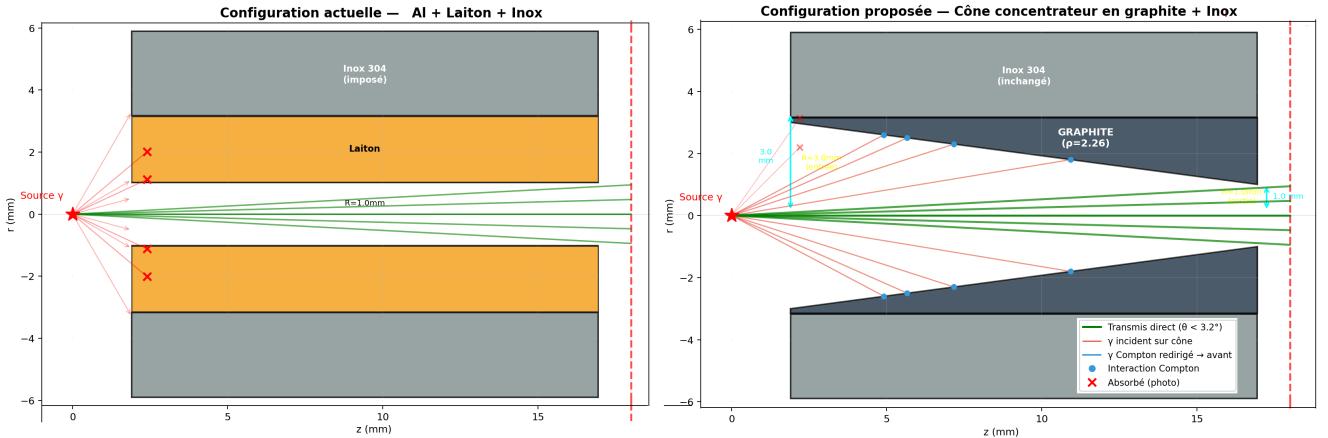
Répartition du devenir d'un photon traversant environ 3 mm de graphite (chemin effectif pour incidence rasante dans le cône). À 10 keV, environ 8% subissent un Compton, 60% sont photo-absorbés et 32% traversent sans interaction. Au-delà de 20 keV, le Compton devient le processus d'interaction dominant.

## 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 :

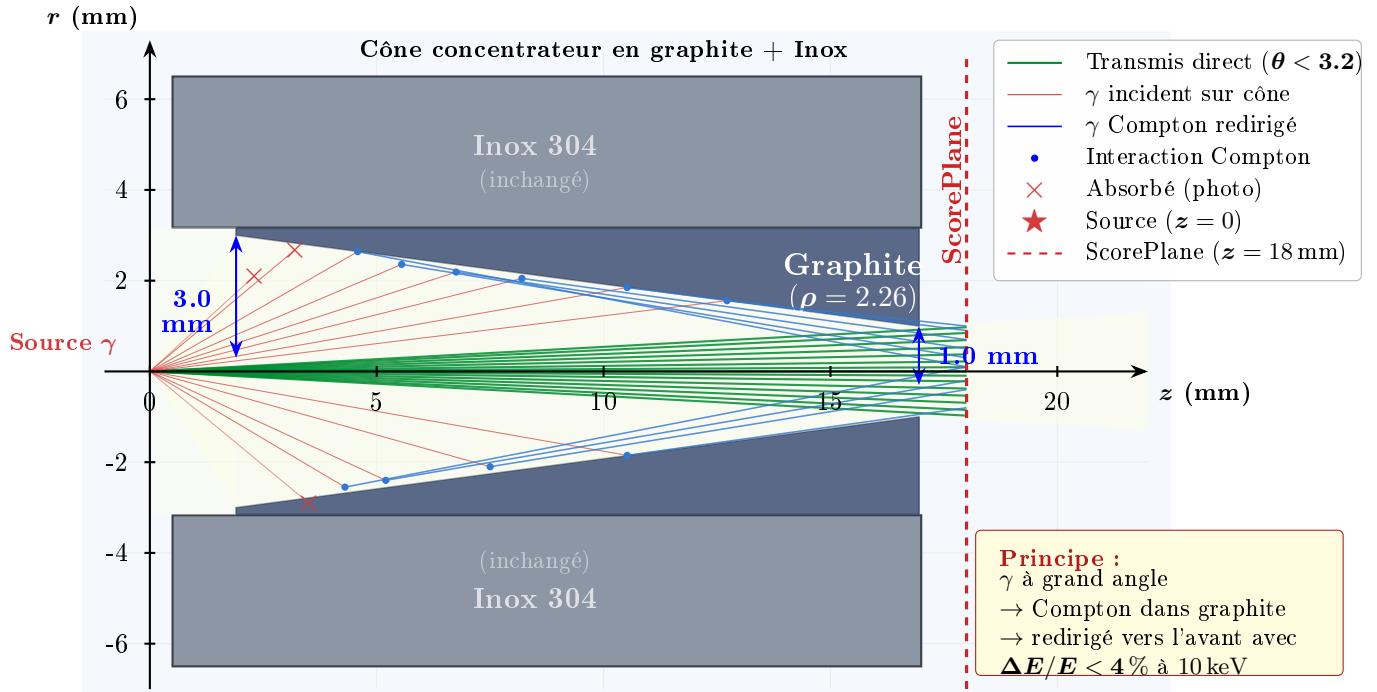
1. **Zone de transmission directe** ( $\theta < 3,2^\circ$ ) : les photons traversent le bore sans interaction → faisceau primaire inchangé.
2. **Zone de capture Compton** ( $3,2^\circ < \theta < 30^\circ$ ) : les photons frappent la paroi interne du cône en graphite sous **incidence rasante**, traversant 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 + Inox 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>		
$R_{in,entree}$	3,0 mm	Rayon côté source (large)
$R_{in,sortie}$	1,0 mm	Rayon côté détecteur (étroit)
Demi-angle du cône	7,6°	$\alpha = \arctan \frac{R_{in,e} - R_{in,s}}{L}$
<i>Enveloppe extérieure</i>		
$R_{ext}$	3,15 mm	$= R_{int,inox} - 0,02 \text{ mm}$ (jeu)
<i>Dimensions axiales</i>		
$z_{debut}$	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, $\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$

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

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

*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)
<b>— Enveloppe et monde —</b>					
Monde (G4Box)	Air	-300	+300	$300 \times 300$ mm <sup>2</sup>	
Enveloppe GDML (G4Box)	Air	-60	+60	$50 \times 50$ mm <sup>2</sup>	
<b>— Tube X MiniX (composants GDML, pos. (0,0,0)) —</b>					
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 beryllium	Be (1.848)		(tessellé, $z \gtrsim 0$ )	0	$\sim 3.5$
Porte-collimateur	304 (8.00)		(tessellé)	3.17	$\sim 5.5$
<b>— Cône Compton (G4Cons) —</b>					
Cône graphite	Graphite (2.21)	<b>1.90</b>	<b>16.95</b>		
<b>— Plans de scoring —</b>					
ScorePlane (G4Box, 1 $\mu$ m)	Air		$z_c = 18.00$	$50 \times 50$ mm <sup>2</sup>	
ScorePlane2 (G4Box, 1 mm)	Air	27.50	28.50	$50 \times 50$ mm <sup>2</sup>	
ScorePlane3 (G4Box, 1 mm)	Air	37.50	38.50	$50 \times 50$ mm <sup>2</sup>	
ScorePlane5 (G4Box, 1 mm)	Air	69.50	70.50	$50 \times 50$ mm <sup>2</sup>	
<b>— Système de détection (couronnes d'eau + PVC) —</b>					
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

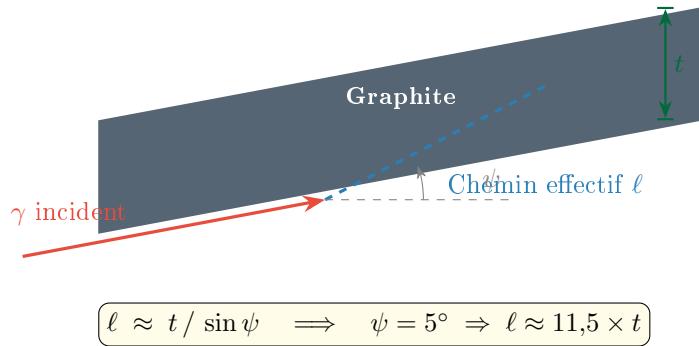
*Repères principaux le long de l'axe z, de la source au dernier plan de scoring.*

$z$ (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	$R_{\text{in}} = 3.00$ mm
9.43	Centre du cône	Placement G4Cons
16.95	Face sortie du cône	$R_{\text{in}} = 1.00$ mm
18.00	<b>ScorePlane</b>	Épaisseur 1 $\mu$ m (scoring principal)
28.00	ScorePlane2	Épaisseur 1 mm
38.00	ScorePlane3	Épaisseur 1 mm
65.00	Face avant eau	Couronnes $r \in [0, 10]$ mm
66.50	Centre couronnes	Placement G4Tubs
68.00	Face arrière eau	Contact PVC fond
68.50	Centre PVC fond	$R = [0, 11]$ 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

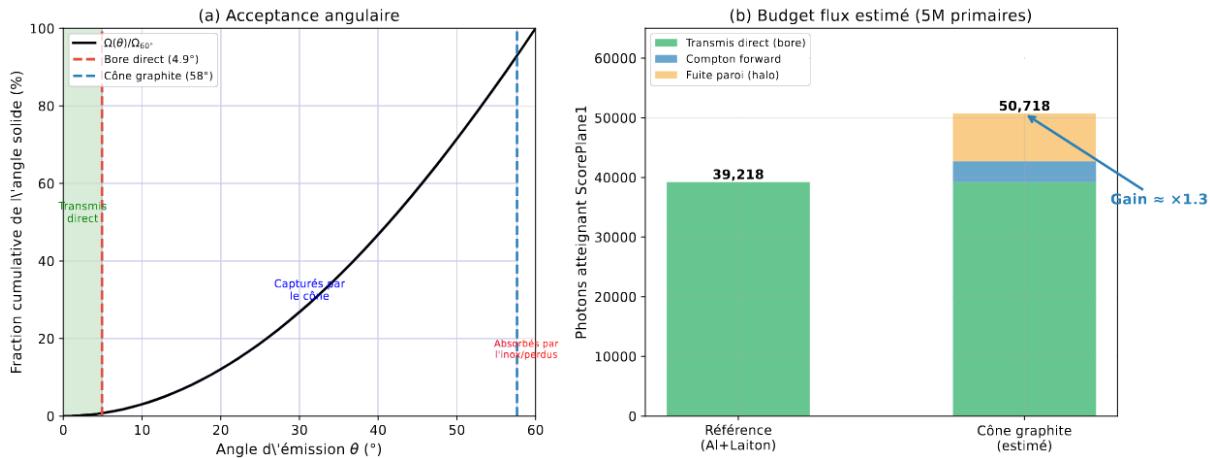
### 5.1 Bilan des photons

Pour 5 000 000 photons primaires :

*Budget de photons estimé pour le cône graphite*

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

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



## 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	~42 000 to 54 000
<b>Taux transm</b>	0,78%	~0,8–1,1%
<b>Compton</b>	0	$\gg 0$
$\Delta E$ Compton	—	< 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 G4Material* MyGraphite
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 ntuple 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, $n_{compt}$ , $E_{avant}$ , $E_{après}$ , position
[ScorePlane1][COMPTON_REDIRECTED]	SurfaceSpectrumSD	200 premiers, puis 1/5 000	Particule, trackID, $E$ au plan, $n_{compt}$ , position Compton, position au plan

## 11 Exemples d'analyse ROOT

*Exemples de commandes ROOT/TTree::Draw*

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

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

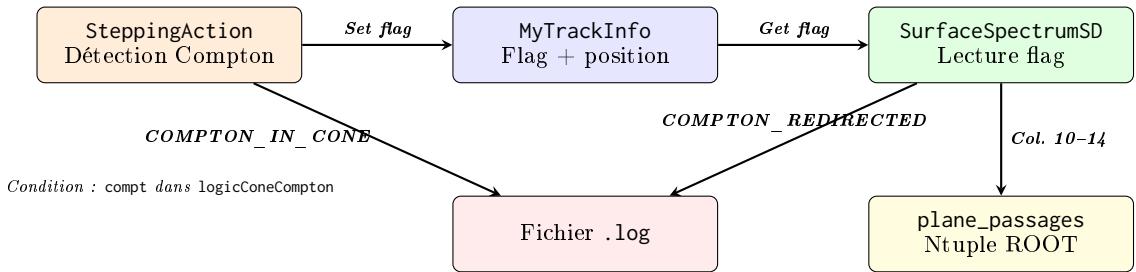
// Distribution en z des lieux de diffusion Compton
plane_passages->Draw("compton_z_mm",
    "compton_in_cone==1")

// 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'énergie 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 redirigés
```

## 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 ntuple** 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 corrélérer 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 ntuple
AnalysisManagerSetup.cc	src/	Création des 2 ntuple + getters
SteppingAction.cc	src/	Remplissage des ntuple 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 <i>x</i> de l'absorption
4	double	y_mm	mm	Position <i>y</i> de l'absorption
5	double	z_mm	mm	Position <i>z</i> 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  $\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$ ,  $z \in [1.90; 16.95] \text{ mm}$ ).

### 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 <i>x</i> de l'absorption
4	double	y_mm	mm	Position <i>y</i> de l'absorption
5	double	z_mm	mm	Position <i>z</i> 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 $R_{\text{int}} = 3.17 \text{ mm}$
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)*

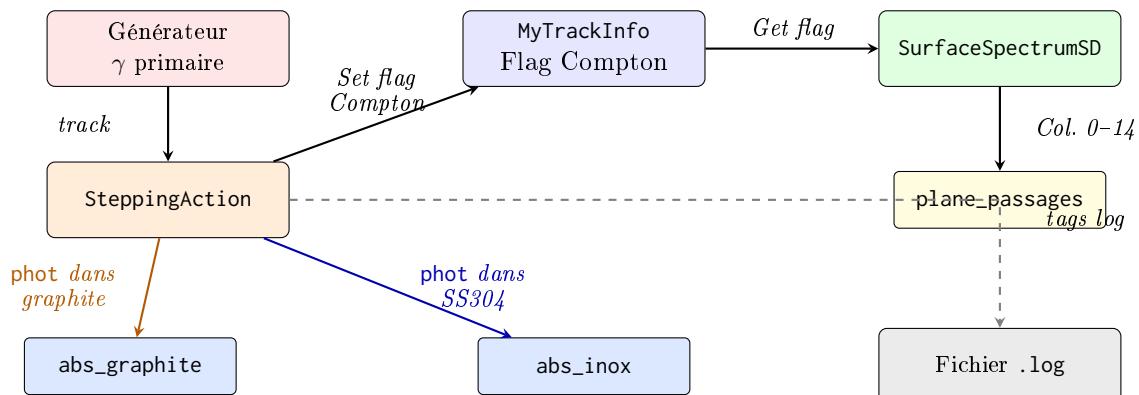
Col.	Type	Nom	Unité	Description
0	int	pdg	—	Code PDG
1	string	name	—	Nom particule
2	int	is_secondary	—	0 = primaire, 1 = secondaire
3	double	x_mm	mm	Position <i>x</i> au plan
4	double	y_mm	mm	Position <i>y</i> au plan
5	double	z_mm	mm	Position <i>z</i> au plan
6	double	ekin_keV	keV	Énergie cinétique
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	<i>x</i> dernière diffusion Compton
13	double	compton_y_mm	mm	<i>y</i> dernière diffusion Compton
14	double	compton_z_mm	mm	<i>z</i> 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 ( <i>z</i> = 18 mm)
2	ScorePlane2_passages	9	ScorePlane2SD	Traversées ScorePlane2 ( <i>z</i> = 28 mm)
3	ScorePlane3_passages	9	ScorePlane3SD	Traversées ScorePlane3 ( <i>z</i> = 38 mm)
4	WaterRings_passages	9	ScorePlane4SD	Traversées plan anneaux d'eau
5	ScorePlane5_passages	9	ScorePlane5SD	Traversées ScorePlane5 ( <i>z</i> = 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



### 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 absorbés 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'être absorbé
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;
```