

Analyse des distributions spatiales dans container d'eau
Mini X - Collimateur 4 mm

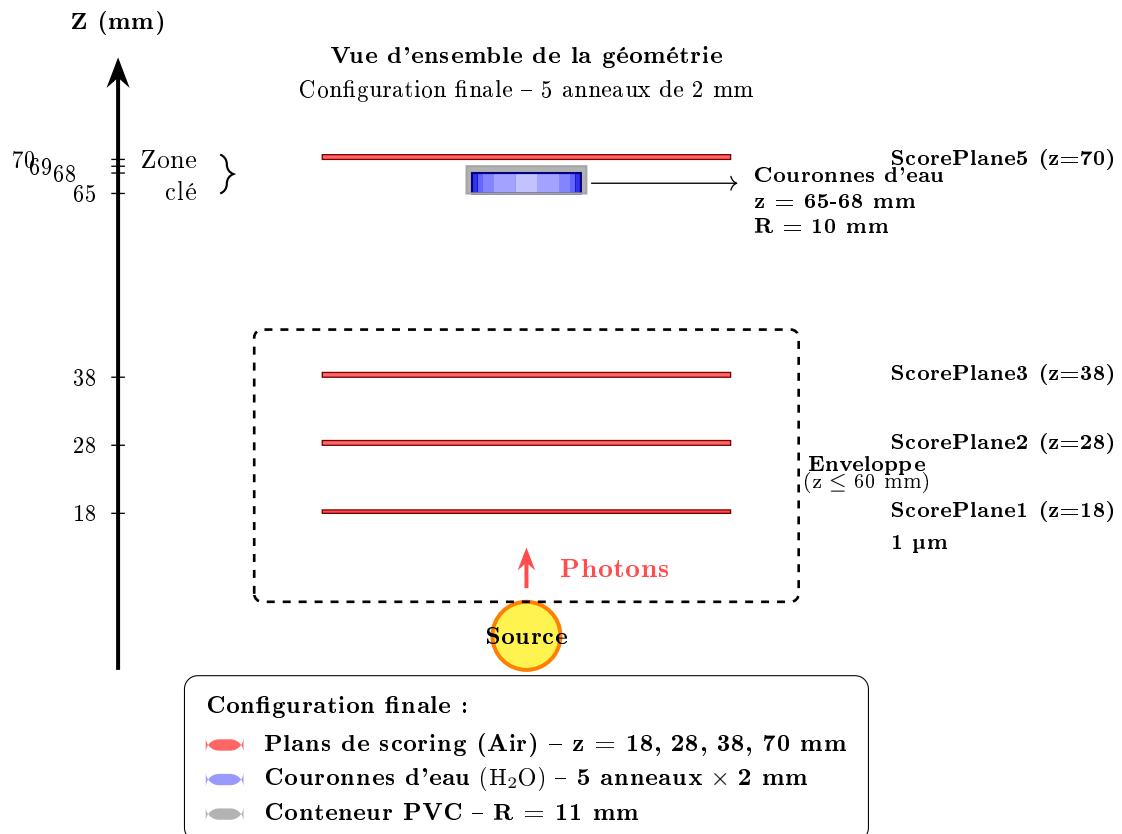
GM

February 3, 2026

1 Géométrie

Configuration

- Analyse des **doses déposées** dans un container d'eau à 68 mm après la sortie du collimateur de 4mm le long de l'axe z .
 - le **diamètre de l'eau est de 20 mm**
 - l'**épaisseur de l'eau est de 3 mm**
 - Le spectre d'émission est celui du MiniX avec un **collimateur de 4 mm**



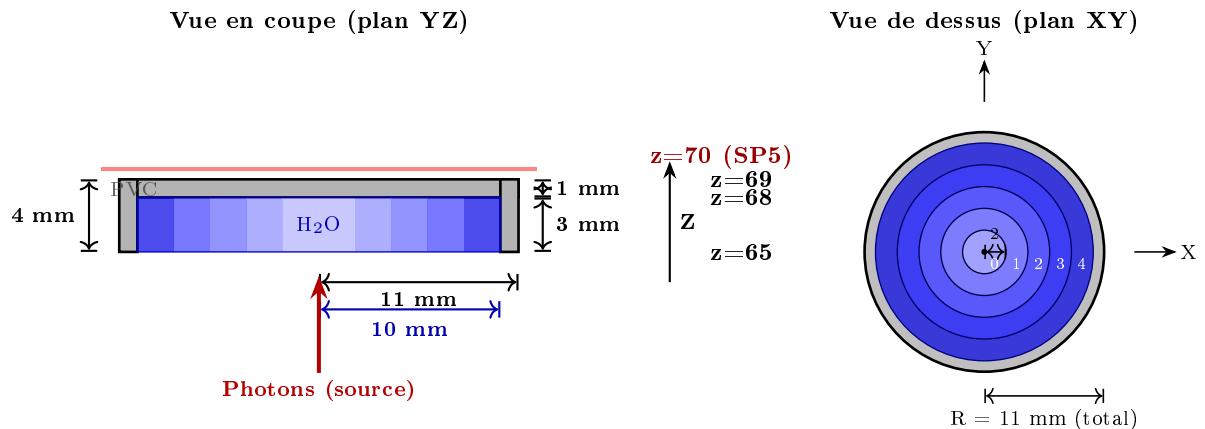
Coupe longitudinale (plan xz) de la géométrie Geant4. Le faisceau de rayons X est généré dans le tube X (gauche), traverse le collimateur en laiton, puis les six plans de scoring (P1-P6) avant d'atteindre la sphère d'eau cible.

Six plans de scoring ont été positionnés perpendiculairement à l'axe de propagation du faisceau (z) aux positions suivantes :

$$z_i \in \{18, 28, 38, 118, 168\} \text{ mm}$$

Les plans de scoring enregistrent les coordonnées d'impact (x, y) de chaque particule traversant le plan, ainsi que l'identifiant du parent (parentID) permettant de distinguer les particules primaires (parentID = 0) des particules secondaires (parentID $\neq 0$).

Détail du système de couronnes d'eau
5 anneaux de 2 mm - Fond à $z = 68$ mm



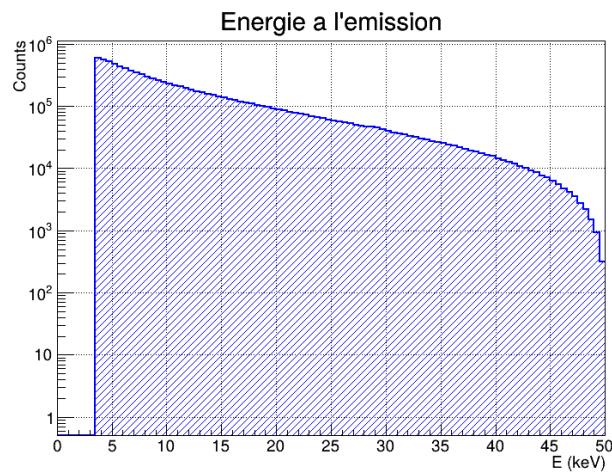
Le container est à la position $z = 68$ mm

2 Source

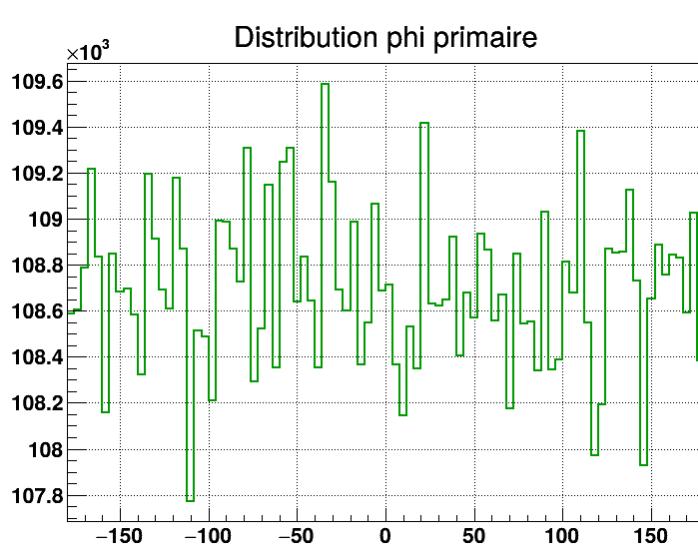
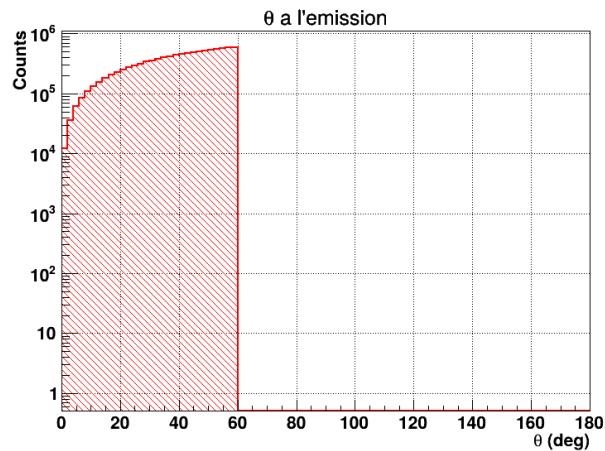
Configuration

Les figures suivantes montrent les caractéristiques du spectre d'émission de la source utilisée:

- La distribution de l'**énergie** sous la forme du fond continu entre 3.5 keV et 50 keV
- La distribution de l'**angle θ** entre $\theta = 0$ et $\theta = 60$ degrés
- La distribution de $\cos \theta$ uniforme entre $\cos 0$ et $\cos \pi/3$
- La distribution de l'**angle ϕ** entre $\theta = 0$ et $\theta = 180$ degrés

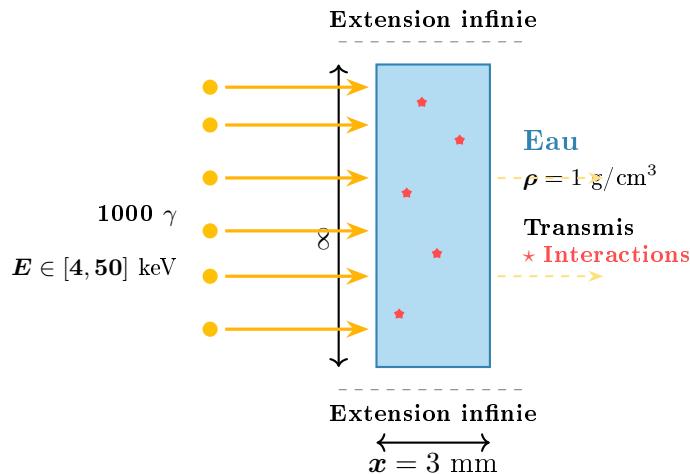


Distribution énergie primaires



3 Evaluation analytique du dépôt de dose pour 1000 photons γ (4–50 keV) dans 3 mm d'eau

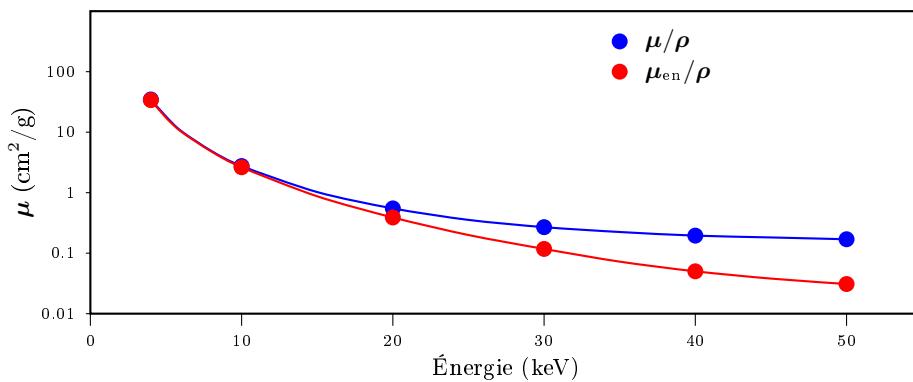
3.1 Sans collimation



Géométrie du problème : faisceau de photons γ incident sur une lame d'eau de 3 mm d'épaisseur et d'extension latérale infinie.

L'interaction des photons avec la matière est caractérisée par deux coefficients :

- μ/ρ : coefficient d'atténuation massique total (cm^2/g)
- μ_{en}/ρ : coefficient d'absorption d'énergie massique (cm^2/g)



Coefficients d'atténuation massique de l'eau (échelle log, données NIST).

Pour un photon d'énergie E , l'énergie moyenne déposée dans une épaisseur x de matériau est :

$$E_{\text{dep}}(E) = E \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{en}}(E) \cdot \rho \cdot x})$$

où :

- $\mu_{\text{en}}(E)$ est le coefficient d'absorption d'énergie linéique (cm^{-1})
- ρ est la densité du matériau (g/cm^3)

- x est l'épaisseur traversée (cm)

Pour un spectre de N photons avec une distribution en énergie $f(E)$:

$$E_{\text{total}} = N \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} E \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{en}}(E) \cdot \rho \cdot x}) \cdot f(E) dE$$

Pour une distribution uniforme : $f(E) = \frac{1}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}$

$$E_{\text{total}} = \frac{N}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \int_4^{50} E \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{en}}(E) \cdot \rho \cdot x}) dE$$

La dose absorbée est définie comme l'énergie déposée par unité de masse :

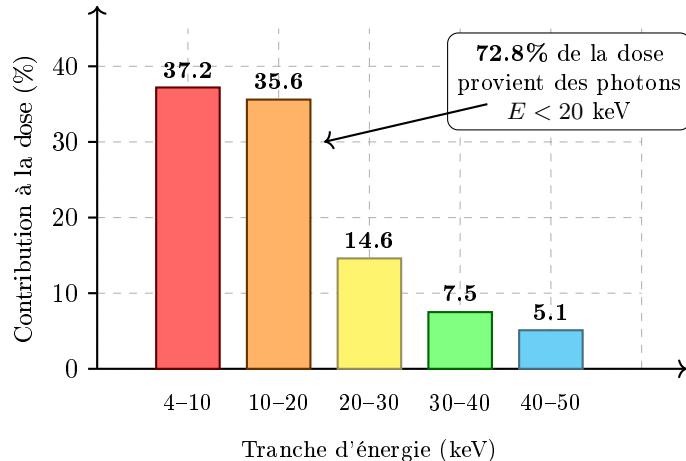
$$D = \frac{E_{\text{total}}}{m} = \frac{E_{\text{total}}}{\rho \cdot x \cdot S}$$

Pour une surface $S = 1 \text{ cm}^2$ et nos paramètres :

$$D = \frac{2200 \text{ keV} \times 1.602 \times 10^{-16} \text{ J/keV}}{0.3 \text{ g} \times 10^{-3} \text{ kg/g}}$$

$$= \frac{3.52 \times 10^{-13} \text{ J}}{3 \times 10^{-4} \text{ kg}}$$

$$= 1.17 \times 10^{-9} \text{ Gy} = 1.17 \text{ nGy}$$



Contribution de chaque tranche d'énergie à la dose totale déposée. Les photons de basse énergie dominent malgré leur proportion uniforme dans le spectre incident.

3.2 Avec collimation

Efficacité du collimateur

Efficacité géométrique du collimateur

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{transmis}}}{N_{\text{générés}}} = \frac{13\,695}{1\,000\,000} = 1.37\% \quad (1)$$

Soit environ 1 gamma sur 73 passe à travers le collimateur.

Bilan des particules

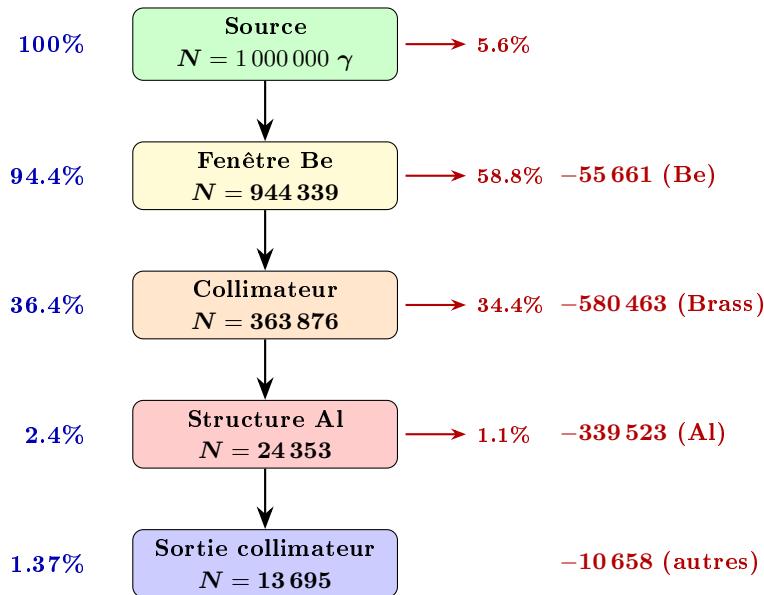


Diagramme de flux des photons à travers le système de collimation. Les pertes par absorption photoélectrique sont indiquées en rouge.

Répartition des absorptions par matériau

Matériau	Photons absorbés	Pourcentage	Rôle
Laiton (Brass)	580 463	58.8%	Collimateur
Aluminium	339 523	34.4%	Structure/support
Béryllium	55 661	5.6%	Fenêtre de sortie
Air	7475	0.8%	Milieu ambiant
Tungstene	1538	0.2%	Anode
Al ₂ O ₃	1363	0.1%	Isolant
Acier Inox 304	1249	0.1%	Enveloppe
Total absorbés	987 272	98.7%	
Transmis	13 695	1.37%	Faisceau utile

Répartition des photons absorbés par matériau. Le processus dominant est l'effet photoélectrique.

Analyse de la transmission

L'efficacité du collimateur peut être définie de plusieurs façons :

1. Efficacité globale (par rapport aux photons générés) :

$$\varepsilon_{\text{global}} = \frac{N_{\text{transmis}}}{N_{\text{générés}}} = \frac{13 695}{1 000 000} = 1.37\%$$

2. Efficacité géométrique (par rapport aux photons sortis du Be) :

$$\varepsilon_{\text{géom}} = \frac{N_{\text{transmis}}}{N_{\text{sortis Be}}} = \frac{13 695}{944 339} = 1.45\%$$

3. Rapport de collimation :

$$R = \frac{1}{\varepsilon_{\text{global}}} \approx 73$$

Efficacité géométrique du collimateur

- Le collimateur en **laiton** joue son rôle principal d'absorbeur : il arrête **59%** des photons émis par la source.
- La **structure en aluminium** contribue également de manière significative à l'atténuation (34%).
- La **fenêtre en beryllium** est relativement transparente aux rayons X (seulement 5.6% d'absorption), ce qui est attendu pour ce matériau à faible Z .
- L'ouverture effective du collimateur ne laisse passer que **1.37%** du flux initial.

Dosimétrie dans l'eau

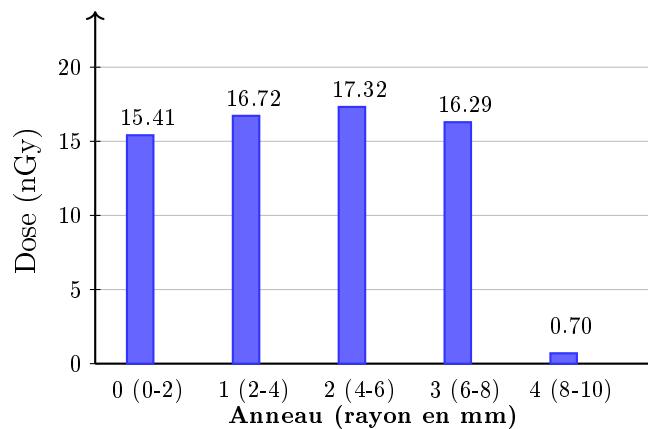
Pour 1 000 000 photons émis par la source, la dose totale déposée est :

Grandeur	Valeur
Énergie totale déposée	64 130,3 keV
Dose totale dans l'eau	10,90 nGy
Photons atteignant l'eau	~ 13 500
Dose par photon transmis	~ 0,8 pGy/ γ

Bilan dosimétrique pour 1 000 000 photons primaires.

Anneau	Rayon (mm)	Énergie (keV)	Dose (nGy)	Fraction
0	0–2	3626,8	15.41	23.3%
1	2–4	11 801,8	16.72	25.3%
2	4–6	20 382,0	17.32	26.2%
3	6–8	26 841,7	16.29	24.6%
4	8–10	1478,0	0.70	1.1%
Total	0–10	64 130,3	10.90*	100%

Distribution de la dose par anneau concentrique dans l'eau. *La dose totale est la moyenne pondérée par les masses.



Distribution radiale de la dose dans les anneaux d'eau (r en mm).

Conclusion

Efficacité géométrique du collimateur

- Avec le calcul analytique, pour 1 000 000 photons émis par la source, la dose totale déposée est :

$$D = 1000 \times 1.17 \text{ nGy} = 1170 \text{ nGy}$$

- Si on applique le facteur d'efficacité de **1.34%**, la dose totale déposée est :

$$D = 1170 \times 0.0134 = 15.67 \text{ nGy}$$

- à comparer avec la valeur simulée de **15.67** nGy

4 Ntuples (TTrees) et Histogrammes

Le fichier `output.root` contient :

- **15 histogrammes 1D**(H0–H14) pour les distributions d'énergie et de dose
- **5 ntuples**pour les données particule par particule aux différents plans de mesure

Liste des histogrammes 1D

ID	Nom	Description	Unité	Bins
H0	E_emission	Énergie des gammas à l'émission	keV	150
H1	theta_emission	Angle θ à l'émission	degrés	180
H2	phi_emission	Angle ϕ à l'émission	degrés	90
H3	Dose_total_run	Dose totale (run complet)	pGy	1000
H4	Dose_total_10000evt	Dose totale (par 10000 evt)	pGy	200
H5–H9	Dose_ring*_run	Dose par anneau (run)	pGy	1000
H10–H14	Dose_ring*_10000evt	Dose par anneau (10000 evt)	pGy	200

Liste des ntuples

ID	Nom	Position z	Détecteur
0	plane_passages	18 mm	SurfaceSpectrumSD (SpecSD)
1	ScorePlane2_passages	28 mm	ScorePlane2SD
2	ScorePlane3_passages	38 mm	ScorePlane3SD
3	WaterRings_passages	65–68 mm	ScorePlane4SD
4	ScorePlane5_passages	70 mm	ScorePlane5SD

Tous les ntuples partagent la même structure de colonnes :

Colonnes des ntuples

Col.	Nom	Type	Description
0	pdg	int	Code PDG de la particule
1	name	string	Nom de la particule
2	is_secondary	int	0 = primaire, 1 = secondaire
3	x_mm	double	Position x (mm)
4	y_mm	double	Position y (mm)
5	ekin_keV	double	Énergie cinétique (keV)
6	trackID	int	Identifiant du track
7	parentID	int	ID du parent (0 si primaire)
8	creator_process	string	Processus créateur

Note : Le ntuple `plane_passages` (ID 0) possède une colonne supplémentaire :

- Colonne 5 : `z_mm` (position z en mm)
- Les colonnes suivantes sont décalées d'un index

4.1 Histogrammes d'émission (H0–H2)

Ces histogrammes caractérisent les particules primaires au moment de leur génération.

H0 : Énergie à l'émission

Paramètre	Valeur
Nom ROOT	E_emission
Plage	[0, 50] keV
Nombre de bins	150
Fichier source	PrimaryGeneratorAction2.cc
Ligne de code	man->FillH1(0, energy);

- Appelé dans `GeneratePrimaries()` après tirage de l'énergie
- Uniquement si $E > 3.5$ keV (coupure basse énergie)
- Distribution tabulée du spectre de rayons X (tungstène, 50 kVp)

H1 : Angle polaire θ

Paramètre	Valeur
Nom ROOT	theta_emission
Plage	[0, 180] degrés
Nombre de bins	180
Fichier source	PrimaryGeneratorAction2.cc
Ligne de code	man->FillH1(1, alphaDeg);

- Angle θ tiré uniformément dans un cône de demi-angle 60°
- $\cos \theta \in [\cos(60), \cos(0)] = [0.5, 1.0]$

H2 : Angle azimutal ϕ

Paramètre	Valeur
Nom ROOT	phi_emission
Plage	[-180, 180] degrés
Nombre de bins	90
Fichier source	PrimaryGeneratorAction2.cc
Ligne de code	man->FillH1(2, psiDeg);

- Angle ϕ tiré uniformément dans [0, 360]

4.2 Histogrammes de dose (H3–H14)

La dose est calculée selon :

$$D \text{ [pGy]} = E_{\text{dep}} \text{ [keV]} \times \frac{0.1602}{m \text{ [g]}}$$

où le facteur de conversion vient de :

$$1 \text{ keV} = 1.602 \times 10^{-16} \text{ J}$$

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 10^{12} \text{ pGy}$$

Géométrie et masses des anneaux d'eau (épaisseur 3 mm, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$)

Anneau	Rayon (mm)	Volume (mm ³)	Masse (g)	Constante
0	0–2	$\pi \times 4 \times 3$	0.0377	kMassRing[0]
1	2–4	$\pi \times 12 \times 3$	0.1131	kMassRing[1]
2	4–6	$\pi \times 20 \times 3$	0.1885	kMassRing[2]
3	6–8	$\pi \times 28 \times 3$	0.2639	kMassRing[3]
4	8–10	$\pi \times 36 \times 3$	0.3393	kMassRing[4]
Total	0–10	$\pi \times 100 \times 3$	0.9425	kMassTotalWater

H3 : Dose totale du run

Paramètre	Valeur
Nom ROOT	Dose_total_run
Plage	[0, 5 000 000] pGy
Fichier source	RunAction.cc (EndOfRunAction)
Ligne de code	am->FillH1(3, dose_total_run_pGy);

- Rempli une seule fois à la fin du run
- Valeur = dose cumulée sur tous les événements
- Plage étendue pour supporter jusqu'à 500M événements

H4 : Dose totale par 10000 événements

Paramètre	Valeur
Nom ROOT	Dose_total_10000evt
Plage	[0, 300] pGy
Nombre de bins	200
Fichier source	RunAction.cc (CheckAndFillDoseHistograms)
Ligne de code	analysisManager->FillH1(4, dose_total);

- Rempli tous les 10000 événements : `if (eventID % 10000 == 0)`
- Accumulateurs réinitialisés après chaque remplissage
- Permet de suivre l'évolution de la dose au cours du run

H5–H9 : Dose par anneau (run complet)

ID	Nom ROOT	Plage (pGy)	Bins
H5	Dose_ring0_run	[0, 5 000 000]	1000
H6	Dose_ring1_run	[0, 5 000 000]	1000
H7	Dose_ring2_run	[0, 5 000 000]	1000
H8	Dose_ring3_run	[0, 5 000 000]	1000
H9	Dose_ring4_run	[0, 1 000 000]	1000

- Remplis à la fin du run dans `EndOfRunAction()`
- Code : `am->FillH1(5 + i, dose_ring_run_pGy);`

H10–H14 : Dose par anneau (par 10000 événements)

ID	Nom ROOT	Plage (pGy)	Bins
H10	Dose_ring0_10000evt	[0, 500]	200
H11	Dose_ring1_10000evt	[0, 500]	200
H12	Dose_ring2_10000evt	[0, 500]	200
H13	Dose_ring3_10000evt	[0, 500]	200
H14	Dose_ring4_10000evt	[0, 100]	200

- Remplis tous les 10000 événements
- Code : `analysisManager->FillH1(10 + i, dose_ring[i]);`

4.3 Ntuple 0 : plane_passages

Paramètre	Valeur
Nom ROOT	plane_passages
Position du plan	$z = 18 \text{ mm}$
Détecteur sensible	SurfaceSpectrumSD ("SpecSD")
Volume physique	physScorePlane
Fichier source	SurfaceSpectrumSD.cc

1. La particule doit **sortir** du volume **physScorePlane**:

```
prePV->GetName() == "physScorePlane" &&
(!postPV || postPV->GetName() != "physScorePlane")
```

2. Si **fOutwardOnly = true**, seules les particules avec $\vec{p}_z > 0$ sont enregistrées
3. Position et énergie prises au **post-step point**

4.4 Ntuple 1 : ScorePlane2_passages

Paramètre	Valeur
Nom ROOT	ScorePlane2_passages
Position du plan	$z = 28 \text{ mm}$
Détecteur sensible	ScorePlane2SD
Volume physique	physScorePlane2
Fichier source	ScorePlane2SD.cc

1. La particule doit **entrer** dans le volume **physScorePlane2**:

```
(! prePV || prePV->GetName() != targetName) &&
(postPV && postPV->GetName() == targetName)
```

2. Direction vers $+z$ requise : `dir.z() > 0`
3. Chaque **trackID** n'est compté qu'une fois par événement (via **fTracksThisEvent**)
4. Énergie prise au **pre-step point**

4.5 Ntuples 2–4 : ScorePlane3, WaterRings, ScorePlane5

Ces ntuples suivent la même logique que ScorePlane2_passages :

Ntuple	Volume	Position	Particularité
ScorePlane3	physScorePlane3	$z = 38$ mm	–
WaterRings	physWaterRing*	$z = 65\text{--}68$ mm	Volumes multiples
ScorePlane5	physScorePlane5	$z = 70$ mm	Après conteneur

Note sur WaterRings : La détection utilise une recherche de sous-chaîne :

```
volName.find("physWaterRing") != std::string::npos
```

4.6 Chaîne d'accumulation de la dose

Flux de données

```
SteppingAction::UserSteppingAction()
|
v
[Detection dans logicWaterRing*]
|
+--> EventAction::AddEdepToRing(ringIndex, edep_keV)
|
v
fEdepRing[i] += edep
fEdepTotalWater += edep
|
v
EventAction::EndOfEventAction()
|
v
RunAction::AddEdepFromEvent(fEdepRing, fEdepTotal)
|
+--> fTotalEdepRing[i] += (accumulation run)
+--> fEdepRing10000[i] += (accumulation 10k evt)
|
v
RunAction::CheckAndFillDoseHistograms()
|
+--> if (eventID % 10000 == 0):
        FillH1(4, dose_total)      [H4]
        FillH1(10+i, dose_ring)   [H10-H14]
        Reset accumulateurs 10k
|
v
RunAction::EndOfRunAction()
|
+--> FillH1(3, dose_total_run)  [H3]
+--> FillH1(5+i, dose_ring_run) [H5-H9]
```

Chaîne d'accumulation et de remplissage des histogrammes de dose

Détection des dépôts d'énergie

Dans **SteppingAction.cc**:

```
// Détection dans un anneau d'eau
if (namePre.find("logicWaterRing") != std::string::npos) {
    // Extraire le numero de l'anneau (dernier caractere)
    char lastChar = namePre[namePre.length() - 1];
    if (lastChar >= '0' && lastChar <= '4') {
        ringIndex = lastChar - '0';
    }
}

if (ringIndex >= 0) {
    G4double edepWater = step->GetTotalEnergyDeposit();
    if (edepWater > 0.0) {
        fEventAction->AddEdepToRing(ringIndex, edepWater / keV);
    }
}
```

5 Analyse des résultats

5.1 Résultats statistiques globaux

Bilan des particules

La simulation a produit les résultats suivants par

Paramètre	Valeur
Primaires générés	10 000 000
Particules entrées dans le Be	10 008 875
Interactions dans le Be	1 267 027
Particules transmises (plan $z = 18$ mm)	139 273
Taux de transmission	1.39 %

Bilan statistique des particules dans la simulation

Le faible taux de transmission (1.39 %) s'explique par la collimation du faisceau et l'atténuation dans les différents matériaux traversés (Aluminium, Laiton, Béryllium, Tungstène, etc.).

Processus d'absorption

L'analyse des processus physiques montre que l'effet photoélectrique domine très largement avec 9 870 918 interactions, ce qui est caractéristique des énergies X diagnostiques (< 50 keV).

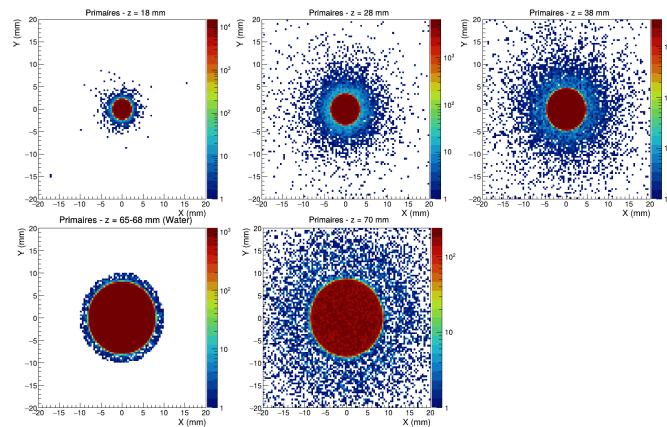
La répartition par matériau révèle que le Laiton absorbe le plus de particules (58.8 %), suivi de l'Aluminium (34.4 %) et du Béryllium (5.6 %).

5.2 Distributions spatiales

Évolution du faisceau primaire

Les distributions 2D des particules primaires montrent l'évolution du faisceau à travers le système.

On observe un **élargissement progressif du faisceau avec la distance**, passant d'un profil très concentré à $z = 18$ mm (sortie du collimateur) à un profil plus étalé dans le fantôme d'eau.

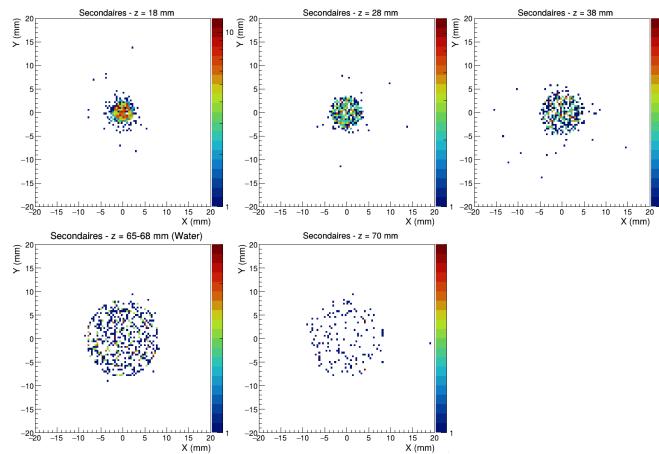


Distribution 2D (X, Y) des particules primaires aux différents plans de mesure

Particules secondaires

Les particules secondaires (électrons de photoionisation, photons diffusés, fluorescence) présentent une distribution plus diffuse que les primaires.

Leur nombre reste faible comparé aux primaires, ce qui indique que la majorité des interactions se produit par absorption photoélectrique totale.

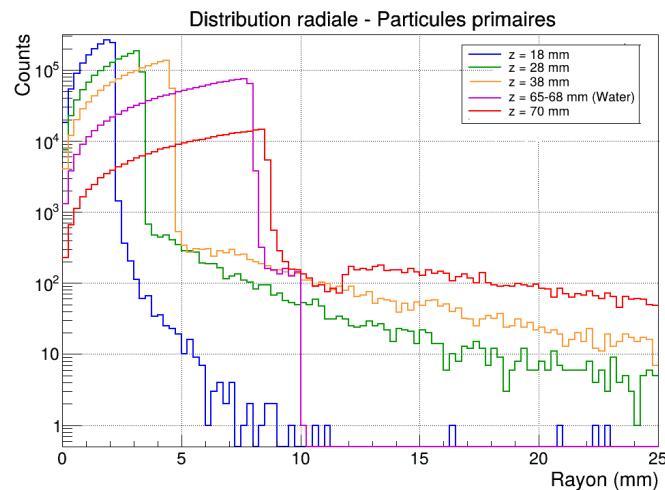


Distribution 2D (X, Y) des particules secondaires

Distribution radiale

L'analyse radiale quantifie l'élargissement du faisceau

À $z = 18$ mm (après collimateur), le faisceau est très collimaté avec un rayon effectif < 3 mm. Dans le fantôme d'eau ($z = 65-68$ mm), le faisceau s'étend jusqu'à environ 8 mm de rayon, couvrant bien les 4 premiers anneaux d'eau.



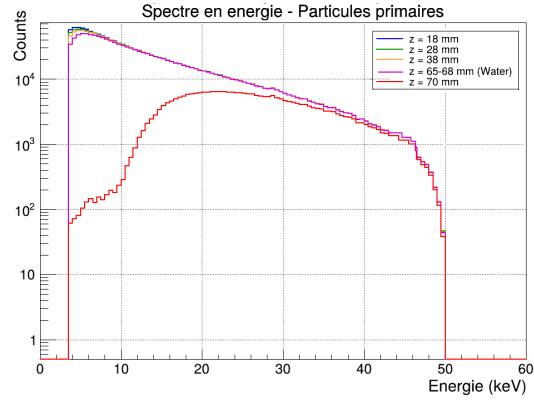
Distribution radiale des particules primaires (échelle logarithmique)

5.3 Analyse spectrale

Spectre des particules primaires

Le spectre en énergie des particules primaires présente deux caractéristiques principales : une coupure nette à 3.5 keV (seuil d'émission imposé) et un pic prononcé autour de 3–5 keV suivi d'une décroissance progressive jusqu'à 50 keV.

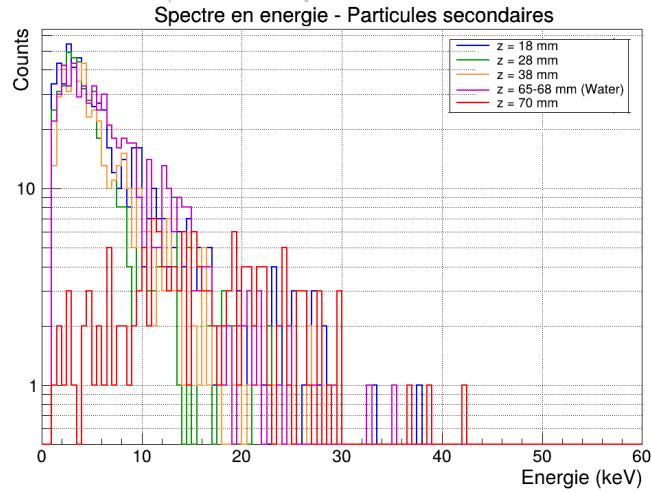
Le spectre à $z = 70$ mm (après le fantôme) montre un durcissement du faisceau dû à l'atténuation préférentielle des basses énergies dans l'eau.



Spectre en énergie des particules primaires aux différents plans

Spectre des secondaires

Les particules secondaires ont des énergies beaucoup plus faibles, concentrées en dessous de 10 keV. Ceci est cohérent avec des électrons de photoionisation et des photons de fluorescence caractéristiques.



Spectre en énergie des particules secondaires

5.4 Dosimétrie

Dose totale et distribution par anneau

La dose absorbée dans le fantôme d'eau a été calculée pour chaque anneau concentrique. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Anneau	Rayon (mm)	Énergie (keV)	Dose (nGy)
0	0 – 2	39 468	167.71
1	2 – 4	120 566	170.78
2	4 – 6	201 144	170.95
3	6 – 8	272 192	165.24
4	8 – 10	16 517	7.80
TOTAL	0 – 10	649 887	110.47

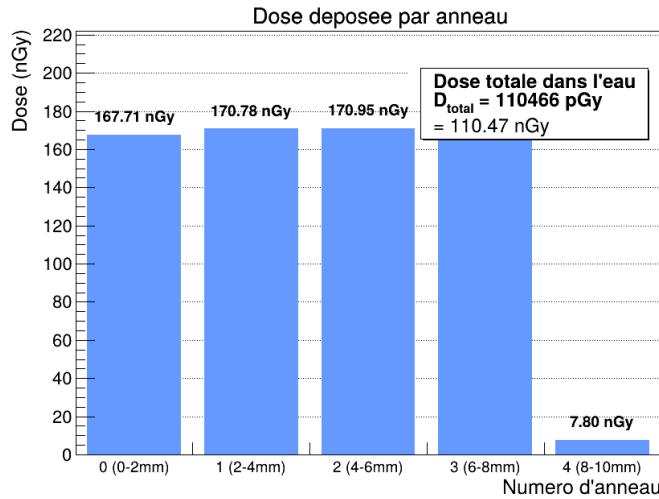
Distribution de l'énergie déposée et de la dose par anneau dans le fantôme d'eau

Analyse de l'homogénéité

L'analyse de la distribution de dose révèle un profil remarquablement plat pour les 4 premiers anneaux (0–8 mm) avec des doses comprises entre 165 et 171 nGy, soit une variation de seulement $\pm 2\%$.

Cette homogénéité suggère que le faisceau est bien collimaté et que le fantôme d'eau est correctement dimensionné. L'anneau externe (8–10 mm) présente une dose significativement plus faible (7.80 nGy), ce qui indique qu'il se situe en grande partie hors du champ d'irradiation principal.

Cet anneau capture principalement les photons diffusés.

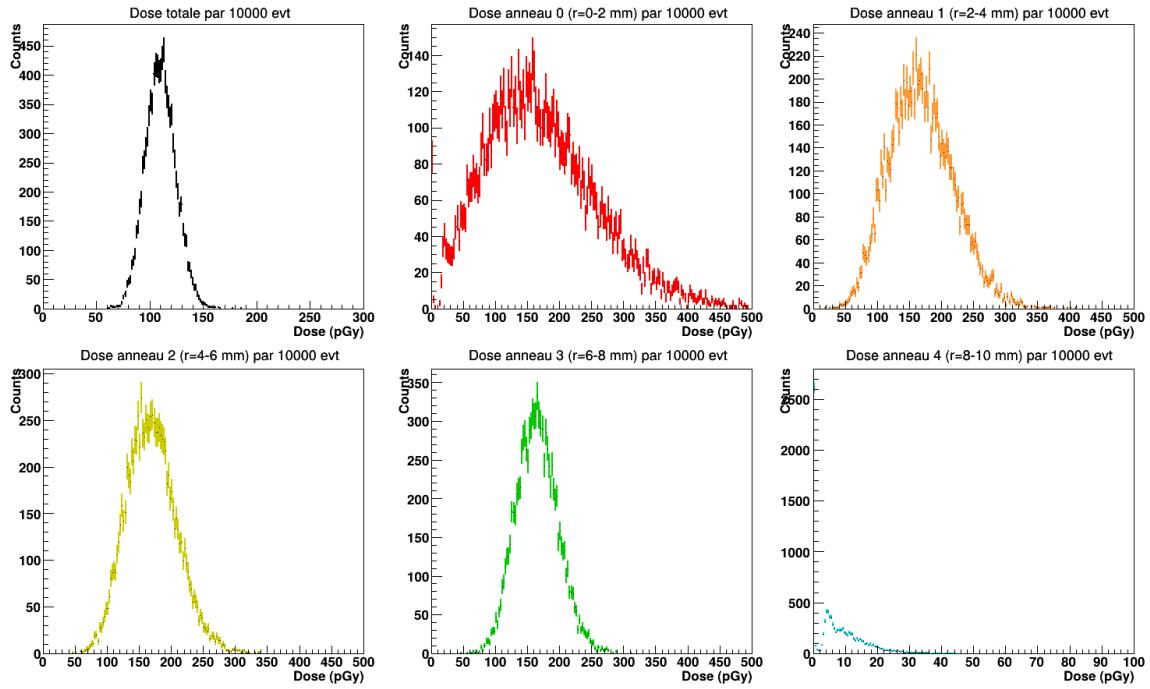


Distribution de la dose par anneau concentrique dans le fantôme d'eau

Fluctuations statistiques

L'histogramme des doses par batch de 10 000 événements montre la fluctuation statistique inhérente à la méthode Monte Carlo.

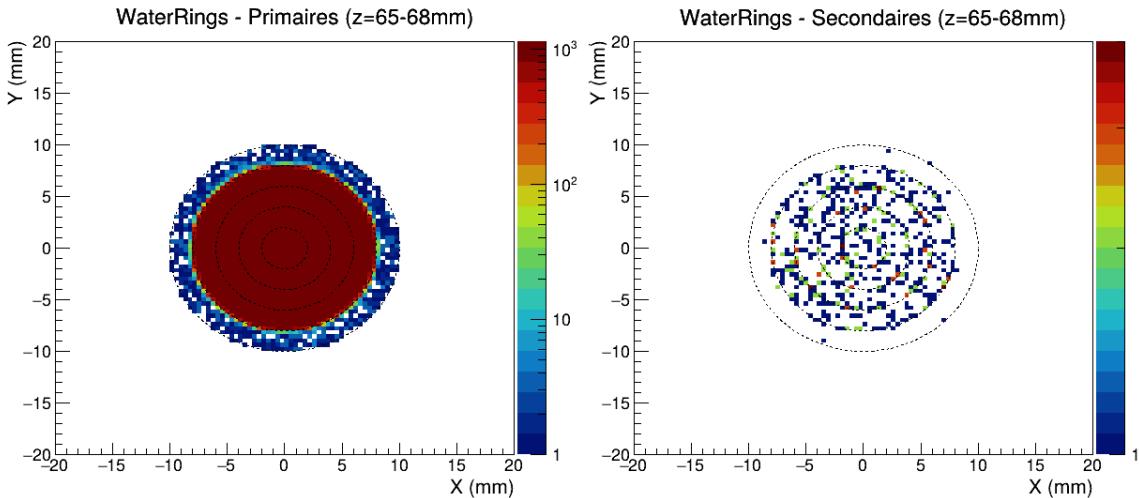
La dose totale présente une distribution quasi-gaussienne centrée sur ~ 110 pGy avec un écart-type d'environ 20 pGy, soit une incertitude relative de $\sim 18\%$ par batch.



Fluctuations statistiques de la dose par batch de 10 000 événements

5.5 Analyse détaillée du fantôme d'eau

La distribution 2D dans les couronnes d'eau ($z = 65\text{--}68 \text{ mm}$) montre clairement la couverture du faisceau. Les cercles pointillés représentent les limites des anneaux concentriques ($r = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ mm}$).



Distribution 2D dans le fantôme d'eau – Primaires (gauche) et Secondaires (droite)

Les particules primaires couvrent uniformément les 4 premiers anneaux (jusqu'à $r = 8 \text{ mm}$), confirmant les observations dosimétriques. Les particules secondaires sont principalement localisées dans la zone centrale du faisceau, avec une distribution plus diffuse vers l'extérieur.

5.6 Conclusions

conclusion

Cette simulation de 10 millions d'événements a permis d'obtenir les résultats suivants :

- **Dose totale** : 110.47 nGy déposée dans le fantôme d'eau
- **Profil de dose** : Homogène à $\pm 2\%$ dans les 4 premiers anneaux (0–8 mm)
- **Taux de transmission** : 1.39 % des photons atteignent le premier plan de scoring
- **Processus dominant** : Effet photoélectrique (> 98 % des interactions)
- **Énergie déposée** : 649.9 keV au total dans le fantôme