

Analyse des Méthodes de Calcul du dose dans une Simulation Geant4

Source Europium-152 – Puits couronne à 20 cm – plaque intermédiaire W/PETG (5mm)

Documentation technique

January 4, 2026

Abstract

Ce document présente une analyse comparative de méthodes de calcul grandeurs radiométriques (débit de Kerma, débit de dose dans des tissus mous), implémentées dans la simulation Geant4 d'une source d'Europium-152.

La première méthode repose sur le dépôt d'énergie Monte Carlo, tandis que la seconde utilise le calcul par fluence avec les coefficients d'absorption d'énergie tabulés. Cette analyse inclut les fondements théoriques, l'implémentation informatique et les conditions de validité de chaque approche.

Contents

1	Configuration de la simulation	4
2	Description de la géométrie	4
2.1	Vue de face des couronnes d'eau (plan xy)	5
2.2	Récapitulatif des positions (axe z)	5
2.3	Visualisation des angles solides	5
3	Angles solides et normalisation	5
3.1	Définition des angles solides	6
3.2	Principe de la renormalisation	7
3.3	Calcul du temps d'irradiation	7
3.4	Formules récapitulatives	8
3.5	Implémentation dans le code Geant4	8
4	Structure des données ROOT	9
4.1	Histogrammes	9
4.2	Ntuples	10
4.3	Flux de données	11
4.4	Exemples d'analyse ROOT	12
5	Vérification de la cohérence de la simulation	13
5.1	Génération des Gammas Primaires	13
5.2	Transmission à Travers le Filtre W/PETG	13
5.3	Bilan des Particules	14
5.4	Dose dans les Anneaux d'Eau	15
5.5	Renormalisation Temporelle	16
5.6	Vérification de la Cohérence Globale	17
6	Résultats principaux	18
6.1	Bilan des gammas	18
6.2	Calcul des doses déposées avec le filtre W/PETG de 5mm	19
7	Ajout de plan de comptage avant et après le container d'eau	20
7.1	Vue en coupe de la géométrie	20
7.2	Positions axiales des éléments de la géométrie	20
7.3	Caractéristiques des plans de comptage	21
7.4	Nouveaux Ntuples : PreContainer et PostContainer	21
7.5	Schéma récapitulatif des flux de particules	23
7.6	Flux de particules dans les plans Precontainer et Postcontainer avec le filtre W/PETG de 5mm	23
7.7	Résultats sans le filtre W/PETG	25
8	Insertion d'une plaque de PMMA et d'une feuille de W pour améliorer le build-up dans l'eau	27
8.1	Vue en coupe de la géométrie	27
8.2	Résultats dans le cas d'une configuration de base	28
8.3	Définition des observables	28
8.4	Résultats pour les Photons	28
8.5	Résultats pour les Électrons	29
8.6	Résultats avec l'activation de la feuille de Tungstène	30
8.7	Comparaison des photons	31
8.8	Comparaison des électrons	31
8.9	Résultats avec l'activation de la feuille de Tungstène et du PMMA	33
8.10	Effet du PMMA sur le PreContainerPlane	34
8.11	Effet du PMMA sur le PostContainerPlane	34
8.12	Analyse des figures	35

9 Résultats avec la configuration complète (eau+Tungstene+PMMA) 38

9.1 Analyse des flux de particules aux interfaces 38

9.2 Dose déposée par anneau 40

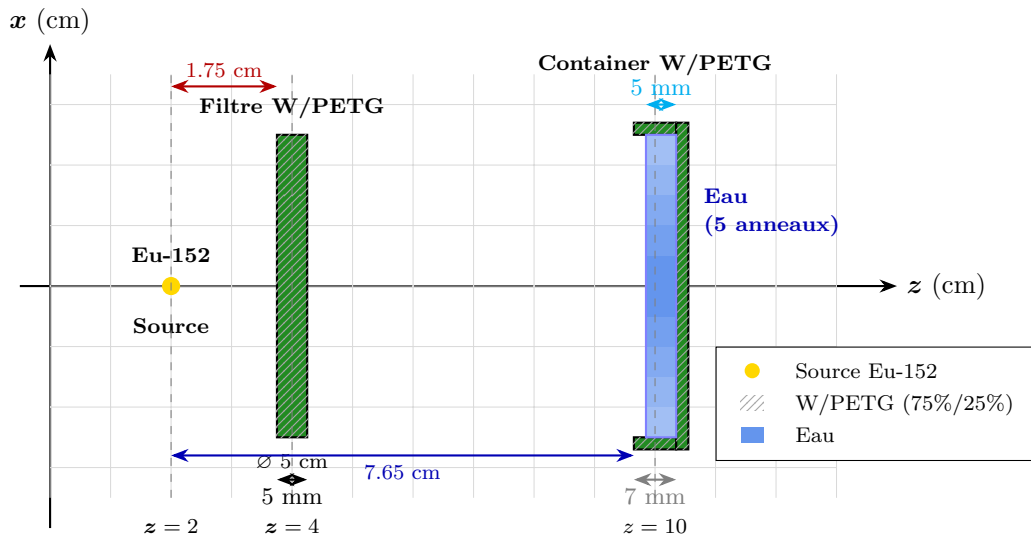
10 Conclusions avec la configuration complète 43

1 Configuration de la simulation

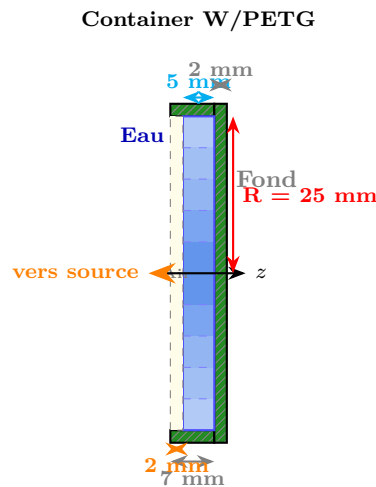
Nouvelle Configuration

- Une source d'**Eu-152** de 44 KBq a une position z de 2 cm
- Une **plaque intermédiaire** de **W/PETG** pour filtrer le rayonnement avec une épaisseur initiale de 5 mm
- Son centre est en $z = 1.75$ cm, ses dimensions en xy sont de 100×100 mm
- A une distance z de 78.5 mm de la source, se trouve une container de 50 mm de diamètre. L'épaisseur de ce container est de 7mm en z
- Dans le container se trouve 5 couronnes d'eau concentriques de 5 mm de largeur. La hauteur de l'eau est de 5mm

2 Description de la géométrie

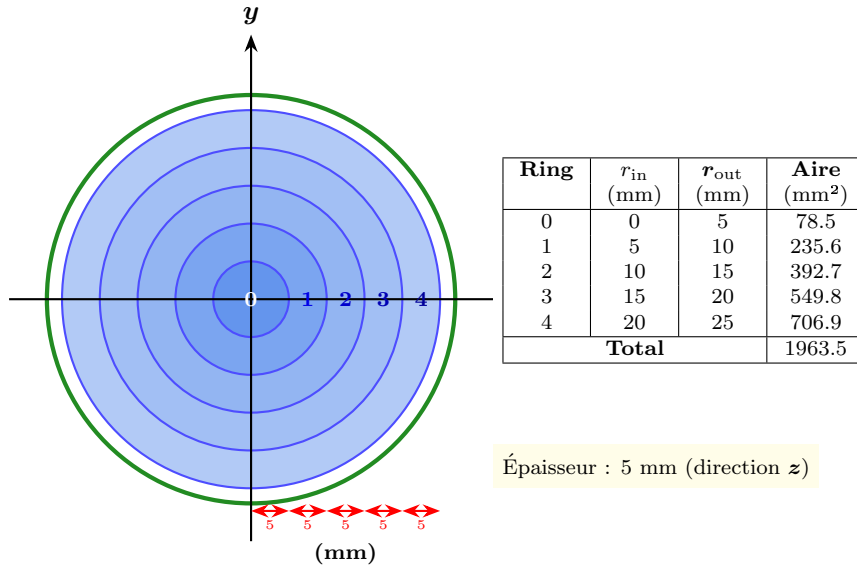


Coupe longitudinale (plan xz) du détecteur "Puits Couronne". L'eau (5 mm) est positionnée contre la face intérieure haute du container (le fond).



Vue détaillée du container "Puits Couronne". La tranche d'eau de 5 mm est positionnée contre la face intérieure haute (fond) du container. Un espace de 2 mm d'air sépare l'eau de l'ouverture.

2.1 Vue de face des couronnes d'eau (plan xy)



Vue de face (plan xy) des 5 couronnes d'eau concentriques. Chaque anneau a une largeur radiale de 5 mm.

2.2 Récapitulatif des positions (axe z)

Distance source → face d'entrée de l'eau : $9.85 - 2.0 = 7.85$ cm

Élément	Position z	Notes
Source Eu-152	2.0 cm	Point source
Filtre W/PETG (face entrée)	3.75 cm	Épaisseur 5 mm
Filtre W/PETG (centre)	4.0 cm	
Filtre W/PETG (face sortie)	4.25 cm	
Container (ouverture)	9.65 cm	Face ouverte vers source
Container (centre cavité)	10.0 cm	Hauteur int. 7 mm
Container (fond interne)	10.35 cm	
Container (fond externe)	10.55 cm	
Eau (face basse)	9.85 cm	Vers la source
Eau (face haute)	10.35 cm	Contre le fond interne

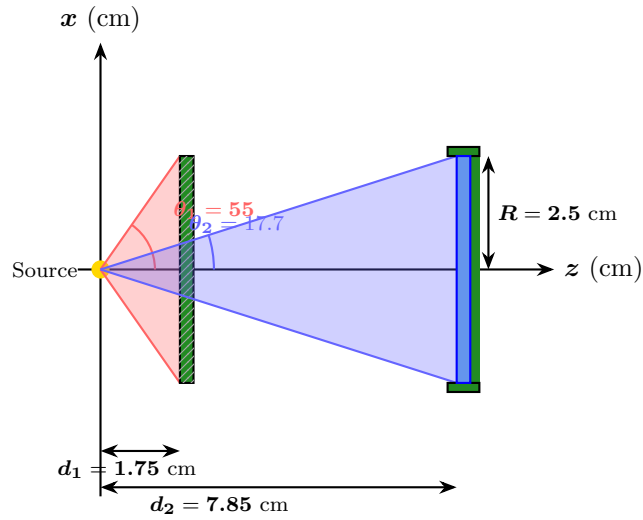
2.3 Visualisation des angles solides

3 Angles solides et normalisation

La source Eu-152 a une activité de $A = 44$ kBq sur 4π stéradians (émission isotrope). Cependant, pour optimiser le temps de calcul de la simulation Monte Carlo, on souhaite restreindre l'émission des gammas dans un cône de demi-angle $\theta_{cone} = 20^\circ$ dirigé vers le détecteur (couronnes d'eau).

Question

Comment relier les résultats obtenus avec N_{sim} événements simulés dans le cône de 20° à un temps d'irradiation réel correspondant à la source isotrope de 44 kBq ?



Élément	Distance θ	Ω (sr)	% de 4π	
Cône émission	—	60	π	25%
Filtre W/PETG	1.75 cm	55	2.68	21.3%
Couronnes eau	7.85 cm	17.7	0.30	2.4%

Visualisation des cônes d'angle solide depuis la source. La distance source-eau (7.85 cm) tient compte du positionnement de l'eau contre le fond interne du container.

3.1 Définition des angles solides

L'angle solide Ω d'un cône de demi-angle θ vu depuis son sommet est :

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \theta)$$

Cône de 20° (simulation optimisée)

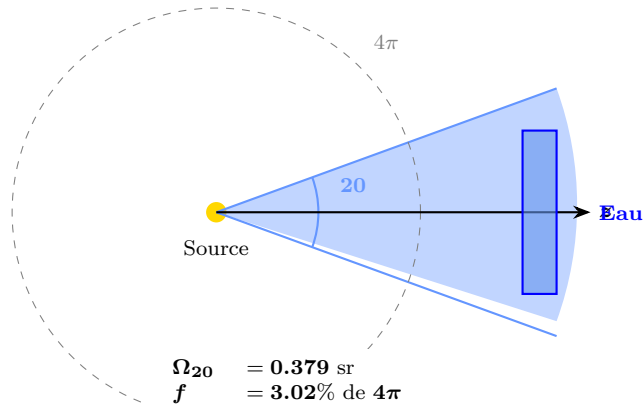
$$\begin{aligned}
 \Omega_{20} &= 2\pi (1 - \cos 20) \\
 &= 2\pi (1 - 0.9397) \\
 &= 2\pi \times 0.0603 \\
 &= 0.379 \text{ sr}
 \end{aligned}$$

Sphère complète

$$\Omega_{4\pi} = 4\pi = 12.566 \text{ sr}$$

La fraction de l'émission 4π couverte par le cône de 20 degré est :

$$f = \frac{\Omega_{20}}{\Omega_{4\pi}} = \frac{0.379}{12.566} = 0.0302 = 3.02\%$$



3.2 Principe de la renormalisation

Équivalence physique

Lorsqu'on simule N_{sim} événements (désintégrations) dans un cône de demi-angle θ_{cone} , on échantillonne uniquement la fraction f de l'émission totale.

Principe fondamental

Ces N_{sim} événements dans le cône correspondent au même nombre de gammas qu'une source isotrope aurait émis dans ce même cône après avoir effectué $N_{4\pi}$ désintégrations sur 4π

$$N_{4\pi} = \frac{N_{\text{sim}}}{f}$$

- N_{sim} = nombre d'événements simulés dans le cône
- $N_{4\pi}$ = nombre équivalent de désintégrations de la source isotrope
- f = fraction de l'angle solide ($\Omega_{\text{cone}}/4\pi$)

Exemple : Si on simule $N_{\text{sim}} = 100\,000$ événements dans un cône de 20° :

$$N_{4\pi} = \frac{100\,000}{0.0302} = 3.31 \times 10^6 \text{ désintégrations sur } 4\pi$$

3.3 Calcul du temps d'irradiation

Relation activité – temps

L'activité A de la source est définie comme le nombre de désintégrations par seconde :

$$A = \frac{N_{\text{désintégrations}}}{\Delta t}$$

Donc le temps correspondant à $N_{4\pi}$ désintégrations est :

$$T_{\text{irr}} = \frac{N_{4\pi}}{A} = \frac{N_{\text{sim}}}{f \cdot A}$$

Prise en compte du nombre de gammas par désintégration

Pour l'Eu-152, chaque désintégration produit en moyenne $\bar{n}_\gamma = 1.924$ gammas (dans le spectre considéré). Si la simulation génère des *gammas* (et non des désintégrations), il faut en tenir compte :

$$T_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{sim}}}{f \cdot A \cdot \bar{n}_\gamma}$$

Application numérique

Paramètre	Valeur
Activité A	44 000 Bq
Demi-angle du cône θ	20
Fraction f	0.0302
Gammas par désintégration \bar{n}_γ	1.924

Temps par événement simulé

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{f \cdot A \cdot \bar{n}_\gamma} \\ &= \frac{1}{0.0302 \times 44\,000 \times 1.924} \\ &= \frac{1}{2556} \text{ s} \\ &= 0.391 \text{ ms par événement} \end{aligned}$$

Temps pour N_{sim} événements

$$T_{\text{irr}} = N_{\text{sim}} \times 0.391 \text{ ms}$$

N_{sim}	T_{irr}
10 000	3.91 s
100 000	39.1 s
1 000 000	6.52 min
10 000 000	1.09 h

3.4 Formules récapitulatives

Formule générale du temps d'irradiation

$$T_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{sim}} \cdot 4\pi}{2\pi(1 - \cos \theta_{\text{cone}}) \cdot A \cdot \bar{n}_{\gamma}} = \frac{2 \cdot N_{\text{sim}}}{(1 - \cos \theta_{\text{cone}}) \cdot A \cdot \bar{n}_{\gamma}}$$

Formule du débit de dose

Si la simulation donne une dose totale D_{sim} (en Gy) pour N_{sim} événements, le débit de dose est :

$$\dot{D} = \frac{D_{\text{sim}}}{T_{\text{irr}}} = \frac{D_{\text{sim}} \cdot f \cdot A \cdot \bar{n}_{\gamma}}{N_{\text{sim}}}$$

Vérification dimensionnelle

$$\begin{aligned} [\dot{D}] &= \frac{[\text{Gy}] \times [\text{sr}] \times [\text{Bq}] \times [\mathbf{1}]}{[\text{sr}] \times [\mathbf{1}]} \\ &= \frac{\text{Gy} \times \text{s}^{-1}}{1} = \text{Gy/s} \end{aligned}$$

3.5 Implémentation dans le code Geant4

Calcul automatique dans RunAction

Modifier `RunAction.cc` pour calculer le temps d'irradiation correct :

```
// Paramètres
G4double coneAngle = 20.0 * deg;           // Demi-angle du cône
G4double activity = 44000.0;                // Bq
G4double gammasPerDecay = 1.924;

// Fraction de l'angle solide
G4double f = (1.0 - std::cos(coneAngle)) / 2.0;

// Temps d'irradiation
G4double T_irr = nofEvents / (f * activity * gammasPerDecay);
```


4 Structure des données ROOT

Principe fondamental

Ces N_{sim} événements dans le cône correspondent au même nombre de gammas qu'une source isotrope aurait émis dans ce même cône après avoir effectué $N_{4\pi}$ désintégrations sur 4π

Le fichier ROOT `puits_couronne.output.root` contient :

- **9 histogrammes** (H0 à H8)
- **3 ntuples**(EventData, GammaData, RingDoseData)

Ces données sont enregistrées pour chaque run de simulation et permettent une analyse détaillée de :

- La **génération des gammas primaires** (spectre Eu-152)
- La **transmission à travers le filtre W/PETG**
- La **dose déposée dans les 5 anneaux d'eau**

4.1 Histogrammes

Liste des histogrammes

ID	Nom	Bins	Min	Max
H0	nGammasPerEvent	15	-0.5	14.5
H1	energySpectrum	1500	0	1500 keV
H2	totalEnergyPerEvent	500	0	5000 keV
H3	doseRing0	200	0	200 keV
H4	doseRing1	200	0	200 keV
H5	doseRing2	200	0	200 keV
H6	doseRing3	200	0	200 keV
H7	doseRing4	200	0	200 keV
H8	doseTotalWater	500	0	500 keV

Liste des histogrammes dans le fichier ROOT

Description détaillée

H0 : nGammasPerEvent

Nombre de gammas par événement

Description : Distribution du nombre de gammas primaires générés par désintégration.

Remplissage : RunAction::RecordEventStatistics()

Valeur attendue : Moyenne $\bar{n}_\gamma \approx 1.924$ (spectre Eu-152)

H1 : energySpectrum

Spectre en énergie des gammas

Description : Spectre des énergies de tous les gammas primaires générés.

Remplissage : RunAction::RecordEventStatistics()

Raies principales : 40, 122, 245, 344, 779, 964, 1112, 1408 keV

H2 : totalEnergyPerEvent

Énergie totale par événement

Description : Somme des énergies de tous les gammas primaires par désintégration.

Remplissage : RunAction::RecordEventStatistics()

H3–H7 : doseRing0 à doseRing4

Dose par anneau d'eau

Description : Distribution des dépôts d'énergie (en keV) dans chaque anneau d'eau, par désintégration.

Remplissage : `RunAction::AddRingEnergy()`

Histo	Anneau	Rayon (mm)
H3	Ring 0	$r = 0 - 5$
H4	Ring 1	$r = 5 - 10$
H5	Ring 2	$r = 10 - 15$
H6	Ring 3	$r = 15 - 20$
H7	Ring 4	$r = 20 - 25$

H8 : doseTotalWater

Dose totale dans l'eau

Description : Distribution de l'énergie totale déposée dans l'ensemble des anneaux d'eau, par désintégration.

Remplissage : `RunAction::RecordEventStatistics()`

Condition : Uniquement si $E_{dep} > 0$

4.2 Ntuples

Ntuple 0 : EventData

Données par événement (désintégration)

Description : Une ligne par événement (désintégration simulée).

Remplissage : `EventAction::EndOfEventAction()`

Col	Nom	Type	Description
0	eventID	Int	Numéro de l'événement
1	nPrimaries	Int	Nombre de gammas primaires générés
2	totalEnergy	Double	Énergie totale des primaires (keV)
3	nTransmitted	Int	Nombre de gammas transmis à travers le filtre
4	nAbsorbed	Int	Nombre de gammas absorbés par le filtre
5	nScattered	Int	Nombre de gammas diffusés (Compton)
6	nSecondaries	Int	Nombre de particules secondaires détectées
7	totalWaterDeposit	Double	Énergie déposée dans l'eau (keV)

Structure du ntuple EventData

Ntuple 1 : GammaData

Données par gamma primaire

Description : Une ligne par gamma primaire émis.

Remplissage : `EventAction::EndOfEventAction()`

Critère de transmission

Un gamma est considéré comme transmis si :

$$|E_{\text{upstream}} - E_{\text{downstream}}| < 1 \text{ keV}$$

Col	Nom	Type	Description
0	eventID	Int	Numéro de l'événement parent
1	gammaIndex	Int	Index du gamma dans l'événement (0, 1, 2, ...)
2	energyInitial	Double	Énergie initiale (keV)
3	energyUpstream	Double	Énergie au plan upstream (keV)
4	energyDownstream	Double	Énergie au plan downstream (keV)
5	theta	Double	Angle polaire d'émission (deg)
6	phi	Double	Angle azimutal d'émission (deg)
7	detectedUpstream	Int	Détecté au plan upstream (0/1)
8	detectedDownstream	Int	Détecté au plan downstream (0/1)
9	transmitted	Int	Transmis sans perte d'énergie (0/1)

Structure du ntuple GammaData

Ntuple 2 : RingDoseData

Dose par anneau par désintégration

Description : Une ligne par événement avec la dose déposée dans chaque anneau.

Remplissage : EventAction::EndOfEventAction()

Col	Nom	Type	Description
0	eventID	Int	Numéro de l'événement
1	nPrimaries	Int	Nombre de gammas primaires
2	doseRing0	Double	Énergie déposée dans Ring 0 (keV)
3	doseRing1	Double	Énergie déposée dans Ring 1 (keV)
4	doseRing2	Double	Énergie déposée dans Ring 2 (keV)
5	doseRing3	Double	Énergie déposée dans Ring 3 (keV)
6	doseRing4	Double	Énergie déposée dans Ring 4 (keV)
7	doseTotal	Double	Énergie totale déposée dans l'eau (keV)

Structure du ntuple RingDoseData

4.3 Flux de données

Diagramme de remplissage

Classe	Méthode	Données remplies
SteppingAction	UserSteppingAction()	Détection dans les plans Dépôts d'énergie → EventAction
EventAction	BeginOfEventAction()	Reset des compteurs Enregistrement des primaires
	EndOfEventAction()	Ntuple 0 (EventData) Ntuple 1 (GammaData) Ntuple 2 (RingDoseData)
RunAction	RecordEventStatistics()	H0, H1, H2, H8
	AddRingEnergy()	H3–H7

Séquence temporelle

Pour chaque événement :

1. **BeginOfEventAction**: initialisation, lecture des vertex primaires
2. **UserSteppingAction**: tracking de chaque particule, détection, dépôts
3. **EndOfEventAction**: calcul des statistiques, remplissage des ntuples
4. **RecordEventStatistics**: mise à jour des compteurs globaux, histogrammes

4.4 Exemples d'analyse ROOT

Lecture des histogrammes

```
TFile* f = TFile::Open("puits_couronne_output.root");

// Spectre en energie
TH1D* hSpectrum = (TH1D*)f->Get("energySpectrum");
hSpectrum->Draw();

// Dose dans l'anneau central
TH1D* hRing0 = (TH1D*)f->Get("doseRing0");
hRing0->Draw();
```

Analyse des ntuples

```
// Ntuple EventData
TTree* tEvent = (TTree*)f->Get("EventData");
tEvent->Draw("totalWaterDeposit", "totalWaterDeposit>0");

// Ntuple GammaData - transmission en fonction de l'energie
TTree* tGamma = (TTree*)f->Get("GammaData");
tGamma->Draw("transmitted:energyInitial", "", "colz");

// Ntuple RingDoseData - correlation entre anneaux
TTree* tRing = (TTree*)f->Get("RingDoseData");
tRing->Draw("doseRing0:doseRing4", "doseRing0>0 && doseRing4>0");
```

Calcul de la dose moyenne

```
// Dose moyenne dans l'anneau 2
TTree* tRing = (TTree*)f->Get("RingDoseData");
double meanDose = tRing->GetEntries("doseRing2>0") > 0 ?
    tRing->GetMean("doseRing2") : 0;
cout << "Dose moyenne Ring 2: " << meanDose << " keV" << endl;
```

Compteurs de run (output.log)

En plus du fichier ROOT, les compteurs suivants sont affichés dans output.log :

Compteur	Description
fRingTotalEnergy[i]	Énergie totale déposée dans l'anneau <i>i</i> (MeV)
fRingEventCount[i]	Nombre d'événements avec dépôt dans l'anneau <i>i</i>
fGammasPreFilterPlane	Gammas traversant le plan pré-filtre
fGammasPostFilterPlane	Gammas traversant le plan post-filtre
fGammasPreWaterPlane	Gammas traversant le plan pré-eau
fGammasPostWaterPlane	Gammas traversant le plan post-eau

Compteurs de vérification par run

5 Vérification de la cohérence de la simulation

Paramètres de Simulation

Nombre d'événements	1 234 936 désintégrations
Gammas générés	2 377 927
Temps d'irradiation équivalent	930.8 s = 15.5 min
Activité source (4π)	44 kBq
Demi-angle du cône	20°
Dose totale dans l'eau	10.39 MeV
Débit de dose moyen	656 nGy h ⁻¹

5.1 Génération des Gammas Primaires

Statistiques de Génération

Paramètre	Valeur	Attendu	Écart
Nombre d'événements	1 234 936	–	–
Gammas générés	2 377 927	–	–
Moyenne \bar{n}_γ /événement	1.9256	1.924	+0.08%
Événements avec 0 gamma	136 610	–	–
Fraction 0 gamma	11.06%	~11%	OK

Statistiques de génération des gammas primaires Eu-152

Vérification de la Cohérence

Le nombre moyen de gammas par désintégration est :

$$\bar{n}_\gamma = \frac{N_{\gamma, \text{total}}}{N_{\text{events}}} = \frac{2\,377\,927}{1\,234\,936} = \mathbf{1.9256}$$

La valeur théorique pour l'Eu-152 est $\bar{n}_\gamma^{\text{th}} = \mathbf{1.924}$. L'écart relatif est :

$$\varepsilon = \frac{|1.9256 - 1.924|}{1.924} \times 100 = \mathbf{0.08\%}$$

Cohérence Génération

L'écart de 0.08% est bien inférieur à l'incertitude statistique attendue ($\sim 1/\sqrt{N} \approx \mathbf{0.09\%}$). Le spectre Eu-152 est correctement simulé.

5.2 Transmission à Travers le Filtre W/PETG

Compteurs de Vérification

Compteur	Valeur
Gammas entrant dans le filtre	2 379 233
Gammas sortant du filtre	1 128 721
Transmission (entrée/sortie)	47.44%

Compteurs de passage dans le filtre W/PETG

Plans de Comptage Cylindriques

Plan	Gammas	Position Z
Pré-filtre	2 377 615	35.5 mm
Post-filtre	1 110 887	43.5 mm
Transmission (plans)		46.72%
Pré-eau	855 548	96.5 mm
Post-eau	647 136	105.5 mm
Transmission eau (plans)		75.64%

Compteurs des plans de comptage cylindriques

Analyse de la Transmission

Transmission du Filtre

La transmission mesurée par les plans cylindriques est :

$$T_{\text{filtre}} = \frac{N_{\text{post-filtre}}}{N_{\text{pré-filtre}}} = \frac{1\,110\,887}{2\,377\,615} = \mathbf{46.72\%}$$

Cette valeur est cohérente avec un filtre W/PETG (75%/25%) de 5 mm d'épaisseur :

- Les gammas de basse énergie (40 keV, 122 keV) sont fortement absorbés
- Les gammas de haute énergie (> 300 keV) sont majoritairement transmis

Différence entre Compteurs

Méthode	Transmission	Différence	Explication
Entrée/Sortie filtre	47.44%	–	Inclut tous les gammas
Plans cylindriques	46.72%	–0.72%	Seulement R < 25 mm

Comparaison des méthodes de mesure de transmission

La légère différence (~0.7%) s'explique par :

- Les plans cylindriques ont un rayon de 25 mm (même que le filtre)
- Les gammas diffusés à grand angle peuvent sortir du filtre mais manquer le plan post-filtre

Transmission de l'Eau La transmission à travers 5 mm d'eau est :

$$T_{\text{eau}} = \frac{N_{\text{post-eau}}}{N_{\text{pré-eau}}} = \frac{647\,136}{855\,548} = \mathbf{75.64\%}$$

Cette valeur élevée est attendue car :

- L'eau a une faible densité ($\rho = 1 \text{ g cm}^{-3}$)
- Les gammas de haute énergie (majoritaires après le filtre) interagissent peu
- Le coefficient d'atténuation linéaire de l'eau est $\mu \approx 0.07 \text{ cm}^{-1}$ pour $E > 300 \text{ keV}$

Vérification avec la loi de Beer-Lambert :

$$T = e^{-\mu x} = e^{-0.07 \times 0.5} \approx \mathbf{96.6\%} \quad (\text{pour un gamma monoénergétique})$$

La transmission mesurée (75.6%) est inférieure car elle inclut :

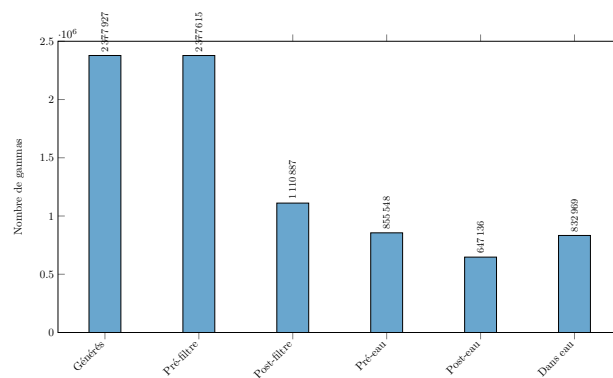
- Les interactions Compton (diffusion hors du plan)
- Les gammas absorbés par effet photoélectrique
- La contribution des gammas de plus basse énergie

Cohérence Transmission

Les transmissions mesurées (47% filtre, 76% eau) sont physiquement réalistes pour les matériaux et énergies considérés.

5.3 Bilan des Particules

Flux de Particules



Flux de gammas à travers la géométrie

Bilan Quantitatif

Étape	Nombre	% du total généré
Gammas générés	2 377 927	100%
Atteignent le pré-filtre	2 377 615	99.99%
Traversent le filtre (plans)	1 110 887	46.72%
Atteignent le pré-eau	855 548	35.98%
Traversent l'eau (plans)	647 136	27.21%
Entrent dans l'eau	832 969	35.03%
Électrons créés dans l'eau	5574	0.23%

Bilan des particules à travers la géométrie

Pertes Géométriques

Entre le post-filtre et le pré-eau :

$$\text{Pertes} = 1\,110\,887 - 855\,548 = 255\,339 \quad (23.0\%)$$

Ces pertes correspondent aux gammas qui :

- Passent à côté du container (parois latérales)
- Sont absorbés dans les parois du container
- Sont diffusés hors de l'acceptance géométrique

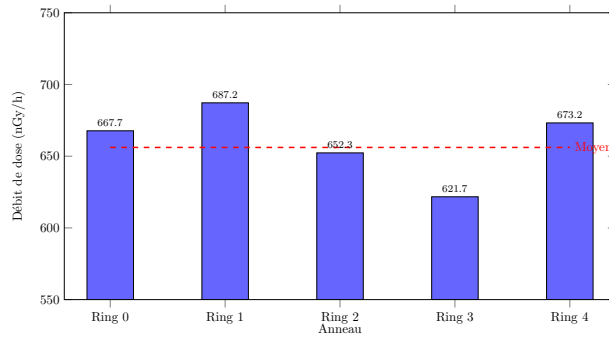
5.4 Dose dans les Anneaux d'Eau

Résultats par Anneau

Ring	Rayon (mm)	Énergie (keV)	Événements	Masse (g)	Débit (nGy/h)
0	0–5	423 140	1629	0.393	667.7
1	5–10	1 306 460	5040	1.178	687.2
2	10–15	2 066 980	8022	1.963	652.3
3	15–20	2 757 760	10 711	2.749	621.7
4	20–25	3 839 570	14 075	3.534	673.2
Total	0–25	10 393 910	39 477	9.817	656.1

Dose déposée dans chaque anneau d'eau

Distribution Radiale de la Dose



Débit de dose par anneau – Distribution relativement uniforme

Analyse de l'Uniformité

Le débit de dose moyen est $\bar{D} = 656.1 \text{ nGy h}^{-1}$.

Écart-type des débits de dose :

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 (D_i - \bar{D})^2} = 24.8 \text{ nGy h}^{-1}$$

Coefficient de variation :

$$CV = \frac{\sigma_D}{\bar{D}} = \frac{24.8}{656.1} = 3.8\%$$

Cohérence Uniformité de la Dose

Le coefficient de variation de 3.8% indique une distribution de dose relativement homogène sur l'ensemble des anneaux. L'écart maximal par rapport à la moyenne est de $\pm 5\%$.

Proportionnalité Énergie/Aire

L'énergie déposée devrait être proportionnelle à l'aire de chaque anneau (pour une irradiation uniforme).

Ring	Aire (mm ²)	Aire relative	Énergie relative	Ratio
0	$\pi \times 25 = 78.5$	1.00	1.00	1.00
1	$\pi \times 75 = 235.6$	3.00	3.09	1.03
2	$\pi \times 125 = 392.7$	5.00	4.89	0.98
3	$\pi \times 175 = 549.8$	7.00	6.52	0.93
4	$\pi \times 225 = 706.9$	9.00	9.08	1.01

Vérification de la proportionnalité énergie/aire

Les ratios proches de 1.0 confirment que l'énergie déposée est bien proportionnelle à l'aire, comme attendu pour une source ponctuelle à incidence normale.

5.5 Renormalisation Temporelle

Paramètres de la Source

Paramètre	Valeur
Activité source (4π)	44 kBq
Demi-angle du cône θ	20°
Fraction d'angle solide f	3.015%
Événements simulés N_{sim}	1 234 936

Calcul du Temps d'Irradiation

La fraction d'angle solide du cône est :

$$f = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1 - \cos \theta}{2} = \frac{1 - \cos(20)}{2} = 0.03015$$

Le taux de désintégrations dans le cône est :

$$\dot{N}_{\text{cône}} = f \times A = 0.03015 \times 44\,000 \text{ Bq} = 1327 \text{ s}^{-1}$$

Le temps d'irradiation équivalent est :

$$T_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{sim}}}{\dot{N}_{\text{cône}}} = \frac{1\,234\,936}{1327\,\text{s}^{-1}} = 930.8\,\text{s} = 15.51\,\text{min}$$

Vérification

$$N_{4\pi, \text{equiv}} = \frac{N_{\text{sim}}}{f} = \frac{1\,234\,936}{0.03015} = 40\,954\,722 \text{ désintégrations}$$

Durée correspondante pour une source 4π :

$$T = \frac{N_{4\pi, \text{equiv}}}{A} = \frac{40\,954\,722}{44\,000\,\text{Bq}} = 930.8\,\text{s} \quad \checkmark$$

Cohérence Renormalisation

Le temps d'irradiation de 15.5 min correspond bien à 1.23 millions de désintégrations dans un cône de 20° pour une source de 44 kBq.

5.6 Vérification de la Cohérence Globale

Tableau Récapitulatif

Test	Attendu	Mesuré	Statut
Gammas/événement	1.924	1.926	✓
Transmission filtre W/PETG	45–50%	47%	✓
Transmission eau 5 mm	70–80%	76%	✓
Uniformité dose (CV)	<10%	3.8%	✓
Proportionnalité E/Aire	~1.0	0.93–1.03	✓
Cohérence plans/entrée	<5%	0.7%	✓

Récapitulatif des tests de cohérence

Incertitudes Statistiques

Pour $N = 1\,234\,936$ événements, l'incertitude statistique relative est :

$$\frac{\sigma}{\mu} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{1\,234\,936}} = 0.09\%$$

Les incertitudes sur les compteurs sont :

- Transmission filtre : $47.44\% \pm 0.04\%$
- Transmission eau : $75.64\% \pm 0.08\%$
- Débit de dose : $656 \pm 1\,\text{nGy/h}$

6 Résultats principaux

6.1 Bilan des gammas

bilan des désintégrations

Bilan des photons gamma pour 10^6 désintégrations.

Catégorie	Nombre	Fraction (%)
Primaires générés	1 443 552	100.0
Absorbés dans le filtre	434 560	30.1
Transmis (sortis du filtre)	1 010 078	69.9
Entrés dans l'eau	732 707	50.8
Absorbés dans l'eau	17	0.002

Le nombre moyen de gammas par désintégration est $\bar{n}_\gamma = 1.44$, conforme à la valeur théorique de 1.44 pour ^{152}Eu (somme des intensités des 11 raies principales).

Taux d'absorption par raie gamma

Le tableau suivant présente les taux d'absorption dans le filtre **W/PETG** pour chaque raie gamma de ^{152}Eu .

*Taux d'absorption des raies gamma de ^{152}Eu dans le filtre **W/PETG** (75%/25%) d'épaisseur 5 mm. Simulation Geant4 avec 10^6 désintégrations.*

Énergie (keV)	Intensité (%)	Émis	Absorbés (filtre)	Transmis (filtre)	Taux d'absorption (%)
121.78	28.4	284 132	278 622	5 520	98.06 ± 0.03
244.70	7.5	75 251	38 758	36 570	51.50 ± 0.18
344.28	26.5	265 450	74 040	191 783	27.89 ± 0.09
411.12	2.2	22 369	4 581	17 823	20.48 ± 0.27
443.97	2.8	28 541	4 954	23 623	17.36 ± 0.22
778.90	12.9	129 290	8 713	120 697	6.74 ± 0.07
867.38	4.2	42 550	2 371	40 212	5.57 ± 0.11
964.08	14.6	146 493	6 992	139 620	4.77 ± 0.06
1085.8	10.2	102 060	4 133	97 999	4.05 ± 0.06
1112.0	13.6	136 706	5 177	131 631	3.79 ± 0.05
1408.0	21.0	210 710	6 219	204 600	2.95 ± 0.04
Total	143.9	1 443 552	434 560	1 010 078	30.10 ± 0.04

*Taux d'absorption des raies γ de ^{152}Eu dans 5 mm de **W/PETG** (75%/25%).*

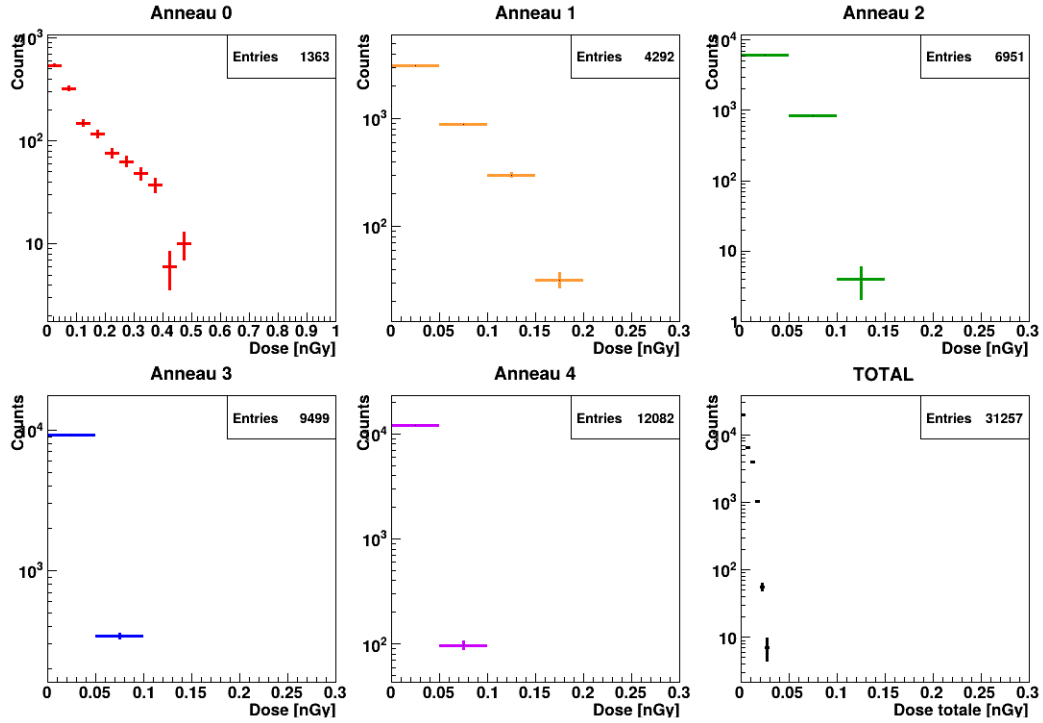
E_γ (keV)	Absorption (%)	E_γ (keV)	Absorption (%)
121.78	98.06 ± 0.03	867.38	5.57 ± 0.11
244.70	51.50 ± 0.18	964.08	4.77 ± 0.06
344.28	27.89 ± 0.09	1085.87	4.05 ± 0.06
411.12	20.48 ± 0.27	1112.07	3.79 ± 0.05
443.97	17.36 ± 0.22	1408.01	2.95 ± 0.04
778.90	6.74 ± 0.07		

6.2 Calcul des doses déposées avec le filtre W/PETG de 5mm

Dose déposée par anneau d'eau pour 10^6 désintégrations d' ^{152}Eu . Épaisseur d'eau: 5 mm, largeur radiale des anneaux: 5 mm.

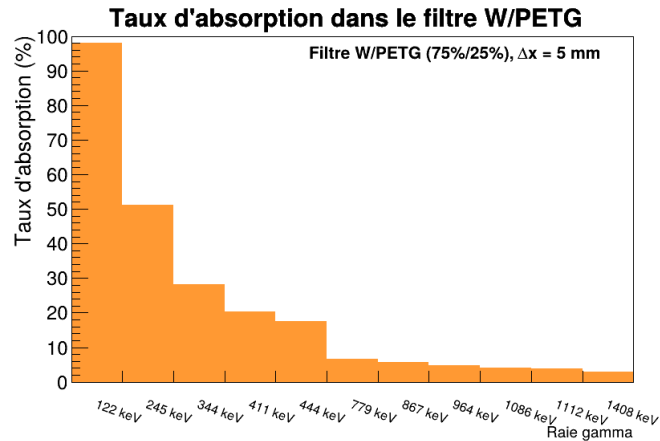
Anneau	r_{in} (mm)	r_{out} (mm)	Masse (g)	E_{dep} (MeV)	Dose (nGy)	Dose/désint. (nGy)
0	0	5	0.393	3.91×10^2	159.7	1.09×10^{-1}
1	5	10	1.178	1.14×10^3	155.0	3.61×10^{-2}
2	10	15	1.964	1.86×10^3	151.5	2.17×10^{-2}
3	15	20	2.749	2.50×10^3	145.9	1.54×10^{-2}
4	20	25	3.534	3.44×10^3	156.0	1.29×10^{-2}
Total	0	25	9.818	9.33×10^3	152.3	1.52×10^{-4}

Dose déposée par anneau



Distribution de la dose par anneau d'eau avec un filtre de W/PETG de 5 mm.

Taux d'absorption par raie gamma



Absorption du filtre de W/PETG de 5mm

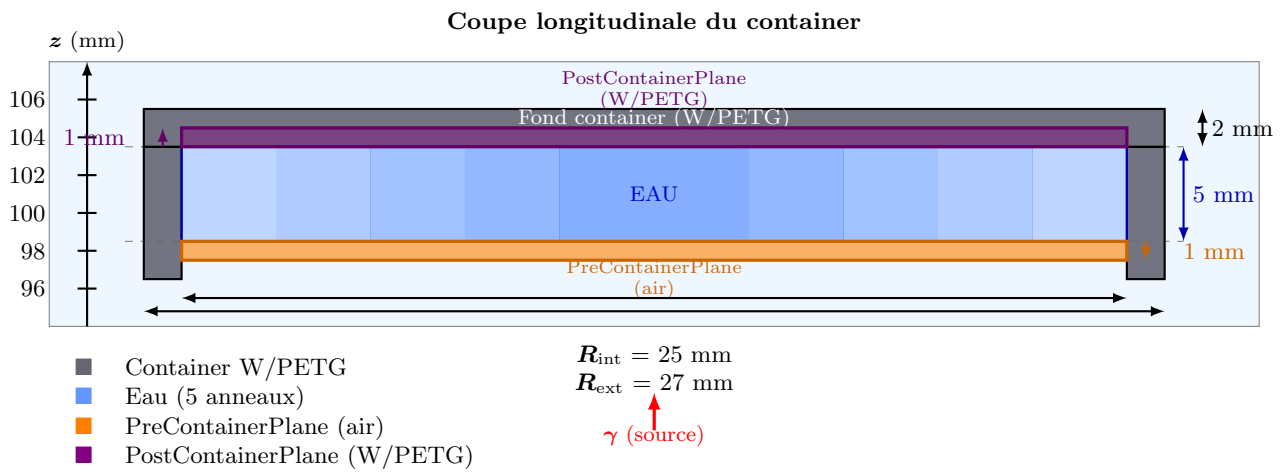
7 Ajout de plan de comptage avant et après le container d'eau

Changement de géométrie

Le container d'eau est précédé et suivi de deux plans de comptage, de 1 mm d'épaisseur. L'objectif de ces plan de comptage est de caractériser la production d'électrons secondaires

7.1 Vue en coupe de la géométrie

La figure suivante présente une vue en coupe axiale (plan XZ) de la géométrie du container et des plans de comptage associés.



Vue en coupe axiale (plan XZ) du container et des plans de comptage. Les plans de comptage sont représentés avec leur couleur respective : PreContainer (orange) et PostContainer (violet). L'eau est divisée en 5 anneaux concentriques de 5 mm de largeur.

7.2 Positions axiales des éléments de la géométrie

Le tableau suivant récapitule les positions en z de tous les éléments de la géométrie.

Positions axiales (z) des éléments de la géométrie – Version actualisée

Élément	Matériau	z min (mm)	z centre (mm)	z max (mm)	Rayon (mm)
Source Eu-152	–	–	20.0	–	ponctuelle
Zone filtre					
PreFilterPlane	Air	35.5	36.0	36.5	25
Filtre W/PETG	W/PETG 75%/25%	37.5	40.0	42.5	25
PostFilterPlane	Air	43.5	44.0	44.5	25
Zone container					
Container (ouverture)	–	$z = 96.5$ (face ouverte)			25 (int) / 27 (ext)
PreContainerPlane	Air	97.5	98.0	98.5	25
Eau (5 anneaux)	H ₂ O	98.5	101.0	103.5	25
PostContainerPlane	W/PETG	103.5	104.0	104.5	25
Container (parois)	W/PETG	96.5	100.0	103.5	25-27
Container (fond)	W/PETG	103.5	104.5	105.5	0-27

7.3 Caractéristiques des plans de comptage

Table 19: Plans de comptage – Configuration actuelle

Plan	z centre (mm)	GAP (mm)	Épaisseur (mm)	Matériau	Volume logique
PreFilterPlane	36.0	1.0	1.0	Air	PreFilterPlaneLog
PostFilterPlane	44.0	1.0	1.0	Air	PostFilterPlaneLog
PreContainerPlane	98.0	0	1.0	Air	PreContainerPlaneLog
PostContainerPlane	104.0	0	1.0	W/PETG	PostContainerPlaneLog

Notes

- **PreContainerPlane** : limite haute (z=98.5 mm) = limite basse de l'eau
- **PostContainerPlane** : limite basse (z=103.5 mm) = limite haute de l'eau
- Les deux plans autour de l'eau ont un GAP = 0 (collés à l'eau)
- PostContainerPlane est en W/PETG (même matériau que le container)

7.4 Nouveaux Ntuples : PreContainer et PostContainer

Addition de ntuple

Deux nouveaux ntuples ont été ajoutés pour enregistrer les passages de particules aux plans de comptage situés juste avant et juste après l'eau (GAP = 0). Les données sont enregistrées **par désintégration** (un événement = une désintégration).

Ntuple precontainer (index 2)

Ce ntuple enregistre les **photons** et les **électrons** traversant le plan PreContainerPlane en direction de l'eau.

Caractéristiques du plan PreContainerPlane

- **Position** : z = 97.5 – 98.5 mm (centre à 98.0 mm)
- **Limite haute** : 98.5 mm = surface basse de l'eau
- **Matériau** : Air
- **GAP** : 0 (collé à l'eau)
- **Rayon** : 25 mm
- **Volume logique** : PreContainerPlaneLog

Variables du ntuple *precontainer*

Variable	Type	Description
nPhotons	Int	Nombre de photons traversant le plan en direction +z (vers l'eau)
sumEPhotons_keV	Double	Somme des énergies cinétiques de ces photons (keV)
nElectrons	Int	Nombre d'électrons traversant le plan en direction +z (vers l'eau)
sumEElectrons_keV	Double	Somme des énergies cinétiques de ces électrons (keV)

Conditions de remplissage du ntuple precontainer

Pour chaque particule traversant le plan **PreContainerPlane**:

Photons vers l'eau

- **Type de particule** : gamma (γ)
- **Direction** : $p_z > 0$ (vers l'eau, direction +z)
- **Condition de passage** :
 - Volume de départ \neq PreContainerPlaneLog
 - Volume d'arrivée = PreContainerPlaneLog

```

if (postLogVolName == "PreContainerPlaneLog"
    && logicalVolumeName != "PreContainerPlaneLog") {
    if (particleName == "gamma" && pz > 0) {
        fEventAction->RecordPreContainerPhoton(kineticEnergy);
    }
}

```

Électrons vers l'eau

- **Type de particule** : électron (e^-)
- **Direction** : $p_z > 0$ (vers l'eau, direction +z)
- **Condition de passage** :
 - Volume de départ \neq PreContainerPlaneLog
 - Volume d'arrivée = PreContainerPlaneLog

```

if (postLogVolName == "PreContainerPlaneLog"
    && logicalVolumeName != "PreContainerPlaneLog") {
    if (particleName == "e-" && pz > 0) {
        fEventAction->RecordPreContainerElectron(kineticEnergy);
    }
}

```

Ntuple postcontainer (index 3)

Ce ntuple enregistre les particules traversant le plan PostContainerPlane, avec distinction selon leur type et direction.

Caractéristiques du plan PostContainerPlane

- **Position** : $z = 103.5 - 104.5$ mm (centre à 104.0 mm)
- **Limite basse** : 103.5 mm = surface haute de l'eau
- **Matériau** : W/PETG (75%/25%)
- **GAP** : 0 (collé à l'eau)
- **Rayon** : 25 mm
- **Volume logique** : PostContainerPlaneLog

Variables du ntuple *postcontainer*

Variable	Type	Description
nPhotons_back	Int	Nombre de photons venant de l'eau (direction -z)
sumEPhotons_back_keV	Double	Somme des énergies cinétiques de ces photons (keV)
nElectrons_back	Int	Nombre d'électrons venant de l'eau (direction -z)
sumEElectrons_back_keV	Double	Somme des énergies cinétiques de ces électrons (keV)
nElectrons_fwd	Int	Nombre d'électrons allant vers l'eau (direction +z)
sumEElectrons_fwd_keV	Double	Somme des énergies cinétiques de ces électrons (keV)

Conditions de remplissage du ntuple postcontainer

Pour chaque particule traversant le plan PostContainerPlane :

Photons rétrodiffusés (depuis l'eau)

- **Type de particule** : gamma (γ)
- **Direction** : $p_z < 0$ (depuis l'eau, direction -z)

```

if (postLogVolName == "PostContainerPlaneLog"
    && logicalVolumeName != "PostContainerPlaneLog") {
    if (particleName == "gamma" && pz < 0) {
        fEventAction->RecordPostContainerPhotonBackward(kineticEnergy);
    }
}

```

Électrons rétrodiffusés (depuis l'eau)

- **Type de particule** : électron (e^-)
- **Direction** : $p_z < 0$ (depuis l'eau, direction -z)

```

if (postLogVolName == "PostContainerPlaneLog"
    && logicalVolumeName != "PostContainerPlaneLog") {
    if (particleName == "e-" && pz < 0) {
        fEventAction->RecordPostContainerElectronBackward(kineticEnergy);
    }
}

```

Électrons vers l'eau

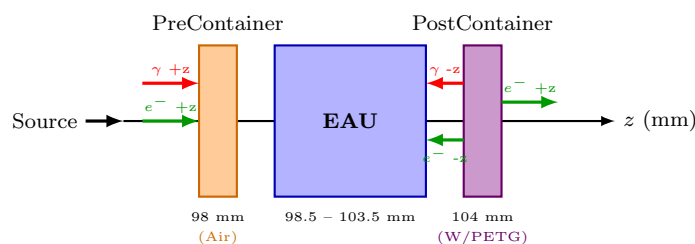
- **Type de particule** : électron (e^-)
- **Direction** : $p_z > 0$ (vers l'eau, direction $+z$)

```
if (postLogVolName == "PostContainerPlaneLog"
    && logicalVolumeName != "PostContainerPlaneLog") {
    if (particleName == "e-" && pz > 0) {
        fEventAction->RecordPostContainerElectronForward(kineticEnergy);
    }
}
```

Remarques importantes

- Le plan **PostContainerPlane** est en **W/PETG** (même matériau que le container). Les particules traversant ce plan peuvent donc interagir avec le matériau du plan lui-même.
- Le plan **PreContainerPlane** est en **air**, donc transparent aux particules.
- Les deux plans sont collés à l'eau (**GAP = 0**).
- Les données sont enregistrées **par événement** (une ligne par désintégration).

7.5 Schéma récapitulatif des flux de particules



Récapitulatif des variables par plan

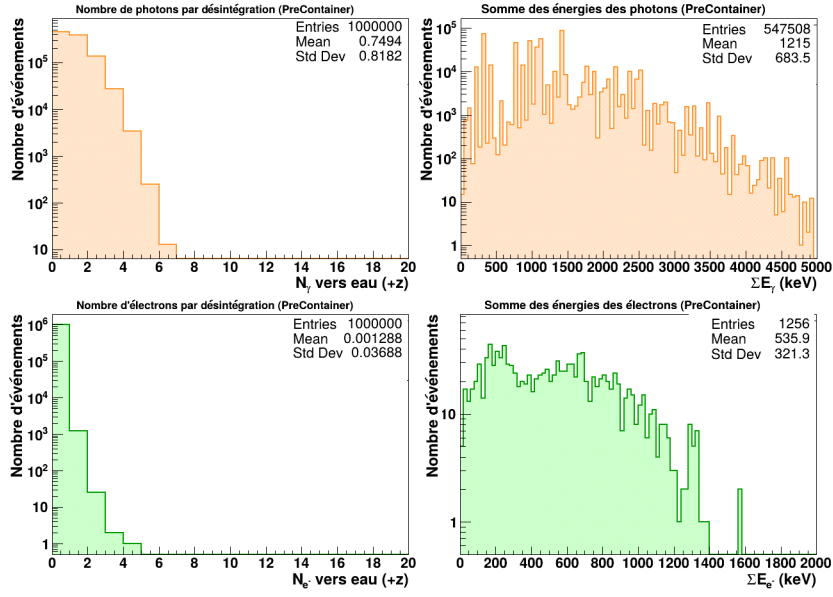
Plan	Particule	Variables
PreContainerPlane	γ vers eau (+z)	nPhotons, sumEPhotons_keV
	e^- vers eau (+z)	nElectrons, sumEElectrons_keV
PostContainerPlane	γ depuis eau (-z)	nPhotons_back, sumEPhotons_back_keV
	e^- depuis eau (-z)	nElectrons_back, sumEElectrons_back_keV
	vers eau (+z)	nElectrons_fwd, sumEElectrons_fwd_keV

7.6 Flux de particules dans les plans Precontainer et Postcontainer avec le filtre W/PETG de 5mm

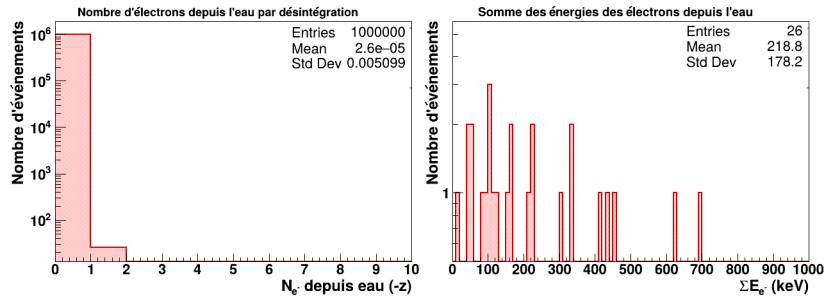
Filtre W/PETG 5mm

Ci après les spectres des distributions des photons et électrons dans les plans de comptage PreContainerPlane et PostContainerPlane

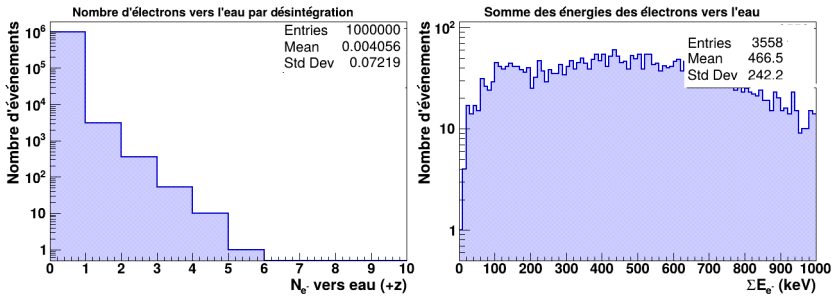
- photons et électrons dans le **PreContainerPlane**
- photons dans le **PostContainerPlane**
- électrons "backward" rétrodiffusés dans le **PostContainerPlane**
- électrons "forward" diffusés dans le **PostContainerPlane**



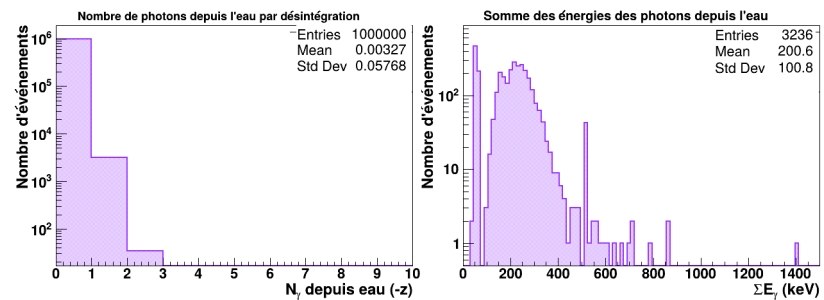
photons et électrons dans le *PreContainerPlane* avec le filtre de *W/PETG* de 5mm



photons dans le *PostContainerPlane* avec le filtre de *W/PETG* de 5mm



électrons "backward" retrodiffusés dans le *PostContainerPlane* avec le filtre de *W/PETG* de 5mm



électrons "forward" diffusés dans le *PostContainerPlane* avec le filtre de *W/PETG* de 5mm

7.7 Résultats sans le filtre W/PETG

sans Filtre W/PETG 5mm

On enlève le filtre de **W/PETG**

Doses déposées dans les anneaux d'eau – Simulation avec filtre en **air** (10^6 désintégrations Eu-152)

Anneau	Masse (g)	E_{dep} (MeV)	Dose (nGy)	Dose/evt (nGy)	Événements
0 (r=0–5 mm)	0.3927	4.407×10^2	1.798×10^2	6.762×10^{-2}	2 659
1 (r=5–10 mm)	1.1781	1.307×10^3	1.778×10^2	2.274×10^{-2}	7 818
2 (r=10–15 mm)	1.9635	2.184×10^3	1.782×10^2	1.356×10^{-2}	13 144
3 (r=15–20 mm)	2.7489	2.970×10^3	1.731×10^2	9.703×10^{-3}	17 843
4 (r=20–25 mm)	3.5343	3.970×10^3	1.800×10^2	7.773×10^{-3}	23 152
TOTAL	9.8175	1.087e4	1.774e2	1.774e-4	1 000 000

Doses déposées dans les anneaux d'eau – Version simplifiée

Anneau	Rayon (mm)	Masse (g)	Dose (nGy)	Dose/désint. (nGy)
0	0 – 5	0.393	179.8	6.76×10^{-2}
1	5 – 10	1.178	177.8	2.27×10^{-2}
2	10 – 15	1.964	178.2	1.36×10^{-2}
3	15 – 20	2.749	173.1	9.70×10^{-3}
4	20 – 25	3.534	180.0	7.77×10^{-3}
TOTAL		9.817	177.4	1.77×10^{-4}

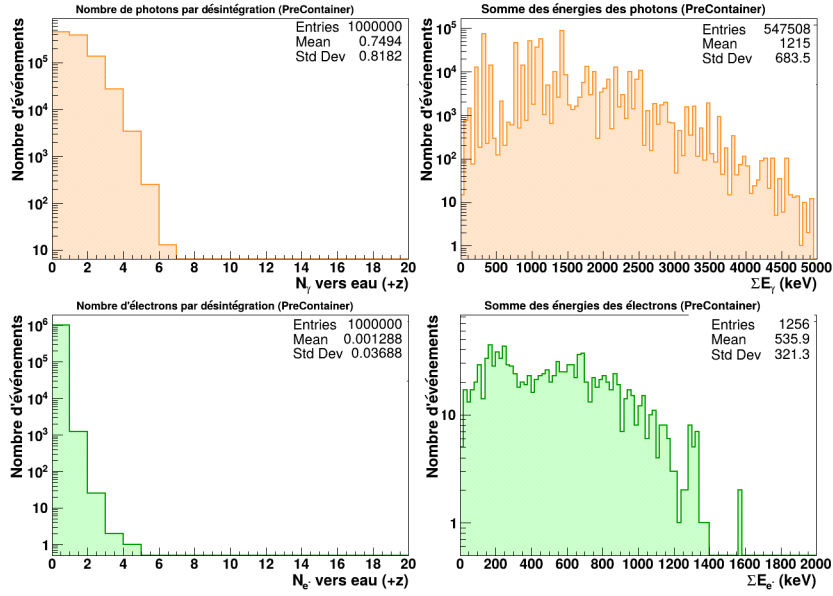
Comparaison des doses : filtre W/PETG vs filtre Air

Anneau	Rayon (mm)	Dose W/PETG (nGy)	Dose Air (nGy)	Augmentation
0	0 – 5	148.4	179.8	+21.2%
1	5 – 10	159.7	177.8	+11.3%
2	10 – 15	155.3	178.2	+14.7%
3	15 – 20	149.2	173.1	+16.0%
4	20 – 25	153.7	180.0	+17.1%
TOTAL		153.3	177.4	+15.7%

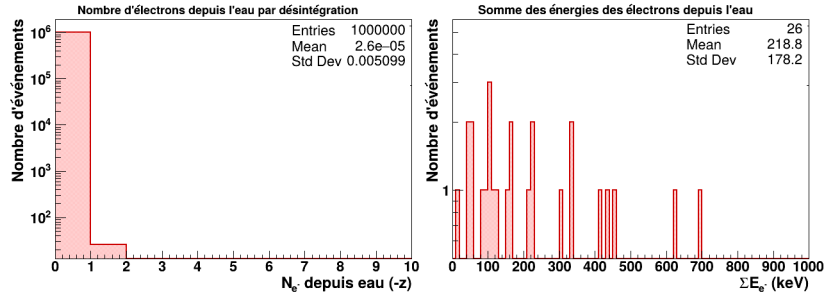
Filtre W/PETG 5mm

Ci après les spectres des distributions des photons et électrons dans les plans de comptage PrecontainerPlane et PostContainerPlane

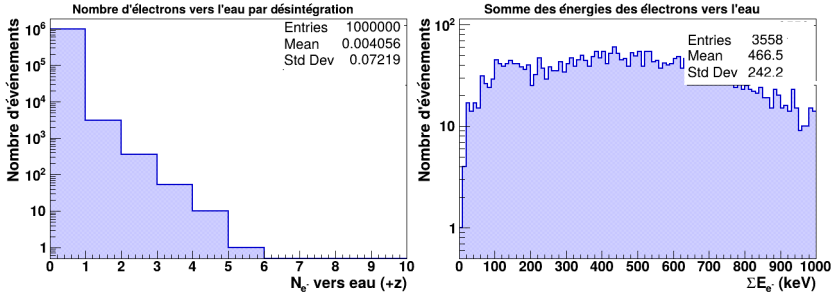
- photons et électrons dans le **PreContainerPlane**
- photons dans le **PostContainerPlane**
- électrons "backward" retrodiffusés dans le **PostContainerPlane**
- électrons "forward" diffusés dans le **PostContainerPlane**



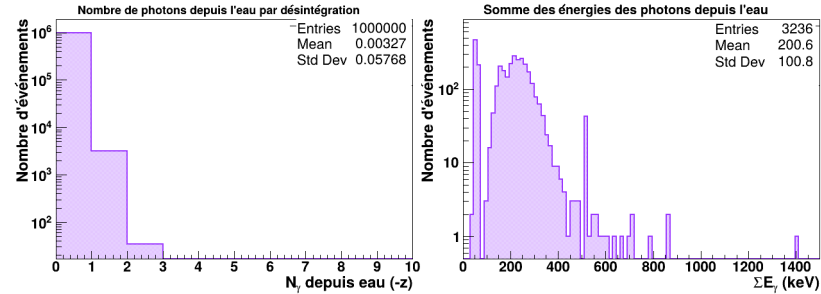
photons et électrons dans le *PreContainerPlane* sans le filtre de *W/PETG* de 5mm



photons dans le *PostContainerPlane* sans le filtre de *W/PETG* de 5mm



électrons "backward" retrodiffusés dans le *PostContainerPlane* sans le filtre de *W/PETG* de 5mm



électrons "forward" diffusés dans le *PostContainerPlane* sans le filtre de *W/PETG* de 5mm

8 Insertion d'une plaque de PMMA et d'une feuille de W pour améliorer le build-up dans l'eau

Changement de géométrie

Le container d'eau est précédé d'une **plaque de PMMA de 5 mm d'épaisseur**, pour améliorer la conversion des photons incidents et la **production d'électrons secondaires** dans l'eau du container. L'objectif de ce plan est d'améliorer le build-up électronique

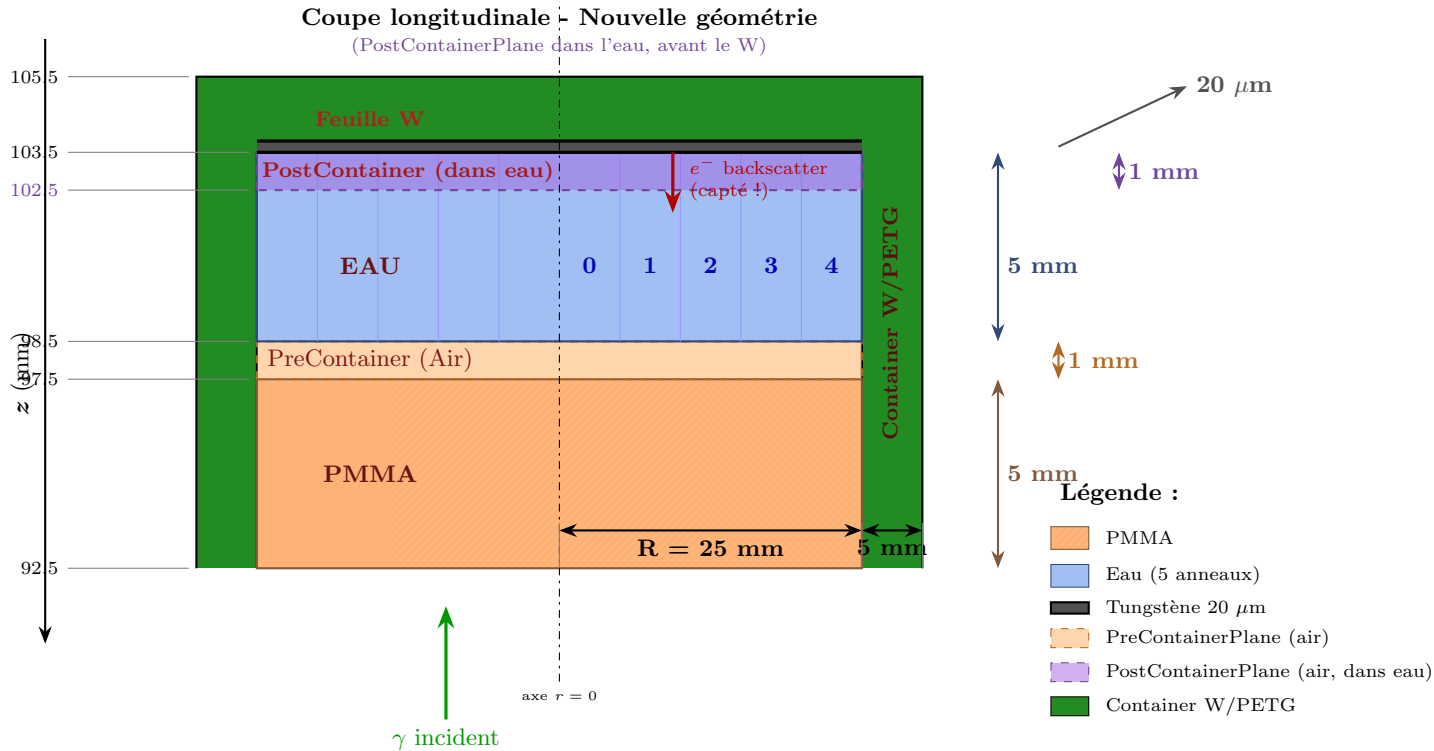
Le fond du container d'eau est tapissé d'une **feuille de tungstène** pour améliorer la **rétrodiffusion des électrons** produit par les photons incidents dans la feuille de tungstène. L'objectif de ce plan est d'améliorer le build-up électronique

Table 26: Positions axiales (z) des éléments de la géométrie du container

Élément	Matériau	z_{min} (mm)	z_{max} (mm)	Épaisseur	Rayon (mm)
PMMA	PMMA	92.50	97.50	5 mm	25
PreContainerPlane	Air	97.50	98.50	1 mm	25
Eau (5 anneaux)	H ₂ O	98.50	103.50	5 mm	25
PostContainerPlane	Air	102.50	103.50	1 mm	25
Feuille W	Tungstène	103.50	103.52	20 μ m	25
Fond container	W/PETG	103.50	105.50	2 mm	30
Parois container	W/PETG	92.50	105.50	5 mm (radial)	25–30

8.1 Vue en coupe de la géométrie

La figure suivante présente une vue en coupe axiale (plan XZ) de la géométrie du container et des plans de comptage associés.



Vue en coupe axiale (plan XZ) du container et des plans de comptage. Les plans de comptage sont représentés avec leur couleur respective : PreContainer (orange) et PostContainer (violet). L'eau est divisée en 5 anneaux concentriques de 5 mm de largeur.

8.2 Résultats dans le cas d'une configuration de base

Géométrie de base

On modifie les matériaux de différents volumes pour avoir une référence. On prend comme matériau l'air pour:

- Les bloc de PMMA,
- Les anneaux d'eau,
- la feuille de tungstène
- les parois du container

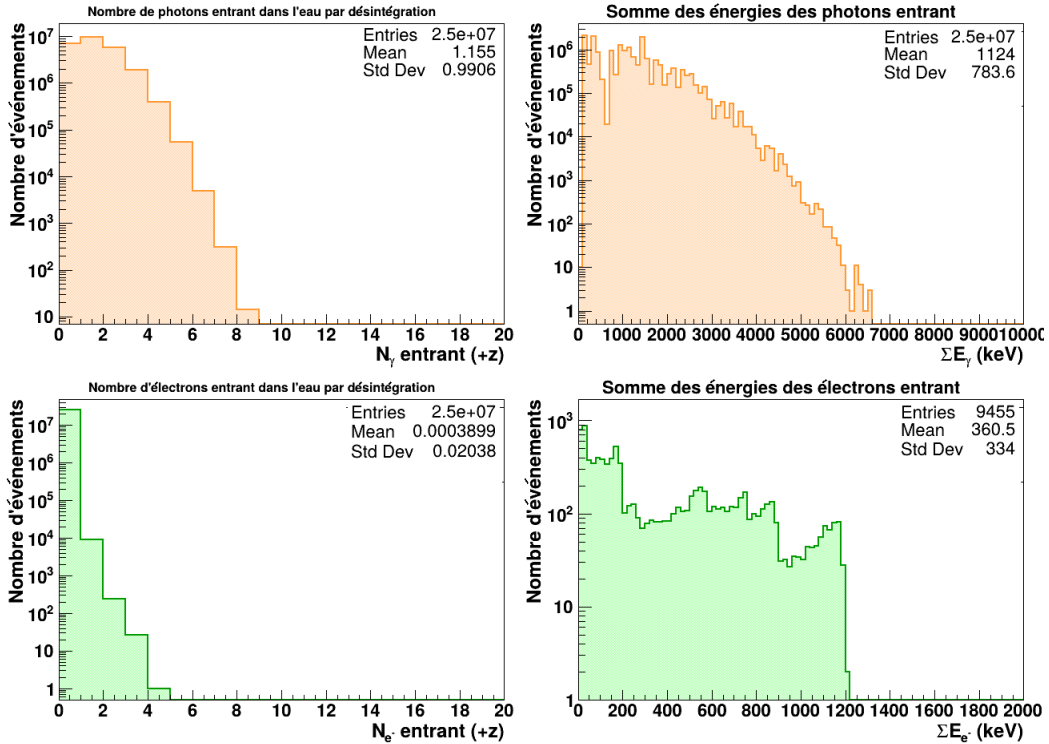
8.3 Définition des observables

Les particules sont comptées selon leur **direction de propagation**:

Définition des observables aux plans de comptage

Plan	Direction	Signification physique
PreContainer	$p_z > 0 (+z)$	Particules entrant dans la région eau
PostContainer	$p_z > 0 (+z)$	Particules transmises (sortant de l'eau)
PostContainer	$p_z < 0 (-z)$	Particules rétrodiffusées (backscatter)

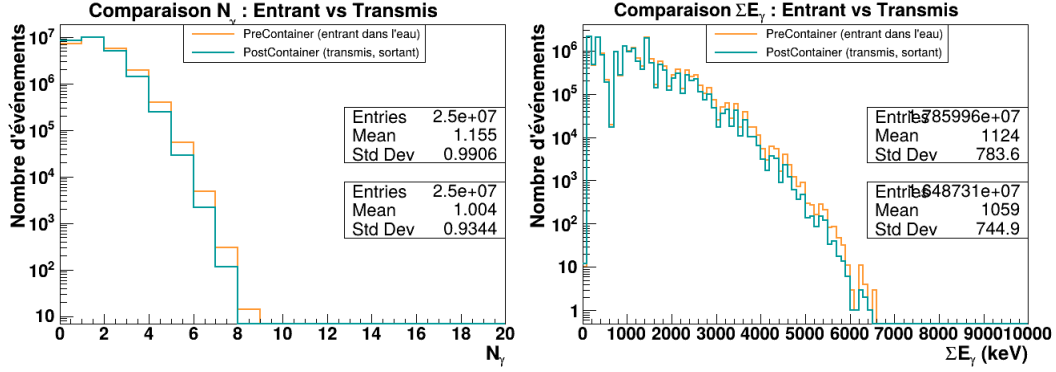
8.4 Résultats pour les Photons



4 histogrammes représentant les particules entrant dans la région eau (direction $+z$) : **Haut gauche** : Nombre de photons par désintégration (N_γ). **Haut droite** : Somme des énergies des photons (ΣE_γ en keV). **Bas gauche** : Nombre d'électrons par désintégration (N_e). **Bas droite** : Somme des énergies des électrons (ΣE_e en keV). Le plan Precontainer mesure le flux de particules **incident** sur la région où se trouve normalement l'eau. C'est la référence pour calculer l'atténuation.

Les distributions PreContainer et PostContainer sont très similaires, ce qui est attendu pour une géométrie tout air:

Observable	PreContainer (entrant)	PostContainer (transmis)	Écart relatif
Nombre moyen $\langle N_\gamma \rangle$	1.155	1.004	−13.1%
Écart-type σ_{N_γ}	0.991	0.934	−5.7%
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_\gamma \rangle$	1124 keV	1059 keV	−5.8%
Écart-type $\sigma_{\Sigma E}$	783 keV	745 keV	−4.9%
Entries (énergie > 0)	17.86×10^6	16.49×10^6	−7.7%
Backscatter	—	0	—

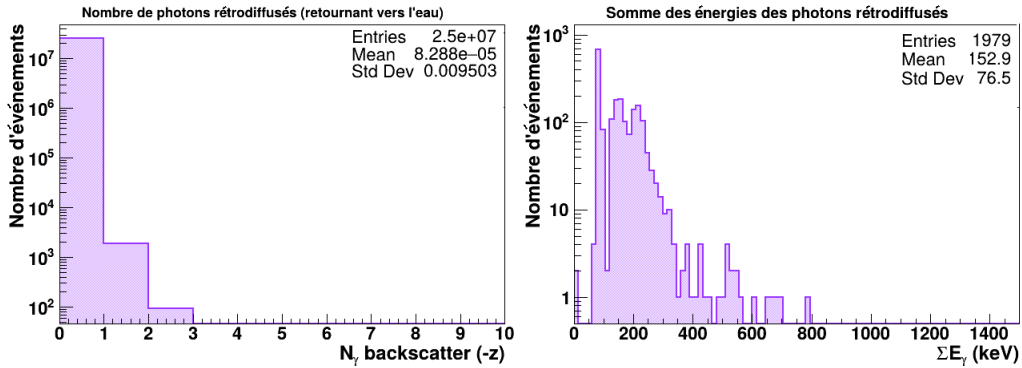


2 histogrammes superposés (Pre en orange, Post en cyan) : *Gauche* : Superposition des distributions N_γ (entrant vs transmis). *Droite* : Superposition des distributions ΣE_γ (entrant vs transmis). Cette figure permet de visualiser directement l'atténuation. Dans la géométrie tout air, les deux distributions sont quasi-superposées

$$\frac{\langle N_\gamma \rangle_{\text{Post}}}{\langle N_\gamma \rangle_{\text{Pre}}} = \frac{1.004}{1.155} \approx 0.87$$

La différence de $\sim 13\%$ s'explique par **les effets géométriques**:

- Les photons émis avec un angle θ important par rapport à l'axe z peuvent sortir latéralement du cylindre de détection (rayon $R = 25$ mm)
- La distance entre les deux plans est $\Delta z = 6$ mm



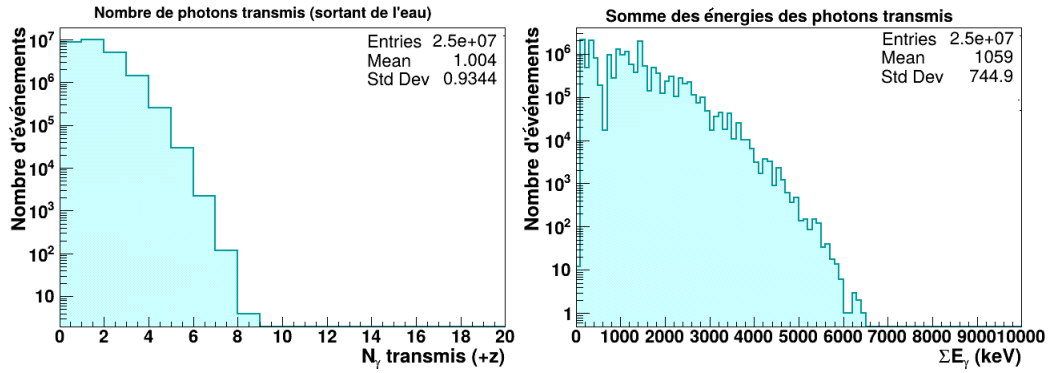
2 histogrammes représentant les photons **retournant vers l'eau** (direction $-z$, backscatter) : *Gauche* : Nombre de photons rétrodiffusés par désintégration (N_γ backscatter). *Droite* : Somme des énergies des photons rétrodiffusés (ΣE_γ en keV). Ces photons proviennent de la diffusion Compton dans les matériaux situés après l'eau. Dans la géométrie tout air, cette distribution est *vide* (Mean = 0)

Le résultat $N_{\gamma, \text{back}} = 1879$ confirme **l'absence de rétrodiffusion**, essentiellement dans l'air :

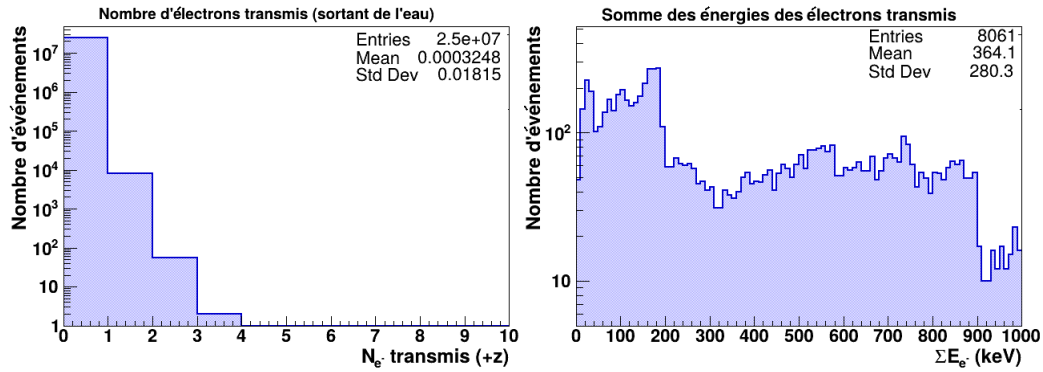
- Le code de détection des directions fonctionne correctement
- Dans l'air, la section efficace de diffusion Compton est négligeable
- Il n'y a pas de matériau pour générer des photons rétrodiffusés

8.5 Résultats pour les Électrons

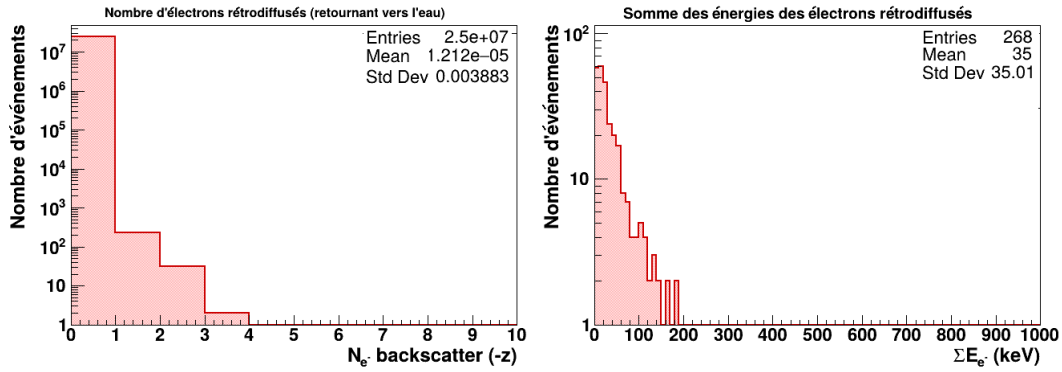
- **Faible production d'électrons**: $\langle N_{e^-} \rangle \sim 4 \times 10^{-4}$ par désintégration, soit environ 1 électron pour 2500 événements
- **Légère augmentation au PostContainer**: Les électrons supplémentaires proviennent de :
 - Diffusion Compton des photons dans l'air (très faible)



2 histogrammes représentant les photons *sortant de l'eau* (direction +z, transmis) : *Gauche* : Nombre de photons transmis par désintégration (N_γ transmis). *Droite* : Somme des énergies des photons transmis (ΣE_γ en keV). Ces photons ont traversé la région eau sans être absorbés ni rétrodiffusés. La comparaison avec le PreContainer permet de mesurer l'atténuation.



2 histogrammes représentant les électrons *sortant de l'eau* (direction +z) : *Gauche* : Nombre d'électrons transmis par désintégration (N_{e^-} transmis). *Droite* : Somme des énergies des électrons transmis (ΣE_{e^-} en keV). Ces électrons peuvent être des électrons primaires ayant traversé l'eau, ou des électrons secondaires produits par effet Compton ou photoélectrique dans l'eau.



2 histogrammes représentant les électrons *retournant vers l'eau* (direction -z) : *Gauche* : Nombre d'électrons rétrodiffusés par désintégration (N_{e^-} backscatter). *Droite* : Somme des énergies des électrons rétrodiffusés (ΣE_{e^-} en keV). Ces électrons proviennent de la rétrodiffusion dans les matériaux après l'eau. Dans la géométrie tout air, cette distribution est *vide*

– Éventuellement, production de paires pour les photons de haute énergie

- **Backscatter nul** : Confirme l'absence de matériau diffuseur

8.6 Résultats avec l'activation de la feuille de Tungstène

Géométrie de base

Deux simulations ont été réalisées avec des configurations identiques, à l'exception du **matériau de la feuille** de 20 μm située entre l'eau et le **PostContainerPlane**

Observable	PreContainer (entrant)	PostContainer (transmis)	PostContainer (backscatter)
Nombre moyen $\langle N_{e-} \rangle$	3.33×10^{-4}	3.25×10^{-4}	1.21×10^{-5}
Écart-type $\sigma_{N_{e-}}$	0.0185	0.0182	0.0039
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_{e-} \rangle$	414 keV	364 keV	35 keV

Table 30: Paramètres des deux configurations

Paramètre	Configuration Air	Configuration Tungstène
Matériau feuille	Air	Tungstène (W)
Épaisseur	20 μm	20 μm
Numéro atomique Z	7.4 (effectif)	74
Densité ρ	0.0012 g/cm ³	19.3 g/cm ³
Événements simulés	25×10^6	25×10^6

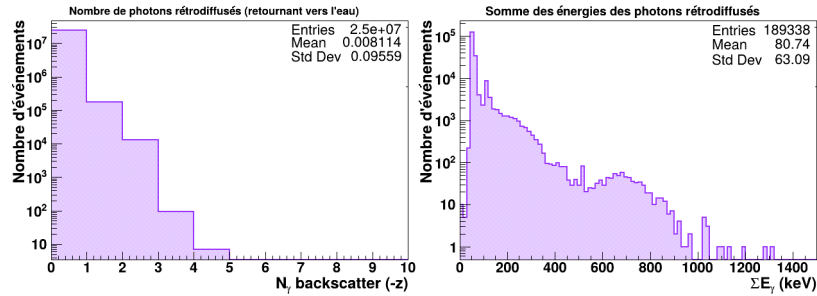
8.7 Comparaison des photons

Photons rétrodiffusés (backscatter, direction $-z$)

- Le nombre de photons backscatter est multiplié par ~ 100 avec le tungstène.
- L'énergie moyenne **diminue** de 153 keV à 81 keV. Cette diminution s'explique par l'apparition des **raies de fluorescence X** du tungstène :
 - Raies K_α : 59.3 keV et 57.9 keV
 - Raies K_β : 67.2 keV et 69.1 keV
- Ces raies X de basse énergie dominent le spectre de backscatter et abaissent l'énergie moyenne.

Statistiques des photons rétrodiffusés au PostContainerPlane

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_\gamma \rangle$	8.29×10^{-5}	8.11×10^{-3}	$\times 98$
Écart-type σ	0.0095	0.0956	$\times 10$
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_\gamma \rangle$	153 keV	80.7 keV	$\times 0.53$
Écart-type énergie	76.5 keV	63.1 keV	$\times 0.82$
Entrées (énergie > 0)	~ 1979	~ 189338	$\times 96$



2 histogrammes représentant les photons **retournant vers l'air** (direction $-z$, backscatter) : Gauche : Nombre de photons rétrodiffusés par désintégration (N_γ backscatter). Droite : Somme des énergies des photons rétrodiffusés (ΣE_γ en keV). Ces photons proviennent de la diffusion Compton dans les matériaux situés après l'air. Dans la géométrie tout air, cette distribution est *vide* (Mean = 0)

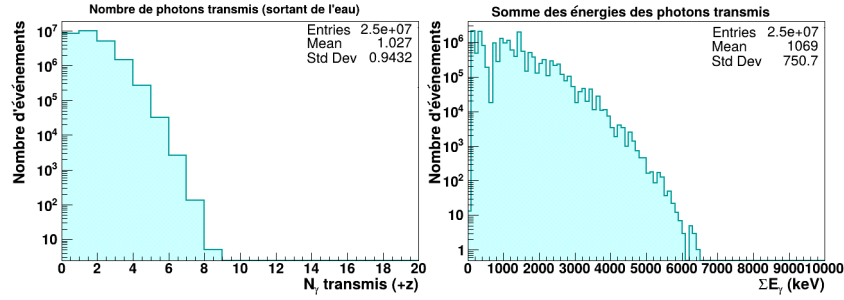
Photons transmis (direction $+z$)

La transmission des photons est quasi-identique car l'épaisseur de 20 μm de tungstène est très faible par rapport au libre parcours moyen des photons gamma de haute énergie ($\lambda \gg 20 \mu\text{m}$ pour $E_\gamma > 100 \text{ keV}$).

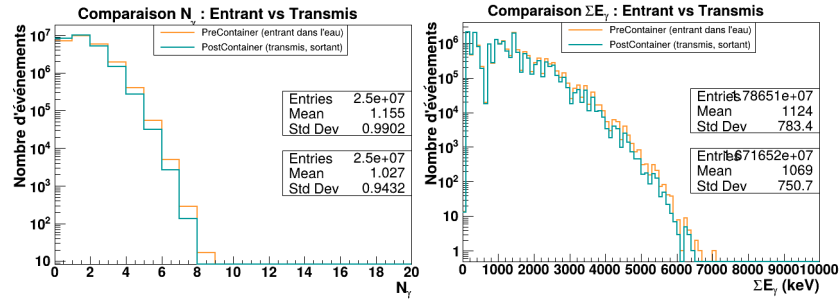
8.8 Comparaison des électrons

Électrons rétrodiffusés (backscatter, direction $-z$)

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_\gamma \rangle$	1.028	1.027	~ 1.00
Écart-type σ	0.943	0.943	~ 1.00
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_\gamma \rangle$	1069 keV	1069 keV	~ 1.00



2 histogrammes représentant les photons *sortant de l'air* (direction $+z$, transmis) : *Gauche* : Nombre de photons transmis par désintégration (N_γ transmis). *Droite* : Somme des énergies des photons transmis (ΣE_γ en keV). Ces photons ont traversé la région air sans être absorbés ni rétrodiffusés. La comparaison avec le PreContainer permet de mesurer l'atténuation.

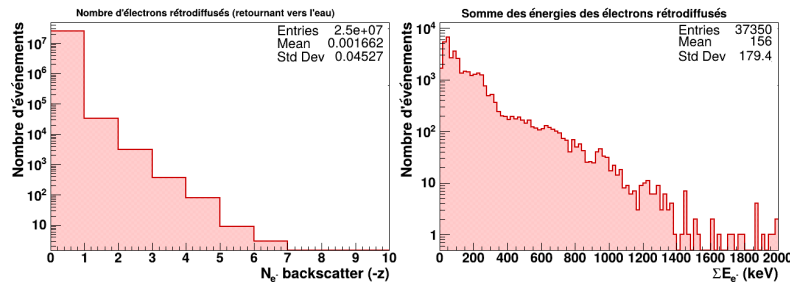


2 histogrammes superposés (Pre en orange, Post en cyan) : *Gauche* : Superposition des distributions N_γ (entrant vs transmis). *Droite* : Superposition des distributions ΣE_γ (entrant vs transmis). Cette figure permet de visualiser directement l'atténuation. Dans la géométrie où l'eau est remplacé par de l'air, les deux distributions sont quasi-superposées

- Le nombre d'électrons backscatter est multiplié par ~ 130 avec le tungstène.
- Contrairement aux photons, **l'énergie moyenne augmente de 35 keV à 156 keV**.
- Le **coefficient de rétrodiffusion électronique du tungstène est élevé ($\sim 50\%$ pour des électrons de quelques centaines de keV)**.

Les électrons de haute énergie proviennent de :

- Photoélectrons des raies gamma (jusqu'à $\sim 1400 - 69.5 \approx 1330$ keV)
- Électrons Compton rétrodiffusés



2 histogrammes représentant les électrons *retournant vers l'eau* (direction $-z$) : *Gauche* : Nombre d'électrons rétrodiffusés par désintégration (N_{e-} backscatter). *Droite* : Somme des énergies des électrons rétrodiffusés (ΣE_{e-} en keV). Ces électrons proviennent de la rétrodiffusion dans les matériaux après l'eau. Dans la géométrie tout air, cette distribution est *vide*

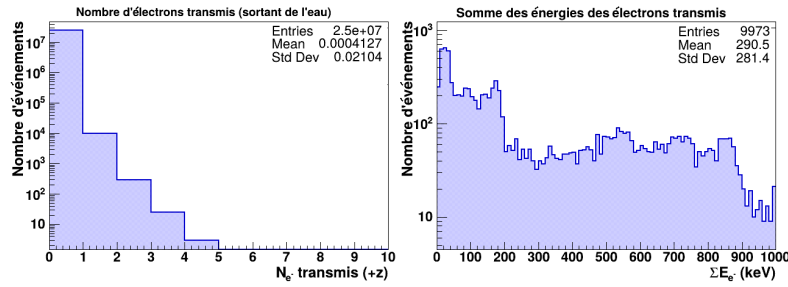
Électrons transmis (direction $+z$)

Le nombre d'électrons transmis augmente légèrement ($+27\%$) mais leur énergie moyenne diminue (-20%), ce qui traduit une perte d'énergie dans le tungstène.

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_{e-} \rangle$	1.21×10^{-5}	1.66×10^{-3}	$\times 137$
Écart-type σ	0.0039	0.0453	$\times 12$
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_{e-} \rangle$	35 keV	156 keV	$\times 4.5$
Écart-type énergie	—	179 keV	—
Entrées (énergie > 0)	~ 303	$\sim 37\,350$	$\times 123$

Statistiques des électrons transmis au PostContainerPlane

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_{e-} \rangle$	3.25×10^{-4}	4.13×10^{-4}	$\times 1.27$
Écart-type σ	0.0182	0.0210	$\times 1.15$
Énergie moyenne $\langle \Sigma E_{e-} \rangle$	364 keV	290 keV	$\times 0.80$
Entrées (énergie > 0)	$\sim 9\,973$	$\sim 9\,973$	~ 1.00



2 histogrammes représentant les électrons *sortant de l'eau* (direction $+z$) : **Gauche** : Nombre d'électrons transmis par désintégration (N_{e-} transmis). **Droite** : Somme des énergies des électrons transmis (ΣE_{e-} en keV). Ces électrons peuvent être des électrons primaires ayant traversé l'eau, ou des électrons secondaires produits par effet Compton ou photoélectrique dans l'eau.

Synthèse de la comparaison Air vs Tungstène

 Synthèse de la comparaison Air vs Tungstène (feuille 20 μm)

Catégorie	Observable	Air	Tungstène	Ratio
Photons backscatter	Nombre moyen	8.29×10^{-5}	8.11×10^{-3}	$\times 98$
	Énergie moyenne	153 keV	80.7 keV	$\times 0.53$
	Événements	$\sim 2\,000$	$\sim 189\,000$	$\times 95$
Électrons backscatter	Nombre moyen	1.21×10^{-5}	1.66×10^{-3}	$\times 137$
	Énergie moyenne	35 keV	156 keV	$\times 4.5$
	Événements	~ 300	$\sim 37\,000$	$\times 123$
Photons transmis	Nombre moyen	1.028	1.027	~ 1.0
	Énergie moyenne	1069 keV	1069 keV	~ 1.0
Électrons transmis	Nombre moyen	3.25×10^{-4}	4.13×10^{-4}	$\times 1.27$
	Énergie moyenne	364 keV	290 keV	$\times 0.80$

8.9 Résultats avec l'activation de la feuille de Tungstène et du PMMA

Géométrie de base

On active maintenant le **bloc de PMMA** avant le container PreContainerPlane.
 → Trois configurations ont été simulées pour isoler l'effet de chaque composant :

Configuration	PMMA (5 mm)	Feuille (20 μ m)	Eau (5 mm)
Air (référence)	Air	Air	Air
Tungstène seul	Air	Tungstène	Air
PMMA + Tungstène	PMMA	Tungstène	Air

8.10 Effet du PMMA sur le PreContainerPlane

Le **PreContainerPlane** est situé juste avant la région d'eau, après le bloc de PMMA. C'est ici que l'effet du PMMA est le plus visible.

Photons entrant dans l'eau

Statistiques des photons au PreContainerPlane

Observable	Air	W seul	PMMA + W	Variation
Mean $\langle N_\gamma \rangle$	1.155	1.155	1.129	-2.3%
Std Dev	0.990	0.990	0.982	-0.8%
Énergie moyenne	1124 keV	1124 keV	1111 keV	-1.2%
Std Dev énergie	783 keV	783 keV	774 keV	-1.1%
Entries ($E > 0$)	2.79×10^7	2.79×10^7	2.76×10^7	-1.1%

Le PMMA (5 mm, $\rho \approx 1.18$ g/cm³) absorbe environ **2–3%** des photons incidents et réduit légèrement leur énergie moyenne par diffusion Compton. Cet effet est modéré car le PMMA est un matériau de faible Z (H, C, O).

Électrons entrant dans l'eau – Changement majeur

Statistiques des électrons au PreContainerPlane

Observable	Air	W seul	PMMA + W	Facteur
Mean $\langle N_{e^-} \rangle$	3.99×10^{-4}	3.99×10^{-4}	4.86×10^{-3}	$\times 12.2$
Std Dev	0.0208	0.0208	0.0735	$\times 3.5$
Std Dev énergie	333 keV	333 keV	273 keV	$\times 0.82$
Entries ($E > 0$)	9 607	9 607	114 723	$\times 11.9$

Le PMMA produit 12 fois plus d'électrons que l'air !

Mean : $3.99 \times 10^{-4} \rightarrow 4.86 \times 10^{-3}$ (facteur $\times 12.2$)

Entries : 9 607 \rightarrow 114 723 (facteur $\times 11.9$)

- **Effet Compton** : Processus dominant dans le PMMA pour les photons de 100 keV à 1 MeV
- **Composition** : Le PMMA (C₅H₈O₂) contient des éléments légers favorisant le Compton
- **Énergie plus élevée** : 478 keV vs 346 keV indique des électrons Compton de haute énergie
- **Épaisseur** : 5 mm de PMMA offre suffisamment de matière pour les interactions

8.11 Effet du PMMA sur le PostContainerPlane

Photons transmis

Statistiques des photons transmis au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Variation
Mean $\langle N_\gamma \rangle$	1.027	1.000	-2.6%
Std Dev	0.943	0.933	-1.1%
Énergie moyenne	1069 keV	1058 keV	-1.0%
Entries	2.57×10^7	2.45×10^7	-4.7%

Photons rétrodiffusés (backscatter)

Statistiques des photons backscatter au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Variation
Mean $\langle N_\gamma \rangle$	8.11×10^{-3}	8.08×10^{-3}	$\sim 0\%$
Std Dev	0.0956	0.0954	$\sim 0\%$
Énergie moyenne	80.7 keV	81.1 keV	$\sim 0\%$
Entries	189 338	188 544	$\sim 0\%$

Le **backscatter des photons est identique** dans les deux configurations.

Il est entièrement dominé par la **fluorescence X du tungstène**(pic à 60–80 keV), et le PMMA n'a aucune influence sur ce processus

Électrons transmis

Statistiques des électrons transmis au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Facteur
Mean $\langle N_{e-} \rangle$	4.13×10^{-4}	4.18×10^{-3}	$\times 10.1$
Std Dev	0.0210	0.0681	$\times 3.2$
Énergie moyenne	290 keV	477 keV	$\times 1.64$
Entries	9 973	99 092	$\times 9.9$

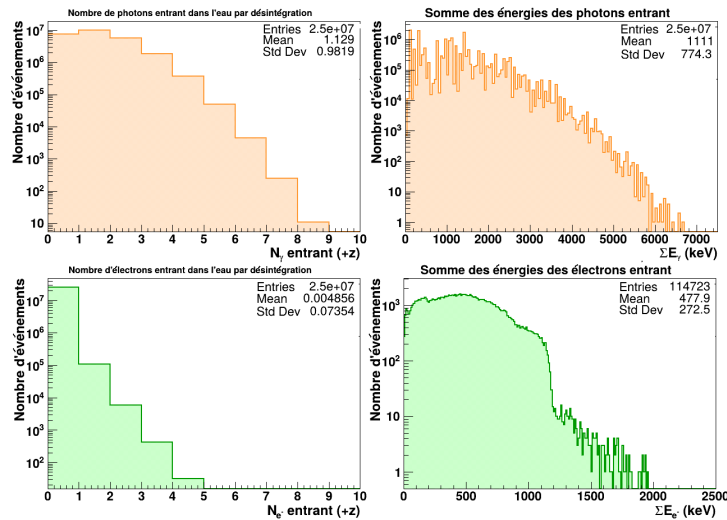
Électrons rétrodiffusés (backscatter)

Statistiques des électrons backscatter au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Facteur
Mean $\langle N_{e-} \rangle$	1.66×10^{-3}	3.38×10^{-3}	$\times 2.0$
Std Dev	0.0453	0.0648	$\times 1.4$
Énergie moyenne	156 keV	267 keV	$\times 1.71$
Entries	37 350	75 342	$\times 2.0$

8.12 Analyse des figures

Figure PreContainer (4 panneaux)



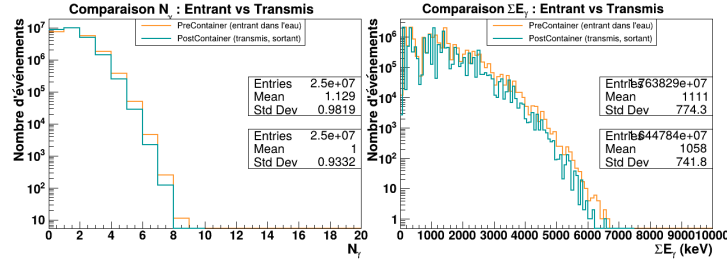
Photons (panneaux supérieurs)

- Distribution du nombre de photons similaire mais légèrement décalée vers la gauche
- Mean = 1.129 (vs 1.155 sans PMMA) : perte de $\sim 2\%$
- Spectre d'énergie quasi-identique avec pics des raies Eu-152 visibles

Électrons (panneaux inférieurs) – Changement majeur :

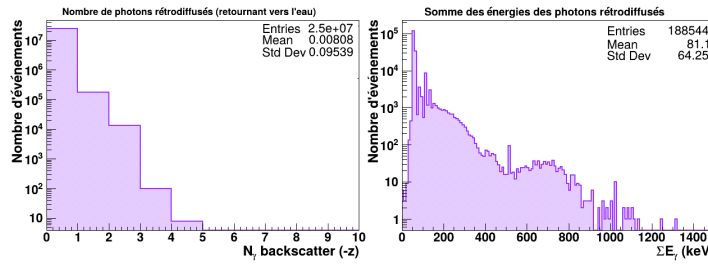
- Distribution beaucoup plus étendue : jusqu'à $N_{e-} = 5$ (vs 3–4 sans PMMA)
- Nombre d'entrées $\times 12$: 114 723 vs 9 607
- Spectre d'énergie en forme de “bosse” caractéristique de l'effet Compton
- Pic vers 500–600 keV avec coupure nette à ~ 1400 keV (bord Compton)

Figure Comparaison Pre/Post (photons)



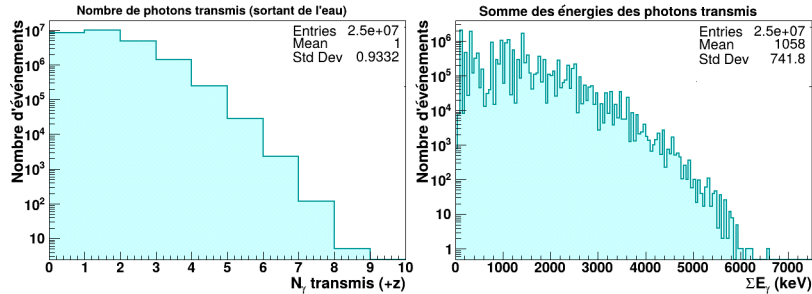
- *Perte de photons* : $(1.129 - 1.000)/1.129 = 11.4\%$ (vs 11.1% sans PMMA)
- Les spectres Pre et Post sont quasi-superposés
- La forme spectrale n'est pas modifiée par le passage à travers l'eau (en air) et le tungstène

Figure Photons backscatter



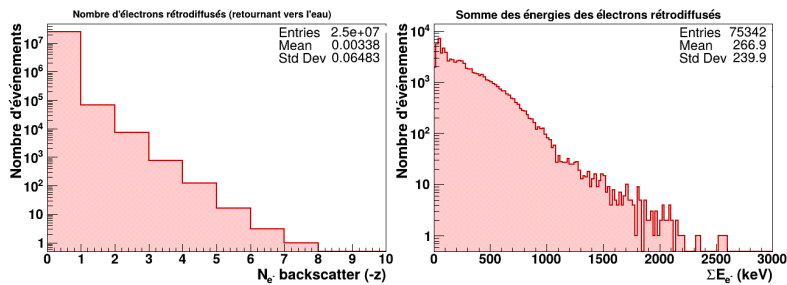
- Pic de fluorescence X du tungstène toujours dominant à 60–80 keV
- Raies K_{α} (58–59 keV) et K_{β} (67–69 keV) du W
- Identique à la configuration sans PMMA → le tungstène domine le backscatter γ
- Queue Compton jusqu'à ~1200 keV

Figure Électrons transmis



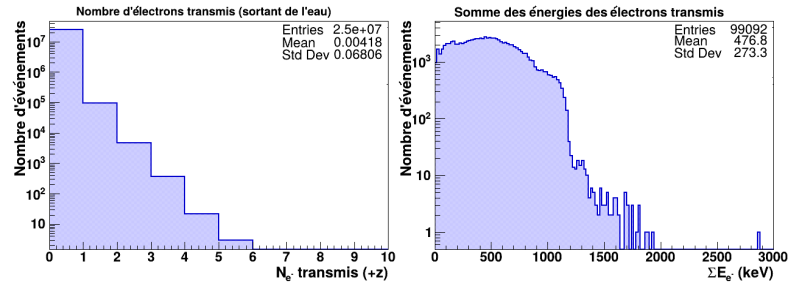
- Spectre très différent de la configuration sans PMMA
- Forme en "bosse" avec pic à ~500 keV
- Queue jusqu'à ~1500 keV (électrons Compton de haute énergie)
- Entries : 99 092 (vs 9 973 sans PMMA) → facteur $\times 10$

Figure Électrons backscatter



- Distribution plus large : jusqu'à $N_{e-} = 8$ (vs 7 sans PMMA)
- Spectre d'énergie élargi avec pic à ~200–300 keV
- Queue étendue jusqu'à ~2500 keV (vs 1800 keV sans PMMA)
- Doublement du nombre d'électrons backscatter : 75 342 vs 37 350

Figure Électrons transmis



Spectre très différent de la configuration sans PMMA

- Forme en "bosse" avec pic à ~ 500 keV
- Queue jusqu'à ~ 1500 keV (électrons Compton de haute énergie)
- Entries : 99 092 (vs 9 973 sans PMMA) \rightarrow facteur $\times 10$

9 Résultats avec la configuration complète (eau+Tungstene+PMMA)

Configuration

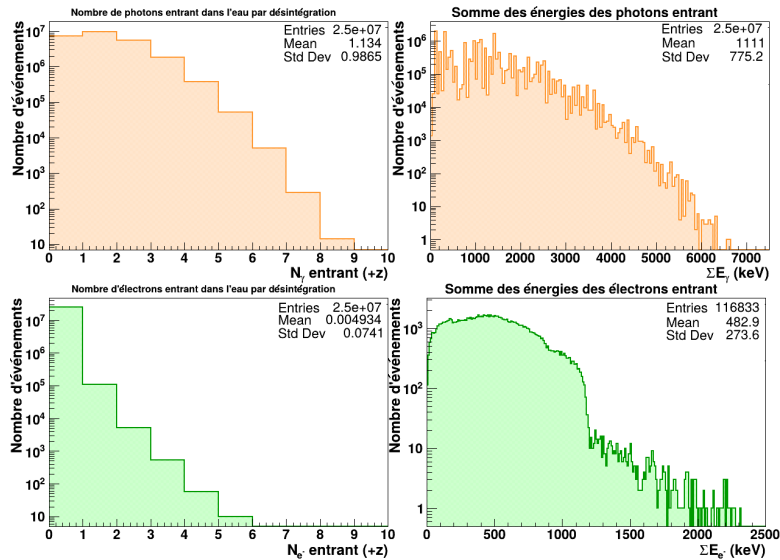
- Le matériau à l'intérieur du container est converti en eau, sous forme de 5 anneaux concentriques de 5 mm de largeur chacun
- L'eau est précédée d'une **plaque de PMMA de 5 mm d'épaisseur**, pour améliorer la conversion des photons incidents et la **production d'électrons secondaires** dans l'eau du container. L'objectif de ce plan est d'améliorer le build-up électronique, sous forme de 5 anneaux concentriques de 5 mm de largeur chacun
- Le fond du container d'eau est tapissé d'une **feuille de tungstène** pour améliorer la **rétrodiffusion des électrons** produit par les photons incidents dans la feuille de tungstène. L'objectif de ce plan est d'améliorer le build-up électronique

9.1 Analyse des flux de particules aux interfaces

Cette section présente l'analyse détaillée des flux de photons et d'électrons aux plans pré-container (entrée dans l'eau) et post-container (sortie de l'eau), permettant d'établir un bilan complet du transport des particules à travers le volume d'eau.

Plan pré-container : particules entrant dans l'eau

Le plan **pré-container** est positionné juste avant l'entrée dans le volume d'eau. La figure suivante présente les distributions du nombre et de l'énergie des particules entrant dans l'eau.



Distributions des particules entrant dans l'eau (plan pré-container). *En haut* : photons (nombre et énergie). *En bas* : électrons (nombre et énergie)

Statistiques des photons entrant dans l'eau

Paramètre	Valeur
Nombre moyen de photons par événement	1.134
Écart-type	0.986
Énergie moyenne par photon	1111 keV
Écart-type de l'énergie	775 keV
Nombre total de photons (sur 25M evt)	~28.4 millions

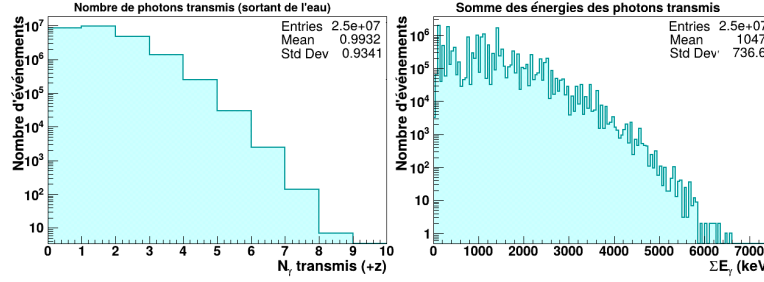
La distribution du nombre de photons par événement présente un pic principal à 1-2 photons, avec une queue s'étendant jusqu'à 8-9 photons pour les événements à multiplicité élevée. L'énergie moyenne de 1111 keV est cohérente avec le spectre Eu-152 qui comprend plusieurs raies intenses au-dessus de 1 MeV (964, 1086, 1112, 1408 keV).

Les électrons entrant dans l'eau proviennent principalement des interactions Compton des photons dans les matériaux en amont (air, structures du container). Leurs caractéristiques sont :

- **Nombre moyen:** 0.0049 électrons/événement (soit environ 1 électron pour 200 événements)
- **Énergie moyenne:** 485 keV
- **Distribution d'énergie avec un maximum autour de 400-600 keV**

La faible multiplicité électronique confirme que le rayonnement incident est essentiellement photonique.

Plan post-container : particules sortant de l'eau

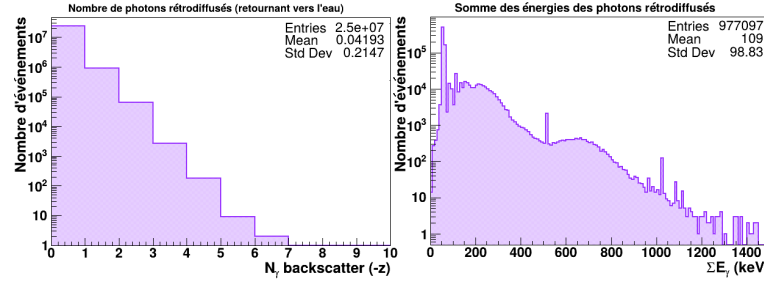


Photons transmis à travers l'eau (direction $+z$). *Gauche* : multiplicité. *Droite* : distribution en énergie.

Bilan des photons transmis

Paramètre	Entrant	Transmis
Nombre moyen/événement	1.134	0.993
Énergie moyenne (keV)	1111	1046
Taux de transmission	87.6%	
Perte d'énergie moyenne	65 keV (5.8%)	

Les photons transmis présentent un taux de transmission élevé de 87.6%, cohérent avec la faible épaisseur d'eau (5 mm), et une perte d'énergie moyenne de 65 keV due principalement à la diffusion Compton.

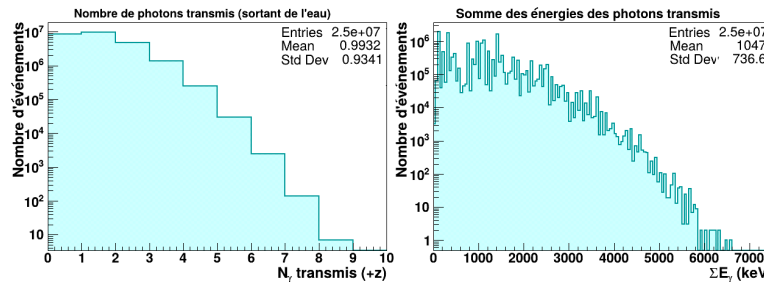


Photons rétrodiffusés par l'eau (direction $-z$). *Gauche* : multiplicité. *Droite* : distribution en énergie.

Caractéristiques des photons rétrodiffusés

Paramètre	Valeur
Nombre moyen par événement	0.042
Événements avec rétrodiffusion	976 688 (3.9%)
Énergie moyenne	109 keV
Écart-type de l'énergie	99 keV

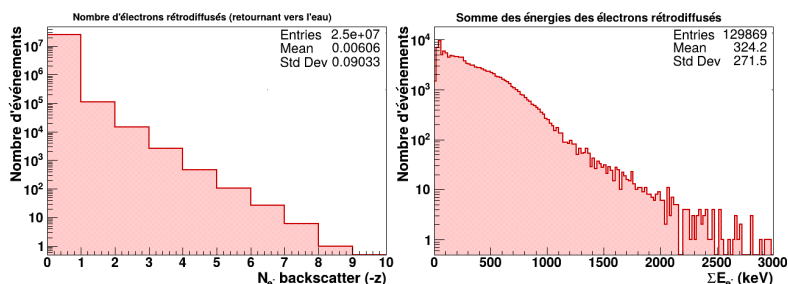
Les photons rétrodiffusés présentent des caractéristiques typiques de la diffusion Compton à grand angle : faible multiplicité (0.042/evt) et énergie moyenne de 109 keV, nettement inférieure à l'énergie incidente.



Électrons transmis à travers l'eau (direction $+z$). *Gauche* : multiplicité. *Droite* : distribution en énergie.

Bilan des électrons transmis

Paramètre	Entrant	Transmis
Nombre moyen/événement	0.00494	0.00422
Énergie moyenne (keV)	485	485
Taux de transmission	85.5%	



Électrons rétrodiffusés par l'eau (direction $-z$) *Gauche* : multiplicité. *Droite* : distribution en énergie.

Caractéristiques des électrons rétrodiffusés

Paramètre	Valeur
Nombre moyen par événement	0.0061
Événements avec rétrodiffusion	130 156 (0.52%)
Énergie moyenne	323 keV

Fait remarquable

- Il y a **plus d'électrons rétrodiffusés que d'électrons entrants** (0.0061 vs 0.0049 par événement)
- Ceci indique que la majorité des électrons rétrodiffusés sont des **électrons secondaires** créés dans l'eau par les interactions des photons (effet Compton, photoélectrique)

Bilan global du transport

Bilan complet du transport des particules à travers l'eau

Particule	Entrant	Transmis	Backscatter	Trans. (%)	Back. (%)
Photons	1.134	0.993	0.042	87.6	3.7
Électrons	0.00494	0.00422	0.00608	85.5	123*

* Rapport >100% dû à la création d'électrons secondaires dans l'eau

L'analyse des flux révèle :

- **Transparence de l'eau**: Taux de transmission des photons de 87.6%
- **Rétrodiffusion Compton**: 3.7% des photons rétrodiffusés avec $\langle E \rangle = 109$ keV
- **Production d'électrons secondaires**: Le nombre d'électrons rétrodiffusés dépasse celui des entrants

9.2 Dose déposée par anneau

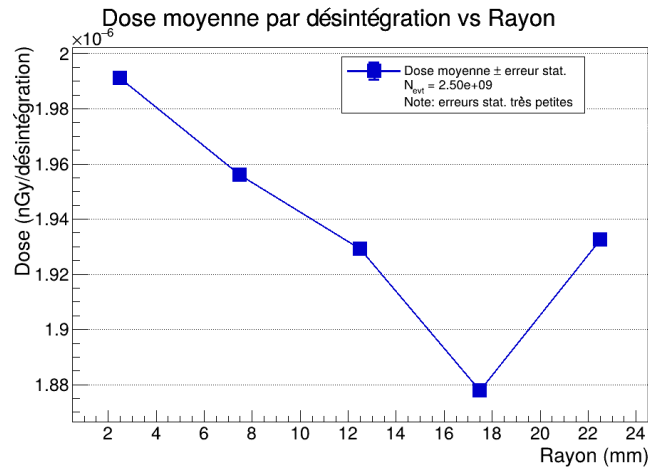
Le tableau suivant présente les résultats de dose pour chaque anneau d'eau.

Dose déposée dans chaque anneau d'eau

Anneau	Masse (g)	E_{dep} (MeV)	Dose totale (nGy)	Dose/evt (nGy)	Événements avec dépôt
0	0.3927	1.220×10^4	4.977×10^3	1.991×10^{-6}	70 556
1	1.1781	3.596×10^4	4.890×10^3	1.956×10^{-6}	206 603
2	1.9635	5.911×10^4	4.823×10^3	1.929×10^{-6}	337 717
3	2.7489	8.055×10^4	4.695×10^3	1.878×10^{-6}	458 070
4	3.5343	1.066×10^5	4.831×10^3	1.933×10^{-6}	580 703
Total	9.8175	2.944×10^5	2.422×10^4	9.687×10^{-6}	—

Distribution radiale de la dose

La figure suivante présente la dose moyenne par désintégration en fonction du rayon.

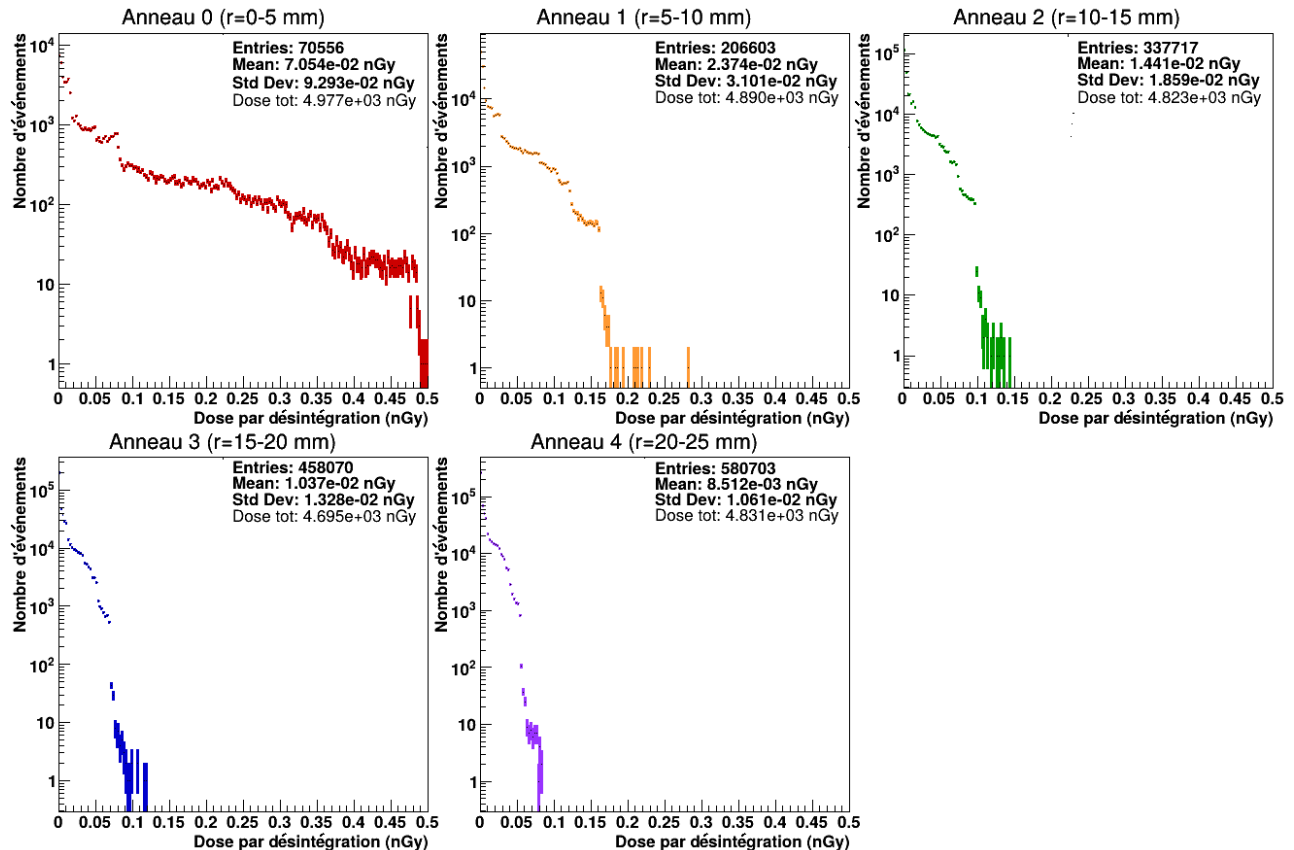


Dose moyenne par désintégration en fonction du rayon. Les points représentent la dose moyenne calculée sur 25 millions d'événements. La dose varie entre 1.88×10^{-6} nGy et 1.99×10^{-6} nGy, soit une variation relative de seulement 6%.

La dose moyenne par désintégration présente un profil remarquablement plat en fonction du rayon, avec des valeurs comprises entre 1.88×10^{-6} nGy (anneau 3) et 1.99×10^{-6} nGy (anneau 0). Cette quasi-uniformité s'explique par plusieurs facteurs physiques :

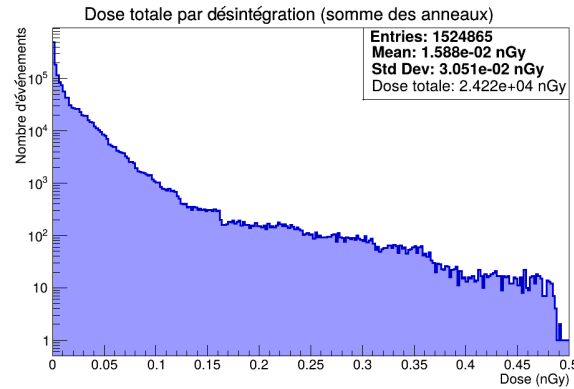
1. **Géométrie du faisceau**: La source émet dans un cône de demi-angle 20° . À la distance source-eau ($z \approx 100$ mm), le rayon du faisceau est $r = 100 \times \tan(20) \approx 36$ mm, ce qui englobe largement tous les anneaux (rayon maximal de 25 mm).
2. **Compensation géométrique**: Les anneaux extérieurs interceptent plus de photons (surface plus grande) mais ont aussi une masse plus importante. La dose étant le rapport énergie/masse, ces effets se compensent partiellement.
3. **Faible épaisseur d'eau**: Avec seulement 5 mm d'eau, l'atténuation latérale est négligeable pour les gammas du spectre Eu-152.
4. **Distance source-détecteur**: La variation de distance solide entre le centre (~ 100 mm) et le bord (~ 103 mm) n'est que de 3%, produisant une variation en $1/r^2$ négligeable.

Distributions de dose par événement

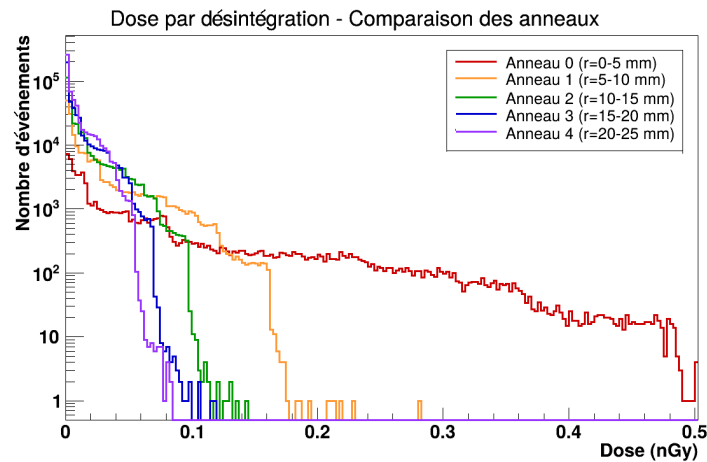


Distributions de la dose par désintégration pour chaque anneau. L'échelle verticale est logarithmique. Le panneau inférieur droit présente le résumé des doses totales.

Distributions de dose total



Distributions de la dose total par désintégration. L'échelle verticale est logarithmique.



Superposition des distributions de dose pour les 5 anneaux. Les distributions sont similaires en forme mais décalées vers les faibles doses pour les anneaux extérieurs.

Les distributions précédentes montrent que :

- La dose moyenne par événement *avec dépôt* diminue avec le rayon : de 6.7×10^{-2} nGy (anneau 0) à 8.5×10^{-3} nGy (anneau 4)
- Cette diminution reflète l'augmentation de la masse des anneaux extérieurs
- Le nombre d'événements avec dépôt augmente avec le rayon (surface d'interception plus grande)

Comparaison avec les attentes théoriques

Pour une source isotrope, la fluence à la distance d serait :

$$\Phi = \frac{N_\gamma}{4\pi d^2}$$

Avec un cône de 20° , la fraction d'angle solide interceptée est :

$$f_\Omega = \frac{1 - \cos(20)}{2} \approx 0.030 = 3.0\%$$

Conclusion

- La **dose uniforme observée** confirme que le **faisceau collimaté illumine uniformément** la surface d'eau dans les limites des anneaux simulés
- L'**uniformité de la dose dans la direction radiale** valide la géométrie du dispositif "**puits couronne**" pour l'irradiation homogène d'échantillons d'eau

10 Conclusions avec la configuration complète

Les paramètres dosimétriques ont été déterminés par simulation Monte Carlo Geant4 avec 25 millions de désintégrations d'Europium-152.

Paramètres dosimétriques issus de la simulation

Paramètre	Valeur
Dose moyenne par desintegration (anneau central)	7×10^{-2} nGy/desintegration
Activité de la source (novembre 2025)	42.4 kBq
Demi-vie de l'Europium-152	13.517 ans

La conversion entre nanogray (nGy) et centigray (cGy) s'effectue selon :

$$1 \text{ nGy} = 10^{-9} \text{ Gy} = 10^{-7} \text{ cGy}$$

Ainsi, pour une dose cible D_{cible} exprimée en cGy :

$$D_{\text{cible}} (\text{nGy}) = D_{\text{cible}} (\text{cGy}) \times 10^7$$

Nombre de désintégrations nécessaires

Le nombre de désintégrations N requis pour atteindre une dose cible est :

$$N = \frac{D_{\text{cible}}}{\dot{D}} = \frac{D_{\text{cible}} (\text{cGy}) \times 10^7}{7 \times 10^{-2} \text{ nGy}}$$

Application numérique pour 50 cGy

$$N = \frac{50 \times 10^7}{7 \times 10^{-2}} = \frac{5 \times 10^8}{7 \times 10^{-2}} = 7.14 \times 10^9 \text{ désintégrations}$$

Le temps d'irradiation t est donné par :

$$t = \frac{N}{A}$$

où A est l'activité de la source en Becquerel (Bq = désintégrations/seconde).

Correction de décroissance radioactive

L'activité décroît selon :

$$A(t) = A_0 \times e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times t}$$

Pour l'Europium-152 ($T_{1/2} = 13.517$ ans), la décroissance sur 2 mois est négligeable ($< 1\%$). On utilise donc $A \approx 42.4 \text{ kBq} = 4.24 \times 10^4 \text{ Bq}$.

Calcul pour 50 cGy

$$t_{50 \text{ cGy}} = \frac{7.14 \times 10^9}{4.24 \times 10^4} = 1.68 \times 10^5 \text{ s} \approx 47 \text{ heures} \approx 2 \text{ jours}$$

Calcul pour 5 cGy

$$t_5 \text{ cGy} = \frac{t_{50 \text{ cGy}}}{10} = \frac{47}{10} = 4.7 \text{ heures} \approx 4 \text{ h } 42 \text{ min}$$

Tableau récapitulatif

Temps d'irradiation en fonction de la dose cible ($A = 42.4 \text{ kBq}$)

Dose cible (cGy)	Dose cible (nGy)	Désintégrations nécessaires	Temps d'irradiation
0.5	5×10^6	7.1×10^8	28 min
1	1×10^7	1.4×10^9	56 min
5	5×10^7	7.1×10^9	4 h 42 min
10	1×10^8	1.4×10^{10}	9 h 24 min
20	2×10^8	2.9×10^{10}	18 h 48 min
50	5×10^8	7.1×10^{10}	47 h (2 jours)
100	1×10^9	1.4×10^{11}	94 h (4 jours)