

# 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 8, 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.

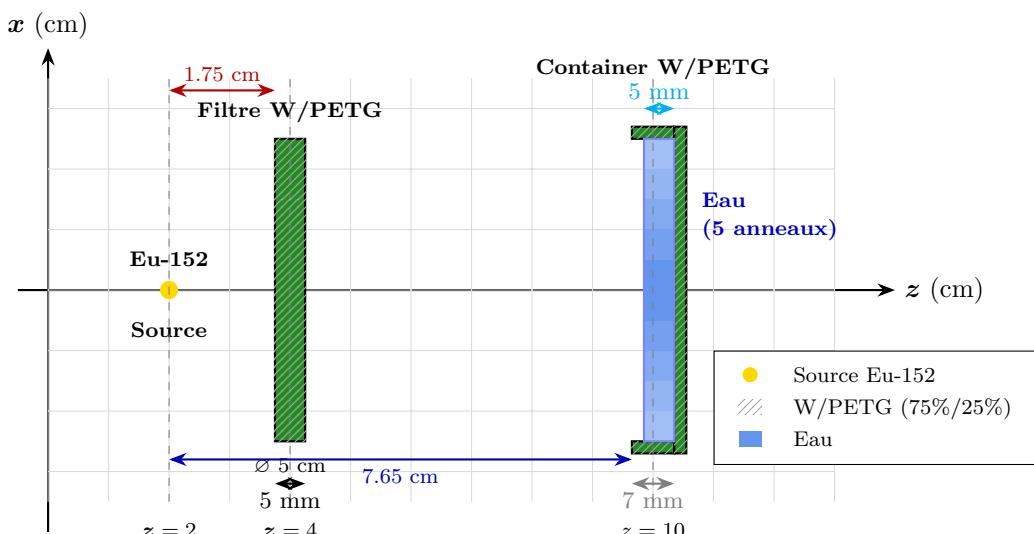
## Contents

# 1 Configuration de la simulation

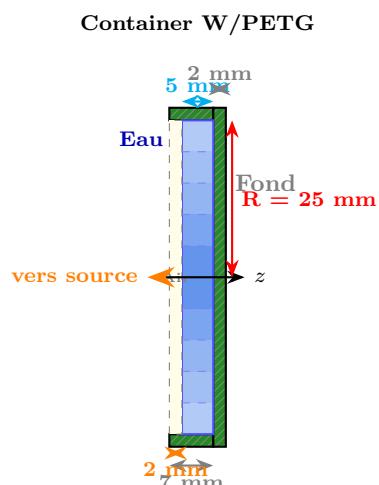
## Nouvelle Configuration

- Une source d'**Eur152** de 44 KBq a une position  $z$  de 2 cm
- Une **plaqué 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  $100 \times 100$  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

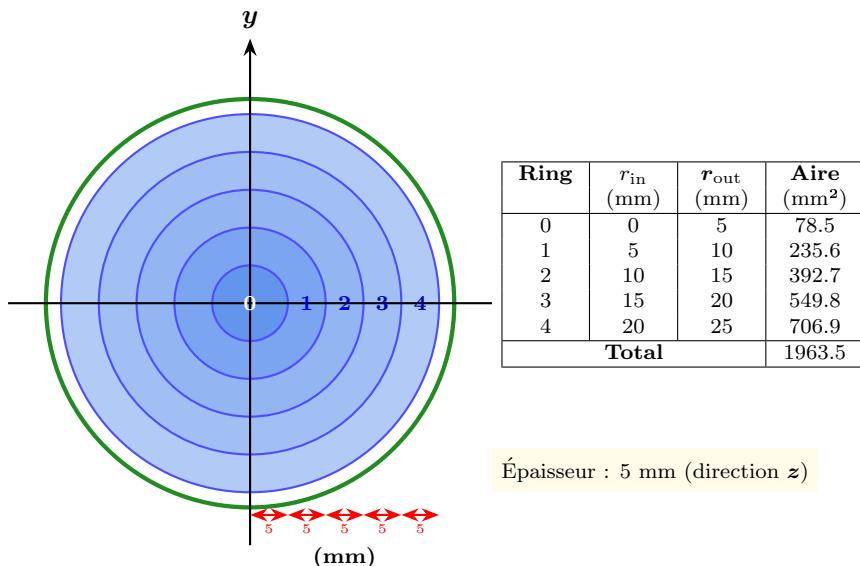


Coupe longitudinale (plan  $xz$ ) du détecteur "Puits Couronne". L'eau (5 mm) est positionnée contre la face intérieure haute du container (le fond).



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	
Filtre W/PETG (centre)	4.0 cm	Épaisseur 5 mm
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	Épaisseur fond 2 mm
Eau (face basse)	9.85 cm	Vers la source
Eau (face haute)	10.35 cm	Contre le fond interne

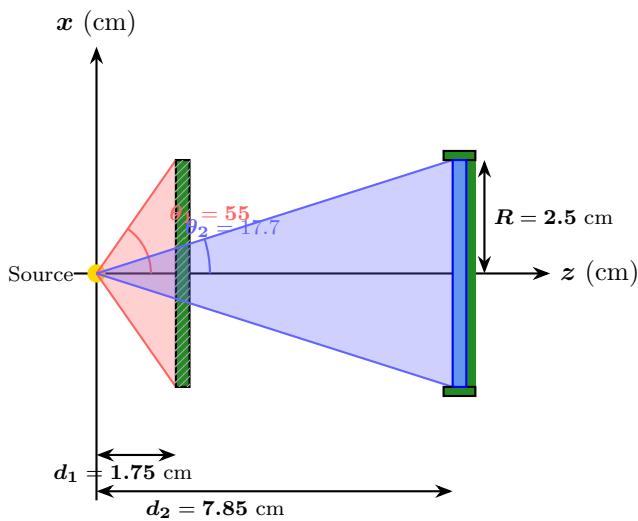
## 2.3 Visualisation des angles solides

## 3 Angles solides et normalisation

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

### Question

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



Élément	Distance $\theta$	$\Omega$ (sr)	% de $4\pi$	
Cône émission	—	60	$\pi$	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  $\Omega$  d'un cône de demi-angle  $\theta$  vu depuis son sommet est :

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

#### Cône de 20° (simulation optimisée)

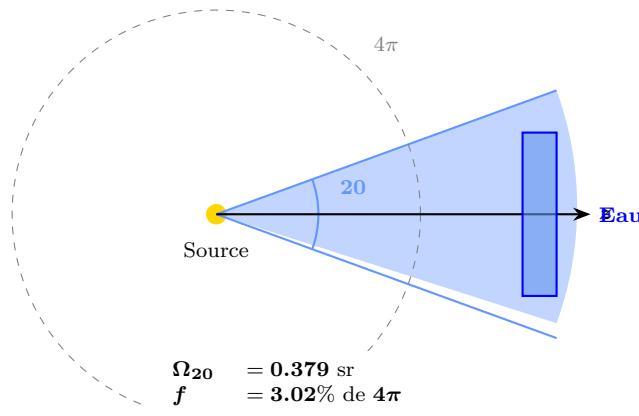
$$\begin{aligned}\Omega_{20} &= 2\pi(1 - \cos 20) \\ &= 2\pi(1 - 0.9397) \\ &= 2\pi \times 0.0603 \\ &= 0.379 \text{ sr}\end{aligned}$$

#### Sphère complète

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

La fraction de l'émission  $4\pi$  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  $N_{\text{sim}}$  événements (désintégrations) dans un cône de demi-angle  $\theta_{\text{cone}}$ , on échantillonne uniquement la fraction  $f$  de l'émission totale.

#### Principe fondamental

Ces  $N_{\text{sim}}$  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  $4\pi$

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

- $N_{\text{sim}}$  = 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  $20^\circ$  :

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

## 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 $\theta$	<b>20</b>
Fraction $f$	0.0302
Gammas par désintégration $\bar{n}_\gamma$	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 $N_{\text{sim}}$ événements

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

$N_{\text{sim}}$	$T_{\text{irr}}$
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  $D_{\text{sim}}$  (en Gy) pour  $N_{\text{sim}}$  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

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

## 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  $N_{\text{sim}}$  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  $4\pi$

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
<b>H0</b>	nGammasPerEvent	15	-0.5	14.5
<b>H1</b>	energySpectrum	1500	0	1500 keV
<b>H2</b>	totalEnergyPerEvent	500	0	5000 keV
<b>H3</b>	doseRing0	200	0	200 keV
<b>H4</b>	doseRing1	200	0	200 keV
<b>H5</b>	doseRing2	200	0	200 keV
<b>H6</b>	doseRing3	200	0	200 keV
<b>H7</b>	doseRing4	200	0	200 keV
<b>H8</b>	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 gammes primaires générées
2	totalEnergy	Double	Énergie totale des primaires (keV)
3	nTransmitted	Int	Nombre de gammes transmis à travers le filtre
4	nAbsorbed	Int	Nombre de gammes absorbés par le filtre
5	nScattered	Int	Nombre de gammes 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 azimuthal 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 gammes 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
<code>fRingTotalEnergy[i]</code>	Énergie totale déposée dans l'anneau $i$ (MeV)
<code>fRingEventCount[i]</code>	Nombre d'événements avec dépôt dans l'anneau $i$
<code>fGammasPreFilterPlane</code>	Gammas traversant le plan pré-filtre
<code>fGammasPostFilterPlane</code>	Gammas traversant le plan post-filtre
<code>fGammasPreWaterPlane</code>	Gammas traversant le plan pré-eau
<code>fGammasPostWaterPlane</code>	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 ( $4\pi$ )	44 kBq
Demi-angle du cône	20°
Dose totale dans l'eau	10.39 MeV
Débit de dose moyen	656 nGy h <sup>-1</sup>

### 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 $\bar{n}_\gamma$ /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 :

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

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

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

#### Cohérence Génération

L'écart de 0.08% est bien inférieur à l'incertitude statistique attendue ( $\sim 1/\sqrt{N} \approx 0.09\%$ ). 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
<b>Transmission (plans)</b>		<b>46.72%</b>
Pré-eau	855 548	96.5 mm
Post-eau	647 136	105.5 mm
<b>Transmission eau (plans)</b>		<b>75.64%</b>

*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 :

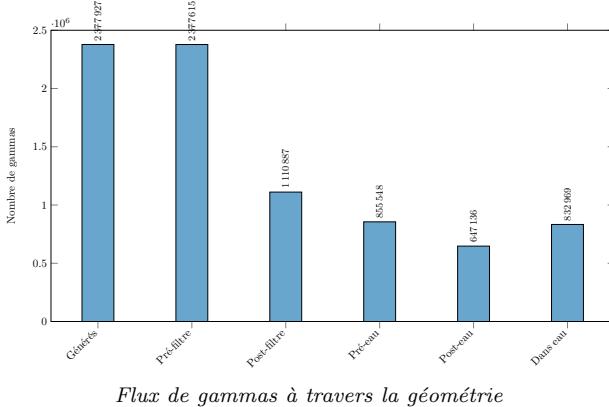
- Les interactions Compton (diffusion hors du plan)
- Les gammas absorbés par effet photoélectrique
- La contribution des gammas de plus basse énergie

### 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



## Bilan Quantitatif

Étape	Nombre	% du total généré
Gammes 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 gammes qui :

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

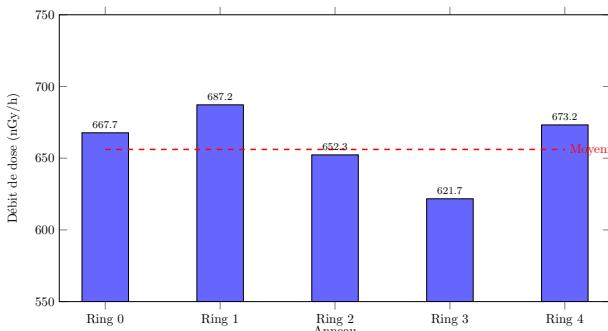
## 5.4 Dose dans les Anneaux d'Eau

### 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
<b>Total</b>	0–25	10 393 910	39 477	9.817	<b>656.1</b>

*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 ( $\text{mm}^2$ )	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 ( $4\pi$ )	44 kBq
Demi-angle du cône $\theta$	$20^\circ$
Fraction d'angle solide $f$	3.015%
Événements simulés $N_{\text{sim}}$	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 :

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

### Vérification

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

Durée correspondante pour une source  $4\pi$  :

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

#### Cohérence Renormalisation

Le temps d'irradiation de 15.5 min correspond bien à 1.23 millions de désintégrations dans un cône de  $20^\circ$  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 l' $^{152}\text{Eu}$  (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 l' $^{152}\text{Eu}$ .

Taux d'absorption des raies gamma de l' $^{152}\text{Eu}$  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	$98.06 \pm 0.03$
244.70	7.5	75 251	38 758	36 570	$51.50 \pm 0.18$
344.28	26.5	265 450	74 040	191 783	$27.89 \pm 0.09$
411.12	2.2	22 369	4 581	17 823	$20.48 \pm 0.27$
443.97	2.8	28 541	4 954	23 623	$17.36 \pm 0.22$
778.90	12.9	129 290	8 713	120 697	$6.74 \pm 0.07$
867.38	4.2	42 550	2 371	40 212	$5.57 \pm 0.11$
964.08	14.6	146 493	6 992	139 620	$4.77 \pm 0.06$
1085.8	10.2	102 060	4 133	97 999	$4.05 \pm 0.06$
1112.0	13.6	136 706	5 177	131 631	$3.79 \pm 0.05$
1408.0	21.0	210 710	6 219	204 600	$2.95 \pm 0.04$
<b>Total</b>	<b>143.9</b>	<b>1 443 552</b>	<b>434 560</b>	<b>1 010 078</b>	<b><math>30.10 \pm 0.04</math></b>

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

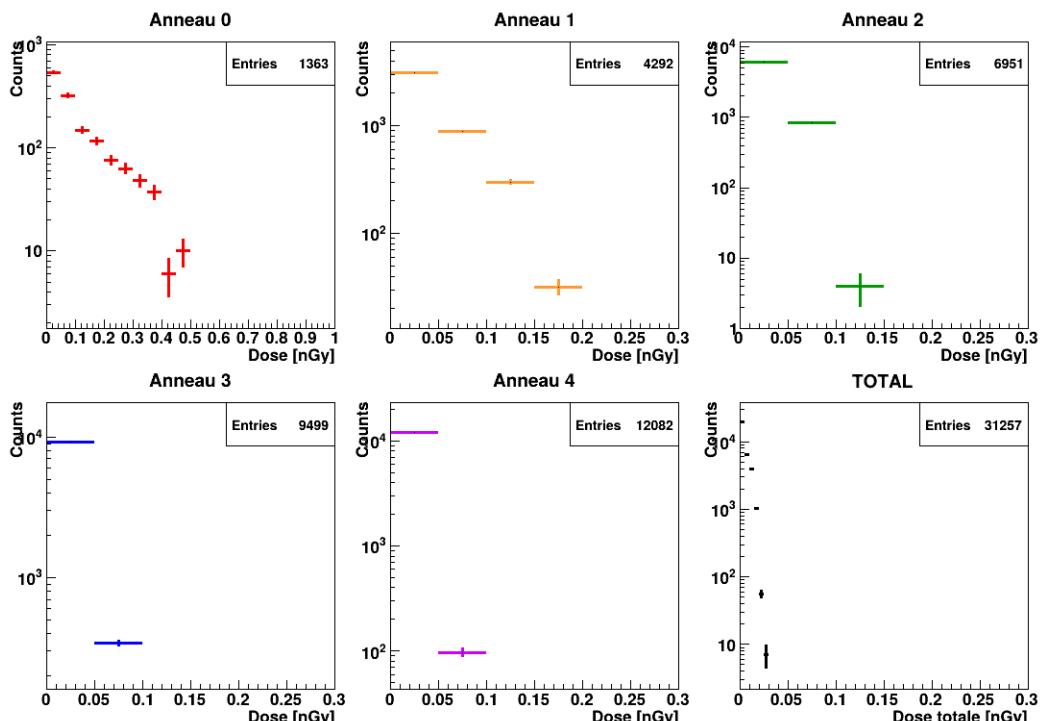
$E_\gamma$ (keV)	Absorption (%)	$E_\gamma$ (keV)	Absorption (%)
121.78	$98.06 \pm 0.03$	867.38	$5.57 \pm 0.11$
244.70	$51.50 \pm 0.18$	964.08	$4.77 \pm 0.06$
344.28	$27.89 \pm 0.09$	1085.87	$4.05 \pm 0.06$
411.12	$20.48 \pm 0.27$	1112.07	$3.79 \pm 0.05$
443.97	$17.36 \pm 0.22$	1408.01	$2.95 \pm 0.04$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

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

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

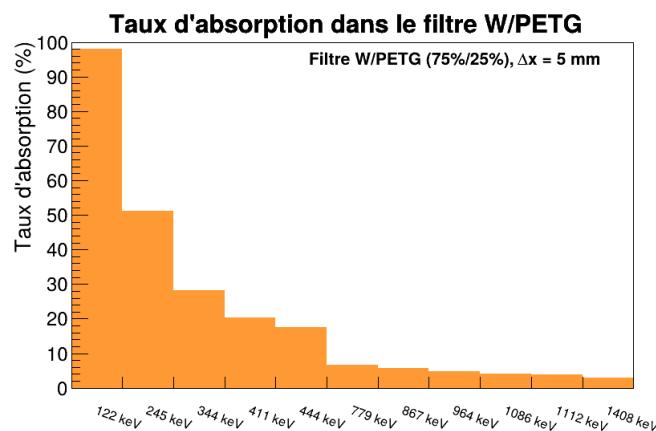
Anneau	$r_{in}$ (mm)	$r_{out}$ (mm)	Masse (g)	$E_{dep}$ (MeV)	Dose (nGy)	Dose/désint. (nGy)
0	0	5	0.393	$3.91 \times 10^2$	159.7	$1.09 \times 10^{-1}$
1	5	10	1.178	$1.14 \times 10^3$	155.0	$3.61 \times 10^{-2}$
2	10	15	1.964	$1.86 \times 10^3$	151.5	$2.17 \times 10^{-2}$
3	15	20	2.749	$2.50 \times 10^3$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

### 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

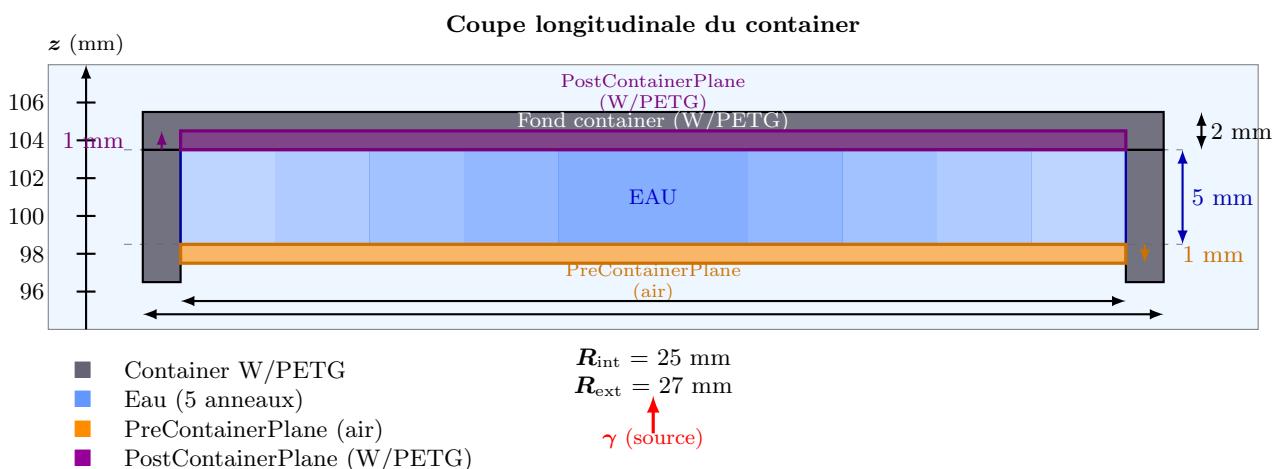
## 7 Ajout de plan de comptage avant et après le container d'eau

### 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 plans 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 <sub>2</sub> 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
<b>PreContainerPlane</b>	<b>98.0</b>	<b>0</b>	<b>1.0</b>	<b>Air</b>	<b>PreContainerPlaneLog</b>
<b>PostContainerPlane</b>	<b>104.0</b>	<b>0</b>	<b>1.0</b>	<b>W/PETG</b>	<b>PostContainerPlaneLog</b>

### 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 ( $\gamma$ )
- **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 ( $\gamma$ )
- **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

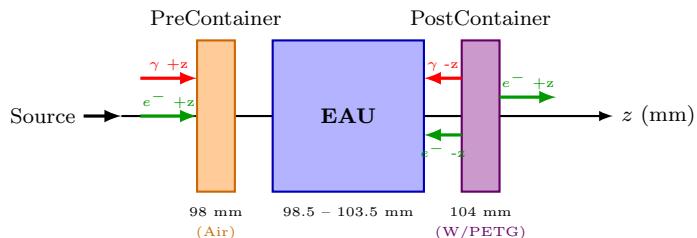
- **Type de particule** : électron ( $e^-$ )
- **Direction** :  $p_z > 0$  (vers l'eau, direction +z)

```
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

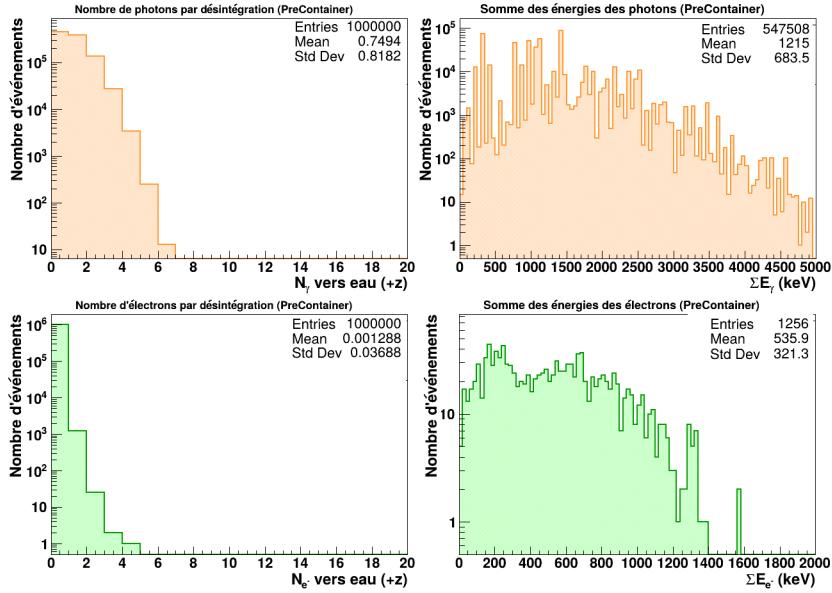
Plan	Particule	Variables
PreContainerPlane	$\gamma$ vers eau (+z)	nPhotons,sumEPhotons_keV
	$e^-$ vers eau (+z)	nElectrons, sumEElectrons_keV
PostContainerPlane	$\gamma$ depuis eau (-z)	nPhotons_back,sumEPhotons_back_keV
	$e^-$ depuis eau (-z) vers eau (+z)	nElectrons_back,sumEElectrons_back_keV nElectrons_fwd,sumEElectrons_fwd_keV

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

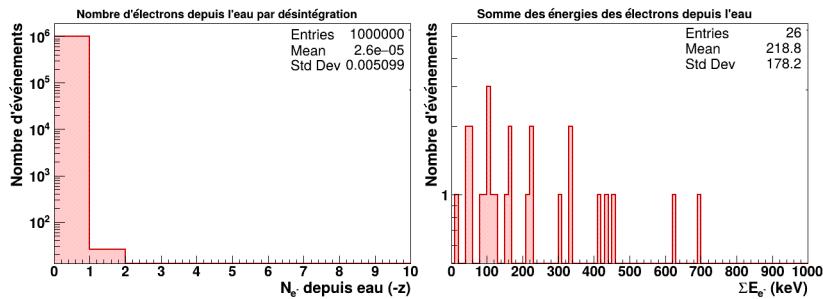
#### Filtre W/PETG 5mm

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

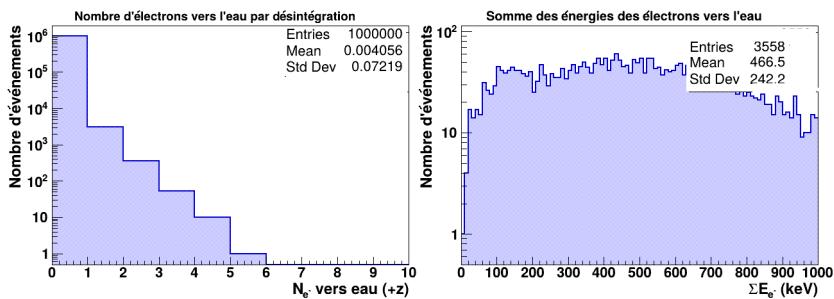
- photons et électrons dans le **PreContainerPlane**
- photons dans le **PostContainerPlane**
- électrons "backward" retrodiffusés dans le **PostContainerPlane**
- électrons "forward" diffusés dans le **PostContainerPlane**



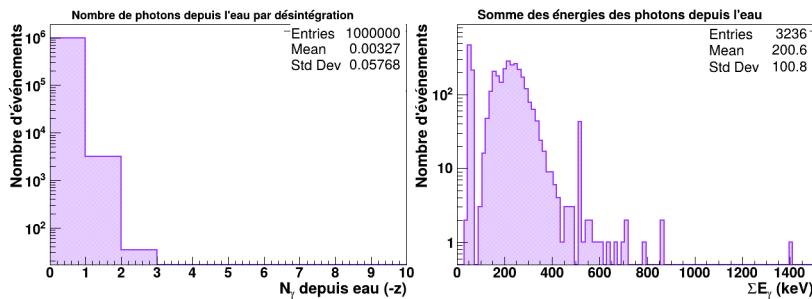
photons et électrons dans le **PreContainerPlane** avec le filtre de **W/PETG** de 5mm



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	$4.407 \times 10^2$	$1.798 \times 10^2$	$6.762 \times 10^{-2}$	2 659
1 (r=5–10 mm)	1.1781	$1.307 \times 10^3$	$1.778 \times 10^2$	$2.274 \times 10^{-2}$	7 818
2 (r=10–15 mm)	1.9635	$2.184 \times 10^3$	$1.782 \times 10^2$	$1.356 \times 10^{-2}$	13 144
3 (r=15–20 mm)	2.7489	$2.970 \times 10^3$	$1.731 \times 10^2$	$9.703 \times 10^{-3}$	17 843
4 (r=20–25 mm)	3.5343	$3.970 \times 10^3$	$1.800 \times 10^2$	$7.773 \times 10^{-3}$	23 152
<b>TOTAL</b>	<b>9.8175</b>	<b>1.087e4</b>	<b>1.774e2</b>	<b>1.774e-4</b>	<b>1 000 000</b>

*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	$6.76 \times 10^{-2}$
1	5 – 10	1.178	177.8	$2.27 \times 10^{-2}$
2	10 – 15	1.964	178.2	$1.36 \times 10^{-2}$
3	15 – 20	2.749	173.1	$9.70 \times 10^{-3}$
4	20 – 25	3.534	180.0	$7.77 \times 10^{-3}$
<b>TOTAL</b>		<b>9.817</b>	<b>177.4</b>	<b><math>1.77 \times 10^{-4}</math></b>

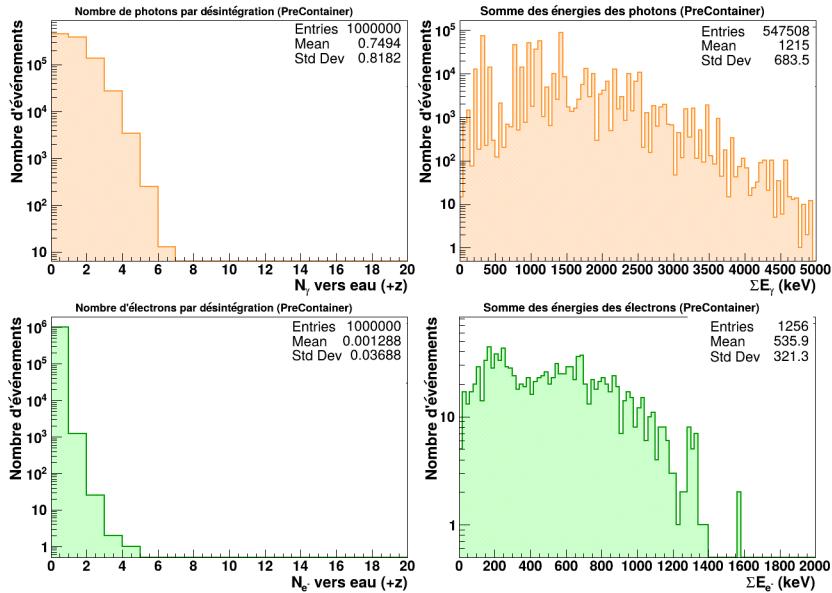
*Comparaison des doses : filtre W/PETG vs filtre Air*

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%
<b>TOTAL</b>		<b>153.3</b>	<b>177.4</b>	<b>+15.7%</b>

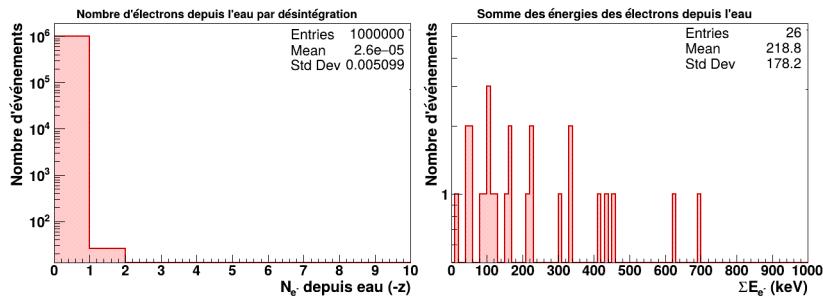
Filtre W/PETG 5mm

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

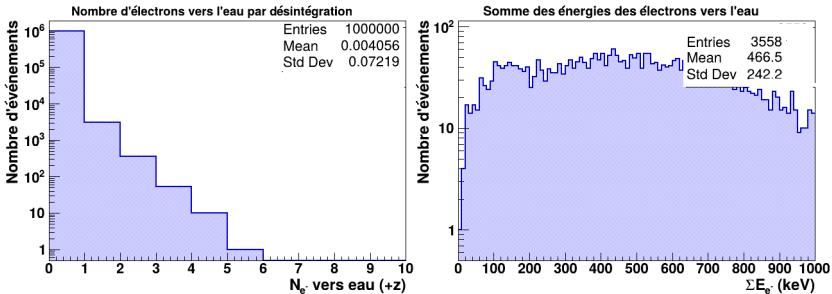
- photons et électrons dans le **PreContainerPlane**
- photons dans le **PostContainerPlane**
- électrons "backward" retrodiffusés dans le **PostContainerPlane**
- électrons "forward" diffusés dans le **PostContainerPlane**



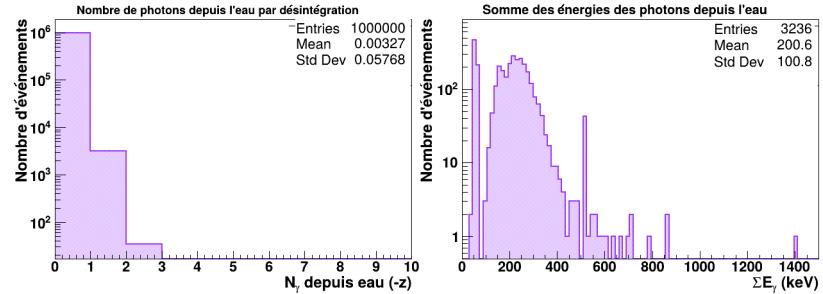
photons et électrons dans le *PreContainerPlane* sans le filtre de *W/PETG* de 5mm



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 **plaqué 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.

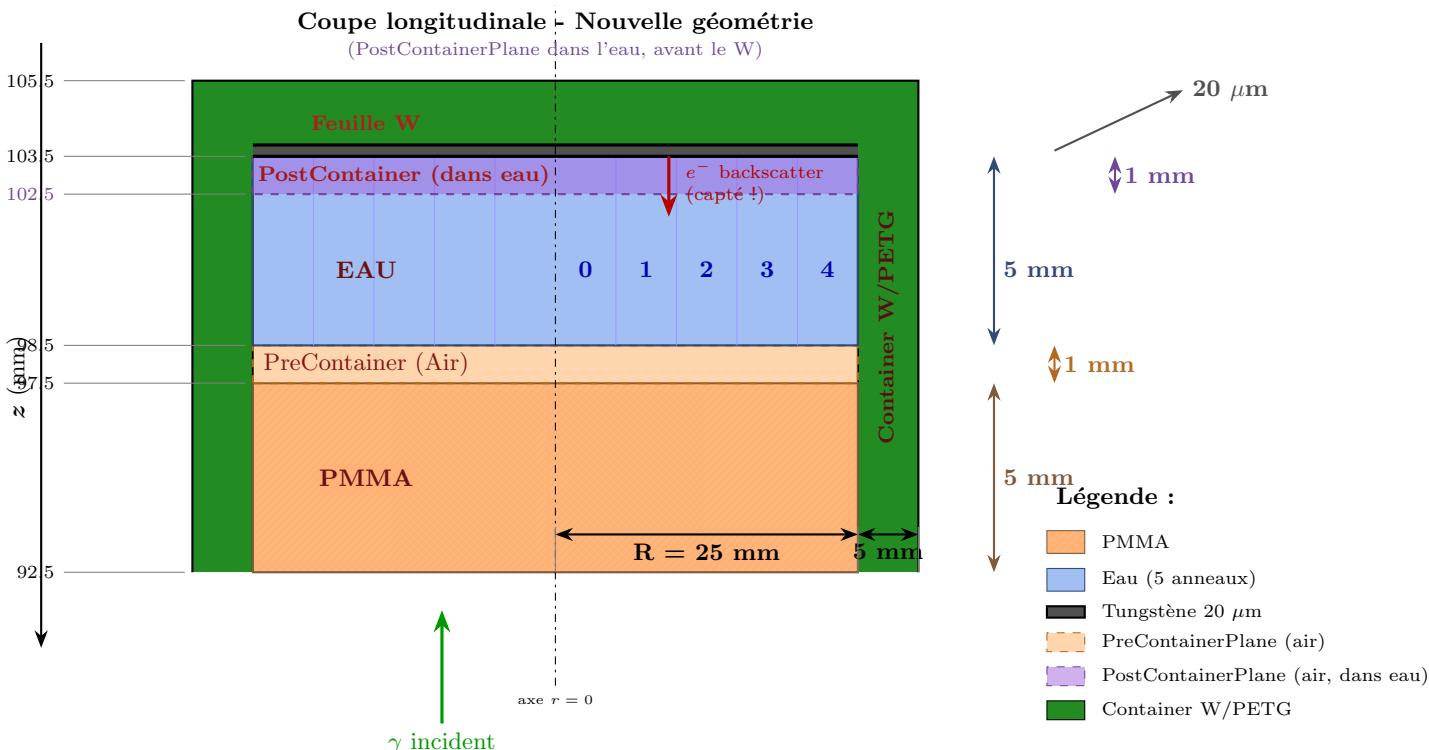
Le fond du container d'eau est tapissé d'une **feuille de tungstène** pour améliorer la **rétrodiffusion des électrons** produit par les photons incidents dans la feuille de tungstène. L'objectif de ce plan est d'améliorer le build-up électronique.

**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 <sub>2</sub> 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 $\mu\text{m}$	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

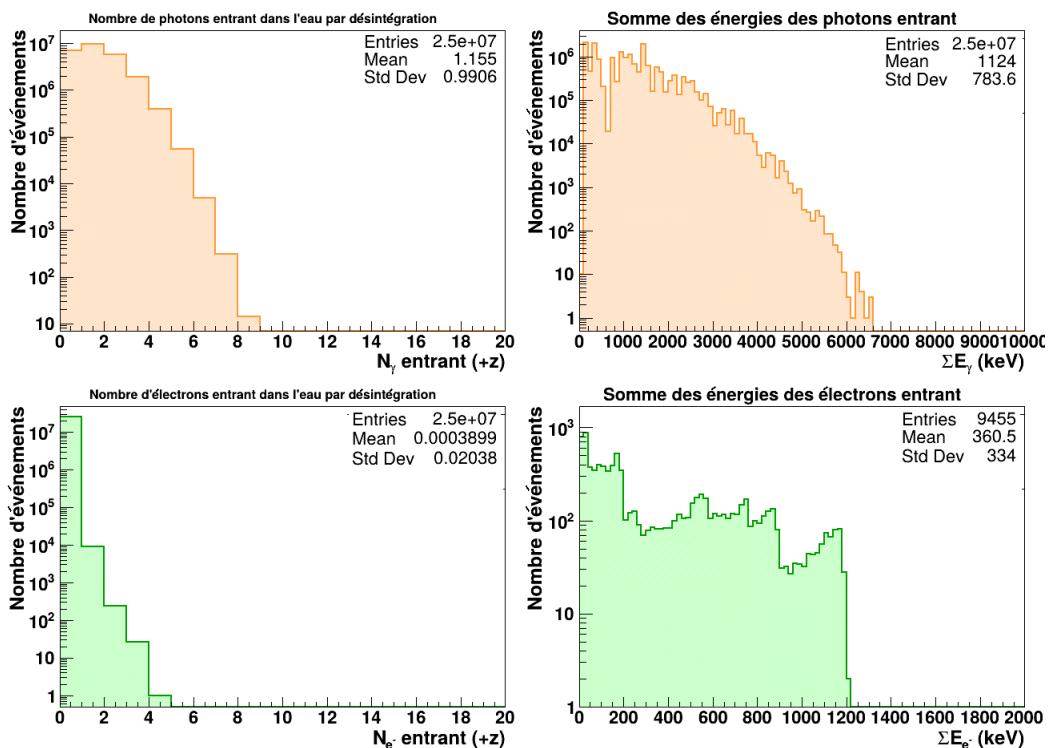
## 8.3 Définition des observables

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 <b>entrant</b> dans la région eau
PostContainer	$p_z > 0 (+z)$	Particules <b>transmises</b> (sortant de l'eau)
PostContainer	$p_z < 0 (-z)$	Particules <b>rétrodiffusées</b> (backscatter)

## 8.4 Résultats pour les Photons

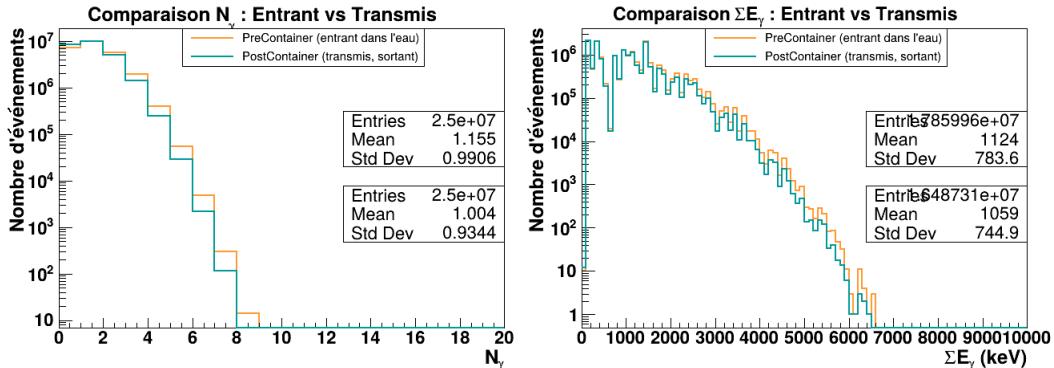


4 histogrammes représentant les particules **entrant dans la région eau** (direction +z) : **Haut gauche** : Nombre de photons par désintégration ( $N_\gamma$ ). **Haut droit** : Somme des énergies des photons ( $\Sigma E_\gamma$  en keV). **Bas gauche** : Nombre d'électrons par désintégration ( $N_e$ ). **Bas droit** : Somme des énergies des électrons ( $\Sigma E_e$  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:

### Comparaison des distributions de photons entre PreContainer et PostContainer

Observable	PreContainer (entrant)	PostContainer (transmis)	Écart relatif
Nombre moyen $\langle N_\gamma \rangle$	1.155	1.004	-13.1%
Écart-type $\sigma_{N_\gamma}$	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)	$17.86 \times 10^6$	$16.49 \times 10^6$	-7.7%
Backscatter	—	0	—

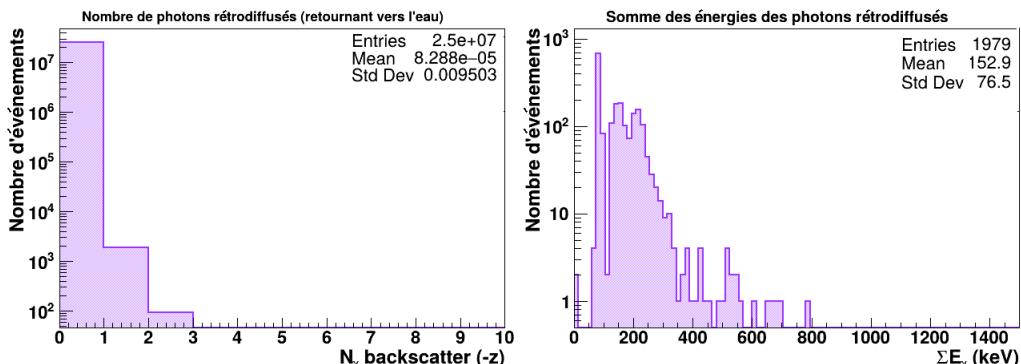


2 histogrammes superposés (Pre en orange, Post en cyan) : **Gauche** : Superposition des distributions  $N_\gamma$  (entrant vs transmis). **Droite** : Superposition des distributions  $\Sigma E_\gamma$  (entrant vs transmis). Cette figure permet de visualiser directement l'atténuation. Dans la géométrie 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  $\theta$  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



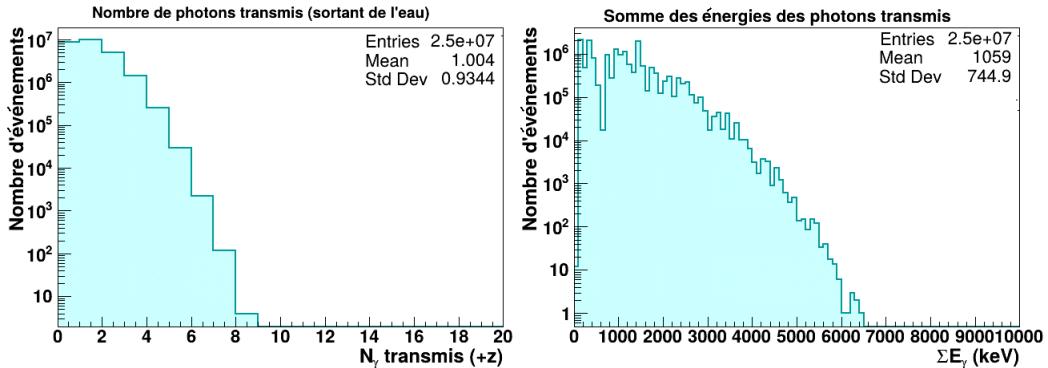
2 histogrammes représentant les photons **retournant vers l'eau** (direction  $-z$ , backscatter) : Gauche : Nombre de photons rétrodiffusés par désintégration ( $N_\gamma$  backscatter). Droite : Somme des énergies des photons rétrodiffusés ( $\Sigma E_\gamma$  en keV). Ces photons proviennent de la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

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

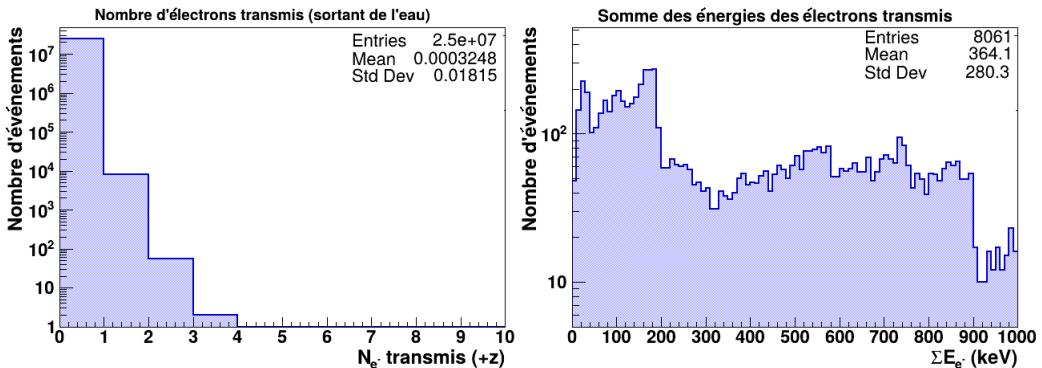
- Le code de détection des directions fonctionne correctement
- Dans l'air, la section efficace de diffusion Compton est négligeable
- Il n'y a pas de matériau pour générer des photons rétrodiffusés

## 8.5 Résultats pour les Électrons

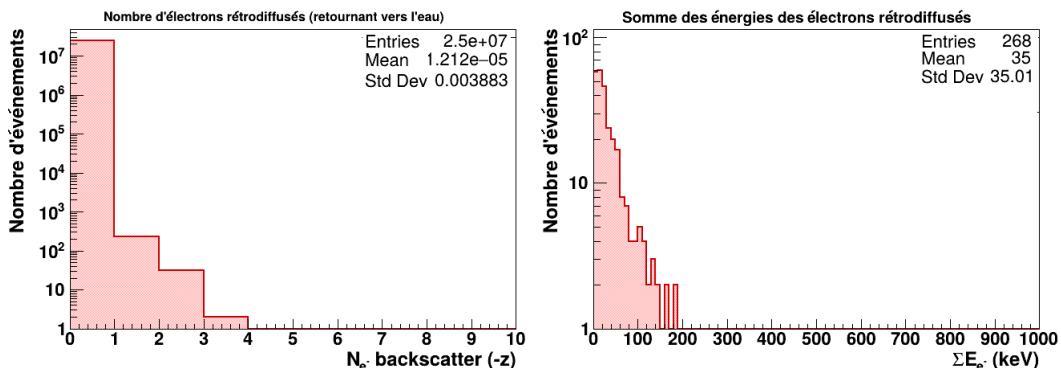
- **Faible production d'électrons:**  $\langle N_{e^-} \rangle \sim 4 \times 10^{-4}$  par désintégration, soit environ 1 électron pour 2500 événements
- **Légère augmentation au PostContainer:** Les électrons supplémentaires proviennent de :
  - Diffusion Compton des photons dans l'air (très faible)



2 histogrammes représentant les photons sortant de l'eau (direction  $+z$ , transmis) : Gauche : Nombre de photons transmis par désintégration ( $N_\gamma$  transmis). Droite : Somme des énergies des photons transmis ( $\Sigma E_\gamma$  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 ( $\Sigma E_{e^-}$  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 ( $\Sigma E_{e^-}$  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  $20\ \mu\text{m}$  située entre l'eau et le **PostContainerPlane**

Observable	PreContainer (entrant)	PostContainer (transmis)	PostContainer (backscatter)
Nombre moyen $\langle N_{e^-} \rangle$	$3.33 \times 10^{-4}$	$3.25 \times 10^{-4}$	$1.21 \times 10^{-5}$
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 $\rho$	0.0012 g/cm <sup>3</sup>	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Événements simulés	$25 \times 10^6$	$25 \times 10^6$

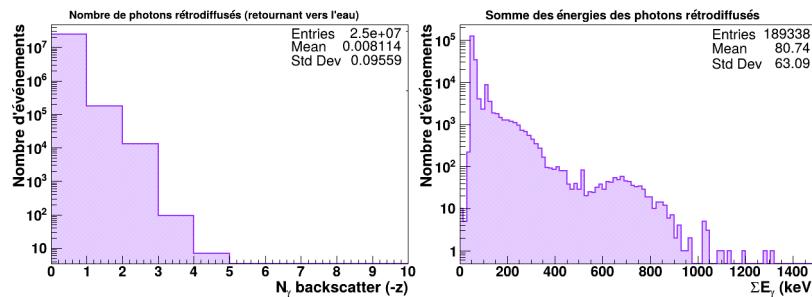
## 8.7 Comparaison des photons

### Photons rétrodiffusés (backscatter, direction $-z$ )

- Le nombre de photons backscatter est multiplié par  $\sim 100$  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  $K_\alpha$  : 59.3 keV et 57.9 keV
  - Raies  $K_\beta$  : 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 $\langle N_\gamma \rangle$	$8.29 \times 10^{-5}$	$8.11 \times 10^{-3}$	$\times 98$
Écart-type $\sigma$	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)	$\sim 1979$	$\sim 189\,338$	$\times 96$



2 histogrammes représentant les photons retournant vers l'air (direction  $-z$ , backscatter) : Gauche : Nombre de photons rétrodiffusés par désintégration ( $N_\gamma$  backscatter). Droite : Somme des énergies des photons rétrodiffusés ( $\Sigma E_\gamma$  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 $+z$ )

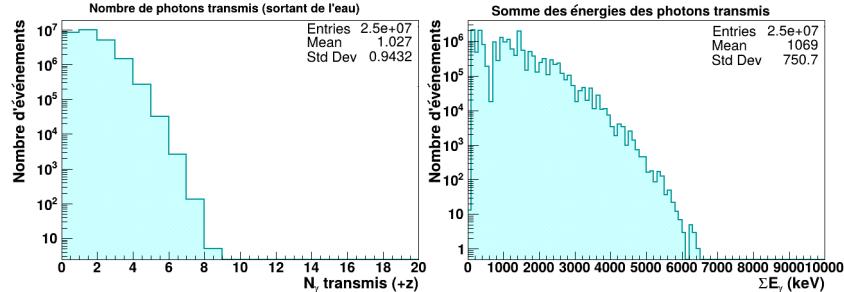
La transmission des photons est quasi-identique car l'épaisseur de 20 μm de tungstène est très faible par rapport au libre parcours moyen des photons gamma de haute énergie ( $\lambda \gg 20 \mu\text{m}$  pour  $E_\gamma > 100 \text{ keV}$ ).

## 8.8 Comparaison des électrons

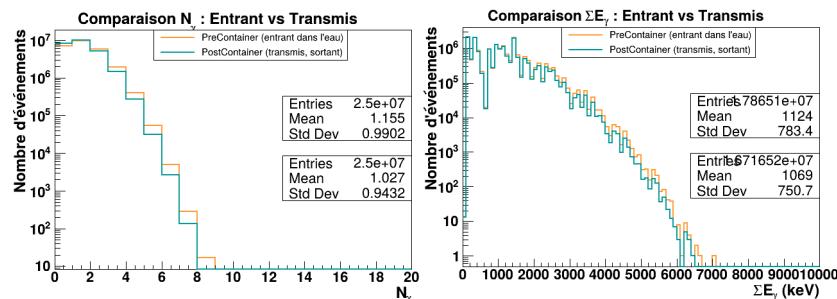
### Électrons rétrodiffusés (backscatter, direction $-z$ )

### Statistiques des photons transmis au PostContainerPlane

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



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

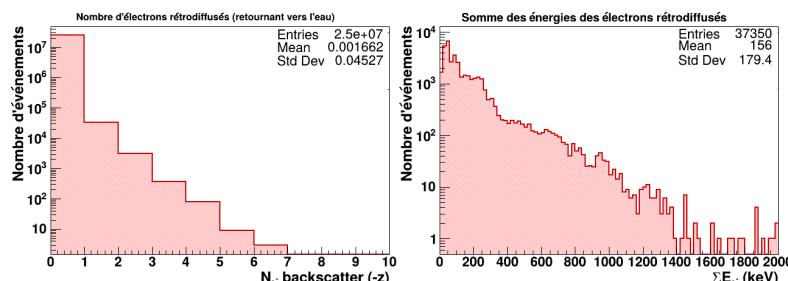


2 histogrammes superposés (Pre en orange, Post en cyan) : Gauche : Superposition des distributions  $N_\gamma$  (entrant vs transmis). Droite : Superposition des distributions  $\Sigma E_\gamma$  (entrant vs transmis). Cette figure permet de visualiser directement l'atténuation. Dans la géométrie où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

- Le nombre d'électrons backscatter est multiplié par  $\sim 130$  avec le tungstène.
- Contrairement aux photons, l'**énergie moyenne augmente de 35 keV à 156 keV**.
- Le **coefficients 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 ( $\Sigma E_{e^-}$  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 $+z$ )

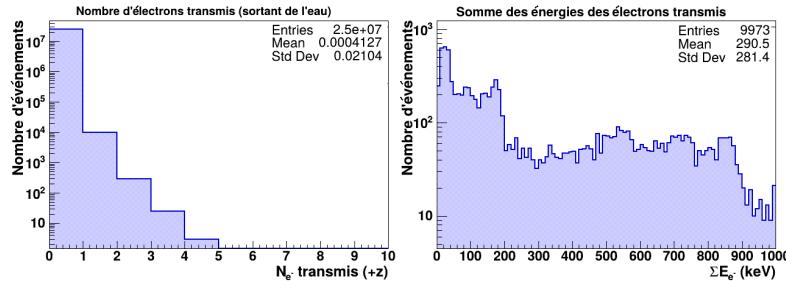
Le nombre d'électrons transmis augmente légèrement (+27%) mais leur énergie moyenne diminue (-20%), ce qui traduit une perte d'énergie dans le tungstène.

*Statistiques des électrons rétrodiffusés au PostContainerPlane*

Observable	Air	Tungstène	Ratio W/Air
Nombre moyen $\langle N_{e^-} \rangle$	$1.21 \times 10^{-5}$	$1.66 \times 10^{-3}$	$\times 137$
Écart-type $\sigma$	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)	$\sim 303$	$\sim 37\,350$	$\times 123$

*Statistiques des électrons transmis au PostContainerPlane*

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



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 ( $\Sigma E_{e^-}$  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
<b>Photons backscatter</b>	Nombre moyen	$8.29 \times 10^{-5}$	$8.11 \times 10^{-3}$	$\times 98$
	Énergie moyenne	153 keV	80.7 keV	$\times 0.53$
	Événements	$\sim 2\,000$	$\sim 189\,000$	$\times 95$
<b>Électrons backscatter</b>	Nombre moyen	$1.21 \times 10^{-5}$	$1.66 \times 10^{-3}$	$\times 137$
	Énergie moyenne	35 keV	156 keV	$\times 4.5$
	Événements	$\sim 300$	$\sim 37\,000$	$\times 123$
<b>Photons transmis</b>	Nombre moyen	1.028	1.027	$\sim 1.0$
	Énergie moyenne	1069 keV	1069 keV	$\sim 1.0$
<b>Électrons transmis</b>	Nombre moyen	$3.25 \times 10^{-4}$	$4.13 \times 10^{-4}$	$\times 1.27$
	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 :

### Matériaux des différentes configurations

Configuration	PMMA (5 mm)	Feuille (20 µm)	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 ( $E > 0$ )	$2.79 \times 10^7$	$2.79 \times 10^7$	$2.76 \times 10^7$	-1.1%

Le PMMA (5 mm,  $\rho \approx 1.18 \text{ g/cm}^3$ ) 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 $\langle N_{e^-} \rangle$	$3.99 \times 10^{-4}$	$3.99 \times 10^{-4}$	$4.86 \times 10^{-3}$	<b>×12.2</b>
Std Dev	0.0208	0.0208	0.0735	×3.5
Std Dev énergie	333 keV	333 keV	273 keV	×0.82
Entries ( $E > 0$ )	9 607	9 607	114 723	<b>×11.9</b>

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

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

Entries : 9 607 → 114 723 (facteur ×11.9)

- **Effet Compton** : Processus dominant dans le PMMA pour les photons de 100 keV à 1 MeV
- **Composition** : Le PMMA ( $C_5H_8O_2$ ) 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	$2.57 \times 10^7$	$2.45 \times 10^7$	-4.7%

### Photons rétrodiffusés (backscatter)

Statistiques des photons backscatter au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Variation
Mean $\langle N_\gamma \rangle$	$8.11 \times 10^{-3}$	$8.08 \times 10^{-3}$	$\sim 0\%$
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 $\langle N_{e^-} \rangle$	$4.13 \times 10^{-4}$	$4.18 \times 10^{-3}$	$\times 10.1$
Std Dev	0.0210	0.0681	$\times 3.2$
Énergie moyenne	290 keV	477 keV	$\times 1.64$
Entries	9 973	99 092	$\times 9.9$

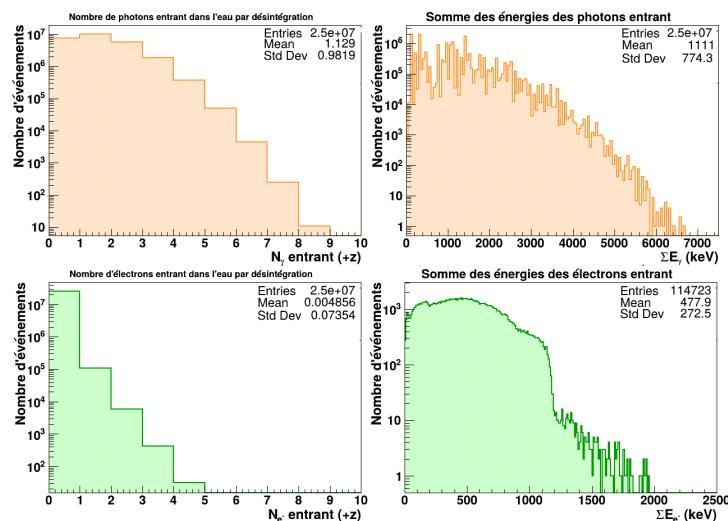
## Électrons rétrodiffusés (backscatter)

Statistiques des électrons backscatter au PostContainerPlane

Observable	W seul	PMMA + W	Facteur
Mean $\langle N_{e^-} \rangle$	$1.66 \times 10^{-3}$	$3.38 \times 10^{-3}$	$\times 2.0$
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)



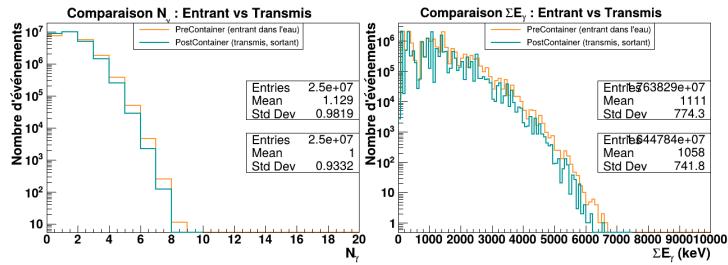
#### Photons (panneaux supérieurs)

- 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 :

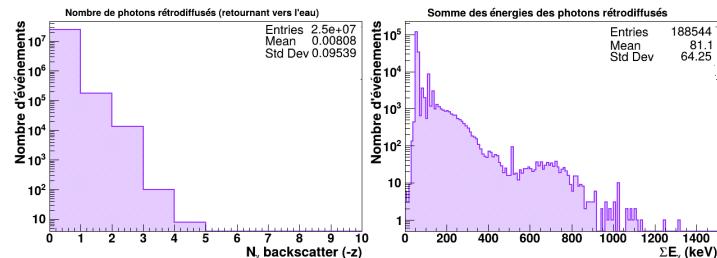
- Distribution beaucoup plus étendue : jusqu'à  $N_{e^-} = 5$  (vs 3–4 sans PMMA)
- Nombre d'entrées  $\times 12$  : 114 723 vs 9 607
- Spectre d'énergie en forme de "bosse" caractéristique de l'effet Compton
- Pic vers 500–600 keV avec coupure nette à  $\sim 1400$  keV (bord Compton)

**Figure Comparaison Pre/Post (photons)**



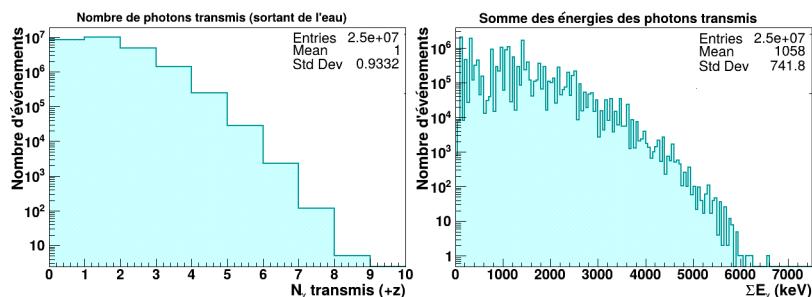
- **Perte de photons :**  $(1.129 - 1.000)/1.129 = 11.4\% \text{ (vs } 11.1\% \text{ sans PMMA)}$
- *Les spectres Pre et Post sont quasi-superposés*
- *La forme spectrale n'est pas modifiée par le passage à travers l'eau (en air) et le tungstène*

**Figure Photons backscatter**



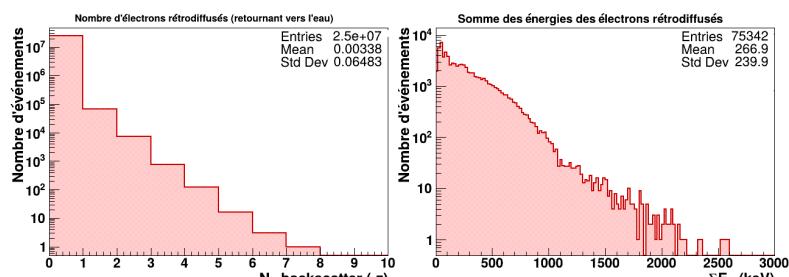
- *Pic de fluorescence X du tungstène toujours dominant à 60–80 keV*
- *Raies K<sub>α</sub> (58–59 keV) et K<sub>β</sub> (67–69 keV) du W*
- *Identique à la configuration sans PMMA → le tungstène domine le backscatter γ*
- *Queue Compton jusqu'à ~1200 keV*

**Figure Électrons transmis**



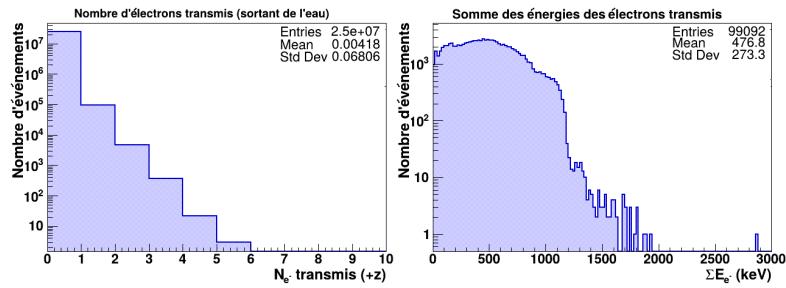
- *Spectre très différent de la configuration sans PMMA*
- *Forme en "bosse" avec pic à ~500 keV*
- *Queue jusqu'à ~1500 keV (électrons Compton de haute énergie)*
- *Entries : 99 092 (vs 9 973 sans PMMA) → facteur ×10*

**Figure Électrons backscatter**



- *Distribution plus large : jusqu'à N<sub>e-</sub> = 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  $\sim 500$  keV
- Queue jusqu'à  $\sim 1500$  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+W+PMMA)

### Configuration

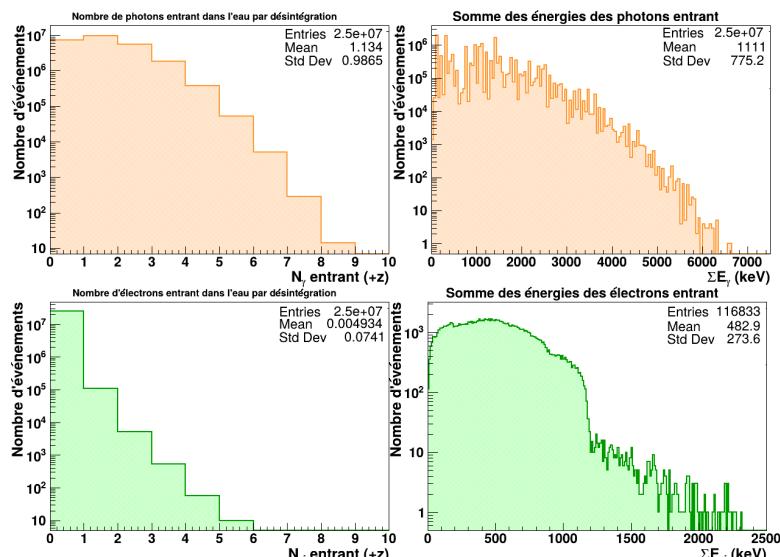
- Le matériau à l'intérieur du container est converti en eau, sous forme de 5 anneaux concentriques de 5 mm de largeur chacun
- L'eau est précédée d'une **plaqué de PMMA de 5 mm d'épaisseur**, pour améliorer la conversion des photons incidents et la **production d'électrons secondaires** dans l'eau du 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

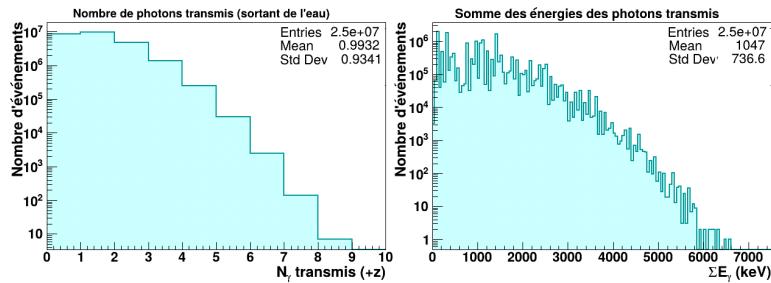
La distribution du nombre de photons par événement présente un pic principal à 1-2 photons, avec une queue s'étendant jusqu'à 8-9 photons pour les événements à multiplicité élevée. L'énergie moyenne de 1111 keV est cohérente avec le spectre Eu-152 qui comprend plusieurs raies intenses au-dessus de 1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

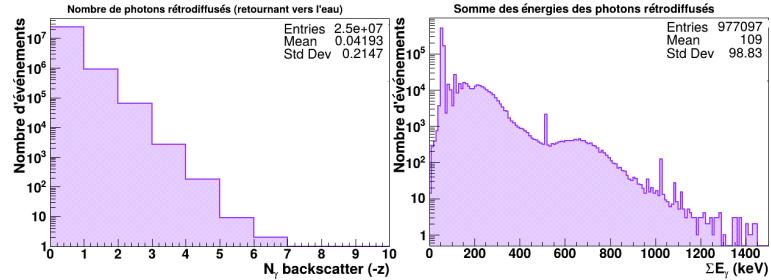


Photons transmis à travers l'eau (direction +z). Gauche : multiplicité. Droite : distribution en énergie.

Bilan des photons transmis

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

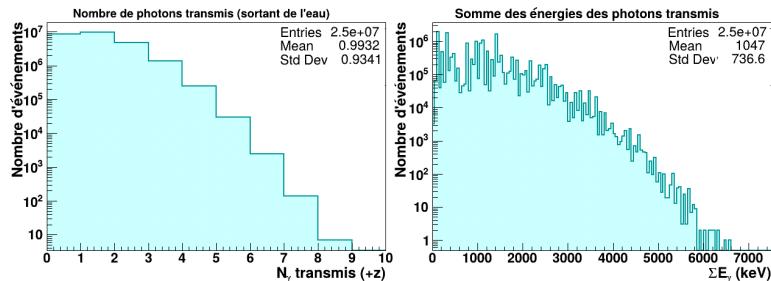


Photons rétrodiffusés par l'eau (direction -z) Gauche : multiplicité. Droite : distribution en énergie.

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

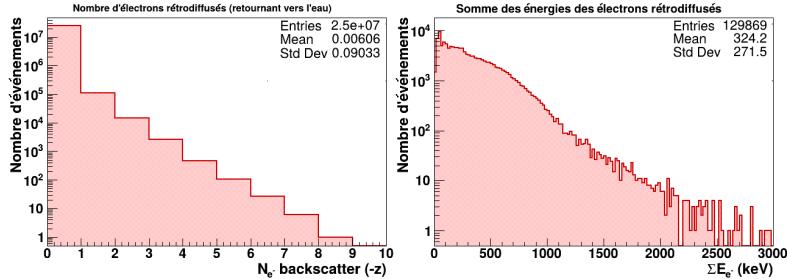
Les photons rétrodiffusés présentent des caractéristiques typiques de la diffusion Compton à grand angle : faible multiplicité (0.042/evt) et énergie moyenne de 109 keV, nettement inférieure à l'énergie incidente.



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

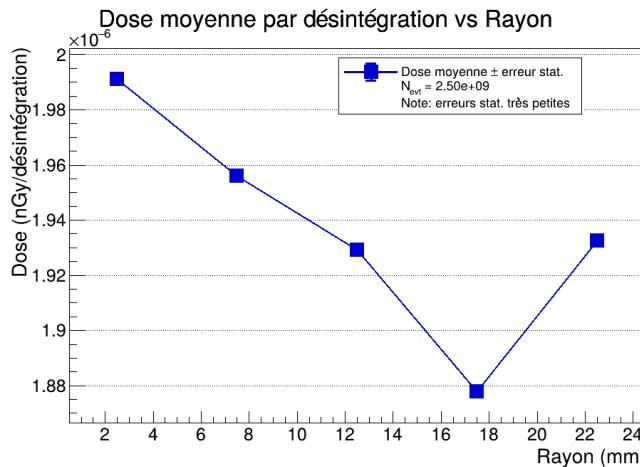
Le tableau suivant présente les résultats de dose pour chaque anneau d'eau.

### 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	$1.220 \times 10^4$	$4.977 \times 10^3$	$1.991 \times 10^{-6}$	70 556
1	1.1781	$3.596 \times 10^4$	$4.890 \times 10^3$	$1.956 \times 10^{-6}$	206 603
2	1.9635	$5.911 \times 10^4$	$4.823 \times 10^3$	$1.929 \times 10^{-6}$	337 717
3	2.7489	$8.055 \times 10^4$	$4.695 \times 10^3$	$1.878 \times 10^{-6}$	458 070
4	3.5343	$1.066 \times 10^5$	$4.831 \times 10^3$	$1.933 \times 10^{-6}$	580 703
Total	9.8175	$2.944 \times 10^5$	$2.422 \times 10^4$	$9.687 \times 10^{-6}$	—

## Distribution radiale de la dose

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

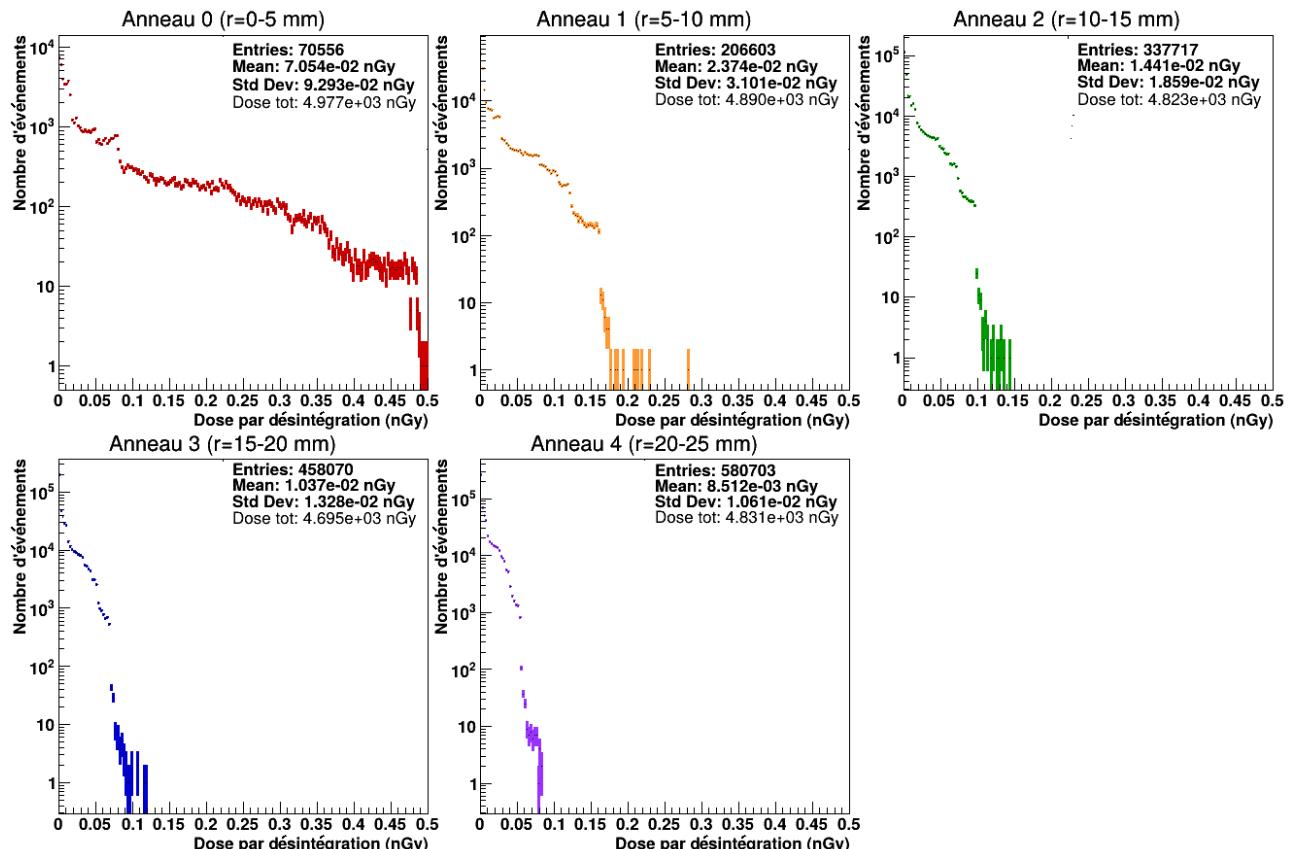


Dose moyenne par désintégration en fonction du rayon. Les points représentent la dose moyenne calculée sur 25 millions d'événements. La dose varie entre  $1.88 \times 10^{-6}$  nGy et  $1.99 \times 10^{-6}$  nGy, soit une variation relative de seulement 6%.

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

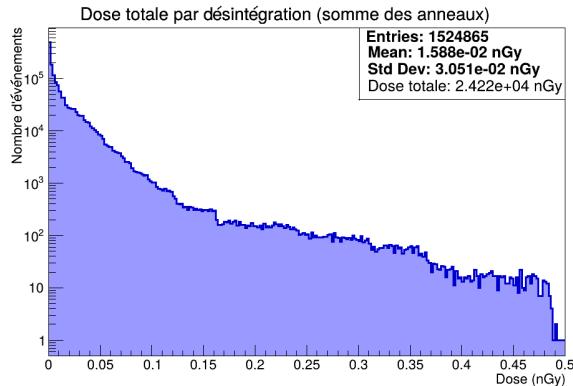
- Géométrie du faisceau:** La source émet dans un cône de demi-angle  $20^\circ$ . À la distance source-eau ( $z \approx 100$  mm), le rayon du faisceau est  $r = 100 \times \tan(20) \approx 36$  mm, ce qui englobe largement tous les anneaux (rayon maximal de 25 mm).
- Compensation géométrique:** Les 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.
- Faible épaisseur d'eau:** Avec seulement 5 mm d'eau, l'atténuation latérale est négligeable pour les gammes du spectre Eu-152.
- Distance source-détecteur:** La variation de distance solide entre le centre ( $\sim 100$  mm) et le bord ( $\sim 103$  mm) n'est que de 3%, produisant une variation en  $1/r^2$  négligeable.

## Distributions de dose par événement

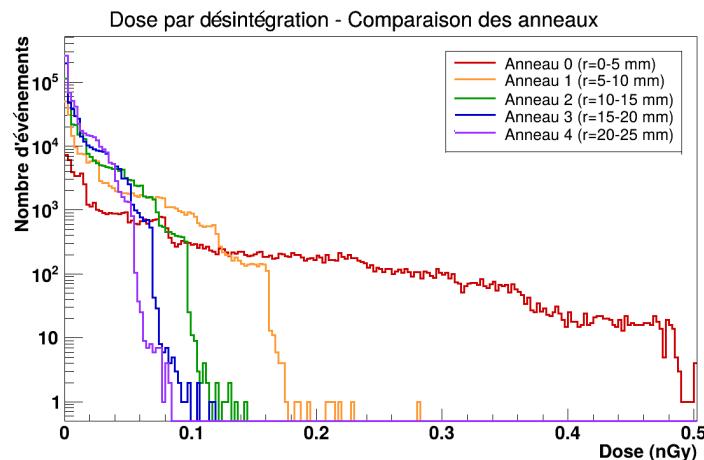


Distributions de la dose par désintégration pour chaque anneau. L'échelle verticale est logarithmique. Le panneau inférieur droit présente le résumé des doses totales.

## 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  $6.7 \times 10^{-2} \text{ nGy}$  (anneau 0) à  $8.5 \times 10^{-3} \text{ nGy}$  (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  $20^\circ$ , 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 désintégration (anneau central)	$7 \times 10^{-2}$ nGy/désintégration
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  $D_{\text{cible}}$  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  $A \approx 42.4$  kBq =  $4.24 \times 10^4$  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

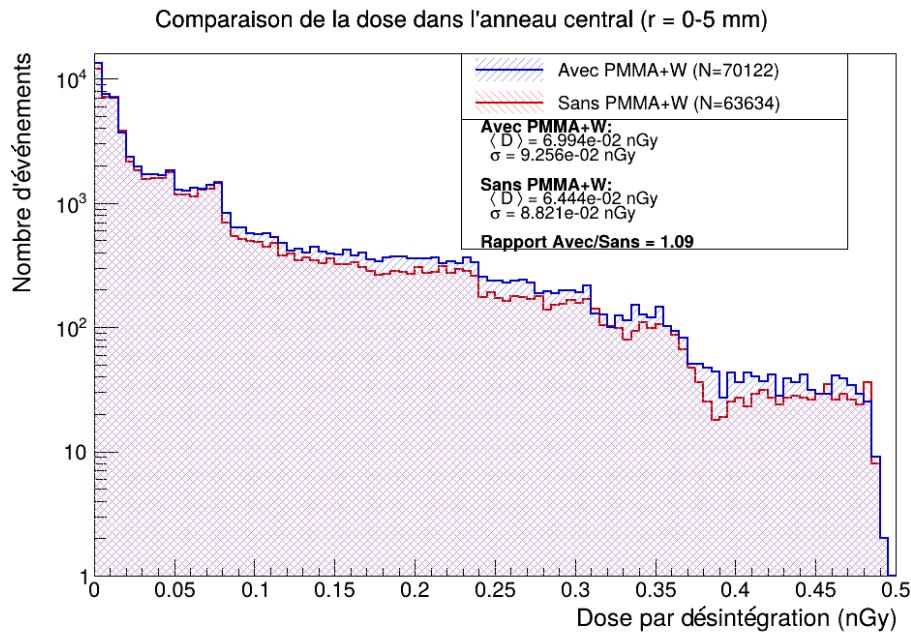
*Temps d'irradiation en fonction de la dose cible ( $A = 42.4$  kBq)*

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

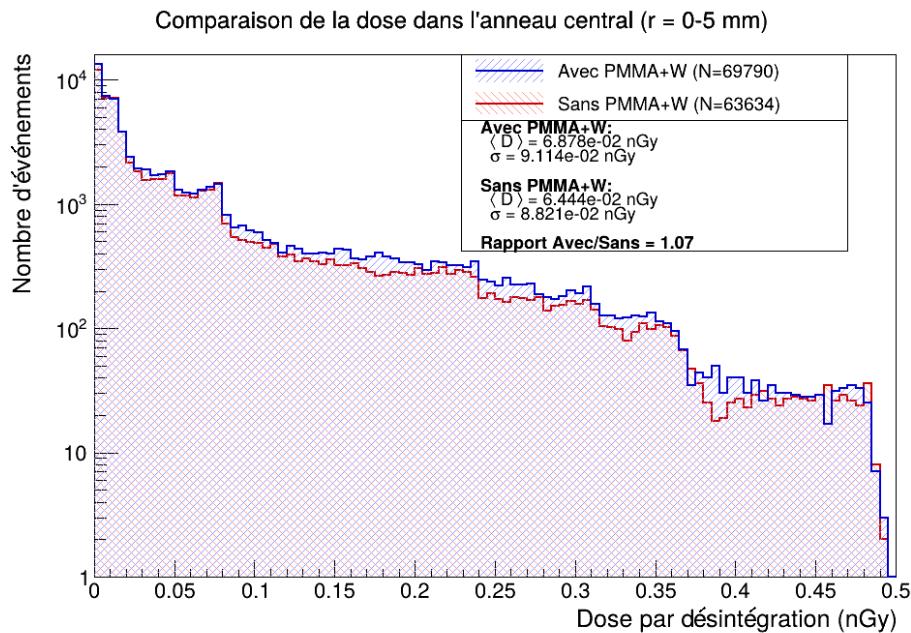
## Figure avec ou sans PMMA de différentes dimensions

### Comparaison avec ou sans PMMA

- La figure suivante montre la distribution de la dose déposée dans l'anneau centrale **avec ou sans** le PMMA
- L'épaisseur de la plaque de PMMA varie de **5 à 40 mm**

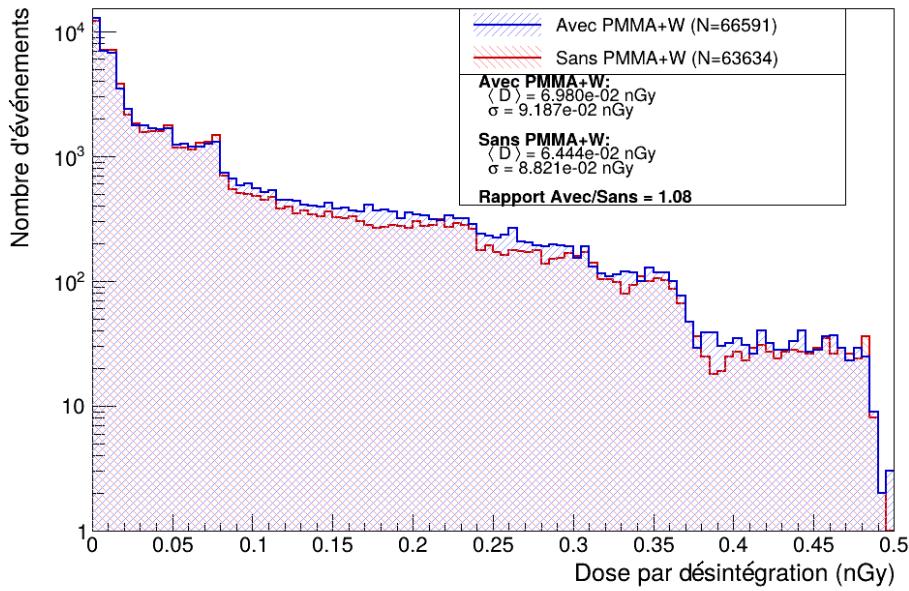


*Superposition des distributions de dose l'anneau central avec ou sans bloc de PMMA de 5 mm*



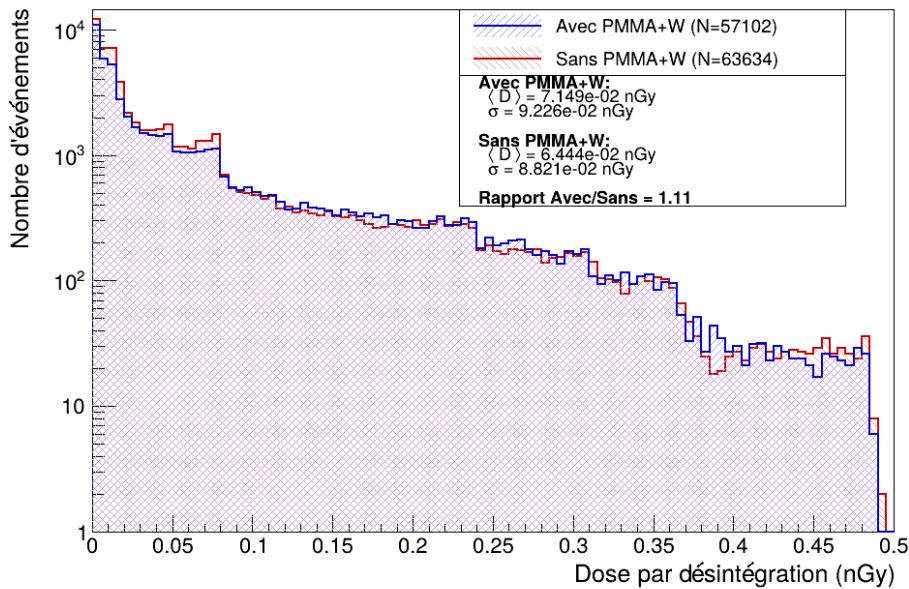
*Superposition des distributions de dose l'anneau central avec ou sans bloc de PMMA de 10 mm*

### Comparaison de la dose dans l'anneau central ( $r = 0-5$ mm)



Superposition des distributions de dose l'anneau cental avec ou sans bloc de PMMA de 20 mm

### Comparaison de la dose dans l'anneau central ( $r = 0-5$ mm)

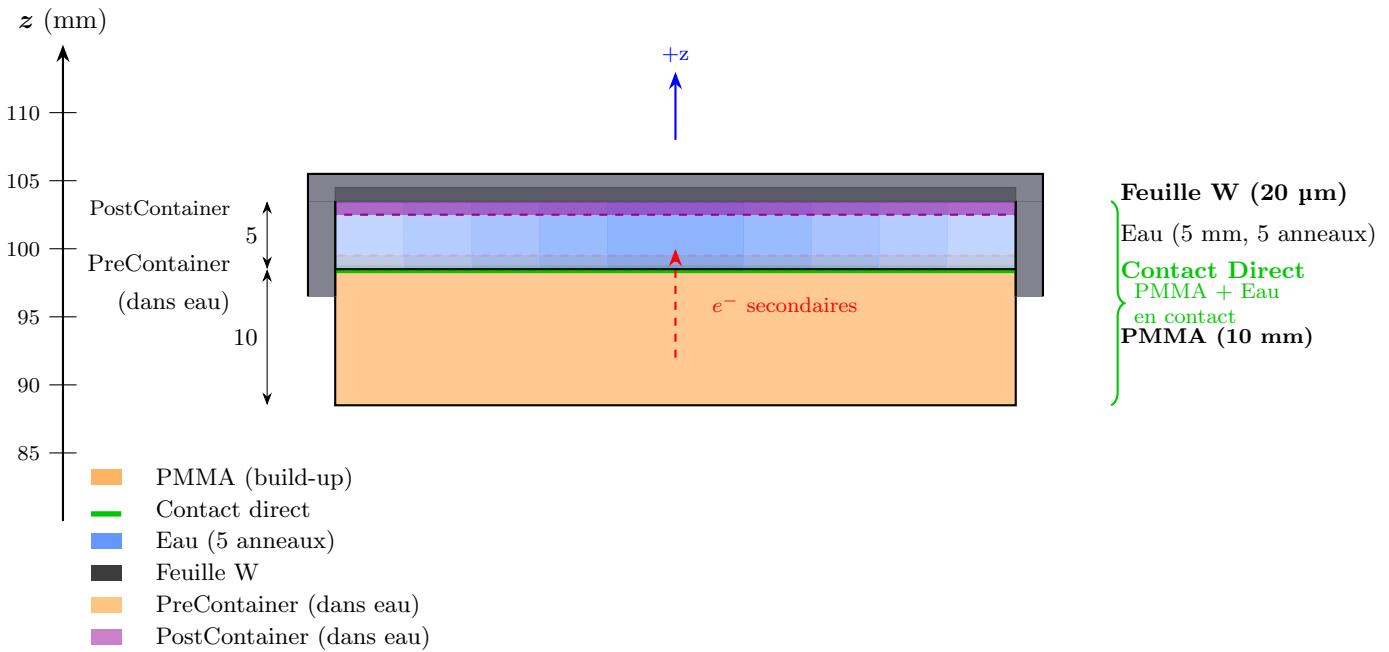


Superposition des distributions de dose l'anneau cental avec ou sans bloc de PMMA de 40 mm

### Géométrie avec PMMA de 10 mm au contact de l'eau

#### PMMA au contact de l'eau

- La figure suivante montre la nouvelle géométrie de simulation:
  - L'épaisseur du PMMA est de 10mm
  - Le PMMA est au contact de l'eau
  - Le PreContainer Plane est inclus dans le haut de l'eau
- On simule la distribution de la dose déposée dans l'anneau centrale **avec ou sans** le PMMA
- Les électrons secondaires créés dans le PMMA peuvent maintenant atteindre l'eau directement



Coupe schématique du container avec PMMA de 10 mm en contact direct avec l'eau. Les plans de comptage (PreContainer et PostContainer) sont maintenant dans l'eau (chevauchement autorisé). Les électrons secondaires créés dans le PMMA peuvent atteindre directement l'eau.

Positions détaillées des éléments du container

Élément	$z_{\min}$ (mm)	$z_{\max}$ (mm)	Remarque
Empilement depuis la source (+z)			
PMMA	88.5	98.5	Face supérieure = bas de l'eau
<b>Interface PMMA/Eau</b>	<b><math>z = 98.5</math></b>		<b>Contact direct !</b>
Eau	98.5	103.5	5 anneaux concentriques
PreContainerPlane	98.5	99.5	Dans l'eau (chevauche)
PostContainerPlane	102.5	103.5	Dans l'eau (chevauche)
Feuille W	103.5	103.52	Sur l'eau
Couvercle container	103.5	105.5	W/PETG

Figure PreContainer (4 panneaux)

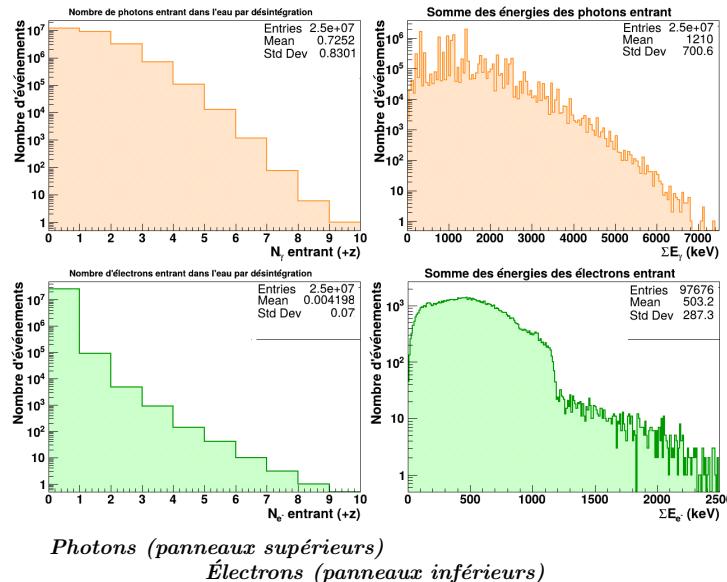


Figure Comparaison Pre/Post (photons)

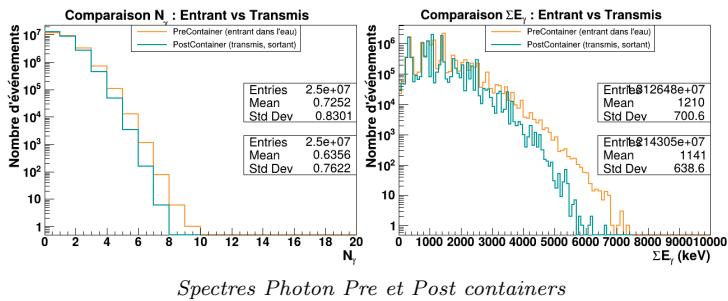


Figure Photons backscatter

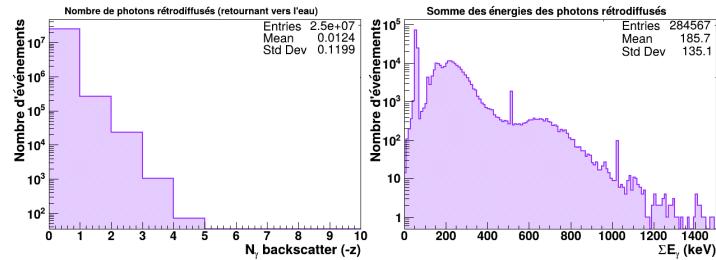


Figure Électrons transmis

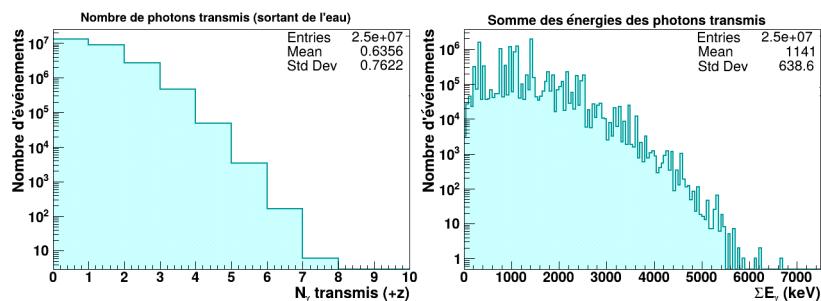


Figure Électrons backscatter

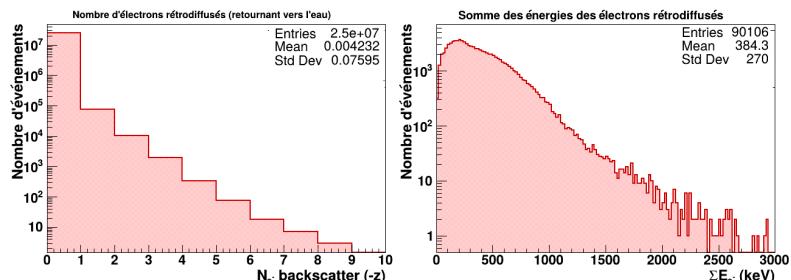
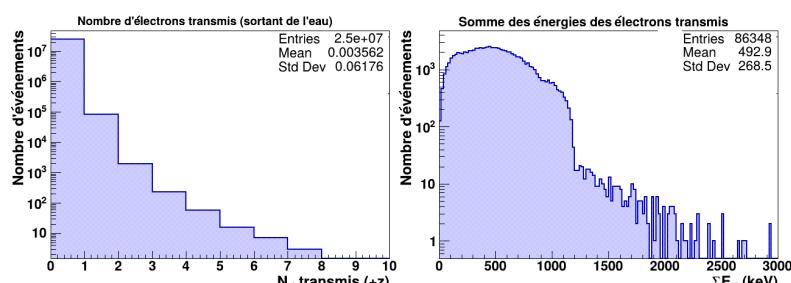
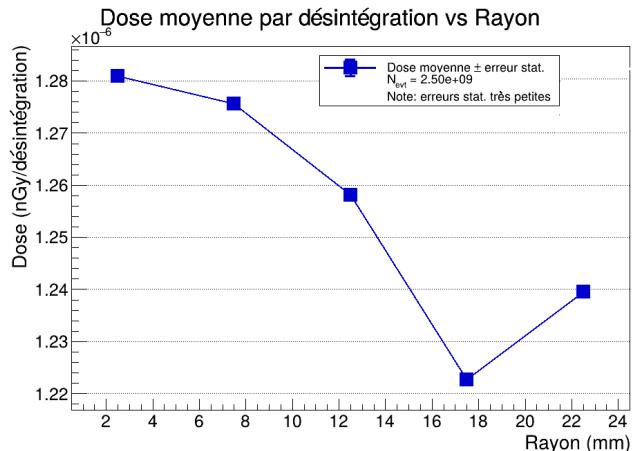


Figure Électrons transmis

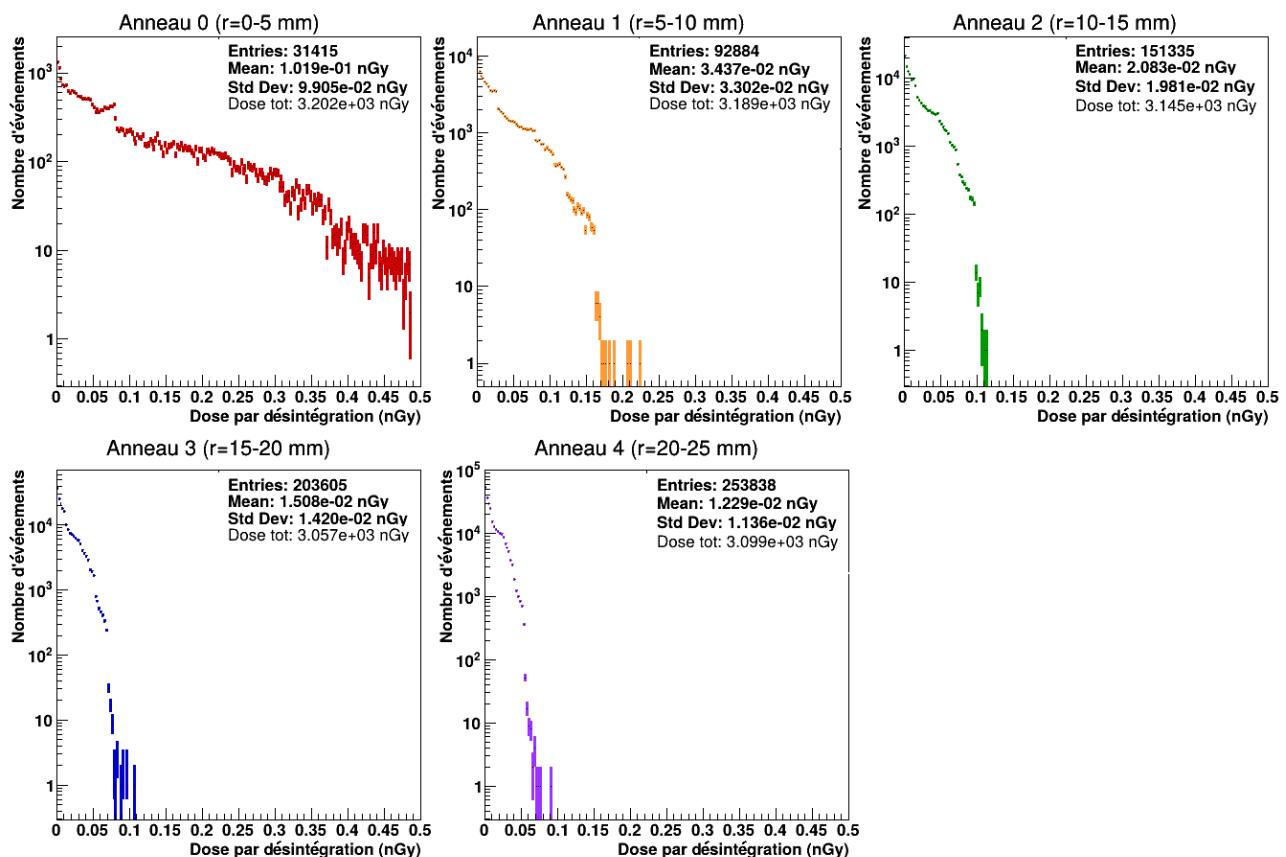


## Distribution radiale de la dose



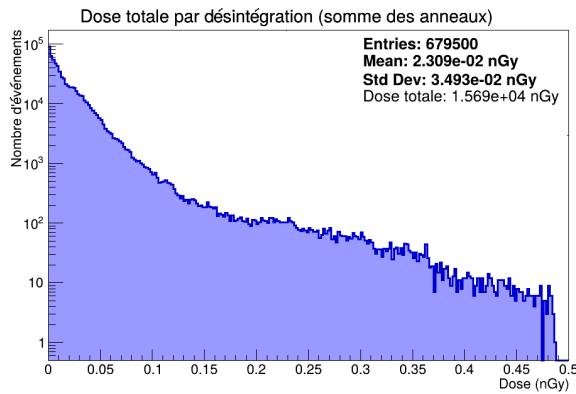
Dose moyenne par désintégration en fonction du rayon. Les points représentent la dose moyenne calculée sur 25 millions d'événements. La dose varie entre  $1.28 \times 10^{-6}$  nGy et  $1.22 \times 10^{-6}$  nGy, soit une variation relative de seulement 6%.

## Distributions de dose par événement

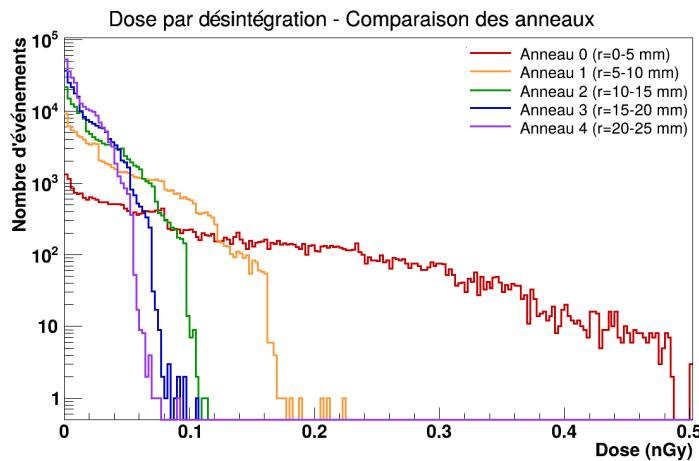


Distributions de la dose par désintégration pour chaque anneau. L'échelle verticale est logarithmique. Le panneau inférieur droit présente le résumé des doses totales.

## Distributions de dose total



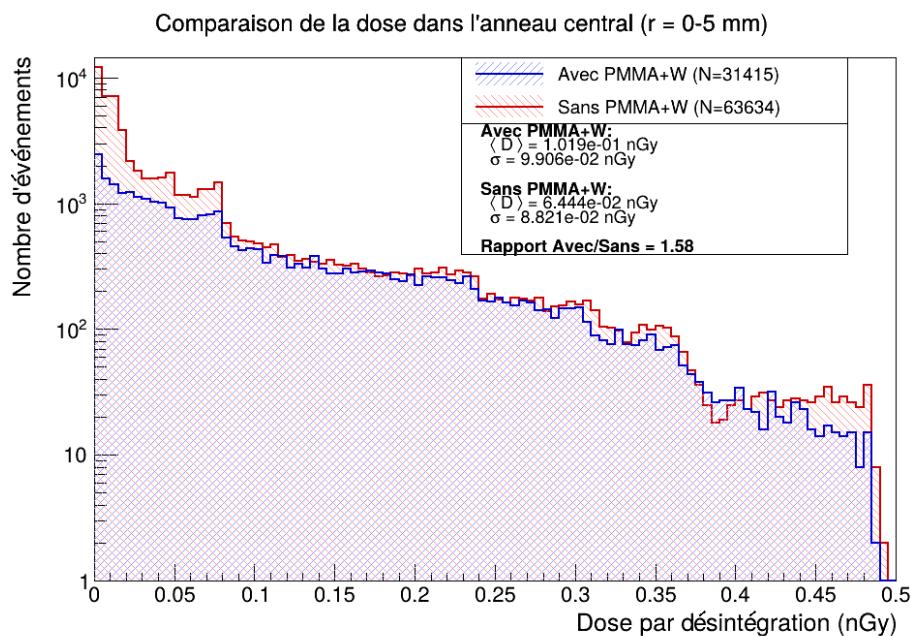
Distributions de la dose total par désintégration. L'échelle verticale est logarithmique.



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.

#### Comparaison avec ou sans PMMA

- La figure suivante montre la distribution de la dose déposée dans l'anneau centrale **avec ou sans** PMMA
- L'épaisseur de la plaque de PMMA est de **10 mm**
- La plaque de PMMA est au contact de l'eau
- Le PreContainer Plane est dans l'eau au contact avec le PMMA



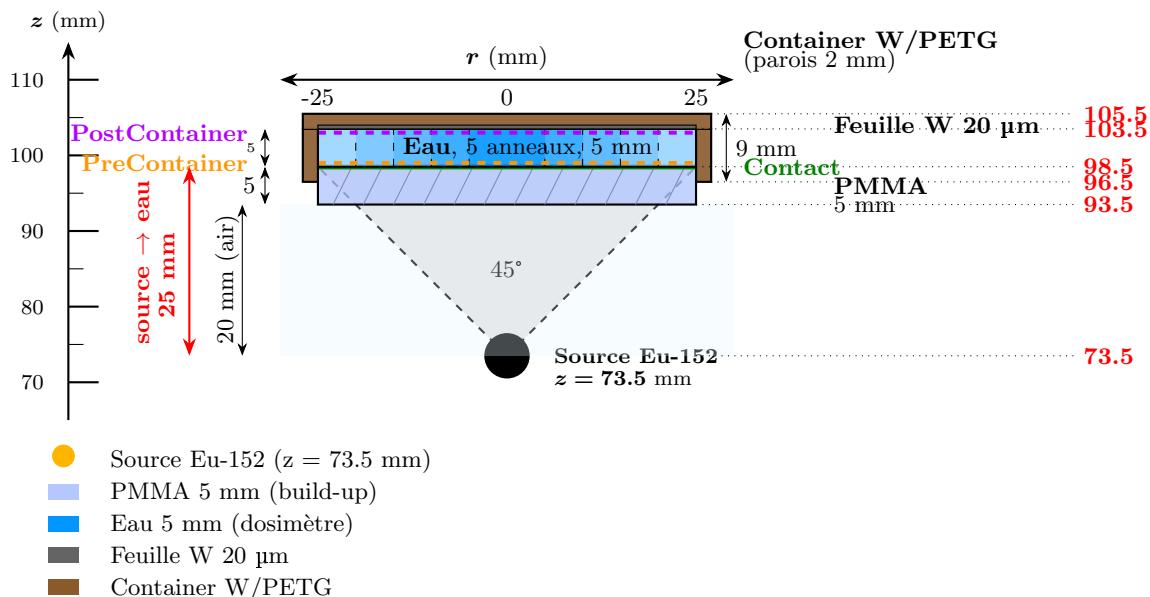
Superposition des distributions de dose l'anneau central avec ou sans bloc de PMMA de 10 mm au contact

## 11 Changement de position de la source z=20mm à z=60mm

### Configuration

- Le **Filtre est supprimé**
- La source est **avancée de 40 mm**, passant de  $z = 20\text{mm}$  à  $z = 60\text{mm}$
- L'eau est **précédée d'une plaque de PMMA de 10 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
- L'eau est au **contact de la plaque de PMMA** de 10 mm d'épaisseur,
- 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

### 11.1 Nouvelle Géométrie



Coupe longitudinale du dispositif Puits Couronne sans filtre. La source Eu-152 est positionnée à  $z = 73.5 \text{ mm}$  avec un cône d'émission de  $45^\circ$  (demi-angle). Le PMMA (5 mm) est en contact direct avec l'eau. Les 5 anneaux d'eau concentriques (nuances de bleu) permettent la mesure de dose radiale.

### Distances caractéristiques

Paramètres géométriques de la simulation

Élément	Position z (mm)	Épaisseur	Rayon (mm)	Matériau
Source Eu-152	73.5	ponctuelle	–	–
Air	73.5 → 93.5	20 mm	–	Air
PMMA (build-up)	93.5 → 98.5	5 mm	25	PMMA
Eau (dosimètre)	98.5 → 103.5	5 mm	25	G4_WATER
Feuille W	103.5 → 103.52	20 $\mu\text{m}$	25	G4_W
Parois container	96.5 → 103.5	2 mm	25–27	W/PETG (75%/25%)
Couvercle container	103.5 → 105.5	2 mm	0–27	W/PETG (75%/25%)

## 11.2 Analyse de la génération des événements

Tableau des raies

Raies gamma et X de l'Eu-152 simulées (13 raies principales)

Index	Énergie (keV)	Intensité (%)	Type	Origine
0	39.52	20.8	Raie X	K $\alpha_2$ (Sm)
1	40.12	37.7	Raie X	K $\alpha_1$ (Sm)
2	121.78	28.41	$\gamma$	$^{152}\text{Sm}^*$
3	244.70	7.53	$\gamma$	$^{152}\text{Gd}^*$
4	344.28	26.59	$\gamma$	$^{152}\text{Gd}^*$
5	411.12	2.24	$\gamma$	$^{152}\text{Sm}^*$
6	443.97	2.83	$\gamma$	$^{152}\text{Gd}^*$
7	778.90	12.97	$\gamma$	$^{152}\text{Sm}^*$
8	867.38	4.24	$\gamma$	$^{152}\text{Gd}^*$
9	964.08	14.63	$\gamma$	$^{152}\text{Sm}^*$
10	1085.87	10.21	$\gamma$	$^{152}\text{Sm}^*$
11	1112.07	13.64	$\gamma$	$^{152}\text{Sm}^*$
12	1408.01	21.01	$\gamma$	$^{152}\text{Sm}^*$
<b>TOTAL</b>		<b>202.78</b>		

Légende des couleurs :

- Raies X : Fluorescence K du Samarium ( $E < 50$  keV)
- $\gamma$  basse énergie :  $E < 250$  keV
- $\gamma$  moyenne énergie :  $250 \text{ keV} < E < 1000 \text{ keV}$
- $\gamma$  haute énergie :  $E > 1000 \text{ keV}$

### Vérification des intensités par raie

Comparaison des intensités simulées et attendues pour chaque raie Eu-152

Raie (keV)	Émis	I simulée (%)	I attendue (%)	Écart	Statut
39.52 (X)	5 199 989	20.80	20.8	< 0.01%	✓
40.12 (X)	9 426 440	37.71	37.7	< 0.01%	✓
121.78	7 099 951	28.40	28.41	< 0.01%	✓
244.70	1 882 297	7.53	7.53	< 0.01%	✓
344.28	6 649 673	26.60	26.59	< 0.01%	✓
411.12	558 246	2.23	2.24	< 0.5%	✓
443.97	706 678	2.83	2.83	< 0.01%	✓
778.90	3 245 196	12.98	12.97	< 0.1%	✓
867.38	1 060 009	4.24	4.24	< 0.01%	✓
964.08	3 658 532	14.63	14.63	< 0.01%	✓
1085.87	2 551 198	10.20	10.21	< 0.1%	✓
1112.07	3 409 096	13.64	13.64	< 0.01%	✓
1408.01	5 251 762	21.01	21.01	< 0.01%	✓
<b>TOTAL</b>		<b>50 699 067</b>	<b>202.80</b>	<b>202.78</b>	< 0.01% ✓

### Vérification du nombre de gammas par désintégration

Événements simulés : 25 000 000  
 Primaires générés : 50 699 067

Le nombre moyen de gammas par désintégration est :

$$\bar{n}_\gamma = \frac{50\,699\,067}{25\,000\,000} = 2.028$$

Cette valeur correspond à la somme des intensités du spectre Eu-152 :

$$\sum_i I_i = 202.8\% \implies \bar{n}_\gamma = 2.028 \quad 3$$

### Conclusion

La génération des raies Eu-152 est **parfaitement cohérente**. Toutes les intensités sont reproduites avec une précision meilleure que 0.5%.

## 11.3 Angle Solide

### Définition de l'angle solide

L'angle solide  $\Omega$  est la mesure bidimensionnelle de la portion de sphère vue depuis un point. Pour une sphère complète :

$$\Omega_{4\pi} = 4\pi \text{ sr (stéradians)}$$

Pour un cône de demi-angle  $\theta_0$  autour de l'axe  $z$ , l'angle solide est :

$$\Omega_{\text{cône}} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_0} \sin \theta \, d\theta = 2\pi(1 - \cos \theta_0)$$

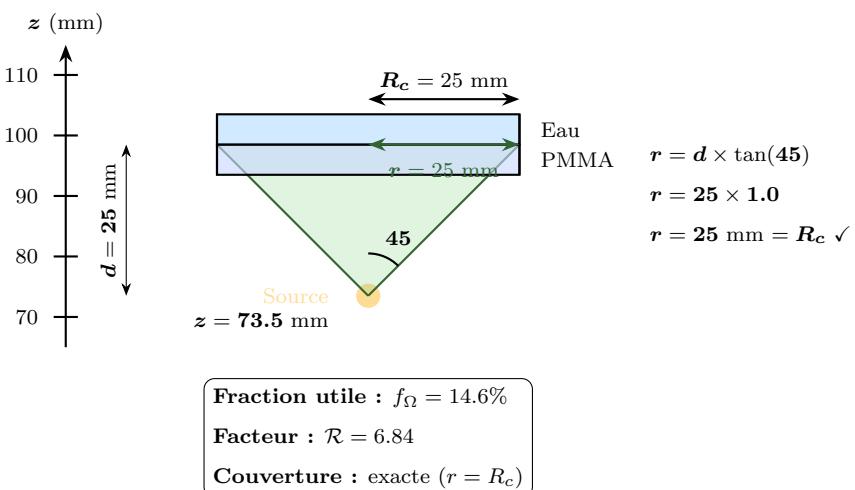
Avec un demi-angle  $\theta_0 = 45^\circ$  :

$$\Omega_{\text{cône}} = 2\pi(1 - \cos 45^\circ) = 2\pi(1 - 0.707) = 2\pi \times 0.293 = 1.84 \text{ sr}$$

La **fraction d'angle solide** couverte par le cône est :

$$f_\Omega = \frac{\Omega_{\text{cône}}}{4\pi} = \frac{1 - \cos \theta_0}{2} = \frac{1 - \cos 45^\circ}{2} = 0.146 = 14.6\%$$

### Géométrie des angles solides



Géométrie du cône d'émission. Le cône de  $45^\circ$  couvre exactement le rayon du container (25 mm) au niveau de l'entrée de l'eau.  
 La couverture est optimale.

## Angle solide et renormalisation

**Problème :** Une source réelle émet dans toutes les directions ( $4\pi$ )  
 ⇒ La plupart des gammas ne touchent pas le détecteur

**Solution :** Simuler uniquement un cône dirigé vers le détecteur  
 ⇒ Gain de temps de calcul considérable

$$\text{Fraction utile : } f_{\Omega} = \frac{1 - \cos(45)}{2} = \mathbf{14.6\%}$$

**Équivalence :** 1 evt simulation = 0.146 désintégration réelle  
 6.84 evt simulation = 1 désintégration réelle

**Conversion dose :**  $D_{\text{réelle}} = D_{\text{simulation}} \times 0.146$

$$\text{Temps irradiation : } t = \frac{N_{\text{evt}} \times 6.84}{A} \text{ (avec } A \text{ en Bq)}$$

### Vérification de la couverture géométrique

Le rayon couvert par le cône à la distance  $d$  de la source est :

$$r_{\text{cône}}(d) = d \times \tan \theta_0$$

*Rayon couvert par le cône ( $\theta_0 = 45^\circ$ ) à différentes positions*

Position	$z$ (mm)	$d = z - z_s$ (mm)	$r_{\text{cône}}$ (mm)	Couverture
Bas PMMA	93.5	20.0	20.0	$< R_c$
Bas eau	98.5	25.0	<b>25.0</b>	$= R_c$
Centre eau	101.0	27.5	27.5	$> R_c$
Haut eau	103.5	30.0	30.0	$> R_c$

#### Conclusion

Le cône de  $45^\circ$  couvre exactement le container d'eau ( $R_c = 25$  mm) à l'entrée de l'eau ( $z = 98.5$  mm), puis dépasse dans l'épaisseur de l'eau avec une marge croissante jusqu'à +5 mm en sortie.

## 11.4 Renormalisation

Dans une simulation Monte Carlo d'une source isotrope (émission  $4\pi$ ), la grande majorité des particules n'atteint jamais le détecteur. Pour optimiser le temps de calcul, on restreint l'émission à un cône dirigé vers la région d'intérêt.

Pour que les résultats de la simulation avec cône soient équivalents à une source isotrope réelle, il faut appliquer un **facteur de renormalisation**.

Une source d'activité  $A$  (en Bq) émet  $A$  désintégrations par seconde dans tout l'espace  $4\pi$ . Le nombre de gammas émis vers l'angle solide  $\Omega$  est :

$$\dot{N}_{\gamma}^{\Omega} = A \times \bar{n}_{\gamma} \times \frac{\Omega}{4\pi}$$

où  $\bar{n}_{\gamma}$  est le nombre moyen de gammas par désintégration. Dans la simulation, **tous** les gammas sont émis dans le cône  $\Omega_{\text{cône}}$ . Un événement de simulation correspond donc à une fraction de désintégration :

$$1 \text{ événement simulation} \equiv f_{\Omega} \text{ désintégration réelle}$$

**Facteur de renormalisation** Le facteur de renormalisation  $\mathcal{R}$  permet de convertir les résultats de simulation en équivalent physique :

$$\mathcal{R} = \frac{1}{f_{\Omega}} = \frac{2}{1 - \cos \theta_0} = \frac{2}{1 - \cos 45^\circ} = \frac{2}{0.293} = \mathbf{6.83}$$

#### Interprétation

Il faut  $\mathcal{R} = 6.83$  événements de simulation pour représenter une désintégration complète  $4\pi$

## Application aux doses

La dose par désintégration réelle est :

$$D_{\text{réel}} = D_{\text{sim}} \times f_{\Omega} = \frac{D_{\text{sim}}}{\mathcal{R}}$$

### Schéma récapitulatif

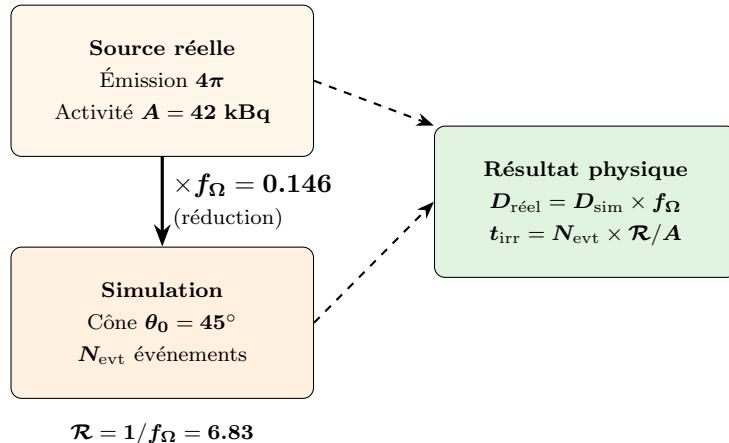


Schéma de renormalisation entre simulation (cône) et source réelle ( $4\pi$ ).

### Paramètres de la configuration actuelle

Paramètre	Symbole	Valeur
Activité source ( $4\pi$ )	$A$	42 kBq
Demi-angle du cône	$\theta_0$	$45^\circ$
Fraction d'angle solide	$f_{\Omega} = \frac{1-\cos\theta_0}{2}$	0.146 (14.6%)
Facteur de renormalisation	$\mathcal{R} = 1/f_{\Omega}$	6.83
Activité effective (dans le cône)	$A_{\text{eff}} = A \times f_{\Omega}$	6.13 kBq

Table 57: Paramètres de renormalisation pour la simulation.

### Application numérique

Pour  $N_{\text{evt}} = 25 \times 10^6$  événements simulés :

- Nombre de désintégrations  $4\pi$  représentées :  $N_{\text{désint}} = N_{\text{evt}} \times \mathcal{R} = 25 \times 10^6 \times 6.83 = 171 \times 10^6$
- Temps d'irradiation simulé :  $t_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{désint}}}{A} = \frac{171 \times 10^6}{42 \times 10^3} = 4071 \text{ s} \approx 68 \text{ min}$

Le débit de dose est calculé par :

$$\dot{D} = D_{\text{sim}} \times A_{\text{eff}} = \frac{D_{\text{sim}}}{N_{\text{evt}}} \times A \times f_{\Omega}$$

### Problème de l'efficacité de simulation

Dans une simulation Monte Carlo d'une source isotrope (émission  $4\pi$ ), la grande majorité des particules n'atteint jamais le détecteur. Pour optimiser le temps de calcul, on restreint l'émission à un cône dirigé vers la région d'intérêt.

Pour que les résultats de la simulation avec cône soient équivalents à une source isotrope réelle, il faut appliquer un **facteur de renormalisation**.

Une source d'activité  $A$  (en Bq) émet  $A$  désintégrations par seconde dans tout l'espace  $4\pi$ . Le nombre de gammas émis vers l'angle solide  $\Omega$  est :

$$\dot{N}_{\gamma}^{\Omega} = A \times \bar{n}_{\gamma} \times \frac{\Omega}{4\pi}$$

où  $\bar{n}_{\gamma}$  est le nombre moyen de gammas par désintégration. Dans la simulation, **tous** les gammas sont émis dans le cône  $\Omega_{\text{cône}}$ . Un événement de simulation correspond donc à une fraction de désintégration :

$$1 \text{ événement simulation} \equiv f_{\Omega} \text{ désintégration réelle}$$

### Facteur de renormalisation

Le facteur de renormalisation  $\mathcal{R}$  permet de convertir les résultats de simulation en équivalent physique :

$$\mathcal{R} = \frac{1}{f_{\Omega}} = \frac{2}{1 - \cos \theta_0} = \frac{2}{1 - \cos 40^\circ} = \frac{2}{0.234} = 8.55$$

#### Interprétation

Il faut  $\mathcal{R} = 8.55$  événements de simulation pour représenter une désintégration complète  $4\pi$

## 11.5 Relations activité–temps d’irradiation

### Définitions

- **Activité  $A$**  : nombre de désintégrations par seconde (Bq)
- **Activité dans le cône  $A_{\text{cône}}$**  : désintégrations par seconde contribuant au cône
- **Temps d’irradiation  $t_{\text{irr}}$**  : durée nécessaire pour accumuler  $N$  désintégrations

### Calcul du temps d’irradiation

#### Méthode 1 : À partir des événements simulés

Un événement de simulation représente l’émission de gammas dans le cône  $\Omega_{\text{cone}}$ . Pour une source isotrope, cela correspond à une fraction  $f_{\Omega}$  de désintégration.

Le nombre de désintégrations réelles équivalentes à  $N_{\text{evt}}$  événements simulés est :

$$N_{\text{désint}} = \frac{N_{\text{evt}}}{f_{\Omega}} = N_{\text{evt}} \times \mathcal{R}$$

Le temps d’irradiation correspondant est :

$$t_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{désint}}}{A} = \frac{N_{\text{evt}} \times \mathcal{R}}{A} = \frac{N_{\text{evt}}}{A \times f_{\Omega}}$$

#### Méthode 2 : À partir de l’activité dans le cône

L’activité effective dans le cône est :

$$A_{\text{cône}} = A \times f_{\Omega}$$

Le nombre moyen de gammas émis dans le cône par seconde est :

$$\dot{N}_{\gamma}^{\text{cône}} = A_{\text{cône}} \times \bar{n}_{\gamma} = A \times f_{\Omega} \times \bar{n}_{\gamma}$$

Le temps pour générer  $N_{\gamma}$  gammas (=  $N_{\text{primaires}}$  dans la simulation) est :

$$t_{\text{irr}} = \frac{N_{\gamma}}{\dot{N}_{\gamma}^{\text{cône}}} = \frac{N_{\text{primaires}}}{A \times f_{\Omega} \times \bar{n}_{\gamma}}$$

### Application numérique

#### Paramètres

Paramètres pour le calcul du temps d’irradiation

Paramètre	Valeur	Source
Activité source $A$	$4.2 \times 10^4$ Bq $= 42$ kBq	Source Eu-152
Fraction angle solide $f_{\Omega}$	0.146	$\theta_0 = 45^\circ$
Facteur de renormalisation $\mathcal{R}$	6.83	$1/f_{\Omega}$
Gammas/désintégration $\bar{n}_{\gamma}$	2.03	Spectre Eu-152 (13 raies)
Événements simulés $N_{\text{evt}}$	$25 \times 10^6$	Simulation
Primaires générés $N_{\text{primaires}}$	$50.7 \times 10^6$	Simulation

#### Calcul par la méthode 1 (événements)

$$N_{\text{désint}} = N_{\text{evt}} \times \mathcal{R} = 25 \times 10^6 \times 6.83 = 170.7 \times 10^6 \text{ désintégrations}$$

$$t_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{désint}}}{A} = \frac{170.7 \times 10^6}{4.2 \times 10^4} = 4065 \text{ s} = \boxed{67.7 \text{ min} \approx 1.1 \text{ h}}$$

#### Calcul par la méthode 2 (primaires)

$$A_{\text{cône}} = A \times f_{\Omega} = 4.2 \times 10^4 \times 0.146 = 6.15 \times 10^3 \text{ Bq} = 6.15 \text{ kBq}$$

$$\dot{N}_{\gamma}^{\text{cône}} = A_{\text{cône}} \times \bar{n}_{\gamma} = 6.15 \times 10^3 \times 2.03 = 12.5 \times 10^3 \text{ gammas/s}$$

$$t_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{primaires}}}{\dot{N}_{\gamma}^{\text{cône}}} = \frac{50.7 \times 10^6}{12.5 \times 10^3} = 4061 \text{ s} = \boxed{67.7 \text{ min} \approx 1.1 \text{ h}}$$

## Vérification

Les deux méthodes donnent le même résultat :  $t_{\text{irr}} \approx 68 \text{ min} \approx 1.1 \text{ h}$

### Tableau récapitulatif des temps d'irradiation

Temps d'irradiation pour différentes activités de source				
Activité	Activité	$t_{\text{irr}}$ (25M evt)	Débit dose (anne. 0)	
			( $\mu\text{Gy/h}$ )	
10 kBq	0.01 MBq	4.7 h	1.5	
<b>42 kBq</b>	<b>0.042 MBq</b>	<b>68 min</b>	<b>6.4</b>	
100 kBq	0.1 MBq	28.5 min	15.2	
1 MBq	1 MBq	2.8 min	152	
37 MBq	37 MBq	4.6 s	5 615	

### Formule générale du débit de dose

Le débit de dose (en  $\mu\text{Gy/h}$ ) est :

$$\dot{D} = \frac{D_{\text{sim}}}{N_{\text{evt}}} \times A \times f_{\Omega} \times 3.6$$

où le facteur 3.6 convertit nGy/s en  $\mu\text{Gy/h}$  ( $\times 3600 \text{ s/h} \div 1000 \text{ nGy}/\mu\text{Gy}$ ).

Application numérique (anneau central,  $A = 42 \text{ kBq}$ ) :

$$\dot{D} = \frac{7196 \text{ nGy}}{25 \times 10^6} \times 4.2 \times 10^4 \text{ Bq} \times 0.146 \times 3.6 = \boxed{6.4 \mu\text{Gy/h}}$$

### Temps pour atteindre une dose cible

Pour atteindre une dose  $D_{\text{cible}}$  dans l'anneau central :

$$t_{\text{cible}} = \frac{D_{\text{cible}}}{\dot{D}}$$

Temps pour atteindre différentes doses (anneau central,  $A = 42 \text{ kBq}$ )

Dose cible	Temps (heures)	Temps
10 cGy (100 mGy)	15 625 h	1.8 ans
<b>20 cGy (200 mGy)</b>	<b>31 250 h</b>	<b>3.6 ans</b>
50 cGy (500 mGy)	78 125 h	8.9 ans

### Conclusion

Avec une source de **42 kBq**, il faut environ **3.6 ans** pour atteindre une dose de **20 cGy** dans l'anneau central.