

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

December 30, 2025

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

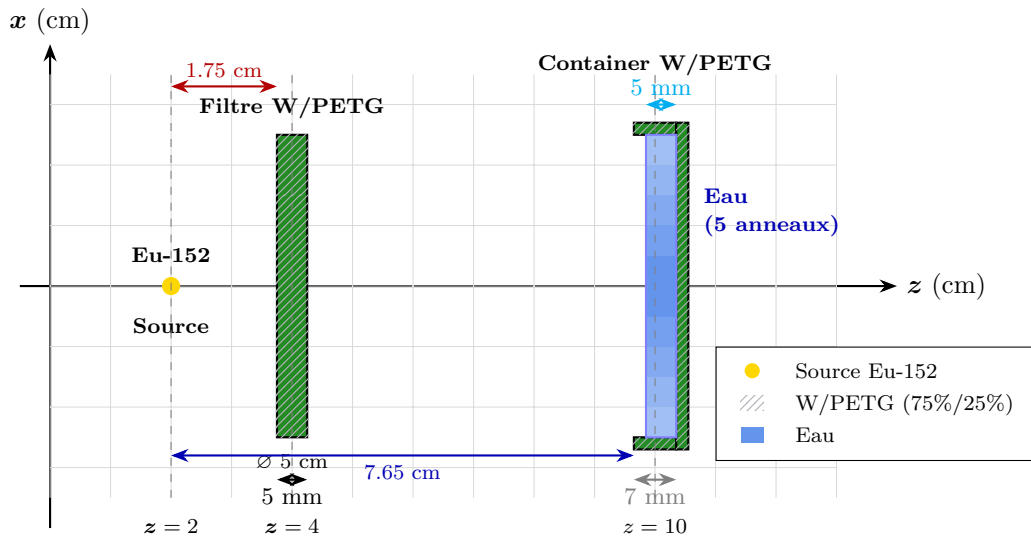
1	Configuration de la simulation	3
2	Description de la géométrie	3
2.1	Vue de face des couronnes d'eau (plan xy)	4
2.2	Récapitulatif des positions (axe z)	4
2.3	Visualisation des angles solides	4
3	Angles solides et normalisation	4
3.1	Définition des angles solides	5
3.2	Principe de la renormalisation	6
3.3	Calcul du temps d'irradiation	6
3.4	Formules récapitulatives	7
3.5	Implémentation dans le code Geant4	7
4	Structure des données ROOT	8
4.1	Histogrammes	8
4.2	Ntuples	9
4.3	Flux de données	10
4.4	Exemples d'analyse ROOT	11
5	Vérification de la cohérence de la simulation	12
5.1	Génération des Gammas Primaires	12
5.2	Transmission à Travers le Filtre W/PETG	12
5.3	Bilan des Particules	14
5.4	Dose dans les Anneaux d'Eau	14
5.5	Renormalisation Temporelle	15
5.6	Vérification de la Cohérence Globale	16
6	Résultats principaux	17
6.1	Bilan des gammas	17
6.2	Calcul des doses déposées avec le filtre W/PETG de 5mm	18
7	Ajout de plan de comptage avant et après le container d'eau	19
7.1	Vue en coupe de la géométrie	19
7.2	Positions axiales des éléments de la géométrie	19
7.3	Caractéristiques des plans de comptage	20
7.4	Nouveaux Ntuples : PreContainer et PostContainer	20
7.5	Schéma récapitulatif des flux de particules	22
7.6	Flux de particules dans les plans Precontainer et Postcontainer avec le filtre W/PETG de 5mm	23
7.7	Résultats sans le filtre W/PETG	24
7.8	Insertion d'une plaque de PMMA pour obtenir le build-up dans l'eau	26
7.9	Vue en coupe de la géométrie	26

1 Configuration de la simulation

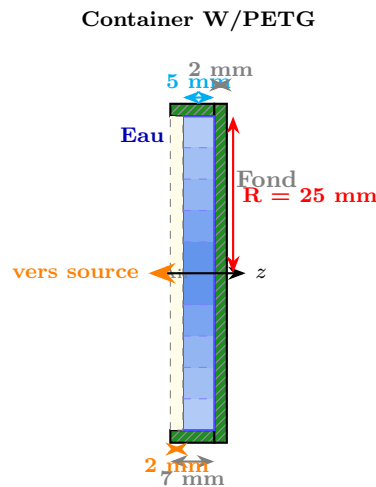
Nouvelle Configuration

- Une source d'**Eur152** de 44 KBq a une position z de 2 cm
- Une **plaque intermédiaire** de **W/PETG** pour filtrer le rayonnement avec une épaisseur initiale de 5 mm
- Son centre est en $z = 1.75$ cm, ses dimensions en xy sont de 100×100 mm
- A une distance z de 78.5 mm de la source, se trouve une container de 50 mm de diamètre. L'épaisseur de ce container est de 7mm en z
- Dans le container se trouve 5 couronnes d'eau concentriques de 5 mm de largeur. La hauteur de l'eau est de 5mm

2 Description de la géométrie

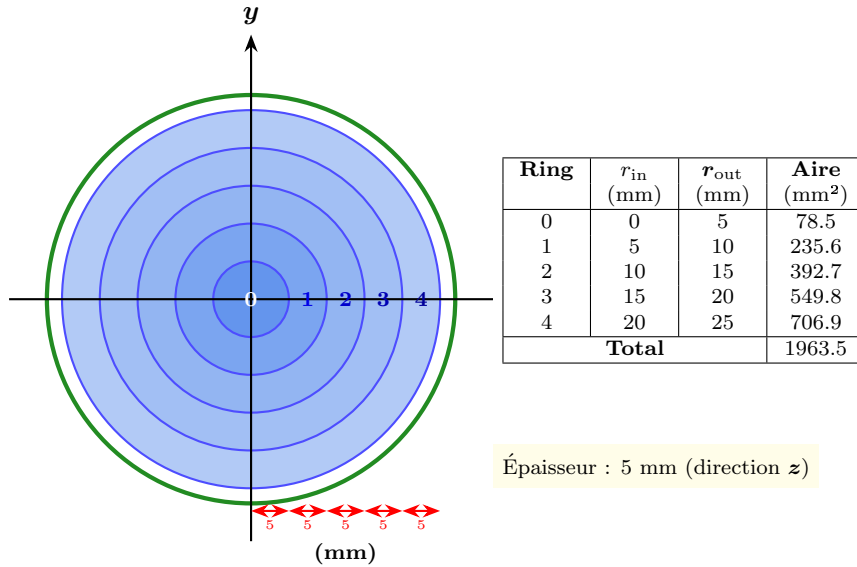


Coupe longitudinale (plan xz) du détecteur "Puits Couronne". L'eau (5 mm) est positionnée contre la face intérieure haute du container (le fond).



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

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



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

2.2 Récapitulatif des positions (axe z)

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

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

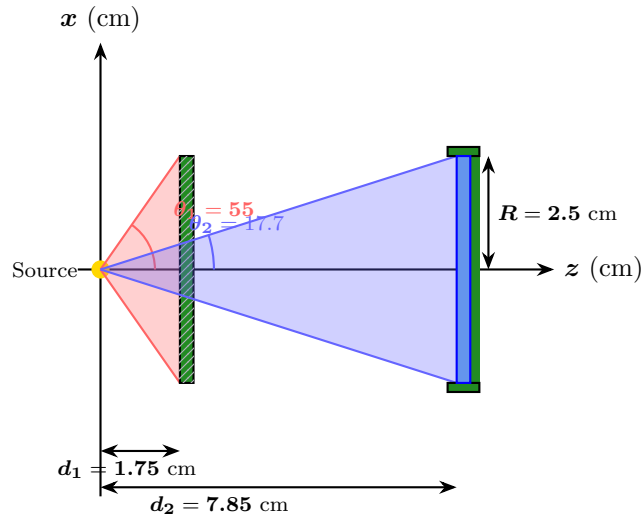
2.3 Visualisation des angles solides

3 Angles solides et normalisation

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

Question

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



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

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

3.1 Définition des angles solides

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

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

Cône de 20° (simulation optimisée)

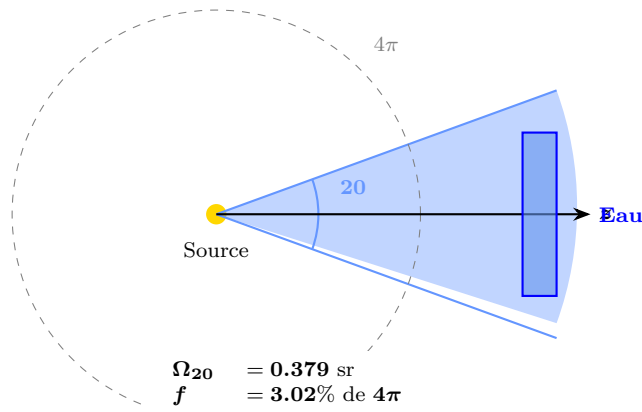
$$\begin{aligned}
 \Omega_{20} &= 2\pi (1 - \cos 20) \\
 &= 2\pi (1 - 0.9397) \\
 &= 2\pi \times 0.0603 \\
 &= 0.379 \text{ sr}
 \end{aligned}$$

Sphère complète

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

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

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



3.2 Principe de la renormalisation

Équivalence physique

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

Principe fondamental

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

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

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

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

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

3.3 Calcul du temps d'irradiation

Relation activité – temps

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

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

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

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

Prise en compte du nombre de gammas par désintégration

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

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

Application numérique

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

Temps par événement simulé

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

Temps pour N_{sim} événements

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

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

3.4 Formules récapitulatives

Formule générale du temps d'irradiation

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

Formule du débit de dose

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

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

Vérification dimensionnelle

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

3.5 Implémentation dans le code Geant4

Calcul automatique dans RunAction

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

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

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

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

4 Structure des données ROOT

Principe fondamental

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

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

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

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

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

4.1 Histogrammes

Liste des histogrammes

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

Liste des histogrammes dans le fichier ROOT

Description détaillée

H0 : nGammasPerEvent

Nombre de gammas par événement

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

Remplissage : RunAction::RecordEventStatistics()

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

H1 : energySpectrum

Spectre en énergie des gammas

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

Remplissage : RunAction::RecordEventStatistics()

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

H2 : totalEnergyPerEvent

Énergie totale par événement

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

Remplissage : RunAction::RecordEventStatistics()

H3–H7 : doseRing0 à doseRing4

Dose par anneau d'eau

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

Remplissage : `RunAction::AddRingEnergy()`

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

H8 : doseTotalWater

Dose totale dans l'eau

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

Remplissage : `RunAction::RecordEventStatistics()`

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

4.2 Ntuples

Ntuple 0 : EventData

Données par événement (désintégration)

Description : Une ligne par événement (désintégration simulée).

Remplissage : `EventAction::EndOfEventAction()`

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

Structure du ntuple EventData

Ntuple 1 : GammaData

Données par gamma primaire

Description : Une ligne par gamma primaire émis.

Remplissage : `EventAction::EndOfEventAction()`

Critère de transmission

Un gamma est considéré comme transmis si :

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

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

Structure du ntuple GammaData

Ntuple 2 : RingDoseData

Dose par anneau par désintégration

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

Remplissage : `EventAction::EndOfEventAction()`

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

Structure du ntuple RingDoseData

4.3 Flux de données

Diagramme de remplissage

Classe	Méthode	Données remplies
SteppingAction	<code>UserSteppingAction()</code>	Détection dans les plans Dépôts d'énergie → <code>EventAction</code>
EventAction	<code>BeginOfEventAction()</code>	Reset des compteurs Enregistrement des primaires
	<code>EndOfEventAction()</code>	Ntuple 0 (<code>EventData</code>) Ntuple 1 (<code>GammaData</code>) Ntuple 2 (<code>RingDoseData</code>)
RunAction	<code>RecordEventStatistics()</code>	H0, H1, H2, H8
	<code>AddRingEnergy()</code>	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 (4π)	44 kBq
Demi-angle du cône	20°
Dose totale dans l'eau	10.39 MeV
Débit de dose moyen	656 nGy h ⁻¹

5.1 Génération des Gammas Primaires

Statistiques de Génération

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

Statistiques de génération des gammas primaires Eu-152

Vérification de la Cohérence

Le nombre moyen de gammas par désintégration est :

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

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

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

Cohérence Génération

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

5.2 Transmission à Travers le Filtre W/PETG

Compteurs de Vérification

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

Compteurs de passage dans le filtre W/PETG

Plans de Comptage Cylindriques

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

Compteurs des plans de comptage cylindriques

Analyse de la Transmission

Transmission du Filtre

La transmission mesurée par les plans cylindriques est :

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

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

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

Différence entre Compteurs

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

Comparaison des méthodes de mesure de transmission

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

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

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

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

Cette valeur élevée est attendue car :

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

Vérification avec la loi de Beer-Lambert :

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

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

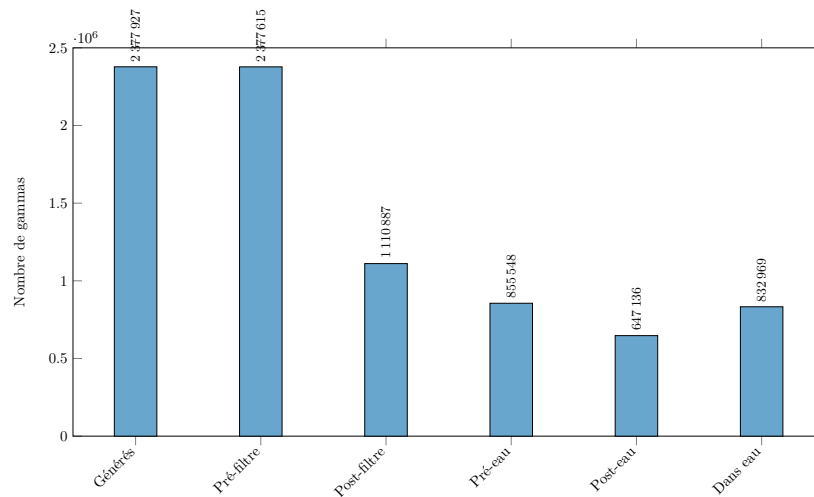
- Les interactions Compton (diffusion hors du plan)
- Les gammas absorbés par effet photoélectrique
- La contribution des gammas de plus basse énergie

Cohérence Transmission

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

5.3 Bilan des Particules

Flux de Particules



Flux de gammas à travers la géométrie

Bilan Quantitatif

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

Bilan des particules à travers la géométrie

Pertes Géométriques

Entre le post-filtre et le pré-eau :

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

Ces pertes correspondent aux gammas qui :

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

5.4 Dose dans les Anneaux d'Eau

Résultats par Anneau

Distribution Radiale de la Dose

Analyse de l'Uniformité

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

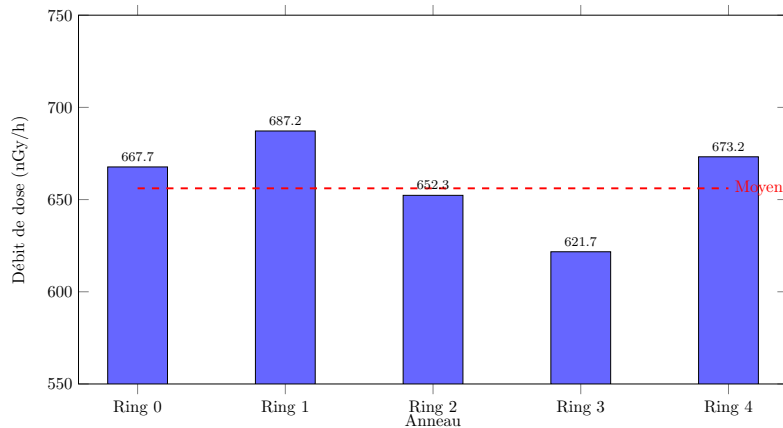
Écart-type des débits de dose :

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

Coefficient de variation :

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

Dose déposée dans chaque anneau d'eau



Débit de dose par anneau – Distribution relativement uniforme

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

Cohérence Uniformité de la Dose

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

Proportionnalité Énergie/Aire

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

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

Vérification de la proportionnalité énergie/aire

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

5.5 Renormalisation Temporelle

Paramètres de la Source

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 :

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

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

Le temps d'irradiation équivalent est :

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

Vérification

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

Durée correspondante pour une source 4π :

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

Cohérence Renormalisation

Le temps d'irradiation de 15.5 min correspond bien à 1.23 millions de désintégrations dans un cône de 20° 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 ± 0.03
244.70	7.5	75 251	38 758	36 570	51.50 ± 0.18
344.28	26.5	265 450	74 040	191 783	27.89 ± 0.09
411.12	2.2	22 369	4 581	17 823	20.48 ± 0.27
443.97	2.8	28 541	4 954	23 623	17.36 ± 0.22
778.90	12.9	129 290	8 713	120 697	6.74 ± 0.07
867.38	4.2	42 550	2 371	40 212	5.57 ± 0.11
964.08	14.6	146 493	6 992	139 620	4.77 ± 0.06
1085.8	10.2	102 060	4 133	97 999	4.05 ± 0.06
1112.0	13.6	136 706	5 177	131 631	3.79 ± 0.05
1408.0	21.0	210 710	6 219	204 600	2.95 ± 0.04
Total	143.9	1 443 552	434 560	1 010 078	30.10 ± 0.04

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

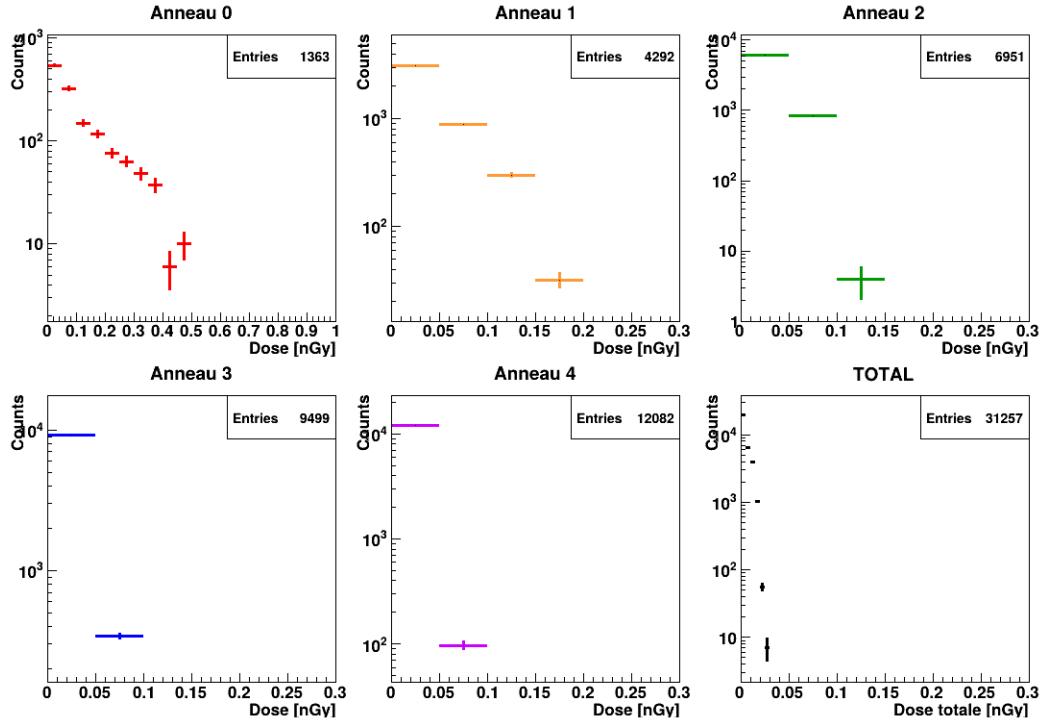
E_γ (keV)	Absorption (%)	E_γ (keV)	Absorption (%)
121.78	98.06 ± 0.03	867.38	5.57 ± 0.11
244.70	51.50 ± 0.18	964.08	4.77 ± 0.06
344.28	27.89 ± 0.09	1085.87	4.05 ± 0.06
411.12	20.48 ± 0.27	1112.07	3.79 ± 0.05
443.97	17.36 ± 0.22	1408.01	2.95 ± 0.04
778.90	6.74 ± 0.07		

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

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

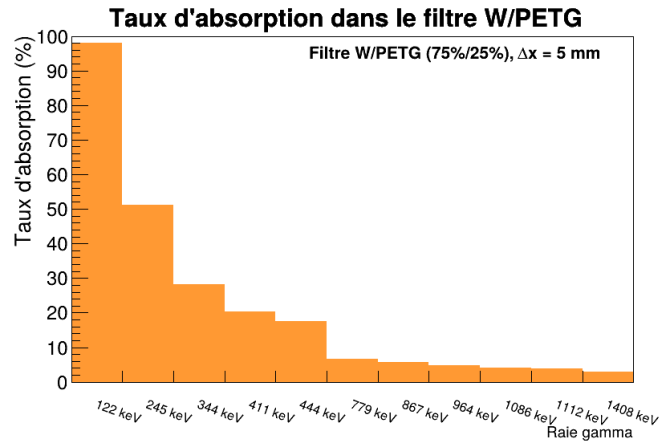
Anneau	r_{in} (mm)	r_{out} (mm)	Masse (g)	E_{dep} (MeV)	Dose (nGy)	Dose/désint. (nGy)
0	0	5	0.393	3.91×10^2	159.7	1.09×10^{-1}
1	5	10	1.178	1.14×10^3	155.0	3.61×10^{-2}
2	10	15	1.964	1.86×10^3	151.5	2.17×10^{-2}
3	15	20	2.749	2.50×10^3	145.9	1.54×10^{-2}
4	20	25	3.534	3.44×10^3	156.0	1.29×10^{-2}
Total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

Dose déposée par anneau



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

Taux d'absorption par raie gamma



Absorption du filtre de W/PETG de 5mm

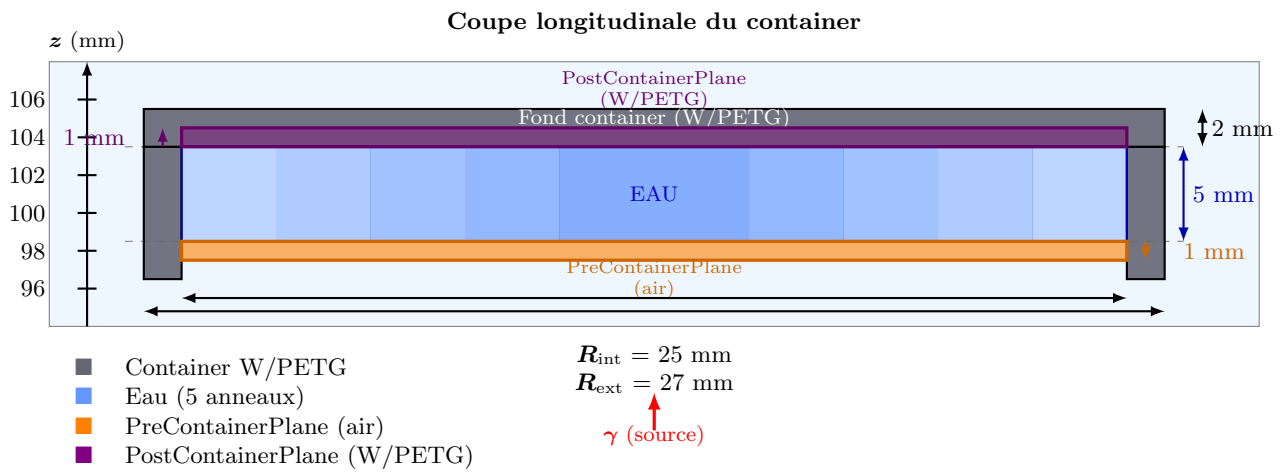
7 Ajout de plan de comptage avant et après le container d'eau

Changement de géométrie

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

7.1 Vue en coupe de la géométrie

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



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

7.2 Positions axiales des éléments de la géométrie

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

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

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

7.3 Caractéristiques des plans de comptage

Table 19: Plans de comptage – Configuration actuelle

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

Notes

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

7.4 Nouveaux Ntuples : PreContainer et PostContainer

Addition de ntuple

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

Ntuple precontainer (index 2)

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

Caractéristiques du plan PreContainerPlane

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

Variables du ntuple *precontainer*

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

Conditions de remplissage du ntuple precontainer

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

Photons vers l'eau

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

```

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

```

Électrons vers l'eau

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

```

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

```

Ntuple postcontainer (index 3)

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

Caractéristiques du plan PostContainerPlane

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

Variables du ntuple *postcontainer*

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

Conditions de remplissage du ntuple postcontainer

Pour chaque particule traversant le plan PostContainerPlane :

Photons rétrodiffusés (depuis l'eau)

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

```

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

```

Électrons rétrodiffusés (depuis l'eau)

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

```

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

```

Électrons vers l'eau

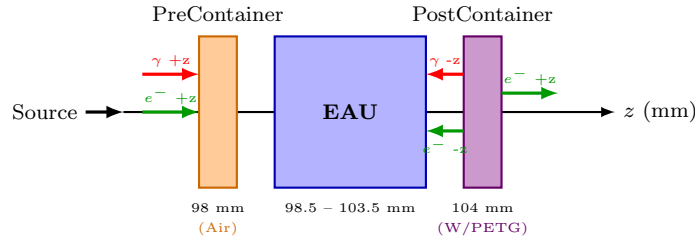
- **Type de particule** : électron (e^-)
- **Direction** : $p_z > 0$ (vers l'eau, direction $+z$)

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

Remarques importantes

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

7.5 Schéma récapitulatif des flux de particules



Récapitulatif des variables par plan

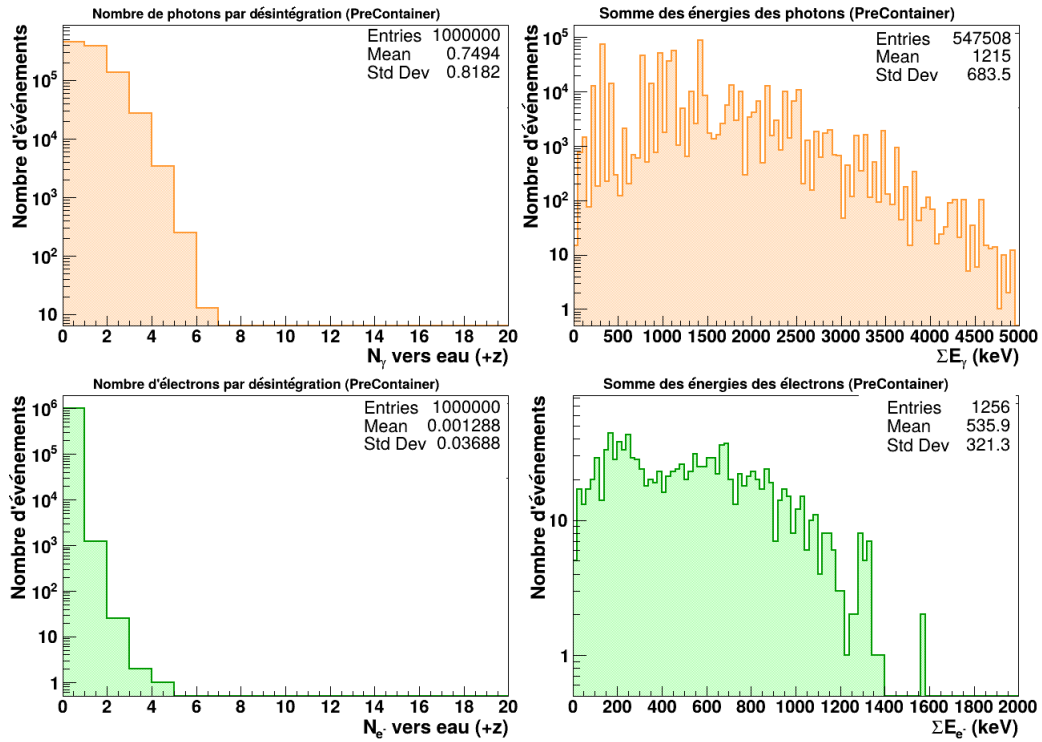
Plan	Particule	Variables
PreContainerPlane	γ vers eau ($+z$)	nPhotons,sumEPhotons_keV
	e^- vers eau ($+z$)	nElectrons, sumEElectrons_keV
PostContainerPlane	γ depuis eau ($-z$)	nPhotons_back,sumEPhotons_back_keV
	e^- depuis eau ($-z$)	nElectrons_back,sumEElectrons_back_keV
	vers eau ($+z$)	nElectrons_fwd,sumEElectrons_fwd_keV

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

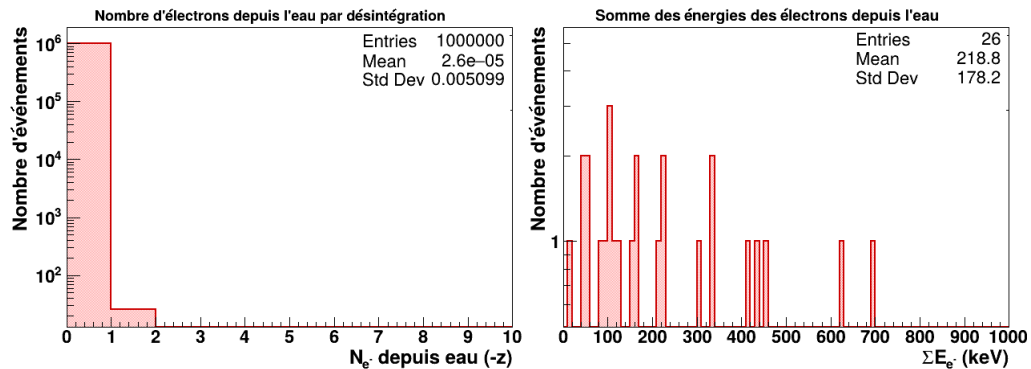
Filtre $W/PETG$ 5mm

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

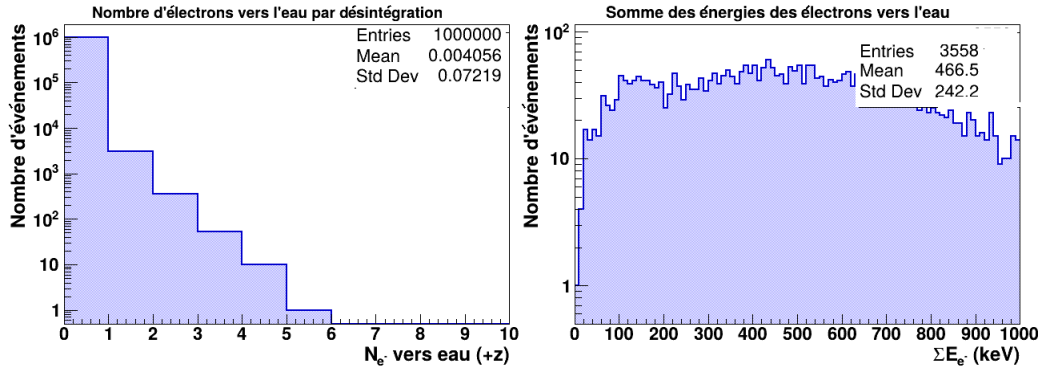
- photons et électrons dans le **PreContainerPlane**
- photons dans le **PostContainerPlane**
- électrons "backward" retrodiffusés dans le **PostContainerPlane**
- électrons "forward" diffusés dans le **PostContainerPlane**



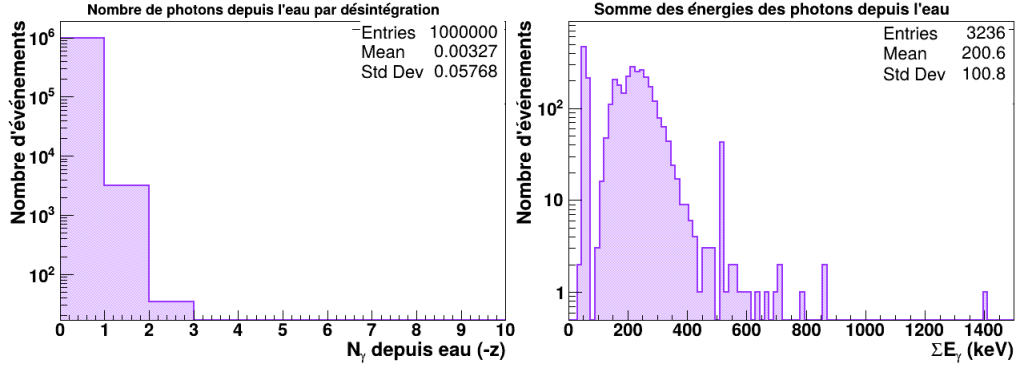
photons et électrons dans le **PreContainerPlane** avec le filtre de $W/PETG$ de 5mm



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

Filtre **W/PETG** 5mm

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

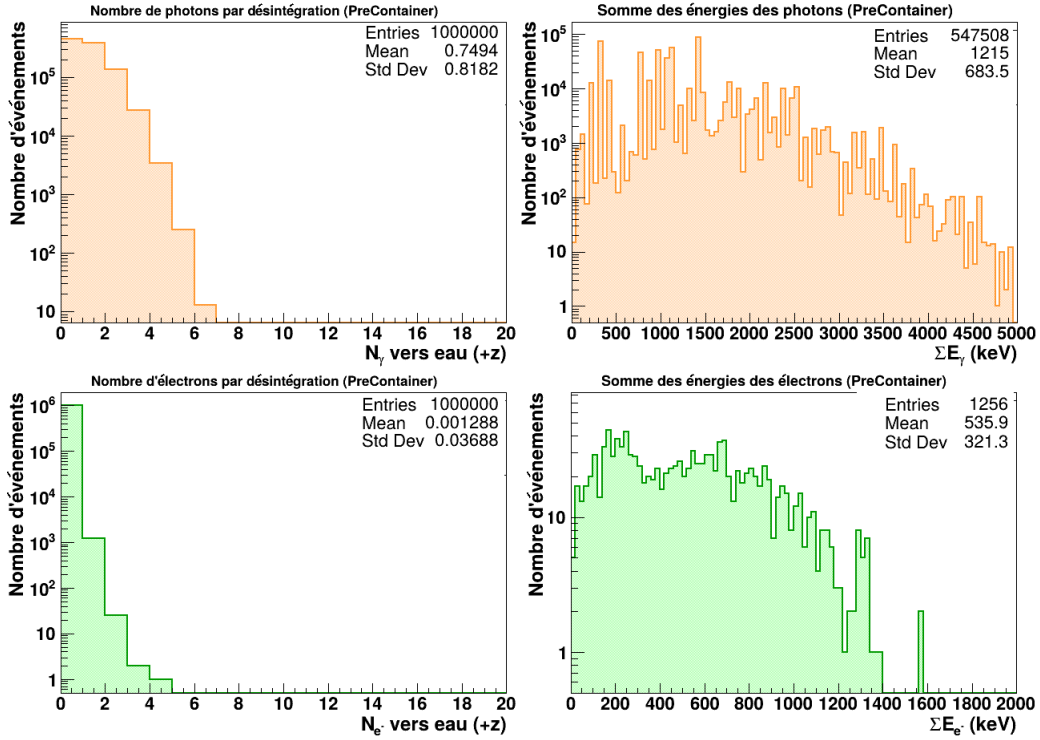
- photons et électrons dans le **PreContainerPlane**
- photons dans le **PostContainerPlane**
- électrons "backward" retrodiffusés dans le **PostContainerPlane**
- électrons "forward" diffusés dans le **PostContainerPlane**

Doses déposées dans les anneaux d'eau – Version simplifiée

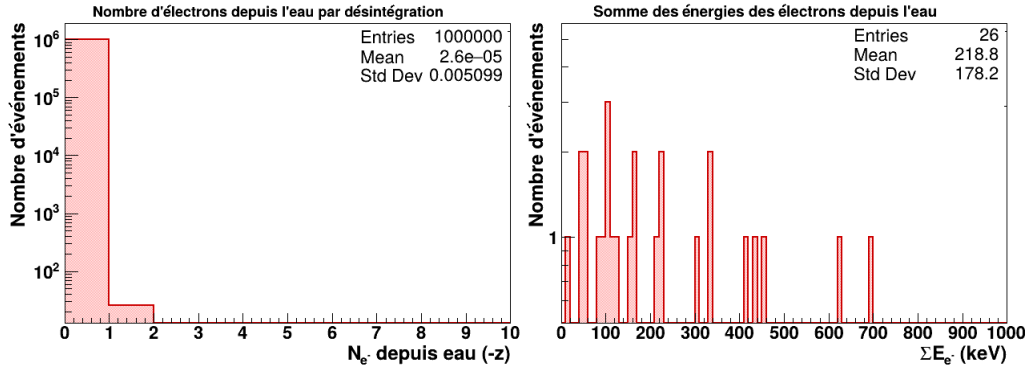
Anneau	Rayon (mm)	Masse (g)	Dose (nGy)	Dose/désint. (nGy)
0	0 – 5	0.393	179.8	6.76×10^{-2}
1	5 – 10	1.178	177.8	2.27×10^{-2}
2	10 – 15	1.964	178.2	1.36×10^{-2}
3	15 – 20	2.749	173.1	9.70×10^{-3}
4	20 – 25	3.534	180.0	7.77×10^{-3}
TOTAL		9.817	177.4	1.77×10^{-4}

Comparaison des doses : filtre W/PETG vs filtre Air

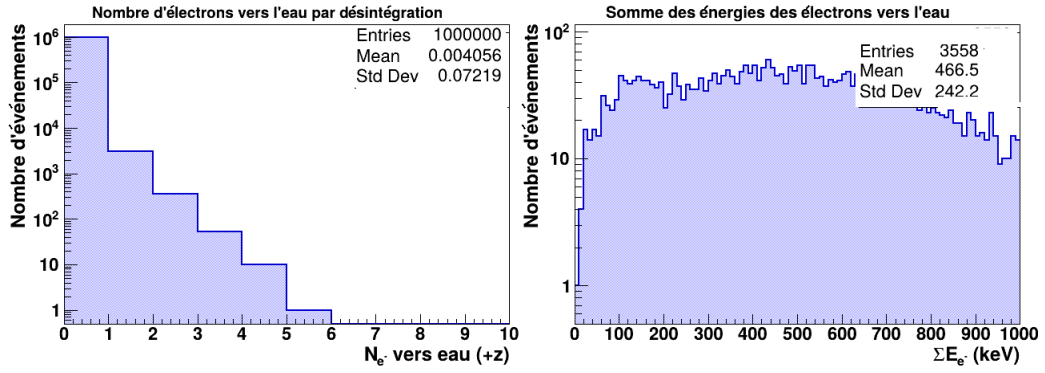
Anneau	Rayon (mm)	Dose W/PETG (nGy)	Dose Air (nGy)	Augmentation
0	0 – 5	148.4	179.8	+21.2%
1	5 – 10	159.7	177.8	+11.3%
2	10 – 15	155.3	178.2	+14.7%
3	15 – 20	149.2	173.1	+16.0%
4	20 – 25	153.7	180.0	+17.1%
TOTAL		153.3	177.4	+15.7%



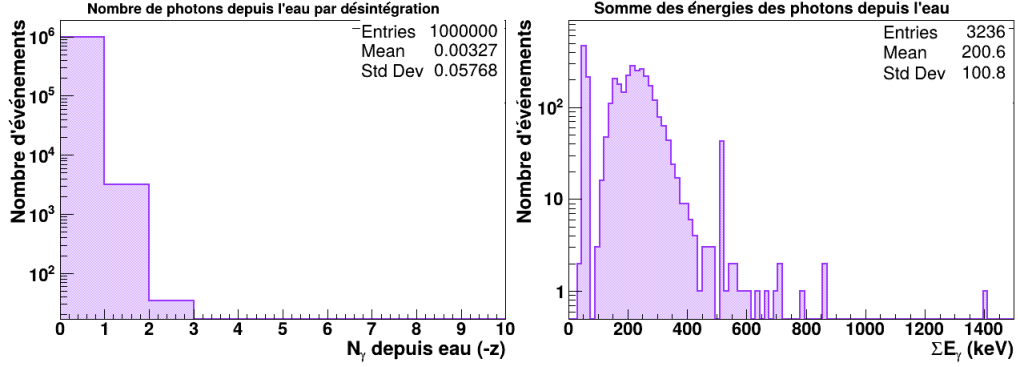
photons et électrons dans le *PreContainerPlane* sans le filtre de *W/PETG* de 5mm



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

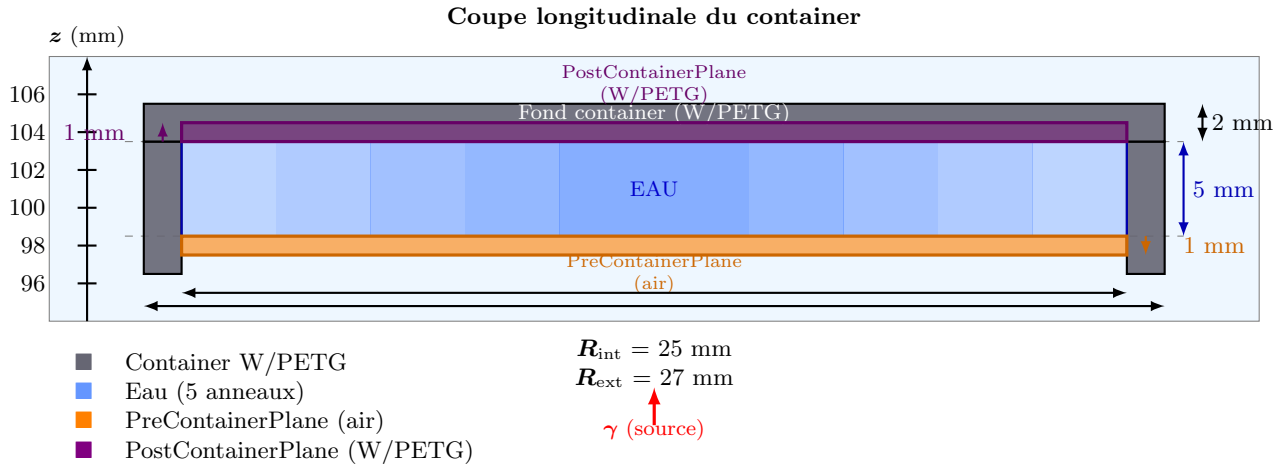
7.8 Insertion d'une plaque de PMMA pour obtenir le build-up dans l'eau

Changement de géométrie

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

7.9 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.