

# Analyse des Méthodes de Calcul du dose dans une Simulation Geant4

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

Documentation technique

January 4, 2026

## Abstract

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

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

# Contents

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

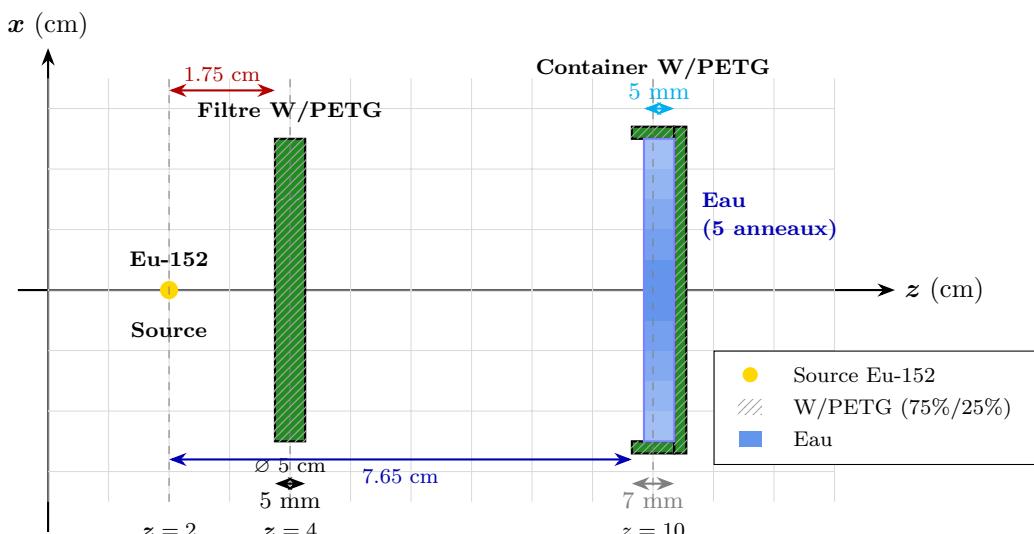
|   |           |
|---|-----------|
| <b>9 Résultats avec la configuration complète (eau+Tungstene+PMMA</b> | <b>38</b> |
| 9.1 Analyse des flux de particules aux interfaces . . . . .           | 38        |
| 9.2 Dose déposée par anneau . . . . .                                 | 40        |
| <b>10 Conclusions avec la configuration complète</b>                  | <b>43</b> |

## 1 Configuration de la simulation

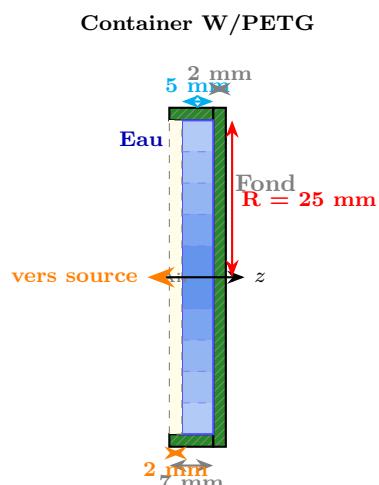
### Nouvelle Configuration

- 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

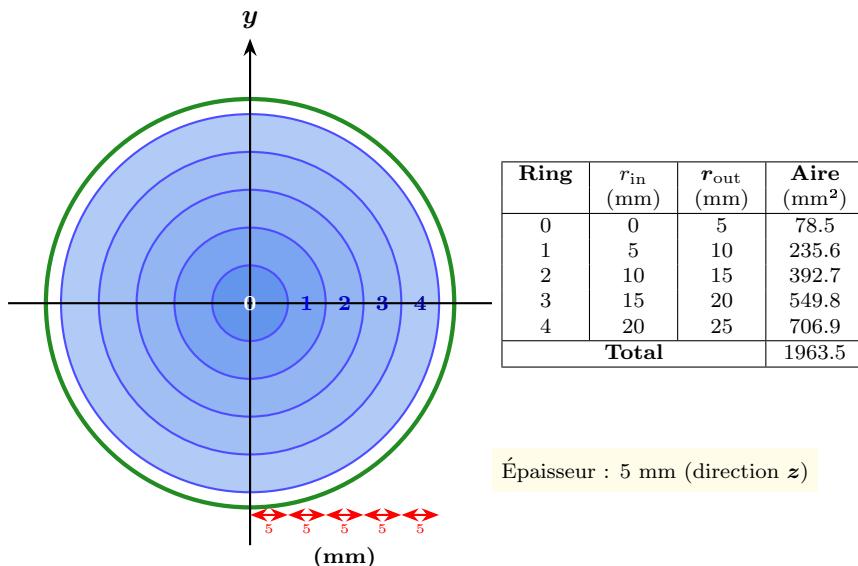


Coupe longitudinale (plan  $xz$ ) du détecteur "Puits Couronne". L'eau (5 mm) est positionnée contre la face intérieure haute du container (le fond).



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   |

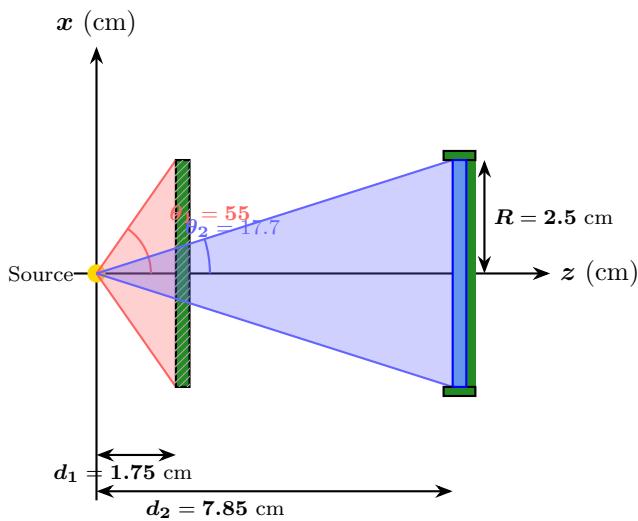
## 2.3 Visualisation des angles solides

## 3 Angles solides et normalisation

La source Eu-152 a une activité de  $A = 44$  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)

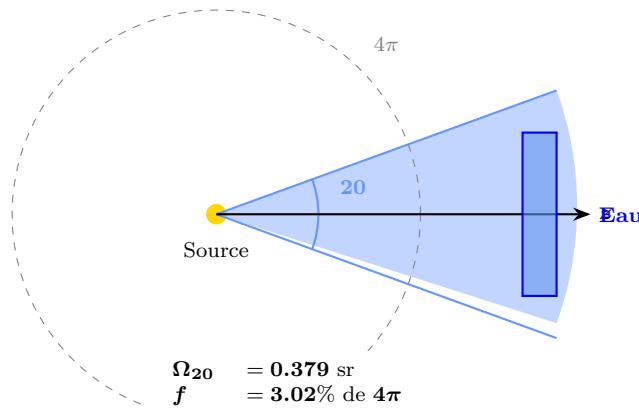
$$\begin{aligned}\Omega_{20} &= 2\pi(1 - \cos 20) \\ &= 2\pi(1 - 0.9397) \\ &= 2\pi \times 0.0603 \\ &= 0.379 \text{ sr}\end{aligned}$$

#### 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 $\theta$                | 20        |
| 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<br>Dépôts d'énergie → EventAction              |
| EventAction    | BeginOfEventAction()    | Reset des compteurs<br>Enregistrement des primaires                     |
|                | EndOfEventAction()      | Ntuple 0 (EventData)<br>Ntuple 1 (GammaData)<br>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 ntuple
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 :

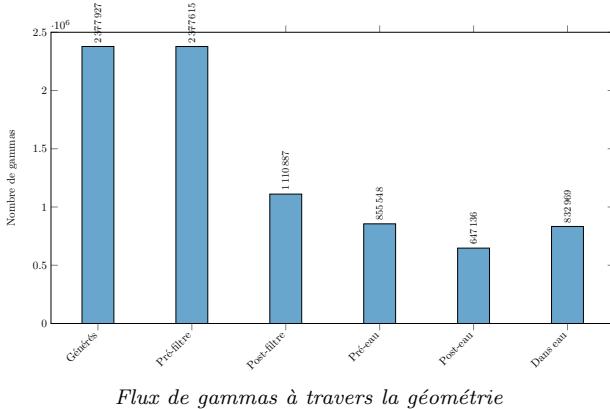
- Les interactions Compton (diffusion hors du plan)
- Les gammas absorbés par effet photoélectrique
- La contribution des gammas de plus basse énergie

### 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

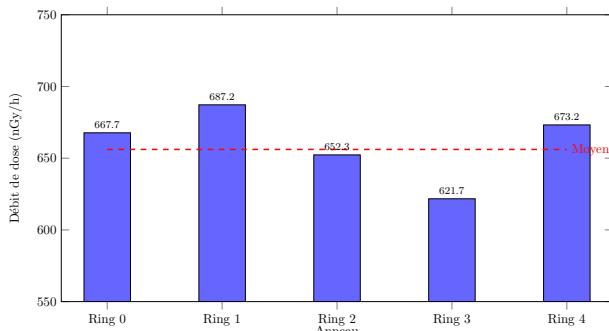
## 5.4 Dose dans les Anneaux d'Eau

### 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%).

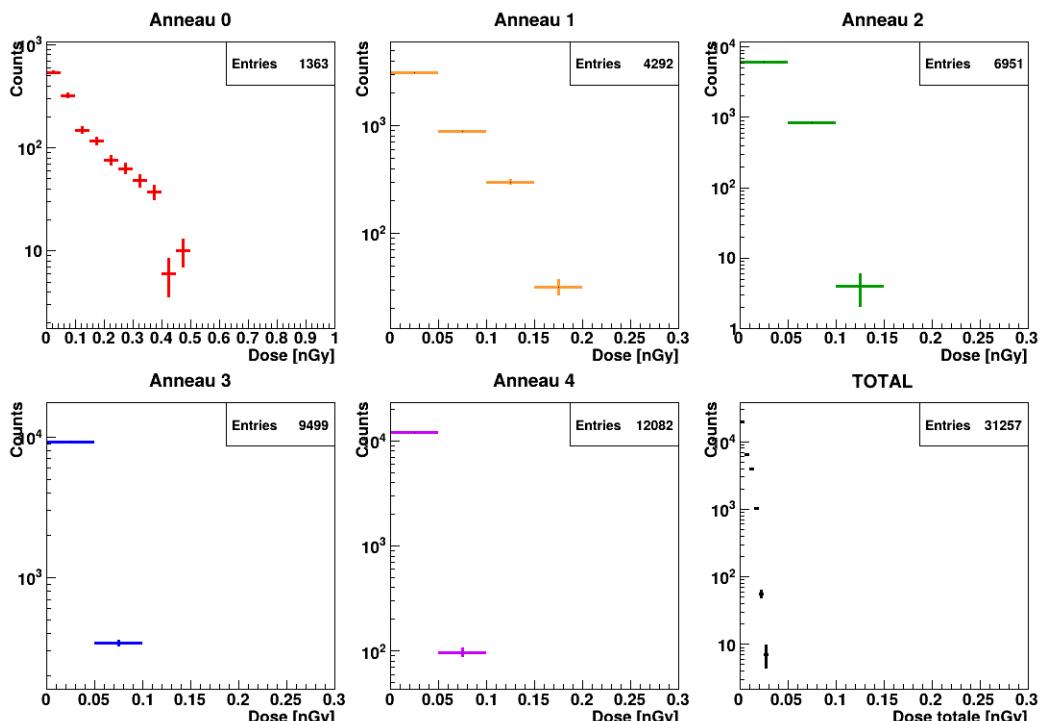
| $E_\gamma$ (keV) | Absorption (%)   | $E_\gamma$ (keV) | Absorption (%)  |
|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 121.78           | $98.06 \pm 0.03$ | 867.38           | $5.57 \pm 0.11$ |
| 244.70           | $51.50 \pm 0.18$ | 964.08           | $4.77 \pm 0.06$ |
| 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.

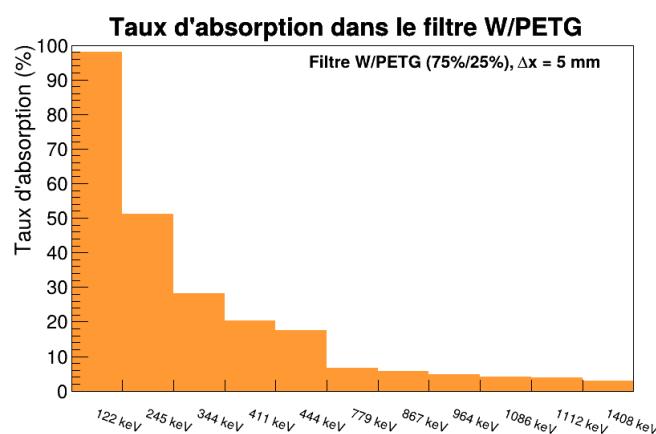
| Anneau       | $r_{in}$<br>(mm) | $r_{out}$<br>(mm) | Masse<br>(g) | $E_{dep}$<br>(MeV)                   | Dose<br>(nGy) | Dose/désint.<br>(nGy)                   |
|--------------|------------------|-------------------|--------------|--------------------------------------|---------------|---|
| 0            | 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

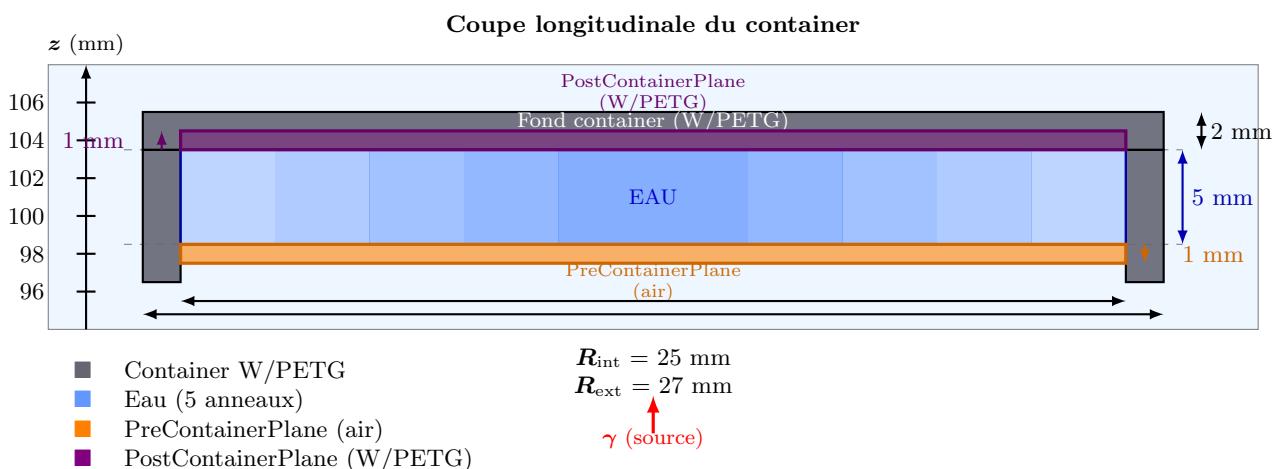
## 7 Ajout de plan de comptage avant et après le container d'eau

### 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<br>(mm) | GAP<br>(mm) | Épaisseur<br>(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

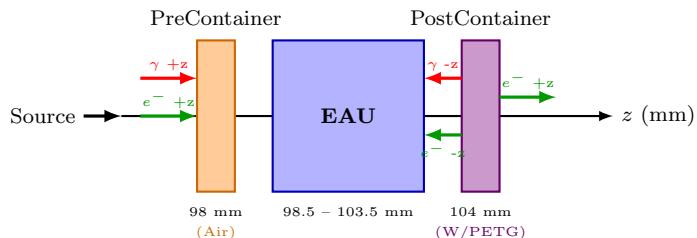
- **Type de particule** : électron ( $e^-$ )
- **Direction** :  $p_z > 0$  (vers l'eau, direction +z)

```
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

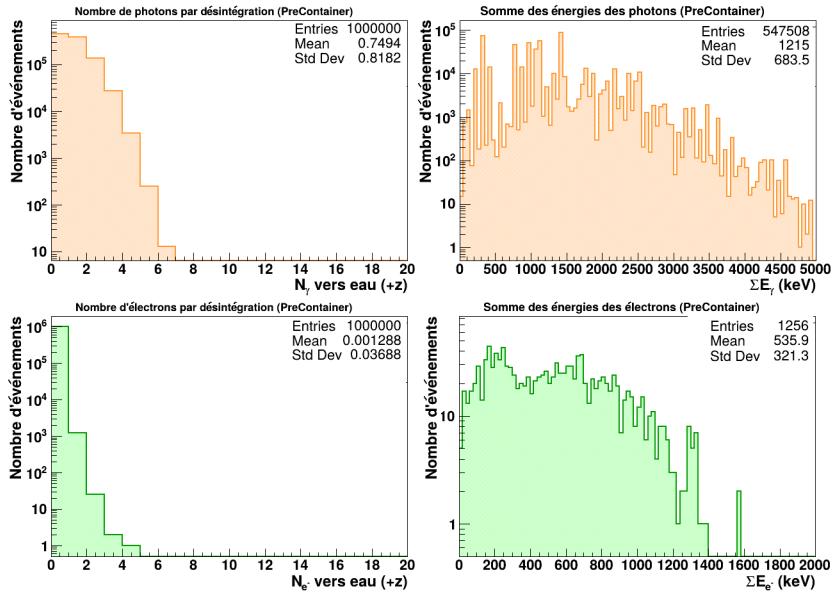
| Plan               | Particule                              | Variables  |
|--------------------|--|--|
| PreContainerPlane  | $\gamma$ vers eau (+z)                 | nPhotons,sumEPhotons_keV   |
|                    | $e^-$ vers eau (+z)                    | nElectrons, sumEElectrons_keV  |
| PostContainerPlane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

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

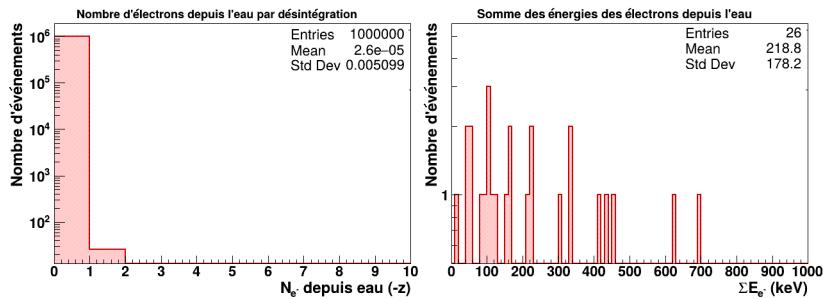
#### Filtre W/PETG 5mm

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

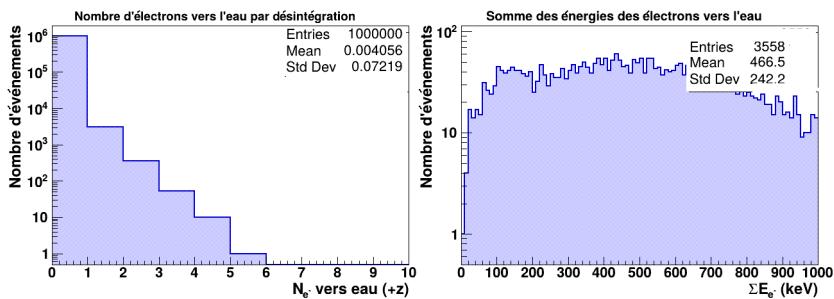
- photons et électrons dans le **PreContainerPlane**
- photons dans le **PostContainerPlane**
- électrons "backward" retrodiffusés dans le **PostContainerPlane**
- électrons "forward" diffusés dans le **PostContainerPlane**



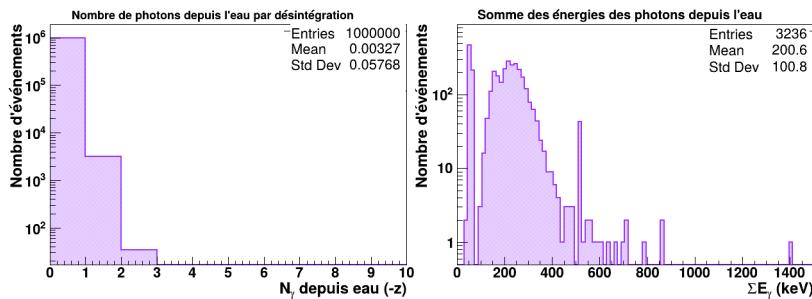
photons et électrons dans le **PreContainerPlane** avec le filtre de **W/PETG** de 5mm



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<br>(g)  | $E_{dep}$<br>(MeV)  | Dose<br>(nGy)       | Dose/evt<br>(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> |

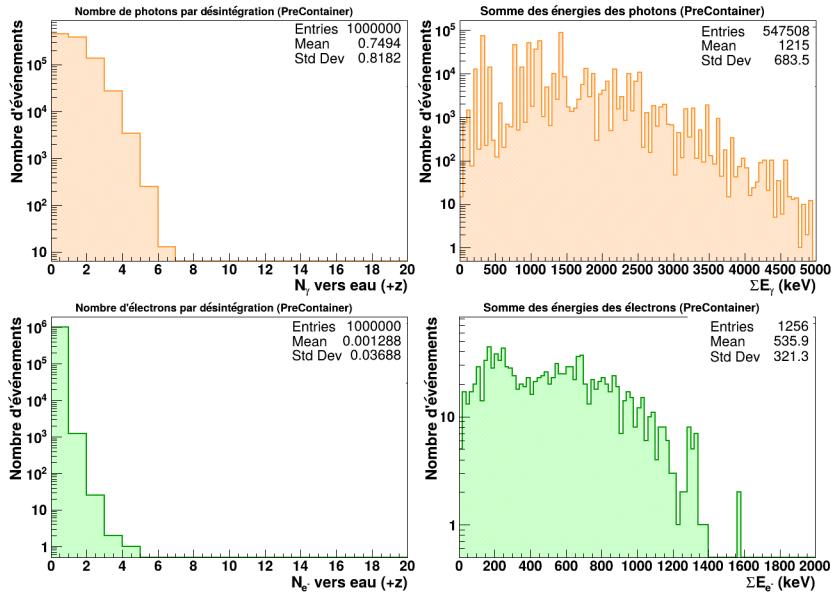
*Comparaison des doses : filtre W/PETG vs filtre Air*

| 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> |

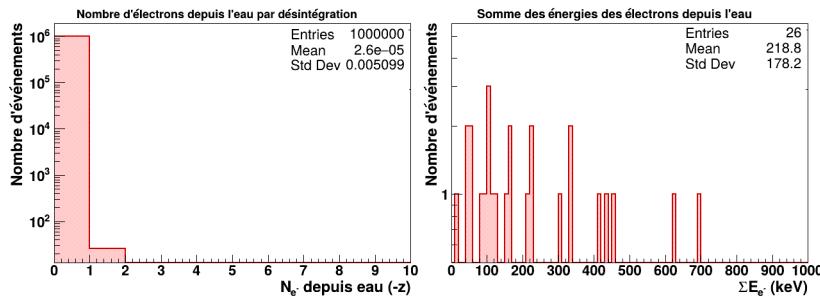
Filtre W/PETG 5mm

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

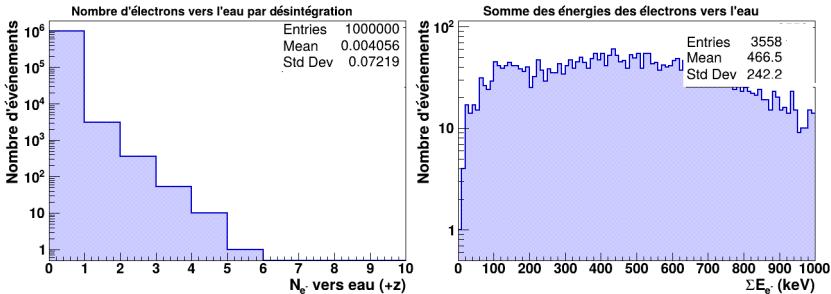
- photons et électrons dans le **PreContainerPlane**
- photons dans le **PostContainerPlane**
- électrons "backward" retrodiffusés dans le **PostContainerPlane**
- électrons "forward" diffusés dans le **PostContainerPlane**



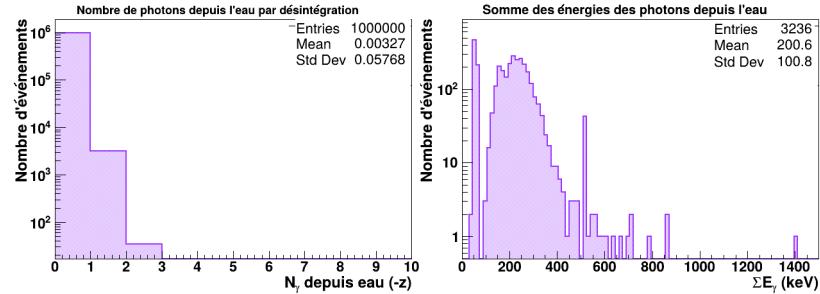
photons et électrons dans le *PreContainerPlane* sans le filtre de *W/PETG* de 5mm



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.

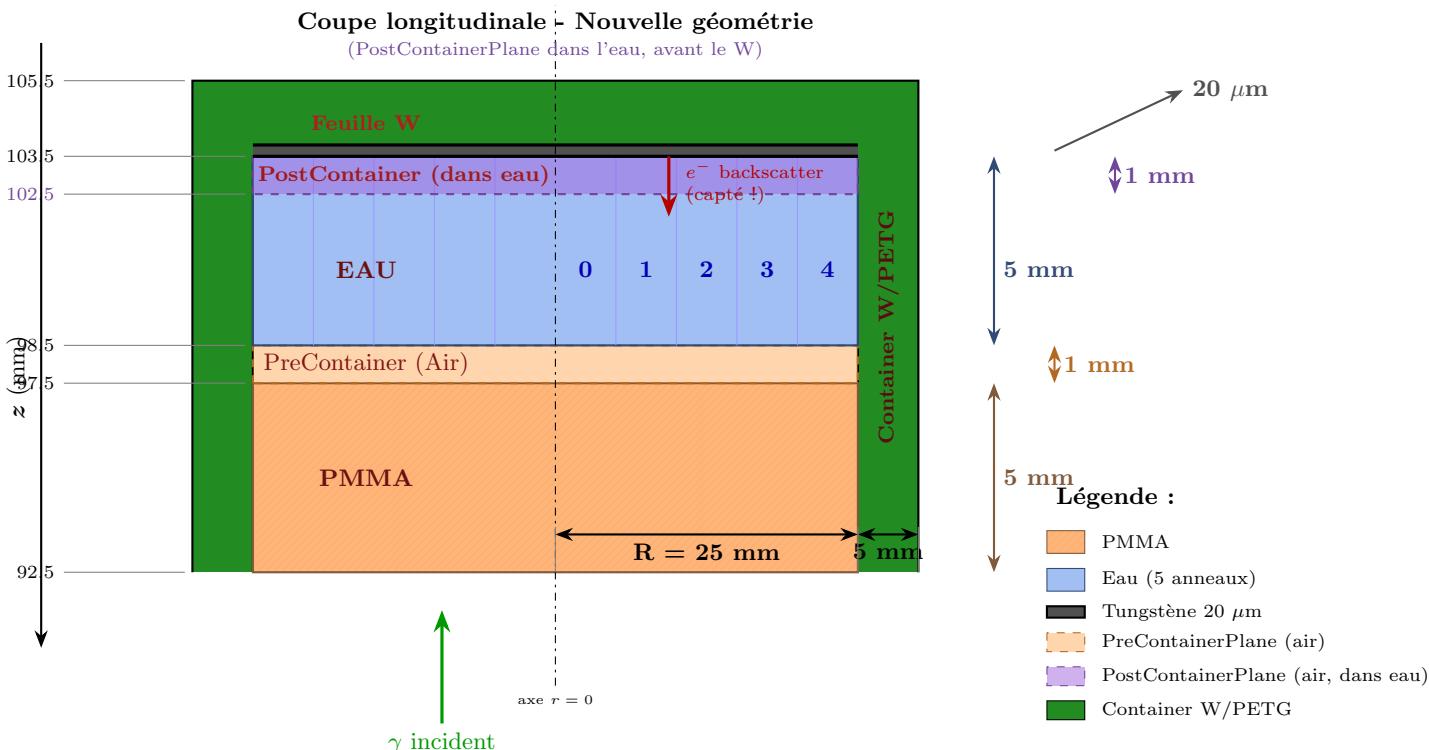
Le fond du container d'eau est tapissé d'une **feuille de tungstène** pour améliorer la **rétrodiffusion des électrons** produit par les photons incidents dans la feuille de tungstène. L'objectif de ce plan est d'améliorer le build-up électronique.

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

| Élément            | Matériau         | $z_{min}$<br>(mm) | $z_{max}$<br>(mm) | Épaisseur        | Rayon<br>(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

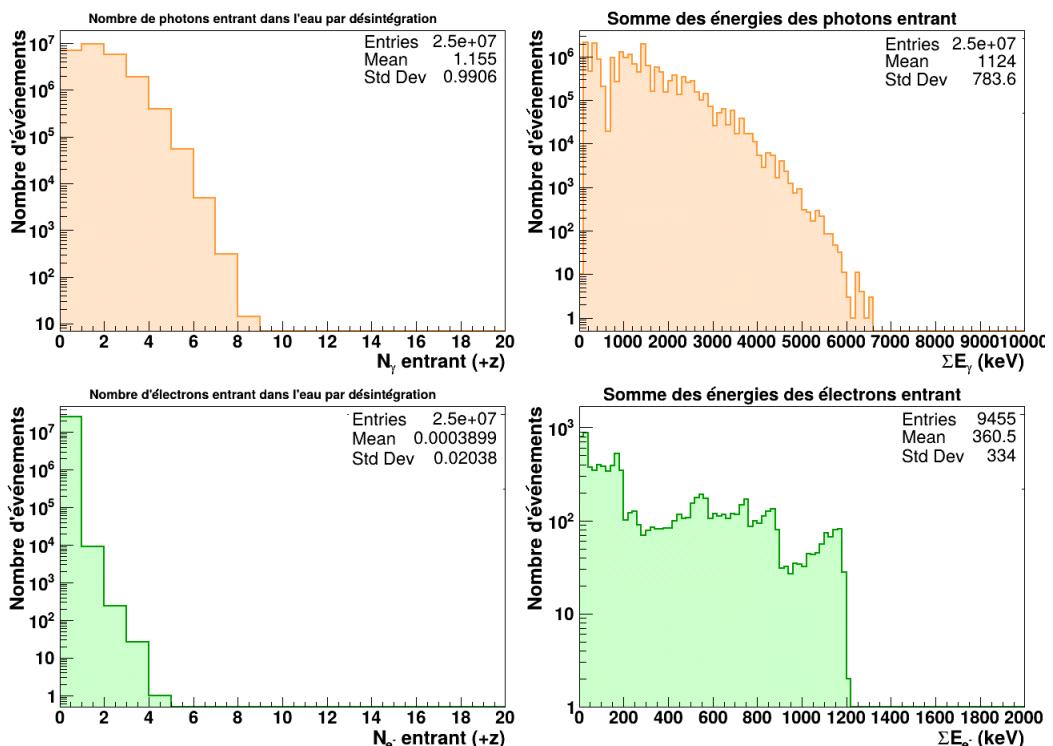
## 8.3 Définition des observables

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

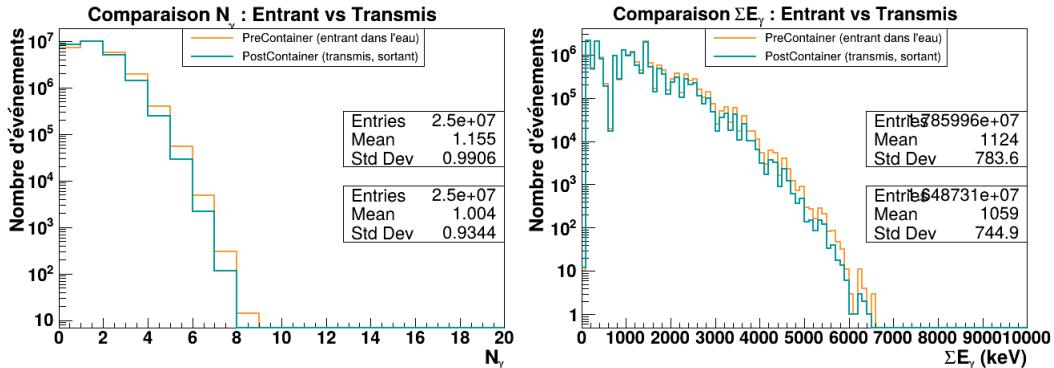


4 histogrammes représentant les particules **entrant dans la région eau** (direction  $+z$ ): **Haut gauche** : Nombre de photons par désintégration ( $N_\gamma$ ). **Haut droit** : Somme des énergies des photons ( $\Sigma E_\gamma$  en keV). **Bas gauche** : Nombre d'électrons par désintégration ( $N_e$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

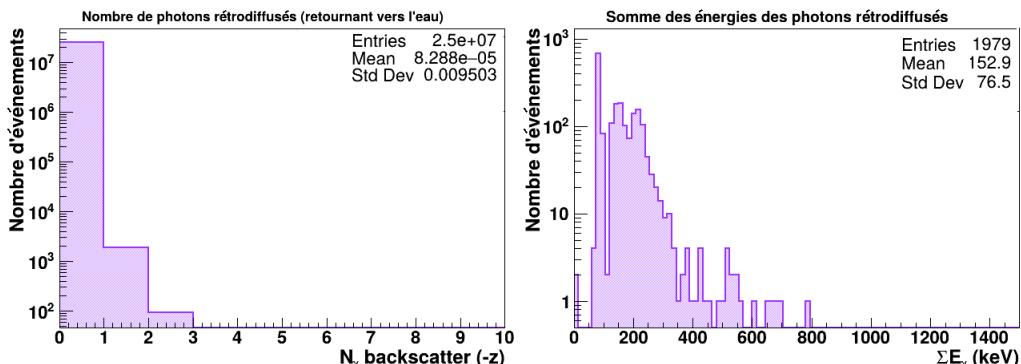


2 histogrammes superposés (Pre en orange, Post en cyan) : **Gauche** : Superposition des distributions  $N_\gamma$  (entrant vs transmis). **Droite** : Superposition des distributions  $\Sigma E_\gamma$  (entrant vs transmis). Cette figure permet de visualiser directement l'atténuation. Dans la géométrie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



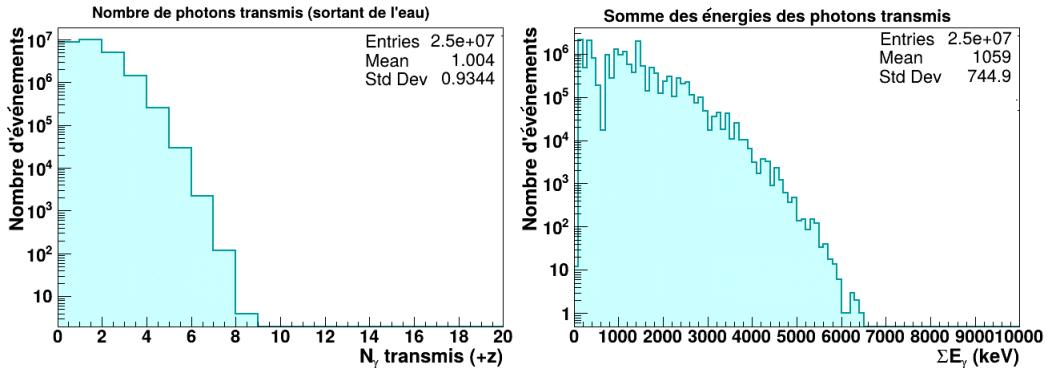
2 histogrammes représentant les photons **retournant vers l'eau** (direction  $-z$ , backscatter) : Gauche : Nombre de photons rétrodiffusés par désintégration ( $N_\gamma$  backscatter). Droite : Somme des énergies des photons rétrodiffusés ( $\Sigma E_\gamma$  en keV). Ces photons proviennent de la 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 :

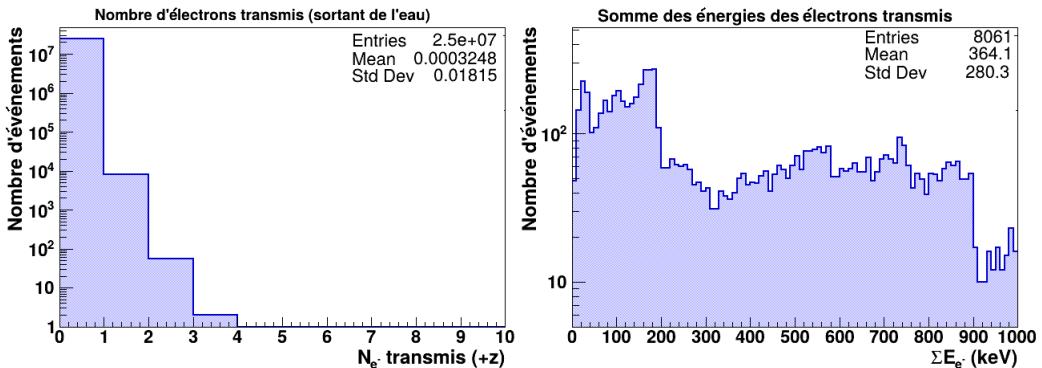
- Le code de détection des directions fonctionne correctement
- Dans l'air, la section efficace de diffusion Compton est négligeable
- Il n'y a pas de matériau pour générer des photons rétrodiffusés

## 8.5 Résultats pour les Électrons

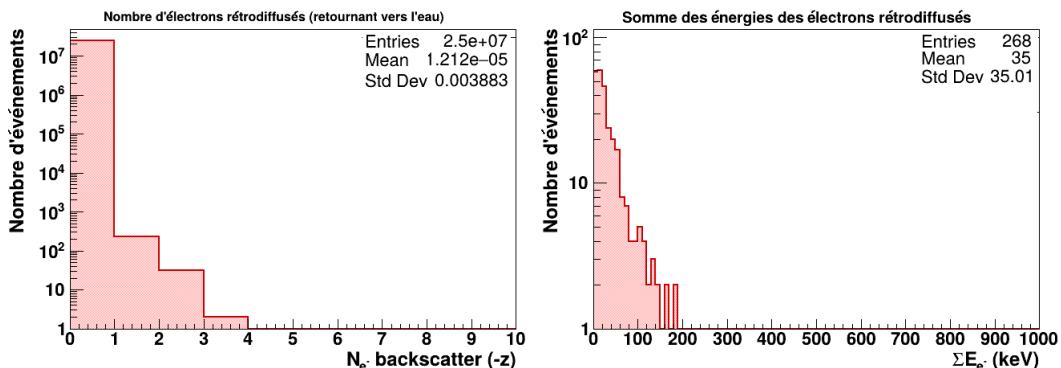
- **Faible production d'électrons:**  $\langle N_{e^-} \rangle \sim 4 \times 10^{-4}$  par désintégration, soit environ 1 électron pour 2500 événements
- **Légère augmentation au PostContainer:** Les électrons supplémentaires proviennent de :
  - Diffusion Compton des photons dans l'air (très faible)



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<br>(entrant) | PostContainer<br>(transmis) | PostContainer<br>(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  | $25 \times 10^6$         | $25 \times 10^6$        |

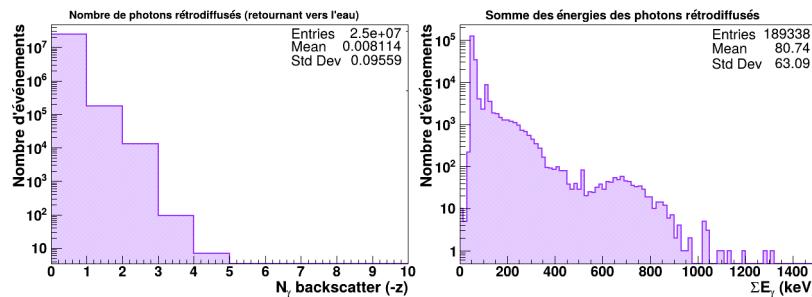
## 8.7 Comparaison des photons

### 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 $+z$ )

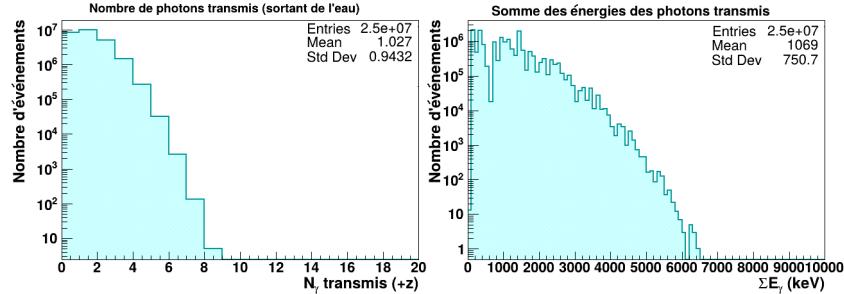
La transmission des photons est quasi-identique car l'épaisseur de 20 µm de tungstène est très faible par rapport au libre parcours moyen des photons gamma de haute énergie ( $\lambda \gg 20$  µm pour  $E_\gamma > 100$  keV).

## 8.8 Comparaison des électrons

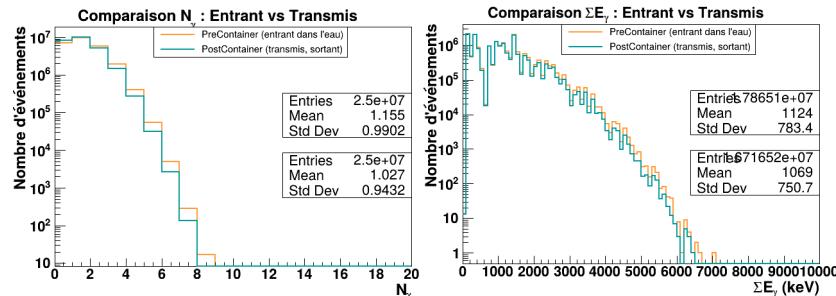
### Électrons rétrodiffusés (backscatter, direction $-z$ )

### 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.

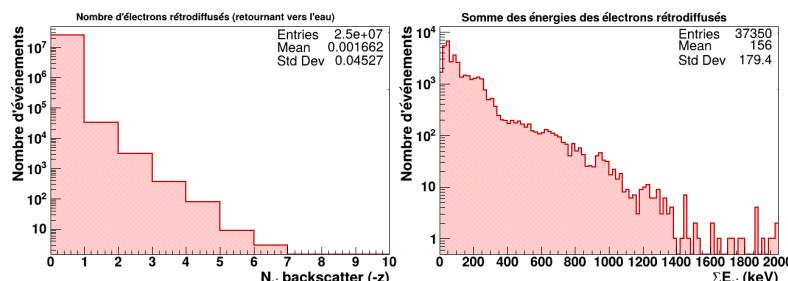


2 histogrammes superposés (Pre en orange, Post en cyan) : Gauche : Superposition des distributions  $N_\gamma$  (entrant vs transmis). Droite : Superposition des distributions  $\Sigma E_\gamma$  (entrant vs transmis). Cette figure permet de visualiser directement l'atténuation. Dans la géométrie où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

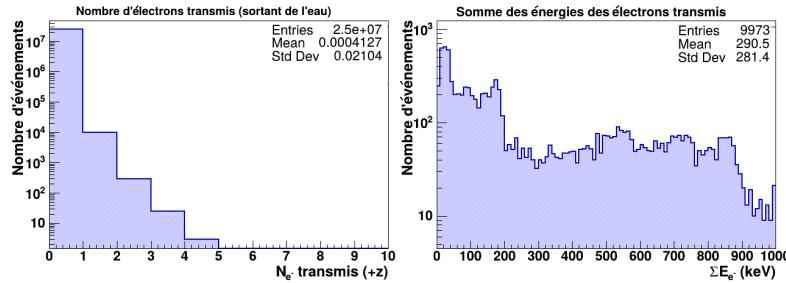
Le nombre d'électrons transmis augmente légèrement (+27%) mais leur énergie moyenne diminue (-20%), ce qui traduit une perte d'énergie dans le tungstène.

*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  $\mu m$ )*

| 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                | $\times 9.9$  |

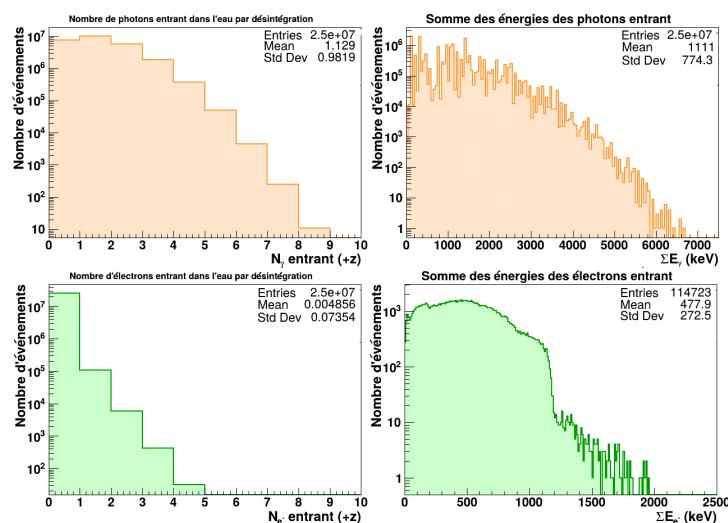
### Électrons rétrodiffusés (backscatter)

#### 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)



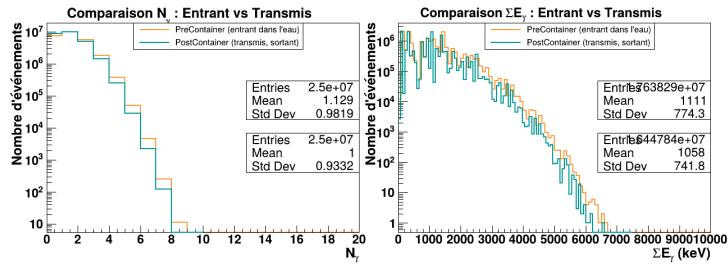
#### Photons (panneaux supérieurs)

- 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 :

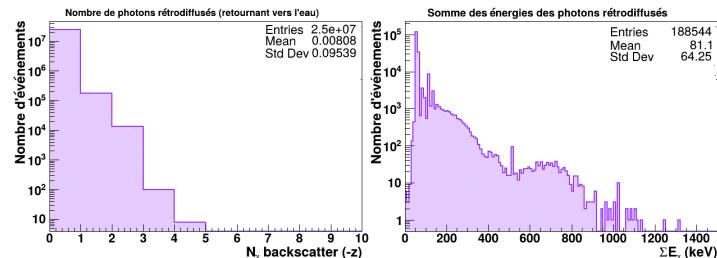
- Distribution beaucoup plus étendue : jusqu'à  $N_{e^-} = 5$  (vs 3–4 sans PMMA)
- Nombre d'entrées  $\times 12$  : 114 723 vs 9 607
- Spectre d'énergie en forme de “bosse” caractéristique de l'effet Compton
- Pic vers 500–600 keV avec coupure nette à  $\sim 1400$  keV (bord Compton)

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



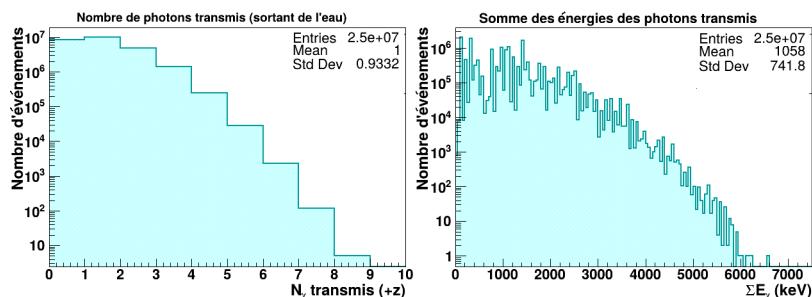
- **Perte de photons :**  $(1.129 - 1.000)/1.129 = 11.4\% \text{ (vs } 11.1\% \text{ sans PMMA)}$
- *Les spectres Pre et Post sont quasi-superposés*
- *La forme spectrale n'est pas modifiée par le passage à travers l'eau (en air) et le tungstène*

**Figure Photons backscatter**



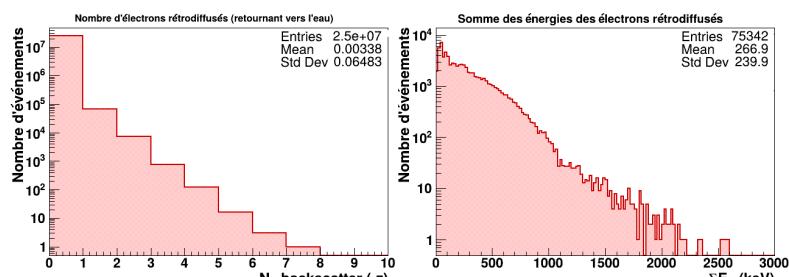
- *Pic de fluorescence X du tungstène toujours dominant à 60–80 keV*
- *Raies K<sub>α</sub> (58–59 keV) et K<sub>β</sub> (67–69 keV) du W*
- *Identique à la configuration sans PMMA → le tungstène domine le backscatter γ*
- *Queue Compton jusqu'à ~1200 keV*

**Figure Électrons transmis**



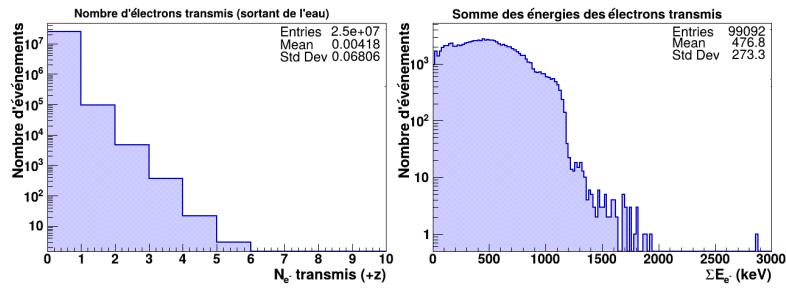
- *Spectre très différent de la configuration sans PMMA*
- *Forme en "bosse" avec pic à ~500 keV*
- *Queue jusqu'à ~1500 keV (électrons Compton de haute énergie)*
- *Entries : 99 092 (vs 9 973 sans PMMA) → facteur ×10*

**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+Tungstene+PMMA)

### Configuration

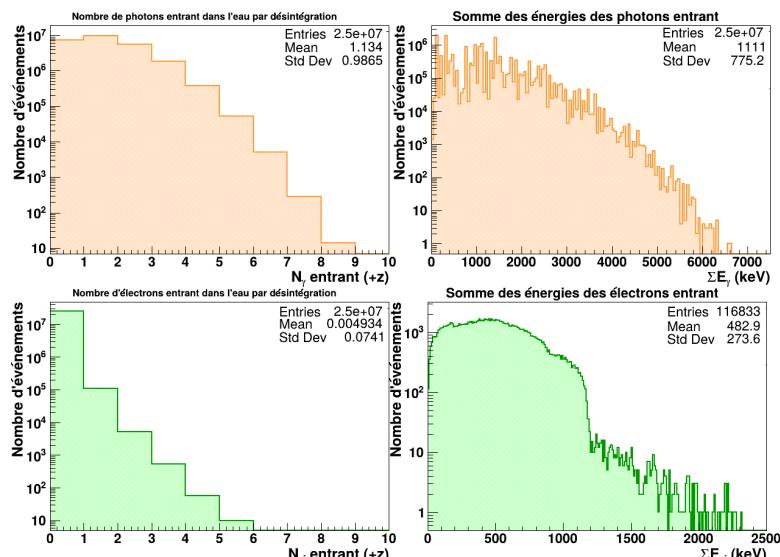
- Le matériau à l'intérieur du container est converti en eau, sous forme de 5 anneaux concentriques de 5 mm de largeur chacun
- L'eau est précédée d'une **plaqué de PMMA de 5 mm d'épaisseur**, pour améliorer la conversion des photons incidents et la **production d'électrons secondaires** dans l'eau du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

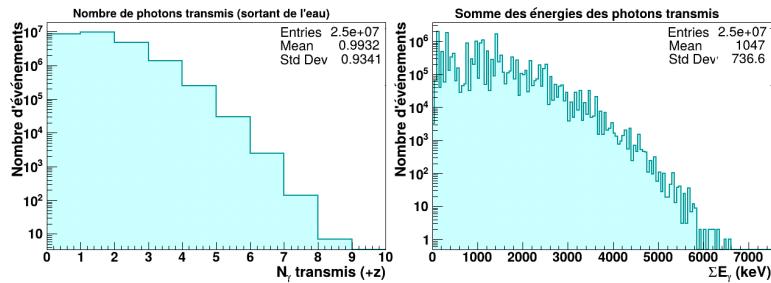
La distribution du nombre de photons par événement présente un pic principal à 1-2 photons, avec une queue s'étendant jusqu'à 8-9 photons pour les événements à multiplicité élevée. L'énergie moyenne de 1111 keV est cohérente avec le spectre Eu-152 qui comprend plusieurs raies intenses au-dessus de 1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

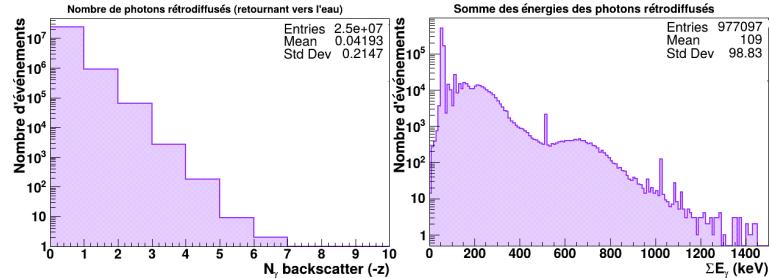


Photons transmis à travers l'eau (direction +z). Gauche : multiplicité. Droite : distribution en énergie.

### 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.

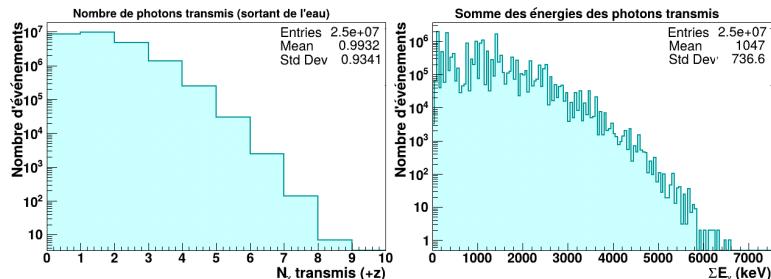


Photons rétrodiffusés par l'eau (direction -z) Gauche : multiplicité. Droite : distribution en énergie.

### 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         |

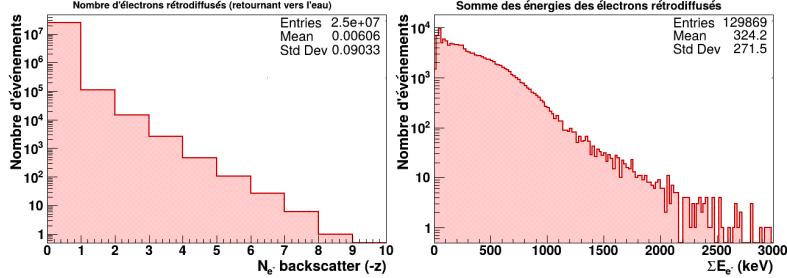
Les photons rétrodiffusés présentent des caractéristiques typiques de la diffusion Compton à grand angle : faible multiplicité (0.042/evt) et énergie moyenne de 109 keV, nettement inférieure à l'énergie incidente.



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

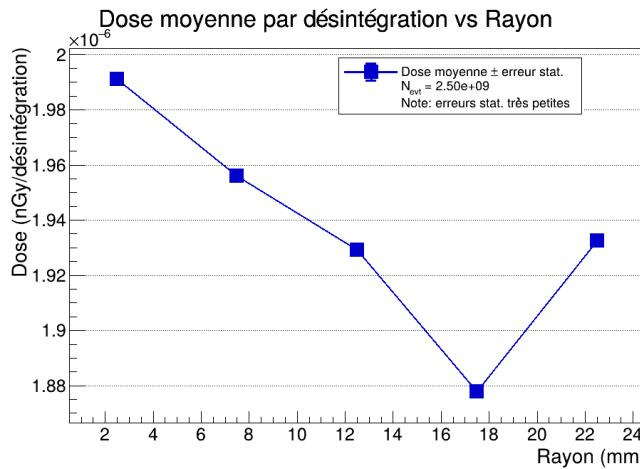
Le tableau suivant présente les résultats de dose pour chaque anneau d'eau.

### 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.

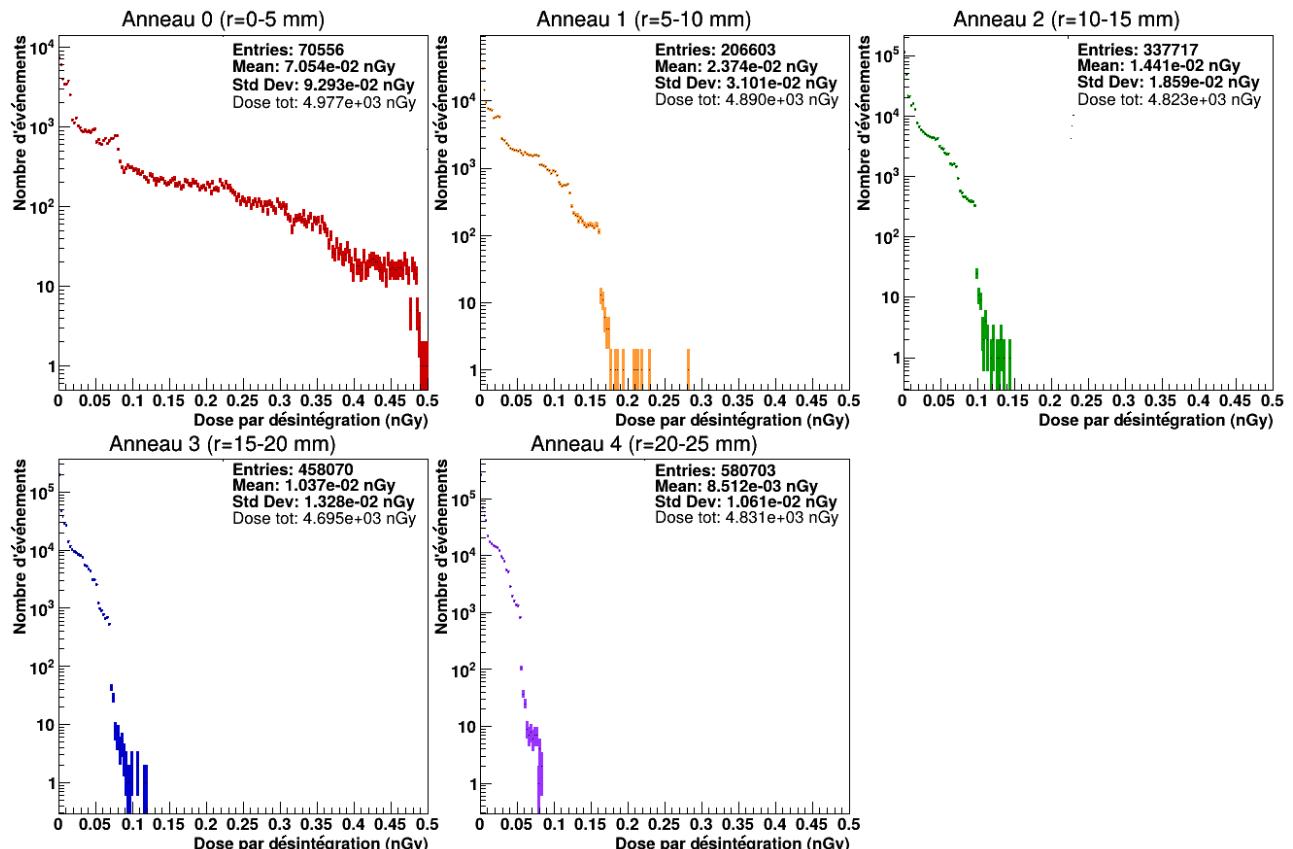


*Dose moyenne par désintégration en fonction du rayon. Les points représentent la dose moyenne calculée sur 25 millions d'événements. La dose varie entre  $1.88 \times 10^{-6}$  nGy et  $1.99 \times 10^{-6}$  nGy, soit une variation relative de seulement 6%.*

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 :

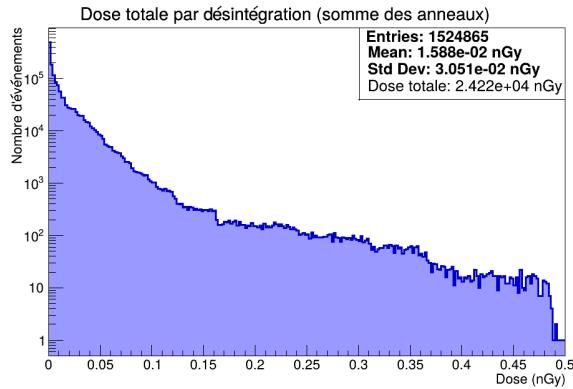
- Géométrie du faisceau:** La source émet dans un cône de demi-angle  $20^\circ$ . À la distance source-eau ( $z \approx 100$  mm), le rayon du faisceau est  $r = 100 \times \tan(20) \approx 36$  mm, ce qui englobe largement tous les anneaux (rayon maximal de 25 mm).
- Compensation géométrique:** Les 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

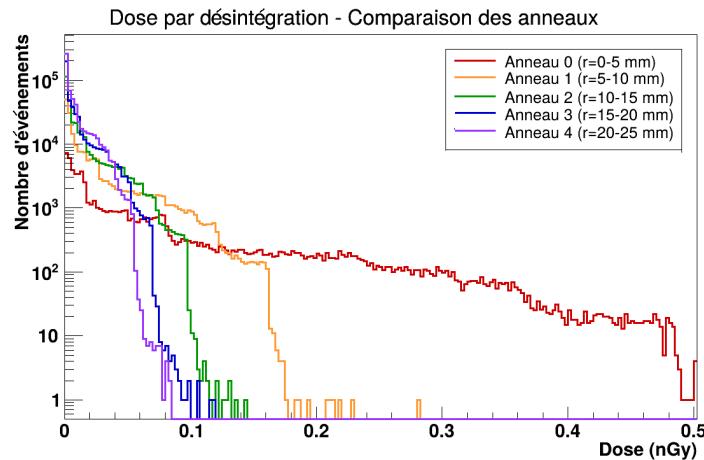


*Distributions de la dose par désintégration pour chaque anneau. L'échelle verticale est logarithmique. Le panneau inférieur droit présente le résumé des doses totales.*

## 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 :

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

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