

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 18, 2026

Abstract

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

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

Contents

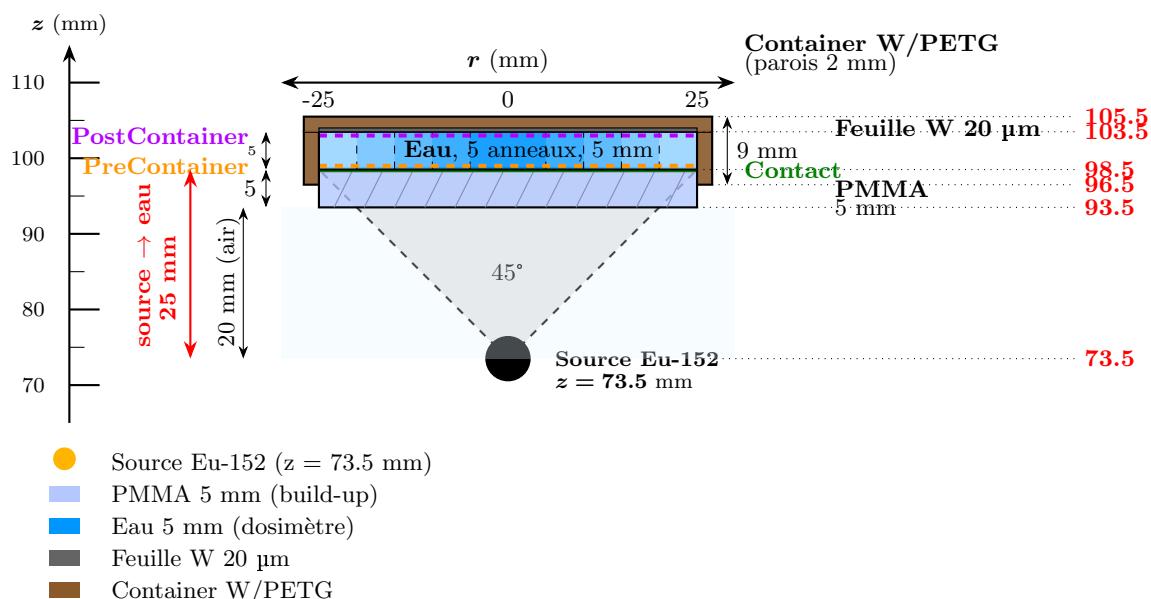
| | |
|---|-----------|
| 1 Source Eur152 - 5mm PMMA - 5 mm Water - Tungsten 20 micron -Distance source/eau 25mm | 3 |
| 1.1 Nouvelle Géometrie | 3 |
| 1.2 Analyse de la génération des événements | 3 |
| 1.3 Angle Solide | 6 |
| 1.4 Renormalisation du temps d'irradiation | 7 |
| 1.5 Relations activité-temps d'irradiation | 10 |
| 1.6 Analyse du Débit de Dose | 10 |
| 1.7 Analyse du taux d'absorption dans l'eau par raie gamma | 11 |
| 1.8 Analyse des plans de comptage PreContainer et PostContainer | 13 |
| 1.9 Analyse Dose Couronnes | 18 |
| 2 Source Eur152 - 2+1 mm Water - Tungsten 50 micron -Distance source/eau 25mm | 24 |
| 2.1 Nouvelle Géometrie | 24 |
| 2.2 Analyse du taux d'absorption dans l'eau par raie gamma | 25 |
| 2.3 Analyse des plans de comptage PreContainer et PostContainer | 25 |
| 2.4 Analyse Dose Couronnes | 27 |

1 Source Eur152 - 5mm PMMA - 5 mm Water - Tungsten 20 micron -Distance source/eau 25mm

Configuration

- Le **Filtre est supprimé**
- La source est **avancée de 40 mm**, passant de $z = 20\text{mm}$ à $z = 60\text{mm}$
- L'eau est **précédée d'une plaque de PMMA de 10 mm d'épaisseur**, pour améliorer la conversion des photons incidents et la **production d'électrons secondaires** dans l'eau du container. L'objectif de ce plan est d'améliorer le build-up électronique
- L'eau est au **contact de la plaque de PMMA** de 10 mm d'épaisseur,
- Le fond du container d'eau est tapissé d'une **feuille de tungstène** pour améliorer la **rétrodiffusion des électrons** produit par les photons incidents dans la feuille de tungstène. L'objectif de ce plan est d'améliorer le build-up électronique

1.1 Nouvelle Géométrie



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

Distances caractéristiques

1.2 Analyse de la génération des événements

Algorithme de génération

Principe

Dans cette simulation Geant4, chaque **événement** correspond à une **désintégration** du noyau d'Europium-152. **Une désintégration peut émettre plusieurs photons gamma en cascade, chacun avec une probabilité d'émission indépendante**

Dans la simulation :

Paramètres géométriques de la simulation

| Élément | Position z (mm) | Épaisseur | Rayon (mm) | Matériaux |
|---------------------|-----------------|-----------|------------|------------------|
| Source Eu-152 | 73.5 | volumique | — | — |
| Air | 73.5 → 93.5 | 20 mm | — | Air |
| PMMA (build-up) | 93.5 → 98.5 | 5 mm | 25 | PMMA |
| Eau (dosimètre) | 98.5 → 103.5 | 5 mm | 25 | G4_WATER |
| Feuille W | 103.5 → 103.52 | 20 μm | 25 | G4_W |
| Parois container | 96.5 → 103.5 | 2 mm | 25–27 | W/PETG (75%/25%) |
| Couvercle container | 103.5 → 105.5 | 2 mm | 0–27 | W/PETG (75%/25%) |

1 événement Geant4 = 1 désintégration ^{152}Eu

Chaque désintégration peut émettre **plusieurs photons gamma** de manière indépendante. Le nombre de photons émis par événement suit une distribution statistique déterminée par les intensités des raies.

Pour chaque événement (**désintégration**), l'algorithme parcourt les $N = 13$ raies et effectue **un tirage de Bernoulli indépendant pour chacune** :

Pour chaque raie $i \in \{1, \dots, N\}$: γ_i est émis si $\xi_i < p_i$

où :

- $\xi_i \sim \mathcal{U}(0, 1)$ est un nombre aléatoire uniforme sur $[0, 1]$
- $p_i = I_i / 100$ est la probabilité d'émission de la raie i

Le nombre de photons émis par désintégration suit une **loi de Poisson composée**. Chaque raie étant tirée indépendamment selon une loi de Bernoulli :

$$n_\gamma = \sum_{i=1}^N X_i \quad \text{avec} \quad X_i \sim \text{Bernoulli}(p_i)$$

Le **nombre moyen de photons par désintégration** est :

$$\langle n_\gamma \rangle = \sum_{i=1}^N p_i = \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{100} = \frac{202.78}{100} = 2.0278$$

La **variance** est donnée par :

$$\text{Var}(n_\gamma) = \sum_{i=1}^N p_i(1 - p_i) = \sum_{i=1}^N p_i - \sum_{i=1}^N p_i^2$$

Numériquement, avec les valeurs du tableau :

$$\text{Var}(n_\gamma) = 2.0278 - 0.4126 = 1.6152 \Rightarrow \sigma_{n_\gamma} \approx 1.27$$

Chaque photon est émis dans un cône d'ouverture $\theta_{\max} = 45$ orienté vers l'axe $+z$. Pour obtenir une **distribution isotrope** dans le cone, on utilise :

$$\cos \theta = \mathbf{1} - \xi \cdot (\mathbf{1} - \cos \theta_{\max})$$

où $\xi \sim \mathcal{U}(0, 1)$.

L'angle azimutal est uniforme :

$$\phi = 2\pi \cdot \xi'$$

où $\xi' \sim \mathcal{U}(0, 1)$ est un second tirage indépendant.

Le vecteur direction unitaire est alors :

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{pmatrix}$$

La fraction de l'angle solide 4π couverte par le cône est :

$$f_\Omega = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{2\pi(1 - \cos \theta_{\max})}{4\pi} = \frac{1 - \cos \theta_{\max}}{2}$$

Pour $\theta_{\max} = 45$:

$$f_{\Omega} = \frac{1 - \cos(45)}{2} = \frac{1 - \frac{\sqrt{2}}{2}}{2} \approx 0.1464 \approx 14.6\%$$

Résumé de l'implémentation

Listing 1: Pseudo-code de la génération

```
\textbf{Pour chaque evenement (desintegration):}
    n_gamma = 0
    Pour i = 0 a 12: // 13 raies
        xi = random(0,1)
        Si xi < probabilite[i]:
            energie = energies[i]
            direction = generer_direction_cone(45 deg)
            emettre_gamma(energie, direction)
            n_gamma++
\textbf{// n_gamma peut etre 0, 1, 2, 3, ...}
```

Tableau des raies

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

| Index | Énergie (keV) | Intensité (%) | Type | Origine |
|--------------|---------------|---------------|----------|---------------------|
| 0 | 39.52 | 20.8 | Raie X | K α_2 (Sm) |
| 1 | 40.12 | 37.7 | Raie X | K α_1 (Sm) |
| 2 | 121.78 | 28.41 | γ | $^{152}\text{Sm}^*$ |
| 3 | 244.70 | 7.53 | γ | $^{152}\text{Gd}^*$ |
| 4 | 344.28 | 26.59 | γ | $^{152}\text{Gd}^*$ |
| 5 | 411.12 | 2.24 | γ | $^{152}\text{Sm}^*$ |
| 6 | 443.97 | 2.83 | γ | $^{152}\text{Gd}^*$ |
| 7 | 778.90 | 12.97 | γ | $^{152}\text{Sm}^*$ |
| 8 | 867.38 | 4.24 | γ | $^{152}\text{Gd}^*$ |
| 9 | 964.08 | 14.63 | γ | $^{152}\text{Sm}^*$ |
| 10 | 1085.87 | 10.21 | γ | $^{152}\text{Sm}^*$ |
| 11 | 1112.07 | 13.64 | γ | $^{152}\text{Sm}^*$ |
| 12 | 1408.01 | 21.01 | γ | $^{152}\text{Sm}^*$ |
| TOTAL | | 202.78 | | |

Légende des couleurs :

- Raies X : Fluorescence K du Samarium ($E < 50$ keV)
- γ basse énergie : $E < 250$ keV
- γ moyenne énergie : 250 keV $< E < 1000$ keV
- γ haute énergie : $E > 1000$ keV

Vérification du nombre de gammas par désintégration

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

Le nombre moyen de gammas par désintégration est :

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

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

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

Conclusion

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

Vérification des intensités par raie

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

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

1.3 Angle Solide

Définition de l'angle solide

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

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

Pour un cône de demi-angle θ_0 autour de l'axe z , l'angle solide est :

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

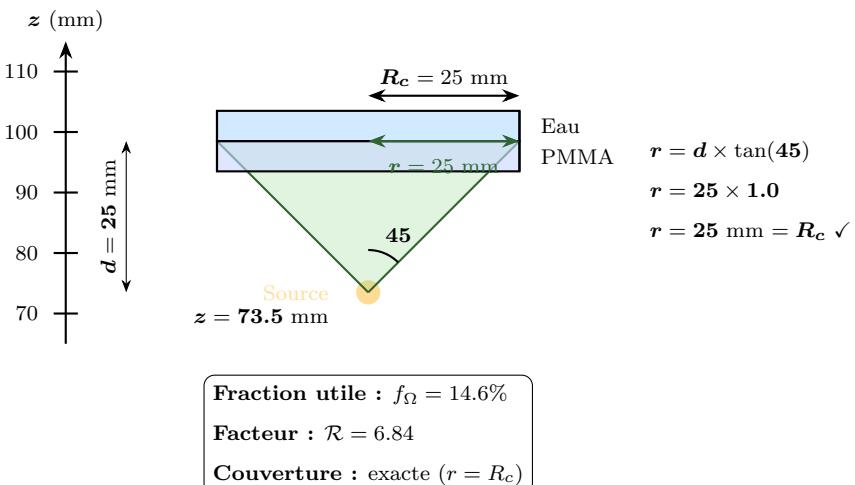
Avec un demi-angle $\theta_0 = 45^\circ$:

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

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

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

Géométrie des angles solides



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

Angle solide et renormalisation

Problème : Une source réelle émet dans toutes les directions (4π)
 \Rightarrow La plupart des gammas ne touchent pas le détecteur

Solution : Simuler uniquement un cône dirigé vers le détecteur
 \Rightarrow Gain de temps de calcul considérable

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

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

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

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

Vérification de la couverture géométrique

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

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

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

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

Conclusion

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

1.4 Renormalisation du temps d'irradiation

Paramètres de la simulation

Paramètres de normalisation

| Paramètre | Symbole | Valeur |
|-------------------------------|----------------------------|----------|
| Activité source (4π) | $A_{4\pi}$ | 42 kBq |
| Demi-angle du cône | θ_{\max} | 45° |
| Fraction d'angle solide | f_Ω | 14.6% |
| Activité effective (cône) | A_{eff} | 6.15 kBq |
| Photons moyens/désintégration | $\langle n_\gamma \rangle$ | 2.03 |
| Position source | z_s | 73.5 mm |

Résumé des Constantes dans le Code

Correspondance code/physique

| Variable C++ | Valeur | Signification |
|-------------------------|-------------------|----------------------------|
| GetMeanGammasPerDecay() | 2.03 | $\langle n_\gamma \rangle$ |
| fMeanGammasPerDecay | 2.03 | Idem (RunAction) |
| fActivity4pi | 4.2×10^4 | $A_{4\pi}$ en Bq |
| fConeAngle | 45° | θ_{\max} |
| GetSolidAngleFraction() | 0.146 | f_Ω |
| kNbGammaLines | 13 | Nombre de raies |

Relation avec l'activité

L'activité de la source sur 4π est $A_{4\pi} = 42$ kBq. L'activité effective dans le cône est :

$$A_{\text{eff}} = A_{4\pi} \times f_\Omega \approx 42 \times 0.1464 \approx 6.15 \text{ kBq}$$

La correspondance entre le nombre d'événements simulés N_{evt} et le temps d'irradiation t_{irr} est :

$$t_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{evt}}}{A_{4\pi} \times f_\Omega}$$

où f_Ω est la fraction d'angle solide couverte par le cône d'émission.

Temps d'irradiation équivalent

Un événement de simulation correspond à une désintégration dans le cône. Le temps d'irradiation équivalent à N_{evt} événements simulés est :

$$t_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{evt}}}{A_{\text{eff}}} = \frac{N_{\text{evt}}}{A_{4\pi} \times f_\Omega}$$

Pour N_{evt} événements simulés, le temps d'irradiation équivalent est :

$$t_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{evt}}}{A_{4\pi} \times f_\Omega} = \frac{N_{\text{evt}}}{42000 \times 0.146} \text{ s} = \frac{N_{\text{evt}}}{6132} \text{ s}$$

Calcul du débit de dose

Si D_{sim} est la dose totale simulée (en Gy) pour N_{evt} événements :

$$\dot{D} = \frac{D_{\text{sim}}}{t_{\text{irr}}} = \frac{D_{\text{sim}} \times A_{4\pi} \times f_\Omega}{N_{\text{evt}}}$$

En nGy/s :

$$\dot{D} \text{ (nGy/s)} = \frac{D_{\text{sim}} \text{ (nGy)}}{N_{\text{evt}}} \times 6132$$

Application aux doses

La dose par désintégration réelle est :

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

Schéma récapitulatif

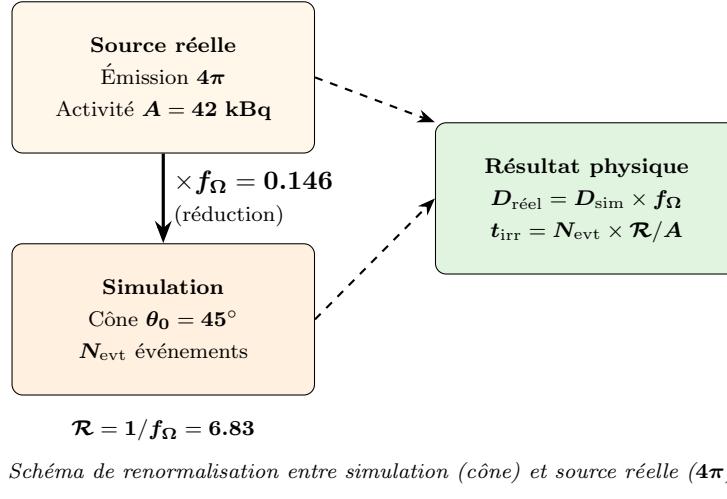


Schéma de renormalisation entre simulation (cône) et source réelle (4π).

Application numérique

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

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

Le débit de dose est calculé par :

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

1.5 Relations activité–temps d'irradiation

Définitions

Calcul du temps d'irradiation

- Activité source (4π) : $A_{4\pi} = 42 \text{ kBq} = 42\,000 \text{ désintégrations/s}$
- Activité effective (dans le cône) : $A_{\text{eff}} = A_{4\pi} \times f_{\Omega}$

$$A_{\text{eff}} = A_{4\pi} \times f_{\Omega} = 42\,000 \times 0.1464 = 6149 \text{ Bq} \approx 6.15 \text{ kBq}$$

Dans la simulation :

1 événement Geant4 = 1 désintégration dans le cône

Le temps d'irradiation équivalent à N_{evt} événements simulés est :

$$t_{\text{irr}} = \frac{N_{\text{evt}}}{A_{\text{eff}}} = \frac{N_{\text{evt}}}{A_{4\pi} \times f_{\Omega}}$$

Application numérique pour $N_{\text{evt}} = 25 \times 10^6$:

$$t_{\text{irr}} = \frac{25 \times 10^6}{6149} = 4066 \text{ s} = 67.8 \text{ min} \approx 1.13 \text{ h}$$

Formule inverse

Pour atteindre un temps d'irradiation t donné, le nombre d'événements requis est :

$$N_{\text{evt}} = A_{\text{eff}} \times t = A_{4\pi} \times f_{\Omega} \times t \quad (1)$$

Correspondance temps – nombre d'événements

| Temps d'irradiation | Nombre d'événements | Note |
|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 1 h | 2.21×10^7 | ≈ 22 millions |
| 1 jour | 5.31×10^8 | ≈ 531 millions |
| 1 semaine | 3.72×10^9 | ≈ 3.7 milliards |

1.6 Analyse du Débit de Dose

Formule de calcul

Le débit de dose \dot{D} est calculé à partir de la dose par événement simulé :

$$\dot{D} = \frac{D_{\text{sim}}}{N_{\text{evt}}} \times A_{\text{eff}} = \frac{D_{\text{sim}}}{N_{\text{evt}}} \times A_{4\pi} \times f_{\Omega}$$

En développant les unités :

$$\dot{D} [\text{nGy/s}] = D_{\text{evt}} [\text{nGy}] \times A_{\text{eff}} [\text{Bq}]$$

Pour convertir en $\mu\text{Gy/h}$:

$$\dot{D} [\mu\text{Gy/h}] = D_{\text{evt}} [\text{nGy}] \times A_{\text{eff}} [\text{Bq}] \times \frac{3600}{1000}$$

Résultats par anneau d'eau

Débit de dose par anneau (source Eu-152, 42 kBq)

| Anneau | Rayon (mm) | Masse (g) | Dose/evt (nGy) | Débit ($\mu\text{Gy/h}$) | t(20 cGy) (h) | t(20 cGy) (jours) |
|--------------|------------|-----------|-----------------------|----------------------------|---------------|-------------------|
| 0 | 0–5 | 0.393 | 2.87×10^{-4} | 6.35 | 31 485 | 1 312 |
| 1 | 5–10 | 1.178 | 2.71×10^{-4} | 6.00 | 33 362 | 1 390 |
| 2 | 10–15 | 1.964 | 2.40×10^{-4} | 5.32 | 37 602 | 1 567 |
| 3 | 15–20 | 2.749 | 2.06×10^{-4} | 4.56 | 43 908 | 1 830 |
| 4 | 20–25 | 3.534 | 1.82×10^{-4} | 4.02 | 49 754 | 2 073 |
| Total | 0–25 | 9.817 | 2.15×10^{-4} | 26.24 | 7 622 | 318 |

Analyse de l'anneau central (Anneau 0)

L'anneau central ($r = 0\text{--}5 \text{ mm}$) reçoit le **débit de dose le plus élevé** :

$$\dot{D}_{\text{anneau } 0} = 6.35 \mu\text{Gy/h} = 0.00635 \text{ mGy/h}$$

Vérification du calcul

$$D_{\text{evt}} = 2.869 \times 10^{-4} \text{ nGy} \quad (\text{dose par événement simulé})$$

$$A_{\text{eff}} = 6149 \text{ Bq}$$

$$\dot{D} = D_{\text{evt}} \times A_{\text{eff}} = 2.869 \times 10^{-4} \times 6149 = 1.764 \text{ nGy/s}$$

$$\dot{D} = 1.764 \times 3.6 = 6.35 \mu\text{Gy/h} \quad \checkmark$$

Temps d'irradiation pour atteindre une dose cible

Pour l'anneau central, le temps nécessaire pour atteindre une dose D_{cible} est :

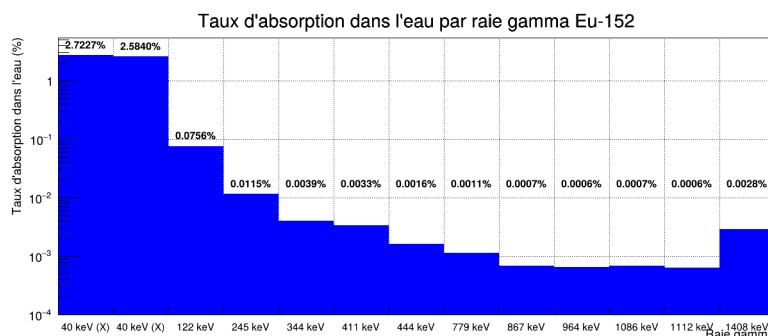
$$t = \frac{D_{\text{cible}}}{\dot{D}_{\text{anneau } 0}} = \frac{D_{\text{cible}}}{6.35 \mu\text{Gy/h}} \quad (2)$$

Temps d'irradiation pour l'anneau central

| Dose cible | Temps (h) | Temps (jours) | Temps (années) |
|-------------------------|---------------|---------------|----------------|
| 10 cGy (100 mGy) | 15 742 | 656 | 1.80 |
| 20 cGy (200 mGy) | 31 485 | 1 312 | 3.59 |
| 50 cGy (500 mGy) | 78 712 | 3 280 | 8.98 |
| 1 Gy | 157 425 | 6 559 | 17.97 |

1.7 Analyse du taux d'absorption dans l'eau par raie gamma

Taux d'absorption par raie gamma



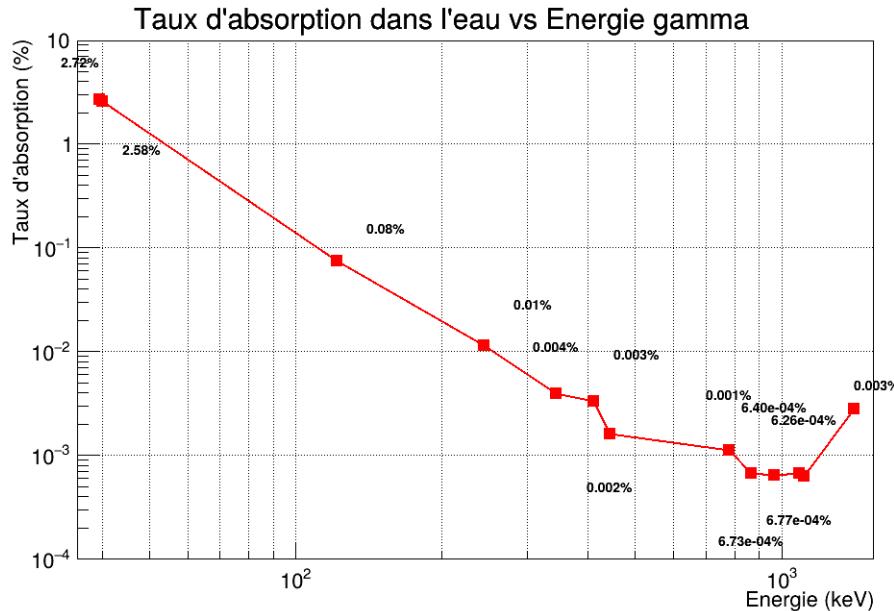
Taux d'absorption dans l'eau (en %) pour chacune des 13 raies gamma de l'Eu-152. L'axe Y est en échelle logarithmique pour visualiser les valeurs sur plusieurs ordres de grandeur

- Dominance des raies X:** Les deux raies X à $\sim 40 \text{ keV}$ dominent très largement l'absorption avec des taux de **2.72%** et **2.58%**. Ces raies représentent plus de **98%** de l'absorption totale dans l'eau.
- Décroissance rapide:** Le taux d'absorption décroît rapidement avec l'énergie :
 - 40 keV : $\sim 2.7\%$
 - 122 keV : 0.08% (facteur 34 de réduction)
 - 245 keV : 0.01% (facteur 270)
 - $> 344 \text{ keV}$: $< 0.01\%$ (facteur > 270)
- Raies de haute énergie:** Les raies au-delà de 300 keV ont des taux d'absorption inférieurs à 0.01%, ce qui signifie que moins d'un photon sur 10 000 est absorbé dans les 5 mm d'eau.
- Anomalie à 1408 keV:** On observe une légère remontée du taux d'absorption pour la raie à 1408 keV. Ceci pourrait être dû à une **contribution de la création de paires (seuil à 1022 keV)** ou à un effet statistique.

| Index | Raie gamma | Énergie (keV) | Taux d'absorption (%) |
|-------|------------|---------------|-----------------------|
| 0 | 40 keV (X) | 39.5 | 2.72 |
| 1 | 40 keV (X) | 40.1 | 2.58 |
| 2 | 122 keV | 121.8 | 0.08 |
| 3 | 245 keV | 244.7 | 0.01 |
| 4 | 344 keV | 344.3 | <0.01 |
| 5 | 411 keV | 411.1 | <0.01 |
| 6 | 444 keV | 444.0 | <0.01 |
| 7 | 779 keV | 778.9 | <0.01 |
| 8 | 867 keV | 867.4 | <0.01 |
| 9 | 964 keV | 964.1 | <0.01 |
| 10 | 1086 keV | 1085.9 | <0.01 |
| 11 | 1112 keV | 1112.1 | <0.01 |
| 12 | 1408 keV | 1408.0 | <0.01 |

Taux d'absorption dans l'eau par raie gamma Eu-152. Les raies X sont surlignées.

Taux d'absorption vs énergie gamma



graphique en échelle log-log montrant l'évolution du taux d'absorption en fonction de l'énergie du photon gamma. Chaque point représente une raie de l'Eu-152

Le graphe montre clairement trois régimes :

1. **Basse énergie (40-100 keV):** Décroissance très rapide, dominée par l'effet photoélectrique
2. **Énergie intermédiaire (100-800 keV):** Décroissance plus lente, transition vers le régime Compton
3. **Haute énergie (>800 keV):** Plateau avec légère remontée, contribution possible de la création de paires

Loi de variation avec l'énergie

Le coefficient d'atténuation massique de l'eau suit approximativement :

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_{pe}}{\rho} + \frac{\mu_C}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho}$$

où les trois termes correspondent à l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la création de paires.

Effet photoélectrique

$$\frac{\mu_{pe}}{\rho} \propto \frac{Z^{4-5}}{E^{3-3.5}}$$

Cette dépendance en E^{-3} explique la chute rapide du taux d'absorption à basse énergie.

Diffusion Compton

$$\frac{\mu_C}{\rho} \propto \frac{Z}{E}$$

La dépendance plus faible en E^{-1} explique le ralentissement de la décroissance aux énergies intermédiaires.

Création de paires

$$\frac{\mu_{pp}}{\rho} \propto Z^2 \ln(E) \quad \text{pour } E > 1.022 \text{ MeV}$$

Ce processus devient non négligeable au-delà de 1 MeV et peut expliquer la légère remontée à 1408 keV.
Pour une épaisseur d'eau de 5 mm, le taux d'absorption théorique est :

$$A = 1 - e^{-\mu x}$$

| Énergie (keV) | μ (cm^{-1}) | A théorique (%) | A simulé (%) |
|---------------|----------------------------|-----------------|--------------|
| 40 | 0.268 | 1.33 | 2.65* |
| 122 | 0.161 | 0.80 | 0.08 |
| 344 | 0.117 | 0.58 | <0.01 |
| 1408 | 0.061 | 0.30 | <0.01 |

Comparaison des taux d'absorption théoriques et simulés. *Le taux simulé plus élevé à 40 keV inclut l'absorption totale (photoélectrique).

Note importante

Les taux simulés représentent l'absorption *totale* (photon complètement absorbé), tandis que les valeurs théoriques incluent aussi la diffusion Compton. La différence importante pour les hautes énergies s'explique par le fait que la majorité des interactions Compton ne conduisent pas à une absorption complète du photon.

Contribution à la dose par raie

La contribution de chaque raie à la dose dépend de :

1. Son intensité d'émission (nombre de photons émis)
2. Son taux d'absorption dans l'eau
3. Son énergie (énergie déposée par absorption)

$$D_i \propto N_i \times A_i \times E_i$$

| Raie | N émis | A (%) | E (keV) | $N \times A$ | Contribution |
|------------|--------------------|-------|-----------|--------------------|--------------|
| 40 keV (X) | 1.46×10^7 | 2.65 | 40 | 3.87×10^5 | Dominante |
| 122 keV | 7.1×10^6 | 0.08 | 122 | 5680 | Faible |
| 344 keV | 6.65×10^6 | <0.01 | 344 | <665 | Négligeable |
| 1408 keV | 5.25×10^6 | <0.01 | 1408 | <525 | Négligeable |

Table 12: Contribution estimée de chaque raie à la dose absorbée.

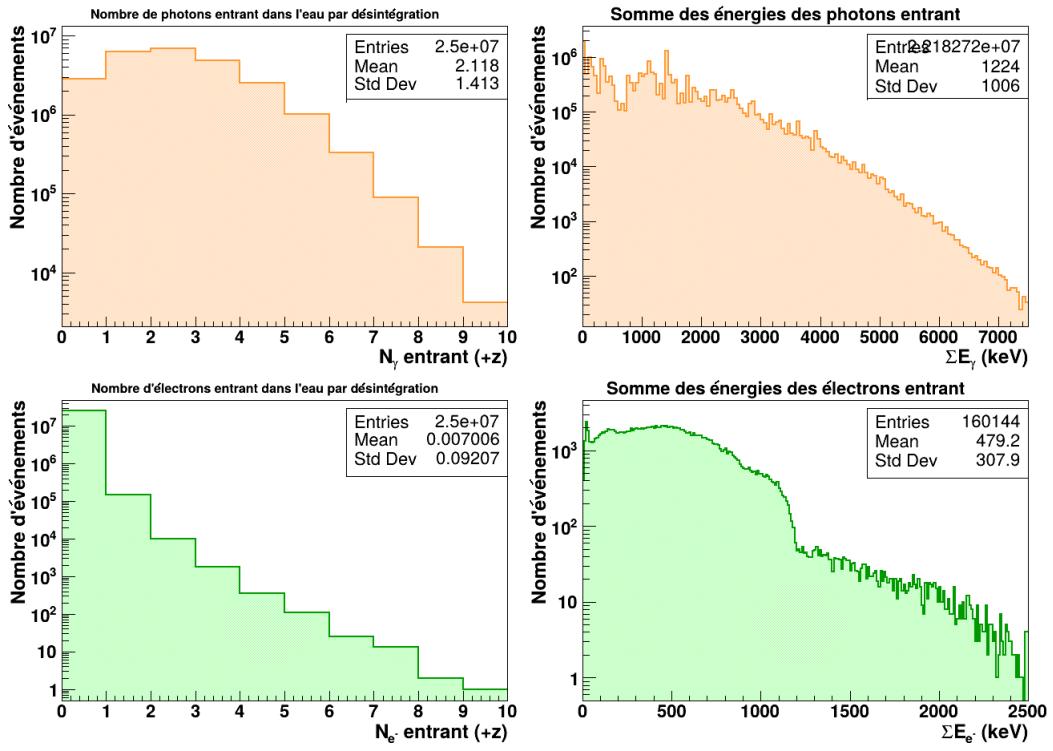
- Les **raies X à 40 keV** sont responsables de la quasi-totalité de la dose absorbée dans l'eau. Pour augmenter le débit de dose, il faudrait :
 - Maximiser le flux de ces raies (pas de filtre ou filtre à faible Z)
 - Utiliser un milieu avec un Z plus élevé (meilleure absorption photoélectrique)
- Les **raies de haute énergie**(>300 keV) traversent l'eau presque sans interaction. Elles ne contribuent pas significativement à la dose dans les 5 mm d'eau mais pourraient être utilisées pour :
 - La détection externe (monitoring)
 - L'irradiation de volumes plus épais
- Un **filtre de haut Z**(comme le tungstène) atténuerait préférentiellement les raies de basse énergie, réduisant fortement le débit de dose mais améliorant la pénétration du rayonnement.

1.8 Analyse des plans de comptage PreContainer et PostContainer

Plan PreContainer – Particules entrant dans l'eau

1. Nombre de photons entrant par désintégration (N_γ entrant)
2. Somme des énergies des photons entrant (ΣE_γ)
3. Nombre d'électrons entrant par désintégration (N_{e^-} entrant)
4. Somme des énergies des électrons entrant (ΣE_{e^-})

Cette figure présente 4 histogrammes caractérisant les particules entrant dans le volume d'eau :



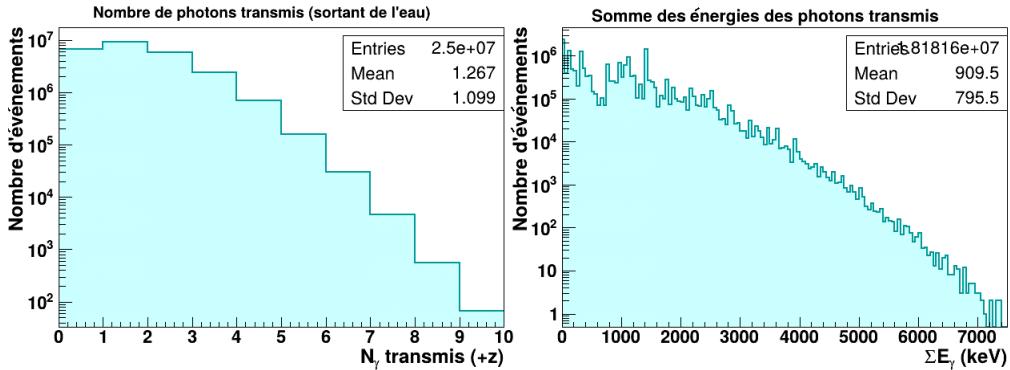
Particules entrant dans le volume d'eau (Precontainer)

| Observable | Entries | Moyenne | Écart-type |
|-------------------------|---------------------|---------|------------|
| N_γ entrant | 2.5×10^7 | 2.118 | 1.413 |
| ΣE_γ (keV) | 2.183×10^7 | 1224.2 | 1006 |
| N_{e^-} entrant | 2.5×10^7 | 0.00701 | 0.0921 |
| ΣE_{e^-} (keV) | 160 144 | 479.2 | 307.9 |

Statistiques des particules entrant dans l'eau (PreContainer).

- **Photons:** En moyenne, **2.118 photons** par désintégration atteignent l'eau, avec une énergie totale moyenne de **1224 keV**. La distribution du nombre de photons s'étend de 0 à environ 10, avec un maximum autour de 2 photons.
- **Électrons:** Très peu d'électrons primaires atteignent l'eau (moyenne = 0.007 par événement). Ces électrons proviennent principalement de la conversion interne et des interactions dans le PMMA. Leur énergie moyenne est de **479 keV**.
- **Rapport N_γ/N_{e^-} :** Le rapport est d'environ 302, confirmant que le flux entrant est très largement dominé par les photons.

Photons transmis (PostContainer,)



Photons qui traversent l'eau sans être absorbés et sortent par le plan PostContainer dans la direction +z (transmis)

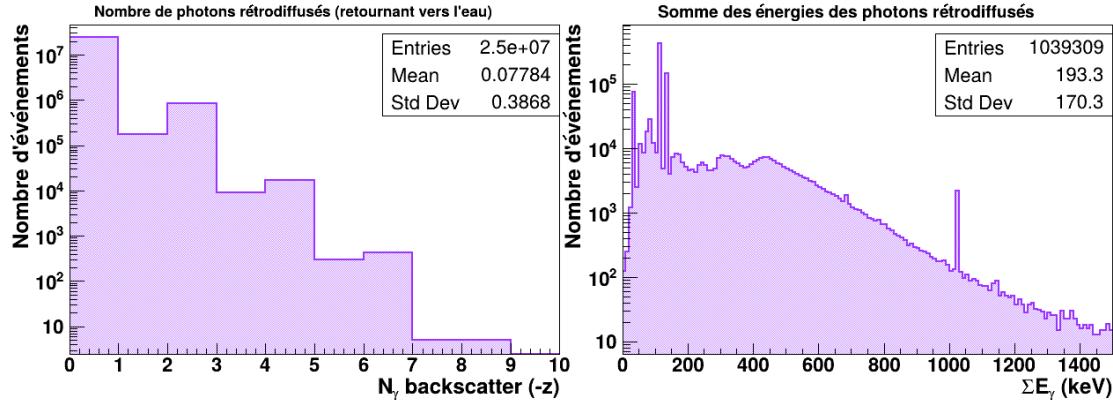
Cette figure montre les photons qui traversent l'eau sans être absorbés et sortent par le plan PostContainer dans la direction +z (transmis)

| Observable | Entries | Moyenne | Écart-type |
|----------------------------------|---------------------|---------|------------|
| N_γ transmis | 2.5×10^7 | 1.267 | 1.099 |
| ΣE_γ transmis (keV) | 1.818×10^7 | 909.5 | 795.5 |

Statistiques des photons transmis (PostContainer, direction +z).

- **Transmission:** En moyenne, **1.267 photons** par événement traversent l'eau, contre 2.118 entrants. Cela correspond à un **taux de transmission de 59.8%** en nombre de photons.
- **Atténuation en énergie:** L'énergie moyenne transmise est de 909.5 keV contre 1224 keV à l'entrée, soit une **atténuation de 25.7%** en énergie.
- **Distribution:** Le spectre en énergie montre une structure complexe avec des pics correspondant aux raies gamma de l'Eu-152 (344, 779, 964, 1112, 1408 keV) et un continuum Compton.

Photons rétrodiffusés (PostContainer, $-z$)



photons qui, après avoir traversé partiellement l'eau, sont diffusés vers l'arrière (direction $-z$) et repassent par le plan PostContainer

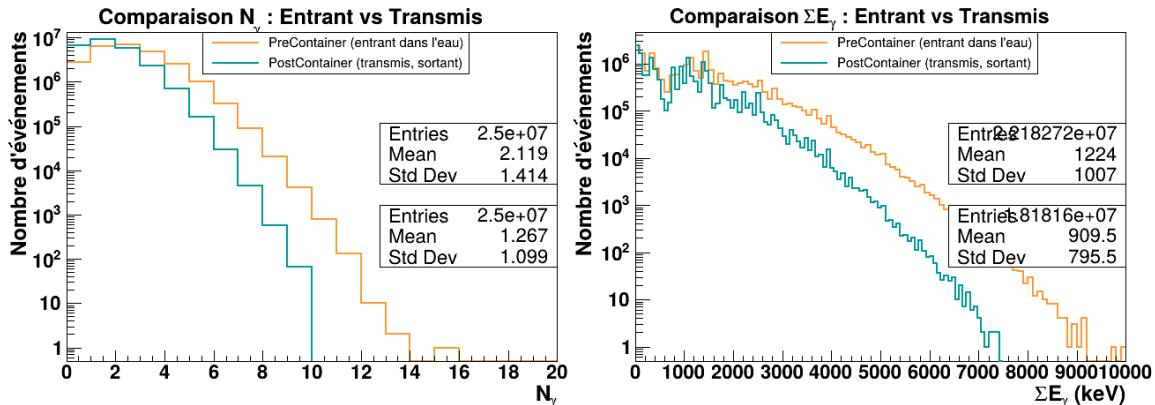
Cette figure caractérise les photons qui, après avoir traversé partiellement l'eau, sont diffusés vers l'arrière (direction $-z$) et repassent par le plan PostContainer.

| Observable | Entries | Moyenne | Écart-type |
|-------------------------------------|-------------------|---------|------------|
| N_γ backscatter | 2.5×10^7 | 0.0778 | 0.387 |
| ΣE_γ backscatter (keV) | 1 039 309 | 193.3 | 170.3 |

Table 15: Statistiques des photons rétrodiffusés (PostContainer, direction $-z$).

- **Rétrodiffusion:** En moyenne **0.0778 photons** par événement sont rétrodiffusés, ce qui correspond à environ **3.7%** des photons entrants.
- **Énergie des photons rétrodiffusés:** L'énergie moyenne est de **193.3 keV**, nettement inférieure à l'énergie des photons entrants (1224 keV). Ceci est caractéristique de la diffusion Compton à grand angle : un photon diffusé à 180° perd une fraction importante de son énergie.
- **Origine physique:** Ces photons proviennent principalement de :
 1. Diffusion Compton à grand angle dans l'eau
 2. Rétrodiffusion sur les structures après l'eau (feuille de tungstène, fond du container)
- **Spectre en énergie:** Le spectre montre un maximum autour de 100-200 keV, correspondant à l'énergie des photons Compton rétrodiffusés depuis les raies principales de l'Eu-152. On observe également des pics caractéristiques autour de 40 keV (raies X fluorescence) et vers 1100 keV (photons diffusés à faible angle).

Comparaison Entrant vs Transmis (photons)



Distributions des photons entrant (PreContainer) et transmis (PostContainer)

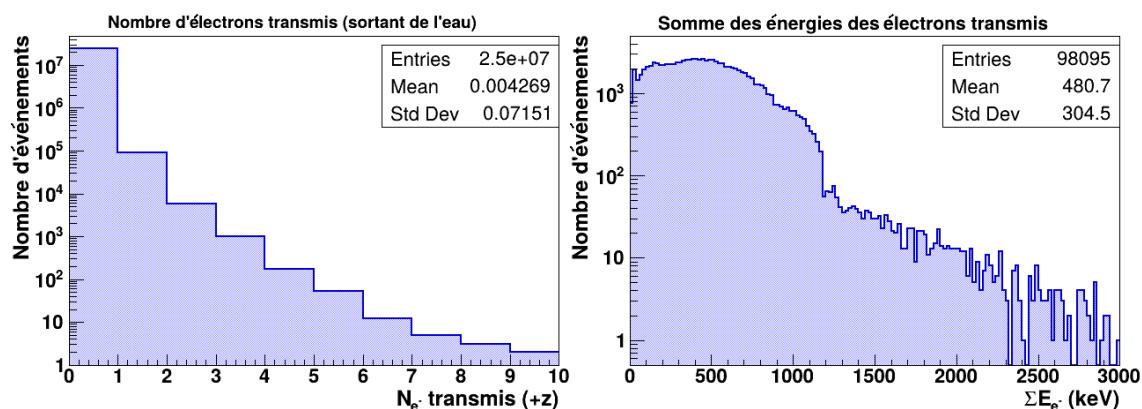
Cette figure superpose les distributions des photons entrant (PreContainer) et transmis (PostContainer) pour visualiser directement l'effet de l'atténuation dans l'eau.

| Observable | PreContainer | PostContainer | Différence | Ratio |
|---|--------------|---------------|------------|-------|
| $\langle N_\gamma \rangle$ | 2.118 | 1.267 | -0.851 | 59.8% |
| $\langle \Sigma E_\gamma \rangle$ (keV) | 1224.2 | 909.5 | -314.7 | 74.3% |

Comparaison des photons entrant et transmis.

- **Atténuation en nombre:** Environ **40.2%** des photons sont absorbés ou diffusés hors du faisceau lors de la traversée de l'eau (10 mm).
- **Atténuation en énergie:** L'énergie totale transmise représente **74.3%** de l'énergie entrante. La différence (25.7%) correspond à l'énergie déposée dans l'eau et à l'énergie emportée par les photons diffusés.
- **Décalage des distributions:**
 - La distribution en nombre se décale vers les faibles valeurs (de 2.118 à 1.267)
 - La distribution en énergie se décale vers les basses énergies et perd les événements de haute énergie (queue tronquée au-delà de 7000 keV)
- **Bilan énergétique:** Sur 1224 keV entrants en moyenne :
 - 909.5 keV sont transmis (74.3%)
 - ~314.7 keV sont déposés ou diffusés (25.7%)

Électrons transmis (PostContainer, +z)



électrons qui traversent l'eau et sortent dans la direction +z

Cette figure caractérise les électrons qui traversent l'eau et sortent dans la direction +z.

| Observable | Entries | Moyenne | Écart-type |
|---------------------------------|-------------------|---------|------------|
| N_{e^-} transmis | 2.5×10^7 | 0.00427 | 0.0715 |
| ΣE_{e^-} transmis (keV) | 98 095 | 480.7 | 304.5 |

Statistiques des électrons transmis (PostContainer, direction +z).

- **Faible transmission:** Seulement **0.00427 électrons** par événement traversent l'eau, ce qui est cohérent avec le faible nombre d'électrons entrants (0.00701) et l'absorption importante des électrons dans l'eau.
- **Taux de transmission électronique:** Environ **60.9%** des électrons entrants traversent l'eau (0.00427/0.00701). Ce taux relativement élevé s'explique par l'énergie élevée des électrons incidents (479 keV en moyenne), dont le parcours dans l'eau est de plusieurs mm.
- **Spectre en énergie:** Le spectre présente un maximum autour de **500-700 keV** et s'étend jusqu'à 2500 keV. Cette distribution reflète le spectre des électrons Compton produits par les photons de haute énergie de l'Eu-152.
- **Origine:** Ces électrons sont principalement des électrons secondaires (Compton, photoélectriques) créés près de l'interface de sortie de l'eau.

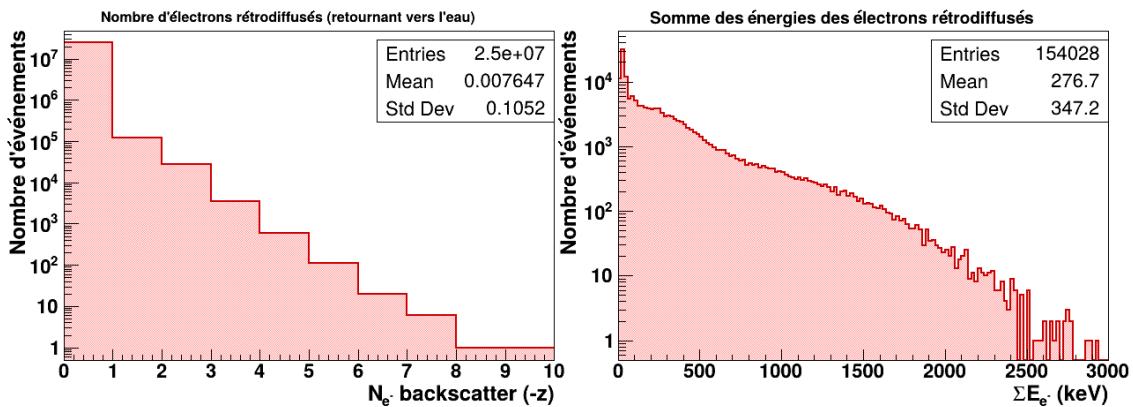
Électrons rétrodiffusés (PostContainer, -z)

Cette figure caractérise les électrons qui sont rétrodiffusés depuis les structures après l'eau (feuille de tungstène, container) et retournent vers le volume d'eau.

| Observable | Entries | Moyenne | Écart-type |
|------------------------------------|-------------------|---------|------------|
| N_{e^-} backscatter | 2.5×10^7 | 0.00765 | 0.105 |
| ΣE_{e^-} backscatter (keV) | 154 028 | 276.7 | 347.2 |

Statistiques des électrons rétrodiffusés (PostContainer, direction -z).

- **Rétrodiffusion significative:** Le nombre d'électrons rétrodiffusés (**0.00765**) est **1.79 fois supérieur** au nombre d'électrons transmis (0.00427). Ceci indique une rétrodiffusion importante depuis la feuille de tungstène.
- **Coefficient de rétrodiffusion:** Le rapport backscatter/transmis est de 1.79, ce qui est caractéristique de la rétrodiffusion électronique sur un matériau à haut Z comme le tungstène (Z=74).



électrons qui sont rétrodiffusés depuis les structures après l'eau (feuille de tungstène, container) et retournent vers le volume d'eau

- **Énergie moyenne:** L'énergie moyenne des électrons rétrodiffusés est de **276.7 keV**, inférieure à celle des électrons transmis (480.7 keV). Cette perte d'énergie est due aux interactions dans la feuille de tungstène avant rétrodiffusion.
- **Spectre en énergie:** Le spectre présente un maximum à basse énergie (< 200 keV) avec une décroissance rapide. La queue à haute énergie (jusqu'à 2500 keV) correspond aux électrons énergétiques rétrodiffusés élastiquement.
- **Impact dosimétrique:** Ces électrons rétrodiffusés contribuent à augmenter la dose dans la partie supérieure du volume d'eau, créant un effet de "build-up inverse".

Synthèse et bilan des flux

| Flux | Photons | | Électrons | |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| | $\langle N \rangle$ | $\langle E \rangle$ (keV) | $\langle N \rangle$ | $\langle E \rangle$ (keV) |
| Entrant (Pre, +z) | 2.118 | 1224.2 | 0.00701 | 479.2 |
| Transmis (Post, +z) | 1.267 | 909.5 | 0.00427 | 480.7 |
| Backscatter (Post, -z) | 0.0778 | 193.3 | 0.00765 | 276.7 |
| Absorbé/diffusé | 0.773 | 121.4 | – | – |

Bilan des flux de particules aux interfaces du volume d'eau.

Coefficients caractéristiques

| Coefficient | Photons | Électrons |
|---|---------|-----------|
| Transmission ($T = N_{trans}/N_{in}$) | 59.8% | 60.9% |
| Rétroréfraction ($R = N_{back}/N_{in}$) | 3.7% | 109.1%* |
| Absorption/perte ($A = 1 - T - R$) | 36.5% | – |

Coefficients de transmission et rétroréfraction. *Le taux >100% pour les électrons indique une création nette d'électrons secondaires rétroréfractés.

Conclusions principales

1. **Photons:** L'eau de 10 mm transmet environ 60% des photons incidents. L'atténuation (40%) est due à l'absorption photoélectrique (raies X à 40 keV) et à la diffusion Compton. La rétroréfraction photonique reste modérée (3.7%).
2. **Électrons:** Le flux électronique est dominé par les électrons secondaires. La rétroréfraction importante depuis la feuille de tungstène (coefficient ~1.79) crée un flux retour significatif vers l'eau, supérieur au flux d'électrons entrants.
3. **Bilan énergétique:** Sur 1224 keV entrants par événement :
 - 909.5 keV sont transmis (74.3%)
 - ~15 keV sont rétroréfractés (photons)
 - ~300 keV sont déposés ou perdus (25.7%)
4. **Importance de la feuille de tungstène:** La feuille W (100 µm) joue un rôle crucial en rétroréfractant les électrons vers l'eau, ce qui augmente la dose dans la partie supérieure du volume d'eau et contribue à modifier le profil de dose axial.

Implications pour la dosimétrie

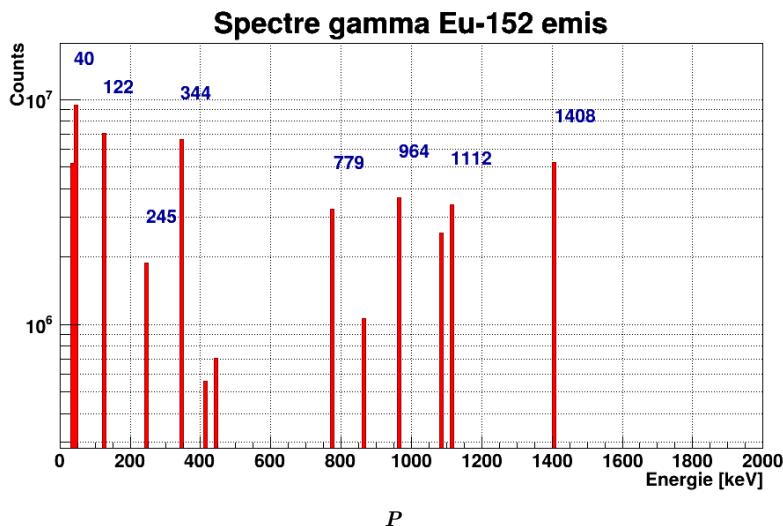
- La **rétroréfraction électronique** depuis la feuille de tungstène augmente localement la dose près de l'interface eau/tungstène.
- Les **photons rétroréfractés** (193 keV en moyenne) sont facilement absorbés et contribuent à la dose dans la partie supérieure de l'eau.
- Le **gradient de dose** observé (Section dose par anneau) est cohérent avec ces flux : la dose est maximale au centre où les photons primaires sont les plus nombreux.

- Pour une dosimétrie précise, il est important de prendre en compte ces effets de rétrodiffusion, particulièrement pour les anneaux situés près de l'interface avec la feuille de tungstène.

1.9 Analyse Dose Couronnes

Spectre gamma Eu-152 émis

Cette figure présente le spectre en énergie des photons gamma émis par la source d'Europium-152 simulée. L'histogramme affiche le nombre de photons (échelle logarithmique) en fonction de leur énergie en keV.



Le spectre montre les raies caractéristiques de l'Eu-152, qui est un émetteur gamma complexe avec de nombreuses transitions. Les principales raies identifiées sont :

| Énergie (keV) | Transition |
|---------------|-------------------------------|
| 40 | Raies X ($K\alpha, K\beta$) |
| 122 | γ |
| 245 | γ |
| 344 | γ (la plus intense) |
| 779 | γ |
| 964 | γ |
| 1112 | γ |
| 1408 | γ |

Principales raies gamma de l'Eu-152 observées dans le spectre émis.

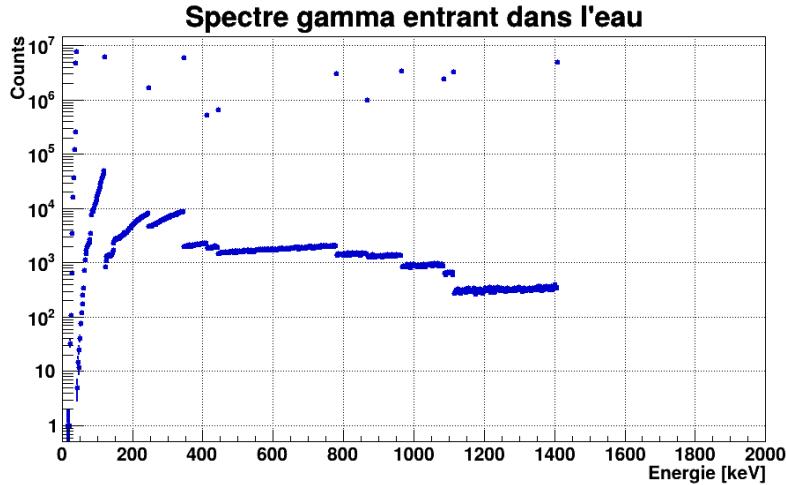
- Le nombre total de photons émis est d'environ 5.07×10^7 (Entries).
- La raie la plus intense est celle à 344 keV, suivie de la raie à 1408 keV.
- Les raies X à 40 keV sont également très intenses, ce qui est caractéristique de la désexcitation par capture électronique de l'Eu-152.
- Ce spectre sert de référence pour calculer les taux de transmission et d'absorption dans les différents volumes de la géométrie.

Spectre gamma entrant dans l'eau

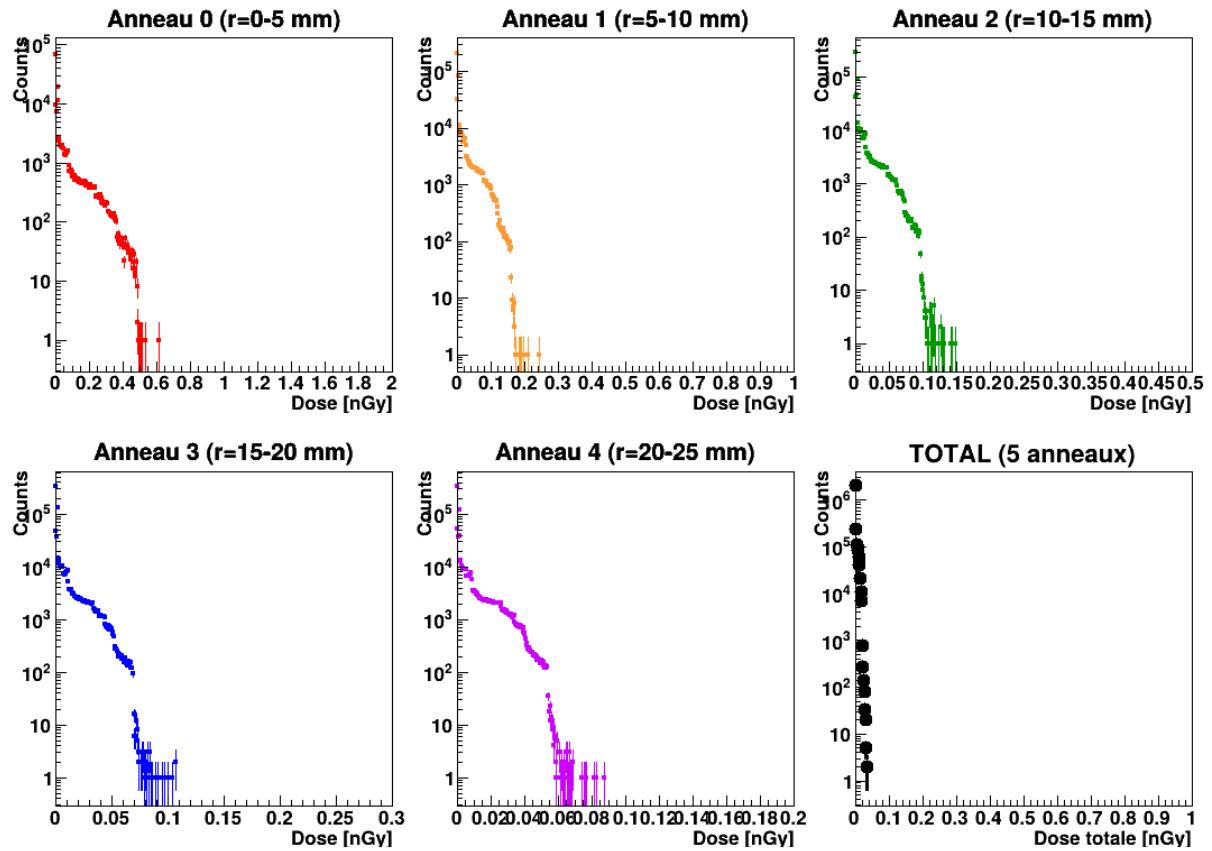
Cette figure montre le spectre en énergie des photons gamma qui pénètrent effectivement dans le volume d'eau (après traversée du PMMA). Elle permet de quantifier l'atténuation et la modification du spectre entre la source et le milieu de mesure.

- Environ 4.83×10^7 photons entrent dans l'eau (Entries).
- Les raies de basse énergie (40 keV, 122 keV) sont significativement atténuées.
- Un continuum Compton apparaît entre les raies discrètes.
- Les raies de haute énergie (> 300 keV) sont relativement préservées.
- Le taux de transmission global source → eau est d'environ 95%, ce qui est cohérent avec l'absence de filtre W/PETG.
- L'atténuation est principalement due à :
 - La géométrie (angle solide limité)
 - L'absorption dans le PMMA (5 mm)
 - Les diffusions Compton créant le continuum
- Les discontinuités visibles dans le spectre correspondent aux seuils d'absorption des matériaux traversés.

Distribution de dose par anneau



Spectre en énergie des photons gamma qui pénètrent effectivement dans le volume d'eau après traversée du PMMA



Distribution de la dose absorbée (en nGy par événement) pour chacun des 5 anneaux concentriques et pour le total

Cette figure présente six panneaux montrant la distribution de la dose absorbée (en nGy par événement) pour chacun des 5 anneaux concentriques et pour le total. Les distributions sont présentées en échelle logarithmique. Pour chaque anneau, on observe une distribution caractéristique :

| Anneau | Rayon (mm) | Entries | Dose max (nGy) |
|--------|------------|---------|----------------|
| 0 | 0–5 | 71 227 | ~ 2 |
| 1 | 5–10 | 74 959 | ~ 1 |
| 2 | 10–15 | 98 230 | ~ 0.5 |
| 3 | 15–20 | 25 645 | ~ 0.3 |
| 4 | 20–25 | 84 847 | ~ 0.2 |
| Total | 0–25 | 785 768 | ~ 1 |

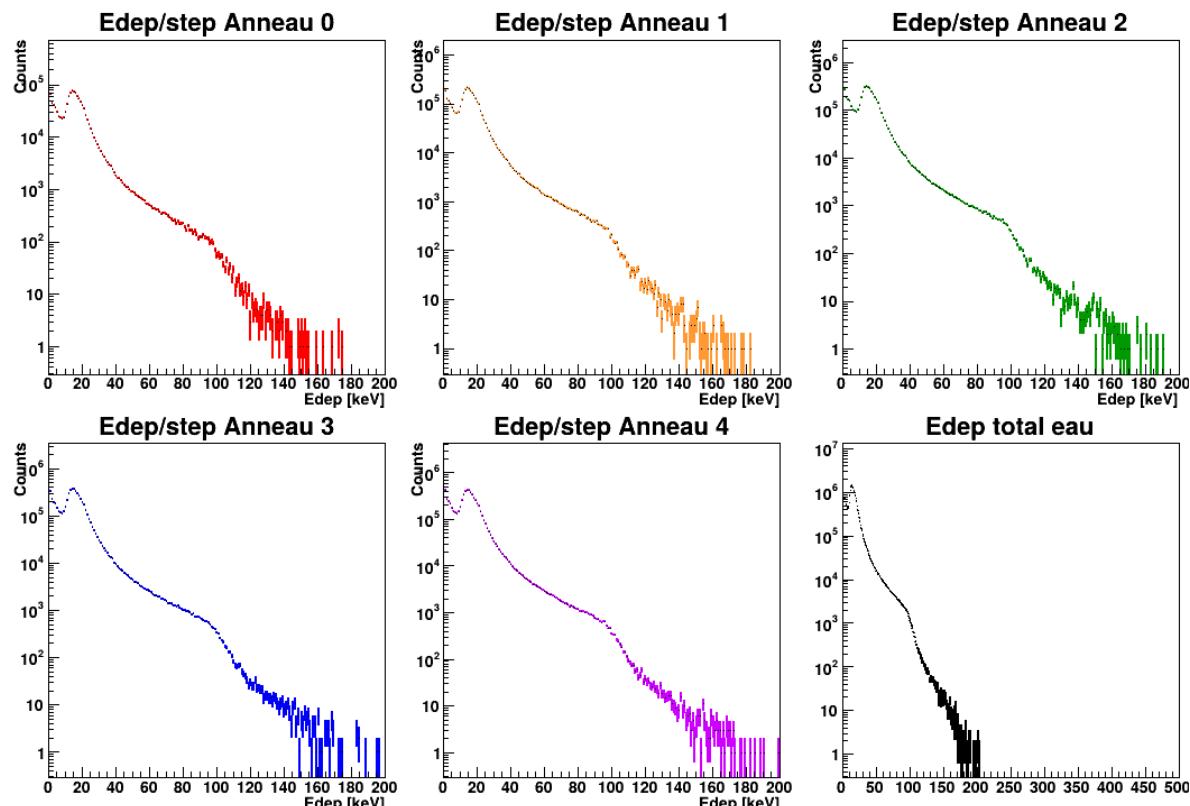
Statistiques des distributions de dose par anneau.

- **Gradient radial** : La dose maximale déposée par événement diminue avec le rayon. L'anneau central (0–5 mm) reçoit la dose la plus élevée (~ 2 nGy), tandis que l'anneau externe (20–25 mm) reçoit une dose maximale d'environ 0.2 nGy.

- **Forme des distributions** : Toutes les distributions présentent une décroissance quasi-exponentielle, caractéristique des processus stochastiques de dépôt d'énergie. La majorité des événements déposent une dose faible, avec une queue vers les hautes doses correspondant aux événements avec forte interaction.
- **Nombre d'événements** : Le nombre d'entrées varie selon les anneaux, reflétant à la fois la surface de chaque anneau et la probabilité d'interaction. L'anneau 2 (10–15 mm) présente le plus grand nombre d'événements, ce qui est cohérent avec sa surface intermédiaire et la distribution spatiale du faisceau.
- **Interprétation physique** : Le gradient radial observé est dû à :
 1. La divergence géométrique du faisceau depuis la source ponctuelle
 2. L'atténuation radiale dans l'eau
 3. La contribution des électrons secondaires qui ont un parcours limité

Énergie déposée par step

Cette figure présente les spectres d'énergie déposée par step de simulation pour chaque anneau et pour le total dans l'eau. L'énergie est exprimée en keV.



spectres d'énergie déposée par step de simulation pour chaque anneau et pour le total dans l'eau

Les spectres montrent :

- Une distribution continue de 0 à environ 200 keV pour les anneaux individuels
- Un spectre total s'étendant jusqu'à 500 keV
- Un maximum autour de 10–20 keV
- Une décroissance exponentielle aux hautes énergies
- Environ 2.84×10^7 entrées au total

| Anneau | Entries | Énergie moyenne (keV) |
|--------|-----------|-----------------------|
| 0 | 1 516 445 | ~ 20 |
| 1 | 4 242 918 | ~ 18 |
| 2 | 6 286 911 | ~ 17 |
| 3 | 7 492 715 | ~ 16 |
| 4 | 8 836 375 | ~ 15 |

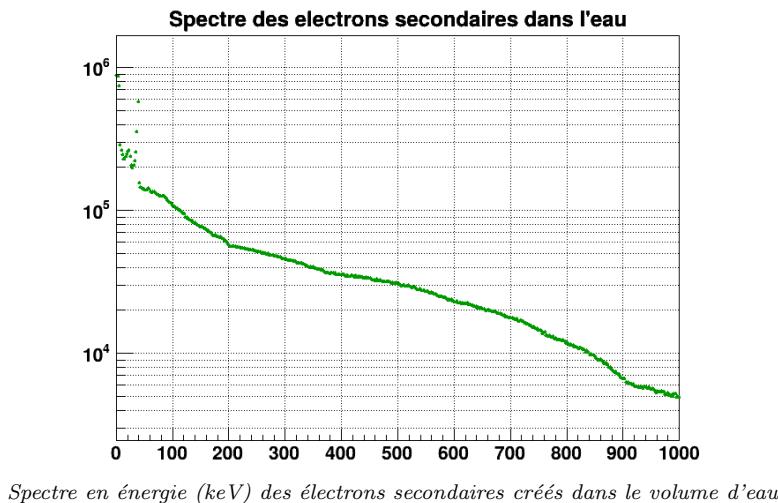
Statistiques des dépôts d'énergie par step.

- **Distribution en énergie:** La forme du spectre est typique des interactions des photons gamma dans l'eau :
 - Le pic à basse énergie (< 50 keV) correspond principalement aux électrons Auger et aux électrons de faible énergie produits par effet photoélectrique
 - La région intermédiaire (50–150 keV) est dominée par les électrons Compton
 - La queue à haute énergie correspond aux électrons Compton de haute énergie
- **Variation radiale:** Le nombre de steps augmente avec le rayon (de 1.5M pour l'anneau 0 à 8.8M pour l'anneau 4), ce qui reflète l'augmentation de la surface des anneaux ($S = \pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)$).

- **Step length:** Le code utilise une limite de step de 0.1 mm dans l'eau (UserLimits), ce qui garantit une bonne résolution spatiale du dépôt d'énergie.

Spectre des électrons secondaires

Cette figure montre le spectre en énergie (keV) des électrons secondaires créés dans le volume d'eau par les interactions des photons gamma.

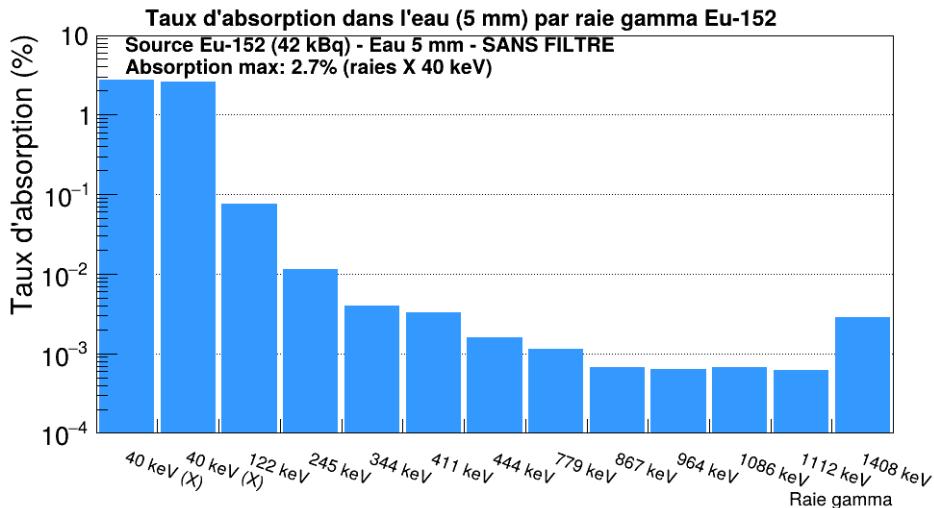


Spectre en énergie (keV) des électrons secondaires créés dans le volume d'eau

- Environ 2.53×10^7 électrons secondaires sont créés (Entries)
- Le spectre s'étend de quelques keV à environ 1000 keV
- Distribution en décroissance continue (quasi-linéaire en échelle log)
- Maximum d'émission aux basses énergies (< 100 keV)
- **Origine des électrons:** Les électrons secondaires sont produits par trois processus principaux :
 1. **Effet photoélectrique** : Produit des électrons d'énergie $E_e = E_\gamma - E_{liaison}$. Dominant pour les photons de basse énergie.
 2. **Diffusion Compton** : Produit des électrons d'énergie variable selon l'angle de diffusion. Processus dominant dans la gamme 100 keV – 1 MeV.
 3. **Création de paires** : Non significatif ici car $E_\gamma < 1.5$ MeV.
- **Forme du spectre:** La décroissance monotone reflète :
 - La prépondérance des interactions de faible transfert d'énergie
 - La section efficace Compton qui favorise les petits angles de diffusion
 - L'abondance des photons de basse énergie dans le spectre incident
- **Rôle dosimétrique:** Ces électrons sont responsables du dépôt d'énergie local. Leur parcours dans l'eau (quelques mm pour des électrons de 500 keV) détermine la résolution spatiale du dépôt de dose.

Taux d'absorption par raie gamma

Cette figure présente un histogramme en barres du taux d'absorption (en %) dans l'eau pour chaque raie gamma de l'Eu-152. L'axe Y est en échelle logarithmique.



Taux d'absorption (en %) dans l'eau pour chaque raie gamma de l'Eu-152

| Raie gamma | Taux d'absorption (%) |
|------------|-----------------------|
| 40 keV (X) | ~ 2.7 |
| 122 keV | ~ 0.08 |
| 245 keV | ~ 0.01 |
| 344 keV | ~ 0.003 |
| 411 keV | ~ 0.003 |
| 444 keV | ~ 0.002 |
| 779 keV | ~ 0.001 |
| 964 keV | < 0.001 |
| 1112 keV | ~ 0.002 |
| 1408 keV | ~ 0.002 |

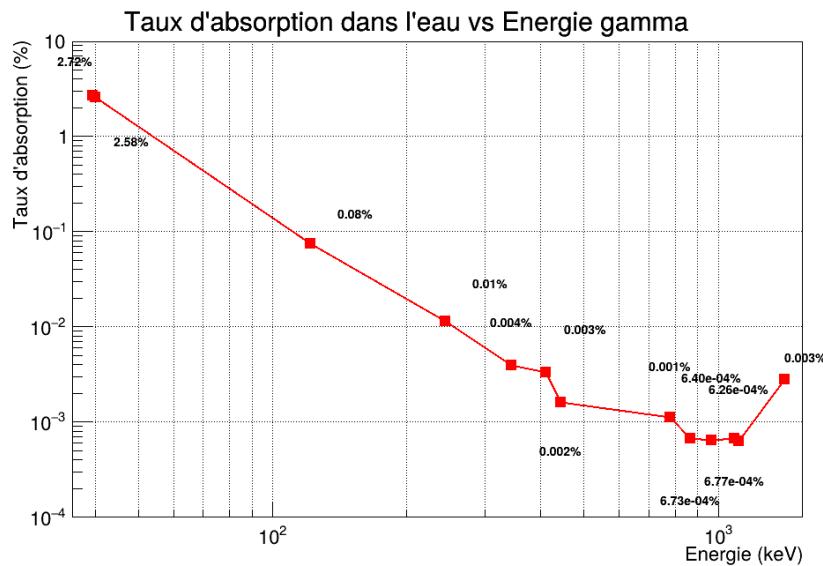
Taux d'absorption dans l'eau (5 mm) par raie gamma Eu-152.

- **Dépendance en énergie:** Le taux d'absorption décroît fortement avec l'énergie du photon. Ceci est conforme à la variation du coefficient d'atténuation massique de l'eau :

$$\mu/\rho \propto E^{-3} \quad (\text{effet photoélectrique, basse énergie})$$

$$\mu/\rho \propto E^{-1} \quad (\text{diffusion Compton, haute énergie})$$

- **Raies X à 40 keV:** Ces raies ont le taux d'absorption le plus élevé (~ 2.7%). C'est cohérent avec le coefficient d'atténuation élevé de l'eau à basse énergie ($\mu \approx 0.27 \text{ cm}^{-1}$ à 40 keV).
- **Raies de haute énergie:** Les raies au-delà de 500 keV ont des taux d'absorption inférieurs à 0.1%, reflétant la grande transparence de l'eau aux photons de haute énergie.
- **Implication dosimétrique :** Bien que les raies de basse énergie soient mieux absorbées, leur contribution à la dose totale dépend aussi de leur intensité d'émission. La raie à 344 keV, très intense mais peu absorbée, peut contribuer significativement à la dose via les interactions Compton.



Taux d'absorption dans l'eau en fonction de l'énergie gamma

Cartes 2D de dépôt d'énergie

Cette figure présente deux cartes bidimensionnelles du dépôt d'énergie :

- **Carte XY :** Vue de dessus (projection dans le plan perpendiculaire au faisceau)
- **Carte RZ :** Coupe longitudinale (rayon vs. position axiale)

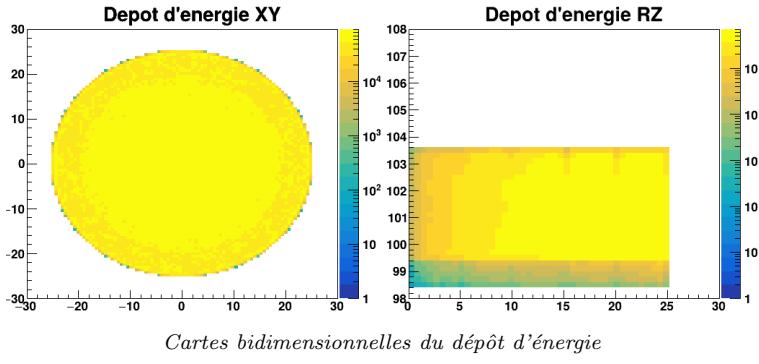
Les deux cartes utilisent une échelle de couleur logarithmique.

Carte XY

- Distribution circulaire uniforme de rayon 25 mm
- Environ 2.84×10^7 entrées
- Intensité relativement homogène sur toute la surface
- Léger gradient radial (centre légèrement plus intense)

Carte RZ

- Visualisation de l'empilement des volumes (z de 98 à 108 mm environ)
- Dépôt d'énergie concentré dans la région de l'eau
- Gradient en z visible : maximum proche de l'entrée, décroissance vers la sortie
- Extension radiale jusqu'à 25–27 mm (incluant les parois du container)



- **Symétrie azimutale:** La carte XY confirme la symétrie cylindrique de la géométrie et l'homogénéité azimutale du dépôt d'énergie.
- **Profil en profondeur:** La carte RZ montre clairement :
 - Le build-up électronique dans les premiers mm
 - L'atténuation exponentielle en profondeur
 - Les interfaces entre les différents volumes (PMMA/eau, eau/tungstène)
- **Localisation des volumes:** On distingue sur la carte RZ :
 - $z \approx 91\text{--}96 \text{ mm}$: PMMA (dépôt plus faible)
 - $z > 106 \text{ mm}$: fond du container (pas de dépôt significatif)
- **Validation géométrique:** Ces cartes permettent de vérifier que la géométrie simulée correspond bien au design prévu et que le dépôt d'énergie se produit dans les volumes attendus.

Synthèse et conclusions

1. **Spectre source:** Le spectre Eu-152 simulé est conforme aux données nucléaires, avec toutes les raies principales correctement représentées.
2. **Transmission:** En configuration sans filtre, environ 95% des photons émis atteignent le volume d'eau.
3. **Absorption:** Les raies X à 40 keV ont le taux d'absorption le plus élevé ($\sim 2.7\%$), tandis que les raies de haute énergie ($> 500 \text{ keV}$) sont peu absorbées ($< 0.1\%$).
4. **Distribution de dose:** Un gradient radial de dose est observé, avec la dose maximale au centre (anneau 0) et une décroissance vers la périphérie.
5. **Électrons secondaires:** Le spectre des électrons secondaires présente une distribution décroissante typique des processus Compton et photoélectrique.

2 Source Eur152 - 2+1 mm Water - Tungsten 50 micron -Distance source/eau 25mm

Configuration

- La profondeur de l'eau est de 3 mm avec une **première tranche de 2mm** et une **seconde tranche de 1mm**
- Les parois du container sont en **polystirene de 1 mm d'épaisseur**
- La source est à **25 mm** de l'entrée de l'eau
- L'arrière du container d'eau est tapissé d'une **feuille de tungstène** de 50 micron 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
- Le **Precontainer Plane** est en avant de la surface d'entrée de l'eau, son épaisseur est de **1mm**
- Le **Postcontainer Plane** chevauche le fond en polystirene du container, son épaisseur est de **1mm**

2.1 Nouvelle Géométrie

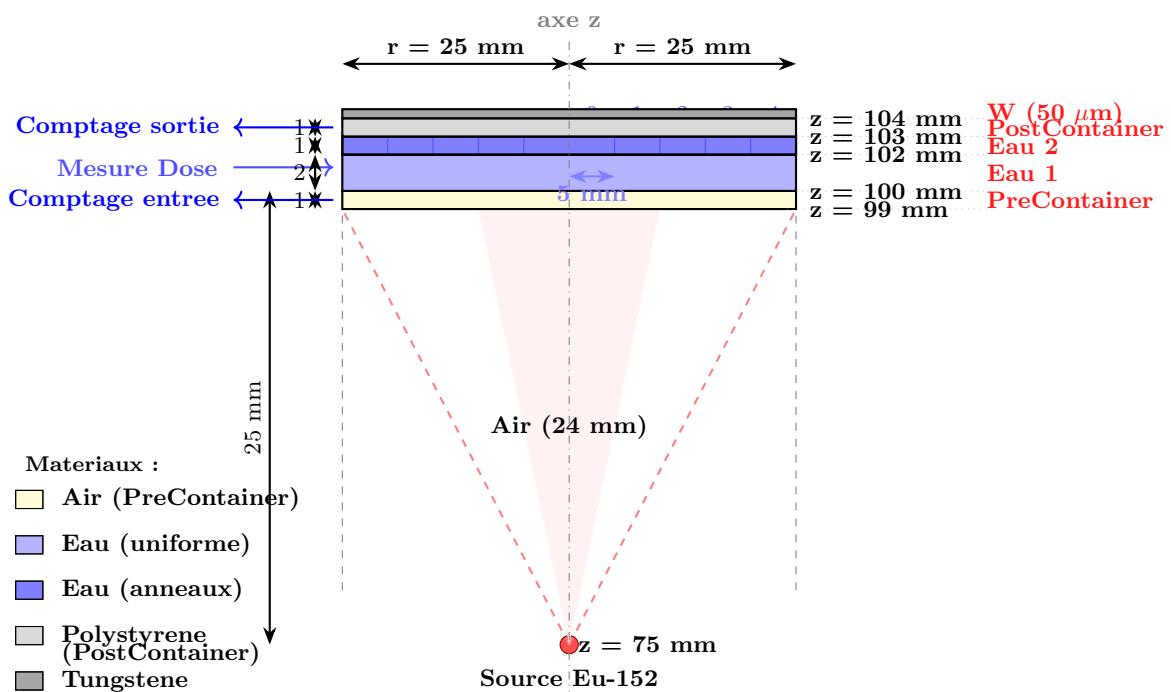


Figure 20: Coupe longitudinale du dispositif Puits Couronne. La source Eu-152 est positionnée à $z = 75 \text{ mm}$ avec un cône d'émission de 45° (demi-angle). l'eau est séparée en deux tranches: 2mm (**Eau 1**) et 1mm (**Eau 2**). Les 5 anneaux d'eau concentriques (nuances de bleu) permettent la mesure de dose radiale.

Position en z des différents éléments de la géométrie optimisée.

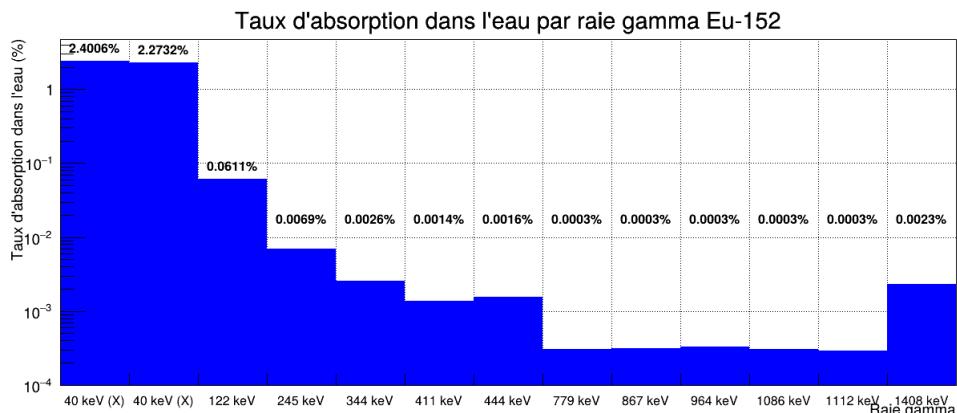
| Volume | Matériau | $z_{\min} (\text{mm})$ | $z_{\max} (\text{mm})$ | Épaisseur (mm) |
|---------------------------------|-------------|------------------------|------------------------|----------------|
| PreContainerPlane | Air | 99.0 | 100.0 | 1.0 |
| Eau 1 (uniforme) | Eau | 100.0 | 102.0 | 2.0 |
| Eau 2 (anneaux) | Eau | 102.0 | 103.0 | 1.0 |
| <i>Volume de mesure de dose</i> | | | | |
| PostContainerPlane | Polystyrène | 103.0 | 104.0 | 1.0 |
| Feuille de tungstène | W | 104.0 | 104.05 | 0.05 |

Distances caractéristiques

| | |
|-------------------------|--|
| $z = 104.05 \text{ mm}$ | <i>Bas feuille W</i> |
| | Feuille W (50 μm) |
| $z = 104.0 \text{ mm}$ | <i>Haut feuille W / Bas PostContainer</i> |
| | PostContainer - Polystyrène (1 mm) |
| $z = 103.0 \text{ mm}$ | <i>Haut PostContainer / Haut Eau 2</i> |
| | Eau 2 (1 mm) - Anneaux - MESURE DOSE |
| $z = 102.0 \text{ mm}$ | <i>Bas Eau 2 / Haut Eau 1</i> |
| | Eau 1 (2 mm) - Volume uniforme |
| $z = 100.0 \text{ mm}$ | <i>Bas Eau 1 = Surface eau / Haut PreContainer</i> |
| | PreContainer - Air (1 mm) |
| $z = 99.0 \text{ mm}$ | <i>Bas PreContainer</i> |
| | Air (24 mm) |
| $z = 75.0 \text{ mm}$ | <i>Source Eu-152</i> |

2.2 Analyse du taux d'absorption dans l'eau par raie gamma

Taux d'absorption par raie gamma

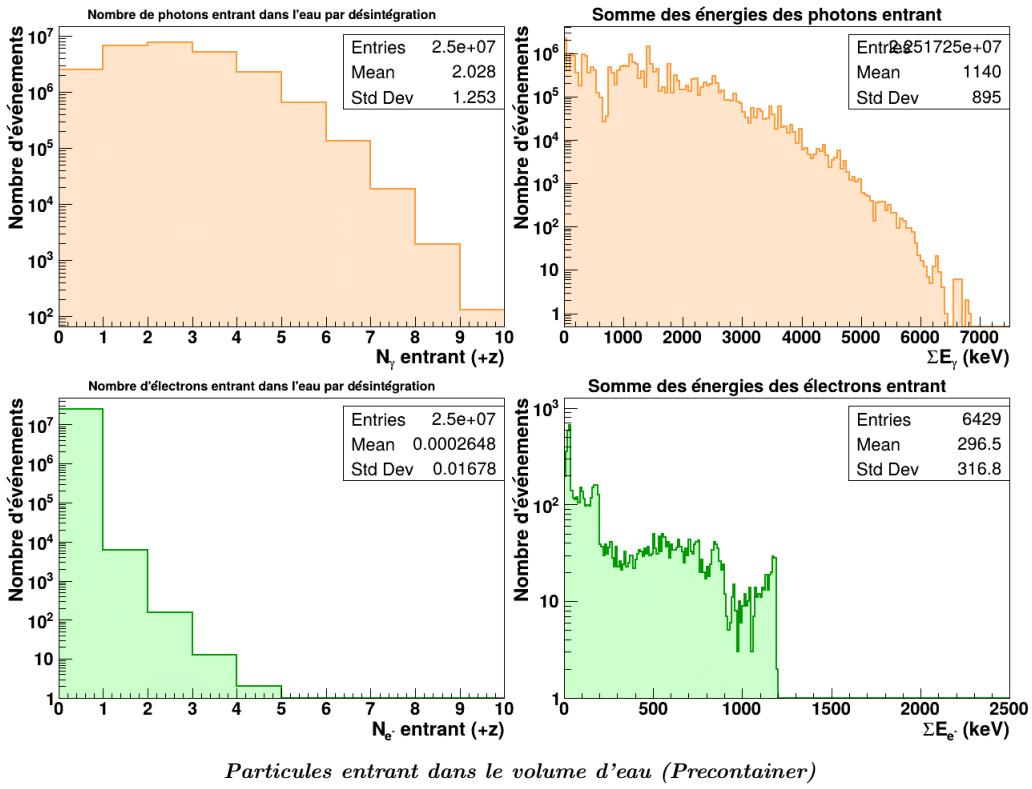


Taux d'absorption dans l'eau (en %) pour chacune des 13 raies gamma de l'Eu-152. L'axe Y est en échelle logarithmique pour visualiser les valeurs sur plusieurs ordres de grandeur

Dominance des raies X: Les deux raies X à ~ 40 keV dominent très largement l'absorption avec des taux de **2.4%** et **2.3%**. Ces raies représentent plus de **98%** de l'absorption totale dans l'eau. Le taux d'absorption décroît rapidement avec l'énergie. Les raies au-delà de 300 keV ont des taux d'absorption inférieurs à 0.01%, ce qui signifie que moins d'un photon sur 10 000 est absorbé dans les 5 mm d'eau. On observe une légère remontée du taux d'absorption pour la raie à 1408 keV. Ceci pourrait être dû à une **contribution de la création de paires (seuil à 1022 keV)** ou à un effet statistique.

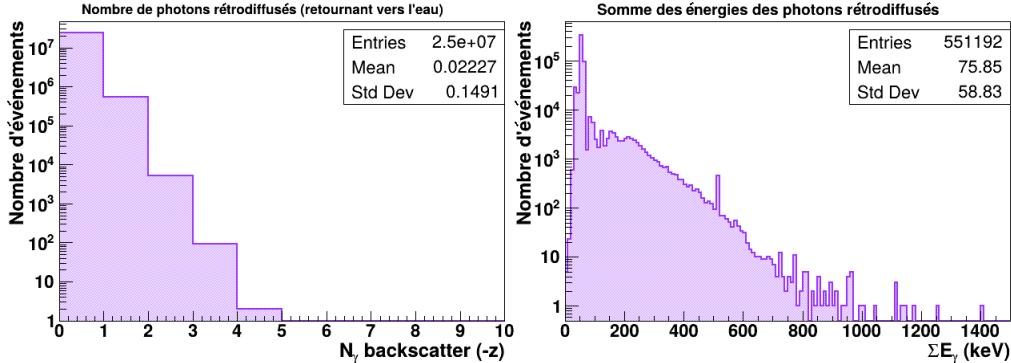
2.3 Analyse des plans de comptage PreContainer et PostContainer

Plan PreContainer – Particules entrant dans l'eau



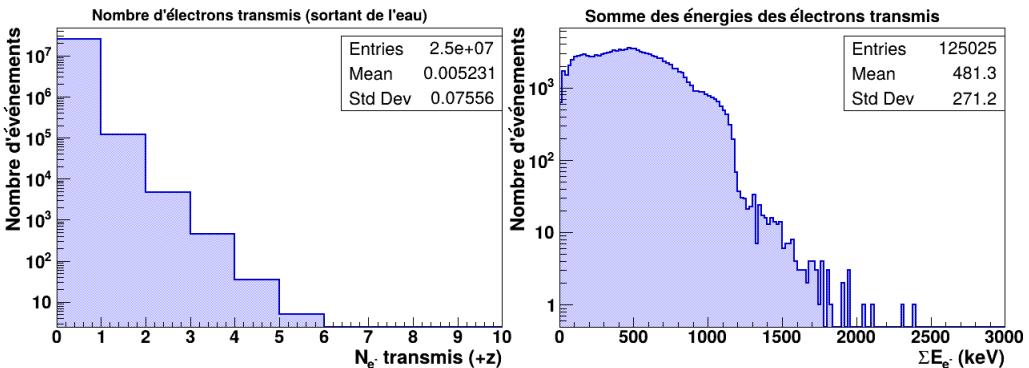
Photons rétrodiffusés (PostContainer, $-z$)

Cette figure caractérise les photons qui, après avoir traversé partiellement l'eau, sont diffusés vers l'arrière (direction $-z$) et repassent par le plan PostContainer.



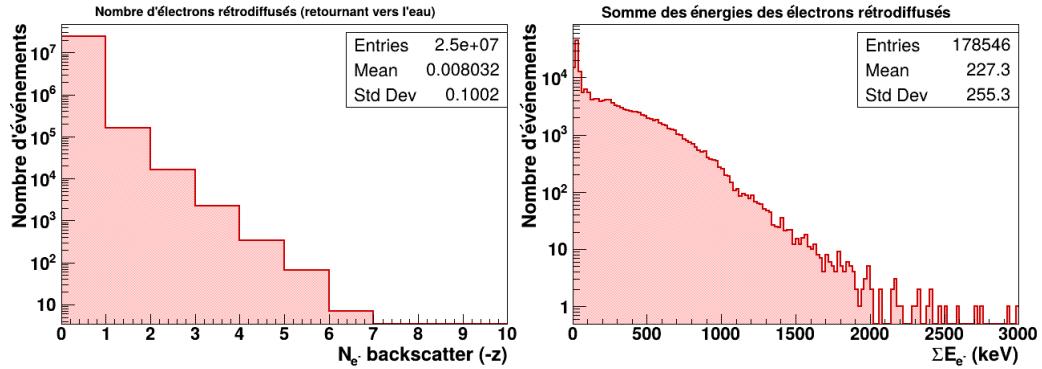
Photons qui, après avoir traversé partiellement l'eau, sont diffusés vers l'arrière (direction $-z$) et repassent par le plan PostContainer

Électrons transmis (PostContainer, $+z$)



Electrons qui traversent l'eau et sortent dans la direction $+z$

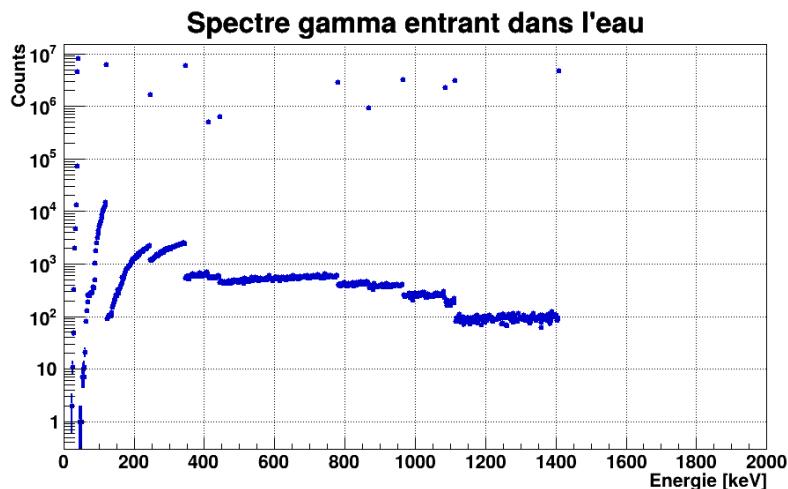
Électrons rétrodiffusés (PostContainer, $-z$)



Electrons qui sont rétrodiffusés depuis les structures après l'eau (feuille de tungstène, container) et retournent vers le volume d'eau

2.4 Analyse Dose Couronnes

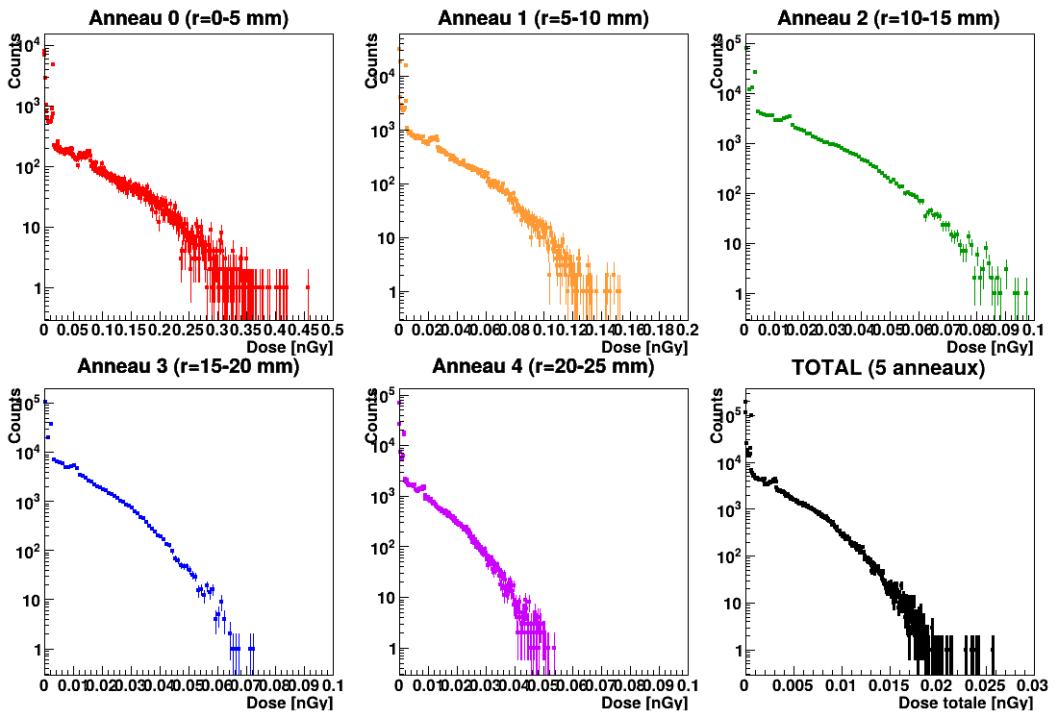
Spectre gamma entrant dans l'eau



Spectre en énergie des photons gamma qui pénètrent effectivement dans le volume d'eau après traversée du PMMA

Cette figure montre le spectre en énergie des photons gamma qui pénètrent effectivement dans le volume d'eau (après traversée du PMMA). Elle permet de quantifier l'atténuation et la modification du spectre entre la source et le milieu de mesure.

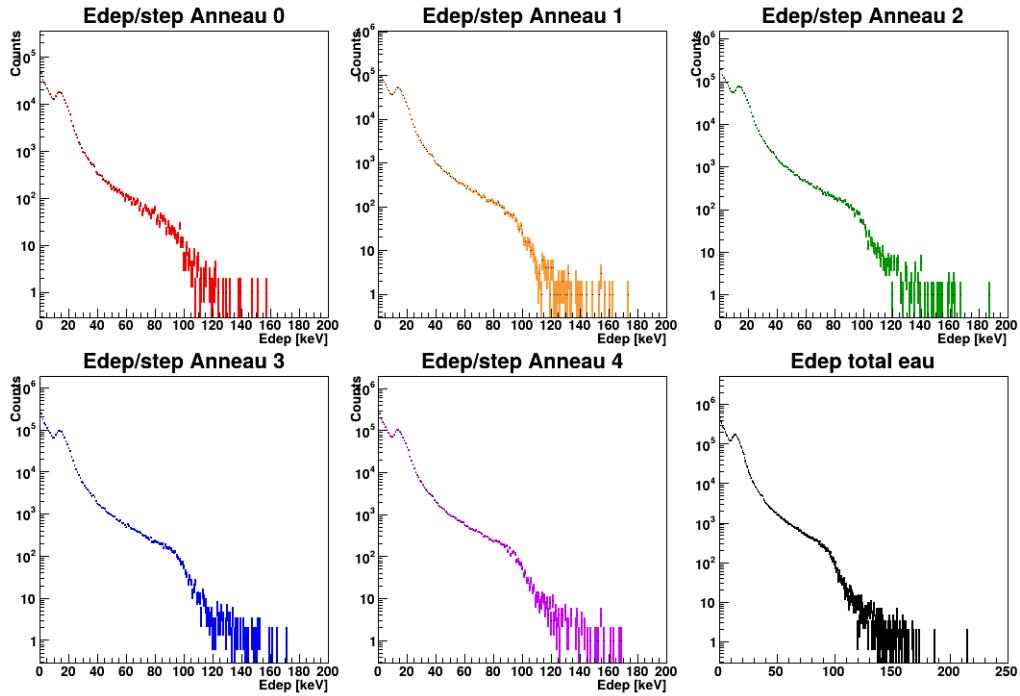
Distribution de dose par anneau



Distribution de la dose absorbée (en nGy par événement) pour chacun des 5 anneaux concentriques et pour le total

Cette figure présente six panneaux montrant la distribution de la dose absorbée (en nGy par événement) pour chacun des 5 anneaux concentriques et pour le total. Les distributions sont présentées en échelle logarithmique. Pour chaque anneau, on observe une distribution caractéristique :

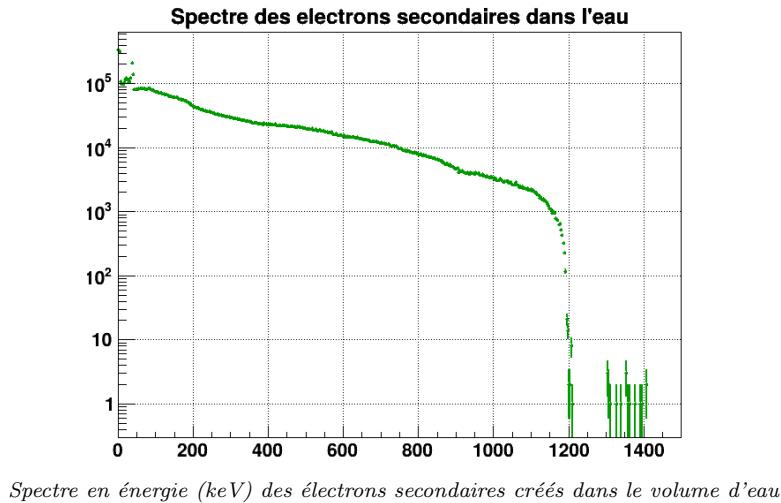
Énergie déposée par step



spectres d'énergie déposée par step de simulation pour chaque anneau et pour le total dans l'eau

Cette figure présente les spectres d'énergie déposée par step de simulation pour chaque anneau et pour le total dans l'eau. L'énergie est exprimée en keV.

Spectre des électrons secondaires



Cette figure montre le spectre en énergie (keV) des électrons secondaires créés dans le volume d'eau par les interactions des photons gamma.

Taux d'absorption par raie gamma

Cette figure présente un histogramme en barres du taux d'absorption (en %) dans l'eau pour chaque raie gamma de l'Eu-152. L'axe Y est en échelle logarithmique.

