

Analyse dosimétrique par anneau

Simulation Monte Carlo Geant4 – Source Eu-152 (42 kBq)
Configuration sans filtre – 25 millions d'événements

1 Paramètres de la simulation

| Paramètre | Valeur |
|-----------------------------------|------------------------|
| Nombre d'événements simulés | 2.50×10^7 |
| Gammas primaires générés | 5.07×10^7 |
| Gammas entrant dans l'eau | 4.83×10^7 |
| Gammas absorbés dans l'eau | 3.54×10^5 |
| Électrons secondaires dans l'eau | 2.39×10^5 |
| Énergie totale déposée dans l'eau | 3.28×10^2 MeV |
| Activité de la source (supposée) | 4.20×10^1 kBq |
| Configuration | Sans filtre W/PETG |

Table 1: Paramètres et statistiques de la simulation.

2 Géométrie des anneaux d'eau

Le volume d'eau est segmenté en 5 anneaux concentriques de 5 mm de largeur chacun. Les caractéristiques géométriques sont :

| Anneau | r_{int} (mm) | r_{ext} (mm) | Volume (cm ³) | Masse (g) |
|--------------|----------------|----------------|---------------------------|-----------|
| 0 | 0 | 5 | 0.3927 | 0.3927 |
| 1 | 5 | 10 | 1.1781 | 1.1781 |
| 2 | 10 | 15 | 1.9635 | 1.9635 |
| 3 | 15 | 20 | 2.7489 | 2.7489 |
| 4 | 20 | 25 | 3.5343 | 3.5343 |
| Total | 0 | 25 | 9.8175 | 9.8175 |

Table 2: Caractéristiques géométriques des anneaux d'eau (épaisseur 5 mm, $\rho = 1$ g/cm³).

Le volume de chaque anneau est calculé par :

$$V_i = \pi (r_{ext,i}^2 - r_{int,i}^2) \times h \quad (1)$$

où $h = 5$ mm est l'épaisseur de la couche d'eau.

3 Analyse des doses déposées par anneau

3.1 Résultats de la simulation

| Anneau | Rayon (mm) | Masse (g) | Énergie (MeV) | Dose (nGy/evt) | Dose relative |
|--------|------------|-----------|--------------------|-----------------------|---------------|
| 0 | 0 – 5 | 0.3927 | 1.78×10^4 | 2.90×10^{-4} | 1.000 |
| 1 | 5 – 10 | 1.1781 | 4.95×10^4 | 2.69×10^{-4} | 0.928 |
| 2 | 10 – 15 | 1.9635 | 7.34×10^4 | 2.40×10^{-4} | 0.827 |
| 3 | 15 – 20 | 2.7489 | 8.78×10^4 | 2.05×10^{-4} | 0.706 |
| 4 | 20 – 25 | 3.5343 | 1.00×10^5 | 1.81×10^{-4} | 0.626 |

Table 3: Énergie déposée et dose par anneau. L’anneau 0 (central) est surligné.

3.2 Interprétation physique

3.2.1 Gradient radial de dose

On observe une décroissance monotone de la dose avec le rayon :

- **Anneau central (0)** : $D_0 = 2.90 \times 10^{-4}$ nGy/event (dose maximale)
- **Anneau externe (4)** : $D_4 = 1.81 \times 10^{-4}$ nGy/event (dose minimale)
- **Rapport** : $D_4/D_0 = 0.626$ soit une réduction de 37.4%

Ce gradient s’explique par :

1. La **divergence géométrique** du faisceau depuis la source ponctuelle
2. L’**atténuation radiale** des photons diffusés
3. Le **parcours limité** des électrons secondaires (\sim quelques mm dans l’eau)

3.2.2 Énergie déposée vs. masse

Bien que l’énergie totale déposée augmente avec le rayon (car la surface augmente), la dose *par unité de masse* diminue :

$$D_i = \frac{E_i}{m_i} \quad \text{avec} \quad m_i \propto (r_{ext,i}^2 - r_{int,i}^2) \quad (2)$$

L’anneau 4 reçoit la plus grande énergie totale (1.00×10^5 MeV) mais a la dose la plus faible car sa masse est la plus grande (3.53 g).

4 Calcul des temps d’irradiation

4.1 Méthodologie

Pour une source d’activité A (en Bq), le débit de dose dans l’anneau i est :

$$\dot{D}_i = D_i \times A \quad (3)$$

où D_i est la dose par événement (nGy/evt) et A représente le nombre de désintégrations par seconde.

Le temps nécessaire pour atteindre une dose cible D_{cible} est :

$$t = \frac{D_{cible}}{\dot{D}_i} = \frac{D_{cible}}{D_i \times A} \quad (4)$$

4.2 Application à l'anneau central (Anneau 0)

Pour l'anneau central avec une source Eu-152 de 4.20×10^1 kBq :

$$D_0 = 2.90 \times 10^{-4} \text{ nGy/event} = 2.90 \times 10^{-13} \text{ Gy/event} \quad (5)$$

$$A = 4.20 \times 10^4 \text{ Bq} = 4.20 \times 10^4 \text{ event/s} \quad (6)$$

$$\dot{D}_0 = 2.90 \times 10^{-13} \text{ Gy/event} \times 4.20 \times 10^4 \text{ event/s} \quad (7)$$

$$\dot{D}_0 = 1.22 \times 10^{-8} \text{ Gy/s} = 1.22 \times 10^{-6} \text{ cGy/s} \quad (8)$$

En unités plus pratiques :

$$\dot{D}_0 = 1.05 \text{ mGy/jour} = 1.05 \times 10^{-1} \text{ cGy/jour} \quad (9)$$

4.3 Temps pour atteindre les doses cibles

| Dose cible | Dose (Gy) | Temps (s) | Temps (jours) | Temps (mois) |
|--------------------------------|-----------|--------------------|---------------|--------------|
| $1.00 \times 10^1 \text{ cGy}$ | 0.1 | 8.21×10^6 | 95.0 | 3.17 |
| $2.00 \times 10^1 \text{ cGy}$ | 0.2 | 1.64×10^7 | 190.1 | 6.34 |
| $5.00 \times 10^1 \text{ cGy}$ | 0.5 | 4.11×10^7 | 475.2 | 15.8 |

Table 4: Temps d'irradiation pour atteindre les doses cibles dans l'anneau central (source Eu-152, 4.20×10^1 kBq).

4.4 Formules de calcul détaillées

Pour **10 cGy** :

$$t_{10} = \frac{1.00 \times 10^{-1} \text{ Gy}}{1.22 \times 10^{-8} \text{ Gy/s}} = 8.21 \times 10^6 \text{ s} = 9.50 \times 10^1 \text{ jours} \approx \mathbf{3.2 \text{ mois}} \quad (10)$$

Pour **20 cGy** :

$$t_{20} = \frac{2.00 \times 10^{-1} \text{ Gy}}{1.22 \times 10^{-8} \text{ Gy/s}} = 1.64 \times 10^7 \text{ s} = 1.90 \times 10^2 \text{ jours} \approx \mathbf{6.3 \text{ mois}} \quad (11)$$

Pour **50 cGy** :

$$t_{50} = \frac{5.00 \times 10^{-1} \text{ Gy}}{1.22 \times 10^{-8} \text{ Gy/s}} = 4.11 \times 10^7 \text{ s} = 4.75 \times 10^2 \text{ jours} \approx \mathbf{1.3 \text{ ans}} \quad (12)$$

5 Analyse comparative entre anneaux

5.1 Débits de dose par anneau

| Anneau | Dose (nGy/evt) | Débit (nGy/s) | Débit (mGy/jour) | Temps pour 10 cGy (jours) |
|--------|-----------------------|---------------|------------------|---------------------------|
| 0 | 2.90×10^{-4} | 12.18 | 1.052 | 95.0 |
| 1 | 2.69×10^{-4} | 11.30 | 0.976 | 102.4 |
| 2 | 2.40×10^{-4} | 10.07 | 0.870 | 114.9 |
| 3 | 2.05×10^{-4} | 8.60 | 0.743 | 134.6 |
| 4 | 1.81×10^{-4} | 7.62 | 0.658 | 151.9 |

Table 5: Débits de dose et temps d'irradiation pour chaque anneau (source 4.20×10^1 kBq).

5.2 Uniformité de dose

Le rapport entre la dose maximale (anneau 0) et minimale (anneau 4) est :

$$\frac{D_{max}}{D_{min}} = \frac{D_0}{D_4} = \frac{2.899}{1.814} = 1.60 \quad (13)$$

Cette non-uniformité de 60% est significative et doit être prise en compte pour les applications dosimétriques nécessitant une irradiation homogène.

6 Taux d'absorption par raie gamma

L'analyse par raie gamma montre que l'absorption est dominée par les raies X de basse énergie :

| Raie | Énergie (keV) | Émis | Entré eau | Absorbé | Taux (%) |
|------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| 0 | 39.5 (X) | 5.20×10^6 | 4.69×10^6 | 1.28×10^5 | 2.72 |
| 1 | 40.1 (X) | 9.42×10^6 | 8.52×10^6 | 2.20×10^5 | 2.58 |
| 2 | 121.8 | 7.10×10^6 | 6.74×10^6 | 5.10×10^3 | 0.08 |
| 3 | 244.7 | 1.88×10^6 | 1.81×10^6 | 2.09×10^2 | 0.01 |
| 4 | 344.3 | 6.65×10^6 | 6.44×10^6 | 2.54×10^2 | <0.01 |

Table 6: Taux d'absorption dans l'eau par raie gamma (5 premières raies). Les raies X sont surlignées.

Observation clé : Les raies X à ~ 40 keV contribuent à plus de 98% des absorptions dans l'eau, avec un taux d'absorption d'environ 2.7%.

7 Synthèse et conclusions

7.1 Résultats principaux

1. **Dose dans l'anneau central :** $D_0 = 2.90 \times 10^{-4}$ nGy par désintégration
2. **Débit de dose** (source 4.20×10^1 kBq) : $\dot{D}_0 = 1.05$ mGy/jour
3. **Temps d'irradiation** pour l'anneau central :
 - 10 cGy : **95 jours** (~ 3.2 mois)
 - 20 cGy : **190 jours** (~ 6.3 mois)
 - 50 cGy : **475 jours** (~ 1.3 ans)
4. **Gradient radial :** Réduction de 37% de la dose entre le centre et la périphérie

7.2 Implications pratiques

- Les temps d'irradiation sont très longs en raison de la faible activité de la source (4.20×10^1 kBq)
- Pour réduire les temps d'un facteur 10, il faudrait une source de 4.20×10^2 kBq
- L'absorption est dominée par les raies X de basse énergie (~ 40 keV)
- Le gradient radial de dose nécessite une calibration spécifique pour chaque anneau

7.3 Formule générale

Pour une activité A quelconque (en kBq), le temps d'irradiation pour atteindre une dose D (en cGy) dans l'anneau central est :

$$t \text{ (jours)} = \frac{D \text{ (cGy)}}{0.1052} \times \frac{42}{A \text{ (kBq)}} = \frac{399.2 \times D}{A} \quad (14)$$

| Dose Activité | 10 cGy | 20 cGy | 50 cGy |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 4.20×10^1 kBq | 95 jours | 190 jours | 475 jours |
| 1.00×10^2 kBq | 40 jours | 80 jours | 200 jours |
| 4.20×10^2 kBq | 9.5 jours | 19 jours | 47.5 jours |
| 1.00 MBq | 4 jours | 8 jours | 20 jours |

Table 7: Temps d'irradiation en fonction de l'activité de la source pour différentes doses cibles.