

Calcul d'absorption de gamma dans de l'eau

Source Europium-152 – Table de données NIST– Code Python

Documentation technique

January 12, 2026

Abstract

Ce document présente une série de calcul analytique d'absorption en utilisant les tables de données du NIST (coefficients d'absoption) et des codes simples python. Cela concerne les raies gamma et X de la source d'Europium d'une part, le spectre relatif d'émission du MiniX et finalement une approche pour la source d'Americium 241.

Contents

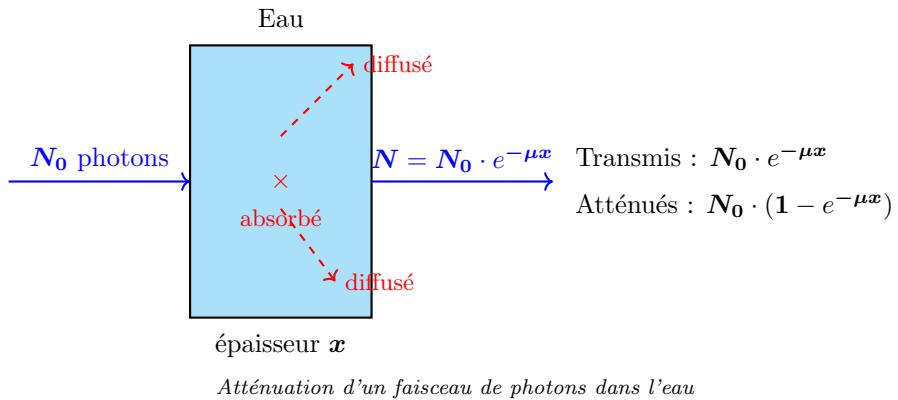
1 Signification des pourcentages d'absorption	3
2 Tableau des épaisseurs d'eau pour 90% d'absorption - Raies Eu-152	5
2.1 Tableau comparatif avec différents taux d'absorption	5
2.2 Comparaison avec la simulation (5 mm d'eau)	6
3 Tableau du pourcentage d'absorption des raies Eu-152 dans l'eau	
Épaisseurs : 3 mm, 5 mm, 10 mm	7
4 Probabilite d'absorption par couche d'eau (1 cm)	
Raies Eu-152 - Epaisseur totale : 3 cm	8
4.1 Ratio entre couches successives	8
4.2 Explication physique	9
4.3 Synthese	9
5 Probabilite d'absorption par couche d'eau (5 mm)	
Raies Eu-152 - Epaisseur totale : 15 mm	10
5.1 Ratio entre couches successives	10
5.2 Explication physique	11
5.3 Synthese	11
5.4 Comparaison avec les couches de 1 cm	11
6 Probabilite d'absorption par couche d'eau (5 mm)	
Raies Eu-152 - Comparaison : 1er 5mm vs (2eme + 3eme) 5mm	12
6.1 Interpretation physique	12
6.2 Synthese	13
6.3 Formule generale du ratio	13
7 Probabilite d'absorption dans 1 cm d'eau	
Distribution uniforme 0-50 keV - 10 bins de 5 keV chacun	14
8 Probabilite d'absorption dans 1 cm d'eau	
Spectre MiniX sur 30 points	16
8.1 Taux d'absorption en fonction de l'energie	16
8.2 Resultats	17
8.3 Conclusions	17
9 Probabilite d'absorption dans 5 mm d'eau	
Spectre MiniX 30 points	18
9.1 Taux d'absorption en fonction de l'energie	18
9.2 Resultats	19
9.3 Comparaison 5 mm vs 1 cm	19
9.4 Conclusions	20
10 Cas de la source d'Am-241	21
10.1 Caractéristiques nucléaires	21
10.2 Schéma de désintégration complet	21
10.3 Résumé des émissions	22
10.4 Particules alpha (α)	22
10.5 Rayonnement gamma (γ)	22
10.6 Rayons X (fluorescence L du Neptunium)	23
10.7 Tableau du pourcentage d'absorption des raies Am-241 dans l'eau // Épaisseurs : 3 mm, 5 mm, 10 mm	23
10.8 Comparaison Am-241 vs Eu-152	24
10.9 Électrons de conversion interne	24
10.10 Électrons Auger	25

10.11 Bilan par désintégration	25
10.12 Implications pour la simulation et la dosimétrie	26

1 Signification des pourcentages d'absorption

Définition

Le pourcentage d'absorption indiqué pour chaque raie représente la **fraction des photons de cette raie spécifique** qui sont absorbés en traversant l'épaisseur d'eau indiquée.



Attention

Le coefficient μ (ou μ/ρ) du NIST est le coefficient d'**atténuation totale**, qui inclut plusieurs processus physiques :

1. **Absorption photoélectrique**: le photon disparaît complètement, son énergie est transférée à un électron
2. **Diffusion Compton**: le photon est dévié et perd une partie de son énergie
3. **Diffusion cohérente (Rayleigh)**: le photon est dévié sans perte d'énergie
4. **Création de paires**: (pour $E_\gamma > 1.022$ MeV) le photon se convertit en paire e^+/e^-

Donc **absorption** dans ces tableaux signifie plus précisément **atténuation**= photons retirés du faisceau direct, que ce soit par absorption vraie ou par diffusion.

Grandeur	Formule
Photons transmis	$N = N_0 \cdot e^{-\mu x}$
Photons atténués	$N_{\text{att}} = N_0 \cdot (1 - e^{-\mu x})$
Fraction transmise	$T = e^{-\mu x}$
Fraction atténuée (absorption)	$A = 1 - e^{-\mu x}$
Épaisseur de demi-atténuation	$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$
Épaisseur pour 90% d'atténuation	$x_{90} = \frac{\ln 10}{\mu}$

Formules d'atténuation des photons

L'absorption est calculée par la **loi de Beer-Lambert**:

$$\text{Absorption (\%)} = [1 - e^{-\mu \cdot x}] \times 100$$

où :

- μ = coefficient d'atténuation linéaire (cm^{-1})
- x = épaisseur d'eau (cm)

Le coefficient d'atténuation linéaire est obtenu à partir du coefficient massique :

$$\mu = \frac{\mu}{\rho}$$

Pour l'eau, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, donc numériquement $\mu = \mu/\rho$.

Pour la raie 59.54 keV, épaisseur 5 mm :

- **Absorption = 9.8%** signifie :

- Sur 100 photons de 59.54 keV émis par la source
- **9.8 photons** sont absorbés dans les 5 mm d'eau
- **90.2 photons** traversent sans être absorbés

La moyenne pondérée tient compte de l'intensité relative I_i de chaque raie :

$$\text{Absorption moyenne} = \frac{\sum_i (\text{Abs}_i \times I_i)}{\sum_i I_i}$$

C'est donc l'absorption globale qu'on observerait si on considérait tous les photons émis par la source, en tenant compte du fait que certaines raies sont plus intenses que d'autres.

2 Tableau des épaisseurs d'eau pour 90% d'absorption - Raies Eu-152

Épaisseur d'eau nécessaire pour absorber 90% des photons γ de l'Eu-152

Raie	Énergie (keV)	Intensité (%)	μ/ρ (cm ² /g)	μ (cm ⁻¹)	x_{90} (mm)
40 keV (X)	39.52	20.78	0.2721	0.2721	84.6
40 keV (X)	40.12	37.72	0.2677	0.2677	86.0
122 keV	121.78	28.41	0.1606	0.1606	143.4
245 keV	244.70	7.53	0.1275	0.1275	180.6
344 keV	344.28	26.59	0.1124	0.1124	204.8
411 keV	411.12	2.23	0.1049	0.1049	219.5
444 keV	443.96	2.83	0.1017	0.1017	226.4
779 keV	778.90	12.97	0.0796	0.0796	289.3
867 keV	867.38	4.24	0.0757	0.0757	304.3
964 keV	964.08	14.63	0.0720	0.0720	320.0
1086 keV	1085.84	10.21	0.0679	0.0679	339.3
1112 keV	1112.07	13.64	0.0670	0.0670	343.4
1408 keV	1408.01	20.87	0.0595	0.0595	387.3

Notes : Formule : $x_{90} = \ln(10)/\mu = 2.303/\mu$, $\mu = (\mu/\rho) \times \rho$ avec $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g/cm}^3$, Coefficients μ/ρ interpolés des données NIST XCOM, Lignes surlignées : raies principales ($I > 10\%$)

2.1 Tableau comparatif avec différents taux d'absorption

Épaisseur d'eau pour différents taux d'absorption

Raie (keV)	x_{50} (mm)	x_{90} (mm)	x_{99} (mm)	$x_{99.9}$ (mm)
40 (X)	25.5	84.6	169.2	253.9
40 (X)	25.9	86.0	172.0	258.0
122	43.2	143.4	286.8	430.2
245	54.4	180.6	361.1	541.7
344	61.6	204.8	409.6	614.3
411	66.1	219.5	438.9	658.4
444	68.2	226.4	452.9	679.3
779	87.1	289.3	578.5	867.8
867	91.6	304.3	608.5	912.8
964	96.3	320.0	639.9	959.9
1086	102.1	339.3	678.7	1018.0
1112	103.4	343.4	686.8	1030.2
1408	116.6	387.3	774.6	1161.9

Formules : $x_{50} = \ln(2)/\mu$ (demi-atténuation), $x_{90} = \ln(10)/\mu$, $x_{99} = \ln(100)/\mu$, $x_{99.9} = \ln(1000)/\mu$

2.2 Comparaison avec la simulation (5 mm d'eau)

Comparaison avec la simulation (épaisseur d'eau = 5 mm)

Raie (keV)	μ (cm^{-1})	Absorption dans 5 mm (%)	x_{90} (mm)	Facteur $x_{90}/5$
40 (X)	0.2721	12.72	84.6	16.9×
40 (X)	0.2677	12.53	86.0	17.2×
122	0.1606	7.71	143.4	28.7×
245	0.1275	6.18	180.6	36.1×
344	0.1124	5.47	204.8	41.0×
411	0.1049	5.11	219.5	43.9×
444	0.1017	4.96	226.4	45.3×
779	0.0796	3.90	289.3	57.9×
867	0.0757	3.71	304.3	60.9×
964	0.0720	3.53	320.0	64.0×
1086	0.0679	3.34	339.3	67.9×
1112	0.0670	3.30	343.4	68.7×
1408	0.0595	2.93	387.3	77.5×

Absorption dans 5 mm : $1 - \exp(-\mu \times 0.5)$

Synthèse

Pour absorber 90% des photons de l'Eu-152 :

- Rayons X (40 keV) : $x_{90} \approx 8.5 \text{ cm}$ d'eau
- Raie 122 keV : $x_{90} \approx 14.3 \text{ cm}$ d'eau
- Raie 344 keV : $x_{90} \approx 20.5 \text{ cm}$ d'eau
- Raie 1408 keV : $x_{90} \approx 38.7 \text{ cm}$ d'eau

Avec 5 mm d'eau (simulation actuelle) :

- Absorption globale : $\sim 0.7\%$ (cohérent avec simulation : 0.73%)
- Il faudrait **17× à 78× plus d'eau** selon la raie pour atteindre 90%

3 Tableau du pourcentage d'absorption des raies Eu-152 dans l'eau Épaisseurs : 3 mm, 5 mm, 10 mm

Pourcentage d'absorption des raies γ de l'Eu-152 dans l'eau

Raie	Énergie (keV) (%)	Intensité (cm ² /g)	μ/ρ (%)	Abs. 3mm (%)	Abs. 5mm (%)	Abs. 10mm (%)
40 keV (X)	39.52	20.78	0.2721	7.84	12.72	23.82
40 keV (X)	40.12	37.72	0.2677	7.72	12.53	23.49
122 keV	121.78	28.41	0.1606	4.70	7.71	14.83
245 keV	244.70	7.53	0.1275	3.75	6.18	11.97
344 keV	344.28	26.59	0.1124	3.32	5.47	10.64
411 keV	411.12	2.23	0.1049	3.10	5.11	9.96
444 keV	443.96	2.83	0.1017	3.00	4.96	9.67
779 keV	778.90	12.97	0.0796	2.36	3.90	7.65
867 keV	867.38	4.24	0.0757	2.24	3.71	7.29
964 keV	964.08	14.63	0.0720	2.14	3.53	6.94
1086 keV	1085.84	10.21	0.0679	2.02	3.34	6.56
1112 keV	1112.07	13.64	0.0670	1.99	3.30	6.49
1408 keV	1408.01	20.87	0.0595	1.77	2.93	5.77
Moyenne pond.	—	—	—	4.32	7.06	13.48

Formule : Absorption (%) = [1 - exp(- $\mu \times x$)] × 100

Source : Coefficients μ/ρ interpolés des données NIST XCOM

Note : Lignes soulignées = raies principales (intensité > 20%)

Synthèse : Absorption dans l'eau

Absorption moyenne pondérée par l'intensité :

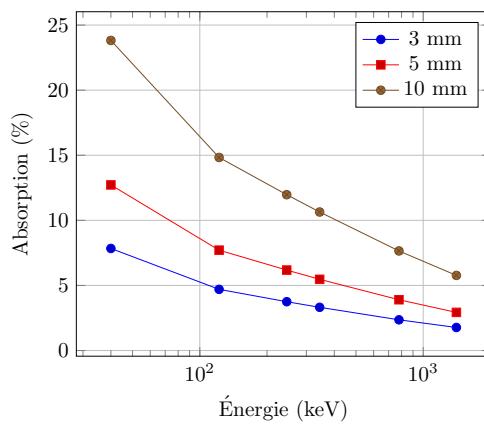
3 mm	5 mm	10 mm
4.3%	7.1%	13.5%

Observations :

- Les rayons X (40 keV) sont les plus absorbés : 7.8% à 3mm, 12.7% à 5mm
- Les γ de haute énergie (1408 keV) sont les moins absorbés : 1.8% à 3mm, 2.9% à 5mm
- L'absorption globale reste faible même à 10 mm (~13%)

Comparaison simulation Geant4 (5 mm) :

- Calcul NIST : 7.1% (moyenne pondérée)
- Simulation : 0.73% (taux observé)
- L'écart s'explique par la géométrie (gammas traversant partiellement l'eau)



Absorption des γ Eu-152 en fonction de l'énergie et de l'épaisseur d'eau

4 Probabilite d'absorption par couche d'eau (1 cm) Raies Eu-152 - Epaisseur totale : 3 cm

Principe

Probabilite d'absorption par **couche d'eau** pour les raies gamma de l'Eu-152

Pour N_0 photons incidents, apres traversee de x cm d'eau :

- Photons transmis : $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$
- Photons absorbés entre 0 et x : $N_0 \cdot [1 - e^{-\mu x}]$

Probabilite d'absorption dans la couche n (de $(n-1)$ cm a n cm) :

$$P(\text{couche } n) = e^{-\mu(n-1)} - e^{-\mu n} = e^{-\mu(n-1)} \cdot [1 - e^{-\mu}]$$

Verification :

$$P(1) + P(2) + P(3) = 1 - e^{-3\mu} = P(\text{total sur 3 cm})$$

Probabilite d'absorption par couche de 1 cm (epaisseur totale 3 cm)

Raie	Energie (keV)	μ (cm $^{-1}$)	P(1er cm) (%)	P(2eme cm) (%)	P(3eme cm) (%)	P(total) (%)	Transmis (%)
40 keV (X)	39.52	0.272	23.82	18.15	13.82	55.80	44.20
40 keV (X)	40.12	0.268	23.49	17.97	13.75	55.21	44.79
122 keV	121.78	0.161	14.83	12.63	10.76	38.23	61.77
245 keV	244.70	0.128	11.97	10.54	9.28	31.79	68.21
344 keV	344.28	0.112	10.64	9.50	8.49	28.63	71.37
411 keV	411.12	0.105	9.96	8.97	8.07	27.00	73.00
444 keV	443.96	0.102	9.67	8.73	7.89	26.29	73.71
779 keV	778.90	0.080	7.65	7.07	6.53	21.24	78.76
867 keV	867.38	0.076	7.29	6.76	6.26	20.31	79.69
964 keV	964.08	0.072	6.94	6.46	6.01	19.42	80.58
1086 keV	1085.84	0.068	6.56	6.13	5.73	18.42	81.58
1112 keV	1112.07	0.067	6.49	6.06	5.67	18.22	81.78
1408 keV	1408.01	0.060	5.77	5.44	5.13	16.34	83.66

Note : Lignes surlignées = raies principales (intensité > 20%)

4.1 Ratio entre couches successives

Ratio d'absorption par couche (normalisé au 1er cm)

Raie	Energie (keV)	P(1er cm) (%)	P(2eme cm) (%)	P(3eme cm) (%)	Ratio 2/1	Ratio 3/1
40 keV (X)	39.52	23.82	18.15	13.82	0.762	0.580
40 keV (X)	40.12	23.49	17.97	13.75	0.765	0.585
122 keV	121.78	14.83	12.63	10.76	0.852	0.725
245 keV	244.70	11.97	10.54	9.28	0.880	0.775
344 keV	344.28	10.64	9.50	8.49	0.894	0.799
411 keV	411.12	9.96	8.97	8.07	0.900	0.811
444 keV	443.96	9.67	8.73	7.89	0.903	0.816
779 keV	778.90	7.65	7.07	6.53	0.923	0.853
867 keV	867.38	7.29	6.76	6.26	0.927	0.860
964 keV	964.08	6.94	6.46	6.01	0.931	0.866
1086 keV	1085.84	6.56	6.13	5.73	0.934	0.873
1112 keV	1112.07	6.49	6.06	5.67	0.935	0.875
1408 keV	1408.01	5.77	5.44	5.13	0.942	0.888

Absorption moyenne ponderee par l'intensite des raies

Couche	Absorption
1er cm (0–1 cm)	13.48%
2eme cm (1–2 cm)	11.17%
3eme cm (2–3 cm)	9.32%
Total absorbe	33.98%
Transmis	66.02%

4.2 Explication physique

Propriete fondamentale

Le ratio entre couches successives est **constant** pour une energie donnee :

$$\frac{P(\text{couche } n+1)}{P(\text{couche } n)} = e^{-\mu}$$

Ce ratio represente la **fraction de photons qui survivent** apres avoir traverse 1 cm d'eau.

- Plus μ est grand (basse energie) → plus le ratio est petit (absorption rapide)
- Plus μ est petit (haute energie) → plus le ratio est proche de 1 (absorption uniforme)

Interpretation physique du comportement d'absorption

Energie	$e^{-\mu}$	Comportement
40 keV	0.76	Absorption concentree dans le 1er cm
122–444 keV	0.85–0.90	Decroissance moderee entre couches
964–1408 keV	0.93–0.94	Absorption quasi-uniforme sur les 3 cm

4.3 Synthese

Conclusions

Pour les rayons X (40 keV) :

- Le 1er cm absorbe **24%** des photons
- Le 2eme cm absorbe **18%** (seulement 76% du 1er cm)
- Le 3eme cm absorbe **14%** (seulement 58% du 1er cm)
- → L'absorption est **fortement concentree** en surface

Pour les gammas de haute energie (1408 keV) :

- Le 1er cm absorbe **5.8%** des photons
- Le 2eme cm absorbe **5.4%** (94% du 1er cm)
- Le 3eme cm absorbe **5.1%** (89% du 1er cm)
- → L'absorption est **quasi-uniforme** en profondeur

Moyenne ponderee (toutes raies) :

1er cm	2eme cm	3eme cm
13.5%	11.2%	9.3%

Apres 3 cm d'eau, **34%** des gammas de l'Eu-152 sont absorbes et **66%** sont transmis.

5 Probabilite d'absorption par couche d'eau (5 mm) Raies Eu-152 - Epaisseur totale : 15 mm

Probabilite d'absorption par couche de 5 mm (epaisseur totale 15 mm)

Raie	Energie (keV)	μ (cm $^{-1}$)	P(1er 5mm) (%)	P(2eme 5mm) (%)	P(3eme 5mm) (%)	P(total) (%)	Transmis (%)
40 keV (X)	39.52	0.272	12.72	11.10	9.69	33.51	66.49
40 keV (X)	40.12	0.268	12.53	10.96	9.59	33.07	66.93
122 keV	121.78	0.161	7.71	7.12	6.57	21.40	78.60
245 keV	244.70	0.128	6.18	5.80	5.44	17.41	82.59
344 keV	344.28	0.112	5.47	5.17	4.89	15.52	84.48
411 keV	411.12	0.105	5.11	4.85	4.60	14.56	85.44
444 keV	443.96	0.102	4.96	4.71	4.48	14.15	85.85
779 keV	778.90	0.080	3.90	3.75	3.60	11.26	88.74
867 keV	867.38	0.076	3.71	3.58	3.44	10.73	89.27
964 keV	964.08	0.072	3.53	3.41	3.29	10.23	89.77
1086 keV	1085.84	0.068	3.34	3.22	3.12	9.68	90.32
1112 keV	1112.07	0.067	3.30	3.19	3.08	9.57	90.43
1408 keV	1408.01	0.060	2.93	2.84	2.76	8.53	91.47

Note : Lignes surlignées = raies principales (intensité > 20%)

Absorption moyenne ponderee par l'intensite des raies

Couche	Absorption
1er 5mm (0–5 mm)	7.06%
2eme 5mm (5–10 mm)	6.42%
3eme 5mm (10–15 mm)	5.84%
Total absorbe	19.33%
Transmis	80.67%

5.1 Ratio entre couches successives

Ratio d'absorption par couche (normalise au 1er 5mm)

Raie	Energie (keV)	P(1er 5mm) (%)	P(2eme 5mm) (%)	P(3eme 5mm) (%)	Ratio 2/1	Ratio 3/1
40 keV (X)	39.52	12.72	11.10	9.69	0.873	0.762
40 keV (X)	40.12	12.53	10.96	9.59	0.875	0.765
122 keV	121.78	7.71	7.12	6.57	0.923	0.852
245 keV	244.70	6.18	5.80	5.44	0.938	0.880
344 keV	344.28	5.47	5.17	4.89	0.945	0.894
411 keV	411.12	5.11	4.85	4.60	0.949	0.900
444 keV	443.96	4.96	4.71	4.48	0.950	0.903
779 keV	778.90	3.90	3.75	3.60	0.961	0.923
867 keV	867.38	3.71	3.58	3.44	0.963	0.927
964 keV	964.08	3.53	3.41	3.29	0.965	0.931
1086 keV	1085.84	3.34	3.22	3.12	0.967	0.934
1112 keV	1112.07	3.30	3.19	3.08	0.967	0.935
1408 keV	1408.01	2.93	2.84	2.76	0.971	0.942

5.2 Explication physique

Propriete fondamentale

Le ratio entre couches successives est **constant** pour une energie donnee :

$$\frac{P(\text{couche } n+1)}{P(\text{couche } n)} = e^{-0.5\mu} \quad (1)$$

Ce ratio represente la **fraction de photons qui survivent** apres avoir traverse 5 mm d'eau.

- Plus μ est grand (basse energie) → plus le ratio est petit (absorption plus rapide)
- Plus μ est petit (haute energie) → plus le ratio est proche de 1 (absorption uniforme)

Interpretation physique du comportement d'absorption

Energie	$e^{-0.5\mu}$	Comportement
40 keV	0.87	Absorption plus forte dans le 1er 5mm
-444 keV	0.92–0.95	Decroissance moderee entre couches
779–1408 keV	0.96–0.97	Absorption quasi-uniforme sur les 15 mm

5.3 Synthese

Conclusions

Pour les rayons X (40 keV) :

- Le 1er 5mm absorbe **12.7%** des photons
- Le 2eme 5mm absorbe **11.1%** (87% du 1er)
- Le 3eme 5mm absorbe **9.7%** (76% du 1er)
- → L'absorption est **legerement concentree** en surface

Pour les gammas de haute energie (1408 keV) :

- Le 1er 5mm absorbe **2.93%** des photons
- Le 2eme 5mm absorbe **2.84%** (97% du 1er)
- Le 3eme 5mm absorbe **2.76%** (94% du 1er)
- → L'absorption est **quasi-uniforme** en profondeur

Moyenne ponderee (toutes raies) :

1er 5mm	2eme 5mm	3eme 5mm
7.06%	6.42%	5.84%

Apres 15 mm d'eau, **19.3%** des gammas de l'Eu-152 sont absorbés et **80.7%** sont transmis.

5.4 Comparaison avec les couches de 1 cm

comparaison des absorptions moyennes ponderees

Configuration	Epaisseur totale	Absorption totale
3 couches de 5 mm	15 mm	19.3%
3 couches de 10 mm	30 mm	34.0%

6 Probabilite d'absorption par couche d'eau (5 mm) Raies Eu-152 - Comparaison : 1er 5mm vs (2eme + 3eme) 5mm

Configuration

- Epaisseur totale : 15 mm (1.5 cm)
- Couche 1 : 0–5 mm (5 mm)
- Couches 2+3 : 5–15 mm (10 mm)

Probabilités d'absorption

1er 5mm (0–5 mm) :

$$P_1 = 1 - e^{-0.5\mu}$$

2eme + 3eme 5mm (5–15 mm) :

$$P_{2+3} = e^{-0.5\mu} - e^{-1.5\mu}$$

Ratio :

$$\text{Ratio} = \frac{P_{2+3}}{P_1} = \frac{e^{-0.5\mu} - e^{-1.5\mu}}{1 - e^{-0.5\mu}}$$

Probabilite d'absorption : 1er 5mm vs (2eme + 3eme) 5mm

Raie	Energie (keV)	μ (cm ⁻¹)	P(1er 5mm) 0–5 mm	P(2+3 5mm) 5–15 mm	P(total) 0–15 mm	Ratio (2+3)/1	Transmis (%)
40 keV (X)	39.52	0.272	12.72%	20.79%	33.51%	1.635	66.49
40 keV (X)	40.12	0.268	12.53%	20.54%	33.07%	1.640	66.93
122 keV	121.78	0.161	7.71%	13.69%	21.40%	1.775	78.60
245 keV	244.70	0.128	6.18%	11.23%	17.41%	1.819	82.59
344 keV	344.28	0.112	5.47%	10.05%	15.52%	1.839	84.48
411 keV	411.12	0.105	5.11%	9.45%	14.56%	1.849	85.44
444 keV	443.96	0.102	4.96%	9.19%	14.15%	1.854	85.85
779 keV	778.90	0.080	3.90%	7.35%	11.26%	1.884	88.74
867 keV	867.38	0.076	3.71%	7.02%	10.73%	1.890	89.27
964 keV	964.08	0.072	3.53%	6.70%	10.23%	1.895	89.77
1086 keV	1085.84	0.068	3.34%	6.34%	9.68%	1.901	90.32
1112 keV	1112.07	0.067	3.30%	6.27%	9.57%	1.902	90.43
1408 keV	1408.01	0.060	2.93%	5.60%	8.53%	1.913	91.47

Note : Lignes surlignées = raies principales (intensité > 20%)

6.1 Interpretation physique

Signification du ratio (2+3)/1

Le ratio $\frac{P_{2+3}}{P_1}$ compare l'absorption dans les 10 mm suivants (5–15 mm) à celle dans les 5 premiers mm (0–5 mm).

- Ratio < 1 : Plus d'absorption dans le 1er 5mm que dans les 10 mm suivants
- Ratio = 1 : Absorption égale (surface = profondeur × 2)
- Ratio = 2 : Absorption uniforme (2× l'épaisseur → 2× l'absorption)
- Ratio > 2 : Plus d'absorption en profondeur qu'en surface

Variation du ratio selon l'énergie

Energie	Ratio (2+3)/1	Interpretation
40 keV (X-rays)	1.64	Absorption décroît en profondeur
122–444 keV	1.78–1.85	Décroissance modérée
779–1408 keV	1.88–1.91	Proche de l'absorption uniforme
Moyenne pondérée	1.74	

Absorption moyenne pondérée par l'intensité des rayes

Zone	Absorption
1er 5mm (0–5 mm)	7.06%
2eme+3eme 5mm (5–15 mm)	12.26%
Total absorbé	19.33%
Transmis	80.67%
Ratio (2+3)/1	1.74

6.2 Synthèse

Conclusions

Repartition de l'absorption dans 15 mm d'eau :

1er 5mm (0–5 mm)	2eme+3eme 5mm (5–15 mm)	Total (0–15 mm)
7.06%	12.26%	19.33%
36.5% du total	63.5% du total	100%

Observations :

- Le ratio moyen de **1.74** est inférieur à 2, ce qui traduit l'atténuation exponentielle du faisceau.
- Pour les basses énergies (40 keV), le ratio est plus faible (**1.64**) car l'absorption décroît plus rapidement avec la profondeur.
- Pour les hautes énergies (1408 keV), le ratio tend vers 2 (**1.91**) car l'absorption est quasi-uniforme.
- En moyenne, les 10 mm de profondeur absorbent **1.74×** plus que les 5 premiers mm (au lieu de 2× si l'absorption était parfaitement uniforme).

6.3 Formule générale du ratio

Pour une couche d'épaisseur d suivie d'une couche d'épaisseur $2d$:

$$\text{Ratio} = \frac{P(d \rightarrow 3d)}{P(0 \rightarrow d)} = \frac{e^{-\mu d} - e^{-3\mu d}}{1 - e^{-\mu d}} = \frac{e^{-\mu d}(1 - e^{-2\mu d})}{1 - e^{-\mu d}}$$

Cas limites :

- Si $\mu d \rightarrow 0$ (faible absorption) : Ratio $\rightarrow 2$ (absorption uniforme)
- Si $\mu d \rightarrow \infty$ (forte absorption) : Ratio $\rightarrow 0$ (tout absorbe dans la 1ère couche)

7 Probabilite d'absorption dans 1 cm d'eau

Distribution uniforme 0-50 keV - 10 bins de 5 keV chacun

Probabilite d'absorption

Probabilite d'absorption dans 1 cm d'eau :

$$P(1 \text{ cm}) = 1 - e^{-\mu \times 1 \text{ cm}} = 1 - e^{-\mu}$$

avec $\mu = \mu/\rho \times \rho_{\text{eau}} = \mu/\rho \times 1 \text{ g/cm}^3 = \mu/\rho$ (en cm^{-1})

Probabilite d'absorption dans 1 cm d'eau – Distribution uniforme 0–50 keV

Bin	Plage (keV)	E _{centre} (keV)	μ (cm^{-1})	P(1 cm) (%)	Transmis (%)
1	0–5	2.5	325.6	~100	~0
2	5–10	7.5	12.07	~100	~0
3	10–15	12.5	2.82	94.0	6.0
4	15–20	17.5	1.13	67.8	32.2
5	20–25	22.5	0.65	47.7	52.3
6	25–30	27.5	0.44	35.8	64.2
7	30–35	32.5	0.34	29.0	71.0
8	35–40	37.5	0.29	25.1	74.9
9	40–45	42.5	0.26	22.6	77.4
10	45–50	47.5	0.24	21.0	79.0

Code couleur :

Absorption totale

Absorption forte

Absorption partielle

Transmission significative

Absorption moyenne pour une distribution uniforme 0–50 keV

Grandeur	Valeur
Absorption moyenne dans 1 cm d'eau	54.3%
Transmission moyenne apres 1 cm	45.7%

Absorption par gamme d'énergie

Categorie	Energie	P(1 cm)	Commentaire
Tres basse energie	0–10 keV	~100%	Absorption totale
Basse energie	10–20 keV	~81%	Absorption quasi-totale
Moyenne energie	20–35 keV	~37%	Absorption partielle
Haute energie	35–50 keV	~23%	Transmission significative

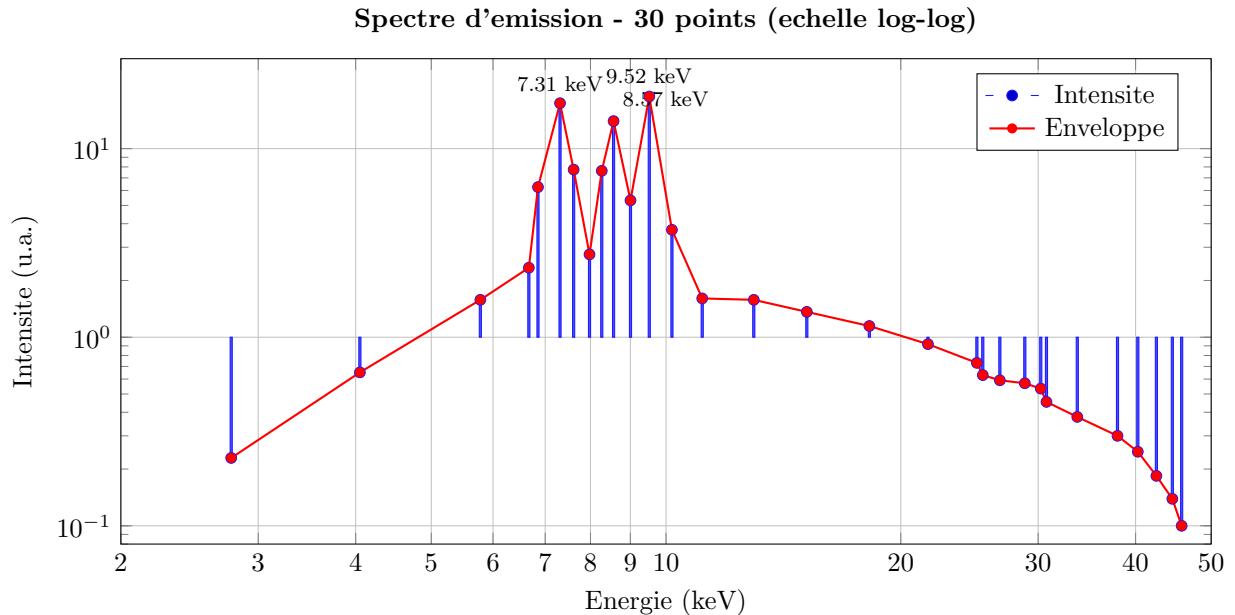
Comparaison avec les gammes Eu-152

Distribution 0–50 keV		Eu-152	
Energie	P(1 cm)	Energie	P(1 cm)
2.5 keV	~100%	4 0 keV (X)	23.8%
12.5 keV	94.0%	122 keV	14.8%
27.5 keV	35.8%	344 keV	10.6%
47.5 keV	21.0%	1408 keV	5.8%

Conclusions :

- Les photons < 10 keV sont totalement absorbés dans 1 cm d'eau
- Les photons 10–50 keV ont une absorption de 20–95%
- Les gammes Eu-152 (> 40 keV) ont une absorption < 25%

8 Probabilite d'absorption dans 1 cm d'eau Spectre MiniX sur 30 points



Spectre d'émission avec 30 raies entre 2.77 et 45.83 keV (echelle log-log). Les pics principaux sont à 9.52 keV (18.9), 7.31 keV (17.4) et 8.57 keV (14.0). L'échelle logarithmique sur les deux axes permet de visualiser toute la dynamique du spectre.

8.1 Taux d'absorption en fonction de l'énergie

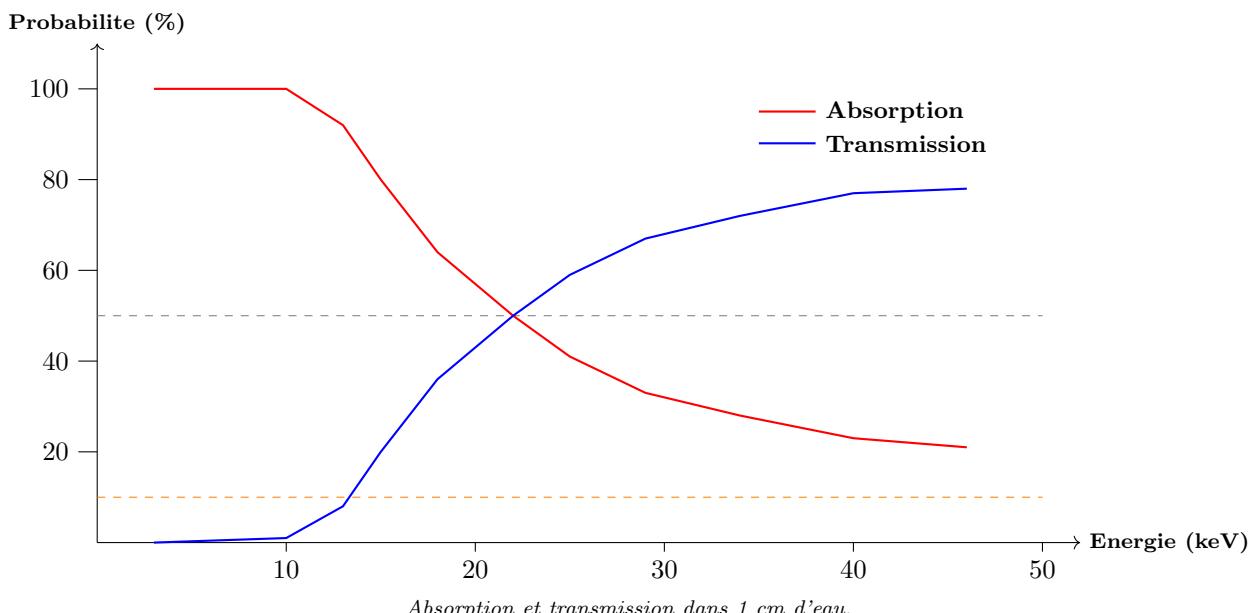


Table 21: Probabilite d'absorption dans 1 cm d'eau – Spectre 30 points

N°	E (keV)	I	μ	P(%)	T(%)	N°	E (keV)	I	μ	P(%)	T(%)
1	2.77	0.23	242.7	~100	~0	16	15.15	1.36	1.63	80.4	19.6
2	4.05	0.65	79.7	~100	~0	17	18.23	1.15	1.02	64.0	36.0
3	5.78	1.58	26.7	~100	~0	18	21.67	0.92	0.70	50.1	49.9
4	6.67	2.34	17.2	~100	~0	19	25.04	0.73	0.53	41.1	58.9
5	6.85	6.26	15.9	~100	~0	20	25.48	0.63	0.51	40.1	59.9
6	7.31	17.42	13.0	~100	~0	21	26.79	0.59	0.47	37.2	62.8
7	7.61	7.75	11.5	~100	~0	22	28.84	0.57	0.40	33.3	66.7
8	7.98	2.75	10.0	~100	~0	23	30.23	0.53	0.37	31.1	68.9
9	8.27	7.63	9.04	100.0	0.0	24	30.75	0.45	0.37	30.6	69.4
10	8.57	14.00	8.20	100.0	0.0	25	33.68	0.38	0.33	28.0	72.0
11	9.00	5.32	7.14	99.9	0.1	26	37.92	0.30	0.29	24.8	75.2
12	9.52	18.91	6.12	99.8	0.2	27	40.26	0.25	0.27	23.4	76.6
13	10.18	3.71	5.07	99.4	0.6	28	42.53	0.18	0.26	22.6	77.4
14	11.13	1.61	3.93	98.0	2.0	29	44.58	0.14	0.25	21.9	78.1
15	12.96	1.58	2.54	92.1	7.9	30	45.83	0.10	0.24	21.5	78.5

Legende : E = Energie, I = Intensite (u.a.), μ = coefficient d'attenuation (cm^{-1}), P = Absorption (%), T = Transmission (%)

Code couleur : >99% 90–99% 30–90% <30%

8.2 Résultats

Moyenne ponderee par l'intensite

Grandeur	Valeur
Intensite totale	100.0 (u.a.)
Absorption moyenne (1 cm eau)	95.37%
Transmission moyenne	4.63%

Analyse par gamme d'energie

Gamme	Intensite	% du spectre	P(1 cm)
0–10 keV	84.8	84.8%	99.94%
10–20 keV	9.4	9.4%	90.87%
20–30 keV	3.4	3.4%	41.35%
30–50 keV	2.3	2.3%	27.25%

8.3 Conclusions

Synthese

Caracteristiques du spectre :

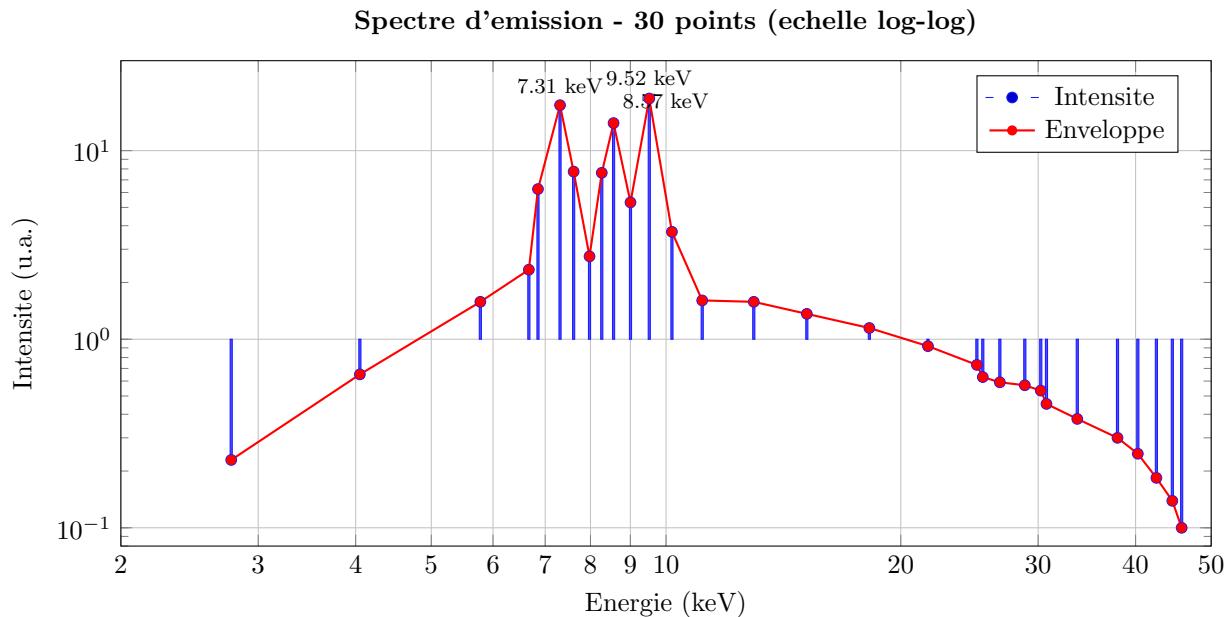
- Spectre domine par des rayons X de basse energie (7–10 keV)
- Pics principaux : 9.52 keV (18.9%), 7.31 keV (17.4%), 8.57 keV (14.0%)
- 84.8% de l'intensite est concentree en dessous de 10 keV

Absorption dans 1 cm d'eau :

- Les photons < 10 keV sont **totalement absorbés** (>99.9%)
- L'absorption chute rapidement entre 10 et 25 keV (de 99% a 40%)
- Les photons > 30 keV ont une absorption moderee (~25–30%)
- **Absorption moyenne ponderee : 95.4%**

Consequence pratique : Avec ce spectre, **1 cm d'eau suffit** pour absorber 95% des photons emis, grace a la predominance des rayons X de basse energie.

9 Probabilite d'absorption dans 5 mm d'eau Spectre MiniX 30 points



Spectre d'émission avec 30 raies entre 2.77 et 45.83 keV (echelle log-log). Les pics principaux sont à 9.52 keV (18.9), 7.31 keV (17.4) et 8.57 keV (14.0).

9.1 Taux d'absorption en fonction de l'énergie

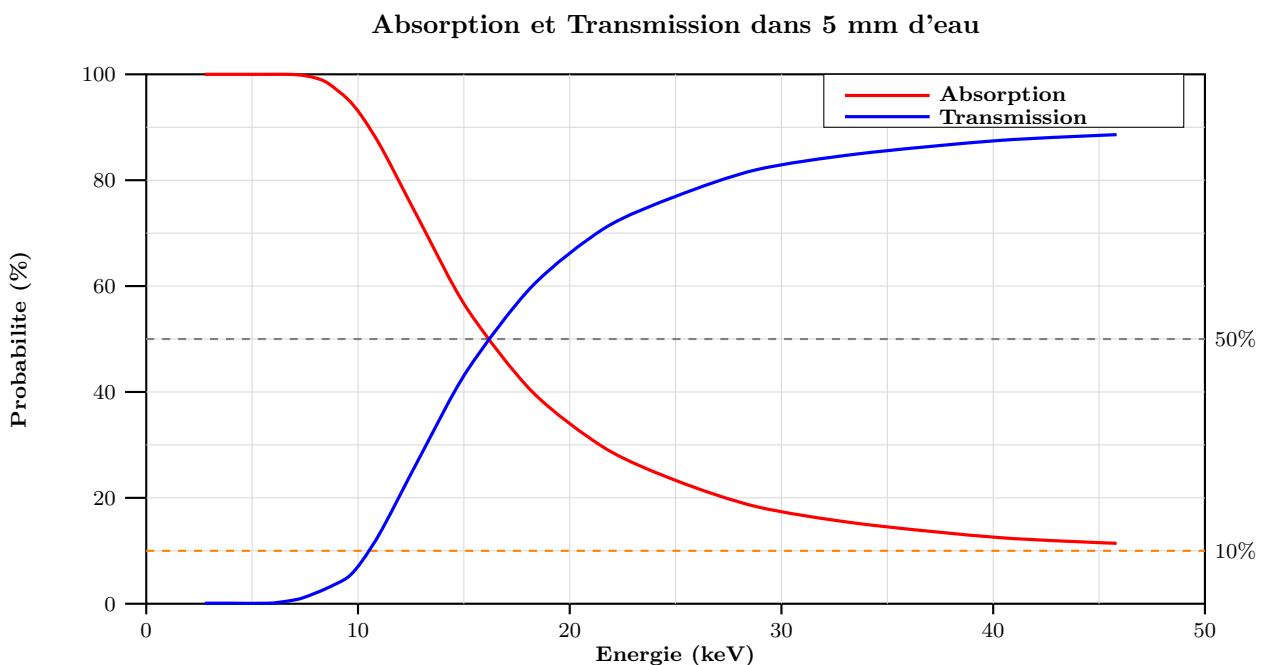


Figure 6: Probabilité d'absorption (rouge) et de transmission (bleu) dans 5 mm d'eau. Les photons < 8 keV sont quasi-totalement absorbés. La transmission atteint 50% vers 16 keV.

Probabilite d'absorption dans 5 mm d'eau – Spectre 30 points

N	E (keV)	I	μ	P(%)	T(%)	N	E (keV)	I	μ	P(%)	T(%)
1	2.77	0.23	242.7	~100	~0	16	15.15	1.36	1.63	55.8	44.2
2	4.05	0.65	79.7	~100	~0	17	18.23	1.15	1.02	40.0	60.0
3	5.78	1.58	26.7	~100	~0	18	21.67	0.92	0.70	29.4	70.6
4	6.67	2.34	17.2	100.0	0.0	19	25.04	0.73	0.53	23.2	76.8
5	6.85	6.26	15.9	100.0	0.0	20	25.48	0.63	0.51	22.6	77.4
6	7.31	17.42	13.0	99.9	0.1	21	26.79	0.59	0.47	20.8	79.2
7	7.61	7.75	11.5	99.7	0.3	22	28.84	0.57	0.40	18.3	81.7
8	7.98	2.75	10.0	99.3	0.7	23	30.23	0.53	0.37	17.0	83.0
9	8.27	7.63	9.04	98.9	1.1	24	30.75	0.45	0.37	16.7	83.3
10	8.57	14.00	8.20	98.4	1.6	25	33.68	0.38	0.33	15.1	84.9
11	9.00	5.32	7.14	97.2	2.8	26	37.92	0.30	0.29	13.3	86.7
12	9.52	18.91	6.12	95.3	4.7	27	40.26	0.25	0.27	12.5	87.5
13	10.18	3.71	5.07	92.1	7.9	28	42.53	0.18	0.26	12.0	88.0
14	11.13	1.61	3.93	86.0	14.0	29	44.58	0.14	0.25	11.6	88.4
15	12.96	1.58	2.54	72.0	28.0	30	45.83	0.10	0.24	11.4	88.6

Legende : E = Energie, I = Intensite (u.a.), μ = coefficient d'atténuation (cm^{-1}), P = Absorption (%), T = Transmission (%)

Code couleur : >95% 50–95% 20–50% <20%

9.2 Résultats

Moyenne ponderee par l'intensite

Grandeur	Valeur
Intensite totale	100.0 (u.a.)
Absorption moyenne (5 mm eau)	91.70%
Transmission moyenne	8.30%

Analyse par gamme d'energie

Gamme	Intensite	% du spectre	P(5 mm)
0–10 keV	84.8	84.8%	98.32%
10–20 keV	9.4	9.4%	76.04%
20–30 keV	3.4	3.4%	23.52%
30–50 keV	2.3	2.3%	14.73%

9.3 Comparaison 5 mm vs 1 cm

Comparaison des absorptions pour differentes epaisseurs d'eau

Epaisseur	Absorption moyenne	Transmission	Difference
5 mm	91.70%	8.30%	–
1 cm	95.37%	4.63%	+3.67%

Comparaison par gamme d'energie : 5 mm vs 1 cm

Gamme	P(5 mm)	P(1 cm)	Difference
0–10 keV	98.32%	99.94%	+1.62%
10–20 keV	76.04%	90.87%	+14.83%
20–30 keV	23.52%	41.35%	+17.83%
30–50 keV	14.73%	27.25%	+12.52%

9.4 Conclusions

Synthese

Caractéristiques du spectre :

- Spectre domine par des rayons X de basse énergie (7–10 keV)
- 84.8% de l'intensité est concentrée en dessous de 10 keV

Absorption dans 5 mm d'eau :

- Les photons < 8 keV sont **quasi-totalement absorbés** (>99%)
- L'absorption chute rapidement entre 10 et 20 keV (de 92% à 40%)
- Les photons > 30 keV ont une faible absorption (~11–17%)
- Absorption moyenne pondérée : **91.7%**

Comparaison avec 1 cm d'eau :

- 5 mm : 91.7% absorbé, 8.3% transmis
- 1 cm : 95.4% absorbé, 4.6% transmis
- La différence de 3.7% provient principalement des photons 10–30 keV

Consequence pratique :

Avec ce spectre, **5 mm d'eau suffisent** pour absorber plus de **90% des photons émis**, grâce à la prédominance des rayons X de basse énergie (< 10 keV).

10 Cas de la source d'Am-241

10.1 Caractéristiques nucléaires

Propriétés de l'Am-241

Numéro atomique : Z = 95	Masse atomique : A = 241
Période : $T_{1/2} = 432.2$ ans	Activité spécifique : 127 GBq/g
Mode principal : Désintégration α (100%)	Noyau fils : ^{237}Np

10.2 Schéma de désintégration complet

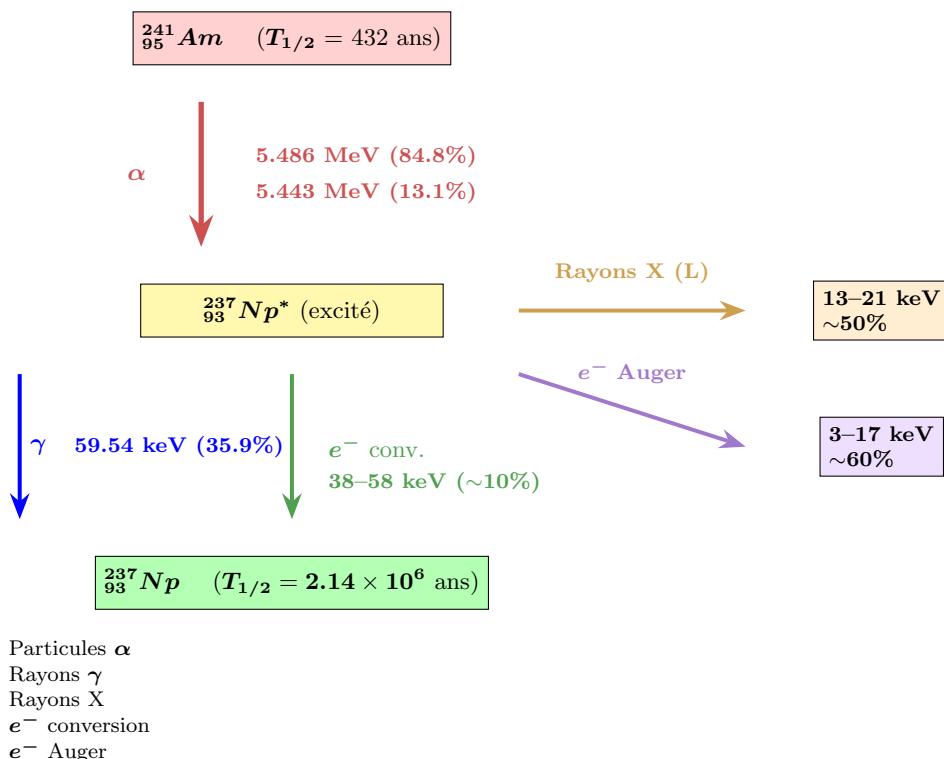


Schéma de désintégration complet de l'Am-241

10.3 Résumé des émissions

Table 29: Types de particules émises par l'Am-241

Type de particule	Émis ?	Énergie typique	Intensité	Parcours (eau)
Alpha (α)	✓oui	5.49 MeV	~100%	~40 µm
Gamma (γ)	✓oui	59.5 keV	35.9%	~10 cm
Rayons X	✓oui	13–21 keV	~50%	~1 cm
e ⁻ conversion	✓oui	38–58 keV	~10%	~50 µm
e ⁻ Auger	✓oui	3–17 keV	~60%	~10 µm
Neutrons (n)	✗non	—	—	—
Beta (β^-)	✗non	—	—	—
Positrons (β^+)	✗non	—	—	—

10.4 Particules alpha (α)

Émission alpha – Mode de désintégration principal

L'Am-241 est un **émetteur alpha pur**. Chaque désintégration produit une particule α (noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}^{2+}$).

Table 30: Raies alpha de l'Am-241

Index	Énergie (MeV)	Intensité (%)	Niveau Np excité
α_0	5.486	84.8	59.54 keV
α_1	5.443	13.1	103.0 keV
α_2	5.388	1.6	158.5 keV
α_3	5.545	0.34	0 keV (fondamental)
α_4	5.512	0.20	33.2 keV
TOTAL		100.0	

Important pour la dosimétrie

Les particules α sont généralement **arrêtées par l'encapsulation** de la source. Elles ne contribuent pas à la dose externe sauf en cas de contamination interne.

10.5 Rayonnement gamma (γ)

Émission gamma – Désexcitation du ${}^{237}\text{Np}^*$

Après émission α , le noyau fils ${}^{237}\text{Np}$ est dans un état excité. Il se désexcite par émission de rayons γ .

Raies gamma de l'Am-241

Index	Énergie (keV)	Intensité (%)	Commentaire
γ_1	59.54	35.90	Raie principale
γ_2	26.34	2.40	Secondaire
γ_3	33.20	0.126	Faible
γ_4	43.42	0.073	Faible
γ_5	55.56	0.018	Très faible
γ_6	69.76	0.021	Très faible
γ_7	98.97	0.0203	Très faible
γ_8	102.98	0.0195	Très faible
γ_9	125.30	0.0041	Très faible
TOTAL γ		38.58	

10.6 Rayons X (fluorescence L du Neptunium)

Rayons X – Réarrangement électronique

La conversion interne crée une lacune dans les couches électroniques du Np. Le réarrangement produit des rayons X caractéristiques (raies L).

Raies X du Neptunium (couche L)

Index	Raie	Énergie (keV)	Intensité (%)	Transition
X1	L ℓ	11.89	0.84	L ₃ –M ₁
X2	L α_2	13.93	13.0	L ₃ –M ₄
X3	L α_1	13.95	13.0	L ₃ –M ₅
X4	L η	15.86	0.47	L ₂ –M ₁
X5	L β_6	16.84	3.4	L ₃ –N ₁
X6	L β_1	17.06	6.5	L ₂ –M ₄
X7	L β_2	17.75	5.2	L ₃ –N ₄ , 5
X8	L β_3	17.99	1.0	L ₁ –M ₃
X9	L γ_1	20.77	4.9	L ₂ –N ₄
X10	L γ_2	21.10	1.1	L ₁ –N ₂
X11	L γ_3	21.34	0.32	L ₁ –N ₃
TOTAL X (L)		49.73		

10.7 Tableau du pourcentage d'absorption des raies Am-241 dans l'eau // Épaisseurs : 3 mm, 5 mm, 10 mm

Pourcentage d'absorption des raies X et γ de l'Am-241 dans l'eau

Raie	Énergie (keV)	Intensité (%)	μ/ρ (cm ² /g)	Abs. 3mm (%)	Abs. 5mm (%)	Abs. 10mm (%)
<i>Rayons X du Neptunium (L X-rays)</i>						
Np L ℓ X-ray	11.89	0.84	3.250	62.28	80.30	96.12
Np L α X-ray	13.93	13.00	2.067	46.21	64.42	87.34
Np L β_1 X-ray	17.06	6.00	1.209	30.42	45.37	70.16
Np L β_2 X-ray	17.75	11.90	1.094	27.98	42.13	66.51
Np L γ X-ray	20.78	4.90	0.753	20.22	31.37	52.91
<i>Rayons gamma</i>						
γ	26.34	2.40	0.481	13.43	21.36	38.16
γ	33.20	0.12	0.334	9.52	15.36	28.37
γ	43.42	0.07	0.252	7.29	11.85	22.30
γ (principale)	59.54	35.90	0.207	6.01	9.82	18.68
Moyenne pond.	—	—	—	20.2	29.8	46.0

Source : Am-241 \rightarrow Np-237 + α + γ + **X** ($T_{1/2} = 432.6$ ans)

Formule : Absorption (%) = [1 - exp(- $\mu \times x$)] × 100

Données : Coefficients μ/ρ interpolés des données NIST XCOM

Note : Lignes soulignées = raies principales

10.8 Comparaison Am-241 vs Eu-152

Comparaison de l'absorption Am-241 vs Eu-152 dans l'eau

Source	Gamme d'énergie (keV)	Abs. 3mm (%)	Abs. 5mm (%)	Abs. 10mm (%)
Am-241	12 – 60	20.2	29.8	46.0
Eu-152	40 – 1408	4.3	7.1	13.5
Ratio Am/Eu	—	4.7×	4.2×	3.4×

10.9 Électrons de conversion interne

Conversion interne – Alternative à l'émission gamma

Au lieu d'émettre un photon γ , l'énergie de désexcitation peut être transférée directement à un électron des couches internes, qui est alors éjecté.

Énergie de l'électron : $E_{e^-} = E_\gamma - E_{\text{liaison}}$

Électrons de conversion interne de l'Am-241 (transition 59.54 keV)

Couche	E _{liaison} (keV)	E _{e-} (keV)	Intensité (%)	Coefficient α
L ₁	22.4	37.1	2.0	0.056
L ₂	21.6	37.9	1.5	0.042
L ₃	17.6	41.9	4.5	0.125
M (total)	~5	~54	1.5	0.042
N (total)	~1	~58	0.3	0.008
TOTAL e⁻ conversion			~10	$\alpha_{\text{tot}} \approx 0.28$

Le coefficient de conversion interne α est défini par :

$$\alpha = \frac{N_{e^-}}{N_\gamma} \approx 0.28 \text{ pour la transition } 59.54 \text{ keV}$$

Cela signifie que pour 100 désexcitations, ~78 produisent un γ et ~22 produisent un électron de conversion.

10.10 Électrons Auger

Effet Auger – Cascade électronique

Après conversion interne ou émission X, une lacune est créée dans les couches internes. Le réarrangement peut produire soit un rayon X, soit un électron Auger (processus non radiatif).

Électrons Auger de l'Am-241

Type	Énergie (keV)	Intensité (%)	Origine
Auger L (LMM)	11–17	~12	Lacune couche L
Auger M (MNN)	3–4	~40	Lacune couche M
Auger N	<1	~10	Lacune couche N
Coster-Kronig	1–5	~5	Transitions intra-couche
TOTAL Auger		~60–70	

Importance des électrons Auger

- Très nombreux : >60 électrons Auger pour 100 désintégrations
- Basse énergie : Majoritairement <20 keV
- Parcours court : <10 µm dans les tissus
- Fort TEL : Haute densité d'ionisation locale
- Radiotoxicité : Très dangereux en contamination interne (dommages ADN locaux)

10.11 Bilan par désintégration

Bilan des émissions pour 100 désintégrations d'Am-241

Type de particule	Nombre / 100 désint.	Énergie moyenne	Énergie totale
Particules α	100	5.48 MeV	548 MeV
Photons γ	39	57 keV	2.2 MeV
Rayons X	50	16 keV	0.8 MeV
e^- conversion	10	45 keV	0.45 MeV
e^- Auger	65	8 keV	0.5 MeV
TOTAL	264 particules	–	~552 MeV

Points clés

- L'énergie est dominée par les particules α (99.3% de l'énergie totale)
- Les α sont arrêtées localement (parcours ~40 µm)
- La dose externe est due principalement au γ 59.54 keV
- En contamination interne, les α et électrons Auger sont très radiotoxiques

10.12 Implications pour la simulation et la dosimétrie

Simulation Monte Carlo

Pour une simulation Geant4 de l'Am-241, il faut considérer :

Recommandations pour simulation Geant4

Application	Particules à simuler	Commentaire
Dose externe (source encapsulée)	$\gamma + X$	α arrêtées par encapsulation
Calibration détecteur	γ 59.54 keV	Raie principale uniquement
Spectrométrie complète	$\gamma + X$	Spectre complet

Comparaison dosimétrique Am-241 vs Eu-152

Comparaison des sources pour irradiation externe

Paramètre	Am-241	Eu-152
Énergie γ principale	59.54 keV	344 keV
Intensité γ	35.9%	26.6%
Pénétration dans l'eau	~10 cm	~50 cm
Dose en profondeur	Faible (basse énergie)	Élevée (haute énergie)
Blindage nécessaire	Léger (quelques mm Pb)	Important (plusieurs cm Pb)
Application typique	Dose superficielle	Dose en profondeur