



Full Length Research Paper

Caractérisation de l'atténuation des photons par le béton baryté pour le blindage contre les rayonnements : analyse des paramètres clés à l'aide de GAMOS et Phy-X/PSD

Nogaye Ndiaye^{1,3*}, Kodjo Joël Fabrice N'Guessan², Oumar Ndiaye^{1,3}, Jean Paul Latyr Faye^{1,3},
Alassane Traoré^{1,3}, Ababacar Sadikhe Ndao^{1,3}

¹Institute of Applied Nuclear Technology, University Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal

²International Cancer Center of Lomé, Lomé, Togo

³Department of Physics, Faculty of Sciences and Technology, University Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal

Received June 2025 – Accepted October 2025



*Corresponding author. ... nogaye11.ndiaye@ucad.edu.sn

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé:

Le béton baryté, composé principalement de barytine (BaSO_4), est un matériau de construction dense et riche en baryum, largement utilisé pour la protection contre les rayonnements ionisants, notamment dans les secteurs médicaux, nucléaires et industriels. Grâce à sa composition unique, il offre une excellente atténuation des rayons X, des rayons gamma et d'autres particules énergétiques. Dans cette étude, des bétons ont été préparés avec différentes proportions de barytine, permettant d'obtenir des matériaux aux densités et compositions granulaires variées. L'objectif était de concevoir des bétons barytés destinés à la construction d'un bunker pour le service de radiothérapie. Les mélanges ont été réalisés avec des granulats denses, intégrant de la barytine à divers pourcentages, afin d'obtenir des bétons de densités distinctes ($S1=3,33$; $S2=3,38$ et $S3=3,44$ g/cm³). Cet article présente une étude approfondie sur l'utilisation du béton baryté pour le blindage contre les rayonnements ionisants dans la construction d'un bunker de radiothérapie au Sénégal. Les principaux paramètres de protection, tels que les coefficients d'atténuation linéaire et massique (LAC et MAC), la couche de demi-atténuation (HVL), la couche de dixième d'atténuation (TVL) et le libre parcours moyen (MFP), ont été calculés pour évaluer l'efficacité du béton baryté. Ces paramètres ont été déterminés à l'aide du code de simulation Monte Carlo GAMOS et du logiciel Phy-X/PSD, pour des énergies de photons allant de 0,015 MeV à 15 MeV. Les résultats obtenus ont été analysés afin d'évaluer l'efficacité du béton baryté en tant que matériau de blindage et d'optimiser la conception des structures de radioprotection, tout en mettant en évidence l'importance des outils de simulation, tels que le code GAMOS, dans ce domaine.

Mots clés : Phy-X/ PSD, GAMOS, Barite Concrete, Shielding, HVL, TVL, LAC, MAC, MFP

Cite this article:

Nogaye Ndiaye, Kodjo Joël Fabrice N'Guessan, Oumar Ndiaye, Jean Paul Latyr Faye, Alassane Traoré, Ababacar Sadikhe Ndao. (2025). Caractérisation de l'atténuation des photons par le béton baryté pour le blindage contre les rayonnements : analyse des paramètres clés à l'aide de GAMOS et Phy-X/PSD. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 7(1), pp. 40-46. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

La radiothérapie est un pilier essentiel du traitement du cancer, nécessitant toutefois des mesures strictes de radioprotection pour garantir la sécurité des patients, du personnel médical et de l'environnement. Le blindage des installations de radiothérapie constitue une étape cruciale, où le choix des matériaux joue un rôle déterminant dans l'efficacité de la protection contre les rayonnements ionisants. Parmi les matériaux

disponibles, le béton baryté se distingue par sa densité élevée et sa teneur en baryum, ce qui en fait une solution privilégiée pour l'atténuation des rayons X et gamma.

De nombreuses études ont été menées pour optimiser les propriétés de protection du béton contre les radiations [1-4], notamment en y intégrant des matériaux à haute densité comme la barytine [5] [6]. Les rayons gamma, étant électriquement neutres et

dépourvus de masse, possèdent un fort pouvoir de pénétration, ce qui rend leur blindage particulièrement complexe. L'interaction des rayons gamma avec la matière dépend de l'énergie des photons incidents, et l'un des paramètres fondamentaux pour caractériser leur atténuation est le coefficient d'atténuation linéaire (μ), qui représente la probabilité qu'un photon interagisse avec un matériau par unité de longueur de trajet.

Plusieurs études ont permis de déterminer des paramètres essentiels pour évaluer l'efficacité des matériaux de blindage, notamment le coefficient d'atténuation linéaire et massique (LAC, MAC), la couche de demi-atténuation (HVL), la couche de dixième d'atténuation (TVL) et le libre parcours moyen (MFP). Ces paramètres peuvent être calculés à l'aide de diverses plateformes de simulation, telles que Geant4 [7], FLUKA [8], PHITS [9], MCNP [10] et GAMOS [11]. Par ailleurs, plusieurs programmes théoriques ont été développés pour faciliter le calcul rapide et efficace des paramètres de blindage gamma. Parmi eux, XCOM est largement reconnu pour sa capacité à calculer les coefficients d'atténuation totale et partielle des photons jusqu'à 100 GeV [12]. Plus récemment, EpiXS a été conçu comme un logiciel dédié au calcul du blindage gamma, en s'appuyant sur les bases de données EPDL97 (ENDF/B-VI.8) et EPICS2017 (ENDF/B-VIII) [13].

Dans cette étude, nous avons utilisé le code Monte Carlo GAMOS ainsi que le logiciel Phy-X/PSD, un outil dédié au calcul des paramètres de protection et de dosimétrie photonique [14]. Les résultats ont été obtenus pour des photons d'énergies comprises entre 0,015 MeV et 15 MeV, et comparés afin d'évaluer l'impact de l'ajout de barytine sur l'efficacité du blindage. L'objectif principal est d'examiner la capacité de trois échantillons de béton baryté à absorber les rayons X à l'aide du code GAMOS.

2. Matériels et méthodes

Dans le cadre de la construction d'un bunker de radiothérapie au Sénégal, une étude approfondie a été menée afin d'évaluer les performances du béton baryté en tant que matériau de blindage. Les principaux paramètres de radioprotection, notamment les coefficients d'atténuation linéaire et massique (LAC, MAC), la couche de demi-atténuation (HVL), la couche de dixième atténuation (TVL) et le libre parcours moyen (MFP), ont été calculés afin de quantifier l'atténuation des rayonnements ionisants. Pour valider ces résultats, des simulations ont été réalisées à l'aide du code Monte Carlo GAMOS et du logiciel Phy-X/PSD, deux outils reconnus pour leur précision dans la modélisation des interactions entre les rayonnements et la matière.

Le béton baryté est conçu pour être plus dense que le béton ordinaire, ce qui est essentiel pour atténuer efficacement les rayonnements ionisants (rayons X, gamma, etc.). Dans le cas du bunker étudié, la structure est principalement constituée de béton baryté, dont la composition inclut de l'eau, du ciment, du sable et du gravier de différentes tailles (3/8 mm : fin, 8/16 mm : moyen, 16/25 mm : grossier). L'intégration de graviers

de granulométries variées permet de renforcer la structure du béton, d'améliorer sa résistance à la compression et à la traction, tout en réduisant les espaces vides, ce qui accroît sa densité et sa compacité. La barytine, sous sa forme brute, ne peut pas être utilisée directement comme matériau de construction. C'est pourquoi le béton lourd chargé de barytine est l'un des matériaux les plus couramment employés pour la construction de bunkers destinés à la protection contre les rayons gamma. Dans cette étude, trois échantillons de béton baryté ont été examinés, présentant des densités respectives de $S1=3,33$; $S2=3,38$ et $S3=3,44$ g/cm³ (voir Figure 1 et tableau 1). Tous les échantillons de béton ont été coulés dans des moules cylindriques de 32 cm de hauteur et 16 cm de diamètre, positionnés le long de l'axe Z. Chaque cylindre a ensuite été placé au centre d'un volume en forme de boîte, de dimensions 2 m × 2 m × 2 m, rempli d'air, représentant l'environnement de la simulation.

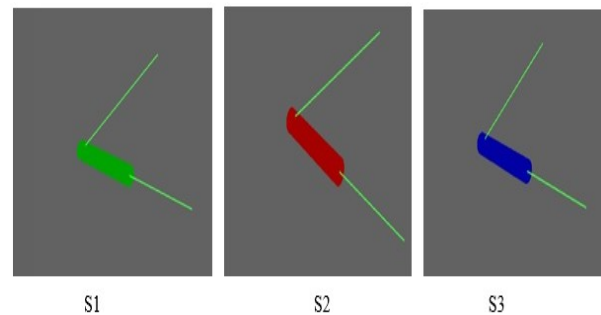


Figure 1 : Modélisation des trois échantillons de béton baryté avec le code GAMOS pour 2 événements de photons.

Tableau 1. Propriétés physiques et mécaniques des bétons.

de granulométries variées permet de renforcer la structure du béton, d'améliorer sa résistance à la compression et à la traction, tout en réduisant les espaces vides, ce qui accroît sa densité et sa compacité. La barytine, sous sa forme brute, ne peut pas être utilisée directement comme matériau de construction. C'est pourquoi le béton lourd chargé de barytine est l'un des matériaux les plus couramment employés pour la construction de bunkers destinés à la protection contre les rayons gamma. Dans cette étude, trois échantillons de béton baryté ont été examinés, présentant des densités respectives de S1=3,33 ; S2=3,38 et S3=3,44 g/cm³ (voir Figure 1 et tableau 1). Tous les échantillons de béton ont été coulés dans des moules cylindriques de 32 cm de hauteur et 16 cm de diamètre, positionnés le long de l'axe Z. Chaque cylindre a ensuite été placé au centre d'un volume en forme de boîte, de dimensions 2 m × 2 m × 2 m, rempli d'air, représentant l'environnement de la simulation.

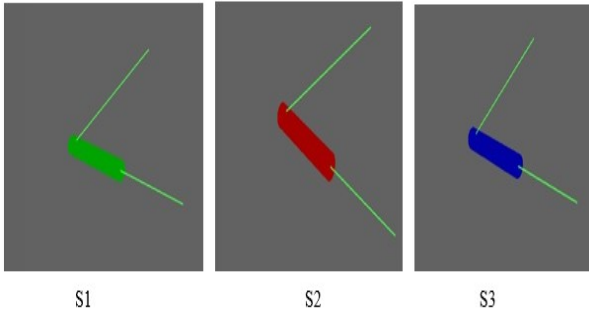


Figure 1 : Modélisation des trois échantillons de béton baryté avec le code GAMOS pour 2 événements de photons.

Tableau 1. Propriétés physiques et mécaniques des bétons.

Les coefficients

d'atténuation linéaire (μ) pour le béton baryté ont été déterminés à différentes énergies, allant de 0,015 MeV à 15 MeV, en appliquant la loi de Beer-Lambert (équation 1) :

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

où μ est le coefficient d'atténuation linéaire, dont la valeur dépend de l'énergie du rayonnement et de la nature du matériau de blindage. Lorsque x , l'épaisseur du matériau, est exprimé en cm, μ doit être exprimé en cm⁻¹.

Comme indiqué dans l'équation 2, le coefficient d'atténuation massique (μ_m en cm² /g) est obtenu en divisant μ par la densité (ρ) du matériau :

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

Le libre parcours moyen (MFP) représente la distance moyenne parcourue par un photon avant d'être atténué dans un matériau. Il est déterminé à l'aide de l'équation 3 :

$$\text{MFP} = \mu^{-1}$$

La couche de demi-atténuation (HVL) représente l'épaisseur du matériau nécessaire pour réduire l'intensité du rayonnement incident de moitié. Elle est définie par l'équation 4 :

$$\text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

De même, la couche de dixième atténuation (TVL) correspond à l'épaisseur du matériau nécessaire pour réduire l'intensité du rayonnement incident à 10 % de sa valeur initiale. Elle est donnée par l'équation 5 :

$$\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu}$$

Lors de la simulation dans GAMOS, nous avons utilisé la physique électromagnétique avec 10⁶ événements. Les résultats des simulations GAMOS ont ensuite été comparés aux données obtenues via Phy-X/PSD.

3. Résultats et discussion

3.1. Couches de demi-atténuation (HVL)

Les couches de demi-atténuation (HVL) des différents bétons barytés ont été calculées pour des énergies de photons comprises entre 0,015 MeV et 15 MeV. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

La figure 2 illustre les valeurs des couches de demi-atténuation (HVL) obtenues avec GAMOS et Phy-X/PSD pour les matériaux S1, S2 et S3 en fonction de l'énergie des photons. Les résultats issus des simulations Monte Carlo montrent une bonne concordance avec ceux calculés à l'aide de Phy-X, bien que de légères différences puissent être observées.

On constate que les valeurs de HVL augmentent globalement avec l'énergie des photons, ce qui indique que le matériau devient plus transparent aux photons à mesure que leur énergie croît. À faible énergie (de

Materials	S1	S2	S3
Average dry weight of the cylinder (Kg)	21.40	21.73	22.10
Average breaking load (KN)	627	745	650
Average strength (MPa)	31.3	37.3	32.5
Density	3.33	3.38	3.44

0,015 à 0,2 MeV), les valeurs de HVL sont faibles, ce qui est attendu puisque les photons de basse énergie sont plus facilement atténués par le matériau. En revanche, à des énergies plus élevées (>1 MeV), la valeur du HVL augmente progressivement, atteignant environ 6 cm. Ce comportement est conforme aux principes physiques de l'atténuation, selon lesquels les photons de haute énergie interagissent moins fréquemment avec la matière et nécessitent donc une épaisseur plus importante pour réduire leur intensité de moitié.

Les trois matériaux étudiés (S1, S2 et S3) présentent des tendances très similaires, avec des écarts minimes entre eux. Cela suggère que la variation de la densité entre ces échantillons n'a pas un impact significatif sur la valeur du HVL dans la gamme d'énergies considérée.

Ces résultats confirment que GAMOS est un outil fiable pour l'estimation des HVL et qu'il peut être utilisé dans des études de blindage, avec des résultats

comparables à ceux obtenus par des logiciels comme Phy-X/PSD.

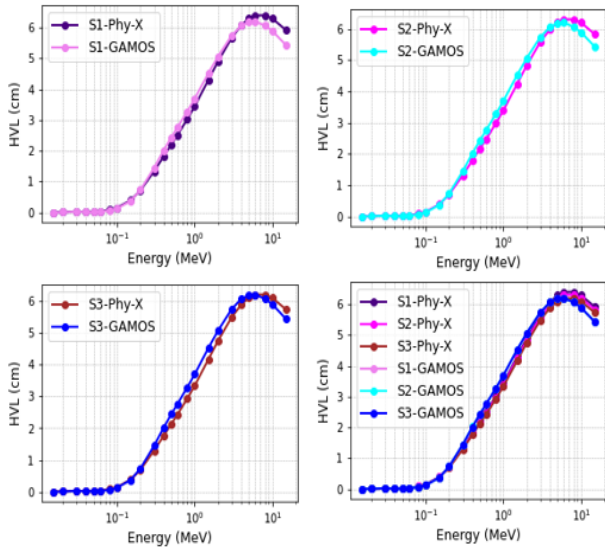


Figure 2 : Comparaison des valeurs de HVL obtenues avec GAMOS et Phy-X/PSD pour S1, S2 et S3 à différentes énergies.

Tableau 2. Comparaison des couches de demi-atténuation (HVL) pour S1, S2 et S3 obtenues à partir du code GAMOS et de Phy-X/PSD.

Energy	S1		S2		S3	
	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD
1.50E-02	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
2.00E-02	0,009	0,011	0,010	0,011	0,009	0,011
3.00E-02	0,031	0,033	0,030	0,033	0,030	0,032
4.00E-02	0,014	0,014	0,013	0,014	0,013	0,014
5.00E-02	0,011	0,025	0,012	0,025	0,020	0,024
6.00E-02	0,024	0,041	0,025	0,040	0,025	0,039
8.00E-02	0,066	0,086	0,066	0,085	0,064	0,083
1.00E-01	0,128	0,153	0,128	0,151	0,128	0,148
1.50E-01	0,378	0,401	0,379	0,395	0,377	0,389
2.00E-01	0,733	0,718	0,734	0,708	0,733	0,695
3.00E-01	1,451	1,338	1,452	1,318	1,451	1,295
4.00E-01	2,026	1,826	2,027	1,799	2,026	1,768
5.00E-01	2,442	2,205	2,443	2,173	2,443	2,135
6.00E-01	2,765	2,516	2,765	2,478	2,764	2,435
8.00E-01	3,278	3,023	3,279	2,978	3,279	2,926
1.00E+00	3,698	3,448	3,699	3,397	3,698	3,338
1.50E+00	4,522	4,303	4,523	4,239	4,522	4,165
2.00E+00	5,071	4,909	5,071	4,836	5,070	4,752
3.00E+00	5,748	5,673	5,748	5,589	5,748	5,492
4.00E+00	6,067	6,087	6,068	5,997	6,067	5,893
5.00E+00	6,186	6,300	6,186	6,207	6,184	6,099
6.00E+00	6,199	6,398	6,200	6,304	6,199	6,194
8.00E+00	6,070	6,403	6,071	6,309	6,071	6,199
1.00E+01	5,894	6,294	5,895	6,201	5,894	6,093
1.50E+01	5,431	5,920	5,431	5,832	5,431	5,731

3.2. Couches de dixième atténuation (TVL)

Les couches de dixième atténuation (TVL) des différents bétons barytés ont été calculées pour des énergies de photons comprises entre 0,015 MeV et 15 MeV. Les résultats sont présentés dans le tableau 3. La figure 3 illustre l'évolution des TVL en fonction de l'énergie pour les échantillons S1, S2 et S3, en comparant les résultats obtenus avec GAMOS et Phy-X/PSD. Comme attendu, les valeurs de TVL augmentent avec l'énergie des photons, ce qui est conforme aux principes de l'atténuation : à mesure que l'énergie des photons augmente, leur pouvoir de pénétration s'accroît, nécessitant une épaisseur plus

importante pour réduire l'intensité du faisceau à 10 % de sa valeur initiale.

À haute énergie, la courbe de TVL atteint un plateau, indiquant que l'atténuation devient moins sensible aux variations d'énergie au-delà d'un certain seuil. Un très bon accord est observé entre les deux (GAMOS et Phy-X/PSD), avec des écarts minimes, confirmant ainsi leur robustesse et leur fiabilité pour l'évaluation du TVL.

Toutefois, de légères différences sont observées à basse énergie (< 1 MeV), probablement dues aux variations dans les bases de données des sections efficaces utilisées ou aux méthodes d'interpolation propres à chaque code. Un TVL plus faible indique un matériau plus efficace en termes d'atténuation, nécessitant une épaisseur moindre pour affaiblir le faisceau d'un facteur 10. À l'inverse, un TVL plus élevé signale un matériau moins absorbant, nécessitant une épaisseur plus importante pour obtenir la même réduction d'intensité.

À haute énergie (> 1 MeV), les valeurs issues de GAMOS et de Phy-X/PSD restent proches, bien que Phy-X/PSD tende à donner des TVL légèrement plus élevés. Par exemple, à 15 MeV, GAMOS estime un TVL de **17,989 cm**, tandis que Phy-X/PSD donne **19,666 cm**.

L'accord global entre les résultats obtenus avec GAMOS et Phy-X/PSD confirme que ces outils peuvent être utilisés de manière interchangeable pour estimer le TVL des matériaux en radioprotection et en blindage. Comme pour le HVL, les trois échantillons S1, S2 et S3 présentent des valeurs très similaires, suggérant que la variation de la densité entre ces matériaux n'a pas d'impact significatif sur le TVL.

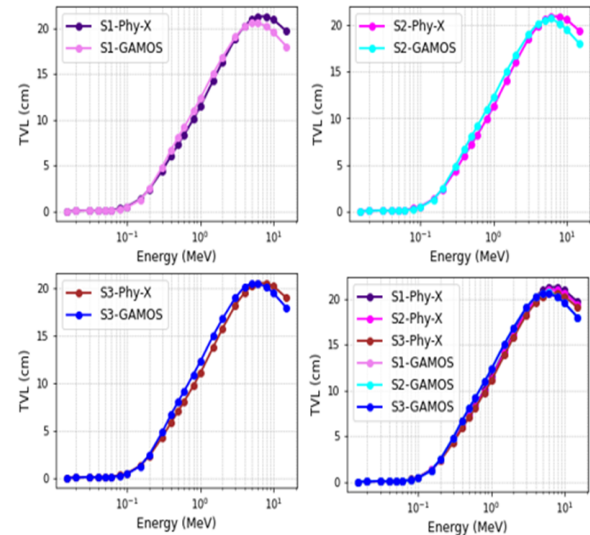


Figure 3 : Comparaison des valeurs de TVL obtenues avec GAMOS et Phy-X/PSD pour S1, S2 et S3 à différentes énergies.

Tableau 3 : Comparaison des couches de dixième atténuation (TVL) pour S1, S2 et S3 obtenues à partir du code GAMOS et de Phy-X/PSD.

Energy	S1		S2		S3	
	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD
1,50E-02	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
2,00E-02	0,030	0,037	0,033	0,037	0,030	0,036
3,00E-02	0,103	0,111	0,100	0,110	0,100	0,108
4,00E-02	0,046	0,047	0,043	0,046	0,043	0,046
5,00E-02	0,036	0,084	0,040	0,083	0,066	0,081
6,00E-02	0,080	0,135	0,083	0,133	0,083	0,131
8,00E-02	0,219	0,287	0,219	0,282	0,213	0,277
1,00E-01	0,425	0,508	0,425	0,500	0,425	0,491
1,50E-01	1,256	1,333	1,259	1,314	1,253	1,291
2,00E-01	2,434	2,386	2,439	2,350	2,434	2,309
3,00E-01	4,817	4,444	4,827	4,379	4,817	4,302
4,00E-01	6,733	6,067	6,732	5,977	6,733	5,873
5,00E-01	8,108	7,326	8,108	7,217	8,108	7,091
6,00E-01	9,174	8,356	9,174	8,233	9,174	8,089
8,00E-01	10,913	10,041	10,913	9,892	10,913	9,720
1,00E+00	12,313	11,454	12,313	11,284	12,313	11,087
1,50E+00	15,050	14,294	15,050	14,083	15,049	13,837
2,00E+00	16,807	16,307	16,807	16,065	16,807	15,785
3,00E+00	19,030	18,847	19,030	18,568	19,030	18,244
4,00E+00	20,198	20,222	20,198	19,923	20,198	19,575
5,00E+00	20,559	20,929	20,559	20,620	20,559	20,260
6,00E+00	20,559	21,255	20,744	20,940	20,559	20,575
8,00E+00	20,198	21,271	20,198	20,957	20,198	20,591
1,00E+01	19,513	20,908	19,513	20,599	19,513	20,240
1,50E+01	17,989	19,666	17,989	19,375	17,989	19,037

3.3. Les coefficients d'atténuation linéaire (LAC)

Les coefficients d'atténuation linéaire (μ ou LAC) des différents bétons barytés ont été calculés pour des énergies de photons comprises entre 0,015 MeV et 15 MeV. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

La figure 4 illustre la variation du coefficient d'atténuation linéaire (μ , en cm^{-1}) en fonction de l'énergie des photons pour les trois matériaux (S1, S2 et S3), calculée à l'aide de GAMOS et du logiciel Phy-X/PSD. Un pic d'atténuation est observé entre 0,03 MeV et 0,04 MeV, ce qui correspond à une région où l'effet photoélectrique est particulièrement dominant.

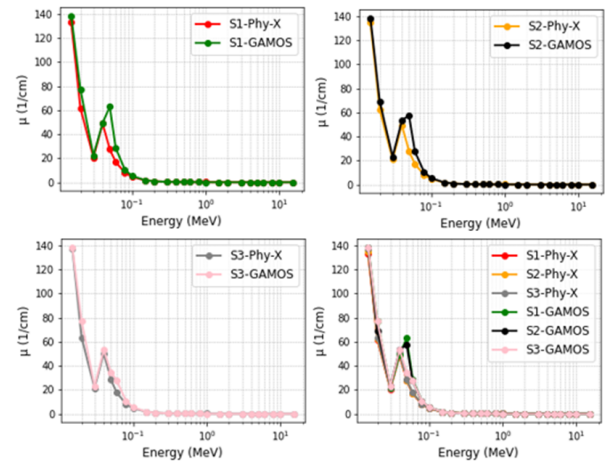
À basse énergie ($\leq 0,1$ MeV), les valeurs de μ sont élevées en raison de la forte probabilité d'interaction via l'effet photoélectrique. Entre 0,1 MeV et 2 MeV, une diminution rapide de μ est observée, marquant la transition entre l'effet photoélectrique et la diffusion Compton, où l'atténuation devient progressivement moins efficace. À haute énergie (> 2 MeV), μ tend à devenir presque constant, ce qui est cohérent avec la prédominance de la diffusion Compton et, dans une moindre mesure, de l'effet de production de paires au-delà de 1,022 MeV.

Comme attendu, μ diminue avec l'augmentation de l'énergie des photons, ce qui traduit une augmentation de la probabilité de pénétration des photons à haute énergie. Un matériau avec un μ plus élevé est plus efficace pour atténuer les photons, ce qui signifie qu'il nécessite une épaisseur plus faible pour absorber un faisceau de rayons X.

La hiérarchie des matériaux en termes de μ révèle que S1, S2 et S3 possèdent des compositions légèrement différentes, influençant ainsi leur pouvoir d'atténuation. Toutefois, à haute énergie, les écarts entre les matériaux deviennent moins marqués, car l'atténuation est alors principalement régie par la diffusion Compton, un phénomène moins dépendant de la composition chimique du matériau.

Une bonne correspondance est observée entre GAMOS et Phy-X/PSD, confirmant la fiabilité des résultats

obtenus avec les deux méthodes. Les variations entre les matériaux S1, S2 et S3 sont principalement dues à leur composition, qui influence directement leur capacité d'atténuation aux différentes énergies de photons.

**Figure 4 : Comparaison des valeurs de μ obtenues avec GAMOS et Phy-X/PSD pour S1, S2 et S3 à différentes énergies.****Tableau 4 : Comparaison les coefficients d'atténuation linéaire (LAC) pour S1, S2 et S3 obtenues à partir du code GAMOS et de Phy-X/PSD.**

Energy	S1		S2		S3	
	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD
1,50E-02	138,629	133,110	138,629	135,109	138,629	137,507
2,00E-02	77,016	61,419	69,315	62,341	77,016	63,448
3,00E-02	22,360	20,716	23,105	21,027	23,104	21,400
4,00E-02	49,510	48,832	53,319	49,565	53,319	50,445
5,00E-02	63,013	27,478	57,762	27,891	34,657	28,445
6,00E-02	28,881	17,035	27,726	17,291	27,726	17,598
8,00E-02	10,502	8,037	10,502	8,157	10,830	8,302
1,00E-01	5,415	4,536	5,415	4,604	5,415	4,685
1,50E-01	1,833	1,727	1,829	1,753	1,838	1,784
2,00E-01	0,946	0,965	0,944	0,980	0,946	0,997
3,00E-01	0,478	0,518	0,477	0,526	0,478	0,535
4,00E-01	0,342	0,380	0,342	0,385	0,342	0,392
5,00E-01	0,284	0,314	0,284	0,319	0,284	0,325
6,00E-01	0,251	0,276	0,251	0,280	0,251	0,285
8,00E-01	0,211	0,229	0,211	0,233	0,211	0,237
1,00E+00	0,187	0,201	0,187	0,204	0,187	0,208
1,50E+00	0,153	0,161	0,153	0,164	0,153	0,166
2,00E+00	0,137	0,141	0,137	0,143	0,137	0,146
3,00E+00	0,121	0,122	0,121	0,124	0,121	0,126
4,00E+00	0,114	0,114	0,114	0,116	0,114	0,118
5,00E+00	0,112	0,110	0,112	0,112	0,112	0,114
6,00E+00	0,112	0,108	0,111	0,110	0,112	0,112
8,00E+00	0,114	0,108	0,114	0,110	0,114	0,112
1,00E+01	0,118	0,110	0,118	0,112	0,118	0,114
1,50E+01	0,128	0,117	0,128	0,119	0,128	0,121

3.4. Coefficients d'atténuation massique (μ_m ou MAC)

Les coefficients d'atténuation massique (MAC) des différents bétons barytés ont été calculés pour des énergies de photons comprises entre 0,015 MeV et 15 MeV, et les résultats sont présentés dans le tableau 5.

La figure 5 illustre la comparaison des coefficients d'atténuation massique (μ_m en cm^2/g) obtenus avec GAMOS et Phy-X/PSD pour les trois matériaux S1, S2 et S3, en fonction de l'énergie des photons (en MeV).

À basse énergie ($\leq 0,1$ MeV), les valeurs de μ_m sont élevées en raison de la dominance de l'effet photoélectrique, un mécanisme d'atténuation particulièrement efficace dans cette gamme d'énergie. Un pic est observé entre 0,03 MeV et 0,04 MeV, ce qui reflète une augmentation soudaine de l'interaction photoélectrique avec la matière.

Entre 0,1 et 2 MeV, une diminution significative de μ_m est observée, marquant la transition vers la diffusion

Compton, où l'atténuation devient progressivement moins efficace.

À haute énergie (> 2 MeV), les valeurs de μ_m tendent à se stabiliser, traduisant la prédominance de la diffusion Compton et, à partir de 1,022 MeV, l'apparition progressive du processus de création de paires.

Les résultats obtenus avec GAMOS et Phy-X/PSD montrent un bon accord, attestant de la fiabilité du modèle Monte Carlo utilisé dans GAMOS pour calculer l'atténuation des photons. Toutefois, de légers écarts sont perceptibles, notamment à basse énergie, probablement en raison des différences dans : les bases de données des sections efficaces utilisées dans chaque code ou les méthodes d'interpolation appliquées pour calculer les valeurs intermédiaires.

Dans l'ensemble, GAMOS et Phy-X/PSD fournissent des résultats cohérents, confirmant la robustesse de GAMOS pour l'évaluation de l'atténuation des photons.

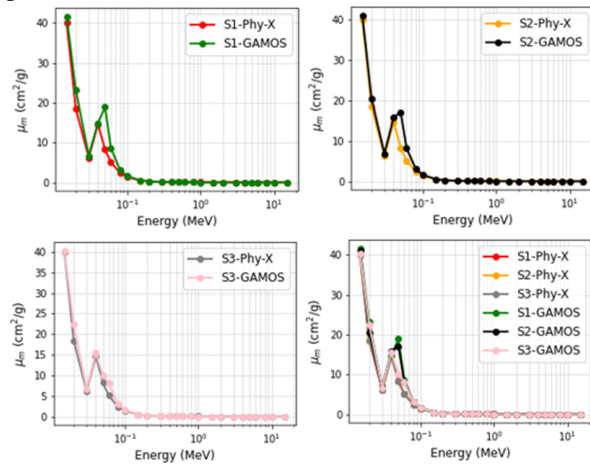


Figure 5 : Comparaison des valeurs de μ_m obtenues avec GAMOS et Phy-X/PSD pour S1, S2 et S3 à différentes énergies.

Tableau 5 : Comparaison les coefficients d'atténuation massique (MAC) pour S1, S2 et S3 obtenues à partir du code GAMOS et de Phy-X/PSD.

Energy	S1		S2		S3	
	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD
1,50E-02	41,630	39,973	41,014	39,973	40,299	39,973
2,00E-02	23,128	18,444	20,507	18,444	22,388	18,444
3,00E-02	6,715	6,221	6,836	6,221	6,716	6,221
4,00E-02	14,868	14,664	15,775	14,664	15,500	14,664
5,00E-02	18,923	8,252	17,089	8,252	10,075	8,252
6,00E-02	8,673	5,116	8,203	5,116	8,060	5,116
8,00E-02	3,154	2,413	3,107	2,413	3,148	2,413
1,00E-01	1,626	1,362	1,602	1,362	1,574	1,362
1,50E-01	0,550	0,519	0,541	0,519	0,534	0,519
2,00E-01	0,284	0,290	0,279	0,290	0,275	0,290
3,00E-01	0,143	0,156	0,141	0,156	0,139	0,156
4,00E-01	0,103	0,114	0,101	0,114	0,099	0,114
5,00E-01	0,085	0,094	0,084	0,094	0,082	0,094
6,00E-01	0,075	0,083	0,074	0,083	0,073	0,083
8,00E-01	0,063	0,069	0,062	0,069	0,061	0,069
1,00E+00	0,056	0,060	0,055	0,060	0,054	0,060
1,50E+00	0,046	0,048	0,045	0,048	0,044	0,048
2,00E+00	0,041	0,042	0,040	0,042	0,040	0,042
3,00E+00	0,036	0,037	0,036	0,037	0,035	0,037
4,00E+00	0,034	0,034	0,034	0,034	0,033	0,034
5,00E+00	0,034	0,033	0,033	0,033	0,032	0,033
6,00E+00	0,034	0,033	0,033	0,033	0,032	0,033
8,00E+00	0,034	0,033	0,034	0,033	0,033	0,033
1,00E+01	0,035	0,033	0,035	0,033	0,034	0,033
1,50E+01	0,038	0,035	0,038	0,035	0,037	0,035

3.5. Libre parcours moyen (MFP)

Le libre parcours moyen (MFP) des différents bétons barytés a été calculé pour des énergies de photons comprises entre 0,015 MeV et 15 MeV, et les résultats sont présentés dans le tableau 6.

La figure 6 compare les valeurs du MFP (en cm) obtenues avec GAMOS et Phy-X/PSD pour les trois matériaux S1, S2 et S3, en fonction de l'énergie des photons (en MeV).

À basse énergie ($\leq 0,1$ MeV), le MFP est très faible, indiquant que les photons sont rapidement absorbés ou diffusés. Cela s'explique par la prédominance de l'effet photoélectrique, qui dépend fortement du numéro atomique du matériau.

Entre 0,1 et 2 MeV, le MFP augmente progressivement, traduisant une diminution de l'efficacité de l'absorption et la transition vers la diffusion Compton, où les interactions des photons avec les électrons de la matière deviennent prépondérantes.

À haute énergie (> 2 MeV), le MFP atteint un plateau, indiquant la dominance de la diffusion Compton. À ce stade, l'atténuation dépend moins de la composition chimique du matériau et davantage de sa densité électronique.

Les résultats fournis par GAMOS et Phy-X/PSD sont en très bon accord, attestant de la cohérence des estimations du libre parcours moyen obtenues avec ces deux méthodes. Toutefois, de légères différences sont observables à basse énergie, probablement en raison des variations dans les bases de données utilisées par chaque code.

À basse énergie, les valeurs de MFP sont très faibles et des écarts entre S1, S2 et S3 sont visibles, reflétant les différences de composition chimique de ces matériaux et leur influence sur l'absorption des photons.

À haute énergie, les valeurs de MFP convergent pour les trois matériaux, ce qui est attendu, car la diffusion Compton devient le principal mécanisme d'interaction, et son efficacité est davantage liée à la densité du matériau qu'à sa composition chimique.

De manière générale, le MFP augmente avec l'énergie des photons, traduisant une atténuation moins efficace à haute énergie.

Les résultats obtenus avec GAMOS et Phy-X/PSD sont donc cohérents, confirmant la fiabilité des simulations Monte Carlo pour l'évaluation du libre parcours moyen.

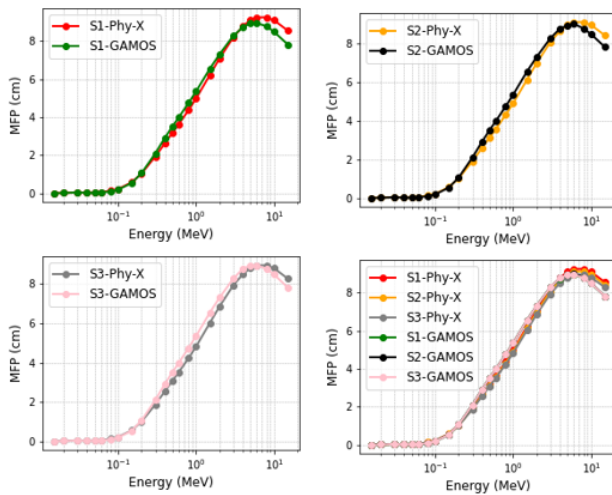


Figure 6 : Comparaison des valeurs de MFP obtenues avec GAMOS et Phy-X/PSD pour S1, S2 et S3 à différentes énergies.

Tableau 6 : Comparaison le Libre parcours moyen (MFP) pour S1, S2 et S3 obtenues à partir du code GAMOS et de Phy-X/PSD

Energy	S1		S2		S3	
	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD	GAMOS	Phy-X/PSD
1.50E-02	0,007	0,008	0,007	0,007	0,007	0,007
2,00E-02	0,013	0,016	0,014	0,016	0,013	0,016
3,00E-02	0,045	0,048	0,043	0,048	0,043	0,047
4,00E-02	0,021	0,020	0,019	0,020	0,019	0,020
5,00E-02	0,016	0,036	0,017	0,036	0,029	0,035
6,00E-02	0,035	0,059	0,036	0,058	0,036	0,057
8,00E-02	0,095	0,124	0,095	0,123	0,092	0,120
1,00E-01	0,185	0,220	0,185	0,217	0,185	0,213
1,50E-01	0,545	0,579	0,547	0,571	0,544	0,561
2,00E-01	1,057	1,036	1,059	1,021	1,057	1,003
3,00E-01	2,092	1,930	2,096	1,902	2,092	1,868
4,00E-01	2,924	2,635	2,924	2,596	2,924	2,551
5,00E-01	3,521	3,181	3,521	3,134	3,521	3,080
6,00E-01	3,984	3,629	3,984	3,575	3,984	3,513
8,00E-01	4,739	4,361	4,739	4,296	4,739	4,221
1,00E+00	5,348	4,974	5,348	4,901	5,347	4,815
1,50E+00	6,536	6,208	6,536	6,116	6,536	6,009
2,00E+00	7,299	7,082	7,299	6,977	7,299	6,855
3,00E+00	8,264	8,185	8,264	8,064	8,264	7,923
4,00E+00	8,722	8,782	8,772	8,652	8,772	8,501
5,00E+00	8,929	9,090	8,929	8,955	8,929	8,799
6,00E+00	8,929	9,231	9,009	9,094	8,929	8,936
8,00E+00	8,772	9,238	8,772	9,101	8,772	8,943
1,00E+01	8,475	9,080	8,475	8,946	8,475	8,790
1,50E+01	7,812	8,541	7,812	8,414	7,812	8,268

4. Conclusion

Lorsqu'un rayonnement constitué de particules traverse la matière, il transfère progressivement son énergie à celle-ci. Ce processus résulte des interactions entre les particules du rayonnement et les atomes du matériau absorbant. Dans le domaine de la radioprotection, le choix des matériaux de blindage est crucial pour limiter l'exposition aux rayonnements ionisants et garantir la sécurité des patients ainsi que du personnel médical.

Le béton baryté, en raison de sa forte densité et de sa teneur en baryum, est largement utilisé dans la construction de bunkers de radiothérapie. Afin d'assurer une protection efficace, il est essentiel de caractériser son pouvoir d'atténuation en déterminant des paramètres clés tels que la HVL, la TVL, et le libre parcours moyen (MFP).

Cette étude a évalué les performances d'atténuation de différents bétons barytés en analysant plusieurs paramètres, notamment la couche de demi-atténuation (HVL), la couche de dixième atténuation (TVL), le coefficient d'atténuation linéaire (LAC), le coefficient

d'atténuation massique (MAC), ainsi que le libre parcours moyen (MFP). Les résultats obtenus avec les codes GAMOS et Phy-X/PSD ont montré un très bon accord entre les deux approches, validant leur fiabilité pour l'évaluation de l'atténuation des photons dans le cadre de la radioprotection et du blindage.

Les analyses des HVL et TVL ont confirmé que ces épaisseurs augmentent avec l'énergie des photons, illustrant ainsi la nécessité de blindages plus épais pour les photons de plus haute énergie. Les valeurs obtenues avec GAMOS et Phy-X/PSD sont restées proches, bien que de légères différences aient été observées à basse énergie. Ces écarts peuvent être attribués aux variations dans les bases de données des sections efficaces et aux méthodes d'interpolation spécifiques à chaque code.

L'analyse des coefficients LAC et MAC a révélé une forte dépendance aux mécanismes d'interaction des photons avec la matière. À basse énergie ($\leq 0,1$ MeV), l'effet photoélectrique domine, ce qui entraîne des valeurs élevées de LAC et MAC, ainsi qu'un MFP réduit. Entre 0,1 et 2 MeV, une diminution progressive de ces coefficients a été observée, traduisant la transition vers la diffusion Compton. À haute énergie (> 2 MeV), l'atténuation devient moins efficace, et les valeurs des paramètres étudiés atteignent un plateau. Ce phénomène est dû à la prédominance de la diffusion Compton et à l'apparition du processus de création de paires au-delà de 1,022 MeV.

Enfin, l'étude du libre parcours moyen (MFP) a mis en évidence une tendance similaire. Les matériaux présentent des différences marquées à basse énergie en raison de leurs compositions chimiques distinctes, mais ces différences tendent à converger à haute énergie. Cela confirme que l'atténuation dans ce régime est principalement dictée par la densité électronique du matériau.

Ces résultats soulignent l'efficacité des bétons barytés étudiés pour le blindage contre les rayonnements ionisants et montrent que GAMOS et Phy-X/PSD peuvent être utilisés de manière interchangeable pour évaluer les propriétés d'atténuation. Ces travaux contribuent à l'optimisation des matériaux de radioprotection et ouvrent la voie à des études complémentaires visant à affiner les modèles d'atténuation et à explorer d'autres matériaux innovants pour la protection contre les rayonnements.

Acknowledgements

Nous exprimons toute notre gratitude au Dr Pedro Arce, du Département de Technologie, Division de l'Instrumentation scientifique, Unité des Applications médicales, Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Espagne

REFERENCES

- [1] Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., Mavi, B., & Akkurt, A. (2006). Radiation shielding of concretes containing different aggregates. *Cement and concrete composites*, 28(2), 153-157.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.006>

- [2] Bashter, I. I. (1997). Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes. *Annals of nuclear Energy*, 24(17), 1389-1401.
[https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(97\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(97)00003-0)
- [3] El-Khayatt, A. M. (2010). Radiation shielding of concretes containing different lime/silica ratios. *Annals of Nuclear Energy*, 37(7), 991-995.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.03.001>
- [4] Singh, V. P., & Badiger, N. M. (2014). Investigation on radiation shielding parameters of ordinary, heavy and super heavy concretes. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 29(2), 149-156.
- [5] Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., & Mavi, B. (2005). The shielding of γ -rays by concretes produced with barite. *Progress in Nuclear Energy*, 46(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2004.09.015>
- [6] Ahmad, N., Idris, M. I., Hussin, A., Abdul Karim, J., Azreen, N. M., & Zainon, R. (2024). Enhancing shielding efficiency of ordinary and barite concrete in radiation shielding utilizations. *Scientific Reports*, 14(1), 26029.
<https://www.nature.com/articles/s41598-024-76402-0>
- [7] Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., ... & Geant4 Collaboration. (2003). GEANT4—a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250-303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [8] Ferrari, A., Ranft, J., Sala, P. R., & Fassò, A. (2005). *FLUKA: A multi-particle transport code (Program version 2005)* (No. CERN-2005-10). Cern.
<https://cds.cern.ch/record/898301>
- [9] Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Noda, S., ... & Sihver, L. (2013). Particle and heavy ion transport code system, PHITS, version 2.52. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 50(9), 913-923.
<https://doi.org/10.1080/00223131.2013.814553>
- [10] Briesmeister, J. F. (2000). MCNPTM-A general Monte Carlo N-particle transport code. *Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory*, 2.
- [11] Şahin, M. C., & Manisa, K. (2023). Evaluation of X-ray shielding ability of tungsten rubber: a GAMOS Monte Carlo Study. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 18(1), 1-9.
<https://doi.org/10.29233/sdufeffd.1241050>
- [12] Berger, M. J., & Hubbell, J. H. (1987). *XCOM: Photon cross sections on a personal computer* (No. NBSIR-87-3597). National Bureau of Standards, Washington, DC (USA). Center for Radiation Research.
<https://doi.org/10.2172/6016002>
- [13] Hila, F. C., Asuncion-Astronomo, A., Dingle, C. A. M., Jecong, J. F. M., Javier-Hila, A. M. V., Gili, M. B. Z., ... & Amorsolo Jr, A. V. (2021). EpiXS: A Windows-based program for photon attenuation, dosimetry and shielding based on EPICS2017 (ENDF/B-VIII) and EPDL97 (ENDF/B-VI. 8). *Radiation Physics and Chemistry*, 182, 109331.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109331>
- [14] Şakar, E., Özpolat, Ö. F., Alım, B., Sayyed, M. I., & Kurudirek, M. (2020). Phy-X/PSD: development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108496.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496>