

Introduction

La protection contre les rayonnements gamma demeure un enjeu majeur en médecine, en industrie et dans les systèmes embarqués. Bien que le plomb reste le matériau de référence grâce à son numéro atomique et sa densité élevés, son poids, sa toxicité, sa rigidité et ses contraintes réglementaires limitent son utilisation dans les technologies modernes, notamment les équipements portables et les structures légères.

Ces limitations ont encouragé le développement de matériaux de radioprotection alternatifs, en particulier les composites polymères renforcés. Les travaux de Shahzad (2023) montrent que les solutions actuelles s'orientent vers des matériaux offrant une bonne efficacité massique, même avec une densité bien inférieure à celle du plomb. Parmi eux, les nanomatériaux carbonés, et notamment le graphène, sont particulièrement prometteurs grâce à leur faible masse, leur résistance mécanique et leur non-toxicité. Dans cette perspective, l'étude de Filak-Mędoń et al. (2024) propose un composite innovant Graphène (carbone) /ABS (Acrylonitrile-Butadiène-Styrène, un thermoplastique commun, conçu pour concilier légèreté, stabilité structurelle et performances d'atténuation aux énergies γ . L'objectif de ce travail est d'analyser ce matériau, d'évaluer ses propriétés radiologiques et de déterminer dans quelle mesure il peut constituer une alternative légère et moderne aux blindages classiques au plomb, en s'appuyant sur les tendances mises en évidence par Shahzad (2023) et Gulbicim (2025).

I – Matériaux et conception du composite Graphène/ABS

Composition : 10 % en masse de nanoplaquettes de graphène (GNP) & 90 % d'ABS

Propriétés structurelles :

Les analyses microscopiques et spectroscopiques révèlent :

- Une **dispersion homogène** des nanoplaquettes dans toute la matrice (SEM),
- Une signature graphénique claire via les images des spectres Raman,
- L'absence d'agglomérats significatifs,
- La formation d'un **réseau électrique percolant** (conductivité ≈ 180 S/m).

Propriétés physico-chimiques :

- **Densité faible** : $\sim 1,064$ g/cm³ (environ 10 \times plus léger que le plomb).

- **Stabilité mécanique** : héritée de l'ABS, renforcée par le graphène.

- **Comportement électronique** : favorable aux interactions photon-electron en régime Compton.

Ces éléments confirment que le matériau s'inscrit dans la stratégie des composites légers performants, telle que décrite dans Shahzad (2023) et Gulbicim (2025).

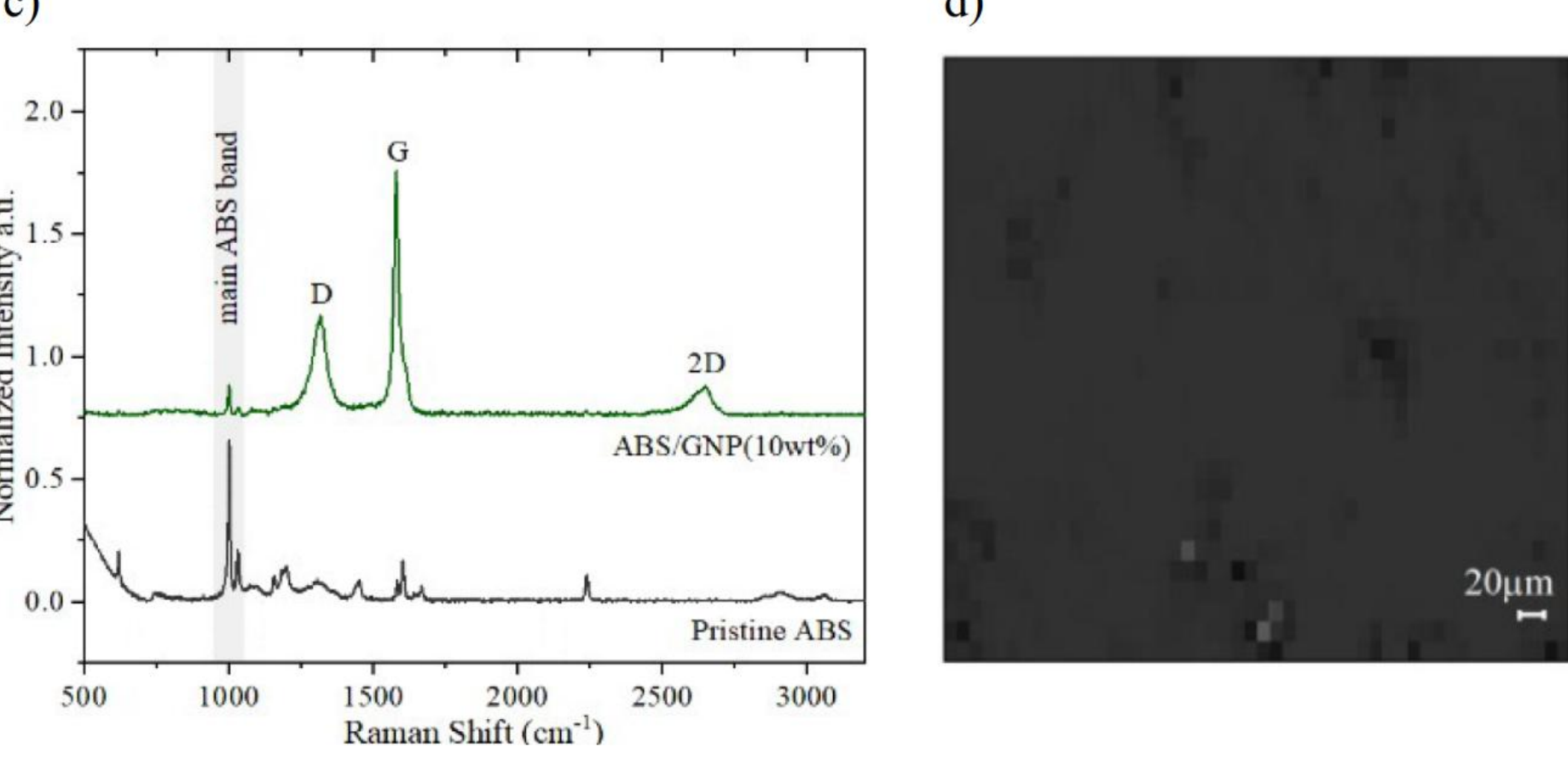


Figure 1 : SEM / Raman spectrographie

II – Procédé de fabrication et caractérisations préliminaires



Figure 2 : Photo/échantillons 3 et 15 mm

Procédé de fabrication :

- **Mélange mécanique** ABS + GNP (1 h, 100 rpm),
 - **Hot-press** à 190°C sous 250 kN,
 - Découpe d'échantillons de 3 mm et 15 mm.

Ce procédé est compatible avec les techniques industrielles (extrusion, injection), un atout majeur pour la production en série.

Caractérisations

- SEM → homogénéité.
- Raman → intégration réussie des nanoplaquettes.
- Mesure de conductivité → réseau électrique fonctionnel.

Ces observations confirment une fabrication contrôlée et un matériau reproductible, condition essentielle pour la radioprotection.

IV – Discussion, limites et perspectives

A. Atouts

- Très léger ($\approx 10\times$ plus léger que le plomb).
- Bonne atténuation massique.
- Flexibilité mécanique et non-toxicité.
- Accord très fort mesure / théorie via XCOM.
- Matériau moyennement coûteux mais facile à produire :
 - Comparatifs de multiples matériaux :
 - \$1.52 à \$3.21/kg pour le plomb
 - 7 à 15 €/kg selon le cours du graphène
 - 250 à 376/kg pour un hybride cobalt-titane

B. Limites

- μ linéaire plus faible que les matériaux denses.
- Dépendance à la qualité de dispersion.
- Données limitées sur le vieillissement radiatif.
- Perte de connaissance en France à la suite de l'abandon des UNGG

C. Perspectives et utilisations

- Optimisation du taux de GNP (>10 %).
- Architecture multicouche.
- Applications mobiles : drones, robots, systèmes embarqués, vêtements protecteurs légers.

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

B. Résultats

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation linéaire μ :

- $\mu \approx 0,50$ cm⁻¹ à 46 keV
- $\mu \approx 0,07$ cm⁻¹ à 662 keV

Figure 3 : A) Comparaison du coefficient d'atténuation linéaire B) Corrélation avec modèle XCOM

Materials	Density g/cm ³	Linear attenuation Coefficients [cm ⁻¹]	mass attenuation coefficients [cm ² /gm]
Lead	11.4	1.1948	0.1048

Coefficient d'atténuation massique μ/p :

- $\mu/p \geq 0,20$ cm²/g aux énergies élevées.
- Excellente performance massique, comparable aux meilleurs polymères renforcés signalés par Shahzad (2023).

Figure 4 : Comparaison du coefficient d'atténuation massique radiation X-Ray et Gamma

||
||
||