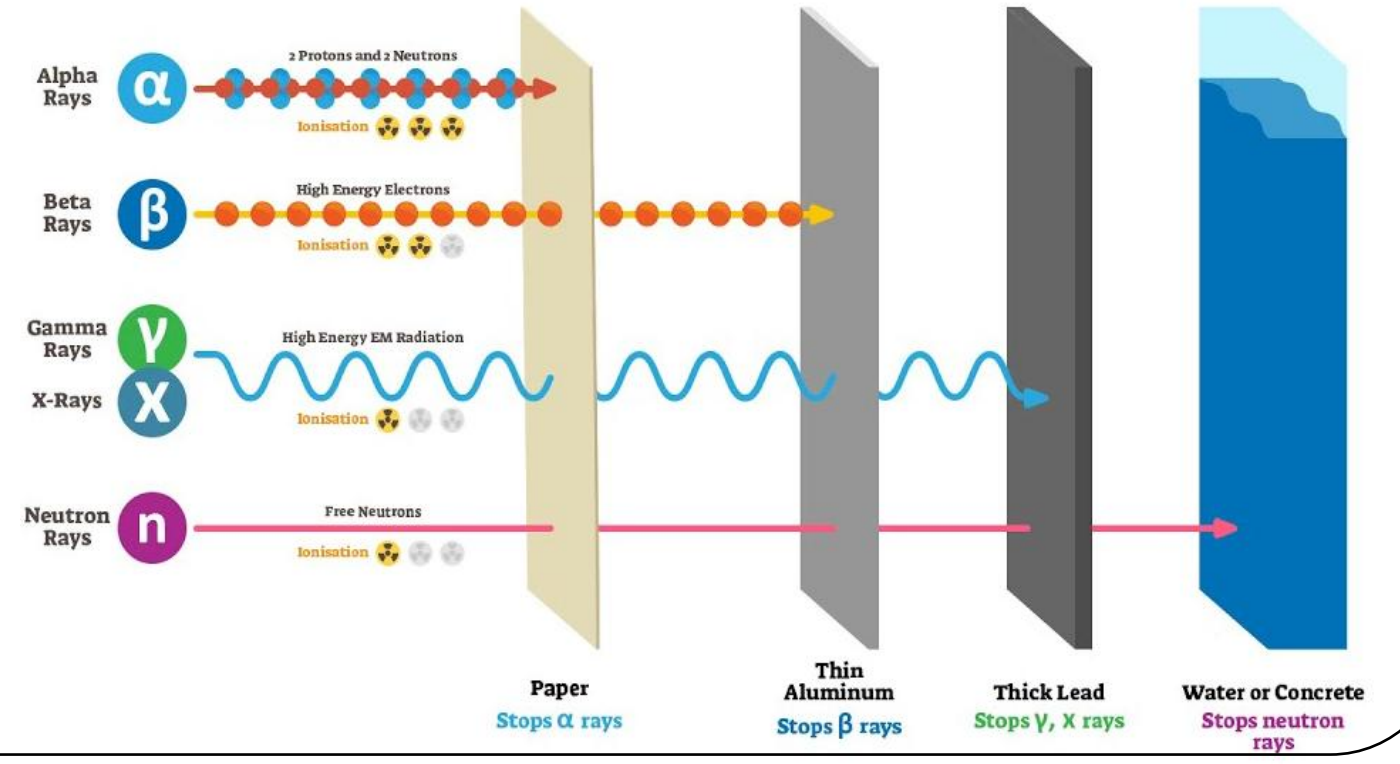


Introduction

L'intégration des applications nucléaires dans divers secteurs a accru la nécessité d'une radioprotection efficace. Parmi les rayonnements ionisants, les neutrons posent un défi majeur en raison de leur fort pouvoir de pénétration. Le béton conventionnel, largement utilisé comme matériau de blindage, présente une efficacité limitée contre les neutrons. Ce travail présente une analyse comparative entre le béton ordinaire et le béton à base de serpentine, en étudiant les paramètres déterminants pour le blindage des neutrons : densité, composition élémentaire, section efficace d'élimination des neutrons rapides et l'énergie des neutrons. Le béton à base de serpentine constitue-t-il une alternative réellement plus performante pour le blindage neutronique que les solutions actuellement utilisées ?



I – Etats des connaissances

Aujourd'hui, dans les centrales nucléaires, on utilise principalement des bétons standard, armé et précontraint pour les structures porteuses et les enceintes de confinement, ainsi que des bétons hydrogénés, boré ou composites pour le blindage des rayonnements. Nous avons ainsi atteint un niveau performant de protection, mais la recherche et le développement se poursuivent pour optimiser davantage ces matériaux et leur durabilité.

II – Méthodologie

Des simulations Monte Carlo (MCNP) ont été réalisées pour comparer le béton ordinaire (OC) et le béton à base de serpentine (SC) en termes de blindage neutronique, à partir de la section efficace d'élimination des neutrons rapides (FNRCs). Cette approche permet d'évaluer l'effet de la composition et de la densité sur leur capacité d'atténuation.

➤ La géométrie expérimentale simulée sous MCNP inclut l'ensemble des éléments présentés dans la figure (1).

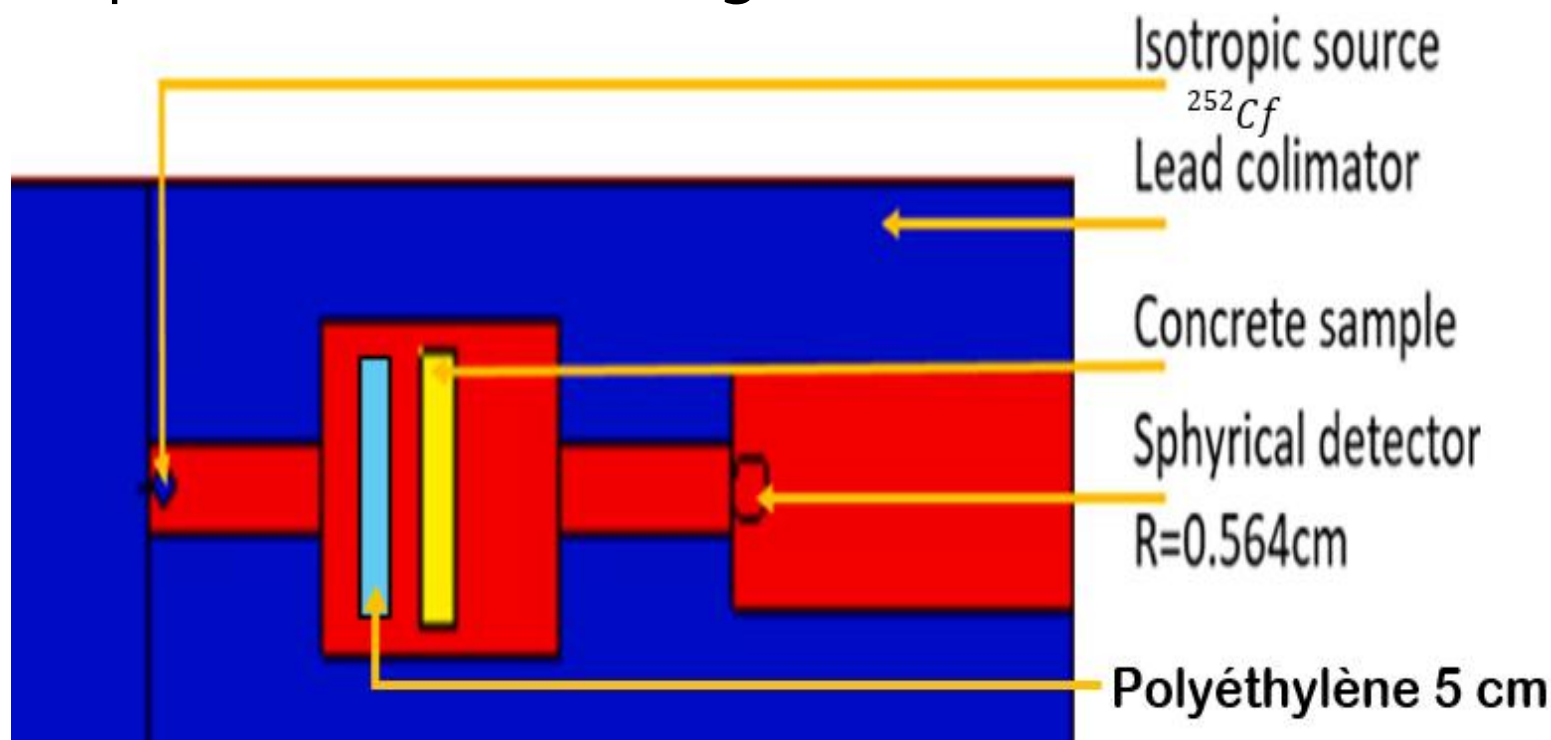


Figure 1 : Géométrie générée par MCNP représentant l'ensemble des éléments illustrés dans la figure adaptée de [1].

➤ Représentation de laboratoire, montrant la disposition de l'installation et la position de la source de neutrons. la source produit des neutrons de 2,45 MeV par fusion de deux noyaux de deutérium (D-D) figure(2).

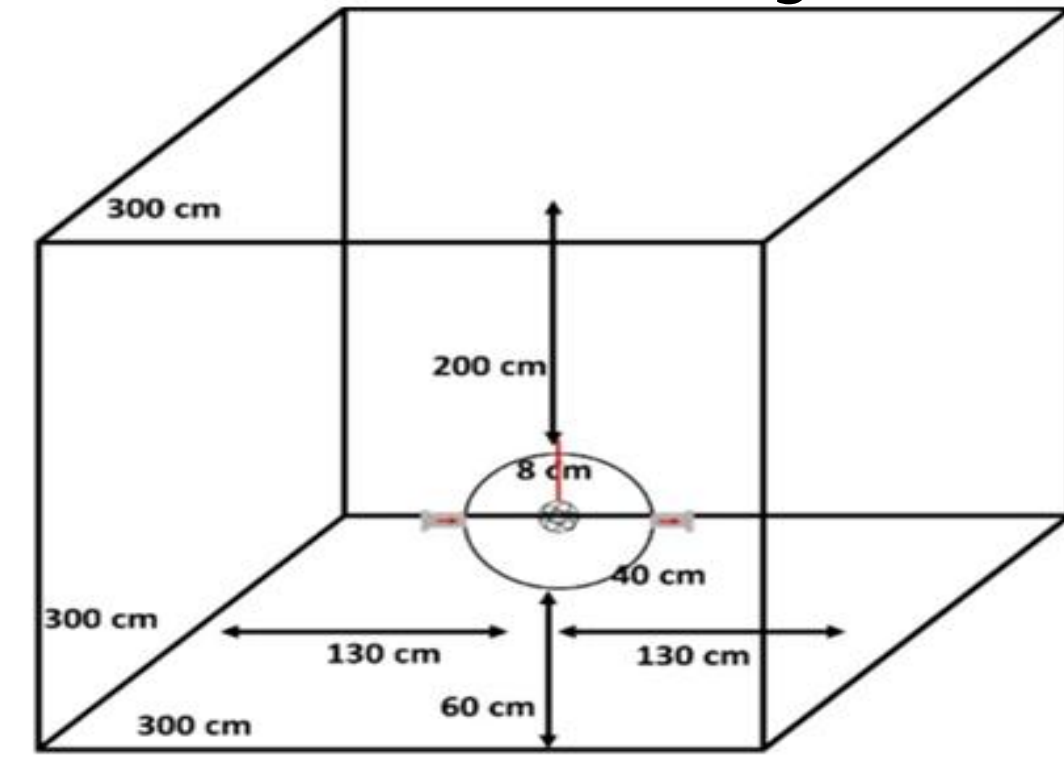


Figure 2 : Disposition du laboratoire de 3 m de cote, comprenant la source de neutron au centre [2]

La serpentine est un minéral silicaté naturel dont la formule chimique générale est $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$.

Elle est efficace pour l'atténuation des neutrons grâce à plusieurs propriétés :

- Riche en hydrogène → ralentit efficacement les neutrons rapides.
- Éléments comme (Mg, Si) → favorisent la perte d'énergie des neutrons par collision.
- Densité avantageuse → augmente les interactions neutroniques.
- Bonne résistance thermique → assure la stabilité des matériaux.



Figure 3: Echantillon de serpentine

III – Présentation des résultats

➤ Les simulations ont permis de calculer, pour chaque source et chaque béton, la section efficace d'élimination des neutrons rapides. Deux sources neutroniques ont été considérées dans cette étude :

- ^{252}Cf , émetteur de neutrons par fission spontanée, avec un spectre couvrant les neutrons thermiques (0 – 0,5 eV), épithermiques (0,5 eV – 0,5 MeV) et rapides (0,5 – 20 MeV). [1]
- la réaction de fusion deutérium (D-D), produisant des neutrons mono-énergétiques d'environ 2,45 MeV. [2]

- la section efficace d'élimination des neutrons rapides est la probabilité qu'un neutron rapide soit absorbé $\Sigma_R = \rho \sum_i \omega_i \left(\frac{\Sigma_{Ri}}{\rho} \right)$

➤ Les résultats montrent que pour la source (D-D), le (SC) présente une Σ_R plus élevée que le (OC), alors que pour le ^{252}Cf , l'exposition est plus importante avec le (SC), en lien avec la réponse énergétique des matériaux. L'examen de la transmittance neutronique permet de vérifier ces résultats selon l'énergie.

- La transmittance, qui exprime la fraction de neutrons traversant un matériau donné, permet donc d'analyser de manière plus directe l'effet combiné de ces facteurs et de comparer les performances des matériaux étudiés.

$$\Sigma_R = -\frac{1}{x} \ln(T(x))$$

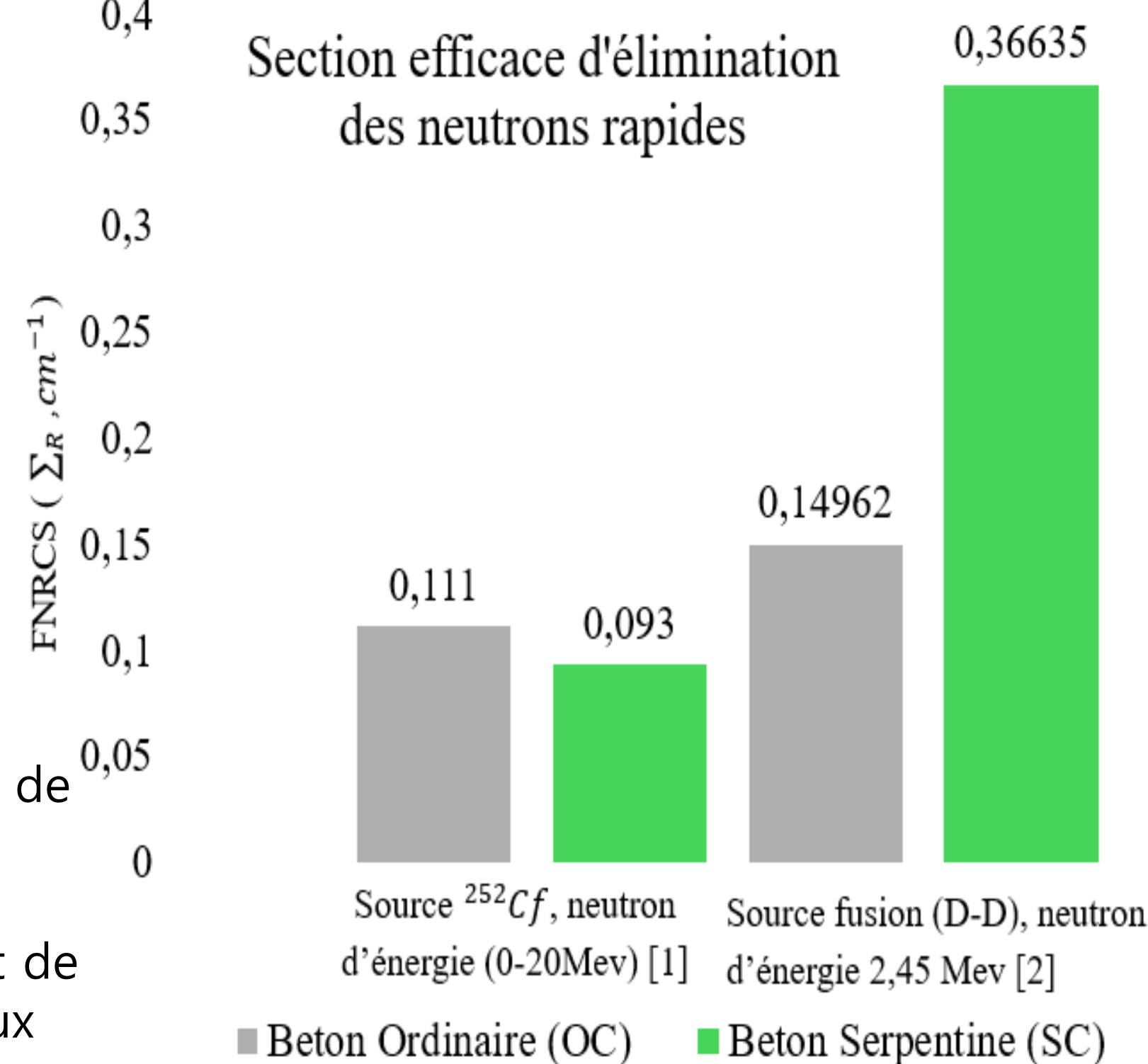
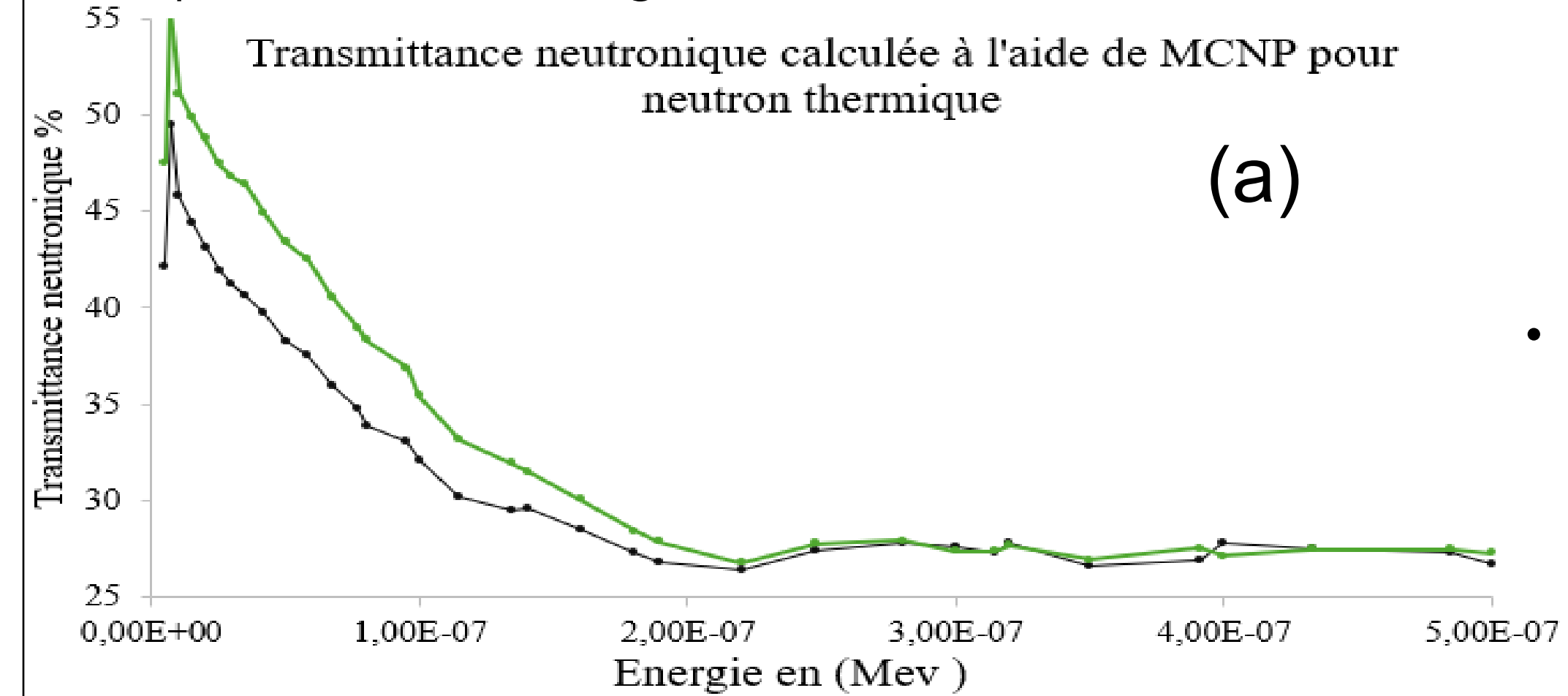


Figure 4: Section efficace d'élimination des neutrons rapides pour différents béton d'après les articles.

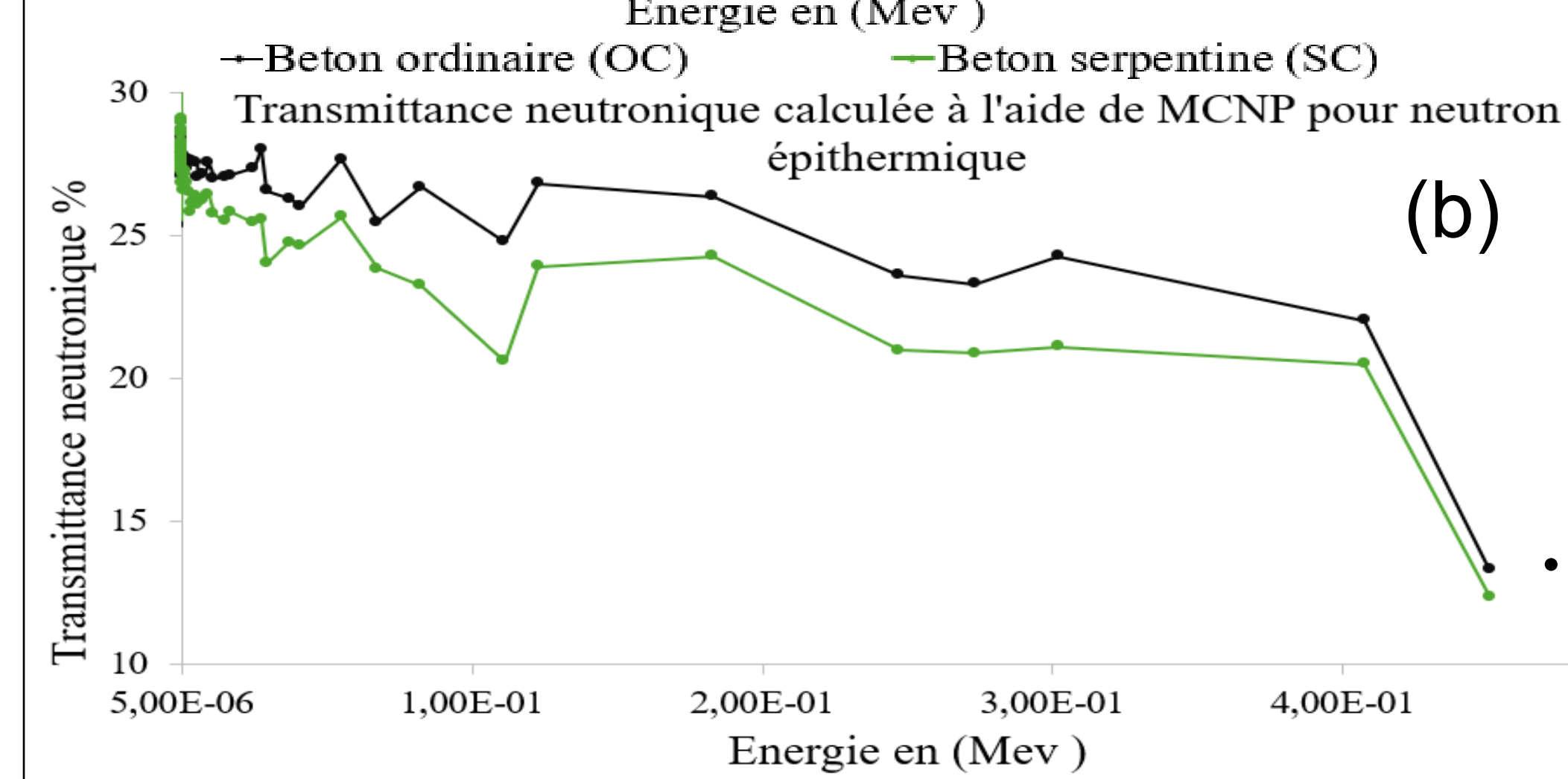
IV – Analyse des résultats

➤ Les trois graphiques comparent l'atténuation neutronique du béton ordinaire et du béton serpentine selon l'énergie des neutrons.



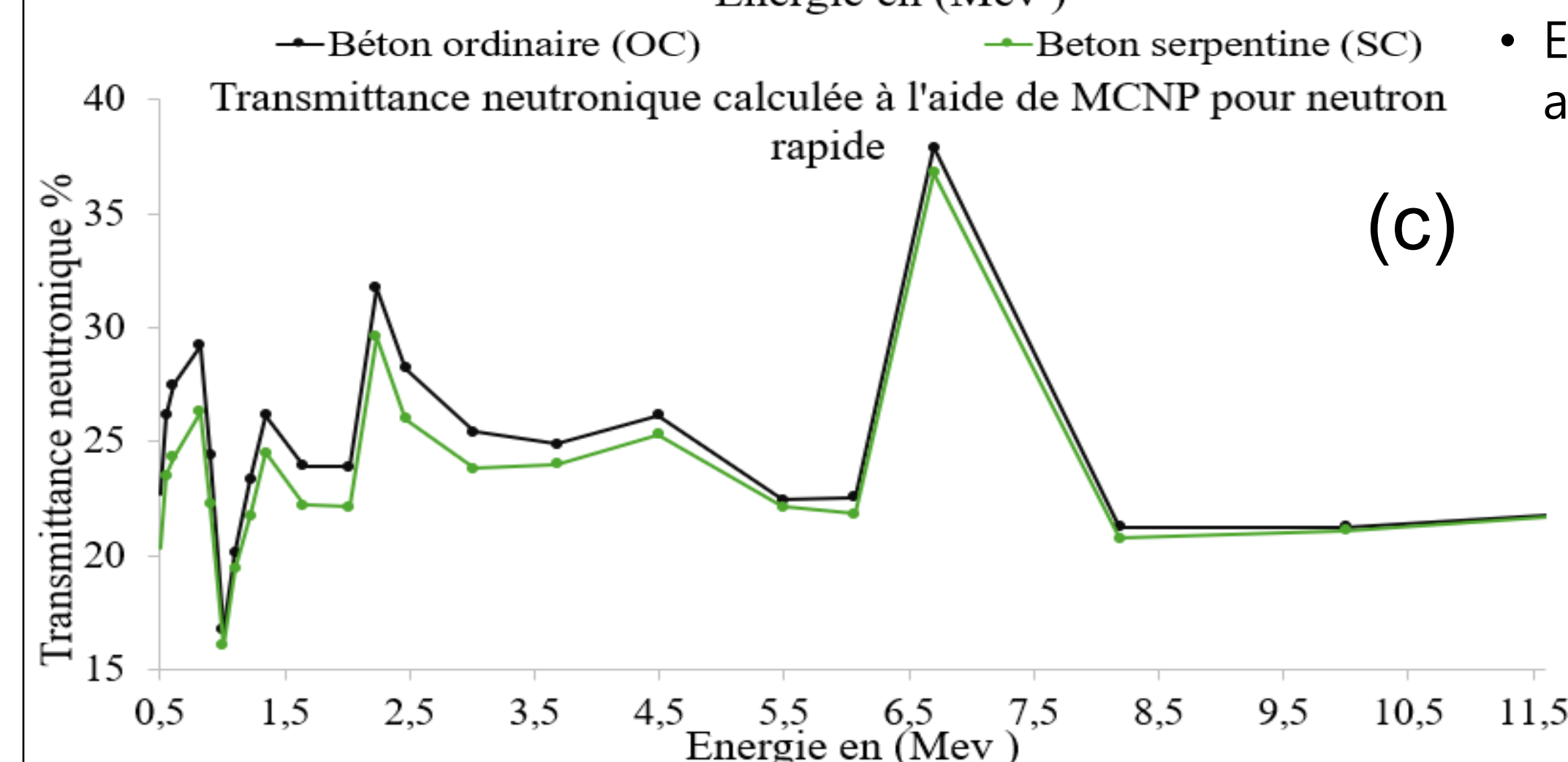
(a)

- Neutron thermique → (OC) (meilleure atténuation)



(b)

- Neutron (épithermique et rapide) → (SC) (plus performant)



(c)

- Energie supérieur → (OC) ≈ (SC) a 9 MeV (efficacité similaire)

Figure 5 : Transmittance neutronique du béton pour neutron (a) thermique, (b) épithermique, (c) rapide (^{252}Cf) d'après les résultats de l'article. [1]

➤ L'étude analysera aussi l'effet de la granulométrie des agrégats de serpentine sur l'atténuation neutronique du béton pour évaluer son impact sur la performance du blindage.

- Le graphique présente $\ln(D/D_0)$ en fonction de l'épaisseur du blindage (x).
- Il permet d'évaluer l'efficacité d'atténuation du béton à base de serpentine.
- Il met en évidence les différences de performance selon les granulométries du béton.

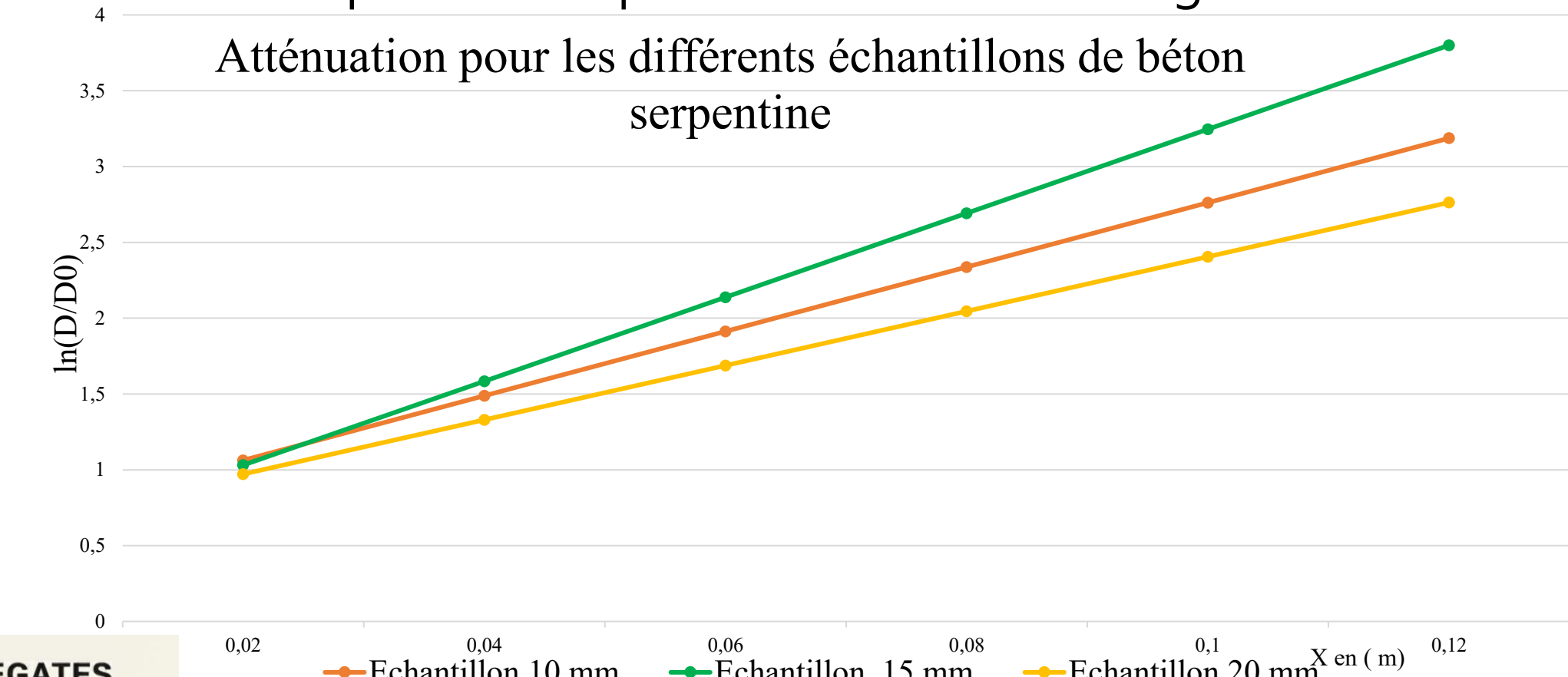


Figure 6 : Atténuation des neutrons (Am-Be) en fonction de l'épaisseur et de la taille du granulat de béton à base de serpentine d'après les données de l'article. [3]

- L'utilisation de granulats de 10 mm augmente la surface spécifique donc augmentation de la microporosité
- Les granulats de 20 mm sont difficiles à manier et présentent une mauvaise répartition dans le mélange.
- Les granulats de 15 mm offrent une compacité facilement atteignable.

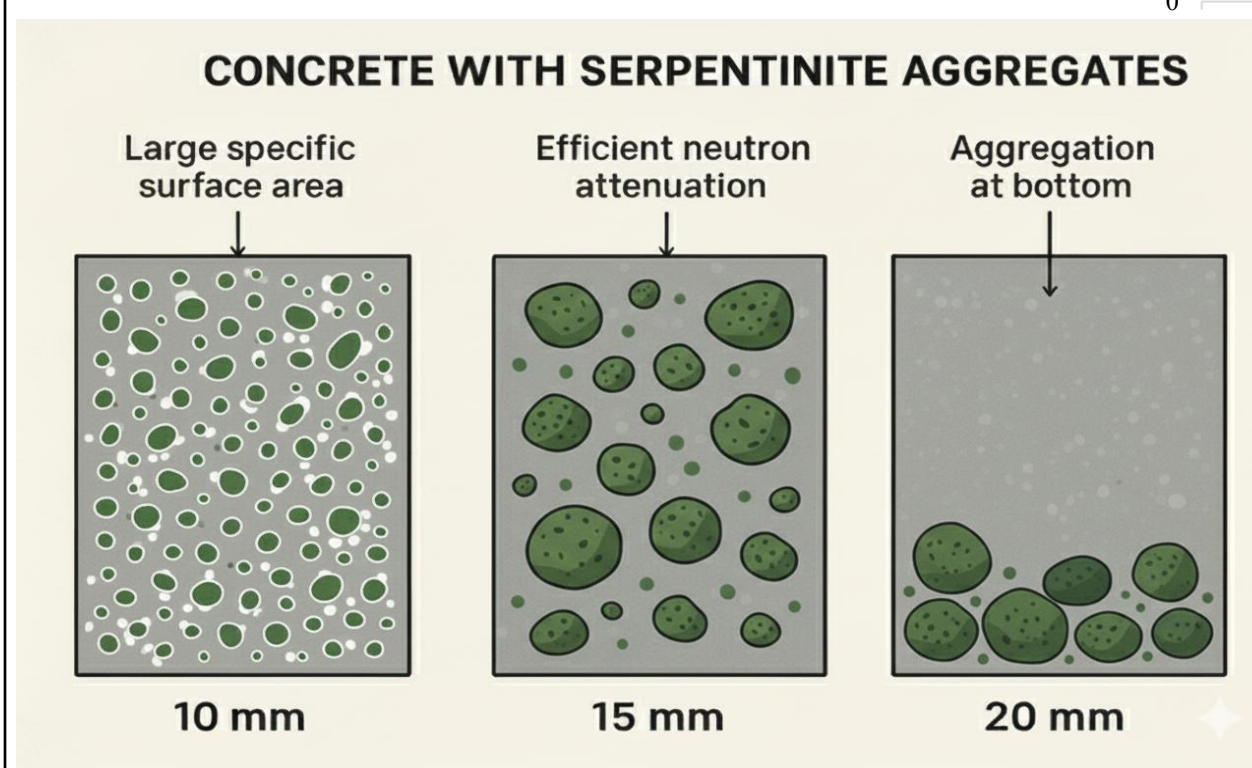


Figure 7 : Illustration de l'Impact de la Granulométrie de la Serpentine sur l'Homogénéité et l'Atténuation du Béton (image générée par AI)

Conclusion

Le choix du béton dépend fortement du type de neutrons à atténuer.

- Neutrons thermalisés → Béton ordinaire recommandé
- Neutrons rapides → Béton à base de serpentine préférable
- Permet même protection qu'un béton ordinaire → épaisseur de blindage réduite
- Faible production de rayonnements secondaires
- Principalement quelques gamma de capture de faible énergie
- Pas de neutrons secondaires
- Activation négligeable

Bibliographie

- [1] B. El Azzaoui *et al.*, « Assessment of radiation shielding properties for some concrete mixtures against photon and neutron radiations », *Nuclear Analysis*, vol. 4, n° 1, p. 100152, mars 2025, doi: 10.1016/j.nucana.2025.100152.
- [2] A. Rawheya, H. Galal Saad, S. Thomas, et B. Mahmoud, « Assessment of Five Concrete Types as Candidate Shielding Materials for a Compact Radiation Source Based on the IECF », *Materials*, vol. 16, n° 7, p. 2845, janv. 2023, doi: 10.3390/ma16072845.
- [3] K. Adedoyin, F. Oyekunle, et S. John, « Determination of linear attenuation coefficient of aggregate serpentine concrete exposed to gamma and neutron radioactive sources », *International Journal of Engineering Research Updates*, vol. 4, p. 1-009, janv. 2023, doi: 10.53430/ijeru.2023.4.1.0068.
- [4] B. EL Azzaoui, O. Kabach, M. Y. Messous, E. mahjoub Chakir, et E. M. Alibrahmi, « Optimizing neutron shielding: A specialised container approach for Disused Sealed Radioactive Sources and orphan neutron emitters », *Nuclear Analysis*, vol. 4, n° 1, p. 100140, mars 2025, doi: 10.1016/j.nucana.2024.100140.
- [5] R. G. Abrefah, K. Tuffour-Achampong, et P. Amoah, « Effectiveness of Serpentine Concrete as Shielding Material for Neutron Source Facility Using Monte Carlo Code », *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2023, n° 1, p. 8986638, 2023, doi: 10.1155/2023/8986638.