

#### Introduction

Depuis les débuts de l'énergie nucléaire, le graphite occupe une place importante dans la conception des réacteurs, utilisé à la fois comme modérateur neutronique, matériau structural et composant du cœur. Dans les années 1950 à 1970, il a permis le développement des réacteurs UNGG en France et RBMK en Union soviétique, grâce à sa stabilité thermique et sa faible absorption neutronique. Cependant, ces modèles anciens ont révélé des faiblesses de sûreté, notamment lors de l'accident de Tchernobyl (1986), entraînant une remise en question du rôle du graphite dans les réacteurs nucléaires.

Face à ces limites, la recherche s'est tournée vers des systèmes plus sûrs et performants : les réacteurs à très haute température (HTGR). Ces réacteurs conservent le graphite et utilisent un gaz hélium inerte comme fluide caloporteur, permettant un fonctionnement à très haute température et un rendement énergétique important. Toutefois, sous l'effet de l'irradiation neutronique et des conditions thermiques extrêmes, le graphite se modifie, se fragilise et devient radioactif en fin de vie [1].

**Quels sont les effets des irradiations neutroniques sur le graphite nucléaire et comment peut-on en atténuer son activité lorsqu'il devient un déchet ?**

#### I – Les réacteurs HTGR

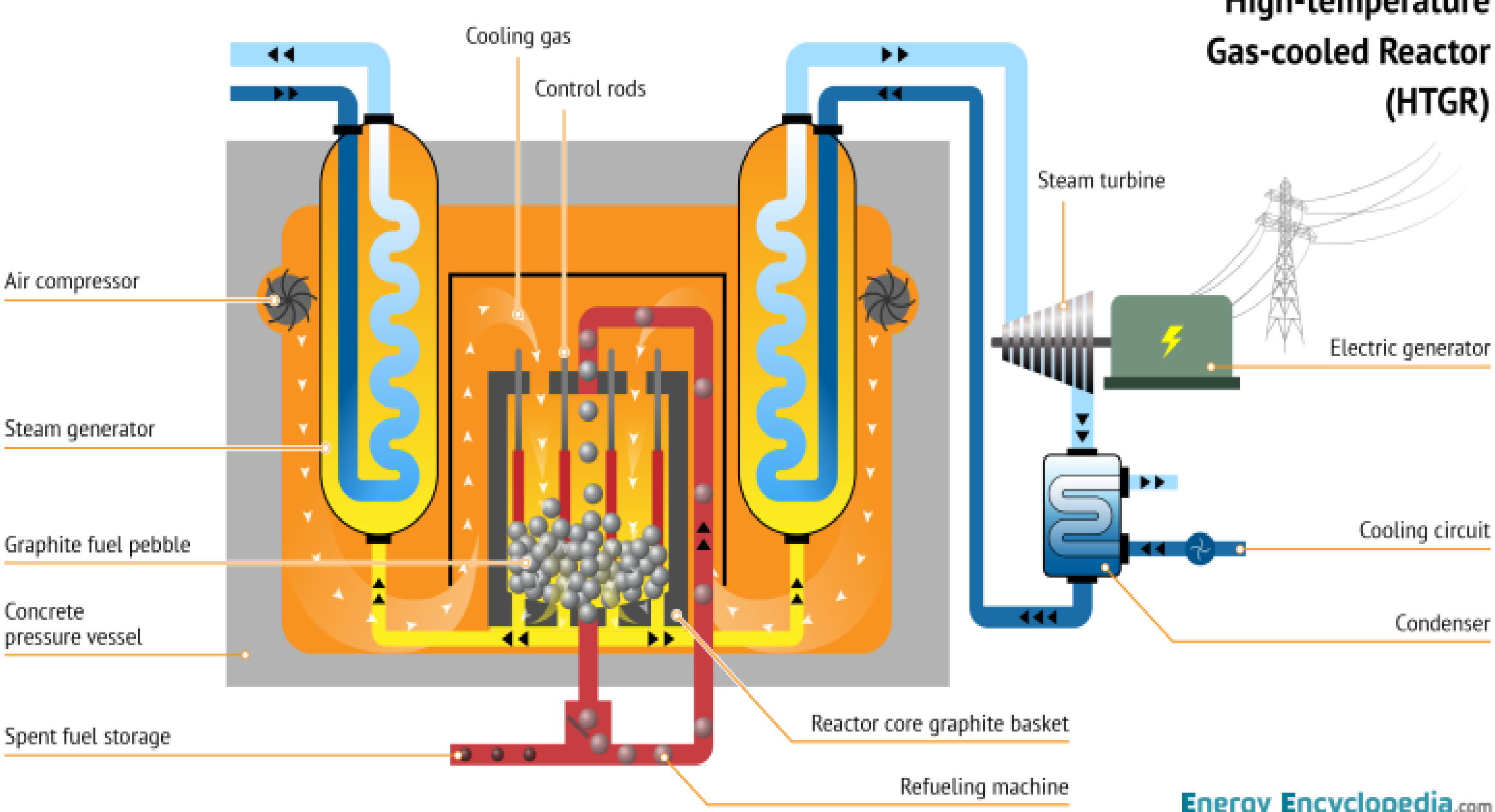


Figure 1 : Schéma d'un High-temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), Energy Encyclopedia [3].

Tableau 1 : Composants du réacteur HTGR, réalisé avec [2], [3]:

Modérateur et matériau structural	Graphite
Caloporteur	Hélium
Combustible	TRISO (Tri-structural Isotropic)
Température	Entre 750 et 950 °C

#### III – Conséquences et sûreté

##### Irradiation neutronique

- Création de défauts
- Fermeture de pores
- Evolution anisotrope

##### Evolution microstructurale

- Densification/fermeture des micropores
- Microfissures localisées

##### Propriétés physiques altérées

- Conductivité thermique
- Contraintes mécaniques internes
- Gradients thermiques / hotspots
- Voies d'oxydation

##### Risques

- Rupture locale ou déformation des blocs
- Diminution de durabilité à long terme
- Situations d'arrêt d'urgence

Importance du suivi et contrôle de l'évolution microstructurale pour maintenir la performance et la sûreté des HTGR.

**Mais comment gérer le graphite lorsqu'il devient un déchet ?**

[3,4]

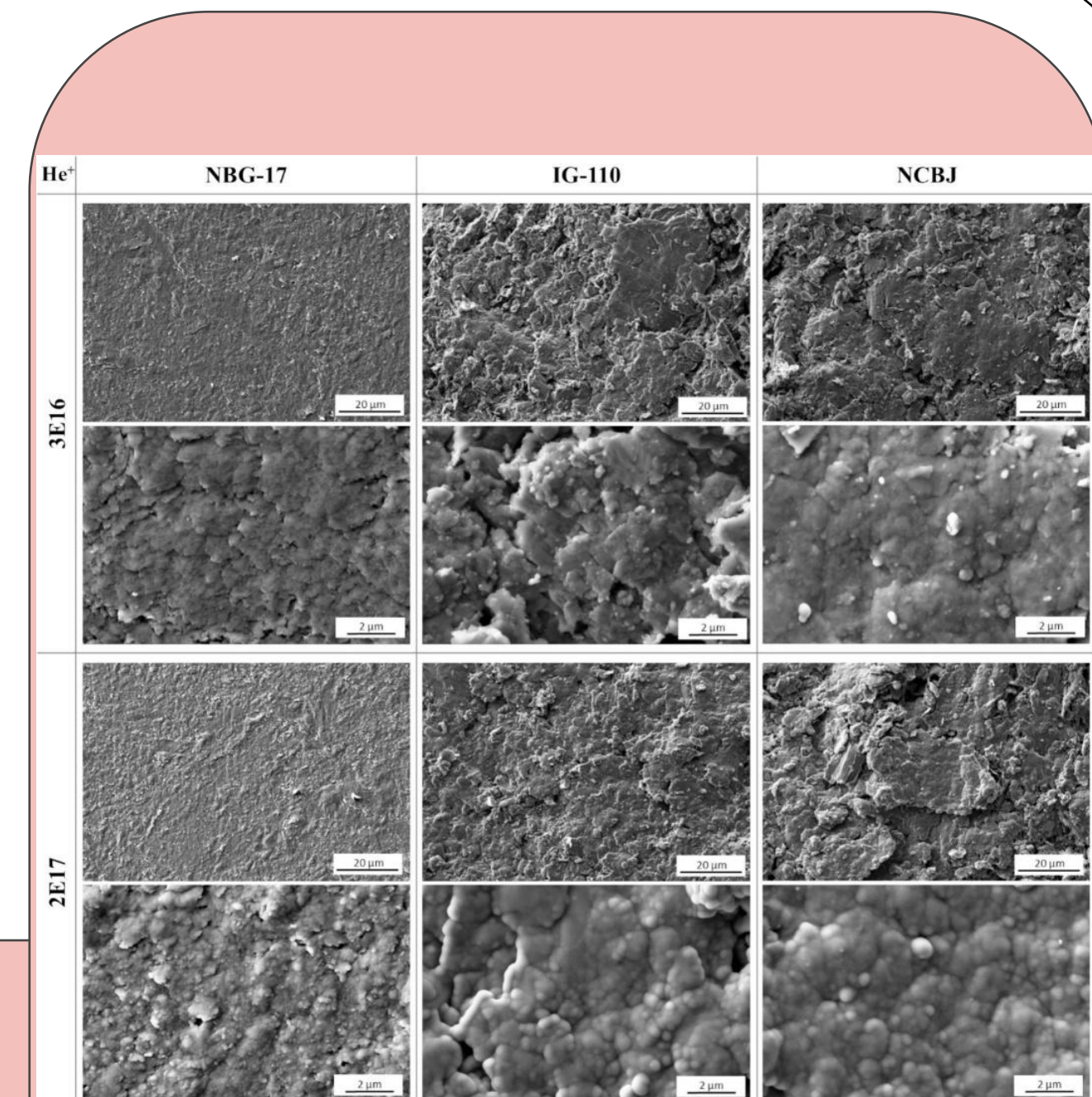


Figure 3 : Images MEB de graphites nucléaires après irradiation [5].

#### II – Impact des irradiations neutroniques sur le graphite nucléaire

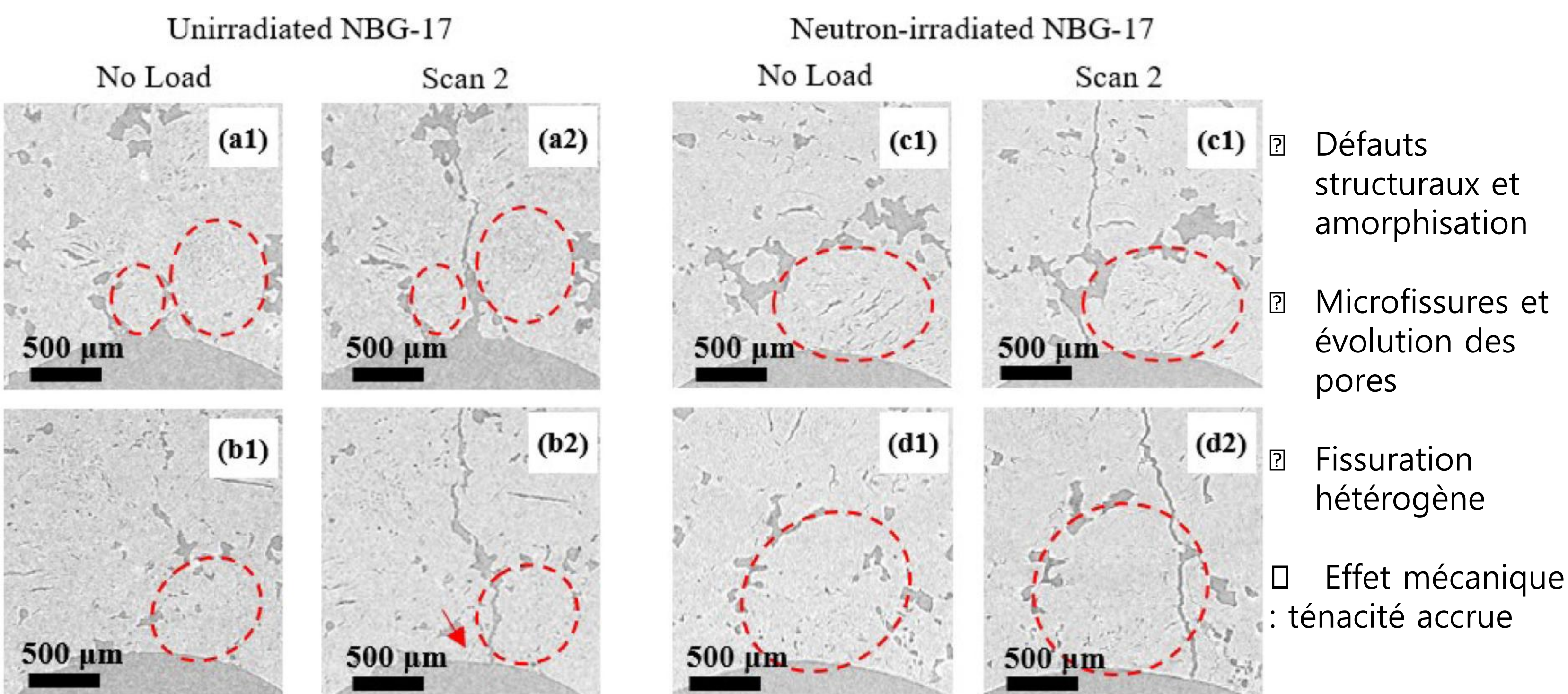


Figure 2 : Coupes 2D micro-CT, amorçage de fissures dans le graphite NBG-17 : (a, b) avant irradiation et (c, d) après irradiation. Les images a1–d1 présentent la microstructure initiale, et a2–d2 montrent les mêmes zones après fissuration. Les cercles rouges indiquent les particules de remplissage [4].

#### IV – Traitement post-utilisation

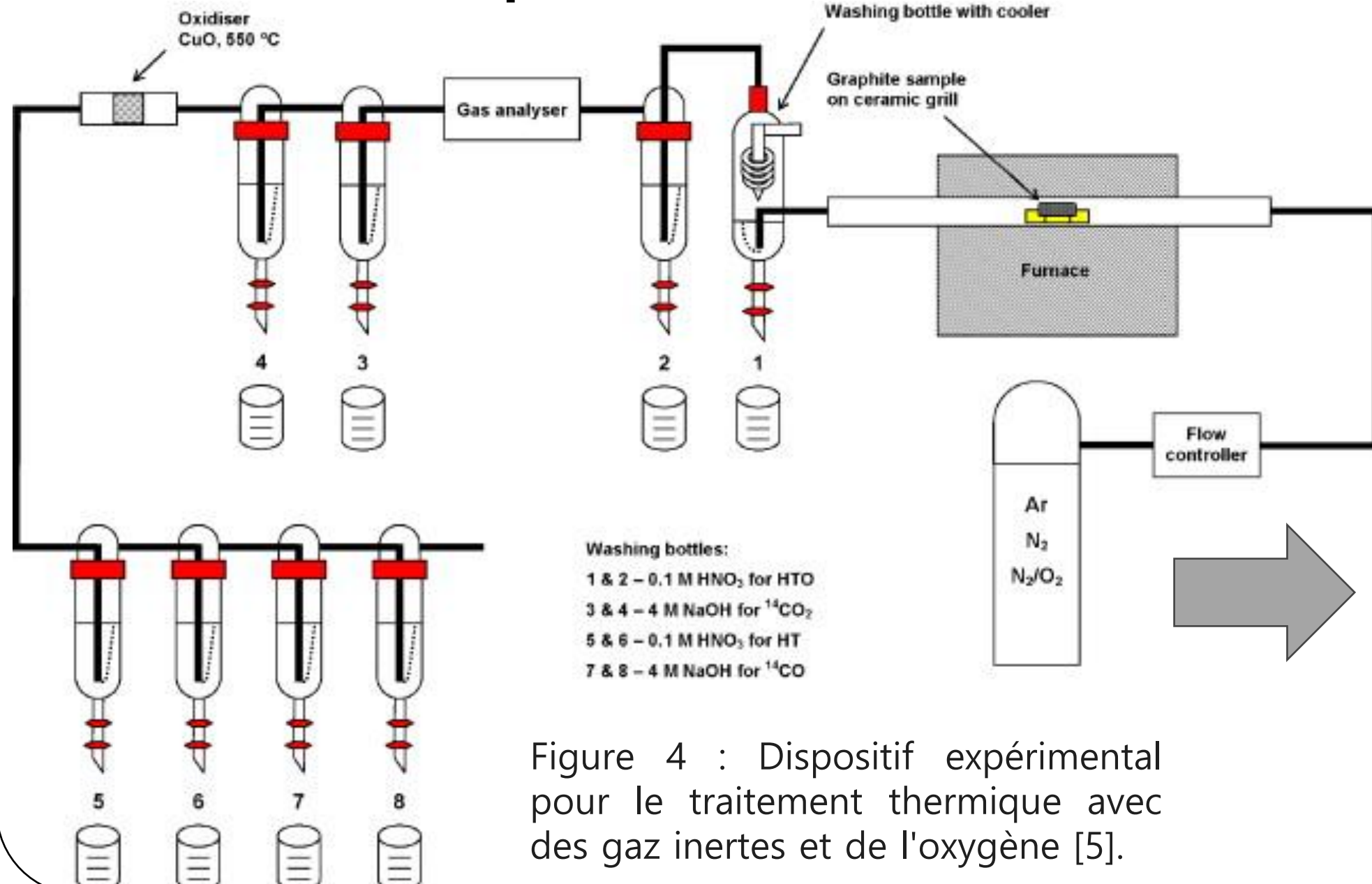


Figure 4 : Dispositif expérimental pour le traitement thermique avec des gaz inertes et de l'oxygène [5].

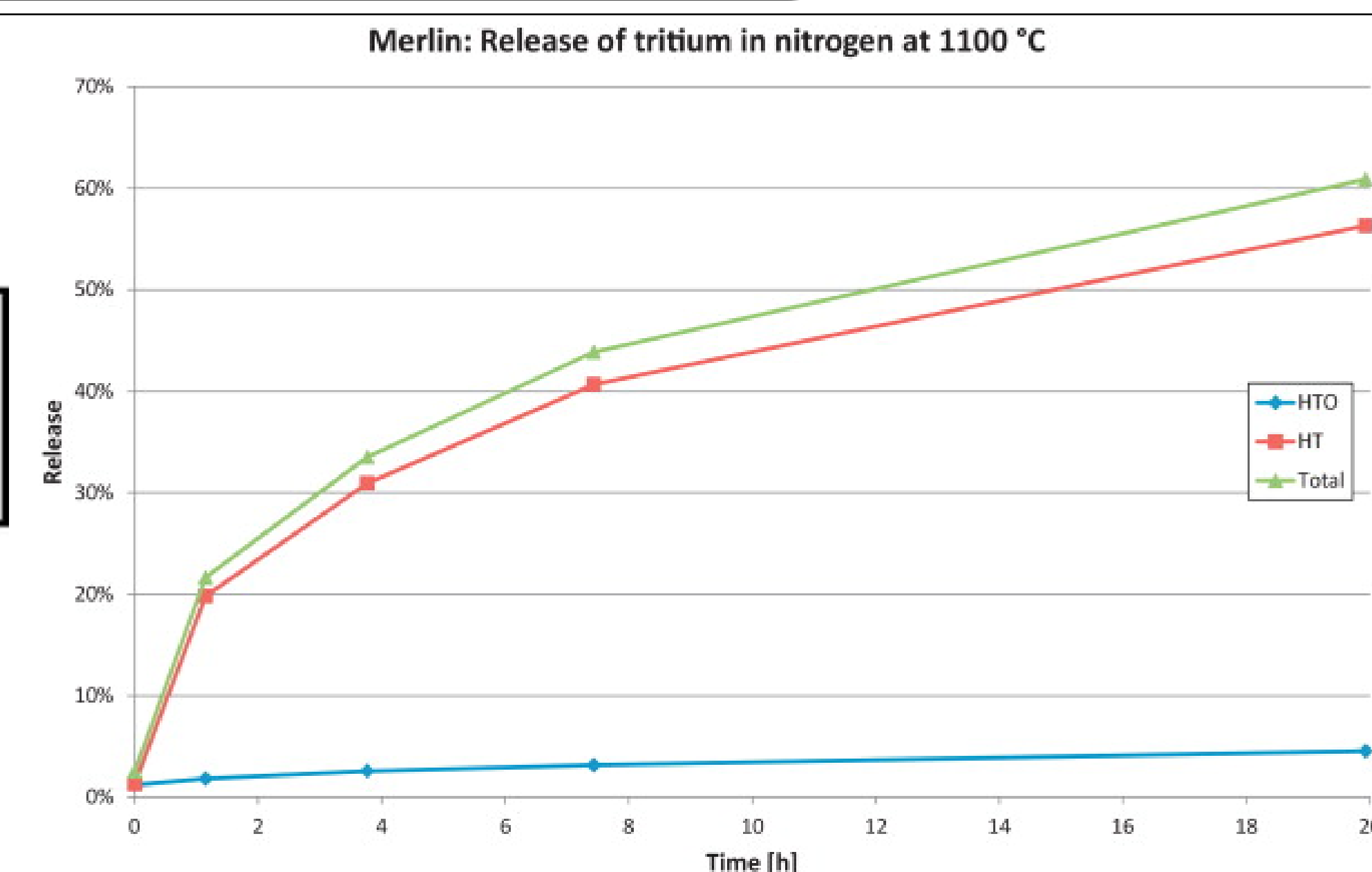


Figure 5 : Courbes de libération de tritium du graphite Merlin dans l'azote à 1100 °C (perte de masse après 20 h : 0,20 %) [5].

Tableau 2 : Avantages et limites réalisé avec [5] :

Accumulation / Irradiation	<sup>3</sup> H et <sup>14</sup> C
Traitement thermique	Gaz inertes / Oxygène
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Libération efficace du tritium (isotope mobile),</li> <li>- Processus contrôlable (température, atmosphère),</li> <li>- Caractérisation avant stockage,</li> <li>- Applicable à différents graphites irradiés (cœur, modérateur, réflecteur)</li> </ul>
Limites	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible libération du carbone-14 (reste fortement piégé),</li> <li>- Processus énergivore à haute température,</li> <li>- Ne réduit pas l'activité totale → le graphite reste un déchet nucléaire,</li> <li>- Coûteuse et complexe</li> </ul>

#### Conclusion

Le graphite des réacteurs HTGR subit, sous l'effet de l'irradiation neutronique, d'importantes évolutions microstructurales : densification, fermeture de pores, fissures localisées et altérations des propriétés thermiques. Ces transformations influencent directement la tenue mécanique des blocs, la géométrie du cœur et, par conséquent, la sûreté du réacteur [2].

En fin de vie, le graphite devient un déchet activé, principalement chargé en tritium et carbone-14. Le traitement thermique étudié dans la littérature permet de réduire efficacement la fraction mobile du tritium et d'améliorer la stabilité du matériau, mais reste limité pour le carbone-14. Malgré ces contraintes, cette méthode constitue aujourd'hui une piste réaliste pour diminuer les risques associés au stockage à long terme. La compréhension et la maîtrise de l'évolution du graphite, depuis l'irradiation jusqu'au traitement post-utilisation, représentent donc un enjeu essentiel pour la sûreté et la durabilité des réacteurs HTGR de quatrième génération [3], [5].

#### Bibliographie

- [1] Wilczopolska, M., Suchorab, K., Gawęda, M., Frelek-Kozak, M., Ciepielewski, P., Brykała, M., Chmurzyński, W., Józwiak, I., 2024. Evolution of radiation-induced damage in nuclear graphite – A comparative structural and microstructural study. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111247>
- [2] Fütterer, M.A., Fu, L., Sink, C., de Groot, S., Pouchon, M., Kim, Y.W., Carré, F., Tachibana, Y., 2014. Status of the very high temperature reactor system. Progress in Nuclear Energy 77, 266–281. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.013>
- [3] Encyclopedia, E., n.d. High Temperature Reactor (HTGR) - Nuclear energy - Energy Encyclopedia. <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/the-nuclear-reactors/high-temperature-reactor-htgr>
- [4] Liu, G., Morankar, S., Cunningham, A., Chirazzi, W., Windes, W., Du, J., Haque, A., 2025. Through-thickness fracture behavior of neutron-irradiated nuclear graphite NBG-17 Using X-ray micro-CT. <https://doi.org/10.1016/j.inucmat.2025.156119>
- [5] Vulpius, D., Baginski, K., Kraus, B., Thomauske, B., 2013. Thermal treatment of neutron-irradiated nuclear graphite. Nuclear Engineering and Design 265, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.09.007>