

# Le Micro Modular Reactor (MMR®) : un micro réacteur permettant le déploiement des réacteurs à haute température refroidis au gaz ?

Adrien PICARD

Master 2 Risques Environnementaux et Sûreté Nucléaire

**I. Introduction :** Un réacteur refroidi par gaz à haute température (HTGR ou HTR) est un réacteur nucléaire à neutrons thermiques qui peut fournir une énergie thermique de 750°C à 950 °C en utilisant un combustible de forme sphérique. Dès 1947, un projet de réacteur refroidi à l'hélium, avec un combustible composé d'uranium dispersé dans des boulets d'oxyde de béryllium ou de graphite, a été élaboré aux Etats-Unis [1]. Puis la filière a été développée au Royaume-Uni (projet Dragon de HTGR expérimental de 20 MWt dans les années 1950 [2]) et aux Etats-Unis, mais surtout en Allemagne pour être arrêtée pour des raisons sociopolitiques ou économiques, et pas en raison de difficultés techniques. Néanmoins, le niveau de sûreté des derniers HTR développés dans les années 80 est d'ores et déjà supérieur à celui des autres réacteurs sélectionnés par le forum international de Génération IV [1]. La réduction de la taille des centrales avec les microréacteurs (<20 MWe) est vue comme une réduction du coût d'investissement et une augmentation de la sûreté des installations nucléaires [3]. Les microréacteurs sont potentiellement capables de pénétrer de nouveaux marchés où les technologies énergétiques à grande échelle ne sont pas adaptées [4].

## II (a). Matériels et méthodes : un combustible à Particules (TRISO) : le combustible nucléaire entièrement micro-encapsulé en céramique (FCM®)

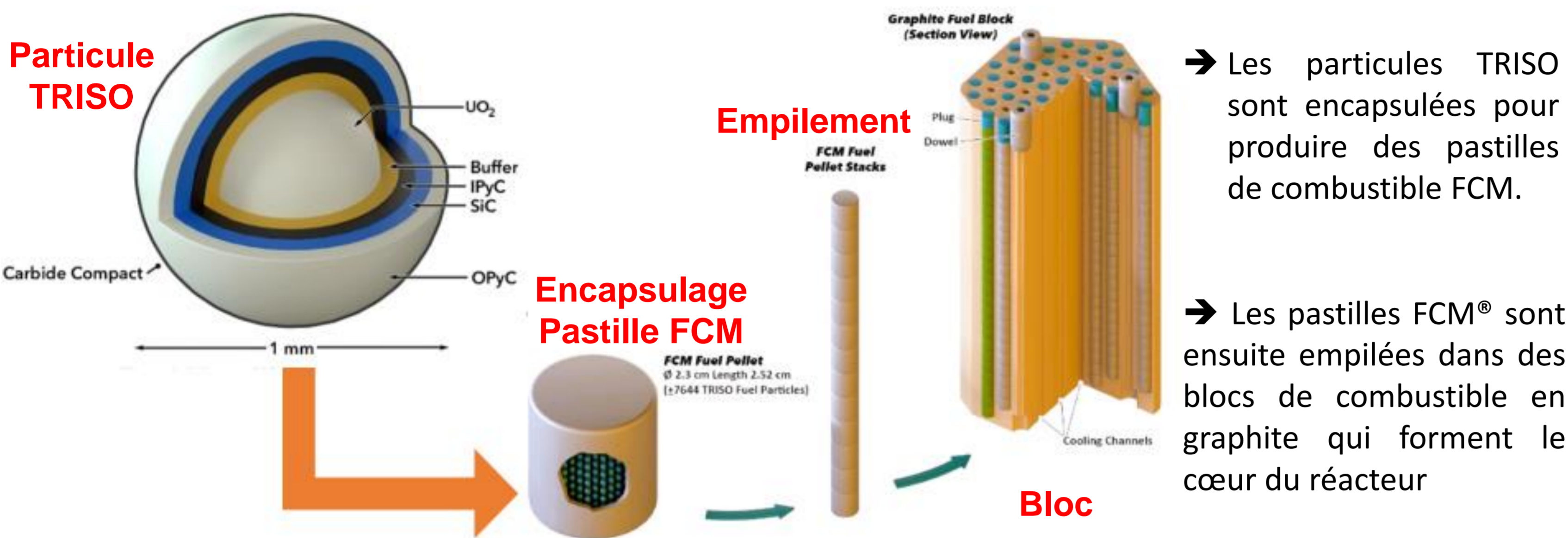


Fig.1 Composants du cœur du réacteur MMR® : MMR® (Ultra Safe Nuclear Corporation UNSC, 2021) [5]

Les Particules TRISO permettent le confinement de la matière radioactive et des produits de fission. Elles comportent 4 couches de revêtement :

- **Tampon PyC poreux (PyroCarbone poreux)** qui assure le découplage mécanique entre le noyau et les couches de revêtement externes denses permettant ainsi un certain degré de gonflement du noyau
- **IPyC : Carbone Pyrolytique dense** pour l'étanchéité (gaz rare et halogène) et tenue mécanique de la couche SiC
- **SiC : Carbure de silice (céramique)** : permet une résistance thermique et mécanique importante et assure l'étanchéité vis-à-vis des produits de fission ( $^{134}\text{CS}$ ,  $^{137}\text{CS}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^3\text{H}$ ...) (= La principale barrière de confinement)
- **OPyC** pour l'étanchéité (gaz rare et halogène) + contribue à la résistance mécanique des particules

→ **Avantages** à ce type de combustible [6] :

- Grande surface spécifique → bon échange thermique avec la matrice graphite et caloporteur
- Forme sphérique des particules → grande résistance mécanique [6]

→ Les particules TRISO sont encapsulées pour produire des pastilles de combustible FCM.

→ Les pastilles FCM® sont ensuite empilées dans des blocs de combustible en graphite qui forment le cœur du réacteur

## II (b). Le Micro Modular Reactor (MMR®)

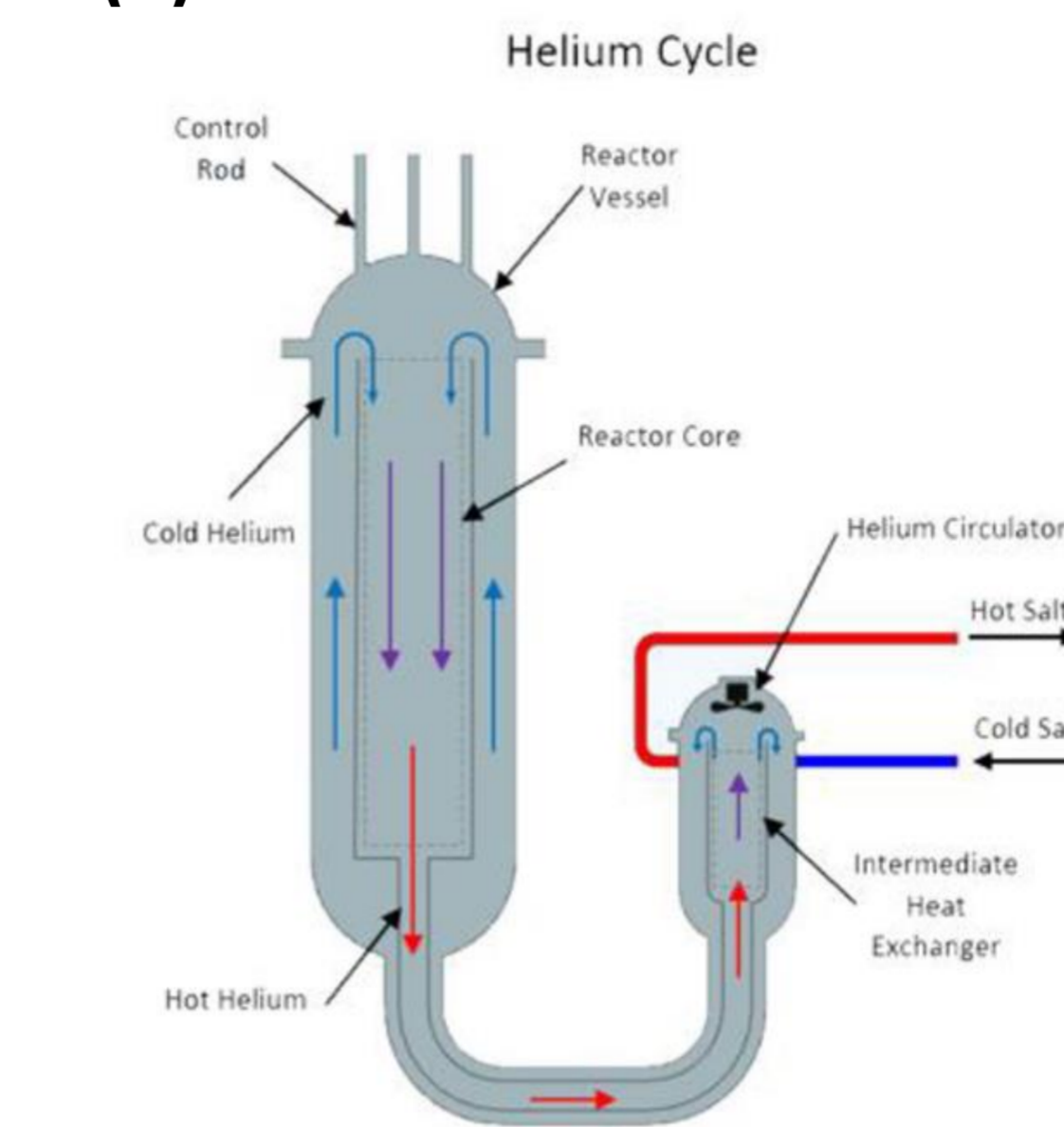


Fig.2 Configuration du réacteur nucléaire MMR® Schéma de processus simplifié (Global First Power, 2019) [7]

Caractéristiques :

- Fluide caloporteur : Hélium (gaz)
- Modérateur : Graphite (+ Rôle de structure du cœur + fonction de réflexion)
- Enrichissement combustible  $\text{UO}_2$  : 19,75 % Combustible HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium)
- Durée de vie : 20 ans (scellé : sans rechargement du combustible)
- Composition modulaire : 1 à 10 unités
- Température en sortie du cœur 630 °C

→ Présence d'une usine adjacente (système de tampon de sels fondus) à la centrale nucléaire contenant le réacteur

## III. Résultats (1) : des utilisations multiples des réacteurs HTR

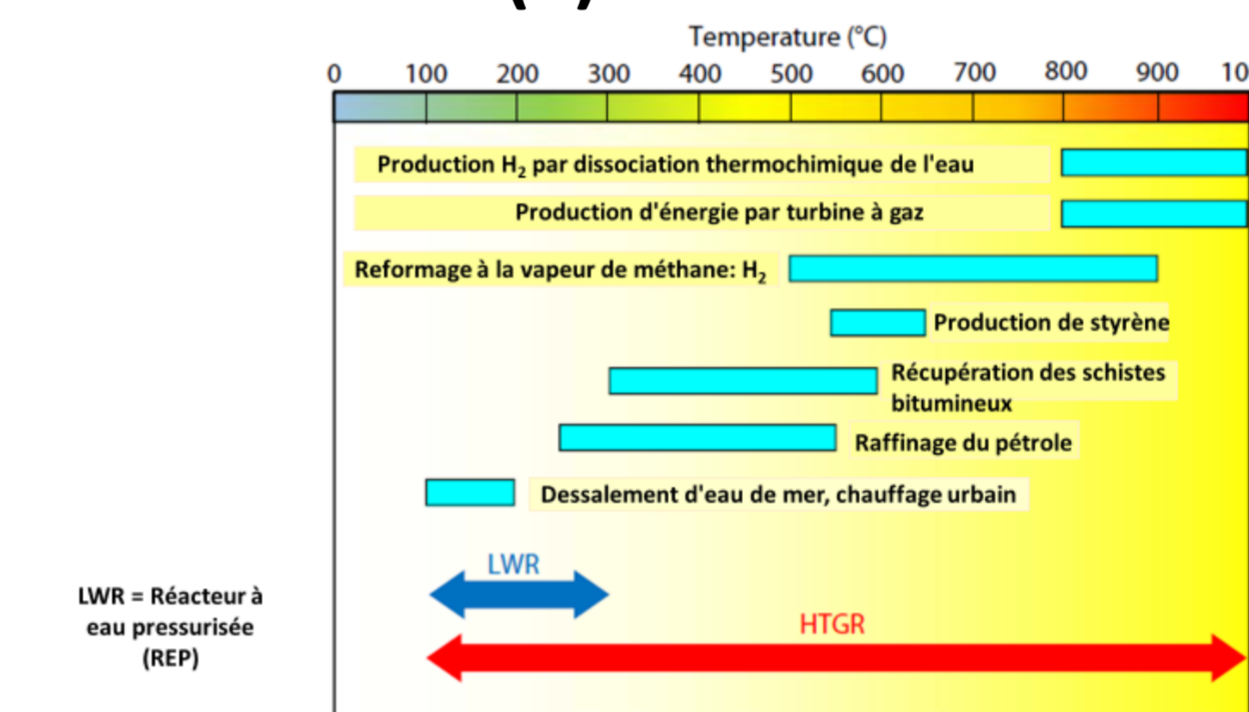


Fig.3 Plages de température d'alimentation en chaleur par les réacteurs HTGR et applications de chaleur potentielles (adapté de Iwatsuki et al., 2021) [8]

→ Ce type de réacteur peut fournir une large gamme de températures et de pressions exigées par les industries pétrolières et chimiques

→ Source de chaleur industrielle : nouvelle application de l'énergie nucléaire dans l'industrie

→ Sidérurgie nucléaire (Japon)

## III. Résultats (2) - Un intérêt certain en terme de sûreté : combinaison de la sûreté des HTGR et des microréacteurs/SMR (Système de sûreté Passive) et réduction du volume de déchets

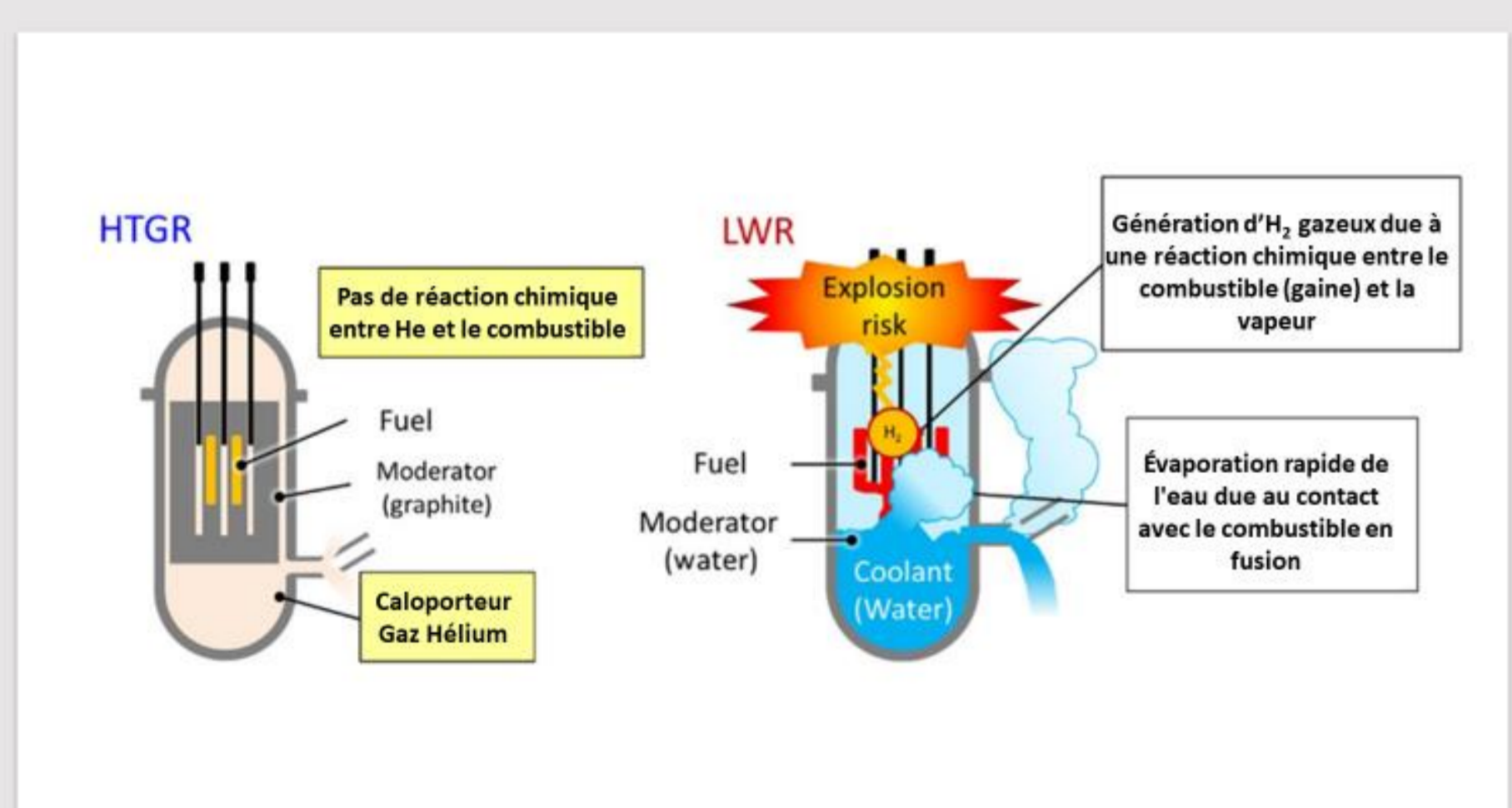


Fig.4 Caractéristiques de sûreté des réacteurs HTGR contre l'explosion d'H<sub>2</sub> et l'explosion de vapeur par rapport au réacteur à eau pressurisé (LWR) (adapté de Iwatsuki et al., 2021) [8]

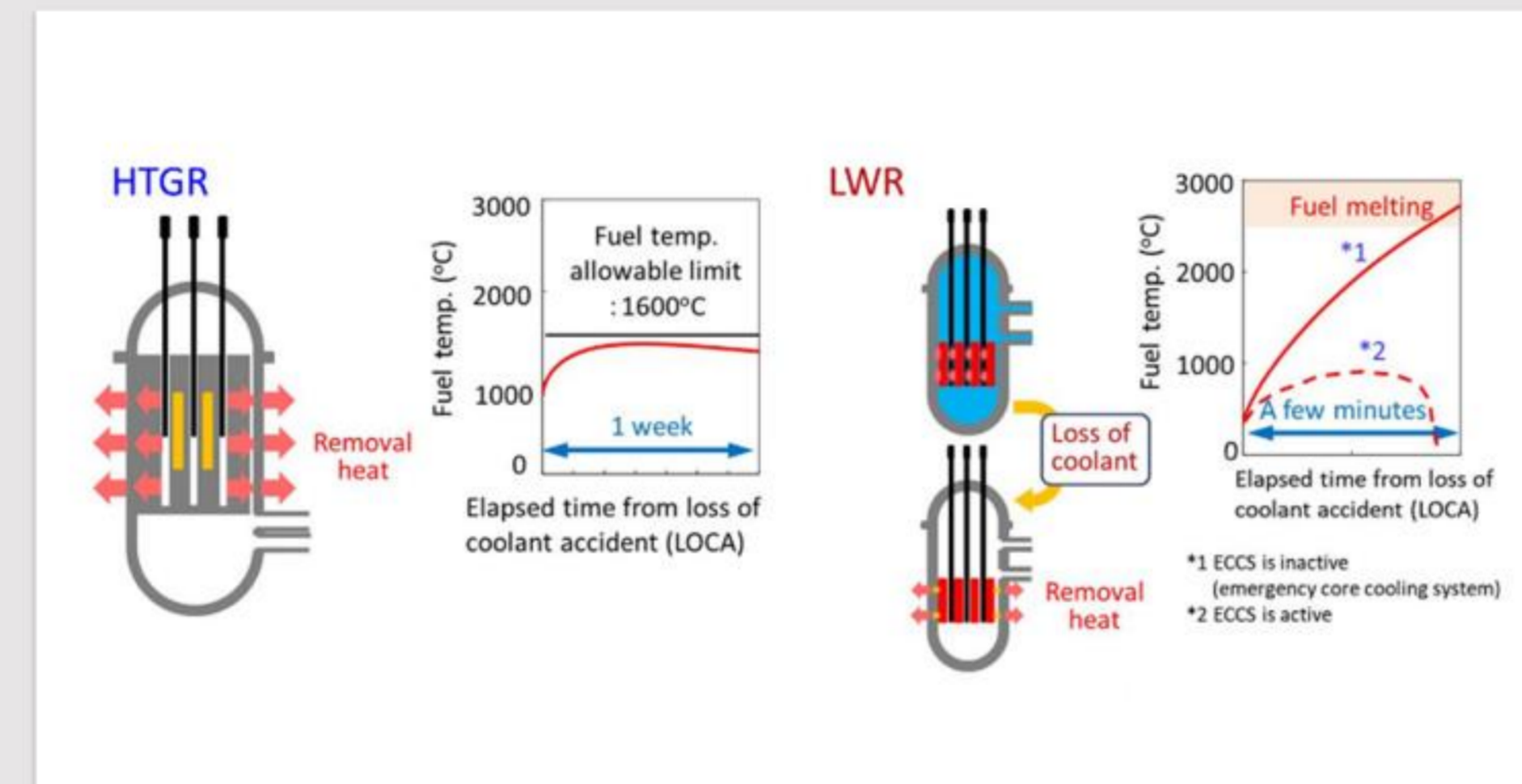


Fig.5 Caractéristiques de sûreté des réacteurs HTGR en situation accidentelle par rapport au réacteur à eau pressurisé (LWR) (Iwatsuki et al., 2021) [8]

Les caractéristiques de sûreté passive des réacteurs modulaires (HTGR) sont conceptuellement bien connues [9].

→ Une sûreté intrinsèque importante : He gazeux est inerte chimiquement avec le combustible et les structures du cœur ainsi il ne peut se produire de formation de H<sub>2</sub> (pas d'explosion) ni d'explosion de vapeur.

→ La puissance résiduelle étant évacuée du cœur essentiellement par conduction et rayonnement thermique, aucun système de refroidissement supplémentaire n'est nécessaire. Cela limite l'élévation de la température du combustible jusqu'à la limite de conception.

→ Les particules de combustible peuvent assurer un confinement efficace jusqu'à 1600°C (pas de fusion du cœur).

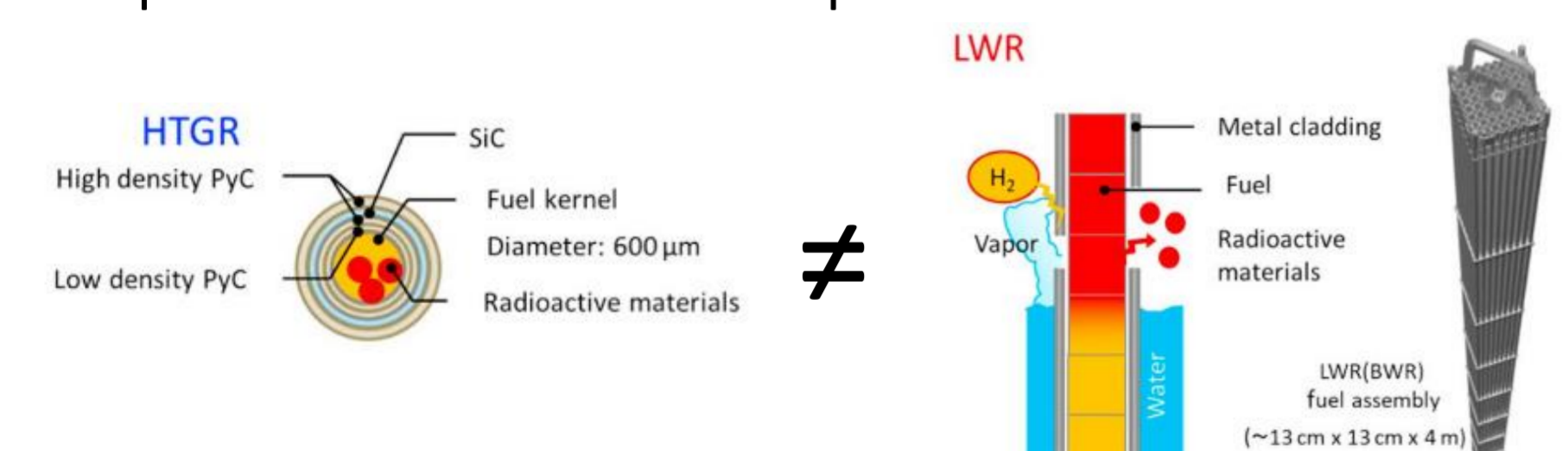


Fig.6 Caractéristiques de sûreté des réacteurs HTGR contre le rejet de produits de fission par rapport aux réacteurs à eau pressurisée (LWR) (adapté de Iwatsuki et al., 2021) [8]

→ Enfin, la quantité de déchets hautement radioactifs peut être réduite à un quart de celle des REP (Iwatsuki et al., 2021)

Fig.7 Diminution de la quantité de déchets hautement radioactifs avec les réacteurs HTGR par rapport aux réacteurs à eau pressurisée (LWR) (adapté de Iwatsuki et al., 2021) [8]

## IV. Discussion : les limites de ce type de réacteur

Certaines caractéristiques des réacteurs HTGR sont susceptibles toutefois d'en limiter le déploiement :

→ **Fuite d'hélium contenant des produits de fission gazeux** : il existe des problèmes d'étanchéité du circuit hélium voire des taux de fuite importants en fonctionnement nominal [1]

→ **Nouvelles exigences réglementaires** nécessaires pour des technologies (réacteur, combustible) non utilisées actuellement : disponibilité limitée de données opérationnelles [4] + **disponibilité du combustible HALEU** [3]

→ **Cycle fermé du combustible complexe** à mettre en œuvre (recyclage du graphite du cœur)

→ Enfin, le comportement de ce type de combustible est complexe et les **modes de ruine des particules** en réacteur sont nombreux [6] (Cf. Figure 8).

→ Existence de **problèmes de corrosion** des particules TRISO lorsqu'elles sont soumises à une forte irradiation : défaillance de la couche SiC par certains produits de fission (palladium)(Cf. Fig. 8a)

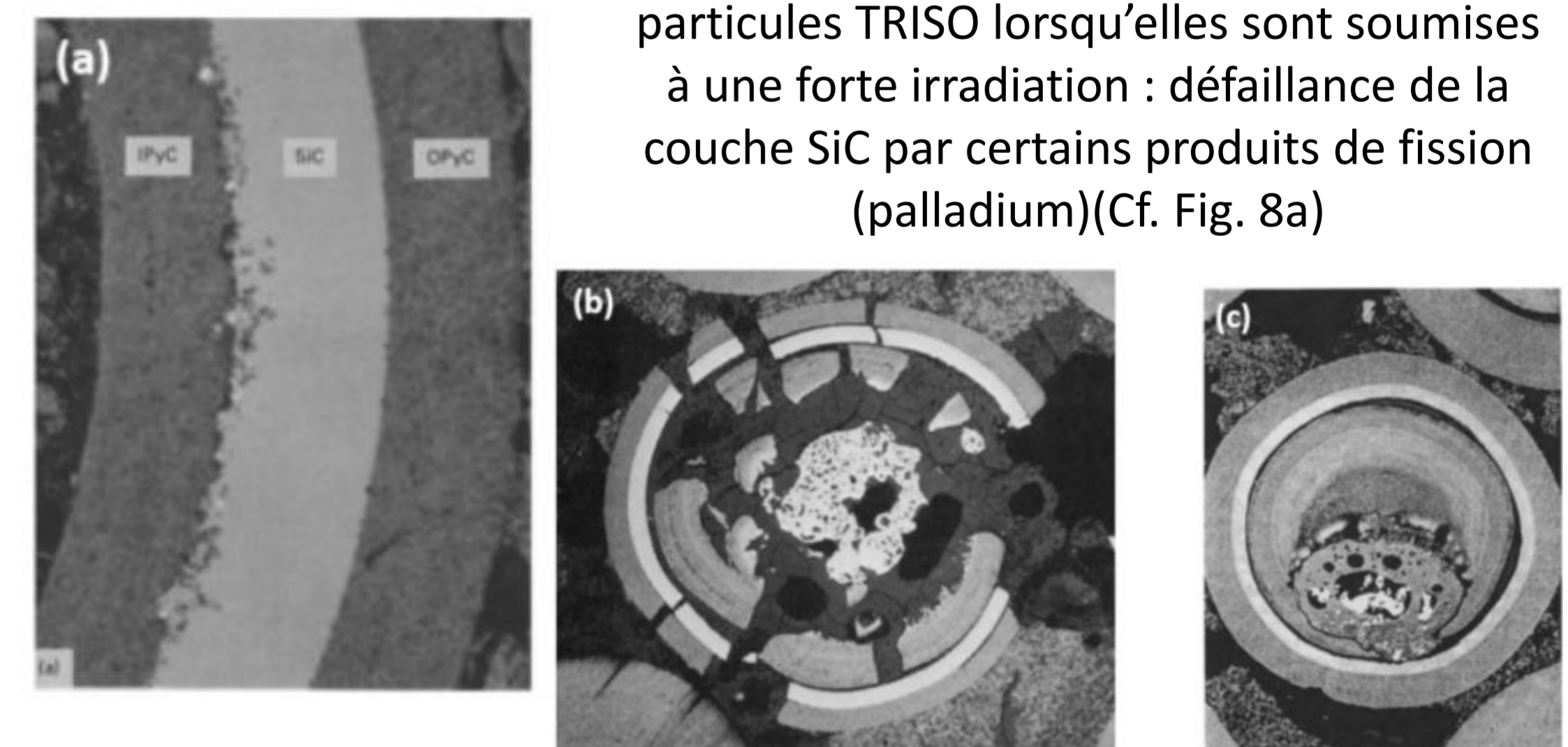


Fig.8 Exemples de mécanismes de défaillance des particules et de corrosion du revêtement. (a) Corrosion au Pd de la couche SiC dans la particule UCO. (b) Rupture de la particule sous pression. (c) Effet « amibe » Migration du noyau d'UO<sub>2</sub>. (Demkowicz et al., 2019)[2]

**V. Conclusion :** Le réacteur MMR® de type HTGR peut fournir de la chaleur à haute température permettant de multiples applications industrielles en plus de bénéficier des avantages des microréacteurs et SMR en termes de sûreté, d'adaptabilité et de coûts. Le remplacement par le réacteur HTGR des centrales à charbon ou à gaz peut contribuer à réduire la consommation de combustibles fossiles et les émissions de CO<sub>2</sub> et donc à résoudre le problème du réchauffement climatique. Une installation pilote de démonstration est prévue pour 2026 sur le site des Laboratoires (nucléaires) de Chalk River en Ontario [7], à environ 200 km au nord-ouest d'Ottawa au Canada ce qui confère un avantage certain pour le possible déploiement de ce réacteur utilisant la technologie HTGR.

**Bibliographie**

[1] IRSN, 2015. Examen des systèmes nucléaires de 4ème génération 246. [https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_expertise/surete/Pages/Rapport-Generation-IV\\_04-2015.aspx](https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/surete/Pages/Rapport-Generation-IV_04-2015.aspx) (Consulté le 24.11.2022)

[2] Demkowicz, P.A., Liu, B., Hunn, J.D., 2019. Coated particle fuel: Historical perspectives and current progress. J. Nucl. Mater. 515, 434–450. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.09.044>

[3] Testoni, R., Bersano, A., Segantini, S., 2021. Review of nuclear microreactors: Status, potentialities and challenges. Prog. Nucl. Energy 138, 103822. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103822>

[4] Black, G., Shropshire, D., Araújo, K., van Heek, A., 2022. Prospects for Nuclear Microreactors: A Review of the Technology, Economics, and Regulatory Considerations. Nucl. Technol. 0, 1–20. <https://doi.org/10.1080/00295450.2022.2118626>

[5] Ultra Safe Nuclear Corporation, 2021. UNSC Micro Modular Reactor (MMRTM Block 1) Technical Information 36. [https://www.usnc.com/assets/media-kit/\[022989\]\[01\]\\*%20MMR%20Technical%20Information%20Document.pdf?v=80a4f6ee9f](https://www.usnc.com/assets/media-kit/[022989][01]*%20MMR%20Technical%20Information%20Document.pdf?v=80a4f6ee9f) (Consulté le 19.11.2022)

[6] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Ed.), 2008. Les combustibles nucléaires, E-den. Ed. "Le Moniteur" CEA, [Paris] Gif-sur-Yvette. [https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/monographie-nucleaire/CEA\\_Monographie2\\_Combustibles-nucleaires\\_2008\\_Fr.pdf](https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/monographie-nucleaire/CEA_Monographie2_Combustibles-nucleaires_2008_Fr.pdf) (Consulté le 16.11.2022)

[7] Global First power, 2019. Project Description for the Micro Modular ReactorTM Project at Chalk River 52. <https://www.usnc.com/assets/media-kit/01%20CRP-LIC-01-001%20Rev%202%20Project%20Description.pdf?v=8598dc7837> (Consulté le 25.11.2022)

[8] Iwatsuki, J., Kunitomi, K., Mineo, H., Nishihara, T., Sakaba, N., Shinozaki, M., Tachibana, Y., Yan, X., 2021. 1 - Overview of high temperature gas-cooled reactor, in: Takeda, T., Inagaki, Y. (Eds.), High Temperature Gas-Cooled Reactors, JSME Series in Thermal and Nuclear Power Generation. Academic Press, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821031-4.00001-4>

[9] Carlson, D.E., Ball, S.J., 2016. Perspectives on understanding and verifying the safety terrain of modular high temperature gas-cooled reactors. Nucl. Eng. Des., 7th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR 2014) 306, 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.01.015>