

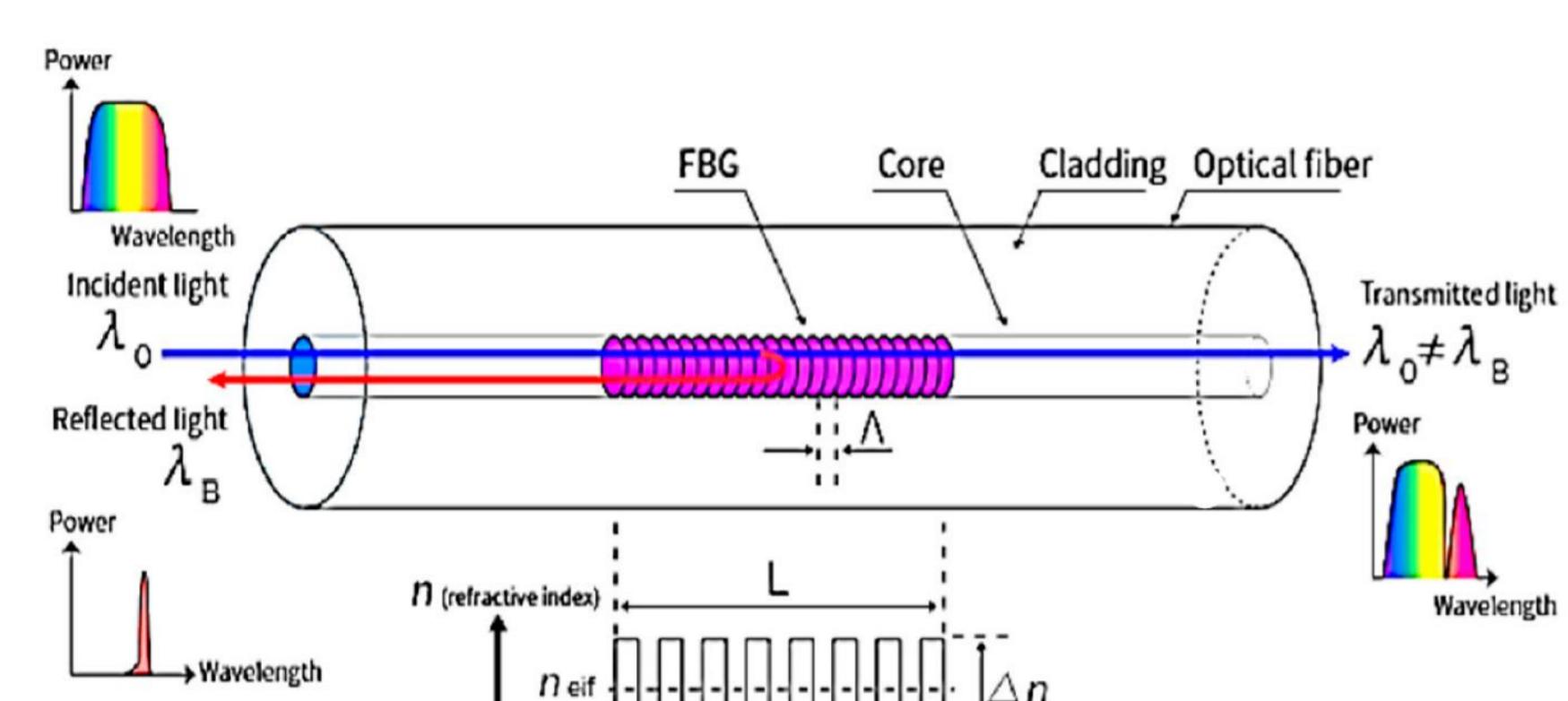
Introduction

Dans le domaine du nucléaire, la sûreté repose en grande partie sur la capacité à surveiller en temps réel l'état des installations : température, pression, contraintes mécaniques ou radiations. Les capteurs traditionnels, comme les thermocouples ou les jauge électriques, présentent toutefois des limites importantes lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées ou à des environnements fortement irradiants. C'est dans ce contexte que les capteurs à fibre optique et plus particulièrement les réseaux de Bragg (FBG) apparaissent comme une solution prometteuse et déjà performante. Leur résistance aux hautes températures, leur stabilité sous irradiation et leur capacité de multiplexage en font des outils de surveillance parfaitement adaptés aux environnements nucléaires.

comment exploiter et optimiser ces capteurs à fibre optique tout en maintenant une mesure fiable et juste afin d'assurer la sûreté de nos centrales ?

Principe de fonctionnement du capteur FBG (1,2)

Figure 1: Schéma du principe de fonctionnement du FBG



•FBG Type II : gravés par laser femtoseconde avec une densification nano-structurée assurant une stabilité thermique jusqu'à 800 °C.

•FBG régénérés (R-FBG) : créés après un traitement thermique > 650 °C, formant une silice cristallisée (cristobalite) stable au-delà de 1000 °C, même sous irradiation.

•Ces deux technologies offrent stabilité thermique, résistance aux radiations et précision de mesure idéales pour la surveillance multipoint dans les environnements nucléaires extrêmes.

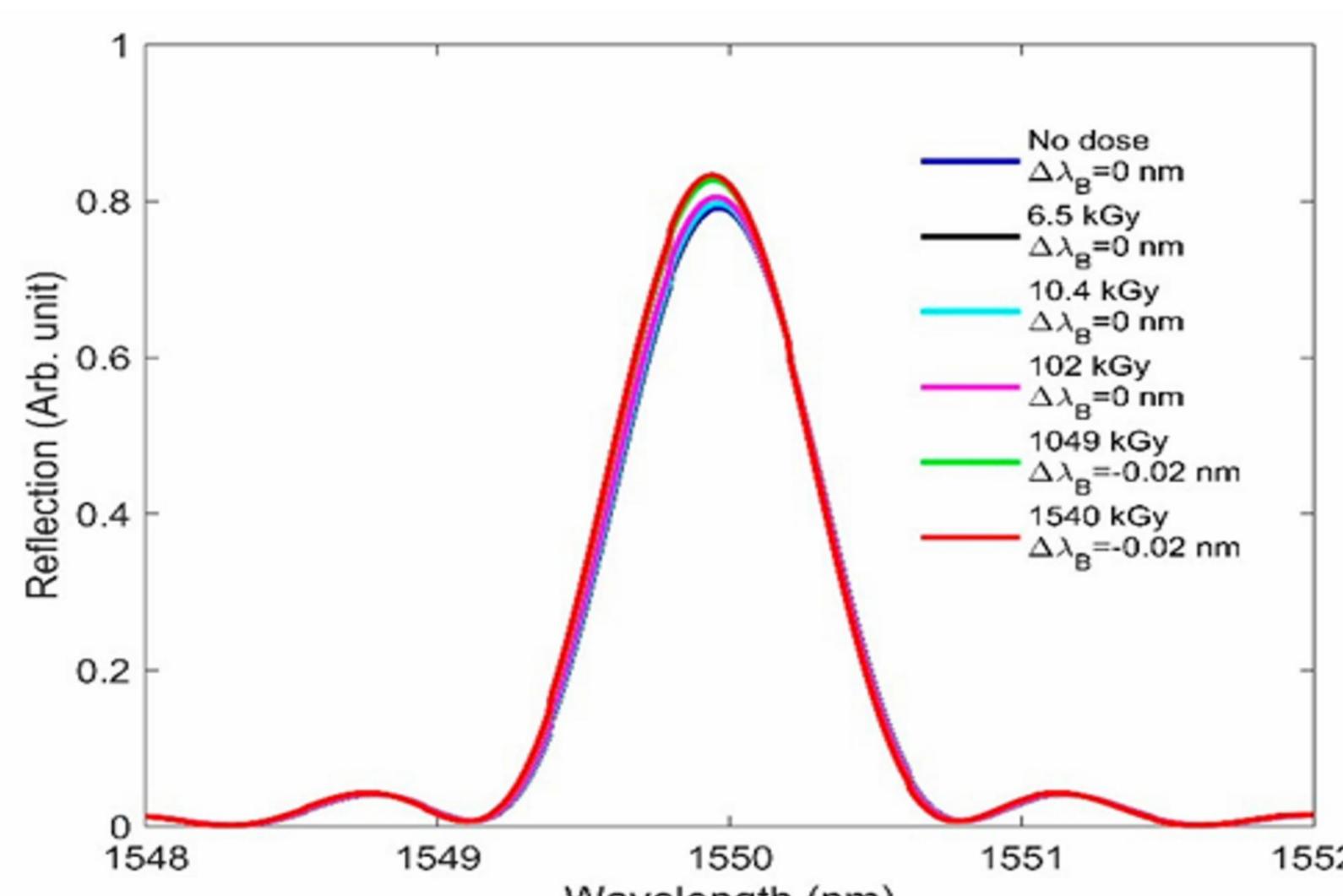
- Un réseau de Bragg (FBG) est une zone gravée périodiquement dans le cœur d'une fibre optique en silice.
- Quand la lumière traverse la fibre le réseau réfléchit une longueur d'onde précise (λ_B) « la longueur d'onde de Bragg » et laisse passer les autres.
- Les variations de température ou de contrainte modifient l'indice de réfraction et la période du réseau entraînant un décalage spectral ($\Delta\lambda_B$) selon la relation :

$$\Delta\lambda_B = CT \times \Delta T + Ce \times \Delta \epsilon$$

où CT et Ce sont respectivement les coefficients thermo-optique et élasto-optique.

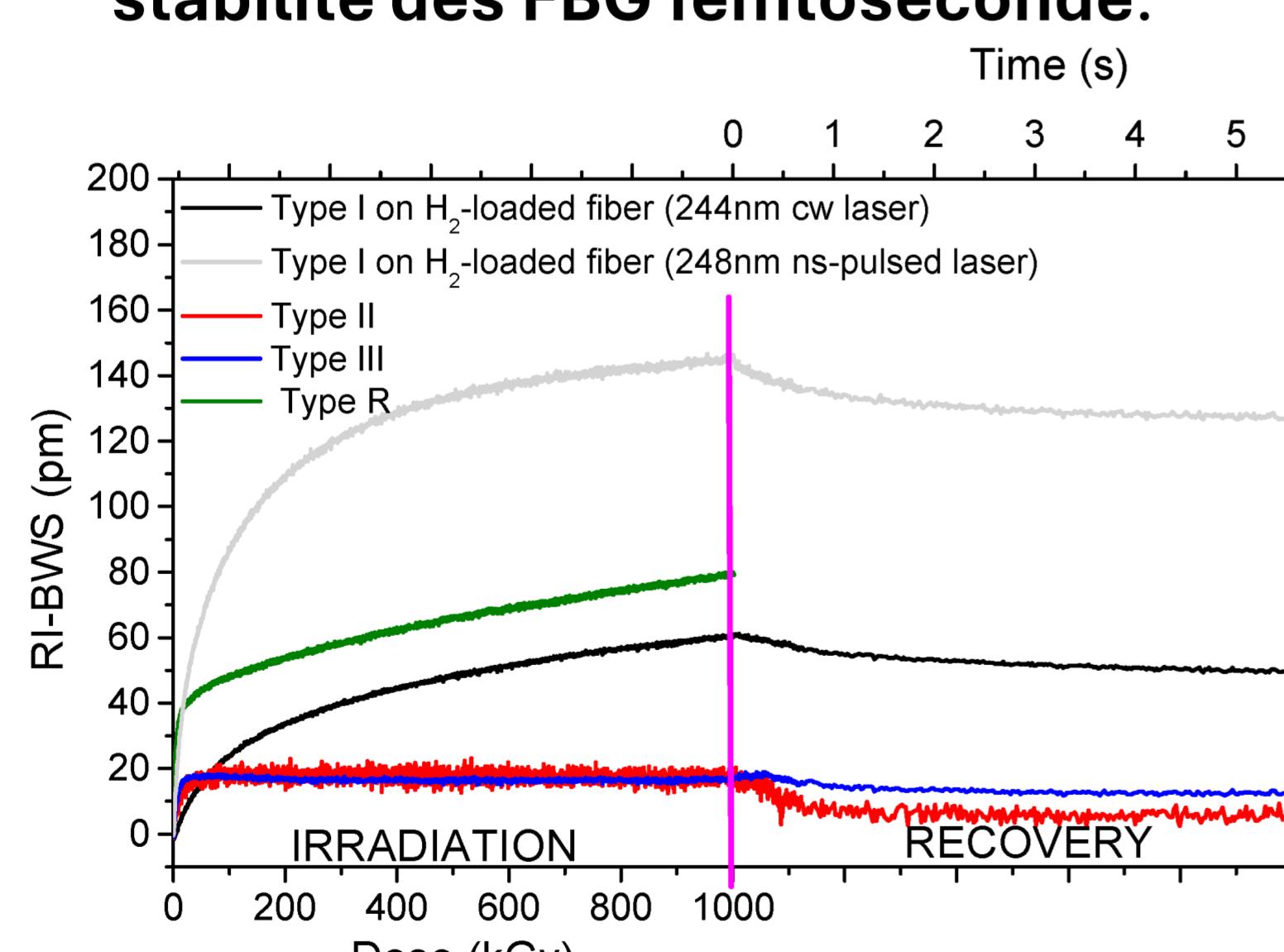
Effets des radiations et durcissement (3,1)

Figure 2: Décalage du spectre de longueur d'onde lorsque la dose augmente de 0 à 1540 kGy



Les rayonnements ionisants peuvent modifier les propriétés optiques des FBG, entraînant des dérives spectrales et une perte de réflectivité. Un décalage de quelques picomètres sur la longueur de la fibre entraîne une variation mesurable et significative de la valeur finale du paramètre étudié. Cependant, les FBG gravés par laser femtoseconde (Type II) présentent une stabilité remarquable : leur dérive reste inférieure à 10 pm même après une exposition allant jusqu'à 1 MGy, tandis que les FBG classiques (Type I) subissent des décalages beaucoup plus importants. Le spectre de réflexion reste quasi inchangé après 1,54 MGy avec un décalage de seulement -0,02 nm démontrant une excellente résistance radiative. Ces résultats confirment que les FBG femtoseconde conservent leurs propriétés optiques et leur fiabilité de mesure même en milieu nucléaire fortement irradiant.

Figure 3: Graphique RI-BWS (pm) vs dose (kGy) montrant la stabilité des FBG femtoseconde.



Bibliographie

1- Morana, Adriana, et al. « Radiation Effects on Fiber Bragg Gratings: Vulnerability and Hardening Studies ». *Sensors*, vol. 22, n° 21, janvier 2022, p. 8175. www.mdpi.com/10.3390/s22218175.

2- Berkovic, G., et al. « Radiation-Induced Wavelength Shifts in Fiber Bragg Gratings Exposed to Gamma Rays and Neutrons in a Nuclear Reactor ». *Sensors*, vol. 25, n° 2, janvier 2025, p. 323. www.mdpi.com/10.3390/s25020323.

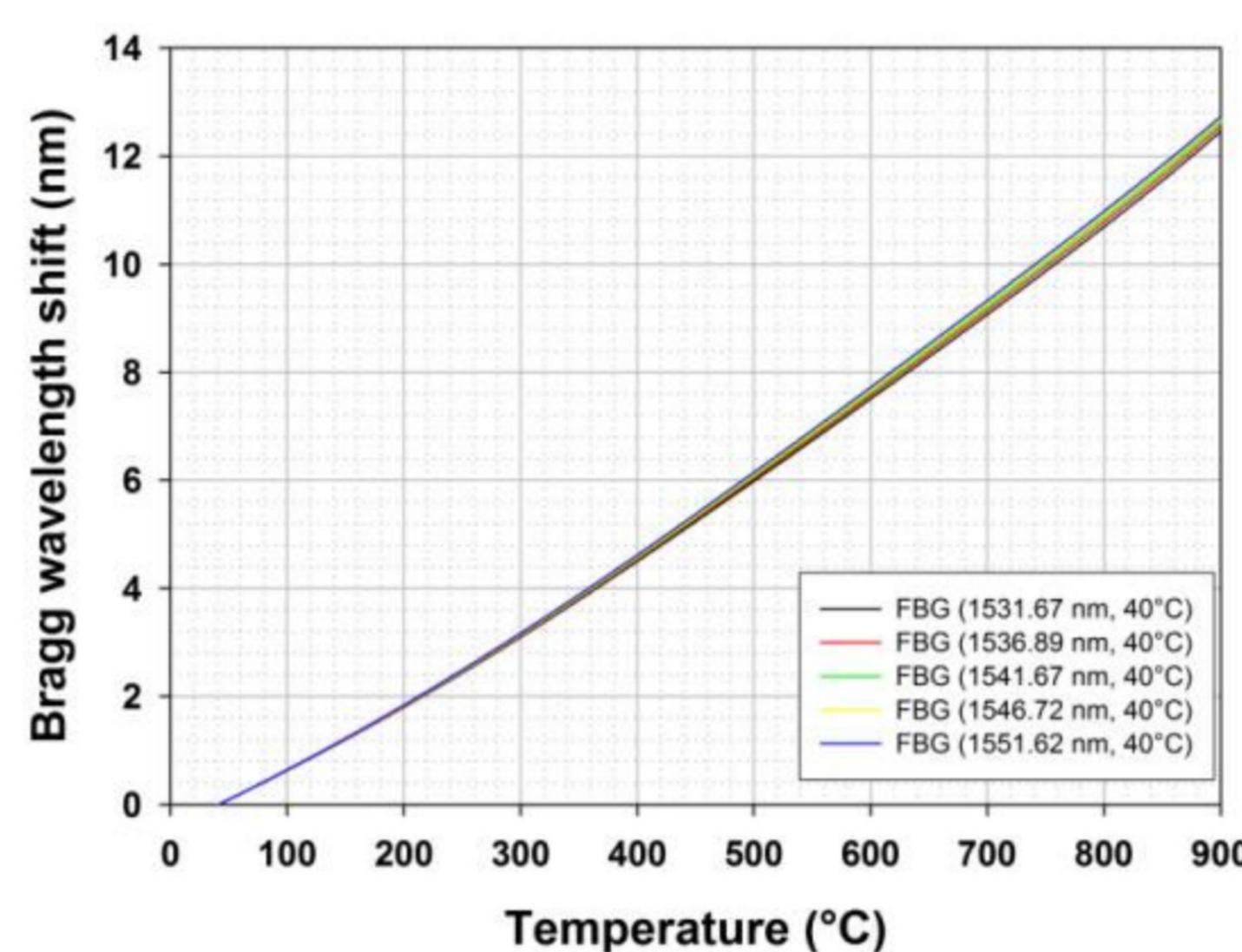
3- Baba, Tamana, et al. « Radiation Tolerant Fiber Bragg Gratings: Review of FBG Sensing ». *Journal of Optics*, juillet 2025. Springer Link, <https://doi.org/10.1007/s12596-025-02861-x>.

4- Mazza, Andrea, et al. « Preliminary Evaluation of Fiber Bragg Grating Sensors for Structural Monitoring: Toward Application in Generation IV Nuclear Reactors ». no. 202505002, Preprints, 25 juin 2025. *Preprints.org*, <https://doi.org/10.20944/preprints202505.0002.v2>.

5- Laffont, Guillaume, et al. « Temperature Resistant Fiber Bragg Gratings for On-Line and Structural Health Monitoring of the Next-Generation of Nuclear Reactors ». *Sensors*, vol. 18, n° 6, juin 2018, p. 1791. www.mdpi.com/10.3390/s18061791.

Résultats expérimentaux (5,3)

Figure 4: Décalage spectral des FBG régénérés jusqu'à 900 °C – essais réalisés au CEA



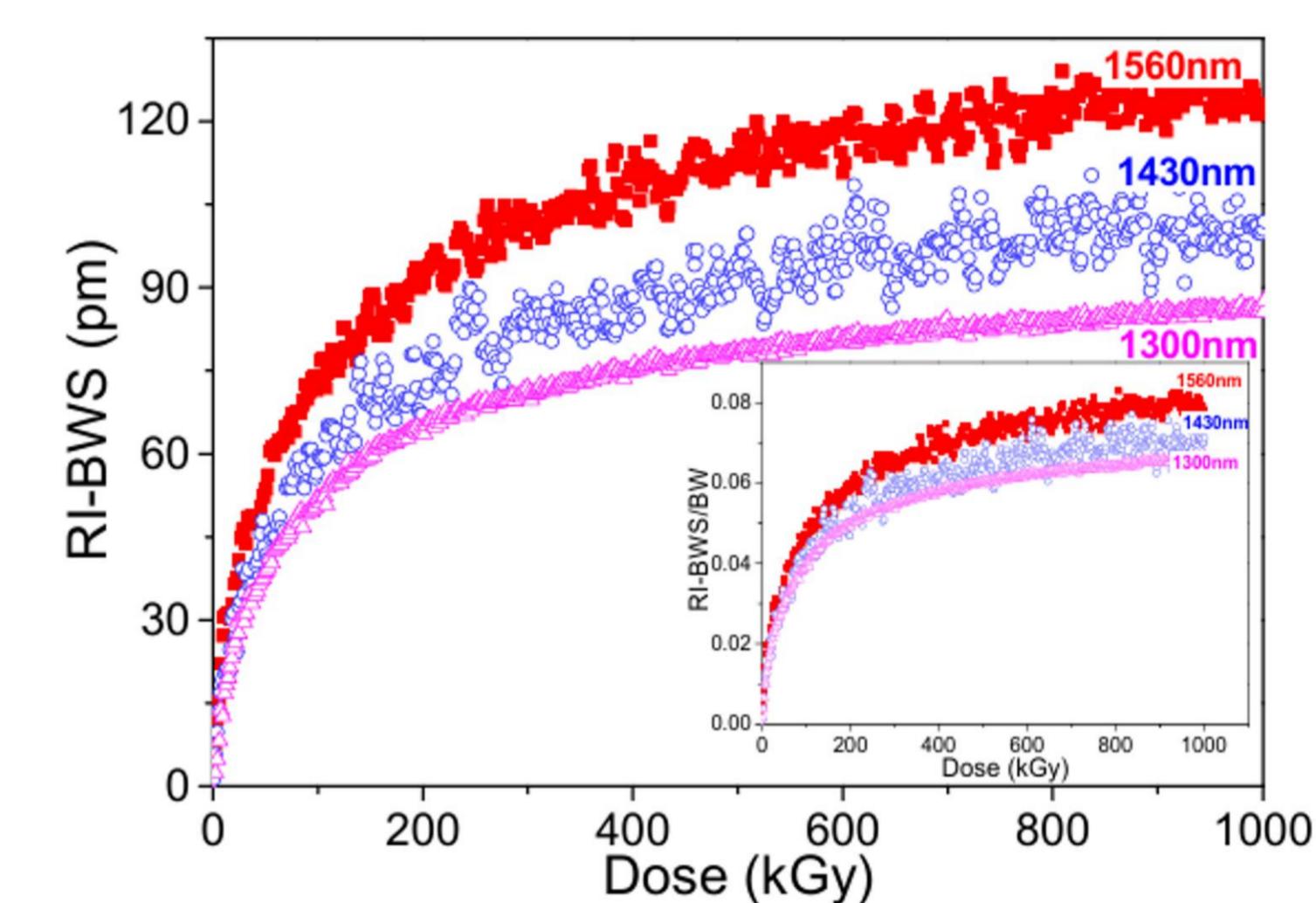
•Les essais du CEA ont étalonné des FBG régénérés de 40 °C à 900 °C.

•Le décalage spectral est linéaire, avec ~8 nm à 600 °C et ~13 nm à 900 °C montrant une excellente sensibilité thermique.

•Sous irradiation X jusqu'à 1 MGy, les FBG montrent un décalage de 85–125 pm mais quasi constant une fois normalisé, indiquant la même modification d'indice pour tous les capteurs.

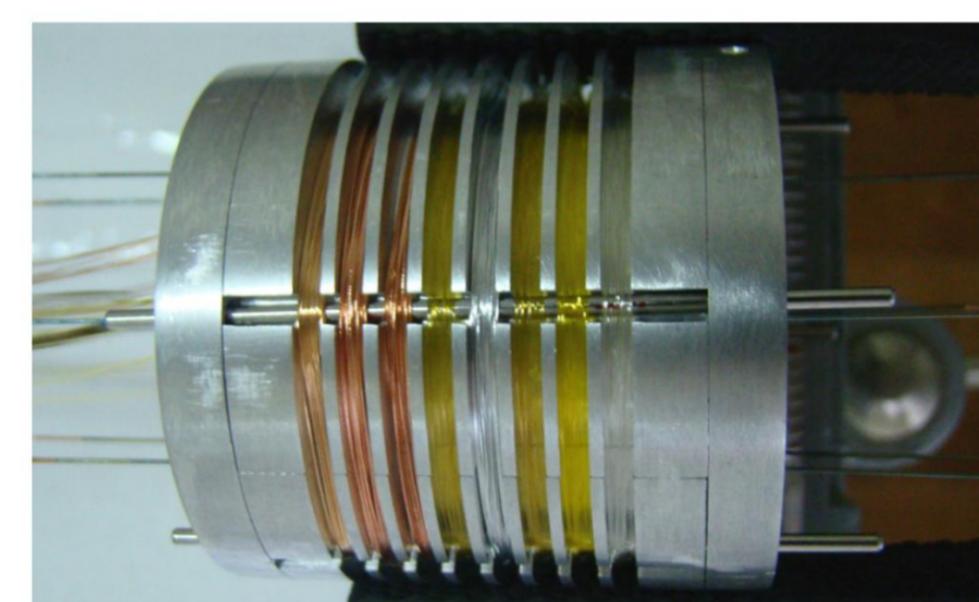
•Ces résultats confirment la robustesse des FBG régénérés et leur capacité à fournir une mesure fiable et reproductible en conditions extrêmes.

Figure 5: Décalage de Bragg sous rayonnement X jusqu'à 1 MGy



Applications nucléaires (4)

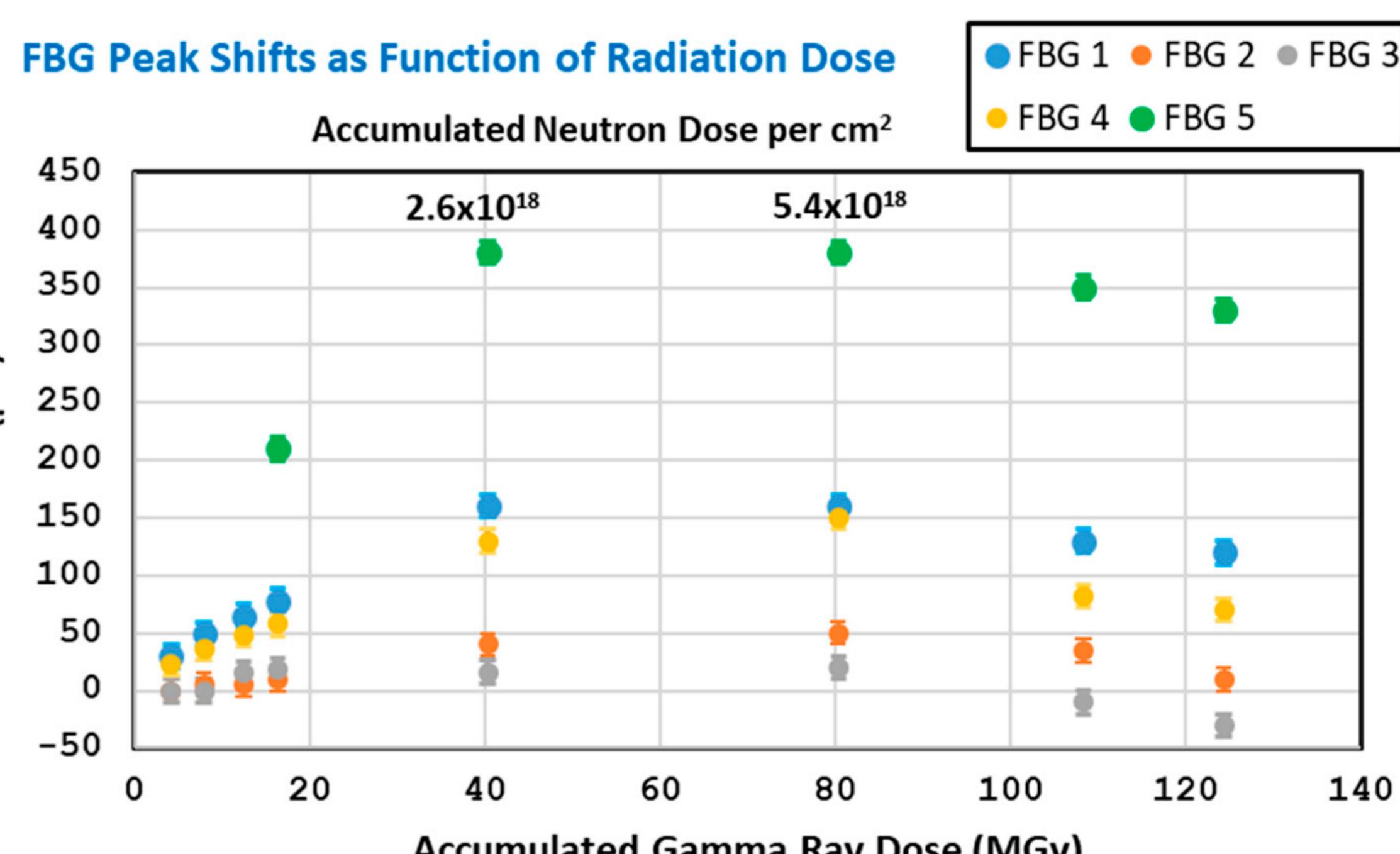
Figure 6: Fibre optique insérée dans rainures de la cuve



- Les FBG sont installés sur la cuve, le générateur de vapeur et les barres de contrôle pour mesurer température, contrainte et vibrations.
- Les fibres sont encastrées dans des rainures ou protégées par des gaines métalliques/céramiques, assurant une installation robuste et durable.
- Cette intégration offre une surveillance fiable, non intrusive et adaptée aux environnements extrêmes des réacteurs de 4^e génération.

Durabilité et fiabilité (2)

Figure 7: Comportement des FBG pendant le fonctionnement du réacteur



•Les FBG régénérés restent stables jusqu'à 900 °C avec une dérive de seulement quelques pm.

•Sous irradiation prolongée les FBG femtoseconde montrent une dérive < 5 pm confirmant leur résistance radiative.

•Ces capteurs offrent une stabilité longue durée et une mesure fiable essentielle pour la sûreté des installations nucléaires.

Conclusion

Les capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg (FBG) démontrent une résistance remarquable aux conditions extrêmes rencontrées dans le nucléaire : hautes températures et fortes radiations. Les études menées montrent une stabilité spectrale et une linéarité thermique jusqu'à près de 1000 °C, confirmant leur précision et fiabilité dans la mesure de température et de déformation. Leur miniaturisation, leur immunité électromagnétique et leur capacité de multiplexage en font une technologie idéale pour la surveillance continue des réacteurs de 4^e génération. Ces résultats ouvrent la voie au déploiement de réseaux FBG régénérés et femtoseconde capables d'assurer une instrumentation durable et sécurisée pour la sûreté de nos installations nucléaires.