

CAPTEURS À FIBRES OPTIQUES RÉPARTIS POUR LA SURVEILLANCE DU CORIUM EN CAS D'ACCIDENT GRAVE DE RÉACTEUR NUCLÉAIRE AVEC PERCEMENT DE LA CUVE : LE PROJET ANR RSNR DISCOMS

P. Ferdinand¹, L. Maurin², G. Jouvin², S. Rougeault², G. Cheymol³, P. Le Tutour³, J.-C. Jaboulay³, H. Maskrot³, A. Denoix⁴, C. Journeau⁴, G. Musoyan⁵, M. Sagan⁵, M. Brovchenko⁶, I. Duhamel⁶, O. Meziani¹, B. Ricque¹, F. Pouillé¹, et Y. Ouerdane⁷

¹LMP S.A., 49-51 rue du Moulin des Prés, 75013 Paris, France

²Institut LIST, CEA, Université Paris-Saclay, F-91120, Palaiseau, France

³CEA, DEN, Université Paris-Saclay, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

⁴CEA, DEN, F-13108 Saint Paul-lez-Durance, France

⁵Framatome, 1 place Jean Millier, 92084 Paris-La Défense cedex, France

⁶Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 92262 Fontenay-aux-Roses, France

⁷Univ Lyon, UJM-CNRS-IOGS, Lab. Hubert Curien UMR 5516, 42000 Saint-Étienne, France

p-ferdinand-lmpsa@sfr.fr

RÉSUMÉ

Une technique de surveillance fondée sur les Capteurs à Fibres Optiques (CFO) répartis (réflectomètres optiques associés à des câbles munis de fibres monomodes *rad-hard* gainées carbone) est proposée pour la surveillance à distance du corium en cas d'Accident Grave de réacteur nucléaire, avec fusion du cœur et percement de la cuve du réacteur.

MOTS-CLEFS : *Corium ; CFO ; fibre optique rad-hard ; mesure répartie*

1. INTRODUCTION & CONTEXTE

Le 11 mars 2011, un séisme de magnitude 9,1 se produisit à 120 km de la côte Nord-Est du Japon, suivi d'un tsunami qui détruisit nombre d'infrastructures et fit plus de 18 000 morts ou disparus. La centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi ne fut pas épargnée puisque quatre de ses réacteurs subirent des dégâts considérables (fusion de cœurs, rupture de cuves, coulées de corium, ...). Quelques mois plus tard, la France initia le programme ANR RSNR, le dotant de 50 M€ d'aide du PIA, pour stimuler la Recherche en Sûreté Nucléaire et Radioprotection. Vingt et un projets furent sélectionnés, dont DISCOMS (*DIstributed Sensors for COrium Monitoring & Safety*) qui débuta pour 5 ans de R&D en janvier 2014.

2. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE DE L'ACCIDENT GRAVE

À Fukushima Dai-ichi, la perte par noyage des alimentations électriques eut pour conséquence immédiate l'arrêt de la majorité des instrumentations, rendant l'opérateur TEPCO sans réels moyens pour contrôler l'état de ses réacteurs. L'approche du projet DISCOMS vise donc à développer une solution innovante pour accroître la sûreté des tranches nucléaires du parc des réacteurs tant existants que futurs, *via* une surveillance déportée du corium hors cuve, fondée sur des capteurs passifs et des instruments de mesure installés dans une base arrière, d'où les équipes de gestion de crise pourront œuvrer sans risque sanitaire. Techniquement, cela revient à déterminer l'intégrité de la 3^{ème} barrière de confinement (en particulier celle du radier sous le réacteur), afin de mener les actions de mitigation appropriées même en cas de perte totale des alimentations électriques. Trois objectifs sont assignés à cette surveillance qui doit rester opérationnelle pendant toute la durée de fonctionnement de la tranche, suivie d'un Accident Grave (AG) : 1) Confirmer la détection du percement de la cuve conduisant à la coulée du corium, 2) Suivre sa progression au sein du radier en béton jusqu'à son éventuel percement, 3) Evaluer son refroidissement sur le long terme (post-accidentel). Pour cela, deux technologies sont retenues dont les collectrons et, objet de cette publication, les CFO répartis continûment sensibles, permettant le déport des appareils de mesure à distance de sécurité [1].

3. MODÉLISATIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS ET DE LA TEMPÉRATURE DANS LE RADIER

Les câbles optiques devant être noyés dans le béton pour ne pas être instantanément détruits au contact du corium coulant de la cuve ($T_{\text{corium}} > 2500^{\circ}\text{C}$), mais aussi protégés des rayonnements ionisants, les conditions radiologiques ont été modélisées (Monte Carlo MCNP [2] et TRIPOLI-4 [3]), en prenant en compte les compositions du corium et des bétons mis en œuvre pour les différents paliers de réacteurs. Ces travaux ont permis de déterminer les spectres et les flux de neutrons, ainsi que les doses γ , en surface du radier et *versus* la profondeur d'enfouissement, puis d'établir les caractéristiques de tenue des fibres optiques dans leurs câbles : en AG avec le rayonnement du corium, seules, les doses γ déposées sont divisées par ~ 10 pour 15 à 20 cm de béton, en fonctionnement normal l'atténuation avoisine un facteur 4 par dm de béton [4]. La modélisation thermique (TOLBIAC-ICB) de l'Interaction Corium-Béton (ICB) montre que la propagation du front d'ablation est plus rapide que celle du front de chaleur (calculée par conduction thermique transitoire), avec des gradients $> 200^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ dans ce matériau très réfractaire. Les fibres en câbles sont donc détruites par l'effet de la chaleur, à seulement quelques cm du front d'ablation.

4. SÉLECTION ET TESTS DES FIBRES OPTIQUES MONOMODES *RAD-HARD*

Le choix des fibres optiques monomodes dont l'atténuation induite sous rayonnements ionisants (RIA) est minimale, fut conditionné par le budget optique des instruments de mesure. Plusieurs échantillons des meilleures fibres optiques du marché ont ainsi été sélectionnés, puis irradiés jusqu'au niveau de dose correspondant à la durée de vie du réacteur (60 ans pour l'EPR), puis à celui d'un Accident Grave avec rupture de la cuve et coulée de corium. Plusieurs irradiations γ (irradiateur POSÉIDON) puis mixtes neutrons- γ (réacteur ISIS) ont été conduites, jusqu'à 2 MGy en γ , et sous une fluence de neutrons rapides ($E > 1 \text{ MeV}$) de $6 \times 10^{15} \text{ n}/\text{cm}^2$ plus 0,3 MGy en γ pour l'irradiation mixte. La mesure de l'atténuation induite, a permis de sélectionner 3 fibres optiques, les plus tolérantes aux radiations (RIA $< 5 \text{ dB}/100 \text{ m}$ à $1,55 \mu\text{m}$). Le même test en γ conduit sur des tronçons de câbles munis de ces mêmes fibres optiques a mis en exergue une RIA additionnelle, sans effet de saturation, se manifestant entre autres par un pic hydroxyle à $1,38 \mu\text{m}$. L'analyse montre que l'hydrogène moléculaire généré par la radiolyse des composants polymères en est la cause, à savoir la croissance des ions OH^{\cdot} sous radiations, liée à la diffusion d' H_2 jusqu'au cœur de silice, par son interaction avec les centres colorés non-pontants de l'oxygène (NBOHCs). La comparaison des spectres d'atténuation des fibres nues, puis en câbles, montre que l'hydrogène ne peut être produit sous irradiation que par les seuls composés organiques des câbles, la spectrométrie de masse haute résolution confirmant le rendement de production de chacun des constituants. Pour ne pas obérer les performances des fibres optiques sous radiations, des tests complémentaires conduits avec une fibre *rad-hard* précédemment sélectionnée, mais revêtue d'une fine couche de carbone (faisant office de barrière contre l'hydrogène) a été insérée dans divers câbles, puis à nouveau irradiée en γ , validant le fait que dans une telle configuration, aucune RIA additionnelle n'est détectable par rapport aux câbles témoins [5].

5. CÂBLES OPTIQUES ET INSTRUMENTS DE MESURES RÉFLECTOMÉTRIQUES

Pour n'exclure aucun instrument de mesure du choix final, la quasi-totalité des techniques réflectométriques unimodales a été mise en œuvre, à savoir un OTDR télécom bi-spectral, un OTDR à comptage de photons, un DTS Raman, un OFDR Rayleigh et un Brillouin B-OFDA. Le choix précis de chaque instrument s'appuie sur des comparatifs des offres du marché. Mais, seuls ceux fonctionnant à $1,55 \mu\text{m}$ ont été testés, afin que les divers câbles de mesure, certains munis de SMF28 et d'autres des fibres *rad-hard*, puissent être indifféremment interrogés. Cinq différents types de câbles-capteurs répartis, compatibles avec la liste des Produits et Matériaux Utilisables en Centrale, ont été spécifiés puis qualifiés suivant leurs fonctionnalités (mesure des profils de la température, des déformations, ou fusible au contact du corium).

6. ESSAI DE COULÉE DE CORIUM & DÉMONSTRATION DU CONCEPT DE SURVEILLANCE

Un essai d'ICB, dit 'Vulcano', a été mené pour tester l'instrumentation complète. 50 kg de corium prototypique composé de 61,3 % d' UO_2 appauvri, placés dans une section d'essai en béton silico-calcaire, ont réagi après amorçage par réaction thermitique, pour former un bain de corium oxyde-métal, dont la température fut maintenue par induction. La section d'essai est un cylindre en béton ($\text{Ø}_{\text{int}} 25 \text{ cm}$, $\text{Ø}_{\text{ext}} 50 \text{ cm}$) d'un contenant ~ 15 litres pour une hauteur de 65 cm. Elle a été équipée de 5 câbles optiques ($\text{Ø} 4 \text{ mm}$)

positionnés en spirale autour du bain de corium, pour une longueur totale de 180 m, conçus pour résister 90 min à 750°C (norme IEC 60331-25), ainsi que de 109 thermocouples de type K (sécurité) et de 8 autres de type C (T_{bain}). Les fibres furent reliées aux instruments mis en réseau, avec un contrôle depuis un poste distant, et une IHM dédiée, installés dans un bâtiment situé à 100 m. Le bilan de cet essai de 98 minutes, qui a conduit à une ablation axiale de 25 mm et radiale de 80 mm, est positif et très riche d'enseignements :

OFDR Rayleigh : la mesure des longueurs des câbles ablatés n'a été efficace qu'avec cet appareil de grande dynamique ; les mesures de variations de déformations/température, rapidement bruitées, ont néanmoins permis de détecter l'entrée en fusion du corium, 4 minutes après le début de l'essai,

OTDR télécom : les mesures ont souffert de la disparition du pic de Fresnel, compliquant sa détection (sans algorithme dédié) et donc la localisation du corium par mesure de longueur de la fibre restante,

OTDR à comptage de photons : les mesures ont été très perturbées, avec la disparition du pic de Fresnel pendant 90 minutes, ne revenant à son intensité initiale que 4 heures après le début de l'essai,

DTS Raman monochromatique : les longueurs de câbles ablatés sont réalistes, comparées aux résultats des autres réflectomètres, ainsi que les profils de température, restant limités à 500°C (repliement dû à l'absence de compensation de l'atténuation différentielle des intensités des raies Stokes & anti-Stokes),

Brillouin : le **B-OFDA** n'a pu réaliser ses mesures jusqu'à la fin de l'essai, du fait d'une progression du corium ouvrant la boucle de mesure ; les résultats Brillouin sont néanmoins intéressants : 1/ l'une des portions de câble a détecté l'entrée en fusion du corium environ 6 minutes après le début de l'essai, 2/ un gradient lié à l'effet principal de la température a été détecté dans l'épaisseur du béton, sous la poche de corium ; par ailleurs, l'approche Brillouin reste fonctionnelle jusqu'à 1000°C, prenant le relais du DTS Raman au-delà de 500°C, d'autant mieux qu'elle est peu influencée par les rayonnements ionisants.

Au final, le consortium recommande l'emploi d'un système Brillouin ne requérant l'accès qu'à une seule extrémité de fibre (**BOTDR** ou **BOFDR**), éventuellement secondé par un DTS équipé d'un système de compensation de la RIA différentielle entre les raies aux longueurs d'ondes Stokes et anti-Stokes [6].

CONCLUSION

Les essais ont démontré la pertinence de cette technologie de mesure optique répartie à répondre aux objectifs de détection et de surveillance du corium. Associés à des réflectomètres (Brillouin, Raman), les câbles continûment sensibles, munis des meilleures fibres monomodes *rad-hard* gainées carbone, une fois installés à la ou les profondeur(s) requise(s) dans le radier, ainsi que dans le dispositif de rétention du corium hors cuve des réacteurs qui en sont équipés, pourraient fournir une solution adéquate pour surveiller l'Accident Grave à distance de sécurité, en déterminant la progression du corium, *via* la fourniture de profils thermiques jusqu'à 500°C (DTS Raman), des informations sur les profils des déformations/température jusqu'à 1000°C (Brillouin), ainsi que les zones de contact avec le corium, tout en assurant la surveillance post-accidentelle de sa température sur le moyen/long terme.

REMERCIEMENTS : Ces travaux ont bénéficié d'une aide du Programme d'Investissements d'Avenir gérée par l'ANR, sous la référence ANR-11-RSNR-0007.

RÉFÉRENCES

- [1] P. Ferdinand, *et al.*, "DISCOMS: DIStributed Sensing for COrium Monitoring and Safety", The Inter. Conf. on Smart Materials and Structures CANSIMART, Vancouver, BC, Canada, 15-17 July 2015.
- [2] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - Version 5, Vol. I: Overview and Theory", LA-UR-03-1987 (2003).
- [3] TRIPOLI-4 Project Team, "TRIPOLI-4 v8 User Guide", CEA-R-6316 (Feb. 2013).
www.oecdnea.org/tools/abstract/detail/nea-1716/
- [4] M. Brovchenko, *et al.*, "Neutron-gamma flux and dose calculations for feasibility study of DISCOMS instrumentation in case of severe accident in a GEN 3 reactor". EPJ Web of Conf. 153, 07030 (2017) - ICRS-13 & RPSD-2016, 25 Sept. 2017.
- [5] G. Cheymol, *et al.*, "Tests under irradiation of optical fibers and cables devoted to remote corium monitoring in case of severe accident in a Nuclear Power Plant", 6th Inter. Conf. on Advancements in Nuclear Instr. Measurement Methods and their Applications, ANIMMA 2019, 17-21 juin 2019, Portorož, Slovénie.
- [6] L. Maurin, *et al.*, "Remote monitoring of MCCI experiment with Optical Fibre Sensors and perspectives for severe nuclear accident monitoring – DISCOMS project", 6th Inter. Conf. on Advancements in Nuclear Instr. Measurement Methods and their Applications, ANIMMA 2019, 17-21 juin 2019, Portorož, Slovénie.