

Introduction

Depuis 2016, le consortium CEA, IRSN et ONET Technologies participe à une étude qui vise à démontrer la faisabilité de la découpe laser de corium à l'intérieur des réacteurs endommagés de la centrale de Fukushima Daiichi. Cette étude comprend aussi l'analyse des particules et aérosols produits lors des coupes et le développement de moyens de mitigation (réduction) de la contamination atmosphérique liée à ces coupes. Dans ce cadre, 3 principales étapes ont été identifiées: la collecte de données concernant les poussières et aérosols générés lors des coupes avec en premier lieu la fabrication de simulants de corium, le développement de moyens de limitation de la mise en suspension et l'analyse des possibilités d'implantation sur site.

I – Collecte des données d'entrée

Fabrication du corium:

Comment réaliser des analyses de découpe sur un matériau mal connu, hétérogène et radioactif ?

Afin de mener à bien ces études, il est nécessaire de disposer d'une quantité importante d'un matériau représentatif du corium. Pour cela, des simulants de corium sont produits par le CEA Cadarache sur l'installation Plinius [1]. Les compositions de ces simulants diffèrent en fonction du réacteur et de la localisation (à l'intérieur de la cuve [3], comprenant principalement de l'uranium et du fer, ou à l'extérieur de la cuve [4], comprenant des éléments provenant de la fusion du béton). Afin de disposer d'un matériau non radioactif, les éléments sont soit remplacés par leur isotope stable soit remplacés par un substituant ayant un comportement similaire [2] [3]. Ex: uranium par l'hafnium et plutonium par le cérium [2].



Fig. 1: Fabrication de corium sur installation PLINIUS [2]



Fig. 2: Résultats de la fabrication de simulants de corium issue de Plinius [2]



Caractérisation des aérosols produits lors des coupes laser

Comment analyser les composants générés lors des coupes laser ?

Des essais de découpe laser de différents matériaux dont des simulants de corium sont réalisés sur l'installation DELIA du CEA Saclay (Fig. 3 et 8). Les aérosols générés sont collectés sur différents systèmes de filtration permettant leur caractérisation (concentration massique et distribution granulométrique notamment) [5] et [6]. Un système d'analyseur de particules de types PPS Pegasor permet de mesurer les émissions en temps réel et en continu. Des filtres à quartz sont utilisés afin de déterminer la concentration massique en particules émises dans la cuve [1]. Les résultats obtenus servent de données d'entrée pour le développement de dispositifs de collecte des poussières et d'aérosols (stratégies de pulvérisation, de collecte et filtration, voir paragraphe II)

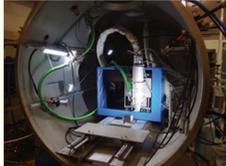


Fig. 3: Vue de l'intérieur de l'enceinte DELIA [6]



Fig. 4: Découpe de bloc au laser [5]

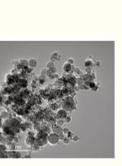


Fig. 5: Morphologie de aérosols collectés [6]

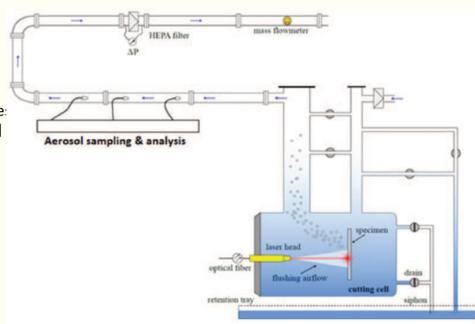


Fig. 8: Schéma de principe de l'installation DELIA et de la boucle aérosol [5]

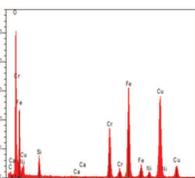


Fig. 6: Composition des aérosols collectés [6]

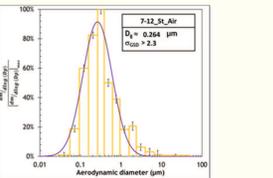


Fig. 7: Distribution granulométrique des aérosols collectés [6]

III – Application des résultats expérimentaux – Etude de faisabilité l'implantation sur site

Comment adapter l'ensemble bras + dispositifs de confinements aux contraintes sur site ?

L'implantation des équipements sur site nécessite le respect de certains critères comme, la compacité du dispositif, la résistance des matériaux aux rayonnements (résistance observée 10⁷Gy en moyenne). Le système de filtration est disposé sur un rack, conçu pour être assemblé par le bras robotisé. Tous les composants sont facilement attrapés par la pince du bras, démontés et conditionnés dans des contenants de taille adaptée (maintien du confinement de la matière aspirée).

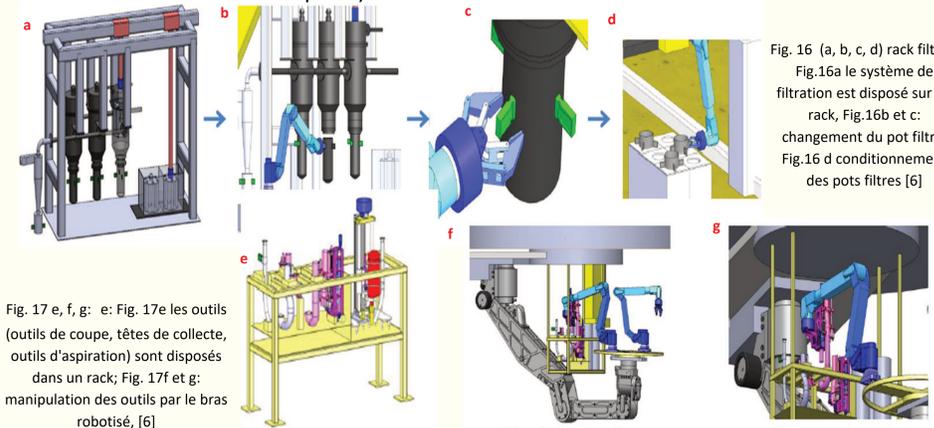


Fig. 16 (a, b, c, d) rack filtres: Fig.16a le système de filtration est disposé sur un rack, Fig.16b et c: changement du pot filtre, Fig.16 d conditionnement des pots filtres [6]

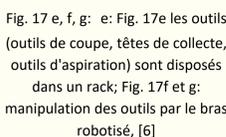


Fig. 17 e, f, g: e: Fig. 17e les outils (outils de coupe, têtes de collecte, outils d'aspiration) sont disposés dans un rack; Fig. 17f et g: manipulation des outils par le bras robotisé, [6]

II – Méthodes et stratégies de collecte de poussières et d'aérosols:

Comment définir la meilleure stratégie de confinement des aérosols radioactifs ?

Lors de cette étape sont mis en œuvre des moyens expérimentaux tels que TOSQAN (IRSN Saclay) fig. 10 et DELIA (CEA Saclay) fig. 12, associés à des simulations numériques CFD (Computational Fluid Dynamics), ex à la fig. 9. Le but est d'étudier, tester et concevoir des solutions adaptées afin de diminuer (par pulvérisation et captation à la source) la concentration d'aérosols pendant les opérations de découpe du corium.

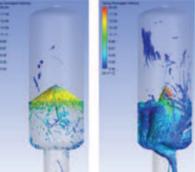


Fig. 9: exemple de modélisation de la concentration des gouttelettes dans TOSQAN [6]

Tests avec des aérosols simulés dans l'installation TOSQAN

Objectifs: Les tests visent à dimensionner le système d'aspersion d'eau (global et local, taille des gouttes, débit, quantité) pour différents scénarios et divers outils de coupe. Dans ce contexte, l'installation TOSQAN a été dimensionnée afin de mesurer à l'intérieur de sa cuve, ces données en temps réels.

Méthodologie utilisée dans le dispositif expérimental TOSQAN:

Des poudres sont pulvérisées afin de simuler les aérosols générés lors des coupes (ex: taille des particules émises lors d'une découpe laser : 0,4 µm [6]). Une aspersion d'eau (buses) est générée en partie supérieure de la cuve et localement au plus près de la diffusion de particules. Les résultats sont observés grâce à des méthodes optiques, vélocimétrie laser ex : PIV (Particle Image Velocimetry), ombroscopie et LDV (Velocimetry Laser Doppler) [7].

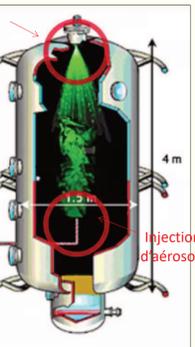


Fig. 10: Schéma de coupe transversale de la cuve de TOSQAN, [7] et [6]



Fig. 11: Taille des bulles Ombroscopie (gauche) et vitesse des bulles droite PIV [7]

Résultats sur l'effet des aspersions dans la cuve au cours du test:

- L'aspersion locale efficace pour diminuer la concentration de particules libérées pendant les coupes
- La combinaison d'aspersions locale et globale favorise la diminution de la concentration en particules dans la cuve

Réalisation de séries de tests dans l'installation DELIA CEA Saclay:

Objectif: tester l'efficacité des pulvérisations d'eau avec découpe au laser de simulants de corium.

Résultats observés: L'aspersion provoque une diminution des particules en suspension comprise entre 25 % et 70 %. Le système est plus efficace sur des particules plus grosses (>1µm).

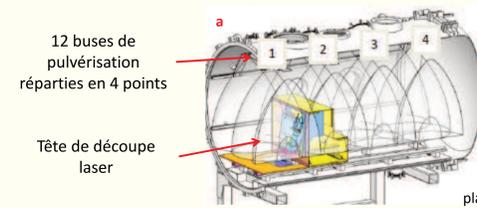


Fig. 12 (a, b, c) Vue de l'installation DELIA: La figure (a) montre la mise en place de la tête de découpe laser et des 12 buses de pulvérisation réparties en 4 points; photos (b) et (c) illustrent différentes typologie de buses [6]

Conception et fabrication de dispositifs de collecte à la source:

Objectifs: Elaborer une tête d'aspiration à la source capable de capter un maximum d'aérosols (plage 0,01µm;1µm), d'être montée à distance sur la tête de découpe laser, et pouvant s'adapter aux différentes formes à découper [6].



Fig. 13: Configuration ELC-A: coupe d'un tube, un tube rempli d'un bloc de zirconium fondu, un tube avec un tube à l'intérieur, [6]



Fig. 14: têtes d'aspiration à la source coupe traversante ou non: ELC-A et NELC-A [6]

Fig. 15: Configuration NELC-A: Des tests ont été réalisés avec des simulants de débris de combustible et des blocs de zirconium fondu [6]

Présentation du système global de découpe laser:

Le dispositif est divisé en quatre parties différentes [6], Fig. 16 :

- La tête laser
- La tête de dé poussierage : ELC-A et NELC-A, Fig. 14
- Le système de filtration comprenant :
 - Une préfiltration cyclonique
 - Un filtre fin (filtre Pulsejet)
 - Une pompe à vide
- Le système de pulvérisation

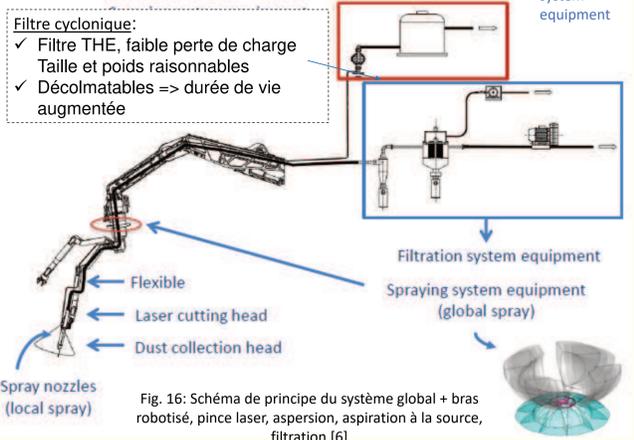


Fig. 16: Schéma de principe du système global + bras robotisé, pince laser, aspersion, aspiration à la source, filtration [6]

Conclusion

L'ensemble des expérimentations menées dans ce projet a permis de développer une stratégie de confinement des aérosols (mitigation et aspiration), produits lors des coupes de corium, de concevoir et tester des prototypes d'équipements dans des conditions représentatives des cuves endommagées de la centrale de Fukushima Daiichi. Afin de mettre au point des techniques robustes, les recherches ont été menées via des dispositifs expérimentaux déjà éprouvés, DELIA (CEA Saclay) et TOSQAN (IRSN Saclay) pour les études d'aspersion lors de coupes laser (CEA) et des systèmes d'aspiration à la source avec filtration cyclonique mis au point par ONET Technologies en collaboration avec l'IRSN. Les résultats ont montré une réelle efficacité de ces techniques utilisées de manière couplée. Ces techniques sont donc associées au bras téléopéré dont l'ensemble devra s'adapter aux difficiles conditions sur site (encombrement, radioactivité, humidité, disparité du corium).

Bibliographie

- [1] Christophe Journeau, Justine Zanini, Emmanuel Excoffier, Véronique Testud, Emmanuelle Brackx, et al. Aerosols released during the laser cutting of a Fukushima Daiichi debris simulant. The 9th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR2019), Mar 2019, Prague, Czech
- [2] C. Journeau, J. Moneris, L. Brissonneau, C. Chagnot, E. Excoffier, V. Testud, D. Roulet, Fabrication et découpe laser de simulants des débris de corium de l'accident de Fukushima Dai-ichi Journée SFT Matériaux & Fluides à Hautes Températures, 20 septembre 2016
- [3] Pellegrini M, Dolganov K, Herranz Puebla LE, et al. Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (BSAF Project) Nuclear Regulation NEA/CSNI/R(2015)18
- [4] K. Robb, M.W. Francis, M. T. Farmer, Ex-Vessel Core Melt Modeling Comparison between MELTSPREAD-CORQUENCH and MELCOR 2.1, Oak Ridge National Lab report ORNL/TM-2014/1 (2014)
- [5] Emmanuel Porcheron, Claire Dazon, Thomas Gelain, Christophe Chagnot, Ioana Doyen, Christophe Journeau, Emmanuel Excoffier & Damien Roulet, Fukushima Daiichi fuel debris retrieval: results of aerosol characterization during laser cutting of non-radioactive corium simulants Article in Journal of Nuclear Science and Technology - September 2020
- [6] Damien Roulet, Rémi Delalez, Thomas Da Silva, Emmanuel Porcheron, Thomas Gelain, Yohan Leblais, Ioana Doyen, Christophe Journeau, Christophe Suteau: Development of dust collection system for fuel debris performance report for fy 2018 supplementary budget (2022/01)
- [7] Emmanuel PORCHERON, Diagnostics des milieux multiphasiques en conditions hostiles: application à l'aérodynamisme des polluants, gazeux et particulaires. Juin 2015 IRSN/IRSN/2016-190