

TOMOGLASS

Tomographie gamma d'émission appliquée à la caractérisation radiologique du reliquat de verre du procédé de vitrification en creuset froid

Résumé : Le projet TOMOGLASS vise à développer un système de tomographie gamma innovant, capable de fonctionner en environnement de Haute Activité, pour caractériser en 3D les reliquats de verre issus du procédé de vitrification des déchets nucléaires. L'objectif est de localiser précisément les inclusions de platinoïdes faiblement solubles dans le verre, afin d'améliorer la compréhension et le pilotage du procédé. Le système repose sur un imageur gamma compact intégrant des détecteurs CZT pixellisés à haute résolution, collimaté (type sténopé) et monté sur bras robotisé. Il permettra une reconstruction multi-isotope à partir d'algorithmes tomographiques avancés. Ce projet s'inscrit dans la perspective de modernisation des installations de La Hague et de l'intégration de technologies numériques dans l'usine du futur.

Contexte

Depuis les années 60, l'industrie nucléaire française dispose avec le procédé de vitrification, d'une technologie sûre et pérenne pour le conditionnement des déchets de haute activité [1]. Le verre, en raison de sa structure désordonnée, permet de confiner de nombreux éléments chimiques tels que les radionucléides qui participent directement à la structure du matériau. Ce procédé repose sur deux étapes principales : la calcination des solutions de produits de fission, suivie de leur vitrification dans un four à haute température (plus de 1000 °C), où la fritte de verre et le calcinat sont transformés en verre, puis coulé dans des conteneurs en acier inoxydable.

Initialement basé sur des creusets chauffés par induction (dits « creusets chauds »), un nouveau procédé de vitrification en creuset froid a été mis en service à l'échelle industrielle en 2010 sur le site de La Hague. Cette technologie permet de chauffer directement la matière tout en maintenant le creuset refroidi par un circuit d'eau, minimisant ainsi les phénomènes de corrosion. Une mince couche de verre (5 à 10 mm) se forme sur la paroi interne, constituant un « autocreuset » protecteur. En atteignant des températures de fusion plus élevées (entre 1200 et 1400 °C), le procédé en creuset froid accroît la capacité de production.

La vitrification en creuset froid présente des avantages en termes de durabilité et de flexibilité. Cependant, en fin de campagne, des reliquats de verre subsistent, contenant des phases hétérogènes (platinoïdes) [1]. Ces reliquats constituent un marqueur du fonctionnement du procédé.

Le renouvellement des installations de La Hague à l'horizon 2045-2050 s'inscrit dans une stratégie de fermeture du cycle du combustible et d'optimisation du recyclage nucléaire. Les priorités incluent l'amélioration de la fiabilité, de la productivité et la réduction des rebuts, le développement de lignes de traitement modulaires et flexibles, ainsi que la diminution de l'exposition des opérateurs tout en intégrant des pratiques durables. L'intégration de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle, la robotique et la réalité augmentée permettra de rendre les opérations plus automatisées, interconnectées et robustes pour une gestion fiabilisée, sécurisée et traçable.

Dans le cadre de l'usine du futur, l'objectif serait d'automatiser les opérations de retrait du reliquat tout en systématisant la collecte des données issues des observations et de caractérisations physiques et radiologiques du reliquat, afin de les corrélérer au déroulement de chaque campagne. Cela permettrait in fine d'alimenter un jumeau numérique du creuset froid avec ces données, afin d'améliorer la maîtrise du procédé et optimiser les futures campagnes.

Travaux de R&D

Pour répondre à cette problématique, le projet TOMOGLASS vise à développer un prototype de tomographie gamma d'émission permettant d'opérer en ambiance de Haute Activité, afin de caractériser le reliquat de verre,

et plus particulièrement de localiser en trois dimensions la répartition des platinoïdes (isotopes radioactifs du rhodium et du ruthénium) peu solubles dans le verre. Une meilleure cartographie de cette répartition permettrait d'améliorer la compréhension du fonctionnement du procédé (bain de verre), et de mettre en évidence des corrélations avec les paramètres de fonctionnement du procédé de vitrification.

La tomographie gamma consistera à mesurer spécifiquement les rayonnements gamma émis par les radionucléides présents dans le reliquat, en ciblant plus particulièrement ceux caractéristiques des platinoïdes (comme ^{106}Rh). Ces mesures seront réalisées à l'aide d'un imageur gamma spectrométrique basé sur des détecteurs semi-conducteurs CZT pixellisés, développés par le CEA Leti [2] [3]. Ces détecteurs présentent une bonne résolution en énergie (<1.5% à 662keV) à température ambiante, ainsi qu'une excellente résolution spatiale intrinsèque (typiquement 300 μm), tout en étant très compacts. Pour fonctionner dans des environnements fortement irradiants (> 100 Gy/h), l'imageur compact devra être fortement blindé et collimaté à l'aide d'un sténopé, ce qui permettra de limiter le flux incident au détecteur. La géométrie du collimateur et du blindage sera optimisée par simulation numérique, de manière à obtenir le meilleur compromis entre champ de vue, sensibilité et résolution spatiale. L'imageur sera monté sur un bras robotisé afin d'acquérir des vues multiples sous différents angles. Les projections bidimensionnelles obtenues seront ensuite combinées pour permettre une reconstruction tomographique 3D multi-isotope à l'aide d'algorithmes itératifs adaptés, tels que ML-EM (Maximum Likelihood – Expectation Maximization).

Fort de son expertise reconnue en imagerie gamma, aussi bien dans le domaine médical [4] que dans l'industrie nucléaire [5], le projet a pour ambition de tirer parti des détecteurs CZT pixellisés de dernière génération tout en explorant les techniques de tomographie robotisée, en les adaptant aux environnements hautement irradiants.

La première phase du projet consistera à démontrer la faisabilité de la mise en œuvre d'un prototype de spectro-imageur en environnement contraint, en s'appuyant sur des briques technologiques existantes : modules de détection et électronique d'acquisition basés sur la technologie HiSPECT [2] [3], et algorithmes de reconstruction d'images développés au CEA Leti [4].

Programme de travail de l'année N :

- Tâche 1 : réaliser une étude multiparamétrique par simulation numérique (code de calcul Monte Carlo), permettant de dimensionner un dispositif de mesures optimisé (épaisseur du blindage, ouverture du collimateur sténopé), compatible avec une fonctionnalité de spectro-imagerie en environnement irradiant. Cette étape implique d'établir des matrices de réponses spatiales et énergétiques.
- Tâche 2 : à partir de la géométrie du dispositif de mesures établie en tâche 1, générer des jeux de données simulés pour différentes configurations de mesure représentatives. L'étude s'appuiera sur un inventaire des radionucléides typiquement rencontrés dans un reliquat de verre, afin de modéliser un environnement réaliste. Ces données serviront à évaluer les performances de reconstruction tomographique à l'aide d'algorithmes itératifs de type ML-EM.

Une fois le concept validé, les travaux se poursuivront en année N+1 avec l'assemblage des composants du prototype (blindage/collimation, détecteur, électronique) et son intégration sur un bras robotisé disponible au laboratoire. Des essais expérimentaux pourront dès lors être envisagés pour une démonstration en environnement labo sur un cas d'usage à définir.

Profil requis

Le(la) candidat(e) titulaire d'un doctorat dans le domaine de l'instrumentation et des mesures nucléaires (industrie ou médecine nucléaire) devra disposer de solides connaissances en physique des interactions rayonnement-matière ainsi que de bonnes bases en mathématiques appliquées. Des compétences en simulation avec des codes de transport de particules (GEANT4[6-7], MCNP6 [8] ou PHITS [9]) sont requises. Une expérience en caractérisation expérimentale de systèmes de détection nucléaire est vivement souhaitée. Une expérience en reconstruction tomographique ou traitement d'image constituerait également un atout.

Références

- [1] https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/clefs-cea/archives/fr/Clefs59_P17-21_FR.pdf
- [2] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8532713>
- [3] <https://www.leti-cea.fr/cea-tech/leti/Pages/innovation-industrielle/Demonstrateurs/HISPECT.aspx>
- [4] <https://theses.hal.science/tel-01866747/>
- [5] https://www.researchgate.net/publication/267649640_Radiological_Characterization_Methods_Specifically_Applied_to_the_Preparation_of_the_Dismantling_of_PHENIX_Fast_Reactor
- [6] S. Agostinelli et al., GEANT4 – A Simulation Toolkit, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 506, 250–303 (2003).
- [7] J. Allison et al., Recent developments in Geant4, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 835, 186–225 (2016).
- [8] C.J. Werner (Ed.), MCNP User's Manual – Code Version 6.2, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-17-29981 (2017)
- [9] T. Sato et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, Journal of Nuclear Science and Technology 55(6), 684–690 (2018).

Personne à contacter

Julien VENARA

DES/ISEC/DPME/SEIP/LNPA

Julien.venara@cea.fr

Julien FAVRICHON – chef de laboratoire

DES/ISEC/DPME/SEIP/LNPA

Julien.favrichon@cea.fr