

Description détaillée du sujet :

Le développement des réacteurs de fusion voit un essor considérable ces dernières années avec des propositions à la fois publiques (européenne pour le réacteur DEMO, d'état pour CFETR en Chine) et privées (par des start-ups telles que Renaissance Fusion en France ou Commonwealth Fusion Systems CFS aux USA capable de lever des fonds considérables) de conception et de construction de nouvelles machines productrices d'électricité dans les décennies à venir. Ces machines fonctionneront à l'aide de systèmes complexes ; citons par exemple la génération de champs magnétiques très intenses, la nécessité de maîtriser le vide, la surveillance des parois face au plasma à 150 000 000 de degrés, la production du combustible qui est le tritium, le chauffage du plasma, la maîtrise du confinement des plasmas et notamment des phénomènes complexes de MHD (Magnétohydrodynamique). Toutes ces technologies nécessiteront des opérations de maintenance régulières. Idéalement, ces opérations seront réalisées à distance à l'aide de robots mais certaines devront être accomplies par un intervenant humain.

Les interventions se font en respectant les règles de radioprotection des travailleurs. Ces règles imposent des niveaux maximaux de dose par an mais également la justification de la nécessité de soumettre des personnels à l'exposition aux rayonnements, et l'obligation de respecter le principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable) [1] pour minimiser le niveau de débit de dose dans l'installation autant que faire se peut. La dose est définie par l'intégrale du débit de dose dans le temps :

$$D = \int \left(\frac{dD}{dt} \right) (t) \times dt$$

et il est donc nécessaire pour minimiser cette dose d'influer sur les deux paramètres impliqués : le débit de dose et le temps d'exposition.

L'IRFM travaille activement dans ce domaine en promouvant l'utilisation des techniques de Réalité Virtuelle [2] qui permettent de vérifier par la simulation la conformité de la conception de l'installation et notamment tous les problèmes d'accessibilité des composants à maintenir en condition opérationnelle. En effet, la problématique de la facilité d'accès et d'intervention est cruciale dès la conception de la machine, mais également pour la définition des scénarios de maintenance, l'objectif final étant la maîtrise des opérations de maintenance et donc la réduction du temps de présence des hommes dans l'environnement radioactif, temps qui est l'une des composantes intervenant dans la dose cumulée reçue.

L'autre composante intervenant dans l'évaluation de la dose est donc le débit de dose. L'intégration du calcul du débit de dose en ligne et dynamiquement en fonction de toutes les modifications de la scène simulée en Réalité Virtuelle permet pendant la simulation à la fois de visualiser instantanément le niveau de débit de dose ambiant pour l'opérateur et de calculer la dose totale pendant l'intervention. Cette fonctionnalité offre la possibilité de discriminer en avance de phase différents scénarios en fonction du risque auquel est exposé le travailleur du nucléaire. Cette démarche est conforme au principe ALARA. Elle nécessite de pouvoir évaluer ce paramètre d'intérêt en un temps réduit ou en temps réel. En effet, dans le cas de l'évaluation de la dose dans une simulation virtuelle préparatoire sur écran (de type « jeu vidéo ») d'une simulation immersive, sans « tracking » en direct d'un opérateur sur site, la restitution dans un

temps réduit est envisageable car l'échelle de temps peut être modulée lors d'analyses postérieures à la simulation (recalcul de la dose cumulée en tenant compte du vrai temps passé dans une situation donnée, indépendamment du temps nécessaire au calcul). Par contre, dans le cas d'une utilisation en mode immersif, avec un « tracking » de l'opérateur où il est attendu que ce dernier puisse adapter son intervention en fonction du niveau de débit de dose ambiant et du niveau de dose reçue, la restitution en temps réel ou en quasi temps réel est préférable à chaque modification de la scène.

Les méthodes couramment utilisées pour le calcul du débit de dose dans des installations nucléaires sont principalement les méthodes d'atténuation en ligne droite (NARMER [3], MicroShield), les méthodes déterministes de type S_N (APOLLO-3 [4], ATTILA) ou des méthodes Monte Carlo (TRIPOLI-4® [5], MCNP-6, SERPENT-2, OpenMC). Les deux premiers types de méthodes sont des méthodes reposant sur des approximations spatiales, énergétiques et angulaires parfois importantes. La dernière, elle, est très coûteuse en temps de calcul et n'est pas compatible avec une évaluation en temps réduit du débit de dose. Les implémentations existantes du calcul du débit de dose couplé avec les simulations en Réalité Virtuelle ou équivalent reposent principalement sur l'utilisation de cartographies statiques préalablement calculées par des codes précis de type Monte Carlo (VORTEX [6], RADAT, Dosemap-calculator, D1SUNED-4.1.1) ou sur l'utilisation de méthodes d'atténuation en ligne droite (iDROP, DEMPLUS [7], VISIPLAN, HVRC VR). Les inconvénients majeurs sont :

- Pour la première catégorie d'implémentation, l'impossibilité de considérer des variations dynamiques de la scène, qui modifient les cartes de débit de dose,
- Pour la seconde catégorie d'une part la difficulté à traiter de sources très complexes et diffuses telles que celles que l'on trouve dans les installations de fusion où tous les composants sont activés, et d'autre part des approximations fortes de méthode qui ne permettent pas de tenir compte de toute la phénoménologie des contributions à la dose (rayonnement réfléchi notamment).

L'objectif de la thèse est donc de développer une nouvelle méthodologie qui permette à la fois la réduction du temps de restitution du calcul de la dose et la maîtrise de la précision du calcul dans toutes les configurations.

Pour satisfaire à ces deux contraintes, l'idée principale du travail à réaliser est de s'appuyer sur des méthodes simplifiées de transport des particules couplées à des techniques d'Intelligence Artificielle à base de Machine Learning ou de Deep Learning [8, 9, 10, 11] afin de remplacer le calcul par l'apprentissage à chaque fois que cela est possible. Ce travail sera suivi par un encadrement proche réalisé par Yannick PENELIAU déjà impliqué dans le développement de ce type de méthodes dans un Work Package appelé WP PrIO (Preparation to ITER Operation) du programme de travail en cours d'EUROfusion et dans l'encadrement de stagiaires sur la thématique du développement de méthodes rapides et simplifiées du calcul d'une configuration avec un écran mobile. Il sera dirigé par Cindy LE LOIREC qui travaille à la DES sur des thématiques proches pour les activités de démantèlement, via l'encadrement et la co-direction d'une thèse sur la problématique des reconstructions de cartes de dose avec des estimateurs performants pour les codes Monte Carlo d'une part et via la coordination d'un projet transversal de compétence et l'encadrement d'un post-doctorant travaillant sur des techniques d'Intelligence Artificielle de type « Processus Gaussiens » d'autre part. La thèse concrétisera en partie une collaboration entre la DES et la DRF sur le sujet.

Le travail se déclinera dans une première phase par une recherche bibliographique des travaux existants relatifs à la Réalité Virtuelle et au calcul du débit de dose, aux techniques d'Intelligence Artificielle associées au domaine de l'évaluation de cartes de dose, à la prise en main des outils prévus pour la mise en œuvre de la nouvelle méthodologie et à la mise en place des modèles à étudier ainsi que des scénarios types à considérer. Cette première étape intégrera l'étude de la réalisation d'une mesure in-situ dans une installation du CEA pour la validation des méthodes. Dans une seconde phase, on abordera la spécification des simplifications implémentées et l'association des techniques d'Intelligence Artificielle remplaçant des tâches de calcul. Ensuite, une troisième phase importante sera dédiée au développement des méthodes avec les contraintes inhérentes à une utilisation dans les outils de Réalité Virtuelle. Cette étape sera accompagnée d'activités de vérification de la validité des développements réalisés sur des configurations très simplifiées comparées à des calculs de référence avec le code Monte Carlo TRIPOLI-4[®]. Enfin, les dernières phases seront consacrées d'une part à la validation de la méthode et à une intégration préliminaire dans l'outil de Réalité Virtuelle de l'IRFM et d'autre part à la préparation de la fin de la thèse au travers de la rédaction du mémoire final et de la préparation de la soutenance, ponctuée d'au moins une communication en journal à comité de lecture.

L'étudiant abordera au cours de cette thèse des méthodes numériques essentielles dans le domaine du nucléaire, et plus particulièrement de la fusion, comme les méthodes de Monte Carlo. Il se confrontera aussi à des techniques d'Intelligence Artificielle qui, comme on le sait, révolutionnent aujourd'hui le monde scientifique et également la société dans son ensemble, et à des technologies d'avenir telles que la Réalité Virtuelle, qui s'impose de plus en plus notamment dans le Metaverse. Par ailleurs, au sein de l'IRFM, il aura toute latitude pour s'intéresser à des domaines physiques très pointus et suivre les programmes expérimentaux réalisés dans l'installation WEST. Les collaborations envisagées pourront lui permettre de s'intéresser au projet international majeur ITER.

[1] ICRP, 2007. "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4)

[2] Gazzotti, S. et al., "Virtual and Augmented Reality Use Cases for Fusion Design Engineering", Fusion Engineering and design, 172 (2021) 112780

[3] Visonneau, T. et al., "NARMER-1: a photon point-kernel code with build-up factors", EPJ Web of Conferences, 153 (2017) 06028

[4] Mosca P. et al., "APOLLO3[®]: Overview of the New Code Capabilities for Reactor Physics Analysis", International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering M&C-2023, Niagara Falls, Ontario, Canada, August 13 – 17, 2023 (2023)

[5] Brun, E. et al., "TRIPOLI-4[®], CEA, EDF and AREVA reference Monte Carlo code", Annals of Nuclear Energy, 82 (2015) 151-160

[6] Naish J. et al., "Minimising operator dose during JET shutdown using virtual", Fusion Engineering and Design, 124 (2017) 1215-1218

[7] <https://www.cyclife-ds.com/produits/demplus>

[8] Blanchard, J.B. et al., "The Uranie platform: an open-source software for optimisation, meta-modelling and uncertainty analysis", *EPJ Nuclear Science and Technology*, 5 (2019) 4

[9] Mol, A.C. et al., "Radiation dose rate map interpolation in nuclear plants using neural networks and virtual reality techniques", *Annals of Nuclear Energy*, 38 (2011) 705-711

[10] Sasaki M. et al., "New method for visualizing the dose rate distribution around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using artificial neural networks", *Nature Scientific Reports*, 11 (2021) 1857.

[11] Yesilkanat C.M. et al., "Spatial interpolation and radiological mapping of ambient gamma dose rate by using artificial neural networks and fuzzy logic methods", *Journal of Environmental Radioactivity*, 175-176 (2017) 78-93