SUJET DE THESE 2025 : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CONVECTION NATURELLE DIPHASIQUE ET DES REGIMES DE VAPORISATION EN PISCINE DE REFROIDISSEMENT D'UNE INSTALLATION NUCLEAIRE

Les systèmes de refroidissement de nombreuses installations nucléaires utilisent des bassins contenant un grand volume d'eau pour dissiper la chaleur résiduelle des combustibles irradiés. Par exemple, le refroidissement des combustibles usés issus des réacteurs à eau légère est effectué en piscine dite de désactivation [1]. Certains réacteurs nucléaires dits de génération III+, sont dotés de systèmes de refroidissement passifs reposant sur des bassins de large volume [2]. Ainsi, le réacteur américain AP-1000 ou le futur réacteur coréen APR+ s'appuient sur l'utilisation de piscines pour évacuer la puissance résiduelle des combustibles en situation d'accident [3], [4]. Enfin, différentes technologies de petits réacteurs nucléaires modulaires en cours de développement de par le monde proposent un refroidissement passif similaire de leur chaudière voire de leur enceinte de confinement [5].

Pour évaluer la capacité de ces différents systèmes à dissiper la puissance résiduelle de combustibles nucléaires irradiés, il est primordial de bien comprendre et de correctement modéliser les transferts de chaleur pouvant s'opérer en bassin en l'absence de système actif de refroidissement. Dans cette configuration, les échanges d'énergie entre la source chaude du bassin et le réfrigérant s'opèrent essentiellement par convection naturelle. Au cours de ces échanges, le réfrigérant est amené à se vaporiser selon trois mécanismes : par évaporation à la surface libre du volume d'eau, par ébullition nucléée sur la surface de la source de chaleur et lorsque la profondeur du bassin est suffisante, par auto-vaporisation gravitaire au sein même du volume de réfrigérant. Concernant ce dernier mécanisme, la température de saturation du réfrigérant peut en effet fortement varier entre la position de la source de chaleur et la surface libre du liquide pour un bassin de grande profondeur. Par exemple, pour une piscine profonde de 10 mètres, la température de saturation varie d'environ 20°C entre le fond et la surface du bassin. Cette situation est propice au dépassement local des conditions de saturation de l'eau s'y écoulant par convection naturelle. Ce faisant, le liquide alors en équilibre métastable ne pourra parvenir à un équilibre stable correspondant aux conditions de saturation qu'en s'auto-vaporisant. Ce phénomène, générateur de bulles en dessous de la surface libre de la piscine n'a été mis en évidence dans la configuration d'un bassin chauffé par le bas que très récemment (Figure 1) et n'est pour l'heure que partiellement compris [6]-[9]. Dans le but d'estimer la capacité de refroidissement de ce type de systèmes, il convient dès lors de lever ces incertitudes par l'obtention de données expérimentales finement résolues en temps et en espace [9]. Aussi, concernant les écoulements de convection naturelle turbulente diphasique pouvant se développer dans de tels bassins, la communauté internationale a souligné le besoin de données expérimentales adéquatement résolues et pertinentes pour le développement et la validation de modélisations thermohydrauliques idoines à l'échelle locale comme à l'échelle système [10]-[12]. Au niveau national, l'Association Française de Mécanique fait le même constat et insiste dès 2015 sur la nécessité de mieux comprendre et caractériser la turbulence induite par les bulles en convection naturelle diphasique [13]. Enfin, un groupe de travail quadripartite CEA-EDF-Framatome-IRSN sur la thermohydraulique des réacteurs nucléaires (projet NEPTUNE) place ce dernier besoin parmi ses priorités de R&D en 2023 [14].

Ainsi, l'objectif de cette thèse est d'étudier les écoulements de convection naturelle diphasique et les régimes de vaporisation attendus en piscine de refroidissement d'une installation nucléaire présentant une variation verticale significative de sa température de saturation. L'auto-vaporisation gravitaire et la turbulence induite par les bulles dans une telle configuration seront particulièrement investiguées. La thèse s'étendra sur trois ans et se déroulera en collaboration avec l'Université catholique de Louvain (UCLouvain, Belgique) et le laboratoire LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels) du CNRS Grenoble. Le candidat sera affilié académiquement à l'UCLouvain, où il effectuera la majeure partie de ses travaux de recherche sous la direction du Pr. Yann Bartosiewicz. Au cours de cette thèse, des données expérimentales suffisamment résolues en temps et en espace seront obtenues au moyen du dispositif d'essais AQUARIUS développé lors d'une recherche doctorale précédente à l'UCLouvain [9]. Les conditions d'écoulement dans le bassin seront caractérisées finement, par l'acquisition des champs de vitesse, de température et de taux de vide au sein du liquide. Pour ce faire, des techniques avancées de stéréo-vélocimétrie par images de particules en milieu diphasique, de thermométrie et d'ombroscopie seront respectivement mises en œuvre. A terme, la réalisation de ces expériences permettra la création d'une banque de données de référence, de qualité « CFD grade » [15], pertinentes pour la simulation thermohydraulique des piscines de refroidissement. Lors de ce projet de thèse, le doctorant pourra développer ses compétences dans le domaine de la thermohydraulique expérimentale par la définition, la réalisation, l'interprétation d'essais et l'utilisation de moyens de mesure d'écoulements diphasiques avancés.

Profil recherché : Diplôme d'ingénieur ou Master avec spécialité : thermique, mécanique des fluides, thermohydraulique.

Démarrage de thèse : Septembre 2025.

Localisation : Université catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve, Belgique) et CEA IRESNE (Cadarache, France).

Contacts :

- Dr. Jimmy Martin, CEA : jimmy.martin@cea.fr
- Pr. Yann Bartosiewicz, UCLouvain : yann.bartosiewicz@uclouvain.be
- Dr. Nathanaël Machicoane, LEGI : nathanael.machicoane@univ-grenoble-alpes.fr

Références :

[1] OECD/NEA (2014). « Status report on spent Fuel Pools under Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accident Conditions », rapport OCDE NEA/CSNI/R(2015)2

[2] W. Surip, N. Putra, A. R. Antariksawan (2022). « Design of passive residual heat removal systems and application of two-phase thermosyphons: A review », Progress in Nuclear Energy, Vol. 154, pp. 104473

[3] T.L. Schulz (2006). « Westinghouse AP1000 advanced passive plant », Nuclear Engineering and Design, Vol. 236, pp. 1547-1557

[4] K. H. Kang, S. Kim, B. U. Bae, Y. J. Cho, Y. S. Park, B. J. Yun (2012). « Separate and integral effect tests for validation of cooling and operational performance of the APR+ passive auxiliary system », Nuclear Engineering and Technology, Vol. 44, Number 6

[5] IAEA (2022). « Advances in Small Modular Reactor Technology Developments - A Supplement to: IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS) », rapport AIEA

[6] J. Martin, P. Ruyer, M. Duponcheel, Y. Bartosiewicz (2023). « A novel experimental observation of the gravity-driven flashing of metastable water in a heated pool », Nuclear Engineering and Design, Vol. 410, pp. 112371

[7] B. Migot, J. Martin (2024). « An experimental study of the thermal-hydraulics of a spent nuclear fuel pool under loss-of-cooling accident conditions. Part I: the MIDI facility and its main experimental results », Nuclear Engineering and Design, Vol. 426, pp. 113404

[8] J. Martin, B. Migot (2024). « An experimental study of the thermal-hydraulics of a spent nuclear fuel pool under loss-of-cooling accident conditions. Part II: a first interpretation of the MIDI tests », Nuclear Engineering and Design, Vol. 426, pp. 113406

[9] J. Martin (2023). « The gravity-driven flashing of metastable water in a pool heated from below, an experimental study », thèse de doctorat de l'Université catholique de Louvain

[10] F. Mascari, B.G. Woods, K. Welter, F. D'Auria, A. Bersano, P. Maccari (2023). « Small modular reactors and insights on passive mitigation strategy modeling », Nuclear Engineering and Design, Vol. 401

[11] OECD/NEA (2016). « A state-of-the-art report on scaling in system thermal-hydraulics applications to nuclear reactor safety and design », rapport NEA/CSNI/R(2016)14

[12] OECD/NEA (2017). « Phenomena Identification and Ranking Table: R&D Priorities for Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accidents in Spent Nuclear Fuel Pools », rapport NEA/CSNI/R(2017)18

[13] AFM (2015). « Livre blanc de la recherche en mécanique – enjeux industriels et sociétaux – recherche, innovation, formation », EDP Sciences

[14] CEA/DES (2023). « Actions couvrant les besoins prioritaires de R&D pour la CFD », note technique DES/ISAS/DM2S/STMF/DIR/NT/2023-71219/A

[15] OECD/NEA (2022). « Requirements for CFD-Grade Experiments for Nuclear Reactor Thermal Hydraulics », rapport OCDE NEA/CSNI/R(2020)3

Figure 1 : illustration du phénomène d'auto-vaporisation gravitaire, attendu accidentellement en piscine d'entreposage de combustibles nucléaires usés, reproduit dans deux installations expérimentales d'échelle et de nature différentes. Gauche : dispositif MIDI [7], [8]. Droite : dispositif AQUARIUS [6], [9]