

## Sujet de thèse 2024

### **Etude expérimentale et numérique de l'ébullition sous-saturée le long d'une plaque verticale en régime de convection naturelle à haut nombre de Rayleigh, caractéristique des piscines de refroidissement de SMR**

- Directeurs de thèse : Michael Le Bars (IRPHE) et Julie-Anne Zambaux (IRSN, Cadarache)
- Contacts : [michael.le-bars@univ-amu.fr](mailto:michael.le-bars@univ-amu.fr) et [julie-anne.zambaux@irsn.fr](mailto:julie-anne.zambaux@irsn.fr)
- Profil du candidat : titulaire d'un master 2 spécialisé en mécanique des fluides, avec des connaissances en méthodes numériques et un goût pour l'approche expérimentale.
- Financement de thèse IRSN acquis

#### **Contexte et objectifs**

Dans différents designs de petits réacteurs (Small Modular Reactors ; SMR) à eau légère, l'enceinte de confinement métallique est immergée dans une piscine d'eau. Cette piscine doit permettre en cas d'accident d'assurer le refroidissement et de limiter la montée en pression dans l'enceinte. Dans les stratégies de gestion d'accidents, et notamment en cas d'accident grave, il est prévu que la piscine puisse assurer le refroidissement sur un temps long (plusieurs jours) sans intervention. Afin de valider les approches de sûreté et de développer des outils d'analyse pertinents comme par exemple pour le code système accident grave ASTEC, il est important de bien comprendre les écoulements de convection naturelle et transferts thermiques au sein de cette piscine en conditions accidentelles. De même, le rôle de l'ébullition qui peut apparaître sur la paroi de l'enceinte, à mesure que sa température augmente au cours de l'accident, doit également pouvoir être pris en compte.

En raison des dimensions importantes de ce type de dispositif, des écoulements de convection naturelle hautement turbulents (avec un nombre de Rayleigh caractéristique de l'ordre de  $10^{14}$ - $10^{15}$ ) sont attendus. Ces régimes sont difficiles à étudier que ce soit expérimentalement ou numériquement et il existe actuellement très peu d'études avec une analyse fine de ce type d'écoulement (voir [1] et [2] pour de premiers exemples d'études numériques). Si des études commencent à être réalisées, l'état des connaissances quant aux différents régimes d'écoulement et transition entre ces régimes à haut nombre de Rayleigh est parcellaire. Pour de telles études, des modélisations de type LES peuvent être envisagées même si on est à la limite de ce que les capacités de calcul permettent actuellement.

Il existe également d'importantes inconnues concernant le comportement de l'ébullition qui peut être attendue en situation accidentelle le long de la paroi verticale de l'enceinte, même pour des températures d'eau de la piscine sous-saturée. Comment ce phénomène d'ébullition interagit avec la boucle de convection naturelle turbulente est en effet une question importante. Ainsi afin de pouvoir proposer à terme, une modélisation numérique d'un écoulement de convection naturelle turbulente en prenant en compte l'ébullition en paroi, il est nécessaire de savoir ce qu'il advient des bulles de vapeur et l'importance qu'elles vont jouer : si elles restent en paroi et participent à un échauffement local, ou si elles sont arrachées et se condensent dans le reste de l'écoulement tout en induisant une turbulence supplémentaire par exemple. Le rôle joué par les bulles de vapeur va conditionner les hypothèses et le choix du type de modélisation à adopter et donc de la méthode de calcul à choisir. Il est donc nécessaire d'obtenir d'abord des données expérimentales pour comprendre et qualifier l'interaction entre les bulles

dues à l'ébullition nucléée sur la paroi et ce type d'écoulement de convection naturelle à haut nombre de Rayleigh.

La thèse proposée vise à fournir des premiers éléments pour progresser sur l'amélioration des connaissances et l'élaboration d'une modélisation pertinente pour l'évaluation du refroidissement de l'enceinte d'un SMR immergée dans une piscine. Cette thèse comportera à la fois :

- un volet expérimental principal centré sur la question de l'ébullition sur une paroi verticale dans un écoulement de convection naturelle turbulente : l'étude expérimentale devra permettre d'une part d'apporter des éléments de réponse sur le rôle joué par l'ébullition nucléée et les choix de modélisation associés et d'autre part d'apporter des données expérimentales pour la validation des différents régimes d'écoulement.
- un volet numérique qui se concentrera sur des conditions monophasiques visant à mettre en évidence les différents régimes pour des conditions sans ébullition nucléée. Les résultats de ce volet numérique permettront d'une part d'aider à la calibration et définition du volet expérimental, ainsi qu'à la production de données concernant les régimes d'écoulement à haut nombre de Rayleigh.

### **Volet Expérimental**

Une installation expérimentale sera conçue et mise en place pendant la thèse, permettant d'étudier en détail l'ébullition sur une plaque verticale dans un écoulement de convection naturelle très turbulent. L'installation sera développée dans les locaux de l'IRPHE à Marseille. Le dispositif expérimental envisagé consiste en deux parois verticales l'une en face de l'autre chauffées différentiellement pour induire l'écoulement de convection naturelle. La hauteur du dispositif est prévue autour de 50 cm. Afin d'atteindre le régime à haut nombre de Rayleigh d'intérêt, il est proposé de travailler avec un fluide simulant plutôt que de l'eau. Le fluide de travail envisagé est le NOVEC 7000TM, fabriqué par 3MTM, fluide non toxique utilisé dans l'industrie et dont le nombre de Prandtl est du même ordre de grandeur que l'eau mais avec une viscosité et une conductivité thermique plus faible pour une densité plus importante, ce qui permet d'atteindre des nombres de Rayleigh plus grand à l'échelle d'essais analytique de laboratoire. Une analyse dimensionnelle réalisée au préalable a montré que l'utilisation de ce fluide permet de retrouver, à l'échelle du laboratoire, les nombres adimensionnels principaux caractéristiques de l'écoulement dans la situation réelle (nombre de Rayleigh et nombre de Prandtl), de la vaporisation (nombre de Stefan) et du processus de détachement des bulles (nombre de Rouse). Ce fluide a une température d'ébullition de 34°C. Il a par exemple été utilisé pour étudier l'ébullition nucléée sur une plaque horizontale en régime de convection naturelle dans [3].

En raison de la faible température d'ébullition du fluide proposé, des parois transparentes en plexiglas peuvent être envisagées pour l'installation, même pour les éléments chauffants, permettant un accès pour la visualisation sur l'ensemble de la veine. Un dispositif de caméras rapides permettra d'observer sur la paroi chauffée la formation de bulles dues à l'ébullition nucléée et de caractériser leur temps de résidence sur le site de nucléation, leur diamètre de détachement ainsi que des phénomènes de glissement de bulles potentiels (voir [4] par exemple). Les mesures devront également permettre de suivre les bulles après leur détachement pour déterminer si elles restent en proche paroi et peuvent s'accumuler en haut de la paroi et éventuellement former des poches de vapeurs localement ou si elles sont arrachées par la boucle de convection naturelle. Un système de PIV (Particle Image Velocimetry) permettra de visualiser les champs de vitesses globaux dans le domaine dans différents plans choisis. Des mesures complémentaires sont prévues, notamment du transfert thermique global ou de la température en certains points du système.

### **Volet Numérique**

Des calculs numériques massivement parallèle LES (Large Eddy Simulation) seront également réalisés. Ces calculs devront permettre de mettre en évidence les différents régimes d'écoulement existants, qui

sont mal connus pour les forts nombres de Rayleigh et les transitions correspondantes. Ces calculs se concentreront sur l'étude du régime de convection naturelle hautement turbulent pour un écoulement monophasique. Ils s'appuieront pour validation sur d'anciennes expériences à grande échelles (par exemple celle citée dans [2]) ainsi que sur de futurs résultats expérimentaux sur des installations encore en projet. Ce travail de calculs numériques permettra de valider les choix en termes de régime d'écoulement considéré dans l'expérience proposée dans cette thèse et constitue une première étape pour la proposition d'une modélisation pertinente du problème complet prenant également en compte l'ébullition, qui sera envisagée après l'analyse des résultats expérimentaux.

- [1] A. De Angelis, N. Reinke and W. Ambrosini, "Assessing water-wall behaviour for a light water Small Modular Reactor with the aid of CFD analyses", *Annals of Nuclear Energy*, 184, 2023.
- [2] S. Yang and U. Bieder, "Using of large eddy simulation model for a spatially developing turbulent natural convection boundary layer in water along a side-heated vertical wall with high Rayleigh number ( $Ra^* \sim 8 \times 10^4$ )", *International Journal of Thermal Science*, 187, 2023.
- [3] D. N. Guzman, Y. Xie, S. Chen, D. F. Rivas, C. Sun, D. Lohse and G. Ahlers, "Heat-flux enhancement by vapour-bubble nucleation in Rayleigh-Bénard turbulence", *Journal of Fluid Mechanics*, 787 (pp 331-366), 2016.
- [4] S. Li, S. Tan, C. Xu, P. Gao, and L. Sun. An experimental study of bubble sliding characteristics in narrow channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57 (pp 89-99), 2013.