

Titre en français : 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

Titre en anglais : Experimental and numerical study of subcooled boiling along a vertical plate in natural convection regime at very high Rayleigh number, representative of SMR cooling pools

Nom du directeur de thèse : Michael Le Bars et co-directrice Julie-Anne Zambaux

Tel : 0413552020

E-Mail : michael.le-bars@univ-amu.fr

Laboratoire : IRPHE et IRSN Cadarache

Financement : acquis

Type de financement : bourse de thèse IRSN

Résumé en français :

Dans différents designs de petits réacteurs nucléaires (Small Modular Reactors ; SMR), 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, il est prévu que la piscine puisse assurer le refroidissement sur 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 sont attendus, avec un nombre de Rayleigh caractéristique de l'ordre de 10^{14} - 10^{15} . 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). Il existe également d'importantes inconnues concernant le comportement de l'ébullition. 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 leur importance dans les transferts thermiques : 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. Il est donc nécessaire d'obtenir d'abord des données expérimentales.

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 centré sur la question de l'ébullition sur une paroi verticale dans un écoulement de convection naturelle turbulente : l'étude 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. Nous utiliserons un fluide simulant avec une température d'ébullition de 34°C [3], qui nous permettra d'atteindre les régimes d'intérêt dans un dispositif aux dimensions réduites (~50cm de haut). Des mesures PIV, des visualisations rapides, et des mesures de température nous permettront de caractériser l'écoulement diphasique turbulent.
- un volet numérique qui se concentrera d'abord sur des conditions monophasiques visant à mettre en évidence les différents régimes pour des conditions sans ébullition dans le cadre de calculs massivement parallèle type LES (Large Eddy Simulation). Les résultats de ce volet numérique permettront d'aider à la calibration du volet expérimental, ainsi qu'à la production de données concernant les régimes d'écoulement à haut nombre de Rayleigh. Nous envisagerons ensuite, après l'analyse des résultats expérimentaux, une modélisation pertinente du problème complet prenant également en compte l'ébullition.

Résumé en anglais :

In various designs of Small Modular Reactors (SMRs), the metallic containment vessel is submerged in a water pool. This pool is intended to ensure cooling and to limit pressure buildup within the vessel in the event of an accident. In accident management strategies, it is anticipated that the pool can provide cooling for several days without intervention. To validate safety approaches and develop relevant analysis tools such as the severe accident system code ASTEC, it is important to understand natural convection flows and heat transfers within this pool under accidental conditions. Similarly, the role of boiling that may occur on the vessel wall as its temperature increases during the accident must also be accounted for.

Due to the significant dimensions of this type of device, highly turbulent natural convection flows are expected, with a characteristic Rayleigh number on the order of 10^{14} - 10^{15} . These regimes are challenging to study both experimentally and numerically, and there are currently very few studies with a detailed analysis of such flow (see [1] and [2] for recent examples of numerical studies). There are also significant unknowns regarding boiling behavior. In order to eventually propose a numerical modeling of turbulent natural convection flow considering wall boiling, it is necessary to understand what happens to vapor bubbles and their importance in heat transfer: whether they remain on the wall and contribute to local heating, or if they are detached and condense in the rest of the flow while inducing additional turbulence, for example. Therefore, obtaining experimental data is necessary first.

The proposed thesis aims to provide initial elements to progress in improving knowledge and developing relevant modeling for evaluating the cooling of a submerged SMR vessel in a pool. This thesis will include:

- An experimental component focused on the question of boiling on a vertical wall in a turbulent natural convection flow: the study should provide insights into the role of nucleate boiling and associated modeling choices, as well as provide experimental data for validating different flow regimes. We will use a simulating fluid with a boiling temperature of 34°C [3], which

will allow us to reach regimes of interest in a small-scale device (~50cm tall). PIV measurements, high-speed visualizations, and temperature measurements will help characterize the turbulent two-phase flow.

- A numerical component that will initially focus on single-phase conditions to highlight different regimes for conditions without boiling using massively parallel LES (Large Eddy Simulation) calculations. The results of this numerical component will assist in calibrating the experimental component and produce data regarding high Rayleigh number flow regimes. We will then consider, after analyzing the experimental results, a relevant modeling of the complete problem also taking boiling into account.

Profil du candidat recherché : titulaire d'un master 2 spécialisé en mécanique des fluides, avec des connaissances en méthodes numériques et un goût pour l'approche expérimentale

Publications sur le sujet :

- [1] A. De Angelis, et al. *Annals of Nuclear Energy*, 184, 2023.
- [2] S. Yang and U. Bieder. *International Journal of Thermal Science*, 187, 2023.
- [3] D. N. Guzman, et al. *Journal of Fluid Mechanics*, 787 (pp 331-366), 2016.

Insertion professionnelle après thèse : recherche publique et privée