



**Rapport sur le mémoire de thèse de Mr Masaru NAGASO intitulé "Etude de la propagation des ultrasons dans un milieu fluide hétérogène en vue de la surveillance en fonctionnement d'un réacteur nucléaire à caloporteur sodium"**

**Mounsif ECH-CHERIF EL-KETTANI, Professeur, LOMC UMR 6294, FANO2 FR 3110, UNIVERSITE DU HAVRE.**

Le sujet traite de l'élaboration de modèles numériques prédictifs dans le but d'établir la signature acoustique des fluides hétérogènes et turbulents, l'application visée étant la sécurité des réacteurs nucléaires de nouvelle génération refroidis au sodium liquide. Le mémoire, en anglais, est composé de 130 pages et de 4 chapitres. Il est rédigé dans un style fluide et contient une bibliographie riche. Beaucoup de figures claires et bien illustrées, viennent étayer les résultats obtenus. Les méthodes et approches adoptées sont bien exposées, et les résultats systématiquement analysés et interprétés.

Les chapitres 3 et 4 constituent le cœur du travail, les chapitres 1 et 2 étant dédiés respectivement à un état de l'art sur les méthodes de caractérisation ultrasonore du sodium liquide, et aux différentes méthodes numériques présentes dans la littérature. Ces 2 chapitres constituent une introduction aux objectifs de la thèse, en dégagant les outils de travail : la méthode des éléments finis par la technique des éléments spectraux qui présente l'avantage de robustesse et de convergence rapide comparativement aux méthodes classiques, et les apports nouveaux du travail : la thermométrie ultrasonore traitée dans le chapitre 3, et la modélisation 3D des fluides hétérogènes traitée dans le dernier chapitre.

La chapitre 3 expose une méthode numérique 2D de thermométrie ultrasonore qui est un modèle d'un banc expérimental utilisé dans un travail antérieur, et faisant appel à une huile Silicone comme milieu de propagation. La démarche est basée sur la détermination de l'écart des temps de vol de signaux ultrasonores de fréquence 1 MHz correspondant à la simulation d'ondes planes, lorsqu'un champ statique de température subit des variations de l'ordre de 1%, soit 5°C, entre 2 milieux. Les résultats numériques établissent clairement un retard d'environ 1  $\mu$ s, compatible avec la fréquence du signal ultrason, et donc à priori mesurable expérimentalement. Le cas traité est simplificateur car ne tenant pas compte des fluctuations du champ de température, mais permet d'avoir une idée sur des valeurs de référence pour les temps de vol, avant d'aborder le cas plus réaliste d'un champ fluctuant. Dans ce but, une fluctuation gaussienne aléatoire est appliquée pour simuler des variations du champ de température. Une étude statistique sur la valeur moyenne et la variance des temps de vol est menée et montre qu'il est possible de détecter, même en présence de fluctuations du champ de température, un écart de 1% de ce champ. Ce résultat numérique venant de la modélisation d'un banc expérimental existant, il aurait été souhaitable de confronter expérience et modèle.

Le chapitre 4 représente un gros travail de modélisation 3D plus proche du cas réel, tenant compte de l'hétérogénéité du champ de température due à l'écoulement des flux du sodium chauds et froids dans le réacteur. Il consiste en la modélisation numérique d'un banc expérimental présentant la diffusion de 2 flux chauds encadrant un flux froid, et d'étudier la répartition du champ de température en 3D et en fonction du temps dans le réacteur. L'étude est menée avec beaucoup de soin et les paramètres de la simulation sont bien décrits et leur choix justifié, tenant compte de l'appétence de la modélisation 3D en ressources de calcul. Un nouvel indice de l'intensité de la fluctuation en température est défini, nommé CTFI, tenant compte du fait que l'onde en une position donnée, est affectée par son milieu environnant. L'analyse des signaux, réalisée en différentes altitudes dans le réacteur, montre que les signaux ultrasonores peuvent rendre compte de l'état du mélange dans le réacteur, et qu'ils sont particulièrement sensibles en des positions clés comme le point de fusion des flux, ou le point de combinaison. L'étude montre également que ces 2 points correspondent aux points d'inflexion de la dérivée seconde du CTFI. L'analyse des temps de vol montre qu'en un point d'observation donné, ces derniers dépendent non seulement de la fluctuation locale de la température, mais aussi de celle des points environnant. Ces résultats sont logiques pour une simulation 3D où les différents points de l'espace s'influencent mutuellement pour créer la valeur du champ en un point donné. Ce dernier chapitre est assez conséquent en nombre de résultats et analyses.

Différentes perspectives sont données en fin du manuscrit, montrant les ouvertures et extensions possibles de ce travail.

En conclusion, il s'agit ici d'un travail de modélisation numérique conséquent, réalisé avec soin et rigueur. Mr Nagaso a pu le mener à bien, plus particulièrement la simulation 3D dont tout un chacun connaît la difficulté et la lourdeur. Une corrélation forte est finalement montrée entre les mesures ultrasonores et les fluctuations thermiques avec écoulement des fluides caloporteurs. Le point faible de ce travail est inhérent à son point fort : il est purement numérique. Les résultats importants dégagés ici mériteraient, dans un futur proche, la confrontation expérimentale, même dans le cas de configurations simplifiées. Ce travail a en outre été diffusé dans une revue internationale de rang 1 et dans deux communications internationales.

Je donne par conséquent un avis très favorable à la défense de ce travail devant un jury.

Le Havre le 22 avril 2018

Mounsif ECH-CHERIF EL-KETTANI

