



DISC Département d'Imagerie, Simulation et Contrôle

Rapport sur le manuscrit de thèse de doctorat de Masaru NAGASO

Le mémoire de thèse traite de la modélisation de la propagation ultrasonore dans un milieu fluide hétérogène (en l'occurrence le sodium liquide) en vue de la surveillance en fonctionnement d'un réacteur nucléaire à caloporteur sodium.

Le manuscrit (en anglais) est bien rédigé et clair. Si l'on peut regretter uniquement l'usage trop systématique de sigles et quelques omissions, on apprécie surtout la qualité de l'anglais et les concision et volonté de synthèse du document. Le manuscrit est doté d'une bibliographie très étoffée et complète ; il comprend 5 chapitres.

Il n'inclut pas d'introduction mais le premier chapitre démarre par une description du contexte de la thèse qui s'inscrit dans le cadre de la surveillance des Réacteurs Rapides refroidis au Sodium liquide (SFR en anglais), envisagés pour la future génération IV de réacteurs nucléaires. En raison de l'opacité du sodium, le contrôle des SFR est un challenge difficile et très attendu d'un point de vue des applications industrielles. Le chapitre 1 s'attache ensuite à établir un état de l'art des techniques et modélisations ultrasonores dédiées à la propagation des ultrasons dans le sodium des réacteurs SFR. Il aborde successivement les particularités des propriétés matériau du sodium liquide et les techniques ultrasonores employées dans ce milieu (thermographie, télémétrie) puis les expériences (NAJECO, PLAJECT) et modélisations de la circulation du sodium au sein du réacteur (laquelle peut modifier la propagation des ultrasons). Enfin, des modèles existants de propagation acoustique en milieu thermiquement hétérogène sont rappelés. Dans ce chapitre, on peut parfois regretter que les termes techniques et figures soient parfois détaillés de manière sommaire. Néanmoins, ce chapitre a le grand mérite de fournir un descriptif et un résumé exhaustifs des très nombreux travaux précédemment effectués notamment au CEA (DEN Cadarache et STMF Saclay) sur les ultrasons en sodium et les flux de sodium au sein des SFR. Il sera donc forcément utile pour les travaux qui suivront sur l'inspection des SFR.

Le chapitre 2 du mémoire rend compte de l'état de l'art en modélisation de la propagation des ultrasons dans les milieux hétérogènes et/ou en mouvement. Il s'agit principalement de rappels théoriques mais qui s'avèrent particulièrement utiles pour aborder la suite de la thèse. L'obtention des équations de propagation en milieu fluide est d'abord fournie en reprenant les travaux classiques de Brekhovskikh et Godin. Je suggère de citer en complément le textbook d'Ostashev dédié aux milieux fluides en mouvement. Masaru Nagaso effectue ensuite une revue des méthodes numériques de simulation en milieu complexe (différences finies FDTD, éléments finis transitoires, éléments spectraux). Deux méthodes récentes de différences finies sont particulièrement détaillées ainsi que le code SPECFEM employé dans la suite de la thèse. A ce stade, une brève discussion des critères de convergence et de stabilité de ces méthodes numériques (condition CFL et nombre d'éléments par longueur d'onde évoqués néanmoins en section 4.3) et de leur signification physique pourrait compléter agréablement ces rappels.

Les chapitres 3 et 4 constituent le cœur de la thèse de M. Nagaso et concentrent d'importants et pertinents travaux en matière de simulation et d'analyse des simulations obtenues.

Le chapitre 3 porte sur des simulations numériques 2D en milieu fluide hétérogène dans le cadre de deux applications différentes. Dans la première, M. Nagaso a tout d'abord apporté des améliorations aux méthodes numériques de différences finies décrites au chapitre 2 : augmentation de l'ordre de discrétisation spatiale et parallélisation du code. Il a ensuite comparé SPECFEM avec les deux méthodes FDTD améliorées (détaillées au chapitre 2) sur l'expérience UPSILON (propagation d'ondes dans une huile de silicone avec gradient de température), montrant que SPECFEM requiert une discrétisation spatiale bien inférieure à celle des FDTD. Si quelques détails et comparaison des schémas en temps employés (Runge-Kutta, Newmark) pourraient la parfaire, cette comparaison de modèles numériques différents est très appréciable et très convaincante. La seconde application évoquée utilise le modèle SPECFEM pour montrer qu'un changement de 1% de la température du sodium à la sortie d'un assemblage de combustible peut être détecté par une mesure de thermométrie ultrasonore c.à.d. à l'aide de la variation de temps de vol issus des deux bords de l'assemblage. Cette faisabilité a été démontrée dans le cadre de champs statiques de température mais aussi si on leur ajoute une fluctuation aléatoire de température (modélisée par un champ gaussien) censée représenter l'effet d'une circulation du sodium. Dans ce dernier cas, il est nécessaire, pour parvenir à la détectabilité de la variation d'1 %, de moyenner les temps de vol mesurés sur un nombre suffisant de réalisations de champs de température. Un snapshot présenté illustre avec esthétisme la robustesse de la simulation éléments finis de la propagation d'ondes ultrasonores autour d'un assemblage. Cette seconde étude est à nouveau établie avec rigueur et les résultats obtenus très prometteurs à ce stade. La question de la représentativité en sortie de cœur de champs de fluctuation gaussiens se pose alors naturellement et M. Nagaso y répond très honnêtement en conclusion de ce chapitre. Il indique aussi alors que la prise en compte dans SPECFEM de milieux en mouvement n'est pas effective, nécessitant de futurs développements.

Le chapitre 4 traite de la modélisation 3D (en espace) de la propagation des ultrasons dans un champ de température réaliste (fourni par le CEA/STMF) dépendant d'une quatrième dimension, le temps. Ce champ de température fluctuant dans le temps est obtenu par modélisation dans une configuration spatiale symétrique nommée PLAJECT reproduisant un ensemble de trois jets (un jet central et deux jets externes plus chauds). La complexité est nettement accrue par rapport au chapitre 3 : les simulations acoustiques sont 3D en espace et les données d'entrée en température sont 3D et temporelles. Des simulations ultrasonores SPECFEM sont réalisées successivement pour un champ de température à un temps donné puis pour différents temps de fluctuation de la température. M. Nagaso parvient alors par un ensemble très complet d'analyses à montrer qu'il existe un lien entre des descripteurs de mesure ultrasonore (comme le temps de vol) et un indicateur représentatif des fluctuations de température (appelé dans la thèse CTFI). Les analyses faites mettent aussi en branle la représentativité de champs de fluctuation gaussiens car à faible distance des jets une directivité des fluctuations acoustiques est observée.

Le chapitre 5 fournit conclusions qui résument agréablement le travail et perspectives. Une première perspective est d'upgrader l'expérience UPSILON en utilisant un réseau multiélément de transducteurs. Une deuxième vise à tester un maillage hexaédral dans SPECFEM pour traiter des géométries de pièces plus complexes. Enfin, une ardue modification du code SPECFEM pourrait être envisagée pour modéliser la propagation sonore dans un liquide en mouvement.

M. Nagaso a fait montre dans sa thèse d'une habilité certaine à mettre en œuvre et adapter des méthodes numériques existantes dans des configurations de contrôle complexes (fluide avec fluctuations spatiales et temporelles discrètes de température) requérant des données massives. J'ai beaucoup apprécié le souci constant de M. Nagaso de fournir soigneusement les paramètres des différentes expériences évoquées, qu'elle soient bien réelles ou simulées : notamment, dans les simulations numériques SPECFEM, les paramètres de maillage (par

exemple son obtention à partir du maillage des simulations thermo-hydrauliques) sont toujours fournis. Les travaux présentés font état d'une avancée très importante dans la modélisation de la propagation dans le milieu sodium turbulent qui est la prise en compte de données réalistes de thermo-hydraulique en sortie de cœur de réacteur. Les analyses des simulations sont effectuées avec rigueur et de manière très complète.

M. Nagaso a effectué un travail conséquent et très intéressant, touchant de nombreux domaines (thermo-hydraulique, acoustique, mathématiques appliquées, informatique, mesures physiques) et donnant lieu à au moins une publication à comité de lecture.

C'est pourquoi je suis très favorable à ce que M. Nagaso soutienne sa thèse de doctorat d'Acoustique de l'université d'Aix-Marseille.

Saclay, le 20/04/2018



Michel Darmon

Ingénieur Chercheur, *Expert du CEA, HDR, Dr*

CEA-LIST / DISC / Laboratoire de Simulation et de Modélisation en Acoustique (LSMA)

CEA-Saclay, DIGITEO LABs, bât. 565, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France.

tel. : 33 1 69 08 29 88

mail : michel.darmon@cea.fr

Commissariat à l'énergie atomique
Centre de Saclay, bâtiment 565- 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél : 01 69 08 32 18 – Fax 01 69 08 75 97 - **R.C.S. PARIS B 775 685 019**