

ANALYSE MATHÉMATIQUE ET SIMULATION NUMÉRIQUE DES MODÈLES D'ÉCOULEMENTS BOUILLANTS POUR LA THERMOHYDRAULIQUE DES CENTRALES NUCLÉAIRES PAR THI PHUONG KIEU NGUYEN

Présentée par : Thi Phuong Kieu Nguyen Discipline : **Mathématiques appliquées**
Laboratoire : LMV

Le vendredi 29 janvier 2016 à 14h

L'INSTN

Bâtiment 395 - Salle 111

CEA Saclay

91191 Gif/Yvette cedex

Résumé :

Dans la thermohydraulique des réacteurs nucléaires, le fluide de refroidissement est habituellement étudié en utilisant des modèles moyennés d'écoulement diphasiques, dans lesquels le fluide possiblement bouillant est décrit à un niveau macroscopique comme un mélange homogénéisé, et la présence des deux phases est représentée par le taux de vide (fraction volumique de la vapeur). Suivant l'approche moyennée, différents modèles d'écoulements diphasiques ont été explorés en fonction de la complexité du régime d'écoulement et de la précision souhaitée. Ces différents modèles sont associés à des hypothèses simplificatrices spécifiques concernant les déséquilibres mécanique et thermique.

Nous nous concentrons dans cette thèse sur le déséquilibre mécanique qui conduit à de nombreuses difficultés mathématiques telles que l'hyperbolicité conditionnelle, les champs caractéristiques non classiques, les points soniques présents même dans le régime subsonique, les produits non conservatifs et les termes source très raides. De nombreuses difficultés numériques sont également inhérentes à ces modèles tels que la positivité du taux de vide, et l'absence de régularité des termes sources. Dans les modèles à deux fluides, la transition vers un régime à une seule phase conduit à une phase évanescence dont la vitesse peut devenir singulière et nous avons besoin de caractériser les paramètres liés à cette phase absente.

Afin de mieux comprendre ces modèles d'écoulements diphasiques, nous étudions en détail leur limite incompressible, où les propriétés mathématiques peuvent être étudiées en profondeur. Nous démontrons l'existence et l'unicité de la solution admissible au problème de Riemann dans la limite incompressible du modèle bi-fluide isentropique à six-équations. La solution présente des vitesses non triviales et bien définies pour les deux phases, même dans la limite de la phase évanescence. Pour la simulation numérique, nous avons utilisé des solveurs de Riemann exacts et approchés.

Pour certains modèles compressibles nous proposons une stratégie générale de construction des matrices de Roe et détaillons la construction dans le cas du modèle à deux fluides compressibles en équilibre thermique (modèle à cinq-équations). Nous montrons qu'une correction entropique est nécessaire pour les schémas de type Roe afin de capturer solutions admissibles dans le cas d'une phase évanescence. L'application d'une correction entropique comme celle de Harten pour le schéma de Roe classique apparaît nécessaire pour obtenir une solution avec le taux de vide borné. La simulation du problème de sédimentation (séparation des phases sous l'effet de la gravité) est réalisée avec succès jusqu'à l'état stationnaire avec des vitesses phasiques bornées malgré l'écoulement à contre-courant et la présence de phases évanescences. Enfin, nous présentons le test du canal bouillant qui est fondamental dans la simulation du comportement accidentel des cœurs de réacteurs nucléaires. Nous avons réussi à capturer l'état stationnaire admissible malgré la non-régularité sévère du terme source grâce à la stratégie de décentrement du terme source similaire à celle des flux convectifs.

Abstract :

In the thermal hydraulics of nuclear reactors components, the cooling fluid is usually studied using averaged two-phase flow models, where the boiling fluid is viewed at a macroscopic level as a homogenized mixture, and the presence of the two phases is accounted by the vapor volume fraction ratio. Following the averaged approach, different two-phase flow models have been explored depending on the complexity of the boiling flow regime and the desired accuracy. These different models are associated with

specific simplifying assumptions regarding mechanical and thermal disequilibrium. We focus on this thesis on the mechanical non equilibrium which leads to many mathematical difficulties such as conditional hyperbolicity, characteristic fields with complicate structure and sonic points being common even in the subsonic regime, non conservative products and very stiff source terms. Numerical difficulties are also inherent to these models such as the positivity of the void fraction, and the stiffness of the source terms. Also in the case of two-fluid models, the transition toward a single phase regime leads to the vanishing phase singularity where we need to characterize the parameters related to the absent phase.

In order to understand better these two-phase flow models, we study in details their incompressible limit, where the mathematical properties can be thoroughly explored. We prove the existence and uniqueness of the admissible solution to the Riemann problem in the incompressible limit of the two-fluid model. The solution displays non trivial and well-defined velocities for both phases even in the limit of a vanishing phase. For the numerical simulation we used both exact and approximate Riemann solvers.

For some compressible models we propose a general strategy to build Roe matrices and detail the construction in the case of the five equation compressible two-fluid model with a common temperature for the two phases. We show that an entropy fix is necessary for the Roe-type schemes to capture admissible solutions in the case of vanishing phase. Applying the Harten-entropy fix to the classical Roe scheme, appears necessary to obtain a solution with the void fraction is between 0 and 1. The sedimentation problem is successfully carried out until stationary state with bounded phasic velocities despite counter-current and vanishing phases. Finally, we present the boiling channel test which is fundamental in the simulation of the accidental behavior of nuclear reactor cores. We were able to capture the admissible stationary state despite severe stiffness of the source term thanks to source upwinding strategies.