**Titre de la thèse** : Simulation d’écoulements diphasiques à faible nombre de Mach dans des domaines fermés : d’une correction par centrage de pression à une méthode originale de type compressibilité artificielle

**Mots-clés :** écoulements diphasiques, régime faible Mach, domaine fermé, expansion d’une bulle de vapeur, méthode DEM, méthode ALE, correction par centrage de pression, compressibilité artificielle

**Résumé :**

Des bulles haute-pression en expansion dans un liquide se rencontrent dans plusieurs problèmes de sûreté étudiés dans l’industrie nucléaire : accidents de type Borax dans des réacteurs expérimentaux de type piscine, Accident Hypothétique de Perturbation du Cœur ou Hypothetical Core Disruptive Accident (HCDA) dans un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium. Un accident de type Borax implique une bulle haute-pression créée par l’interaction de matériaux métalliques fondus avec l’eau. Pour un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, le scénario d’un HCDA suppose que le cœur du réacteur a partiellement fondu et que le combustible fondu interagit chimiquement avec le sodium liquide pour produire une large quantité de composants gazeux. L’expansion explosive de la bulle de gaz haute pression ainsi formée génère des charges significatives sur l’enceinte du réacteur.

Une large gamme de nombre de Mach est observée dans un tel écoulement diphasique compressible, avec un régime bas-Mach dans le liquide mais un régime à Mach élevé dans l’autre phase. Le calcul d’écoulements à Mach élevé avec une méthode de type Godunov en formulation volumes finis centrée sur la cellule est désormais une tâche de routine. Cependant, lorsque l’on traite des écoulements bas-Mach, ces solveurs de type Godunov souffrent d’un problème de précision et d’efficacité pour lequel des remèdes ont été proposés dans la littérature.

Dans le but de de comprendre le comportement bas-Mach pour des cas avec ou sans présence d’ondes acoustiques, l’analyse numérique des schémas est tout d’abord réalisée pour des écoulements monophasiques de liquide, décrits à l’aide d’une équation d’état de type gaz raides. La correction bas-Mach de Dellacherie *et al.* est étendue aux écoulements liquides et il est montré que le problème de précision à faible Mach peut effectivement être résolu en centrant la pression. Cependant, l’efficacité de la simulation reste à améliorer.

Une méthode originale à 2 étapes est alors proposée : dans une première étape, une méthode de type compressibilité artificielle est mise en œuvre pour accélérer la résolution du système hyperbolique décrivant la propagation d’ondes acoustiques artificielles de faible amplitude ; dans une seconde étape, une transformation isentropique est appliquée pour prendre en compte les mécanismes de compression / détente en domaines fermés. La méthode est étendue aux maillages mobiles à l’aide d’une approche de type ALE et également étendue à un modèle diphasique à 7 équations avec l’approche Discrete Equation Method (DEM) afin de calculer des écoulements gaz-liquide bas -Mach. Elle est appliquée avec succès à un problème d’expansion bas-Mach d’une bulle dans une enceinte fermée.

**Thesis title**: Solving low-Mach two-phase flows in closed domains: from pressure centering to a novel artificial compressibility method

**Keywords**: two-phase flows, low-Mach regime, closed domain, vapor bubble expansion, DEM method, ALE method, pressure centering correction, artificial compressibility

**Abstract**:

High pressure bubble expansion in liquid is involved in several safety problems studied in the Nuclear Industry, such as Borax-type accidents in pool-type experimental reactors or Hypothetical Core Disruptive Accident (HCDA) in a liquid-sodium fast breeder reactor. A Borax-type accident involves a high-pressure bubble created by the interaction of melted metal materials with water. For a liquid-sodium fast breeder reactor, the scenario of an HCDA supposes the reactor core has partially melted and the molten fuel chemically interacts with the liquid sodium to produce a large quantity of gaseous components. The explosive expansion of the high-pressure gas bubble thus formed yields significant loads on the reactor vessel.

A wide range of Mach number is observed in such two-phase compressible flows with a low-Mach regime in the liquid but a high-Mach regime in the other phase. Computing flows in the high-Mach number regime with a Godunov-type cell-centered finite-volume method is now a routine task. However, when dealing with low-Mach flows, these Godunov solvers suffer from an accuracy and efficiency problem for which some fixes have been proposed in the literature.

With the purpose of understanding the low-Mach behavior for cases with and without the presence of acoustic waves, the numerical analysis of the schemes is first performed for single-phase liquid flows governed by the stiffened gas equation of state. The low-Mach correction of Dellacherie et al. is extended to liquid flows and it is demonstrated the accuracy problem can be indeed fixed by centering the pressure. However, the overall efficiency of the simulation remains to be improved.

A novel two-step method is thus proposed: in a first step, it relies on an artificial compressibility approach to speed up the computation of the hyperbolic system of PDEs for artificial acoustic waves of small amplitude; in a second step, it performs an isentropic transformation to take into account the compression/expansion of closed domains. The method is extended to moving meshes using the ALE approach and also extended to the seven-equation two-phase model solved with the Discrete Equation Method (DEM) to compute low-Mach two-phase flow problems. It is successfully applied to a low-Mach bubble expansion problem in a closed vessel.