

Construction d'une méthode de pénalisation pour la simulation d'écoulements liquide-bulles

Dominique Legendre¹, Jérôme Laviéville², Antoine Morente²

1. Institut de mécanique des fluides de Toulouse
UMR CNRS 5502
Allées du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse, France
Dominique.Legendre@imft.fr

2. EDF R&D
Département MFEE Groupe I81 (Écoulements réactifs et polyphasiques industriels)
6, Quai Watier 78401 Chatou
jerome-marcel.lavieville@edf.fr
antoine.morente@edf.fr

Résumé :

La simulation d'un écoulement fluide en présence d'une bulle sphérique est étudiée en représentation Euler-Lagrange. Nous construisons une méthode numérique de pénalisation volumique pour prendre en compte la présence de bulles dans notre écoulement. En omettant les efforts du fluide sur la bulle, des cas de validation et de vérification ont été établis pour s'assurer de la conformité des choix numériques réalisés.

Abstract :

A flow around a spherical bubble is considered with Euler-Lagrange representation. We develop a numerical volume penalty method to take into account the presence of the bubble in the flow. By omitting the action of the fluid on the bubble, validation and verification test cases have been established to ensure the compliance of our numerical closures.

Mots clés : Bulle sphérique, Pénalisation volumique, Frontières immergées

1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet NEPTUNE, issu d'un co-développement du CEA et d'EDF, avec le soutien de l'IRSN et d'AREVA.

De nombreuses problématiques industrielles recensées par l'exploitant font intervenir des écoulements à plusieurs phases. En particulier, la configuration accidentelle de crise d'ébullition DNB (Departure from Nuclear Boiling) est la source de nombreux phénomènes caractérisant les écoulements à bulles (nucléation, coalescence, transferts de quantité de mouvement...). L'amélioration de la connaissance de ces écoulements est donc un enjeu majeur pour l'exploitant. Actuellement, les modèles existants sont mal adaptés à ces études car dépendant de corrélations établies loin des conditions REP (Réacteurs à Eau Pressurisée) de très haute température et très haute pression. Dans la littérature peu de références font état de simulations réalisées pour des Reynolds élevés et un nombre de bulles conséquent correspondant à un taux de vide élevé.

Les simulations diphasiques de type DNS (Direct Numerical Simulation) avec suivi d'interfaces sont trop coûteuses et non représentatives (nombre de Reynolds trop faible). Les simulations Lagrangiennes classiques nécessitent la con-

naissance des forces instantanées locales appliquées aux bulles, ce que nous ne maîtrisons que dans certains cas.

Dans un premier temps, nous réalisons des hypothèses de sphéricité, d'indéformabilité des bulles; le transfert de masse, les effets de coalescence et de fragmentation sont proscrits. Sous ces conditions, des similarités peuvent être établies avec les simulations de type fluide-particules solides. On cherche à étendre l'usage des méthodes numériques employées dans ce cadre aux écoulements à bulles, en particulier pour une méthode de pénalisation. L'objectif final de ce travail est le développement d'un outil de type simulation directe des grandes échelles (LES) avec traitement Eulérien de la phase fluide et suivi Lagrangien des bulles par une méthode de pénalisation.

Les simulations seront réalisées dans des domaines tridimensionnels de géométrie simple (essentiellement des domaines hexaédriques), pour des conditions aux limites périodiques. Ces expériences numériques (mais réalistes) vont nous fournir l'ensemble des caractéristiques locales de notre écoulement (forces de traînée, portance, masse ajoutée, dispersion turbulente). Les corrélations moyennes seront confrontées aux modèles utilisées dans le code NEPTUNE_CFD [4].

Nous présentons par la suite le formalisme de cette méthode.

2 Formulation du problème

Les méthodes de pénalisation ont été initialement développées pour la résolution des équations de Navier-Stokes (Arquis, [1]) et de l'équation de Poisson (Angot, [2]). Le principe de base de cette méthode consiste à ne considérer qu'une équation sur un domaine défini comme l'union de sous-domaines correspondant à des milieux aux propriétés différentes selon le problème. Un terme dit de pénalisation est ajouté à l'équation et multiplié par un paramètre de pénalisation variant en fonction du sous-domaine dans lequel il est évalué. Dans un sous-domaine donné, ce paramètre vaudra 0 et n'aura aucune influence. Dans le domaine complémentaire à ce sous-domaine, il vaudra l'infini, modifiant l'équation initiale en une relation souhaitée.

Le domaine est constitué de liquide et de bulles en mouvement. Ω_f désigne le domaine fluide, Ω_p le domaine pénalisé correspondant au domaine occupé par les bulles et Σ l'interface séparant ces deux domaines (Figure 1). La phase continue est représentée en formalisme eulérien, un suivi Lagrangien est réalisé sur les objets pénalisés (les bulles).

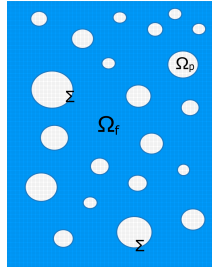


Figure 1: Configuration du domaine, $\Omega = \Omega_f \cup \Sigma \cup \Omega_p$.

Pour un fluide visqueux, incompressible, on cherche à résoudre les équations de Navier-Stokes formulées sur $\Omega = \Omega_f \cup \Sigma \cup \Omega_p$. L'équation de quantité de mouvement contient le terme de pénalisation:

$$\begin{cases} \rho_f \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + K(\mathbf{u}_b - \mathbf{u}) + \rho_f \mathbf{g} \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \end{cases}$$

avec K paramètre de pénalisation:

$$K(x, t) = \begin{cases} \infty & x \in \Omega_p \\ 0 & x \in \Omega_f \end{cases}$$

\mathbf{u}_b désigne la vitesse de la bulle, \mathbf{u} celle du fluide, ρ_f est la masse volumique du fluide, ∇p le gradient de pression de la phase liquide, μ la viscosité dynamique du fluide et \mathbf{g} désigne la gravité. Selon le problème considéré, le paramètre de pénalisation peut avoir un sens physique. Ici, dans le cadre de la résolution des équations de Navier-Stokes, K n'en a pas et fait uniquement office de paramètre numérique.

3 Simulation numérique de l'écoulement

Les simulations sont réalisées à l'aide du code NEPTUNE_CFD. Ce code permet la résolution des équations de Navier-Stokes incompressibles, instationnaires et tridimensionnelles multiphasiques. L'approche que nous avons développé nous ramène à l'étude d'un écoulement monophasique, les bulles étant les objets pénalisés. En terme de simulation, seule la phase liquide existe: les bulles ne sont pas assimilées à une phase dans le code de calcul.

Les maillages utilisés pour la pénalisation sont hexaédriques réguliers. La discrétisation des équations de conservation est effectuée par une méthode de volumes finis. L'algorithme de résolution est de type prédicteur-correcteur. La vitesse et la pression sont évaluées au centre des mailles. Une méthode Level-Set couplée à une méthode Volume of Fluid établie pour les bulles sphériques est utilisée et permet le calcul d'une fonction couleur C ($0 \leq C \leq 1$) sur chaque maille. Il n'y a pas de reconstruction de l'interface. Les bulles étant de rayon fixe r et indéformables, leurs centres de gravité sont transportés à la vitesse de la bulle.

Afin d'obtenir localement un comportement physique du fluide s'écoulant autour d'un obstacle pénalisé, il est nécessaire de revoir la discrétisation des équations. Pour une maille occupée par le domaine pénalisé, on a besoin de connaître les fractions volumiques fluides et les fractions surfaciques aux faces entre les cellules pour réévaluer les calculs de bilans, de flux. La fonction couleur C est utilisée pour obtenir la valeur des fractions volumiques correspondant au pourcentage de fluide en présence un volume de contrôle.

Les flux de masse, les flux convectifs, les flux diffusifs et le gradient de pression doivent être évalués en tenant compte de la position de l'interface établie à partir de la fraction de fluide présente dans la maille. On se base pour cela sur des méthode cut-cell (Ye, [3]) consistant à réévaluer la forme des volumes de contrôle une fois la fraction volumique calculée. Chacune des ces grandeurs est calculée pour assurer des conditions de glissement à l'interface. Des modifications sont apportées à l'algorithme de résolution en ce sens. La Figure 2 montre le principe de 'redécoupage' d'une maille traversée par l'interface.

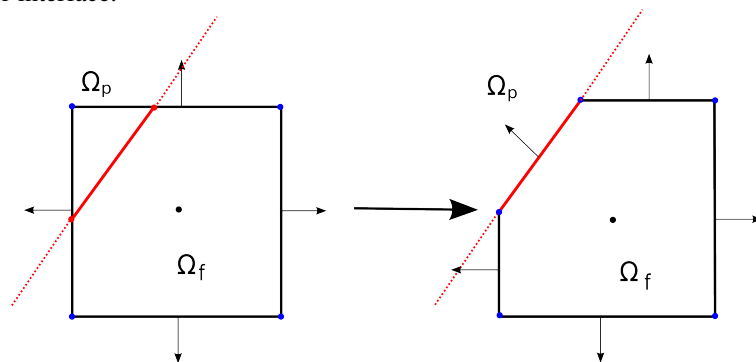


Figure 2: Principe de la méthode cut-cell.

Pour illustrer ce principe, parmi les autres modifications apportées à l'algorithme de résolution, nous détaillons la correction de calcul du gradient de pression. Initialement, dans NEPTUNE_CFD, l'intégrale du gradient de pression est calculée sur un volume de contrôle Ω_i comme la somme des pressions définies aux faces multipliées par les vecteurs surfaces.

$$\int_{\Omega_i} \vec{\nabla} P d\Omega = \sum_{J \in V_I} P_{IJ} \vec{n}_{IJ}$$

Pour des conditions de type glissement à l'interface, on impose une condition de Neumann homogène sur la pression. Afin d'assurer un gradient nul dans la direction orthogonale à l'interface, l'approximation consiste à prendre la pression à l'interface égale à la pression au centre de la maille notée P_I . Pour cela, on introduit une 5^{ème} face qui représente l'interface entre les deux domaines (Figure 3).

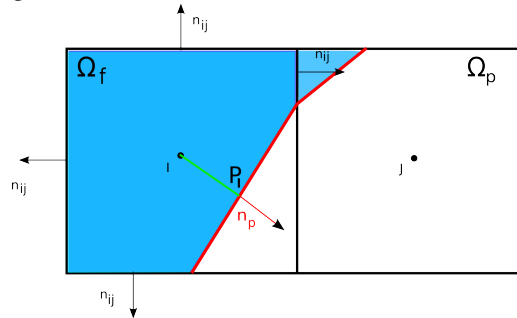


Figure 3: Reconstruction du gradient de pression sur la maille fluide I, la maille J est pénalisée.

On définit α_{IJ} comme la fraction surfacique fluide de la face joignant les mailles I et J. Finalement, l'intégrale du gradient de pression reconstruit s'écrit:

$$\int_{\Omega_i} \vec{\nabla} P d\Omega = \sum_{J \in V_I} P_{IJ} \alpha_{IJ} \vec{n}_{IJ} + P_I \vec{n}_p$$

La méthode numérique complète permettra un couplage instationnaire entre le mouvement des bulles et le fluide. Les deux cas numériques présentés par la suite n'incluent pas ce couplage, un premier travail a été de valider la méthode sur des objets pénalisés fixes.

4 Cas de validation sur un obstacle fixe

On cherche à valider l'ensemble des modifications apportées à l'algorithme de résolution pour simuler l'écoulement du fluide autour d'un objet pénalisé. Pour cette étude, on se dote de deux maillages: un maillage hexaédrique régulier sur lequel l'objet est représenté numériquement par pénalisation. Sur le deuxième maillage le contour de l'obstacle est maillé (Figure 4). Hormis l'obstacle, les domaines maillés sont identiques.

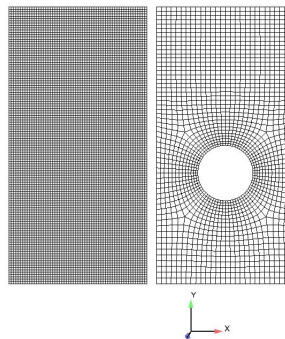


Figure 4: À gauche: maillage cartésien régulier pour la pénalisation. À droite: maillage quadrangle courbe utilisé pour la simulation avec obstacle (circulaire dans ce cas).

L'objet pénalisé considéré est fixe, les efforts du fluide ne sont pas pris en compte. On se ramène donc au cas 2D largement détaillé dans la littérature d'écoulement autour d'un cylindre fixe. Notre objectif étant de simuler du glissement à l'interface de nos objets pénalisés, nous imposons sur les faces de l'obstacle (maillage de droite sur la Figure 4) des conditions de glissement. On injecte le fluide à l'une des extrémités du domaine selon l'axe (Oy). Les parois latérales sont munies de conditions de symétrie. Les deux simulations sont réalisées pour les mêmes paramètres physiques (vitesse du fluide en entrée, masse volumique, etc...) pour un nombre de Reynolds $Re = 50$. Les résultats des simulations à l'état convergé sont montrés dans la Figure 5 pour le champ de vitesse et la Figure 6 pour le champ de pression.

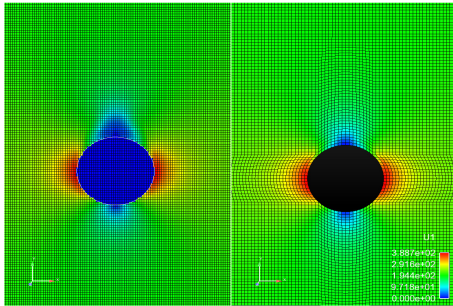


Figure 5: Champ de vitesse (magnitude) à l'état convergé.

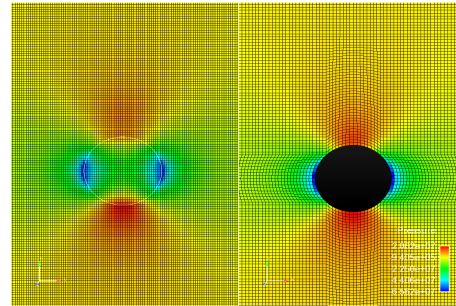


Figure 6: Champ de pression à l'état convergé.

Des profils de vitesse et de pression sont comparés selon des axes caractéristiques intersectant la bulle, une fois l'état stationnaire atteint. Les résultats de l'étude de convergence pour les vitesses (Figure 7) et les pressions (Figure 8) montrent que la méthode développée est adaptée pour ce cas spécifique de validation.

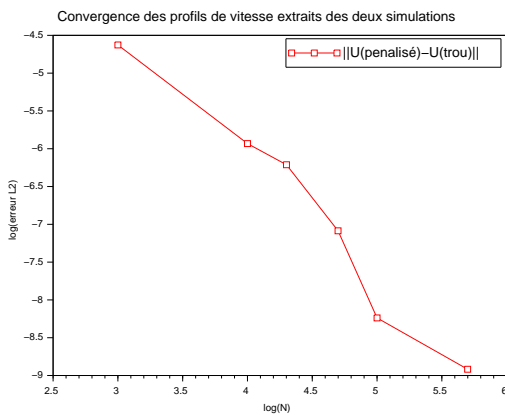


Figure 7: Étude de convergence des vitesses.

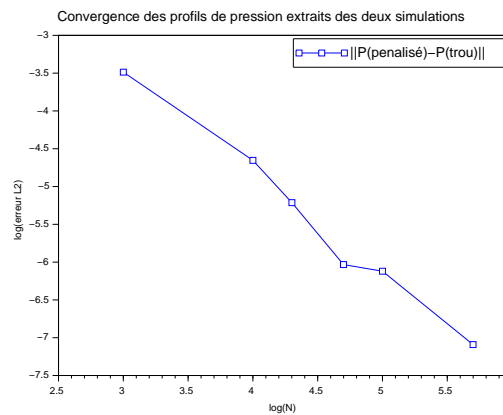


Figure 8: Étude de convergence des pressions.

5 Cas de vérification: configuration en canal incliné

La simulation est effectuée dans un domaine rectangulaire. Le domaine fluide central (en bleu sur la Figure 9) est délimité par deux droites parallèles dotées d'une inclinaison choisie dans le repère du domaine global (de type "canal incliné"). Ce domaine fluide est bordé de part et d'autre par deux domaines pénalisés (en rouge sur la Figure 9). Le domaine est initialisé à un champ de vitesse constant $\vec{u} = (4.5, 9.0)$, ces vecteurs vitesses étant parallèles au paroi

délimitant le domaine fluide. Une condition de Dirichlet est imposée en entrée à $\vec{u}_{Entree} = (4.5, 9.0)$. On impose une condition de symétrie sur les parois latérales. Le champ de pression est initialisé à 0. La théorie montre que pour un écoulement non-visqueux avec condition de glissement à l'interface les vitesses et la pression sont invariantes au cours du temps.

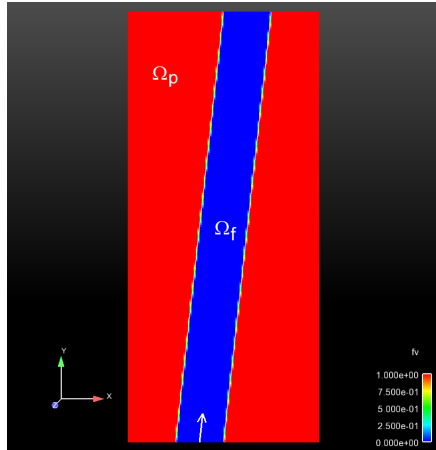


Figure 9: Fractions volumiques pour domaine incliné pénalisé.

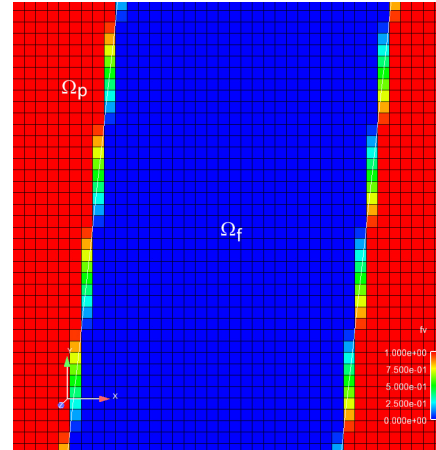


Figure 10: Fractions volumiques pour domaine incliné pénalisé (zoom).

On réalise une première simulation pour laquelle sont prises en compte toutes les modifications apportées à l'algorithme pour simuler un glissement autour d'objets pénalisés. Une deuxième simulation est réalisée sans ces modifications. On compare les résultats fournis par les simulations à la solution analytique pour différents maillages. Cette comparaison (Figure 11) montre que les simulations réalisées avec correction offrent une précision satisfaisante, l'erreur relative est stable. Sans correction, la solution diverge.

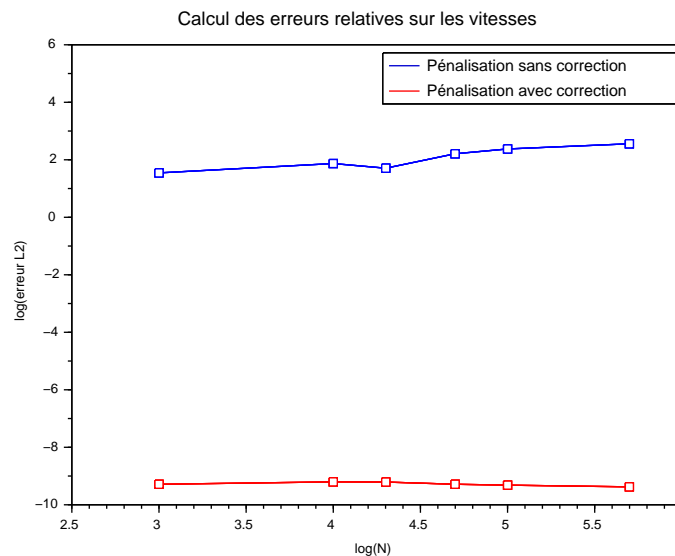


Figure 11: Étude de la convergence des vitesses avec (courbe rouge) ou sans (courbe bleue) prise en compte des modifications apportées à l'algorithme.

6 Conclusions

Nous avons présenté l'approche numérique de la méthode de pénalisation pour simuler l'écoulement fluide autour d'un objet pénalisé. Le cas de validation réalisé atteste de la robustesse de la méthode numérique développée. Le cas de vérification réalisé permet de s'assurer de la stabilité de la méthode. Le travail en cours consiste à réaliser le couplage entre le fluide et les bulles et valider la méthode sur des cas classiques (ascension d'une bulle sphérique dans un fluide au repos sous influence de la gravité).

Références

- [1] Arquis, E., Convection mixe dans une coche poreuse verticale non confinée, Application à l'isolation perméodynamique. PhD Thesis, Université Bordeaux I, 1984.
- [2] Angot, P., Contribution à l'étude des transferts thermiques dans des systèmes complexes aux composants électroniques. PhD Thesis, Université Bordeaux I, 1989.
- [3] Ye, T., Mittal, R., Udaykumar, H. S., and Shyy, W., An Accurate Cartesian Grid Method for Viscous Incompressible Flows with Complex Immersed Boundaries, *Journal of Computational Physics* (1999) 156, 209–240.
- [4] Méchitoua, N., Boucker, M., Laviéville, J., Hérard, J.M, Pigny, S., Serre, G., NEPTUNE_CFD: an Unstructured FV Solver for two-phase Water/Vapor Flows Based on an Elliptic Oriented Fractional Step Method, NURETH-10, Seoul, Oct. 5-9 (2003).