

# SGE diphasique appliquée à un sous-canal de REP

Sylvain MAGDELEINE\*, Adrien TOUTANT, Olivier LEBAIGUE

Laboratoire de modélisation et de développement de logiciels  
CEA Grenoble – DEN/DER/SSTH, 17 rue de Martyrs – 38054 Grenoble cedex 9, France  
\*(auteur correspondant : [sylvain.magdeleine@cea.fr](mailto:sylvain.magdeleine@cea.fr))

**Résumé** - Ce travail s'inscrit dans un projet dont la finalité est d'étudier l'ébullition convective dans les réacteurs nucléaires au moyen d'outils de simulation des écoulements diphasiques avec suivi des interfaces. Pour cela, notre démarche consiste à développer une modélisation de type SGE diphasique (appelée modèle ISS pour Interfaces and Subgrid Scales) dans une géométrie simplifiée, puis à la mettre en œuvre dans des calculs tridimensionnels massivement parallèles sur la géométrie réelle. Dans ce contexte, nous présentons le modèle ISS et nous exposons les résultats de tests *a priori* qui en démontrent le potentiel.

## Nomenclature

$k$	courbure moyenne, $m^{-1}$	<i>Indice et exposant</i>
$n$	normale sortante du gaz	$s$ surfacique
$r$	longueur caractéristique du filtre, $m$	<i>Opérateur</i>
$u$	vecteur vitesse, $m.s^{-1}$	$\bar{O}$ moyenne spatiale
$L$	terme sous-maille de Leonard, $J. kg^{-1}$	<i>Acronymes</i>
$S$	tenseur des contraintes visqueuses, Pa	DAR : Développements Asymptotiques Raccordés
<i>Symboles grecs</i>		ISS: Interfaces and Subgrid Scale
$\delta_\sigma$	fonction de Dirac associée à l'interface, $m^{-1}$	RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes
$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$	REP : Réacteur à Eau Pressurisée
$\sigma$	tension de surface, $N. m^{-1}$	SGE : Simulation des Grandes Échelles
$\xi_3$	coordonnée normale à l'interface, $m$	SND : Simulation Numérique Directe
$\chi_g$	fonction indicatrice de phase du gaz	

## 1. Introduction et contexte

Des calculs numériques diphasiques sont utilisés dans les études de sûreté nucléaire pour rendre compte du comportement du réacteur et de la centrale en cas d'incidents ou d'accidents. Afin de décrire correctement le comportement de l'installation, il est nécessaire d'avoir une connaissance approfondie des écoulements diphasiques qui s'y développent. Dans le domaine qui nous intéresse, des efforts de recherche sont entrepris pour parfaire la compréhension des phénomènes d'ébullition convective dans les canaux de refroidissement du cœur. Ces phénomènes physiques interviennent sur toute une gamme d'échelles spatiales allant des plus petits détails de l'écoulement (qui sont les plus petites structures tourbillonnaires et les plus petites déformations de l'interface) aux dimensions du système industriel. La résolution simultanée de l'ensemble de ces échelles étant irréaliste, les codes de calcul utilisés au niveau industriel, tels les codes Cathare et Neptune, utilisent des modèles diphasiques moyennés de type RANS pour décrire les écoulements. Les relations de fermeture de ces modèles sont établies à l'aide d'expériences physiques qui permettent d'avoir accès à des grandeurs essentiellement macroscopiques.

De façon complémentaire, l'augmentation de la puissance de calcul des moyens informatiques et le développement de méthodes numériques adaptées nous permettent de réaliser des expériences numériques de plus en plus détaillées, des géométries de plus en plus

complexes et réalistes. Le travail que nous présentons ici s'inscrit dans un projet à long terme dont la finalité est d'étudier l'ébullition convective dans les réacteurs nucléaires au moyen d'outils de simulation des écoulements diphasiques avec suivi d'interface. Dans cette contribution, nous présentons la stratégie de modélisation que nous suivons pour réaliser le calcul numérique des écoulements à bulles en sous-canal et nous en donnons les premiers résultats.

## **2. Problématique et stratégie**

### **2.1. Besoins**

Les simulations que nous voulons réaliser serviront à renseigner les modèles de type RANS-diphasique et devront donc permettre de représenter des écoulements de plusieurs centaines ou milliers de bulles. Même si dans une première approche, nous allons nous intéresser aux écoulements isothermes sans changement de phase, un seul ordinateur n'est pas en mesure d'effectuer l'ensemble des opérations nécessaires à un cas réel. La mise en œuvre numérique du modèle doit donc offrir la possibilité de réaliser des calculs parallèles. La parallélisation par décomposition de domaine permet en outre d'augmenter la mémoire disponible pour un calcul (mémoire distribuée).

Nous avons également besoin de décrire finement la géométrie des interfaces pour évaluer correctement les forces de tension de surface. Comme nous nous intéressons aux échanges de quantité de mouvement entre phases, il faut estimer correctement la vitesse des interfaces et la fonction indicatrice de phase (position des interfaces).

De plus, notre outil numérique doit être capable de tenir compte des interactions entre les différentes bulles. En particulier, il doit permettre de décrire la coalescence et la fragmentation des inclusions. Nous avons également besoin qu'il décrive correctement la physique des lignes de contacts et leurs déplacements lorsque les interfaces touchent les parois.

Enfin, nous voulons être capables de rendre compte des géométries complexes correspondant à des fractions d'assemblage de crayons de combustible. Dans notre outil, cela nous conduit à utiliser un maillage eulérien non structuré et une approche éléments finis.

### **2.2. Le savoir-faire disponible en modélisation physique et numérique**

Afin de réaliser des calculs massivement parallèles, le code de simulation numérique Trio\_U a été développé dans une approche Orientée Objet. Ainsi, nous avons la possibilité d'implémenter nos modèles sans être expert du parallélisme en héritant de fonctionnalités de parallélisation native.

Un modèle de simulation numérique directe (SND) diphasique a déjà été implémenté. Il est basé sur une méthode de suivi d'interface (Front-Tracking Discontinu) [1, 2], qui considère l'interface comme une surface de discontinuité séparant deux phases (sans étalement des discontinuités ou des forces de tension de surface). Cette méthode présente l'avantage de décrire très finement la géométrie et la vitesse des interfaces au travers d'un maillage mobile de ces interfaces (maillage lagrangien se déplaçant sur le maillage eulérien fixe). De plus, des algorithmes de gestion des coalescences et des fragmentations sont implémentés dans ce modèle. Un exemple de calcul sous-résolu incluant une centaine de bulles est présenté à la figure (1).

Les moyens informatiques actuels permettent également de réaliser des calculs complètement résolus à l'échelle d'une bulle. La figure 2 représente le résultat d'un calcul effectué avec Trio\_U. Il s'agit de l'ascension d'une bulle à contre-courant d'un écoulement présentant une turbulence analogue à une turbulence de grille [3].

Enfin, Trio\_U est un code qui intègre à la fois des discrétisations de type différences finies et de type éléments finis. Il est donc possible de résoudre des problèmes présentant une géométrie complexe. La figure (3) présente le calcul sous-résolu d'un écoulement à bulles, analogue à celui de la figure (1), mais dans le volume délimité par quatre crayons de combustible cylindriques (espace appelé sous-canal).

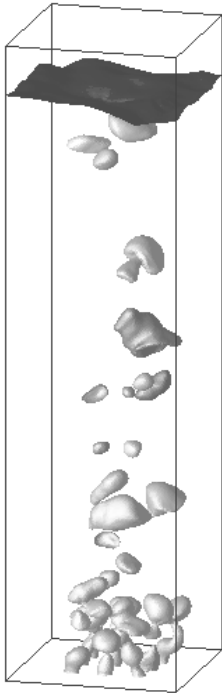


Figure 1 : Visualisation de la colonne à bulles : calcul sous-résolu, différences finies sur maillage parallélépipédique.

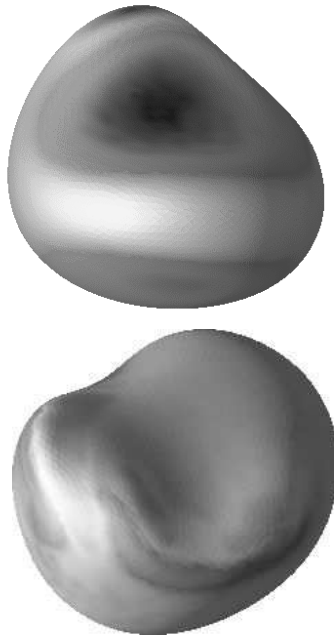


Figure 2 : Deux vues de la bulle soumise à une turbulence de grille : calcul différences finies sur maillage parallélépipédique.

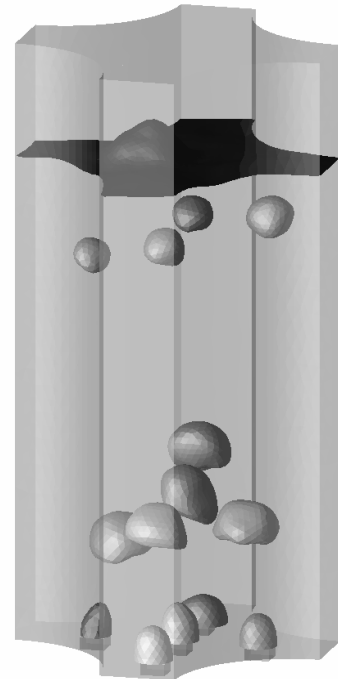


Figure 3 : Visualisation d'un sous-canal de REP : calcul sous-résolu, éléments finis tétraédriques.

### 2.3. Limites initiales de ce savoir-faire

Nous disposons d'un outil puissant et adapté à notre problématique. Néanmoins, nous ne disposons pas de toutes les briques nécessaires à la réalisation de notre projet. En effet, un sous-canal de REP présente un diamètre hydraulique de 12 mm, de nombreuses bulles de vapeur d'un diamètre moyen de l'ordre de 150  $\mu\text{m}$  sont présentes. De plus, comme l'eau circule à une vitesse de quelques  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , l'échelle de Kolmogorov (qui représente la taille des plus petites structures turbulentes de la phase continue) avoisine 1  $\mu\text{m}$ . Dans ces conditions, les moyens numériques actuels ne permettent pas de réaliser les calculs dont nous avons besoin pour notre étude sur un domaine suffisamment étendu spatialement. Pour résoudre ce problème, il faudrait disposer d'un modèle qui permette d'utiliser un niveau de discrétisation moins élevé. Ainsi, l'utilisation de modèles de Simulation des Grandes Échelles (SGE) diphasique, utilisant un maillage 10 fois plus grossier qu'une SND bien résolue, permettrait de réduire (en 3D) d'un facteur 1000 le nombre de nœuds de discrétisation.

## 2.4. Stratégie adoptée pour la construction du modèle physique et numérique

Afin de renseigner les équations de fermeture des modèles de type RANS, nous avons besoin de réaliser des calculs numériques sur plusieurs centaines de bulles. Nous venons de rappeler que cela est actuellement impossible avec des modèles de SND. Comme nous ne pouvons pas réaliser notre objectif en une seule étape, nous proposons donc de scinder notre projet en deux phases consécutives : le développement d'une modélisation de type SGE diphasique dans une géométrie simplifiée puis sa mise en œuvre dans des calculs tridimensionnels massivement parallèles sur la géométrie réelle.

## 3. Solution retenue pour la SGE diphasique

### 3.1. Description

Dans la mesure où l'outil de Front-Tracking Discontinu est déjà implémenté dans le code, le choix d'une méthode à interfaces non diffuses est naturel. Nous avons établi un modèle de type SGE appelé *Interfaces and Sub-grid Scales* (ISS) [4] qui décrit l'évolution des grandeurs filtrées au sens de la SGE ainsi que les relations de saut de ces grandeurs au niveau des interfaces et le déplacement de ces interfaces elles aussi filtrées. Le modèle ISS est basé sur un formalisme monofluide et permet, pour l'instant, d'étudier les écoulements isothermes, incompressibles par phase et sans changement de phase.

Lors de la conception du modèle physique, l'application du filtrage spatial SGE implique initialement un étalement de l'interface. Pour revenir à une méthode de Front-Tracking discontinu, il a fallu procéder à une étape de re-raïdissage de l'interface grâce à la méthode des développements asymptotiques raccordés (DAR). Cela permet de localiser à l'interface les grandeurs en excès. Le système finalement obtenu est composé de 3 équations qui sont valables (au sens des distributions) dans tout l'espace et qui sont énoncées ci-dessous. Par soucis de concision, le détail des notations n'est pas fourni ici mais peut être trouvé dans les références [3, 4].

- équation de continuité :

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

- équation de transport de la discontinuité :

$$\frac{\partial \chi_g}{\partial t} = \left( \underbrace{u \cdot n}_i + \underbrace{(\overline{u \cdot n} - \overline{u} \cdot \overline{n})}_{ii} + \underbrace{\frac{r^2}{10} \left( \Delta_s \left( \frac{\partial \chi_g}{\partial t} n \right) \cdot n - 2 \nabla_s \left( \frac{\partial \chi_g}{\partial t} n \right) : \nabla_s(n) \right)}_{iii} \right) \delta_\sigma \quad (2)$$

- équation de bilan de quantité de mouvement :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (u \otimes u) = -[\rho]u \left( \underbrace{(\overline{u \cdot n} - \overline{u} \cdot \overline{n})}_{ii} + \underbrace{\frac{r^2}{10} \left( \Delta_s \left( \frac{\partial \chi_g}{\partial t} n \right) \cdot n - 2 \nabla_s \left( \frac{\partial \chi_g}{\partial t} n \right) : \nabla_s(n) \right)}_{iii} \right) \delta_\sigma$$

$$- \nabla p + \nabla \cdot S + \underbrace{\rho \nabla \cdot L}_{(iv)} + \underbrace{L \cdot \nabla \rho}_{(v)} - \left( \sigma k n + \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial(\overline{\rho u} - \overline{\rho} \overline{u})}{\partial t} d\xi_3}_{(vi)} \right) \delta_\sigma \quad (3)$$

L'équation de continuité (1) est la seule qui soit identique à celle que l'on aurait en SND et ne présente pas de difficulté particulière.

À l'inverse, l'équation de déplacement de l'interface (2) contient un terme classique (i) et deux termes supplémentaires par rapport à la SND. Le terme (ii) est analogue au terme de Bardina (hypothèse de similarité d'échelles). Il permet de tenir compte de l'existence de corrélation spatiale entre la vitesse et la normale à l'interface. Le terme (iii) représente l'effet de la variation temporelle la courbure.

Enfin, l'équation de bilan de quantité de mouvement (3) contient un terme volumique (iv) qui étend le terme classique de Leonard de similarité d'échelles et rend compte des effets des échelles sous-maillages de la turbulence. C'est le seul terme qui existe en SGE dans les situations monophasiques. Le terme (v) est l'analogue du terme précédent à l'interface. Enfin, le terme (vi) traduit la corrélation entre les fluctuations de masse volumique et de la vitesse : il corrige les erreurs de transfert de quantité de mouvement dues à la sous-résolution.

Ainsi, l'étape de re-raidissement de l'interface par les DAR identifie les termes sous-maillages qui n'existent pas dans les configurations monophasiques. Ces termes sont localisés aux interfaces, à la manière des forces capillaires.

### 3.2. Potentiel du modèle

Avant l'implémentation du modèle ISS, des tests *a priori* ont été réalisés [3] afin d'évaluer les capacités du modèle à décrire la physique de l'écoulement diphasique sous-résolu.

Une première série de tests a permis de montrer que l'estimation des termes (iv), (v) et (vi) était satisfaisante et qu'ils suffisaient à évaluer les termes sous-maillages du bilan de quantité de mouvement [5].

Une seconde série d'essais réalisés dans le cas d'une bulle soumise à une turbulence de grille a montré que la vitesse de déplacement de l'interface était correctement évaluée par l'équation (2). Ainsi, la figure (4) représente l'écart entre le résultat d'une SND suffisamment résolue et celui obtenu par modélisation de la vitesse de l'interface par l'équation (2). Trois courbes présentent les écarts obtenus en ne tenant compte que des contributions (i)+(ii) (analogue au modèle de Bardina [6]), en tenant compte des contributions (i)+(iii) (appelé modèle d'évolution de la courbure) et celui obtenu avec toutes les contributions, c'est-à-dire (i)+(ii)+(iii) (le modèle complet). On peut constater sur cette figure que les contributions des termes (ii) et (iii) sont du même ordre de grandeur. Enfin, le modèle complet fournit quant à lui une bonne estimation de la vitesse de déplacement des interfaces (l'écart ou erreur est environ de 10%).

Ces tests ont démontré que les termes sous-maillages sont correctement estimés par le modèle ISS. Il semble donc que ce modèle soit apte à décrire correctement les écoulements diphasiques avec de nombreuses bulles. Néanmoins, seuls les résultats d'une étude *a posteriori* (par implémentation du modèle, en cours) permettront de confirmer le potentiel prédictif du modèle ISS.

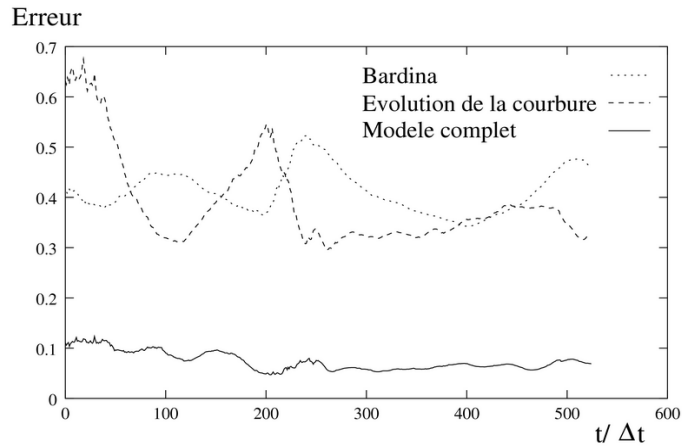


Figure 4 : Evolution temporelle de l'erreur commise sur le transport de l'interface.

#### 4. Conclusion et perspectives

Afin d'étudier les relations de fermetures des codes moyennés diphasiques, nous avons besoin de réaliser des simulations numériques à l'échelle de plusieurs centaines de bulles. Nous avons rappelé que cela était impossible en utilisant directement un modèle de SND.

Nous avons donc entrepris de passer par une étape intermédiaire qui consiste à développer le modèle ISS [3, 4]. Nous avons exposé ce modèle et nous avons montré qu'il est potentiellement apte à décrire des écoulements à bulles. Nous avons présenté les premiers résultats numériques qui seront complétés début 2007 par des calculs ISS multi-bulles.

Par ailleurs, des études préliminaires ont été effectuées afin d'étendre la modélisation ISS à l'étude des écoulements anisothermes sans changement de phase [7]. Les premiers résultats montrent que l'ajout de l'équation de la chaleur ne modifie pas de manière importante la nature des résultats présentés au paragraphe 3.1. Ultérieurement, nous envisageons l'extension du modèle ISS à des études qui incluent l'effet Marangoni, le changement de phase et les singularités thermiques aux voisinages des lignes de contact [2, 8].

#### Références

- [1] B. Mathieu, A 3D parallel implementation of the front-tracking method for two-phase flows and moving bodies, *Article#24, 177ème Session de la SHF, Advances in the modelling methodologies of two-phase flows*, Lyon, France, 24-26 novembre 2004
- [2] B. Mathieu, *Etude physique, expérimentale et numérique des mécanismes de base intervenant dans les écoulements diphasiques*, Thèse de Doctorat, Université de Provence, 2003.
- [3] A Toutant, E Labourasse, O. Lebaigue & O. Simonin, Interaction between a deformable buoyant bubble and a homogeneous isotropic turbulence, *Proc. Conference on Turbulence and Interactions 2006*, Porquerolles, France, 29 mai–2 juin 2006
- [4] A. Toutant, *Modélisation physique des interactions entre interfaces et turbulences*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [5] E. Labourasse, D. Lacanette, A. Toutant, P. Lubin, S. Vincent, O. Lebaigue, J.P. Caltagirone & P. Sagaut, Towards large eddy simulation of isothermal two-phase flows: Governing equations and a priori tests, *Int. J. Multiphase Flow*, 33(1), 1-39, Jan. 2007.
- [6] J. Bardina, J.H. Ferziger & W.C. Reynolds, Improved turbulence models for large eddy simulation, *AIAA Paper 83-1357*, 1983.
- [7] A. Toutant, O. Lebaigue, E. Labourasse, S. Vincent, P. Lubin & D. Lacanette, Effects of turbulence on interfacial heat transfer: a priori test and filters evaluation, *Proc. IHTC'13*, Sydney, Australie, 13-18 August 2006.
- [8] B. Mathieu, O. Lebaigue & L. Tadriss, Dynamic contact line model applied to single bubble growth, *Proc. 41st European Two-Phase Flow Group Meeting*, Trondheim, Norway, May 2003.