

Méthode de raccord multi-domaines non-conforme pour les écoulements multiphasiques

B. RAVERDY

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, (IRSN) Fontenay-aux-Roses, 92262,
France.
bruno.raverdy@irsn.fr

Résumé :

Une méthode multi-domaines non conforme, basée sur des méthodes multi-grilles développées sur des schémas Implicit Continuous-Fluid Euler (ICE), est décrite. Cette méthode a été validée sur des cas « test » de convection de jet de gaz 2D plan. Les résultats obtenus par des simulations multi-domaines non conforme sont identiques à ceux des simulations mono-domaine. Cette méthode multi-domaines non conforme peut s'appliquer à des cas multi-domaines, des cas de raffinement local ou des cas multi-grilles. Cette méthode peut s'étendre aux autres applications pour simuler des écoulements multiphasiques.

Abstract :

A non conforming multi-domain method, based on multi-grid methods developed on Implicit Continuous-Fluid Euler (ICE) schemes, is described. This method was validated on 2D gas jet convection test cases. The simulation results obtained with the non conforming multi-domain method are similar to the results of the mono-domain simulation. This non conforming multi-domain method could be applied to multi-domain, local refinement or multi-grid cases. This method can be extended to other applications to simulate multi-phase flows.

Mots clefs : Multi-domaines ; raccord non conforme ; multi-grilles ; raffinement local

1 Introduction

MC3D est un logiciel de thermodynamique multiphasique développé par l'IRSN qui permet entre autres de modéliser l'interaction entre le corium (résultant de la dégradation du cœur en cas d'accident grave survenant dans un réacteur nucléaire) fondu et l'eau. Il contient deux applications principales qui sont PREMEL et EXPLO et des applications secondaires comme MONOGAS, MONOSTRU et DIPHASIC.

Les deux premières applications permettent de simuler une explosion de vapeur [1] issue de l'interaction entre le corium et l'eau dans un réacteur nucléaire. L'application MONOGAS permet de simuler des écoulements gazeux et notamment de simuler la dépressurisation d'un circuit dans un réacteur nucléaire. L'application MONOSTRU permet de simuler des écoulements gazeux autour

d'obstacles chauffés et notamment de simuler le refroidissement d'une goutte solide. L'application DIPHASIC permet de simuler des écoulements diphasiques et notamment de simuler les phénomènes d'évaporation et de condensation.

Actuellement, le code MC3D utilise un seul domaine pour le maillage qui peut être soit cartésien soit cylindrique. Lorsque le maillage est raffiné localement afin de capter un phénomène particulier, le raffinement local se propage au reste du domaine dans les directions associées, ce qui augmente considérablement la taille du maillage et donc le temps de calcul. Afin de réduire le temps de calcul, il a été choisi de développer une méthode de raccord multi-domaines non conforme dans le code MC3D spécifiquement pour l'application MONOGAS. Un premier travail a été réalisé à l'IRSN sur l'application MONOGAS afin d'effectuer des calculs multi-domaines utilisant un raccord conforme.

Le travail exposé ici présente la méthode retenue pour le traitement du raccord non conforme dans l'application MONOGAS, la phase de validation réalisée et l'impact de la méthode de raccord non conforme sur le temps de calcul.

2 Méthodes numériques

2.1 Description numérique

La méthode ICE (Implicit Continuous-Fluid Euler) [2] est utilisée dans le code MC3D. La discrétisation est basée sur un maillage entrelacé avec une évaluation des grandeurs scalaires telles que la pression, les taux volumiques, les masses volumiques au centre des mailles et les composantes de vitesses évaluées sur les faces de chaque maille. Les méthodes numériques sont détaillées dans un article [3] qui décrit la modélisation de la phase de prémélange du phénomène d'explosion de vapeur par l'application PREMEL.

2.2 Méthode de raccord multi-domaines non conforme

Les travaux de Brandt et al. [4] ou de Vanka [5] concernent l'utilisation d'une méthode multi-grilles couplée avec une méthode ICE [2]. La méthode multi-grilles utilise des fonctions d'interpolation de la grille fine vers la grille grossière appelées procédures de restriction et inversement de la grille grossière vers la grille fine appelées procédures de prolongation. La méthode multi-grilles se réalise de la façon suivante :

1. La résolution se fait d'abord sur la grille fine jusqu'à obtention de la convergence ;
2. Le résidu (erreur d'approximation de la solution) issu du calcul sur la grille fine est utilisé (interpolation) pour former un nouveau système dans la grille grossière ;
3. Ce système est résolu dans la grille grossière et donne une erreur d'approximation dans la grille grossière ;
4. Cette erreur est ensuite interpolée dans la grille fine ;
5. Enfin, la solution dans la grille fine est corrigée avec l'ajout de cette erreur interpolée. Cette technique est appelée « coarse-grid-correction » (CGC).

Cette technique peut être répétée, itérant sur la grille fine et en appliquant alternativement la CGC. Ce mode d'utilisation de la méthode multi-grilles est appelé « correction-scheme » (CS).

Dans le cas du raccord non conforme, les procédures de restriction et de prolongation de la méthode multi-grilles seront utilisées pour le transfert des grilles fictives vers les grilles réelles de chaque domaine et inversement.

Dans le cas du raccord conforme, chaque domaine est résolu par la méthode itérative de Newton à chaque pas de temps. Après convergence de la méthode de Newton, le transfert entre les domaines

s'effectue et le pas de temps suivant est calculé. Cette procédure est itérée jusqu'à l'instant final de la simulation. Cette procédure s'applique également dans le cas du raccord non conforme et ne nécessite pas l'utilisation d'une méthode CS habituellement utilisée dans le cas des méthodes multi-grilles.

3 Validation

3.1 Convection d'un jet 2D

Trois cas « test » ont été réalisés afin de valider la méthode de raccord multi-domaines non conforme développée. Ils concernent tous les trois la convection d'un jet 2D plan. Dans les deux premiers cas « test », le domaine fin est à gauche et le domaine grossier à droite. Les cas « test » décrivent un jet 2D dans le plan (x,y) se propageant de la gauche vers la droite (fin vers grossier) et de la droite vers la gauche (grossier vers fin) dans un domaine ouvert (figure 1) de 2m x 1 m.

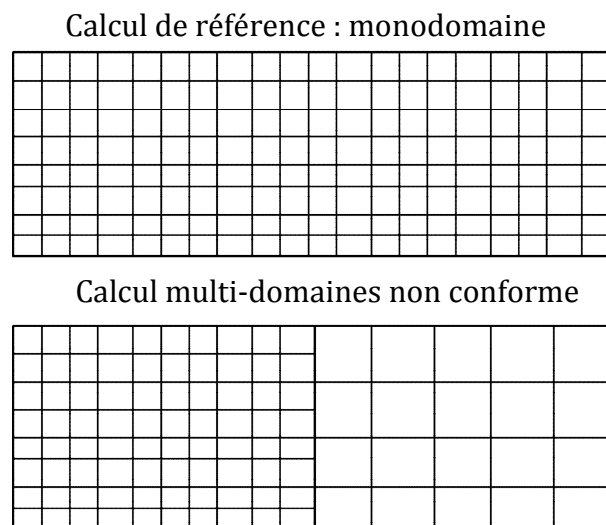


FIG. 1- Cas test de convection d'un jet (gauche → droite) pour le calcul monodomaine (haut) et le calcul multi-domaines non conforme (bas)

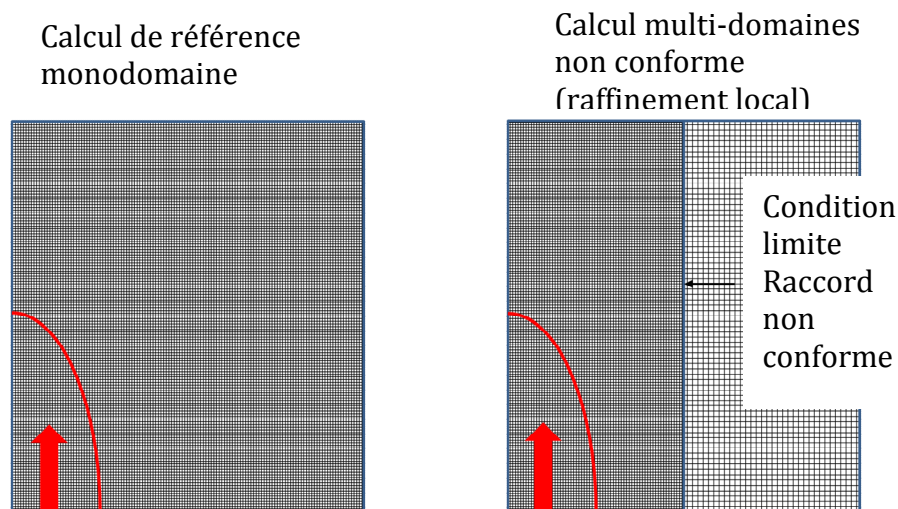


FIG. 2 - Cas test de convection d'un jet de gaz 2D plan représentant un cas pratique de raffinement local

Dans le cas de la convection du jet 2D de la gauche vers la droite, un domaine unique fin (même finesse que le maillage fin multi-domaines 20 X 10) est utilisé pour le calcul de référence. Dans le cas de la convection du jet 2D de la droite vers la gauche, un domaine unique grossier (même finesse que le maillage grossier multi-domaines 10 X 5) est utilisé pour le calcul de référence.

Le troisième cas « test » concerne le cas de la convection d'un jet 2D plan parallèle à l'interface de raccord (figure 2). Une condition limite de vitesse de 2m/s est utilisée sur un quart du bord bas du domaine de calcul. Des conditions limites de pression de 1 bar sont utilisées pour le reste des bords. Ce cas « test » représente un cas pratique de raffinement local (dans une seule direction). Pour le calcul de référence monodomaine, un maillage fin de 40 x 40 cellules est utilisé. Pour le calcul multi-domaines non conforme un maillage avec respectivement 20 X 40 et 10 X 20 cellules pour les domaines fin et grossier est utilisé.

3.2 Résultats de simulation

La figure 3 montre la comparaison de la composante de vitesse U à l'interface de raccord du calcul de référence et du calcul multi-domaines non conforme, avec convection gauche-droite. Les profils de vitesse du calcul multi-domaines sont identiques à ceux du calcul de référence. La figure 4 montre la comparaison de la composante de vitesse U à l'interface de raccord du calcul de référence et du calcul multi-domaines non conforme, avec convection droite-gauche. Les profils de vitesse du calcul multi-domaines sont identiques à ceux du calcul de référence.

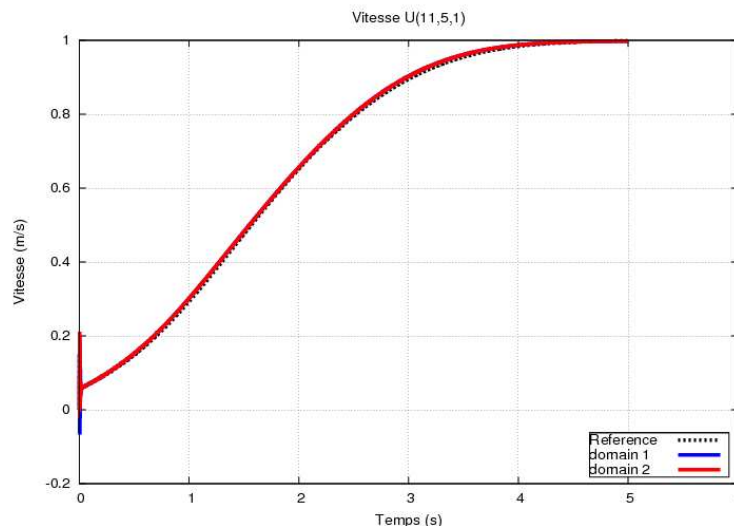


FIG. 3 - Profils de la composante de vitesse U à l'interface du raccord dans le cas de la convection gauche-droite – Domaine fin vers domaine grossier

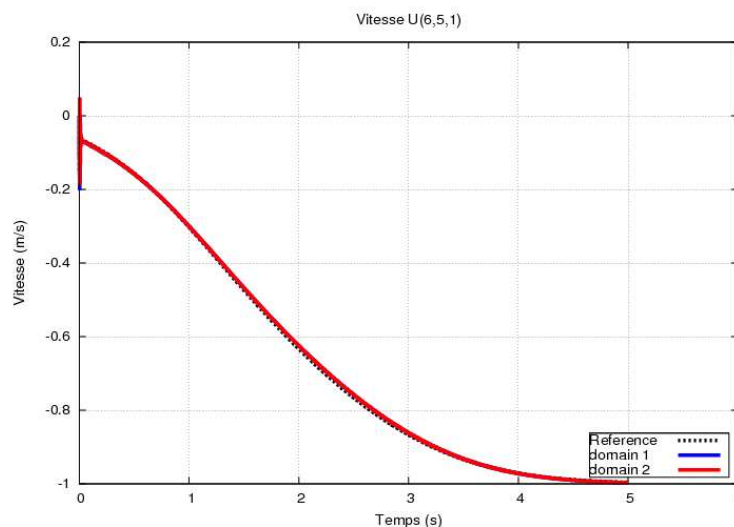


FIG. 4 - Profils de la composante de vitesse U à l'interface du raccord dans le cas de la convection droite-gauche – Domaine grossier vers domaine fin

Les figure 5 et figure 6 montrent respectivement les profils des composantes U et V de la vitesse pour trois positions le long du jet pour le calcul de référence et le calcul multi-domaines. Les profils de vitesse du calcul multi-domaines sont identiques à ceux du calcul de référence. Les temps de calcul pour respectivement le calcul de référence et le calcul multi-domaines non conforme sont de 30 et 10 minutes, soit un gain d'un facteur 3 (gain qui reste fonction du cas abordé).

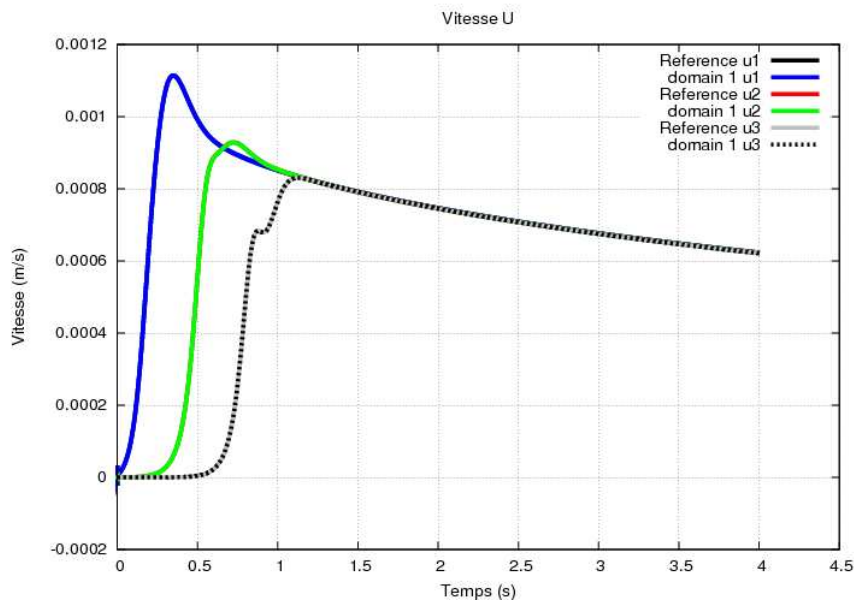


FIG. 5 - Profils de la composante U de la vitesse du jet (orthogonale à la direction de convection du jet) pour trois positions le long du jet – Raffinement local

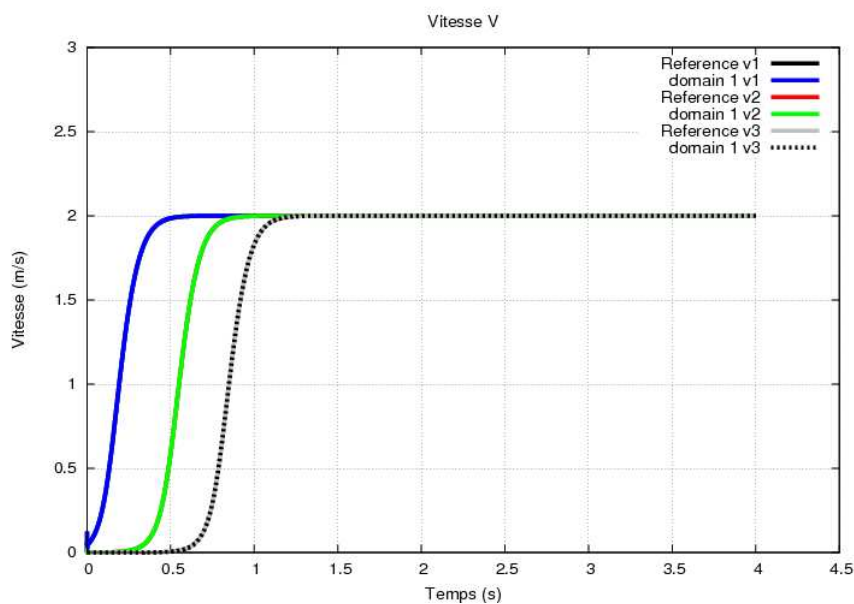


FIG. 6 - Profils de la composante V de la vitesse du jet (sens de convection du jet) pour trois positions le long du jet – Raffinement local

4 Conclusions

Une méthode de raccord multi-domaines non conforme basée sur des procédures de prolongation et de restriction issues de méthodes multi-grilles utilisées avec des méthodes ICE est proposée pour l'application MONOGAS du code MC3D.

Trois cas « test » de convection d'un jet 2D ont été réalisés dans le cas d'une simulation multi-domaines non conforme. Ces cas « test » sont satisfaisants puisque les profils de vitesse issus des calculs multi-domaines non conforme sont identiques aux profils de vitesse des calculs de référence (mono-domaine).

Cette méthode de raccord multi-domaines non conforme basée sur une méthode multi-grilles montre un comportement très satisfaisant qui peut s'appliquer à différents cas :

- Multi-domaines (chaque domaine associé à un volume spécifique) qui permet d'aborder des configurations complexes ;
- Raffinement local dans le cas d'une configuration simple avec un découpage du domaine approprié (domaine fin associé aux petites échelles) ;
- Multi-grilles, puisque la méthode en découle.

Cette méthode de raccord multi-domaines non conforme peut s'étendre aux autres applications du code MC3D, comme par exemple MONOSTRU et DIPHASIC et à plus long terme à PREMEL et EXPLO afin de simuler des écoulements multiphasiques.

Dans le cas des applications MONOGAS, MONOSTRU ou DIPHASIC du code MC3D, cette méthode pourrait permettre de réaliser des simulations très fines Direct Numerical Simulation (DNS) d'écoulements d'eau ou de gaz autour de gouttes chaudes de corium, avec des temps de calcul réduits.

Dans le cas des applications PREMEL et EXPLO du code MC3D, il serait possible de simuler plus finement l'écoulement du jet de corium dans l'eau, de traiter des configurations plus complexes ou de modéliser plus finement des cas « réacteur » avec des temps de calcul raisonnables et accessibles.

Références

- [1] R. Meignen, B. Raverdy, M. Buck; G. Pohlner; P. Kudinov; W. Ma; C. Brayer; P. Piluso; S.W. Hong; M. Leskovar; M. Uršič; G. Albrecht; I. Lindholm; I. Ivanov, Status of steam explosion understanding and modeling, *Annals of Nuclear Energy* 74, 125-133, 2014
- [2] F.H. Harlow and A.A. Amsden, Numerical calculation of almost incompressible flow, *J. Comp. Phys.*, 3, 80-93, 1968
- [3] R. Meignen, S. Picchi, J. Lamome, B. Raverdy, S. Castrillon-Escobar, G. Nicaise, The Challenge of Modeling Fuel Coolant Interaction: Part I – Premixing, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 280, pp. 511-527, 2014
- [4] A. Brandt, Multi-level Adaptive solutions to boundary-value problems, *Math. Comp.* vol. 31 n° 138, 333-390, 1977
- [5] S.P. Vanka, Block implicit multigrid solution of Navier-Stokes equations in primitive variables, *Jour. Comp. Phys.* Vol.65, 138-158, 1986