

Une méthode eulérienne directe pour la simulation des écoulements compressibles multi-matériaux avec glissement

■ R. MOTTE - J.P. BRAEUNIG - M. PEYBERNES / CEA-DAM Île-de-France

La simulation des écoulements compressibles multi-matériaux représente un enjeu important car elle est le socle de nombreux codes multi-physiques. Pour bien prendre en compte le couplage avec d'autres domaines de la physique comme la turbulence ou la tension de surface, il faut limiter les défauts inhérents à la discrétisation des équations de l'hydrodynamique, *i.e.* la diffusion numérique ou l'absence de glissement aux interfaces. Nous proposons dans ce travail une méthode de simulation robuste et précise qui autorise le glissement des matériaux aux interfaces.

La simulation d'écoulements compressibles à plusieurs matériaux est essentielle aux applications du CEA/DAM. Citons par exemple la mise en œuvre d'explosifs en détonique ou de lasers intenses en fusion par confinement inertiel, qui font interagir des matériaux ayant de grands contrastes de densité ou de compressibilité, et qui sont soumis à de grandes déformations. De plus, les codes de calcul doivent être couplés à une physique complexe et s'adapter à de nouvelles architectures informatiques. Ceci demande une souplesse à la fois de l'informatique et de la méthode numérique. Nous proposons le schéma VFFC-NIP [1] qui est de type Volumes Finis à variables centrées, destiné à résoudre les équations d'Euler compressible. Dans un contexte industriel où l'on utilise des équations d'état réelles, nous souhaitons simuler des écoulements laminaires sans diffusion moléculaire. Pour traiter ce type d'écoulements, nous considérons donc des interfaces séparant des matériaux non miscibles. Dans ce contexte, nous permettons aux matériaux de glisser les uns par rapport aux autres, comme dans le cas de l'air et de l'eau par exemple.

Description de la méthode

À l'inverse d'une méthode lagrangienne dont le maillage suit le mouvement de la matière, une méthode eulérienne nécessite de calculer des flux des quantités conservées (masse, quantité de mouvement, énergie totale) entre les mailles, et de déterminer le mouvement des interfaces sur un maillage fixe. Les flux numériques sont

exprimés entre deux volumes, chacun étant associé à un état thermodynamique [1]. Dans le cas de mailles pures (contenant un seul matériau), ce flux est bien défini. En revanche, dans le cas des mailles mixtes (contenant plus d'un matériau), il est nécessaire d'y calculer une valeur moyenne de la pression et de la vitesse. Ceci rend cependant moins naturelle l'introduction de modèles de sous-maille tels que le glissement ou la tension de surface.

L'intérêt de notre approche est d'écrire une loi de conservation pour chaque matériau dans une maille mixte, en exprimant une condition de contact entre les matériaux sous la forme d'un flux, comme pour les mailles pures. Ceci permet de calculer la vitesse des interfaces et d'autoriser le glissement [1,2]. Cette démarche est rendue possible par la définition de variables spécifiques à chaque matériau (vitesse, densité, énergie totale), y compris dans une maille mixte. À titre d'illustration, nous présentons sur la **figure 1** le cas d'un choc de forte intensité se propageant dans de l'eau et interagissant avec une bulle d'air qui va être fortement déformée et comprimée.

Une méthode adaptée aux nouvelles architectures

L'implémentation de la méthode VFFC-NIP repose sur un « splitting » directionnel sur un maillage cartésien orthogonal. Le calcul du nouvel état des mailles d'une ligne du maillage est ici indépendant des autres lignes, ce qui nous a permis de définir un algorithme parallèle MPI (*Message Passing Interface*, librairie

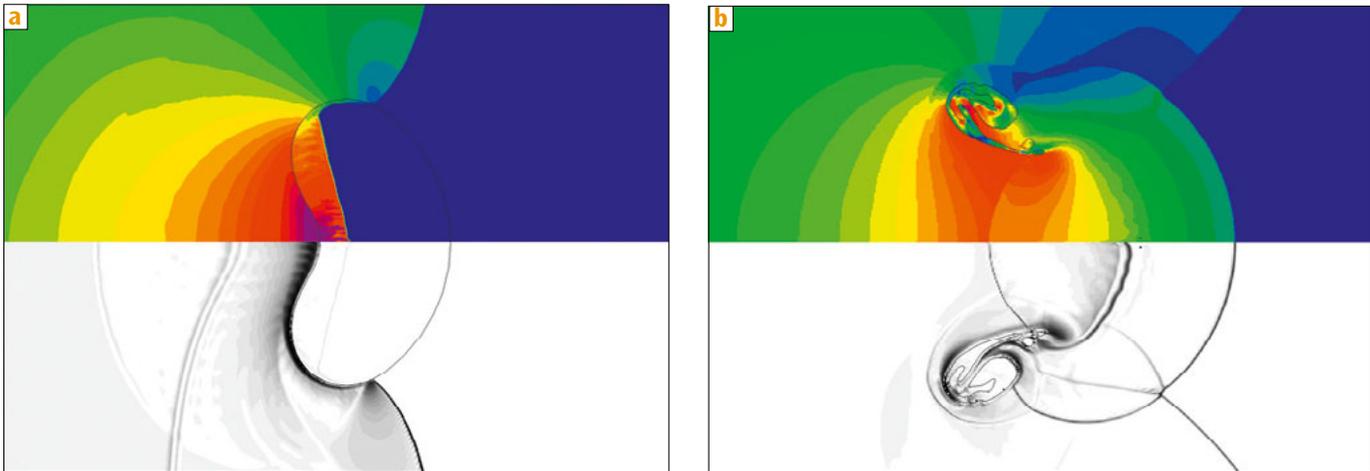


Figure 1. Simulation VFFC-NIP : interaction d'un choc dans de l'eau avec une bulle d'air aux temps 9,8 μs (a) et 16,5 μs (b) : en haut le module de la vitesse et en bas le gradient de la densité. Ces images illustrent le glissement par la discontinuité de la vitesse à l'interface (trait noir) et la position des ondes.

permettant la communication entre processeurs sur un système à mémoire distribuée) efficace par décomposition de domaine. Le système est découpé en tranches horizontales lors de la phase en X, verticales lors de la phase en Y, chaque tranche étant attribuée à processus MPI. Un algorithme de transposition permet de redistribuer les données par échange de messages MPI, pour passer d'un découpage en tranches horizontales à un découpage en tranches verticales et inversement. L'efficacité de ce parallélisme est due au fait que les communications ne concernent que la phase de transposition, alors que l'ensemble d'une phase X ou Y se fait sans communication. De plus, afin d'exploiter les futures architectures hétérogènes (processeurs multi-cœurs, accélérateurs graphiques de type GPU), des directives OpenMP et HMPP (bibliothèques permettant d'exploiter plusieurs cœurs ayant une mémoire partagée) ont été introduites, permettant de traiter une tranche MPI par plusieurs *threads* (processus légers attachés aux cœurs de calcul). L'algorithme hybride MPI-OpenMP, MPI-GPU permet ainsi de réduire fortement les communications MPI lors de la transposition et d'exécuter des calculs massivement parallèles (10 000 cœurs) avec une très bonne scalabilité.

Évolution vers un code multi-physique

Cette méthode numérique a été mise au point pour les équations d'Euler compressible en dimension deux. Depuis, elle a été étendue aux géométries axi-symétriques [3] et en dimension trois. D'autres phénomènes physiques ont été

modélisés : la tension de surface, un modèle d'hydrodynamique radiative, les écoulements à bas nombre de Mach [4], les écoulements bi-fluides et le traitement d'une surface libre avec du vide. La méthode VFFC-NIP a permis traiter chacun de ces modèles de manière générique, en écrivant le même système de lois de conservation dans les mailles mixtes que dans les mailles pures.

Références

- [1] J.-P. BRAEUNIG, B. DESJARDINS, J.-M. GHIDAGLIA, "A totally Eulerian Finite Volume solver for multi-material fluid flows", *Europ. J. Mech. B/Fluids*, **28**, p. 475-486 (2009).
- [2] R. LOUBERE, J.-P. BRAEUNIG, J.-M. GHIDAGLIA, "A totally Eulerian Finite Volume solver for multi-material fluid flows : Enhanced Natural Interface Positioning (ENIP)", *Europ. J. Mech. B/Fluids*, **31**, p. 1-11 (2012).
- [3] A. CHAMPMARTIN, J.-P. BRAEUNIG, J.-M. GHIDAGLIA, "An Eulerian Finite Volume solver for multi-material fluid flows with cylindrical symmetry", *Comput. Fluids* (2012), doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.09.014.
- [4] D. CHAUVHEID, *Écoulements multi-matériaux et multi-physiques : solveur volumes finis eulérien co-localisé avec capture d'interfaces, analyse et simulations*, Thèse de l'école normale supérieure de Cachan, 2012.