

Projet : FSI-LBM-GPU

Fluid Structure Interaction using Lattice Boltzmann Methods on Graphics Processing Units

Laboratoires CMLA et LMT

Résumé

Ce projet FARMAN s'intéresse à la résolution numérique haute performance de problèmes de couplage fluide-structure rencontrés en Ingénierie du Génie civil, mécanique et/ou Génie des procédés. Les méthodes Boltzmann sur réseaux ou Lattice Boltzmann Method (LBM) développées depuis une quinzaine d'année et en amélioration constante sont une alternative intéressante aux méthodes standards de discrétisation des équations de Navier-Stokes, notamment pour leurs propriétés étonnantes de stabilité numérique ne faisant pas appel à des méthodes implicites, rendant la programmation très simple. Les méthodes LBM ont déjà été prouvées hautement parallélisable sur architecture GPU ou GPGPU [1, 2] permettant même de la simulation 3D quasi-temps réel sur Station de travail à base de GPGPU Nvidia [6]. Dans ce projet, on se propose d'explorer deux aspects de Recherche : (i) l'extension des méthodes LBM aux cas de Mécanique des solides (voir [3] pour une étude préliminaire sur le sujet) ; (ii) les aspects théoriques et numériques de couplage fluide-structure quand LBM est utilisé comme solveur fluide (voir [4, 5, 6, 7] pour des références récentes sur le sujet).

Responsables scientifiques

Florian De Vuyst (PR, CMLA)
Christian Rey (PR, LMT)

Membres de l'équipe-projet avec la proportion de temps consacré au projet

CMLA : Laurent Desvillettes (modélisation, équations cinétiques, 5%), C. Labourdette (algorithmes et génie logiciel, 10%), J. M. Ghidaglia (analyse, 5%), F. De Vuyst (analyse, méthodes numériques, 20 %)

LMT : Rachid Bennacer (génie civil, méthodes de volumes finis, méthodes LBM 10%), A. Caignot (génie logiciel, 10%), C. Rey (mécanique des structures, décomposition de domaines, méthodes numériques, 20 %)

Description de la problématique scientifique

Les méthodes de Boltzmann sont une alternative intéressante aux méthodes de discrétisation standards telles qu'éléments finis ou volumes finis pour les problèmes de Mécanique des fluides et de thermique. Fondées sur une version discrète des équations de Boltzmann avec un terme de collision linéaire de type relaxation (modèle de Bhatnagar-Gross-Krook ou BGK), les méthodes LBM présentent de nombreux intérêts tant du point de vue de la stabilité numérique et leur robustesse que leur rapidité de mise en œuvre ou leur parallélisation sur architecture parallèle notamment sur GPU et GPGPU. Les méthodes lattice Boltzmann permettent de résoudre les équations de Navier-Stokes sur une gamme de nombres de Reynolds de l'ordre de 1 à 100. Plusieurs extensions récentes ont été proposées pour traiter les fluides compressibles, ou du couplage avec de la thermique et des écoulements multiphasiques. Les méthodes LBM permettent une simulation numérique quasi-temps réel d'écoulements 3D de liquides avec frontière libre (voir [1-4]).

Dans des travaux récents, des auteurs ont montré que les méthodes LBM sont aussi pertinentes pour les problèmes de couplage et interaction fluide-structures (voir Ohtsuki et al. 2009 [6] ou Kollmannsberger et al. 2009 [7]). Dans [6], les auteurs proposent un schéma d'interaction fluide-solide utilisant les méthodes LBM pour le fluide et des éléments discrets (DEM) pour les solides. Le schéma d'interaction proposé est validé sur un problème de chute de grains dans un liquide (phénomène DKT – drafting, kissing and tumbling) et donne des résultats qualitativement conformes aux attentes pour des nombres de Reynolds assez bas. Plusieurs articles discutent du traitement des conditions limites de frontières solides mobiles et du couplage avec LBM. Dans [6], les auteurs proposent de modifier l'opérateur de collision dans LBM et de prendre en compte une fraction d'aire solide dans les cellules LBM (voir figure ci-dessous).

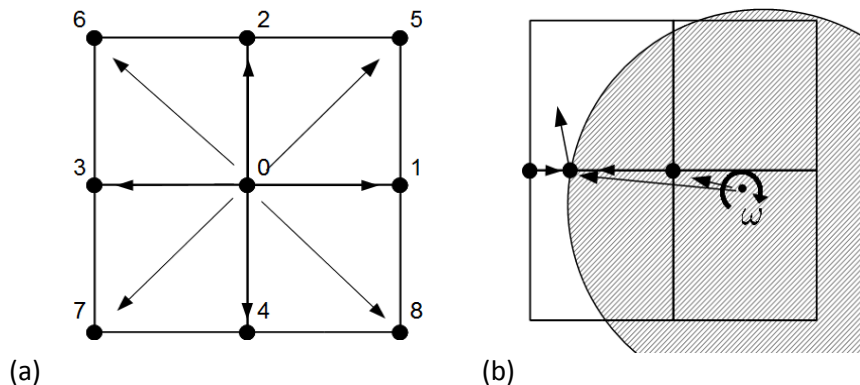


Figure. (a) Schéma d'interaction LBM D2Q9 ; (b) Schéma d'interaction LBM-DEM [10].

Néanmoins, la justification théorique d'un tel couplage et les questions de stabilité et de précision du couplage ne sont pas traitées dans ces papiers récents. Dans le présent projet FARMAN, on propose de réaliser l'Analyse Numérique des méthodes existantes et, éventuellement, de proposer de nouvelles méthodes numériques qui améliorent l'ordre de précision et/ou la stabilité numérique.

Les méthodes LBM s'appliquent de manière naturelle aux problèmes de fluides par construction puisque une description cinétique à l'échelle microscopique permet d'être consistant avec le comportement macroscopique. Toutefois, il serait intéressant d'explorer la piste de la dérivation de méthodes LBM pour la mécanique des solides et des structures. Cette piste a d'ailleurs été « touchée » dans [5] mais reste exploratoire et prospectif et nécessite des développements complémentaires pour conclure sur la pertinence des méthodes LBM en Mécanique des solides. Dans ce projet, on s'intéressera aussi à la question des extensions LBM aux équations de la Mécanique des solides (cadre de l'élasticité dans un premier temps).

Originalité du projet

La force du projet est l'interaction pluridisciplinaire et les regards croisés entre mathématiciens, numériciens ainsi que mécaniciens des fluides et des structures pour le traitement numérique de ces systèmes complexes couplés. L'originalité tient aussi dans la volonté d'étudier rigoureusement ces questions de couplage entre LBM et d'autres méthodes numériques pour le traitement des solides. L'étude théorique et l'analyse numérique sera une réelle valeur ajoutée par rapport à l'état de l'art actuel.

Le projet se veut aussi « pragmatique » au sens on l'on tentera d'appliquer ces méthodes de couplage à des problèmes pratiques d'ingénierie en Génie civil (injection de béton par exemple) ou en génie des procédés (cultures d'algues en bassins en présence de cylindres en suspension, simulation d'écoulements dans les pipes off-shore, sédimentation, etc).

L'originalité tiendra aussi dans la mise en œuvre de ces méthodes sur architecture GPGPU [13] pour tenter d'atteindre la simulation temps-réel, tant à des fins de Recherche qu'à des fins pédagogiques que de démonstration. Le simulateur a vocation à terme d'être connecté à un EQUIPEX de visualisation grande échelle de type « Grand mur de données » permettant l'interaction homme-simulation numérique.

Objectifs

Pour résumer, les objectifs du présent projet sont les suivants :

- Etat de l'art
- Analyse numérique des méthodes existantes de couplage
- Recherche de méthodes nouvelles de couplage
- Faisabilité et pertinence des méthodes LBM en Mécanique du solide
- Mise en œuvre sur GPGPU Nvidia sur la dernière architecture FERMI, aspects de parallélisation
- Définition de cas applicatifs en ingénierie et Génie civil.
- Réalisation de stages de Master Maths-Méca
- Publication d'un à deux articles + conférences

Planning prévisionnel

Ce projet amont à caractère exploratoire et d'évaluation du potentiel de Recherche et d'interaction Maths-Méca sera d'une durée de 24 mois. Il permettra de lancer un à trois stages de Master M2 sur les deux ans. Il pourra conduire à terme à un projet de plus grande envergure impliquant plusieurs industriels (tels que Véolia ou Total) et un changement de dimension de l'équipe projet. Une réunion mensuelle est programmée sur ces deux années de projet pour régulièrement faire un état d'avancement du projet.

Apport scientifique des différents partenaires à la réalisation du projet

L'équipe *Mécanique des Fluides* du Centre de Mathématiques et de leurs Applications CMLA est experte en méthodes numériques et analyse numérique des équations aux dérivées partielles. Le CMLA sera en force de proposition d'algorithmes innovants sur GPU pour l'évolution Temps Réel de solutions numériques d'EDP. Le CMLA apportera aussi un composante technologique « Génie Logiciel ». Lors d'un contrat industriel avec Total, le CMLA a réalisé une plate-forme de simulation numérique temps réel d'une colonne de craquage catalytique (Fluid Catalytic Cracking, FCC) avec interaction Homme-Machine. La plateforme de simulation était constituée de technologies C++, VTK, Python, SWIG et wxWidgets.

Le LMT a une forte expertise en modélisation et simulation numérique en mécanique des solides et des structures et . Il dispose notamment d'une expertise dans les approches par décomposition de domaine (linéaire et non linéaire), le contrôle de l'erreur d'approximation, le couplage de modèles et les approches LBM.

Équipement Farman - EQUIPEX. La plate-forme de simulation temps réel ainsi mise en place pourra être connectée au prochain mur de données du Bâtiment Farman, partie de l'Équipement d'Excellence EQUIPEX DIGISCOPE entre partenaires DIGITEO du Plateau de Saclay (projet soumis en attente d'acceptation). L'ensemble formera un environnement de simulation/visualisation Temps Réel à des fins expérimentales et de démonstration auprès des étudiants.

Planning prévisionnel et financement : fonctionnement et équipement

Un total de 24 keuros est demandé pour 2 ans, qui se décompose comme suit :

Équipement (12 000 euros)

• Station de travail, CPU de base Core i7 960, Mémoire 12Go RAM incluant une carte graphique NVIDIA Quadro 5000	3590.00 € HT
Processeur de calcul Tesla C2070	3130.00 € HT
• PC Portable incluant carte Nvidia Quadro pour démonstration et mobilité	3300.00 € HT
TOTAL HT	10020.00 € HT
TOTAL TTC incluant TVA 19.6%	11983.92€ TTC

Fonctionnement (12 000 euros)

- | | |
|---|-------------|
| • Gratification de stage Master2 (420 €/mois) | 6 000 € TTC |
| • Missions (conférences) | 6 000 € TTC |

Bibliographie

- [1] Frederic Kuznik, Christian Obrecht, Gilles Rusaouen, Jean-Jacques Roux, LBM based flow simulation using GPU computing processor, *Computers & Mathematics with Applications*, Volume 59, Issue 7, Mesoscopic Methods in Engineering and Science, International Conferences on Mesoscopic Methods in Engineering and Science, April 2010, Pages 2380-2392, DOI: 10.1016/j.camwa.2009.08.052 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TYJ-4X9D5D0-329e7676667251dd6bdc7ea63fbc0232a8>)
- [2] A. Gjermundsen and A. C. Elster, LBM vs. SOR solvers on GPU for Real-Time Fluid Simulations, *Proc. Of Para 2010 – State of the Art in scientific and Parallel Computing*, <http://vefir/hi.is/para10/para10-paper-132.pdf>
- [3] Guo YL, Bennacer R, Shen S, et al., Simulation of a Liquid Droplet Impinging on a Horizontal Solid Substrate Using Lattice Boltzmann Moment Model, *Defect and diffusion forum*, 283-286, pp. 303-308, 2009
- [4] Mohamad AA, Bennacer R, El-Ganaoui M, Double dispersion, natural convection in an open end cavity simulation via Lattice Boltzmann Method, *Int. J. Thermal Sciences*, 49 (10), pp. 1944-1953, 2010.
- [5] B. Chopard and S. Marconi, Mechanical properties of a Lattice Boltzmann solid body, *Rapport Technique*, Université de Genève (2009), <http://cui.unige.ch/~chopard/CA/solid-theory.pdf>
- [6] S. Ohtsuki and T. Matsuoka, Numerical simulation of solid particle behaviors in fluid flow by using a numerical method coupling technique, *Int. J. of the Japanese Committee for Rock Mechanics*, Vol 4, nb 2, June 2009 61—67.
- [7] S. Kollmannsberger, S. Geller, A. Düster, J. Tölke, M. Krafczyk and E. Rank, Fluid-Structure interaction based on Lattice Boltzmann and P-FEM: verification and validation, *Int. Con on Comp. Methods for Coupled problems in Sci. And Eng., Coupled Problems 2009, CIMNE Barcelona (2009)*.
- [8] X. D. Niu, C. su, Y. Chew and Y. Peng, A momentum exchange-based immersed boundary-lattice Boltzmann method for simulating incompressible viscous flows, *Phys. Letter A*, 354 (3), 173—182.
- [9] O. E. Strack and B. K. Cook, Three-dimensional immersed boundary conditions for moving solids in the Lattice Boltzmann method, *Int. J. for Num. Methods in Fluids*, 55, 103—125 -2007).
- [10] D. Noble and J. Torczynski, A lattice Boltzmann method for partially saturated computational cells, *International J. of Modern Physics, C*, 9, 1189—1201 (1998).
- [11] M. Stiebel, J. Tölke, M. Krafczyk, An upwind discretization scheme for the finite volume lattice Boltzmann method, *Computer and Fluids* 35 (2006), 814—819.
- [12] S. Ubertini and S. Succi, A Generalised lattice Boltzmann equation on unstructured grids, *Communications in Comp. Phys.*, 3, n° 2 (2008), 342—356.
- [13] Multiscale Research at IPE – Institute of Process Engineering, calculateur 1 PetaFlop GPU, <http://www.multiscalesci.org/2010/0428/8.html>

Codes open source en lien avec le projet

[i] **Palabos** – <http://www.lbmethode.org/palabos/index.html>

Open source code, Parallel Lattice Boltzmann solver. Efficient parallelization is achieved through the MPI extension. [Good scalability](#) on thousands of cores, and code efficiency up to [several billion site updates per second](#) in 3D applications have been measured.

[ii] **Sailfish** – <http://sailfish.us.edu.pl/>

Sailfish is a free computational fluid dynamics solver based on the Lattice Boltzmann method and optimized for modern multi-core systems, especially GPUs (Graphics Processing Units).

[iii] **OpenCurrent** – <http://code.google.com/p/opencurrent/wiki/OpenCurrent>

OpenCurrent is an open source C++ library for solving Partial Differential Equations (PDEs) over regular grids using the CUDA platform from NVIDIA.

Eléments de bibliographie des partenaires

[CMLA1] Romain Billot, Christophe Chalons, Florian De Vuyst, Nour-Eddin El Faouzi, Jacques Sau, A conditionally linearly stable second-order traffic model derived from a Vlasov kinetic description, *Comptes Rendus Mécanique*, Volume 338, Issue 9, September 2010, Pages 529-537

[CMLA2] D. Bouche, J.M. Ghidaglia et F. Pascal, Theoretical analysis of the upwind finite volume scheme on the counter-example of Peterson, *Mathematical Modelling and Numerical Analysis (M2AN)*, 44, 1279-1293, 2010.

[CMLA3] F. De Vuyst, L. Desvillettes, B. Frogé, J.-M. Ghidaglia, C. Labourdette and Ph. Ricoux, A lightweight three-phase Fluid Catalytic Cracking riser model for real-time simulation and interactive three-dimensional visualization, *submitted to Computer and Fluids*, 2010.

[CMLA4] F. De Vuyst, C. Audouze, Réduction de modèle Eléments Finis par POD pour les problèmes paramétrés aux EDP, Chapitre 2 dans *Optimisation multidisciplinaire en mécanique*, Tome 2: "Réduction de modèles, robustesse, fiabilité, réalisations logicielles", (Traité MIM, série méthodes numériques en Mécanique), Filomeno Coelho & Breitkopf Eds., Hermès Sciences, 47 pages (fév. 2009), ISBN-10: 2746221969

[CMLA5] Le Bourdieu S., De Vuyst F. and Jacquet L., Numerical solution of the Vlasov-Poisson system using generalized Hermite functions, *Comput. Phys. Comm.*, Volume 175, Issue 8, pages 528-544 (2006)

[LMT1] Pebrel J., Rey C., Gosselet P., A nonlinear dual domain decomposition method: application to structural problems with damage, *Int. J. of Multiscale Computational Engineering*, V 6, 3, pp 251-262, 2008.

[LMT2] Gosselet P., Rey C., Non-overlapping domain decomposition methods in structural mechanics, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol 13, 4, pp 515-572, 2006.

[LMT3] Parret-Fréaud, A., Rey, C., Gosselet, P., Feyel, F, Fast estimation of discretization error for FE problems solved by domain decomposition, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v.199, 49-52, pp 3315-3323, 2010.

[LMT4] S. Gavaille, C. Rey, A. Delaplace, and C. Mariotti. Stratégie de couplage de la méthode des éléments discrets avec la méthode des éléments spectraux. In 9^e Colloque National en Calcul des Structures, 2009.

[LMT5] Guo YL, Bennacer R, Shen S, et al., Simulation of a Liquid Droplet Impinging on a Horizontal Solid Substrate Using Lattice Boltzmann Moment Model, *Defect and diffusion forum*, 283-286, pp. 303-308, 2009

[LMT6] Mohamad AA, Bennacer R, El-Ganaoui M, Double dispersion, natural convection in an open end cavity simulation via Lattice Boltzmann Method, *Int. J. Thermal Sciences*, 49 (10), pp. 1944-1953, 2010.

ANNEXE A

La dernière génération de cartes GPU et GPGPU NVIDIA (novembre 2010)

Basés sur l'architecture CUDA™ de nouvelle génération portant le nom de code Fermi, les modules de calcul GPGPU Tesla M2050 (3 Go GDDR5) et Tesla M2070 (6 Go GDDR5) permettent une intégration efficace de solutions de calcul par le GPU dans des systèmes-hôtes, afin de bénéficier de capacités HPC et déployer de gros centres de données. Les GPU Tesla série 20 à 512 coeurs CUDA sont les premiers à délivrer des fonctions de mémoire ECC et jusqu'à 10 fois plus de puissance en virgule flottante à double précision par rapport à un CPU quad-core x86, à savoir 515 Gflops en virgule flottante Double Précision.

La dernière carte graphique NVIDIA Quadro 6000 à Architecture Fermi 448 coeurs CUDA délivre des performances jusqu'à 8 fois plus rapides par rapport aux générations précédentes dans les applications de calcul les plus exigeantes de l'industrie, comme celles de ray tracing, de traitement vidéo et de mécanique des fluides numérique. Quadro 6000 intègre une double précision en virgule flottante de 64 bits et une mémoire de 6 Go GDDR5.

Un PC de bureau équipé d'un GPGPU Tesla M2070 et d'une carte graphique GPU Quadro 6000 possède désormais une puissance de calcul théorique de l'ordre du TeraFlops Double Precision, puissance du super-calculateur du CEA Bruyères il y a seulement 8 ans !