



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène
Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés

SYNTHESE

SUR LES ACTIVITES DE RECHERCHE

Présentée pour :

Une habilitation universitaire

En Génie Mécanique

Thème

**ANALYSE NUMERIQUE DES ECOULEMENTS ET DU
TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES MILIEUX
POREUX**

Par :

Dr AMEZIANI Djamel-Eddine
Maître de conférences B

| | |
|---|----|
| I. INTRODUCTION | 3 |
| II. Stockage Granulaire | 5 |
| III. Simulation des écoulements avec la méthode Lattice Boltzmann | 10 |

I. Introduction

Ce rapport scientifique est une synthèse de mes activités de recherche que j'ai entreprises durant ces dix dernières années au laboratoire des transports polyphasiques et milieux poreux de la faculté de génie mécanique et de génie des procédés de l'USTHB. Mes contributions dans trois projets de recherche, agréés par le MESRS et dirigés par le Professeur K. Bouhadef (FGMGP/USTHB) ainsi qu'un accord programme CMEP Tassili Dirigé par Messieurs Pr. S. Chikh (FGMGP/USTHB) et Pr. R. Bennacer (Université de Cergy-Pontoise, France), m'ont permis d'évoluer au départ, en tant qu'étudiant en post-graduation pour l'obtention du diplôme de magister et par la suite, en tant qu'enseignant de grade de chargé de cours et de chercheur associé puis chargé de recherche pour l'obtention du diplôme de doctorat ; et enfin actuellement, en tant que maître de conférences de classe B pour une candidature à une habilitation universitaire en génie mécanique. J'ai eu l'honneur d'être encadré par Madame Pr K. Bouhadef dans la préparation de mes thèses de magister et de doctorat. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour son soutien et ses précieux conseils tout au long de ces années de recherche.

Le premier projet que j'ai intégré officiellement en 2002 (après mon recrutement) et portait sur une contribution à la compréhension de certains problèmes concernant notamment les transports de chaleur et de masse dans divers processus, incluant des milieux poreux, tels que le séchage et le stockage de denrées agro-alimentaires (objet de ma thèse de magister), la filtration catalytique, l'isolation ou les convections thermosolutales. L'étude faite est une réponse à la sollicitation du secteur industriel pour des problèmes d'optimisation du stockage granulaire. Une attention particulière est portée à la phase de formulation du transport dans les milieux poreux, qui a constitué mon axe d'investigation dans ce projet. Une première approche numérique portant sur les effets de la géométrie et du type du granulat sur les transferts transitoires combinés de chaleur et de masse est entreprise.

Dans le prolongement de ce travail, un deuxième projet de recherche est réalisé durant la période de 2003 à 2005 et a traité sur l'étude des transferts dans des systèmes à géométrie complexe, poreux ou non poreux. Mon axe d'intervention dans ce projet a ciblé en particulier, le développement de modèles de conditions aux limites pour modéliser les écoulements dans les canaux ouverts ainsi que sur l'analyse des effets de chauffage périodique (déroulement des saisons) sur les transferts de chaleur dans les silos de stockage granulaire.

Le troisième projet de recherche, réalisé entre 2006 et 2009, est une étude de l'amélioration des performances des systèmes thermiques industriels par l'utilisation de milieux poreux. En effet, les milieux poreux sont retrouvés dans plusieurs situations industrielles telles que dans les équipements électroniques, l'isolation et les échangeurs de chaleur et sont également retrouvés comme produit à stocker. Afin de réduire les pertes calorifiques et d'améliorer l'efficacité énergétique des installations de stockage, il se dégage de là, un axe de recherche d'une importance considérable qui est la maîtrise et l'optimisation des conditions de stockage. Dans ce sens, ma contribution dans ce projet est de développer des modèles d'analyse numérique de l'optimisation du stockage suivant les conditions externes par l'utilisation de l'air comme fluide de chauffage ou de refroidissement.

Enfin, une collaboration de recherche dans le domaine du refroidissement par adsorption est établie avec l'équipe du laboratoire LEEVAM, sous la direction du Professeur R. Bennacer (que je saluerais au passage), de l'université de Cergy-Pontoise (France). Mon axe d'investissement dans cette collaboration traite à cours terme de l'étude d'un problème typiquement fondamental, mais d'un grand intérêt dans le domaine scientifique, qui est la

modélisation des écoulements autour d'obstacles cylindriques par la méthode de Lattice Boltzmann en multiple relaxation (LBM/MRT, Lattice-Boltzmann method, Multiple Relaxation Time). Il s'agit, plus particulièrement, de simuler numériquement dans les situations bidimensionnelle/tridimensionnelle les écoulements induit par convection mixte autour d'obstacles cylindriques/sphériques contenus dans une cavité carrée/cubique. Cette étude aura un impact appréciable dans la compréhension locale de ce qui se produit à l'intérieur d'un milieu poreux (dans notre cas) généré par un empilement de cylindres ou de sphères suivant qu'on est en situation 2D ou 3D.

Les résultats obtenus dans le cadre de mes activités de recherche sont issus globalement d'études numériques basées sur la méthode des volumes finis. Les procédures numériques sont construites autour des algorithmes SIMPLE et SIMPLER pour le traitement du couplage en les champs de vitesse et de pression (Patankar, 1980). Différents schémas d'interpolation (Power Law et QUICK) sont considérés pour la discrétisation des termes de convection et de diffusion dans les équations de conservation. Les codes de calcul élaborés sont tous confirmés par des études de sensibilité au maillage. Ils sont aussi validés dans les thèmes de recherche abordés par des études de comparaisons avec des résultats expérimentaux ou numériques de travaux antérieurs existants dans la littérature.

Le bilan de ma production scientifique lors de la réalisation des différents projets de recherche, cités précédemment, est le suivant :

- Sept publications internationales

- 01 publié dans International Journal of Thermals Sciences, Elsevier 2009.
- 02 publié dans Journal of Deffect and Diffusion Forum, Trans Tech Publication 2009&2008.
- 01 publié dans International Journal of Numerical Heat Transfer, Part A, Taylor and Francis 2008.
- 01 publié dans WSEAS transactions on Heat and mass Transfer, WSEAS publication 2006.
- 01 accepté et à paraître dans Intenational Journal of Computational Thermal Science, Begell House 2010.
- 01 accepté et à paraître dans Intenational Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Emerald janvier 2010.

Les deux premiers (D.D.F. et I.J.T.S.), ainsi que les deux derniers à paraître, sont apparus après la soutenance de ma thèse doctorat (octobre 2008).

- Quatorze communications internationales (voir CV détaillé)

Dans ce qui suit, un aperçu sur le développement de mes axes de recherche est brièvement exposé avant de présenter les résultats essentiels obtenus. Ces axes de recherche sont au nombre de deux et sont intitulés dans l'ordre:

1. Stockage Granulaire.
2. Etude des écoulements autour d'obstacles cylindriques/sphériques.

Une conclusion de chaque partie ainsi que les développements possibles sont également donnés à la fin de chaque partie de ce rapport.

II. Stockage granulaire :

a/ Problème du canal ouvert

Cette thématique porte sur la simulation numérique des transferts thermoconvectifs dans des conduites planes. Bien que de nombreux travaux expérimentaux et numériques aient été publiés au cours des dernières décennies, ce problème reste difficile à résoudre dans une géométrie limitée au seul canal, en particulier parce que l'écriture des conditions aux limites d'entrée et de sortie reste une question largement ouverte. Une illustration de la difficulté se retrouve dans le récent benchmark établi sur le problème de l'effet de cheminée par Desrayaud *et al.* [2007]. Une grande différence, dans les solutions, est trouvée pour le même problème avec différentes conditions aux limites.

Deux types de conditions aux limites sont principalement retrouvés dans les travaux antérieurs:

$$\text{à l'entrée: } \frac{\partial U}{\partial x} = V = T = 0, \quad P = -\frac{Q_T^2}{2} \quad \text{ou} \quad P(0, Y) = -\frac{U(0, Y)^2}{2}$$

$$\text{à la sortie: } \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} = P = 0, \quad \text{si } U \geq 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{autrement } T = 0$$

Où Q_T^2 représente le débit de fluide, P la pression, U : la vitesse à la sortie. A noter que le premier type de conditions aux limites ne tient pas compte de l'effet de l'environnement externe (recirculation) sur le transfert de chaleur dans le canal. Le deuxième type de conditions à la limite donne une restriction sur la température en fonction du sens de l'écoulement.

Les transferts de chaleur et l'hydrodynamique dans un canal vertical chauffé ou refroidi ont été très largement étudiés depuis près de cinquante ans. En effet, le canal plan est représentatif de plusieurs problèmes comme la cheminée, le capteur solaire plan, le mur Trombe ou encore le refroidissement des cartes de circuits imprimés (Incropera, [1988]). Une des premières études expérimentales de la convection naturelle dans un canal vertical est celle d'Elenbaas [1942] qui a déterminé les différents modes d'écoulement en fonction d'un nombre de Rayleigh modifié (rapport du nombre de Rayleigh construit sur la largeur par l'allongement du canal) : à faibles nombres de Rayleigh, le régime est pleinement développé alors qu'aux nombres de Rayleigh élevés, le régime est de type couche limite. Bar-Cohen *et* Rosenhow [1984] ont présenté, à partir de résultats expérimentaux et numériques, un ensemble de corrélations valables dans différentes situations, canal chauffé symétriquement ou asymétriquement, à flux ou à températures imposés. Ces corrélations ont été récemment améliorées par Manca *et al.* [1994] et Olsson [2004] pour le cas du chauffage symétrique.

La revue de la littérature classe les travaux correspondant au problème du canal ouvert en quatre catégories principales d'études:

- Celles qui s'intéressent à la quantification du transfert de chaleur (corrélations), où la plupart des travaux considèrent deux longueurs additionnelles à la géométrie afin d'avoir la cohérence avec leurs conditions aux limites, *i.e.* établissement du champs dynamique à l'entrée et du champs thermique/dynamique à la sortie (Wirtz *et* Stutzman [1982], Hernandez *et al.* [1994], Ramanathan *et* Kumar [1991]) ;
- Celles qui s'intéressent aux conditions aux limites (Bodoia *et* Osterle [1962], Kettleborough [1972], Nakamura *et al.* [1982], Webb *et* Hill [1989], Morrone *et al.* [1997], Bade *et* Haldenweg [1998], Marcondes *et* Maliska [1999]);

- Celles qui s'intéressent à la convection naturelle sous effet cheminée c'est-à-dire que l'écoulement suit la direction verticale comme direction préférentielle (Straatman *et al.* [1993], Bianco *et al.* [1997], Shahin *et al.* [1999], Manca *et al.* [2003]) ;
- Enfin, celles qui s'intéressent à la recirculation sur la surface supérieure du canal (Sparrow *et al.* [1984], Win Aung *et al.* [1986], Ingham *et al.* [1988], Khim *et al.* [1995]).

Bien que plusieurs travaux expérimentaux et numériques aient été présentés, peu de résultats prennent en compte l'effet des milieux poreux sur les canaux dans la situation de la convection naturelle. On peut citer, à titre d'exemple, les travaux de Hadim *et al.* [1997], qui ont examiné un canal plan muni d'une succession de milieu poreux chauffé par un flux de chaleur uniforme et constant. L'effet de la succession de cloisons poreuse sur le transfert de chaleur dans les canaux a fait l'objet de nombreuses études (Huang *et al.* [1994], Zhongyu *et al.* [1997], Da Silva *et al.* [2004], Nicolau *et al.* [2006]) à la fois dans la situation de la convection naturelle ou de la convection forcée. Cependant dans ces cas là, le problème des conditions d'entrée/sortie ne se pose pas. Enfin, on peut évoquer le travail de Bennisallah *et al.* [1996] qui, pour sa part, a étudié la validité de l'équilibre thermique local dans un cylindre poreux chauffée avec un flux de chaleur constant à la paroi latérale.

On conclut d'après la recherche bibliographique sur le canal ouvert est que l'écriture des conditions aux limites, d'entrée et de sortie reste une question largement ouverte, ceci justifiant la diversité des résultats trouvés par les différentes méthodes numériques et expérimentales utilisées par les nombreux auteurs.

b/ Chauffage Périodique

Il existe une imposante littérature relative aux phénomènes thermoconvectifs instationnaires résultants de conditions de chauffage constantes ou variables. La revue de ces travaux indique clairement que la plupart des études dans ce domaine portent sur des écoulements convectifs avec des conditions de chauffage permanentes, ce qui est le cas de la plupart des applications pratiques. Il existe cependant un certain nombre de situations où l'énergie fournie aux systèmes est variable. Les collecteurs d'énergie solaires, l'alimentation des circuits par courant alternatif, le stockage de produits dans les conditions ambiantes (qui peuvent être approchées par des températures sinusoïdales, où la période peut être le défilement des journées ou des années), sont des exemples de tels systèmes. Par conséquent, la connaissance des mécanismes de transfert de chaleur, par convection naturelle transitoire s'avère nécessaire, d'autant plus qu'il est impossible de prédire le comportement d'un fluide soumis à des conditions de chauffage variables à partir de résultats obtenus avec des conditions de température ou de flux imposés constantes.

Pour le cas de la convection naturelle transitoire induite par des conditions de chauffage variant dans le temps, il existe relativement peu de travaux dans la littérature. Parmi les contributions, On peut citer trois catégories :

1. Celles qui considèrent des variations linéaires ou brusques du chauffage.
2. Celles qui s'intéressent aux conditions de chauffage périodiques. (Milieux fluides (Patterson *et al.* [1980], Hall *et al.* [1988]), Milieux Poreux (Sözen *et al.* [1995], Bradean *et al.* [1995, 1997]).
3. La modulation de conditions dans un souci de stabilisation d'écoulement oscillatoire (élaboration de matériaux, Semma *et al.* [2009]).

La revue de la bibliographie a montré que peu de travaux se sont intéressés au chauffage périodique dans un milieu poreux et aucun travail ne s'est intéressé à la simulation des défilements des journées ou des années dans les silos de stockage.

On se propose dans notre travail d'étudier le transfert de chaleur instationnaire du à des gradients périodiques de température dans un silo de stockage granulaire. L'étude consiste en la modélisation du transfert de chaleur par convection naturelle à travers un cylindre de stockage de grains, de hauteur H et de rayon R , disposé verticalement, ouvert à ses extrémités, et rempli d'un milieu poreux. La paroi du cylindre est portée à une température imposée variant d'une manière sinusoïdale (afin de simuler le défilement des journées ou des années) dans le temps (T_p), alors que le fluide est aspiré par le bas avec une température constante (T_0). On s'attardera pas dans ce qui suit sur la formulation mathématique ainsi que sur la résolution des équations de transport décrites qui sont bien définies dans les références (Ameziani *et al.* [2008], Ameziani *et al.* [2009])

Les principaux résultats obtenus pour le cas d'une température constante mettent en évidence, selon les valeurs du rapport de forme (A), nombre de Biot (Bi) et du nombre de Rayleigh-Darcy (Ra), deux types d'écoulements:

Écoulement sans recirculation –Ce type d'écoulement est rencontré dans le cas de cylindres plus allongés et de nombre de Rayleigh relativement faible. Le cas $Ra=50$, $A=1$ a été choisi pour illustrer ce type d'écoulement (fig.1-a).

Écoulement avec recirculation- Ce type d'écoulement est rencontré pour des facteurs de forme A élevés et pour des valeurs importantes du nombre de Rayleigh Ra . Le cas $Ra=1000$ et $A=1$ a été choisi pour illustrer ce type d'écoulement (fig. 1-b). Le champ de température illustre des similarités avec celui rencontré dans le cas d'une plaque plane en milieu semi-infini ou une couche limite se développe le long de la paroi.

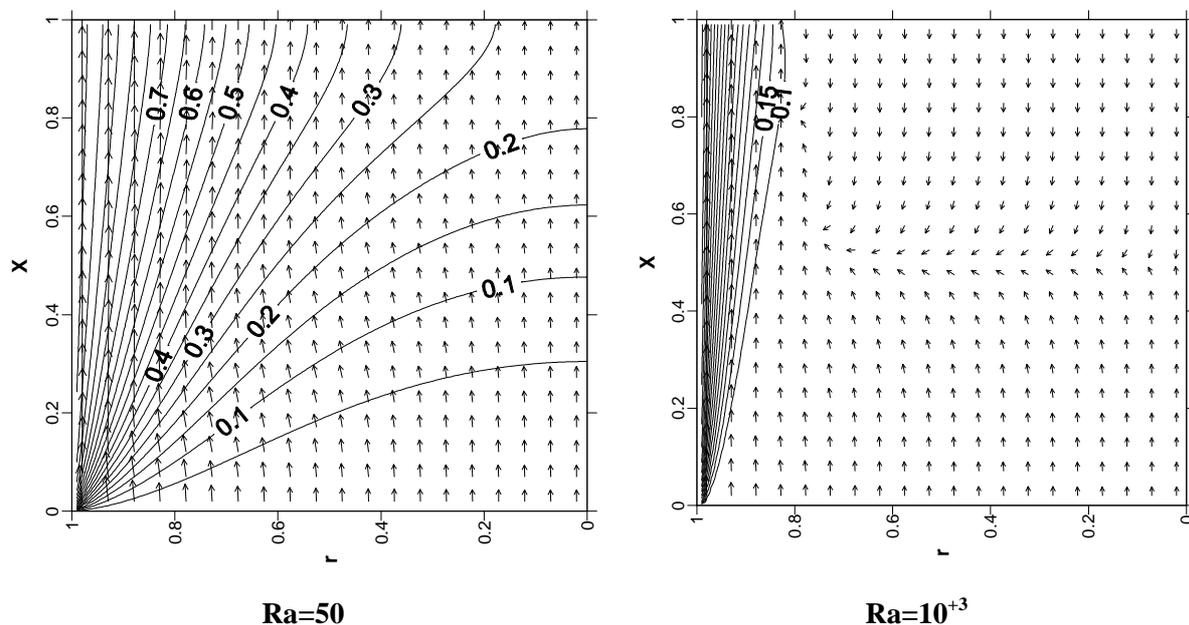


Figure 1:Champs de Température et de vitesses pour différents nombres de Rayleigh

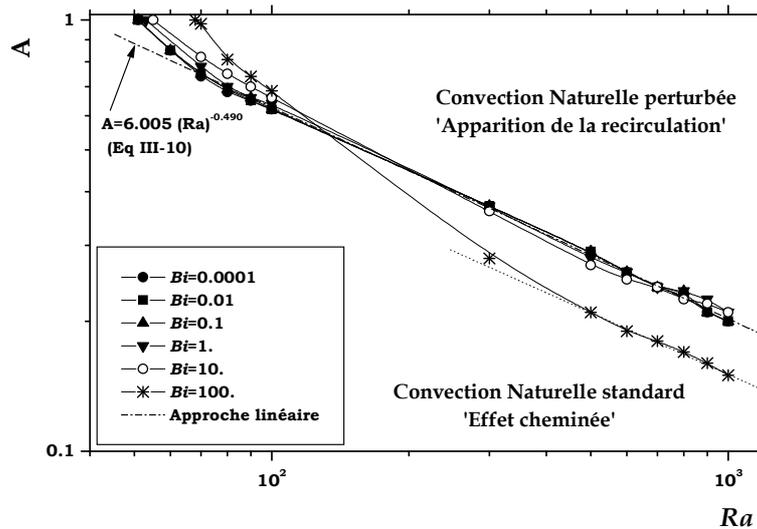


Figure 2. Diagramme de l'apparition de la recirculation ($Ra-A$) pour les différents nombres de Biot Bi .

L'analyse a démontré que l'aspiration supérieure disparaît lorsque la couche limite couvre la sortie du cylindre. La limite entre les deux types d'écoulements représente une droite, dans le cas de faibles nombres de Biot, dans le champ $A-Ra$ (fig.3). Ce résultat est qualitativement en bon accord avec le cas du développement de couche limite le long d'une plaque verticale plane où la littérature nous donnent une longueur de couche limite comme:

$$\delta_T \sim x (Ra_x)^{-1/2}$$

et par analogie une analyse aux ordres de grandeur nous a permis de donner le rapport de forme limite de l'apparition de la recirculation comme :

$$A \sim (Ra)^{-1/2}.$$

Et enfin de corrélérer l'apparition de la recirculation avec le rapport de forme comme :

$$A = 6,005 \times Ra^{-0,49}$$

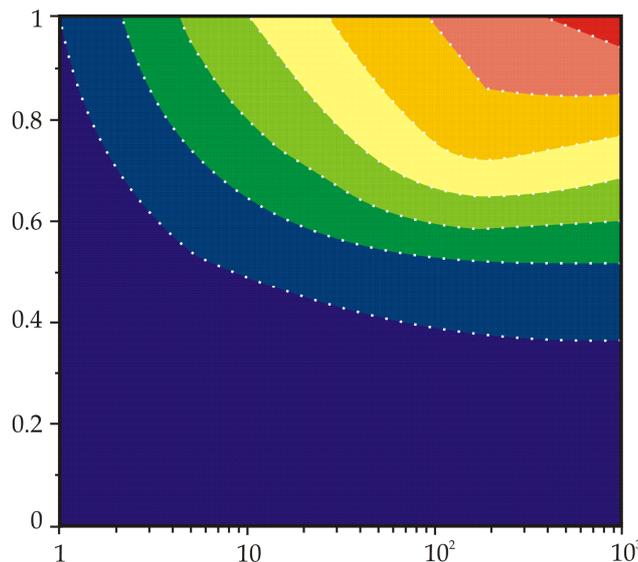


Figure 3. Influence des oscillations de température sur l'augmentation relative du transfert de chaleur.

Pour obtenir une comparaison globale des caractéristiques de transfert de chaleur pour le chauffage périodique, l'influence de l'amplitude des oscillations de la température sur la variation relative du transfert de chaleur ($Nu_T - Nu / Nu$) est illustrée sur la figure 3 pour différents nombres de Rayleigh, différentes amplitudes adimensionnelles, et pour un faible nombre de Biot ($Bi=0,01$).

Pour les faibles amplitudes adimensionnelles ($XA < 0,5$), nous observons une équivalence entre les transferts pour les deux cas de chauffage : constant et modulé dans le temps (variation relative inférieure à 3%).

Pour des amplitudes plus grandes que 0,5, nous observons une amélioration significative du transfert de chaleur moyen. Nous avons observé que cette augmentation s'accroît avec le nombre Ra . Pour des valeurs élevées du nombre de Rayleigh, la variation du transfert de chaleur va de la valeur de référence à une augmentation de 19,5% lorsque l'amplitude sans dimension atteint 0,99.

Une période moins importante ($\tau=0,012$) symbolisée par les pointillés sur cette même figure, n'engendre aucune modification sensible. Des résultats similaires par rapport à l'influence de la période ont été rapportés dans la littérature pour le cas des cavités rectangulaires.

Conclusion et perspectives :

Le transfert de chaleur dans un cylindre poreux a été analysé. L'écoulement est semblable à celui rencontré dans le cas d'une plaque plane en milieu semi-infini où une couche limite se développe. Les résultats obtenus mettent en évidence, selon les valeurs de A et de Ra , deux types d'écoulements: un écoulement avec recirculation et un écoulement sans recirculation. La limite de l'obtention de l'une ou de l'autre situation est obtenue suivant la corrélation $A = 6.005 \times Ra^{-0.49}$.

L'analyse du transfert de chaleur montre que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh. Le nombre de Nusselt moyen est sensible aux valeurs des nombres de Biot et du rapport de forme uniquement pour les faibles nombre de Rayleigh et cette dépendance disparaît lorsque le tirage thermique augmente (Ra).

L'analyse du chauffage périodique de la paroi du cylindre donne des résultats importants, on note :

- Pour les faibles amplitudes adimensionnelle ($XA < 0,5$), une équivalence entre les transferts des deux cas de chauffage constant et modulé dans le temps est observée (variation relative est inférieure à 3%).
- Pour des amplitudes plus grandes que 0,5, l'amélioration du transfert de chaleur moyen est directement proportionnelle aux valeurs Ra , elle peut s'avérer significative notamment pour les grandes amplitudes ($XA=0,99$) où une augmentation de 19,5% à été calculée.

Pour les perspective à venir, la plus proche situation réelle (et la plus intéressante) est de modéliser le transfert de chaleur/masse avec la présence de réaction chimique. Cette étude représente non pas le stockage mais la fermentation (du blé par exemple) qui se produit dans certains cas engendrant même des explosions.

III. Simulation des écoulements avec la méthode Lattice Boltzmann

Nous nous proposons dans la suite de nos recherches d'utiliser la méthode de Lattice Boltzmann pour la simulation des écoulements autour d'obstacles puis, par la suite, par un empilement de cylindres/sphères pour simuler localement l'écoulement à travers les milieux poreux en situations bidimensionnelle et tridimensionnelle. Le détail de la méthode est retrouvé dans la bibliographie (Ameziani *et al.* [2010], Ameziani *et al.* [2010]).

On se propose d'abord d'appliquer la méthode de Lattice Boltzmann pour simuler l'écoulement de la convection mixte dans une cavité carrée engendrée par la combinaison de la convection naturelle induite par un gradient de température pariétal et la convection forcée dû au déplacement de paroi supérieure fig4.

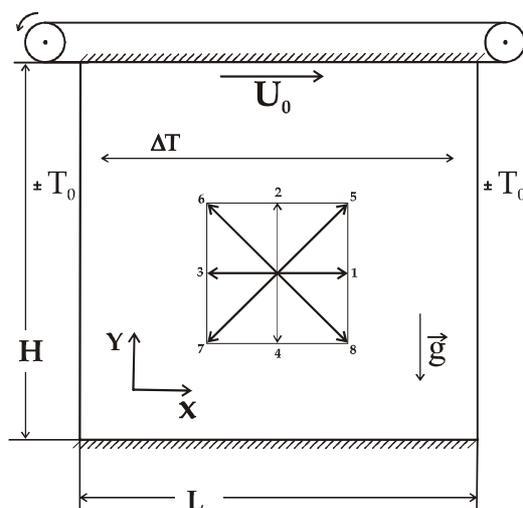


Figure 4. : Configuration géométrique.

L'écoulement est représenté par des lignes de courant et des isothermes, et l'analyse de l'influence des paramètres de l'écoulement (*i.e.* le nombre de Reynolds Re et le nombre de Rayleigh Ra) sur le transfert de chaleur est analysée. La caractéristique de l'écoulement et du transfert thermique (évalué par le nombre de Nusselt) varie avec le nombre de Reynolds et le nombre de Rayleigh suivant que les forces de flottabilité et de convection forcée sont coopérantes ou opposées.

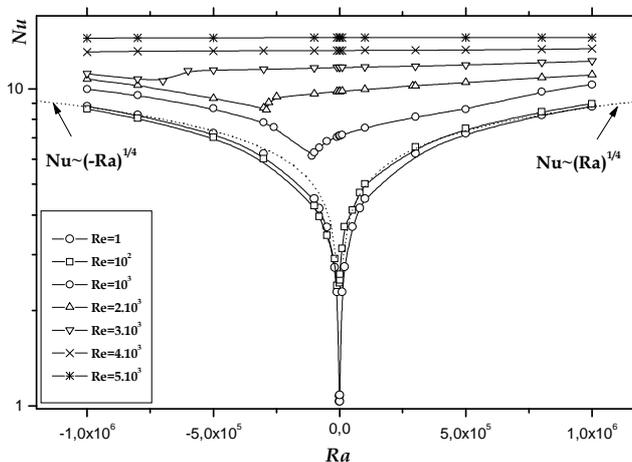


Figure 5 : Evolution du nombre de Nusselt moyen (en fonction du nombre de Rayleigh.
(Cas coopérants et opposés)

La figure 5 nous donne un exemple de résultat relatif à la la synthèse de l'évolution du nombre de Nusselt en fonction de ces deux paramètres (Re , Ra) dans les deux situations de forces coopérantes ou opposées.

Nous remarquons que pour un nombre de Reynolds élevé (Convection forcée dominante), le nombre de Rayleigh influence peu les transferts thermiques et les résultats confirment même l'analyse aux ordres de grandeur $Nu \sim Re^{1/2}$. L'autre situation (*i.e.* convection naturelle dominante) obtenue pour les faibles nombres de Reynolds, le nombre de Nusselt a un même ordre de grandeur que $Nu \sim Ra^{1/4}$ après installation du régime convectif.

A noter que l'obtention de la symétrie évidente, lorsque le nombre de Reynolds est réduit, entre les cas où les forces de convection naturelle et la convection forcée coopèrent avec le cas où elles sont opposées ($Ra < 0$ et $Ra > 0$). Cette symétrie a tendance à disparaître pour des valeurs importantes du nombre de Reynolds indiquant une valeur critique du nombre de Rayleigh pour laquelle le nombre de Nusselt est minimum.

Un exemple de résultats relatif à l'introduction d'un obstacle cylindrique à l'intérieur de la cavité rectangulaire pour des nombres de Rayleigh et de Reynolds respectivement de (Figure 6, $Ra=10^{+4}$, $Re=10^{+2}$). Cette situation est une situation de convection mixte où on voit bien l'apparition de la grande cellule de convection naturelle accélérée par le mouvement de la plaque supérieure. L'augmentation du diamètre de l'obstacle perturbe l'écoulement, et de ce fait, les isothermes qui se retrouvent inclinées.

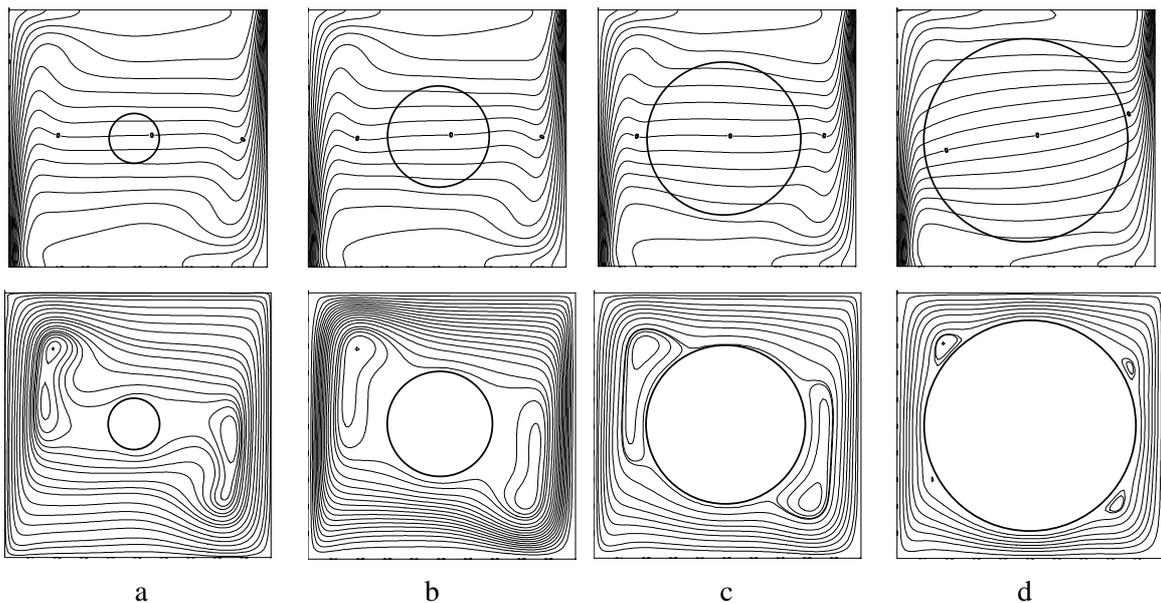


Figure 6. Champs des isothermes (en haut) et des lignes de courant (en bas) pour le cas de force mécanique et de flottabilité Co-opérantes, $Ra=10^{+4}$, $Re=10^{+2}$.
a) $\varnothing=0.2$, b) $\varnothing=0.4$, c) $\varnothing=0.6$, d) $\varnothing=0.8$

Conclusion et perspectives :

Nous avons utilisé la méthode de Lattice Boltzmann pour la simulation des écoulements autour d'obstacles à l'écoulement de la convection mixte dans une cavité carrée engendrée par la combinaison de la convection naturelle induite par un gradient de température pariétal et la convection mécanique dû au déplacement de paroi supérieure.

D'autres résultats ont été obtenus et ont fait l'objet de plusieurs publications et communications. Les perspectives sont innombrables que ce soit dans le côté fondamentale de la méthode de lattice Boltzmann ou dans notre cas la simulation des milieux poreux. La prochaine étape sera celle de la simulation d'un empilement de billes afin de comparer les résultats avec ceux des méthodes de prise de moyenne et ceci en situation bidimensionnelle ou tridimensionnelle.

Références

- Ameziani D.E., Bouhadek K., Bennacer R., Azzi A., Effect of the days scrolling on the natural convection in an open ended storage silo. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol.48, pp. 2255-2263, 2009.
- Ameziani D.E., Bouhadek K., Bennacer R., Rahli O., Analysis of the chimney natural convection in a vertical porous cylinder. *Numerical Heat transfer. Part A*. Vol. 54, pp. 47-66. 2008.
- Ameziani D.E., Guo Y., Bennacer R., El Ganaoui M., Bouzidi M., Competition between lid driven and natural convection in square cavity: lattice boltzmann method. *Computational Thermal Sciences*. Soumis&Accepté, 2010.
- Bade F., Haldenwag P., High order scheme for thermally driven flows in an open channel. *Computer & Fluids*, Vol. 27, pp. 273-290, 1998.
- Bar-Cohen, A. and Rosenhow, W. M., Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates. *J. Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 116-123, 1984.
- Ben Nasrallah S., Amara T., Du Peuty M. A. , Convection naturelle instationnaire dans un cylindre rempli de grains ouvert à ses extrémités et dont la paroi est chauffée par un flux de chaleur constant : validité de l'hypothèse de l'équilibre thermique local. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 40, pp. 1155-1168, 1997.
- Bianco N., Manca O. and Morrone B., Naso V., Experimental analysis of chimney effect for vertical isoflux symmetrically heated parallel plates. *Eurotherm 58 Thermal Management of electronic systems III*, Elsevier edts., pp. 73-79, 1997.
- Bodoia J.R., Osterle J.F., The development of free convection between heated vertical plates. *J. Heat Transfer*, Vol. 84, pp. 40-44, 1962.
- Bradean R., Ingham D. B., Heggs P.J., and Pop I. Free convection fluid flow due to a periodically heated and cooled vertical plate embedded in a porous media. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1995; Vol.39, pp.2545-2557.
- Bradean R., Ingham D. B., Heggs P.J., and Pop I. Unsteady free convection adjacent to an impulsively heated horizontal circular in porous media. *Numer. Heat Transfer* 1997; A32, pp. 325-346.
- Da Silva Miranda B.M; Anand N. K., Convective heat transfer in a channel with porous baffles. *Numerical Heat Transfer, A*, Vol. 46, pp. 425-452, 2004.
- Desrayaud G., Bennacer R., Caltagirone J. P., Chenier É., Joulin A., Laaroussi N., Mojtabi K., Étude numérique comparative des écoulements thermoconvectifs dans un canal vertical chauffé asymétriquement. VIIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois. 28-30 Mai, Montréal, Canada, 2007.
- Elenbaas W., Heat dissipation of parallel plates by free convection. *Physica* 9, N° 1, pp. 1-23, 1942.
- Guo Y., Bennacer R., Shen S., Ameziani D.E., Simulation of mixed convection in slender rectangular cavity with lattice Boltzmann method, *Int. J. of Num. Meth. For Fluid flow*, Soumis&Accepté, Janvier 2010.
- Hall J.D., Bejan A., Chaddock J.B.. Transient natural convection in a rectangular enclosure with one heated side wall. *Int. J. Heat Fluid Flow* 1988; Vol. 9, pp. 396-404.
- Hernandez J., Zamora B., Campo A., On the effect of Prandtl number and aspect ratio upon natural-convection flows in vertical channels, *Proceedings of the 10th Heat Transfer Conference*, Brighton, UK, 12-NM-14, pp. 483-488, 1994.
- Huang P. C.; Vafai K., Internal heat transfer augmentation in a channel using an alternate set of porous cavity-block obstacles. *Numerical Heat Transfer, A*, Vol. 25, pp. 519-539, 1994.

- Incropera F.P., Convection heat transfer in electronic equipment cooling. *J. Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1097-1111, 1988.
- Ingham, Keen, Heggs, Flows in vertical channels with asymmetric wall temperatures including situations where reverse flows occur. *J. Heat transfer*, Vol. 110, pp. 910-917, 1988.
- Kettleborough C.F., Transient laminar free convection between heated vertical plates including entrance effects. *Int. J. Heat Mass transfer*, Vol. 15, pp. 883-896, 1972.
- Khim, Kim, Fletcher, Onset of flow reversal and penetration length of natural convective flow between isothermal walls. *J. Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 776-779, 1995.
- Manca O., Morrone B., Naso V., A numerical study of natural convection between symmetrically heated vertical parallel plates, *Proceed. XII Congresso Nazionale sulla Trasmissione*, Vol. 1, UIT, pp. 379-390, 1994.
- Manca O., Musto M., Naso V., Experimental analysis of asymmetrical isoflux channel-chimney systems. *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 42, pp. 837-846, 2003.
- Marcondes F., Maliska C.R., Treatment of the inlet boundary conditions in natural-convection flows in open-ended channels. *Num. Heat Transfer, B*, Vol. 35, pp. 317-345, 1999.
- Morrone B., Campo A., Manca O., Optimum plate separation in vertical parallel-plate channels for natural convection flows: incorporation of large spaces at the channel extremes. *Int. J. Heat Mass transfer*, Vol. 40, pp. 993-1000, 1997.
- Nakamura H., Asako, Y., Naitou, T., Heat transfer by free convection between two parallel flat plates. *Numer. Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 95-106, 1982.
- Nicolau B. Santos ; Marcelo J. S. de Lemos, Flow and Heat Transfer in a Parallel-Plate Channel with Porous and Solid Baffles. *Numerical Heat Transfer, A*, Vol. 49, pp. 471-494, 2006.
- Olsson C.O., Prediction of Nusselt number and flow rate of buoyancy driven flow between vertical parallel plates. *J. Heat Transfer*, Vol. 126, pp. 97-104, 2004.
- Patterson J.C., Imberger J., Unsteady natural convection in a rectangular cavity. *Int. J. Fluid Mech*, 1980; Vol. 100: pp. 65-86.
- Ramanathan S., Kumar R., Correlations for natural convection between heated vertical plates. *J. Heat Transfer*. Vol. 113, pp. 97-107, 1991.
- E. Semma, M. El Ganaoui, R. Bennacer, On Some Oscillatory Behaviours During Horizontal Bridgman Process, *Advances In Space Research*, (en revision)
- Shahin G.A., Floryan J.M., Heat transfer enhancement generated by the chimney effect in systems of vertical channels. *J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 230-232, 1999.
- Sözen M. and Vafai K., Analysis of oscillating compressible flow through a packed bed. *Int. J. Heat Fluid Flow* 1991; Vol. 12, pp. 130-136.
- Straatman A.G., Tarasuk J.D., Floryan J.M., Heat transfer enhancement from a vertical, isothermal channel generated by the chimney effect. *J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 395-402, 1993.
- Sparrow E.M., Chrysler, G.M., Azevedo, L.F., Observed flow reversals and measured-predicted Nusselt numbers for natural convection in a one-sided heated vertical channel. *J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 325-332, 1984.
- Webb B.W., Hill D.P., High Rayleigh number laminar natural convection in an asymmetrically heated vertical channel. *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 649-656, 1989.
- Win Aung, Worku, Developing flow and flow reversal in a vertical channel with asymmetric wall temperatures. *J. Heat transfer*, Vol. 108, pp. 229-304, 1986.
- Wirtz R.A., Stutzman R.J., Experiments on free convection between vertical plates with symmetric heating. *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 501-507, 1982.

Zhongyu G., Anand N. K., Three-dimensional heat transfer in a channel with a baffle in the entrance region. *Numerical Heat Transfer, A*, Vol. 31, pp. 21-35, 1997.