

Amélioration des transferts thermiques dans une cavité ouverte par utilisation des nanofluides

Zouhaier MEHREZ^{1,2}, Mourad BOUTERRA², Afif El CAFSI², Ali BELGHITH²

¹ISSATG, Rue Omar Ibn Khattab, 6072 Zrig, Gabes, Université de Gabes, TUNISIE

²LETTM, Faculté des Sciences de Tunis, El Manar 2092, Université d'el Manar, TUNISIE

Email des auteurs : zouhaier.mehrez@yahoo.fr

Résumé : Ce travail a pour objectif l'étude numérique de la convection mixte en écoulement des nanofluides dans un canal contenant une cavité ouverte. Les parois verticales de la cavité sont adiabatiques, ainsi la paroi horizontale (fond de la cavité) est maintenue à une température constante. Le nombre de Reynolds est varié entre 100 et 500 et celui de Richardson entre 0.05 et 1. Cette étude est établie pour deux rapports de formes différentes de la cavité. Les résultats montrent que l'addition des particules nanométriques au fluide de base améliore le transfert de chaleur et modifie l'intensité de l'écoulement dans la cavité. Ces effets observés dépendent des valeurs des nombres de Reynolds et de Richardson, de rapport de forme de la cavité et de la fraction volumique et de type de nanoparticules.

Mots clés : Simulation numérique, cavité ouverte, convection mixte, nanofluides.

1. Introduction

Dans plusieurs applications industrielles, l'amélioration des transferts thermiques est un facteur déterminant de leur efficacité. Dans ce cadre, la miniaturisation des appareillages (MEMS) n'est efficace que par la présence d'un système de refroidissement fiable permettant le transfert des grandes quantités de chaleur dissipées. Des études ont été réalisées, à l'exemple du projet de recherche REMONA [1], visant le développement d'un liquide de refroidissement plus performant permettant une diminution de la consommation énergétique des véhicules, ce qui réduit les émissions des gaz à effet de serre.

L'importance des thèmes posés a orienté les efforts des chercheurs à développer des procédés permettant l'augmentation des échanges thermiques. La meilleure solution trouvée est les nanofluides, qui sont des solutions colloïdales formées par des nanoparticules métalliques ou oxydes-métalliques en suspension dans un liquide de base telle que l'eau pure, l'Éthylène- Glycol, les huiles... La présence des nanoparticules dans des fluides de base change leurs propriétés thermodynamiques ce qui augmente leurs conductivités thermiques (voir Choi et al. [2] et Eastman et al. [3]) et les rend plus performants en termes des transferts de chaleur. En plus, des études montrent que, l'effet Brownien, dû à la présence des particules de tailles nanométriques dans un liquide, contribue à la diminution de l'érosion dans les conduites et les pompes, suite à l'affaiblissement de phénomène de sédimentation rencontré avec d'autres particules des tailles plus grandes.

Dans la dernière décennie, le nombre des publications sur le thème d'écoulements des nanofluides est augmenté d'une façon appréciable. Dans le cadre de la convection naturelle, plusieurs auteurs ont investi sur l'amélioration de ce type de transfert thermique dans des cavités fermées (Aminossadati & Ghasemi [4] par exemple), Pour la même géométrie, Mansour et al. [5] ont étudié la convection mixte dans les nanofluides. D'autres travaux publiés traitent le thème de la convection forcée dans des écoulements des nanofluides (Abu-Nada et al. [6]).

La convection mixte en cavité ouverte est importante à cause de sa présence dans plusieurs applications industrielles, à l'exemple des collecteurs solaires, circuits électroniques, échangeurs thermiques, réacteurs nucléaires, croissance cristalline, systèmes des énergies géothermiques, systèmes d'échauffement et de refroidissement... C'est pour cette raison que l'écoulement en cavité ouverte continue à attirer l'attention de plusieurs chercheurs, dont le but d'approfondir leurs connaissances sur ce domaine afin d'améliorer les échanges thermiques dans les applications industrielles cités. Dans ce contexte, parmi les travaux les plus récents, Rahman et al. [7] ont étudié l'effet de la position d'une source de chaleur, placée sur les parois d'une cavité ouverte, sur la structure dynamique et la convection mixte. Ajoutons dans [8], Rahman et al. ont étudié l'effet d'un champ magnétique externe sur la convection mixte et le transfert couplé de chaleur et de masse, dans une cavité ouverte chauffée par le bas.

L'absence des travaux, jusqu'à maintenant, traitant le thème de la convection mixte dans les nanofluides en cavité ouverte, nous a motivé d'aborder ce sujet important. Dans ce travail, dans un premier temps, l'effet de la fraction volumique des nanoparticules, des nombres de Reynolds et de Richardson ainsi que le rapport de forme de la cavité, chauffée par le bas avec une température uniforme, a été étudié pour le nanofluide Cu-eau.

Dans un deuxième temps d'autres types des nanofluides (Al_2O_3 -eau, CuO -eau, TiO_2 -eau) ont été introduits pour la comparaison.

2. Modèle physique

On s'intéresse à la simulation bidimensionnelle de la convection mixte d'un écoulement des nanofluides. La figure 1 présente la configuration géométrique et les conditions aux limites utilisées dans le présent travail. Le domaine de calcul est de rapport de forme 3.5. La cavité est de hauteur H et de largeur L . Deux valeurs du rapport de forme de la cavité L/H sont utilisées : 1 et 2. Le nombre de Reynolds est varié entre 100 et 500 et celui de Richardson entre 0.05 et 1. La fraction volumique ϕ des nanoparticules dans le fluide de base, qui est l'eau pure, est variée entre 0 et 0.05. Le nombre de Prandtl est fixé à 6.2. Le maillage et le pas du temps sont fixés, après avoir testés et validés, respectivement à 100×100 et 10^{-3} . A l'entrée, le profil de la vitesse est parabolique. A la sortie, les conditions aux limites de type advectif sont imposées sur la température et la vitesse. Le long des parois solides la condition d'adhérence est appliquée. Le fluide d'entrée est maintenu froid à basse température. Le fond chaud de la cavité est à haute température uniforme. Le reste des parois solides sont supposés adiabatiques.

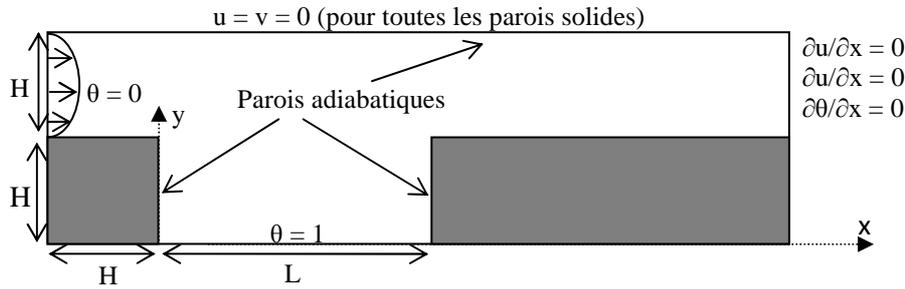


Figure 1 : Configuration géométrique et conditions aux limites

2. Formulation mathématique

L'eau pure et les nanofluides sont supposés obéir à l'approximation de Boussinesq. Les équations adimensionnelles de continuité (1), de quantité de mouvement (2) et (3) et de l'énergie (4) en coordonnées cartésiennes sont donnés par :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{\nu_f}{\nu_{nf}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \frac{\nu_f}{\nu_{nf}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{\beta_{nf}}{\beta_f} Ri \theta \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

Avec $Re = U_0 L / \nu_f$, $Pr = \nu_f / \alpha_f$, $Ri = g \beta_f H (T_c - T_f) / U_0^2$ sont respectivement le nombre de Reynolds, le nombre de Prandtl et le nombre de Grashof. Les variables adimensionnelles sont définies par :

$X = x/H$, $Y = y/H$, $\tau = U_0 t/H$, $\theta = (T - T_f) / (T_c - T_f)$, $U = u/U_0$, $V = v/U_0$, $P = p/\rho_f U_0^2$.

La masse volumique effective et la diffusivité thermique de nanofluide sont données par :

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_f \quad (5)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (6)$$

La capacité thermique et le coefficient d'expansion thermique de nanofluide sont donnés par :

$$(\rho c_p)_{nf} = \phi (\rho c_p)_s + (1 - \phi) (\rho c_p)_f \quad (7)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = \phi (\rho \beta)_s + (1 - \phi) (\rho \beta)_f \quad (8)$$

La viscosité de nanofluide est estimée par le modèle de Brinkman [9], elle est donnée par :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (9)$$

La conductivité thermique effective de nanofluide est estimée par le modèle de Maxwell [10], elle est donnée par :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} \quad (10)$$

Le nombre de Nusselt local, est donné par :

$$Nu = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (11)$$

Le nombre de Nusselt moyenne est obtenu en intégrant Nu local sur la paroi chaude, est exprimé par :

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dx \quad (12)$$

3. Méthode numérique

Les équations de conservation de la quantité de mouvement et d'énergie sont discrétisées suivant la méthode de volumes finis à maillage décalé. Chaque inconnue est définie sur une grille qui lui est propre. Les termes non linéaires ont été approchés par un schéma Quick (Quadratic Upstream Interpolation for Convection Kinematic). Le traitement des équations de mouvement associées à la condition d'incompressibilité est effectué par la méthode de projection. La méthode aux directions alternées (ADI) est utilisée pour résoudre la partie prédiction. La partie projection est résolue par une procédure multigrille linéaire. Le schéma temporel adopté est de type différences finies d'ordre deux Adams-Bashford, consiste traiter explicitement les termes non-linéaires (termes convectifs) et implicitement les termes diffusifs.

4. Résultats et discussions

Pour avoir une idée sur le champ de l'écoulement, la figure 2 représente les lignes du courant et le champ de la température pour $\varphi = 0$ (sans nanoparticules) et $\varphi = 0.05$. Les nanoparticules utilisées sont celles de cuivre métallique (Cu). Les lignes du courant (figure 2.a) montrent, dans les deux cas ($L/H = 1$ et 2), que l'écoulement dans la cavité est gouverné par une recirculation qui devient moins intense par la présence des nanoparticules. Dans le cas de $L/H = 2$, le centre de recirculation change de position en décalant vers le mur de gauche. Ces modifications sont dues à l'amplification des forces d'inertie par l'ajout des nanoparticules. La différence entre les champs de température n'est pas bien claire avec $L/H = 1$, mais pour le rapport 2 on peut observer l'épaississement de zones des basses températures dans la cavité. Le refroidissement de la cavité par le fluide issu de l'entrée, devient alors plus efficace par utilisation de nanofluide.

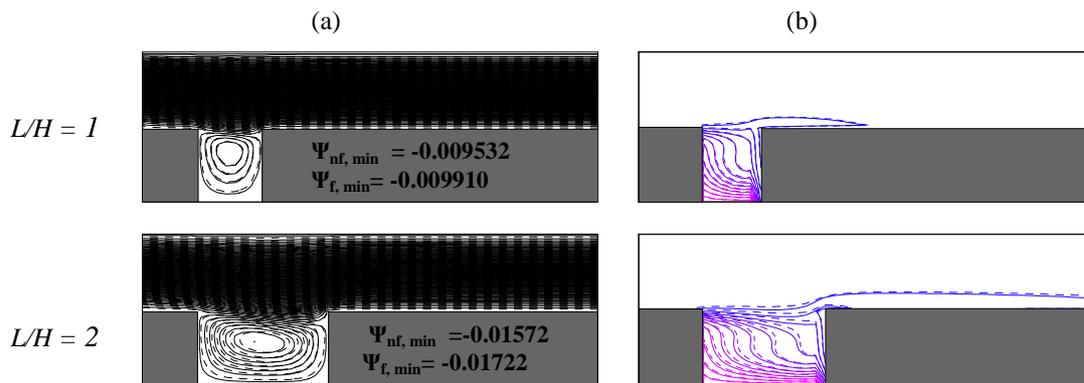


Figure 2 : (a) Lignes de courant (- - - - $\varphi = 0$, — $\varphi = 0.05$), (b) Champ de la température.
Nanofluide Cu-eau $Ri = 0.05$ et $Re = 100$.

Les variations du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique φ des nanoparticules, sont représentées sur la figure 3 pour différentes valeurs du nombre de Reynolds. Pour tous les Re , en augmentant la valeur de φ , le nombre de Nusselt moyen augmente d'une façon linéaire. Ce phénomène est dû essentiellement

aux modifications du champ de l'écoulement suite à la diminution de la vitesse de fluide dans la cavité à cause de l'augmentation de son viscosité. Il est à noter aussi, en fixant ϕ , Nu_m augmente avec Re . Ce résultat se traduit, pour Ri fixe, par l'amélioration du mode de transfert forcée en augmentant la valeur de Re . Le taux d'augmentation de Nu_m décroît avec Re . Par comparaison de deux cas représentés, on peut conclure que Nu_m , pour toutes les valeurs de Re et ϕ diminue avec le rapport de forme de la cavité.

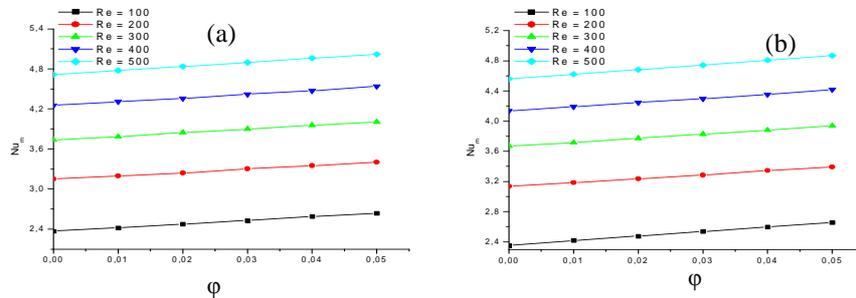


Figure 3: Variations de Nu_m en fonction de ϕ pour différents Re . (a) : $L/H=1$, (b) : $L/H=2$. $Ri = 0.05$. Nanofluide Cu-eau

La figure 4 donne les variations du nombre de Nusselt moyen en fonction de ϕ pour différentes valeurs du nombre de Richardson. Pour toutes les valeurs présentées de Ri , Nu_m augmente d'une façon linéaire avec ϕ . Cette amélioration du transfert thermique observée, peut être accentuée par augmentation du nombre de Richardson, tout en fixant Re , c.à.d en favorisant la convection naturelle. Pour ϕ constante, les variations de Nu_m en fonction de Ri est plus rapide par comparaison avec ceux en fonction de Re (voir figure 3). Comme pour l'eau pure, l'écoulement de nanofluide Cu-eau devient plus intense en augmentant Ri ce qui améliore davantage le transfert de chaleur. En conclusion, l'effet de la convection naturelle est plus notable dans la cavité en écoulement de nanofluide que celui de la convection forcée.

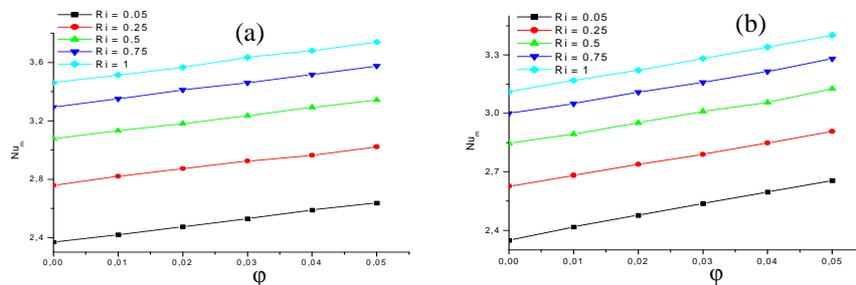


Figure 4: Variations de Nu_m en fonction de ϕ pour différents Ri . (a) : $L/H=1$, (b) : $L/H=2$. $Re= 100$. NanofluideCu-eau

La comparaison entre différents nanofluides est illustrée à la figure 5 qui représente les profils du nombre de Nusselt local, le long de la paroi horizontale chaude de la cavité. Les profils sont similaires pour tous les types de nanofluides. Le transfert de chaleur, de faible valeur au coin gauche de la cavité, augmente rapidement jusqu'à atteindre un maximum pour une abscisse évaluée de trois-quarts de la largeur de la cavité, puis diminue légèrement. Pour le quatre cas considérés, les meilleures nanoparticules en termes d'amélioration du transfert thermique sont celles de Cu qui possède une meilleure conductivité thermique. La comparaison entre Al_2O_3 et CuO montre qu'on ne peut pas confirmer définitivement que l'augmentation de transfert thermique est liée uniquement à la conductivité thermique de nanoparticules. En effet, malgré la valeur plus élevée de la conductivité de Al_2O_3 en comparaison avec celle de CuO, le transfert thermique, dans la deuxième partie de la cavité, est plus important avec les nanoparticules CuO.

4. Conclusion

L'étude de l'écoulement en convection mixte des nanofluides, nous a montré l'efficacité de l'existence des nanoparticules, dans l'eau pure, pour l'amélioration des échanges thermiques dans une cavité ouverte. Ceci a été approuvée pour toutes les valeurs de Re , Ri et L/H considérés dans ce travail. La comparaison entre les nanofluides, nous conduit à penser, d'une façon approfondie, aux facteurs et paramètres autre que la conductivité thermique des nanoparticules, qui contribuent à l'amélioration des transferts thermiques.

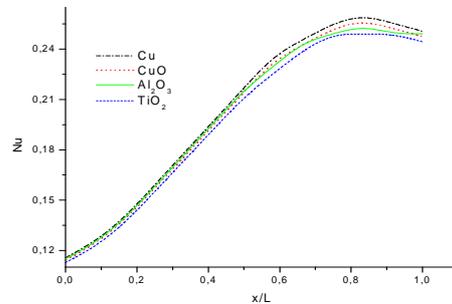


Figure 5: Profils de Nusselt local pour différents nanofluides. $Re = 100$, $Ri = 0.05$, $L/H = 1$ et $\phi = 0.05$

Nomenclature

Symbole	Nom, unité	Symboles grecs	Nom, unité
g	accélération de pesanteur, m/s^2	α	diffusivité thermique, $m^2 s^{-1}$
H	hauteur de la cavité, m	β	coefficient d'expansion thermique, K^{-1}
L	longueur de la cavité, m	ψ	fonction de courant adimensionnelle
Nu	nombre de Nusselt	ν	viscosité cinématique, m^2/s
p	pression, N/m^2	Indices	
Pr	nombre de Prandtl	c	chaud
Re	nombre de Reynolds	f	froid (avec la température), fluide
Ri	nombre de Richardson nfnanofluide	min	minimum
T	température, K		

Références

- [1] ADEME, site web: www.ademe.fr
- [2] S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles In Developments and Applications of Non-Newtonian Flows (ed. DA. Siginer et HP. Wang) (1995)99-105, New York: Am. Soc. Mech. Eng.
- [3] Eastman, J.A., Choi, S., Li, S., Yu, W., Thompson, L. Anomalous increase in thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles Applied Physics Letter 78 (2001) 718-720.
- [4] S.M. Aminossadati, B. Ghasemi, Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure, Eur. J. Mech. B-Fluid 28 (2009) 630–640.
- [5] M.A. Mansour, R.A. Mohamed, M.M. Abd-Elaziz, S.E. Ahmed, Numerical simulation of mixed convection flows in a square lid-driven cavity partially heated from below using nanofluid, Int. Commun. Heat Mass 37 (2010) 1504–1512.
- [6] E. Abu-Nada, Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step, Int. J. Heat Fluid Fl. 29 (2008) 242–249.
- [7] M.M. Rahman, Computational analysis of mixed convection in a channel with a cavity heated from different sides, Int. J. Heat Mass. 39 (2012)78–84.
- [8] M.M. Rahman, Conjugated effect of joule heating and magneto-hydrodynamic on double-diffusive mixed convection in a horizontal channel with an open cavity, Int. J. Heat Mass. 54 (2011) 3201–3213.
- [9] H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, J. Chem. Phys., 20(1952) 571–581.
- [10] J.C.A. Maxwell, Treatise on Electricity and Magnetism, 2nd Edn., Clarendon Press, Oxford, UK (1881).