

# Etude numérique de la convection naturelle du mélange Eau-Cu dans une cavité partiellement chauffée

M. El hafad BARA<sup>1</sup>, Mme. Sakina EL HAMDANI<sup>1</sup>, M. A. BENDOU<sup>1</sup>, M. Karim LIMAM<sup>2</sup>

1. Laboratoire de Mécanique, Procédés de l'Energie et de l'Environnement (LMP2E) Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir  
 2. LASIE, Université de La Rochelle, Av. Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France  
 elhafad.bara@edu.uiz.ac.ma

## Résumé

Dans ce travail, on a mené une étude numérique de la convection naturelle de nanofluides dans une cavité fermée. Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finis en utilisant le schéma en loi de puissance. La viscosité dynamique et la conductivité thermique effective du nanofluide sont approximées respectivement par le modèle de Brinkman et le modèle de Maxwell-Garnetts. Les simulations numériques sont effectuées dans le cas de l'eau pure d'une part et d'un mélange d'eau et de nanoparticules (Cu) d'autre part pour un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^5$ , une fraction volumique de nanoparticules comprise entre 0 et 0,1 et un angle d'inclinaison variant de  $0^\circ$  à  $80^\circ$ . Les résultats obtenus montrent que le transfert de chaleur s'améliore en augmentant la fraction volumique des nanoparticules et le nombre de Rayleigh.

**Mots clés:** Nanofluides, Transfert de chaleur, Convection naturelle, étude numérique, volumes finis.

## 1. Introduction

Le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité tire son importance de son application dans divers processus industriels. Des études menées récemment ont montré que, dans certaines conditions, l'ajout de particules nanométriques dans un fluide de base (appelé nanofluide) pouvait augmenter le transfert de la chaleur, par rapport au cas du corps pur (eau), en modifiant de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur. Plusieurs études ont été réalisées dernièrement sur la convection naturelle des nonofluides dans une cavité fermée, par exemple, M. H. Esfe et al.[1] ont étudié numériquement la convection naturelle dans une cavité carrée avec un obstacle rectangulaire, la cavité est chauffée et remplie de nanofluide  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau, et ils ont observé que l'augmentation du nombre de Nusselt moyen pour toutes les valeurs prises par la fraction volumique avec une diminution du nombre de Richardson, ainsi que la variation irrégulière de nombre moyen de Nusselt à différents valeurs du nombre Richardson par rapport à la variation des angles d'inclinaison dans tous les cas.

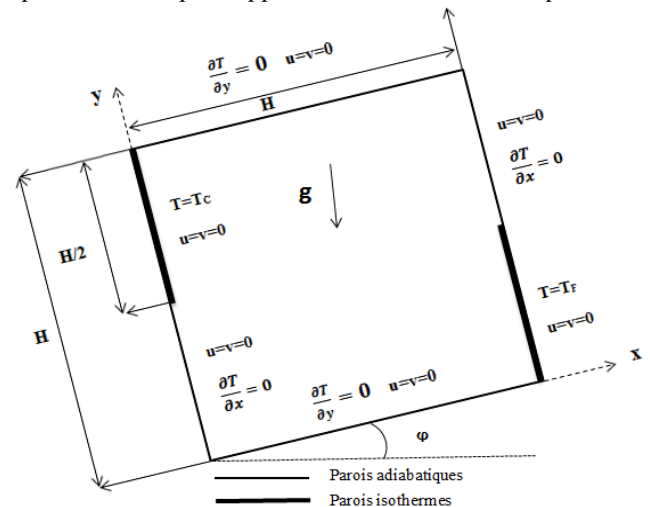
Hossein et al. [2] ont étudié la convection naturelle des nanofluides dans une enceinte carrée inclinée partiellement chauffées, ils ont trouvé que :

- Le type de nanofluide est un facteur clé pour l'amélioration du transfert de chaleur
- Le nombre de Nusselt est une fonction croissante de chacune de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Rayleigh.

Khanafar et al. [3] ont étudié numériquement la convection naturelle d'un nanofluide confiné dans une enceinte différentiellement chauffée, les résultats obtenus ont montré que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. Dans le présent travail, nous étudions numériquement la convection naturelle laminaire stationnaire du mélange eau-Cu dans une cavité.

## 2. Formulation du problème et méthode de résolution

La géométrie du problème considéré est représentée sur la figure 1. Le fluide de base utilisé est newtonien, l'écoulement est bidimensionnel, laminaire et stationnaire. La dissipation visqueuse est négligeable, les propriétés thermophysiques du nanofluide sont constantes, sauf pour la variation de la masse volumique, qui est estimée par l'approximation de Boussinesq.



**Figure.1 :** Schéma de la configuration étudiée et les conditions aux limites

Les équations gouvernantes pour un régime laminaire et stationnaire dans le cas de la convection naturelle d'un nanofluide, sous forme adimensionnelle s'écrivent sous la forme suivante :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra_f Pr_f \sin(\varphi)\theta$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra_f Pr_f \cos(\varphi)\theta$$

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

### 3. Solution numérique

Le système d'équations donné ci-dessous, associé aux conditions aux limites, est résolu numériquement en utilisant la méthode des volumes finis, tout en adoptant le schéma en loi de puissance comme schéma de résolution. La vitesse et la pression sont couplées par l'algorithme SIMPLE. La méthode de balayage ligne par ligne, avec l'algorithme de Thomas est utilisée pour la résolution itérative du système d'équations.

### 4. Résultats et discussions

Les résultats, présentés dans ce travail, sont obtenus pour l'eau comme fluide pure  $Pr=6,2$ , le mélange eau-Cu tout en variant le nombre de Rayleigh ( $Ra$ ) de  $10^3$  à  $10^5$ , la fraction volumique en nanoparticules ( $\phi$ ) de 0 à 0,1 et l'angle d'inclinaison ( $\varphi$ ) de  $0^\circ$  à  $80^\circ$ .

$$\text{Avec } Ra = \frac{g\beta_f H^3 (T_h - T_c)}{v_f \alpha_f}$$

La figure 2 illustre l'influence du nombre de Rayleigh sur les champs dynamique et thermique pour le mélange eau-Cu dans le cas de  $\phi = 0.1$ ,  $\varphi = 0^\circ$  et  $Pr = 6.2$ . Une cellule singulière est formée à faible nombre de Rayleigh et la forme de la cellule principale est circulaire figure 5 (a). Comme on le voit sur la Figure 5 (b-c), la forme de la cellule tend à devenir elliptique pour  $Ra = 10^4$ , et finalement, la forme de la cellule a tendance à se décomposer en deux tourbillons pour  $Ra = 10^5$ . En outre, on peut aussi constater que, à nombre élevé de Rayleigh,

les isothermes au centre de la cavité sont horizontales, et les isothermes verticales deviennent seulement à l'intérieur des couches limites thermiques aux parois verticales. Cela est dû au passage du mode conductif (faible nombre de Rayleigh) au mode convectif (grand nombre de Rayleigh).

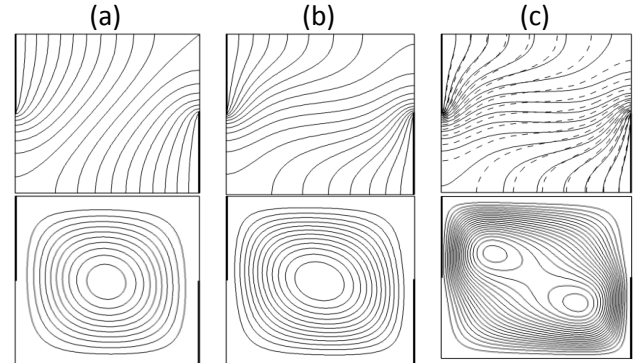
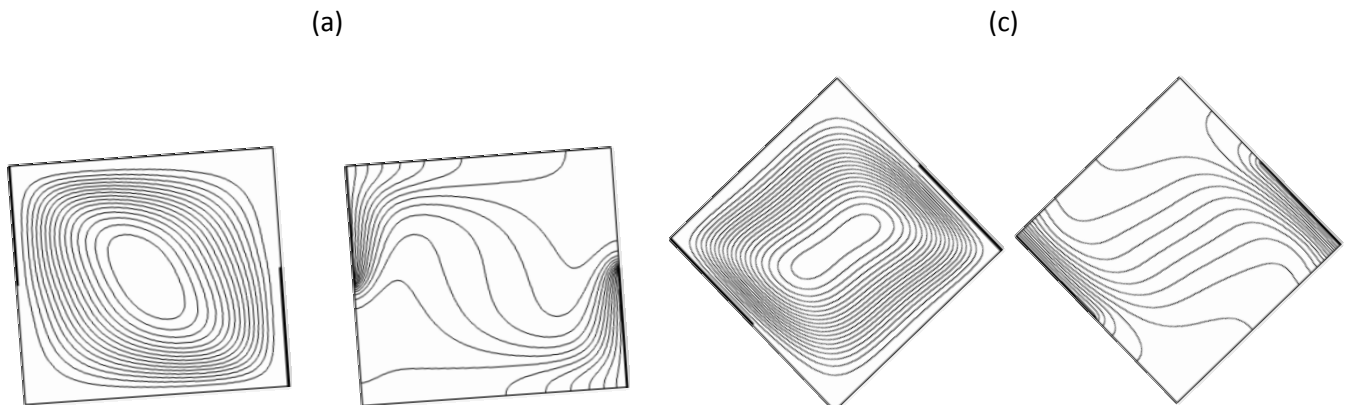
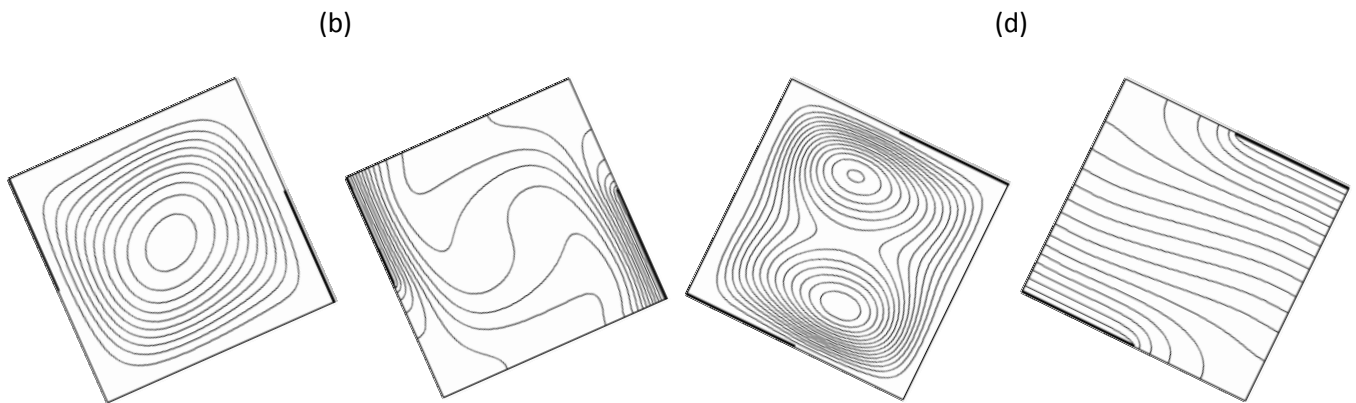


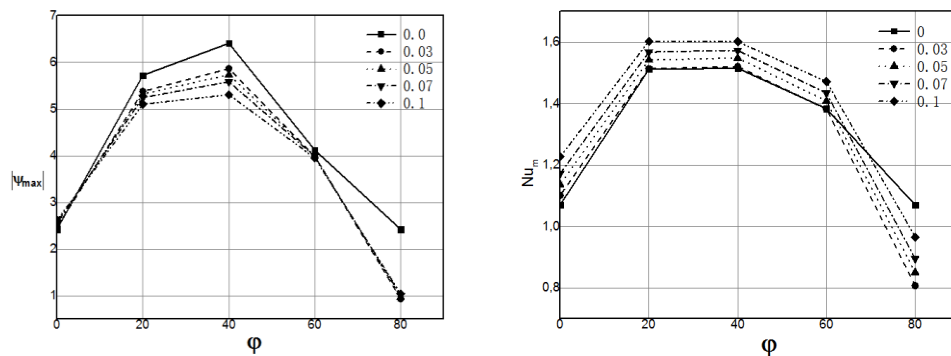
Figure 2: Lignes de courant (en bas) et isothermes (en haut) pour (a)  $Ra = 10^3$ , (b)  $Ra = 10^4$  et (c)  $Ra = 10^5$  dans le cas de  $\phi = 0.1$ ,  $\varphi = 0^\circ$  et  $Pr = 6.2$  (Cu-Water)

La figure 3 présente les lignes de courants et les isothermes pour différentes valeurs de l'angle d'inclinaison ( $\varphi$ ), l'effet de l'angle de l'inclinaison ( $\varphi$ ) et de de la fraction volumique ( $\phi$ ) sur (a)  $|\psi_{max}|$  et (b)  $Nu_m$  est illustré dans la figure 4, l'angle d'inclinaison de la cavité est proposé en tant que paramètre de commande pour l'écoulement du fluide et pour le transfert de la chaleur. On observe que la forme de la cellule principale est sensible à l'angle de l'inclinaison. Les lignes de courants passent d'une forme cellulaire à une forme d'ellipsoïde circulaire avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison. On remarque aussi que la valeur maximale du nombre de Nusselt se produit dans le cas de  $\varphi = 40^\circ$ , en raison de l'augmentation de la vitesse d'écoulement à cet angle. Il est évident d'après la Figure 7 que l'incrément de l'angle d'inclinaison de  $0^\circ$  à  $40^\circ$  provoque le mouvement du fluide et cause la diminution de l'épaisseur de la couche limite thermique, ainsi que l'augmentation du nombre de Nusselt et  $|\psi_{max}|$ , le comportement inverse est observé lorsque l'angle d'inclinaison augmente de  $40^\circ$  à  $80^\circ$ .





**Figure 3.** Lignes de courant (à gauche) et isothermes (à droite) pour  $\phi = 0.1$ , (a)  $\varphi = 20^\circ$ , (b)  $\varphi = 40^\circ$ , (c)  $\varphi = 60^\circ$  et (d)  $\varphi = 80^\circ$  pour  $Ra = 105$  et  $Pr = 6.2$  (cas de Cu–Water).



**Figure 4.** Effets de  $\varphi$  et  $\phi$  sur (a)  $|\psi_{\max}|$ ; (b)  $Nu_m$  pour  $Ra = 10^5$  (cas de Cu–eau).

## 5. Conclusion

Dans ce travail, le problème du transfert de la chaleur par convection naturelle des nanofluides confinés dans une enceinte carrée où un gradient de température est imposé entre les deux parois verticales (partie chaude et partie froide) ; et les parois haute et basse sont adiabatiques, a été résolu numériquement. L'influence de certains paramètres, à savoir la fraction volumique de nanoparticules, l'angle d'inclinaison et le nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur a été étudiée. Cette étude nous a permis de sortir avec les conclusions suivantes :

- Le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique en nanoparticules et le nombre de Rayleigh (Nusselt moyen).
- L'augmentation de l'angle d'inclinaison de  $\varphi = 0^\circ$  à  $\varphi = 40^\circ$  conduit à l'élévation du nombre de nusselt, tandis que le mouvement inverse est observé lorsque l'angle d'inclinaison augmente à partir de  $\varphi = 40^\circ$  et  $\varphi = 80^\circ$ .

## References

- [1] M. H. Esfe, M. Akbari, A. Karimipour, M. Afrand, O. Mahian et S. Wongwises, Mixed-convection flow and heat transfer in an inclined cavity equipped to a hot obstacle using nanofluids considering temperature-dependent properties, *International Journal of Heat and Mass Transfer* volume 85, pages 656–666, 2015
- [2] M. Hosseini, M.T. Mustafa, M. Jafaryar, E. Mohammadian, Nanofluid in tilted cavity with partially heated walls, *Journal of Molecular Liquids* volume 199, pages 545–551, 2014
- [3] K. Khanafer, K. Vafai et M. Lightstone, Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a TwoDimensional Enclosure Utilizing

Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 46, Pages 3639–3653, 2003.

- [4] H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *J. Chem. Phys.*, Volume 20, Pages 571–581, 1952.
- [5] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press., U.K, 1891.