

Etude numérique de la convection mixte laminaire dans une cavité carrée remplie de nanofluides

Ithem ZEGHBID, Rachid BESSAIH*

Laboratoire d'Energétique Appliquée et de Pollution, Département de Génie Mécanique, Université Constantine 1, Route de Ain El. Bey, Constantine 25000, Algérie.

*(auteur correspondant : Bessaih.rachid@gmail.com)

Résumé –Ce présent travail concerne l'étude de la convection mixte laminaire dans une cavité carrée, avec un couvercle mobile, remplie de différents nanofluides (Cu-eau, Al₂O₃-eau, Ag-eau et TiO₂-eau) et chauffée simultanément par deux sources de chaleur à un flux de chaleur constant q'' sur les deux parois verticales. La méthode des volumes finis a été utilisée pour résoudre les équations de l'écoulement avec transfert thermique dans tout le domaine physique. Les résultats obtenus montrent que le (Cu-eau) améliore le transfert de chaleur, et que la position des sources de chaleur a une influence sur la structure de l'écoulement, le champ thermique et le nombre de Nusselt moyen.

Nomenclature

b	longueur de la source de chaleur, m	u, v	composantes horizontale et verticale de la vitesse, m.s ⁻¹
B	longueur adimensionnelle de la source de chaleur, (b/H)	U_0	vitesse, m.s ⁻¹
d	distance de la source par rapport à l'origine, m	x, y	coordonnées horizontale et verticale, m
D	distance adimensionnelle de la source par rapport à l'origine, d/H	X, Y	coordonnées horizontale et verticale adimensionnées
C_p	chaleur spécifique, JKg ⁻¹ K ⁻¹	ΔT	gradient de température ($=q''H/k_f$)
g	accélération de la pesanteur, m.s ⁻²	ϕ	fraction volumique du solide
L	largeur de la cavité, m	T	température, K
H	hauteur de la cavité, m	<i>Symboles grecs</i>	
k	conductivité thermique, W/mK	ψ	fonction de courant adimensionnée
Nu_m	nombre de Nusselt moyen le long de la source de chaleur	θ	température adimensionnée
p	pression, Pa	ν	viscosité cinématique, m ² .s ⁻¹
P	pression adimensionnée, ($=p/p_{nf} U_0^2$)	μ	viscosité dynamique, kg m ⁻¹ .s ⁻¹
Pr	nombre de Prandtl, ($=\nu_f/\alpha_f$)	ρ	masse volumique, kg.m ⁻³
q''	flux de chaleur par unité de surface, W/m ²	α	diffusivité thermique, m ² s ⁻¹
Ra	nombre de Rayleigh, ($=g \beta_f H^3 \Delta T / (\nu_f \alpha_f)$)	<i>Indices et exposants</i>	
Re	nombre de Reynolds, ($=\rho_f U_0 H / \mu_f$)	nf	:nanofluide
U, V	composantes adimensionnées horizontale et verticale de la vitesse	s	:solide
		f	:fluide

1. Introduction

Les fluides conventionnels tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène glycol sont fréquemment rencontrés dans les applications industrielles comme les systèmes de refroidissement par leur faible conductivité thermique [1]. Plusieurs recherches en matière de transfert de chaleur ont été menées au cours des précédentes décennies au développement des nouvelles techniques d'améliorations des performances de transfert par l'utilisation des additifs métalliques ou non métalliques aux fluides de base afin d'augmenter leur conductivité thermique [2]. L'utilisation des nanoparticules de haute conductivité thermique (par exemple, le cuivre, l'aluminium,

l'argent, ...etc.) permet de augmenter la conductivité thermique des fluides de base [3]. Les nano fluides ont attiré l'attention à une nouvelle génération des fluides de transfert de chaleur dans le chauffage de bâtiments, dans des échangeurs de chaleur, et dans les applications de refroidissement automobile, en raison de leur excellente performance thermique [4]. Salari et al. [5] ont présenté des résultats d'une étude numérique de la convection mixte au sein d'une cavité remplie d'un nano fluide. Les résultats montrent que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et les longueurs de la source de chaleur, alors qu'il diminue avec l'augmentation de la fraction volumique de la nanoparticule et le nombre de Reynolds. Talebi et al. [6] et Pourmahmoud et al. [7] ont montré que les nanoparticules ont une influence majeure sur l'écoulement et les champs thermiques.

L'objectif de la présente étude est d'étudier la convection mixte laminaire dans une cavité carrée avec un couvercle mobile, remplie de différents nano fluides et chauffée simultanément par deux sources de chaleur à un flux de chaleur constant. Les effets de l'emplacement des deux sources de chaleur sont considérés. En outre, l'influence des paramètres pertinents tel que le nombre de Rayleigh, le nombre de Reynolds et la fraction volumique des nano fluides sur le nombre de Nusselt moyen est étudié en détail.

2. Géométrie et modèle mathématique

La géométrie considérée est une enceinte bidimensionnelle illustrée sur la figure 1. Elle contient de deux sources de chaleur installées sur les deux parois verticales. Les autres parois sont maintenues à une température locale froide T_c . La paroi supérieure se déplace avec une vitesse uniforme U_0 . Nous supposons que l'écoulement est incompressible, Newtonien et visqueux. Les propriétés thermo physiques de l'eau et des nanofluides sont données dans le tableau 1.

En introduisant les variables adimensionnelles suivantes :

$$X=x/H \quad ; \quad Y=y/H \quad ; \quad \theta=T-T_c/\Delta T \quad ; \quad \Delta T= q'' H/k_f$$

$$U=u/U_0 \quad ; \quad V=v/U_0 \quad ; \quad P=p/\rho_{nf} U_0^2$$

$$Ra= g \beta_f H^3 \Delta T/(v_f \alpha_f) \quad ; \quad Re= \rho_f U_0 H/ \mu_f \quad ; \quad Pr= v_f/ \alpha_f$$

Les équations adimensionnées régissant l'écoulement, s'écrivent comme suit :

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

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \frac{Ra}{Re^2} \theta \quad (3)$$

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

La viscosité dynamique effective de nanofluide μ_{nf} présentée par Brinkman [8] est :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (5)$$

et la conductivité thermique de nanofluid k_{nf} est donnée par l'expression suivante [5] :

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_s)}{(k_s + 2k_f) + \phi(k_f - k_s)} \right] \quad (6)$$

Les conditions aux limites sont présentées pour notre étude sous forme adimensionnelle, comme suit :

$$A \quad X=0 \text{ et } 0 \leq Y \leq (D-0.5B) ; U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 ; A \quad X=0 \text{ et } (D-0.5B) \leq Y \leq (D+0.5B) ; U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{k_f}{k_{nf}}$$

$$A \quad X=0 \text{ et } (D+0.5B) \leq Y \leq 1 ; U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 ; A \quad X=1 \text{ et } 0 \leq Y \leq (D-0.5B) ; U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 ;$$

$$A \quad X=1 \text{ et } (D-0.5B) \leq Y \leq (D+0.5B) ; U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{k_f}{k_{nf}} ; A \quad X=1 \text{ et } (D+0.5B) \leq Y \leq 1 ; U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0$$

$$A \quad Y=0 \text{ et } 0 \leq X \leq 1, U=V=0, \theta=0 ; A \quad Y=1 \text{ et } 0 \leq X \leq 1, U=1, V=0, \theta=0.$$

3. Méthode numérique

La méthode numérique des volumes finis, développée par Patankar [9], a été employée pour discrétiser les différentes équations du modèle mathématique. Un maillage de 122×122 nœuds a été choisi pour faire les calculs nécessaires à la résolution de ces équations, puisqu'il est considéré pour avoir le meilleur compromis entre temps de calcul et précision (voir tableau 2). L'algorithme SIMPLER [9] a été utilisé pour la résolution du couplage vitesse - pression, et la performance du code numérique a été testée par comparaison avec les résultats disponibles dans la littérature [5] (voir figure 2).

Maillage	42×42	62×62	82×82	102×102	122×122	142×142
Nu_m	6.9590	6.8800	6.8410	6.8180	6.8090	6.8080
$\theta_{s,max}$	0.1880	0.1860	0.1850	0.1840	0.1840	0.1840

Tableau 2 : Effet du maillage sur les valeurs de Nu_m et $\theta_{s,max}$.

4. Résultats et discussion

4.1. Lignes de courant et isothermes

Dans le but d'étudier la convection mixte dans une cavité carrée contenant deux sources de chaleur munie d'un couvercle mobile remplie d'un nano fluide (voir fig. 3), une série de calculs a été effectuée dans lequel le nombre de Rayleigh représente un facteur clé. Nous pouvons voir un mouvement rotatif à l'intérieur de l'enceinte à travers une cellule munie d'une recirculation dans la partie supérieure de la cavité près de la paroi mobile. L'allure de l'écoulement se compose de deux cellules tournantes au sens inverse, la taille des zones de recirculation augmente. Ceci est dû à la valeur élevée du nombre de Rayleigh ($Ra=10^6$). Cette augmentation de la taille de la zone de recirculation de sens antihoraire, sert à dégager la chaleur vers l'écoulement du fluide principal. Bien que, la zone de recirculation soit une zone morte et isolée de l'écoulement du fluide principal, mais le sens antihoraire de cette zone de recirculation aide à refroidir la cavité. Nous pouvons noter que les gradients de température (Fig.3 à droite) sont assez grands au voisinage des sources actives, par contre une

stratification a été observée près des parois horizontales. Cette stratification thermique importante mène le liquide à devenir refroidisseur, qui améliore considérablement le refroidissement de la cavité.

La figure 4 présente les contours des lignes de courant et des isothermes. On constate que la présence des sources de chaleur n'a pas un effet visible sur la fonction de courant.

4.2. Effet du nanofluide

Dans le but d'examiner l'effet du nano fluide sur le taux de transfert de chaleur, des simulations ont été exécutées pour étudier l'effet de la variation du nombre de Rayleigh et du nombre de Reynolds sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour une cavité remplie de différents nano fluides (Cu-eau), (Al_2O_3 -eau), (Ag-eau) et (TiO_2), chauffée simultanément par deux sources de chaleur. On remarque lorsqu'on augmente le nombre de Rayleigh, le nombre de Nusselt moyen augmente aussi, une courbe croissante a été obtenue montre l'effet notable du nombre de Rayleigh sur le taux de transfert à l'intérieur de la cavité.

En outre, on a observé que les valeurs les plus importantes du nombre de Nusselt moyen ont été détectées dans le cas (D-D), où l'endroit des sources en bas de la cavité influe d'une manière considérable sur la variation du nombre de Nusselt moyen. Ceci est dû essentiellement au gradient de température important existant à l'intérieur de l'enceinte surtout que la localité des deux sources de chaleur est très loin par rapport à la paroi supérieure froide. Aussi, on a pu constater que l'augmentation du nombre de Nusselt moyen pour les différents emplacements des deux sources de chaleur pour un nombre de Rayleigh maximum ($Ra=10^6$), est de l'ordre de 44% pour le cas (M-M), 59% pour le cas (T-T), 65% pour (D-D), et 60% pour l'emplacement croisé (T-D). D'après ces caractéristiques données ci-dessus, on apprécie le rôle important de la localisation de la source de chaleur dans l'augmentation du taux d'enlèvement de la chaleur, ainsi le type du nano fluide additionné, car le Cu-eau est le nano fluide meilleur qui favorise de plus en plus le transfert de chaleur (fig. 5).

4.3. Effet du nombre de Rayleigh, la fraction volume du nanofluide et le nombre de Reynolds sur la vitesse verticale

La figure 6 montre les effets du nombre de Rayleigh, nombre de Reynolds et la fraction volumique du nanofluide sur la composante verticale de la vitesse. Nous pouvons voir clairement que la composante verticale de la vitesse augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, alors qu'elle diminue lorsque la concentration volumique du nano fluide (particules de cuivre) augmente ($\phi=0-0.20$), ainsi le nombre de Reynolds. Aussi, on a remarqué que la concentration volumique croissante des particules de cuivre dans le nano fluide agit positivement sur la composante verticale de la vitesse, ceci est dû essentiellement à la force de gravité du nanofluide.

4.4. Effet de la Position des sources de chaleur

La figure 7 illustre les lignes de courant et les contours de température pour différentes positions des sources de chaleur. Notre étude est basée sur quatre configurations dans lesquels plusieurs localisations des sources de chaleur ont été considérées comme suit : deux sources de chaleur placées à la mi-section de la cavité, cas (M-M), deux sources installées dans la partie supérieure de la cavité, cas (T-T), emplacement inférieur des deux éléments chauffants, cas (D-D) et le cas d'un emplacement croisé.

Dans les quatre configurations considérées, on a pu voir la génération d'une zone de recirculation à l'intérieur de la cavité toute en s'approche de la paroi supérieure active. L'intensité de l'écoulement devienne plus accentuée, ceci a été remarqué dans les deux cas (T-T) et (T-D), donc la fonction de courant devienne importante lorsque les deux sources de chaleur sont près de la paroi coulissante. Ceci est dû essentiellement au mouvement de la paroi et près de cette zone, par contre pour les deux autres emplacements, cas (M-M) et (D-D), les lignes de courant sont plus calmes. On peut conclure que l'emplacement de la source de chaleur affecte considérablement le transfert de chaleur, et que la configuration parfaite qui peut assurer un bon refroidissement de la cavité, c'est celle de l'emplacement supérieur, cas (T-T).

5. Conclusion

L'étude de la convection mixte laminaire dans une cavité carrée, avec un couvercle mobile, remplie de différents nanofluides a été faite. Les résultats obtenus montrent que lorsque le nombre de Rayleigh augmente, le nombre de Nusselt moyen devient important et la température adimensionnelle maximale diminue. En outre, l'augmentation de la concentration du nanofluide diminue la vitesse verticale. Le type du nano fluide et l'emplacement de la source de chaleur affectent considérablement la variation du nombre de Nusselt moyen et que la localisation (inférieure-inférieure) (D-D) des deux sources de chaleur donne des valeurs plus importantes du nombre de Nusselt moyen. Enfin, le cuivre est le seul nano fluide compétent qui peut majorer le taux de transfert thermique à l'intérieur de l'enceinte.

Références

- [1] S. U. S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticules, ASME 1995: *Proc. Int. Mech. Eng. Cong. and Exposition, San Francisco, USA, ASME, FED231/MD66*, (1995) 99-105,
- [2] V. Trisaksri and S. Wongwises, Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (3) (2007) 512-523.
- [3] Y.Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 125 (2003) 151-155.
- [4] S. U. S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticules, ASME 1995: *Proc. Int. Mech. Eng. Cong. and Exposition, San Francisco, USA, ASME, FED231/MD66*, (1995) 99-105.
- [5] M. Salari, M. M. Tabar, A. M. Tabar et H. A. Danesh, Mixed convection of nanofluid flows in a square lid-driven cavity heated partially from both the bottom and side walls, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 62 (2012)158-177.
- [6] F. Talebi, A. Houshang Mahmoudi, M. Shahi, Numerical study of mixed convection Flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (2010) 79-90.
- [7] N. Pourmahmoud, A. Ghafouri, I. Mirzall, Numerical study of mixed convection heat transfer in lid-driven cavity utilizing nanofluid: Effect of type and model, *Thermal Science*, (2013) 53-53.
- [8] H. C. Brinkman, The Viscosity of concentrated suspensions and solution, *J. of Chem.Phys.*, 20 (1952) 571-581.
- [9] S.V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere, Washington, DC, 1980.

	ρ (kg m ⁻³)	β (K ⁻¹)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Eau	997.1	21 x 10 ⁻⁵	0.613	4179
Silver (Ag)	10.500	1.89 x 10 ⁻⁵	429	235
Cuivre (Cu)	8933	1.67 x 10 ⁻⁵	401	385
Alumina (Al ₂ O ₃)	3970	0.85 x 10 ⁻⁵	40	3970
Titanium (TiO ₂)	4250	0.9 x 10 ⁻⁵	8.9538	686.2

Table 1 : Propriétés thermo physiques de l'eau et des nanofluides [5]

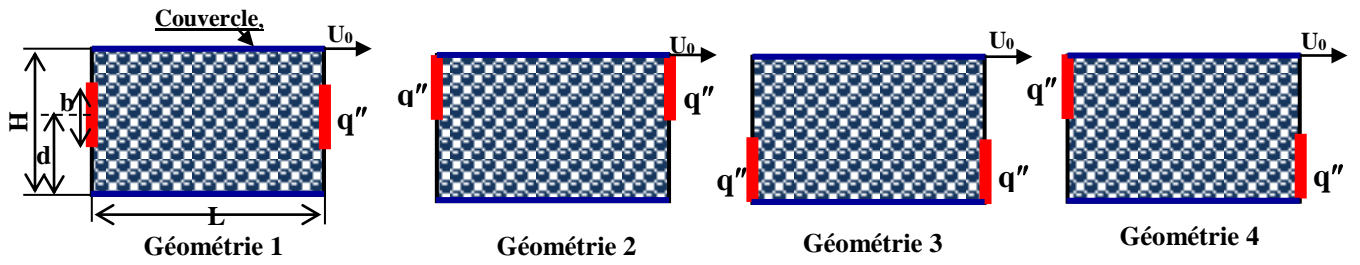


Figure 1 : Cavité carr e contenant deux sources de chaleur pour différentes positions.

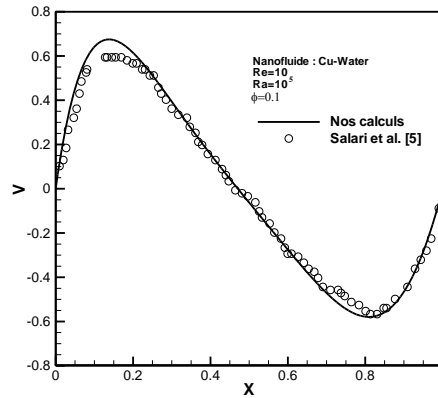


Figure 2 : Validation du code de calcul avec les données de la référence [5] de la vitesse v , pour $Ra=10^5$, $Re=10$, et $\phi=0.1$.

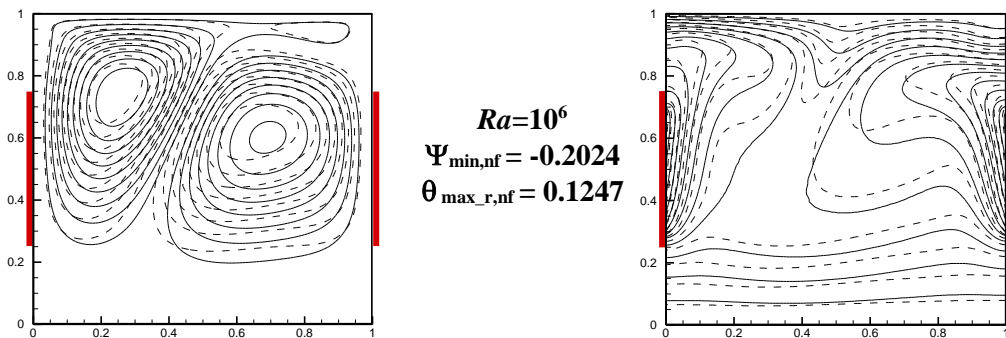


Figure 3 : Lignes de courant (  gauche) et isothermes (  droite), pour, $\phi=0.10$ (—), et l'eau pure $\phi=0$ (---) pour nano fluide (Cu-eau) et $Re=10$.

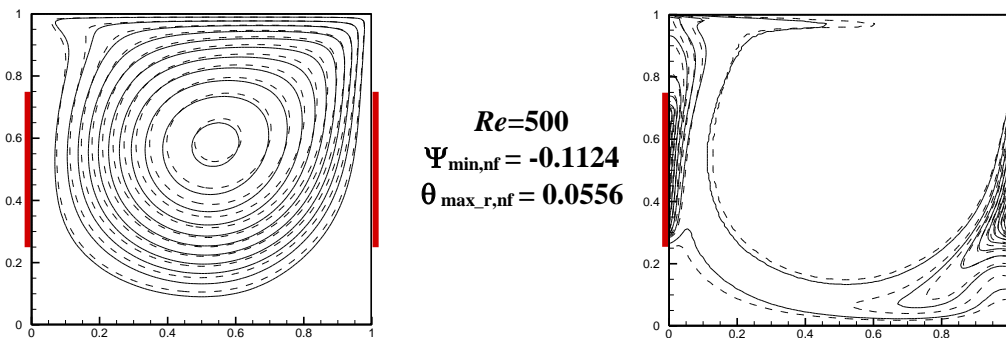


Figure 4 : Lignes de courant (  gauche) et isothermes (  droite), pour, $\phi=0.10$ (—), et l'eau pure $\phi=0$ (---) pour nano fluide (Cu-eau) et $Ra=10^5$.

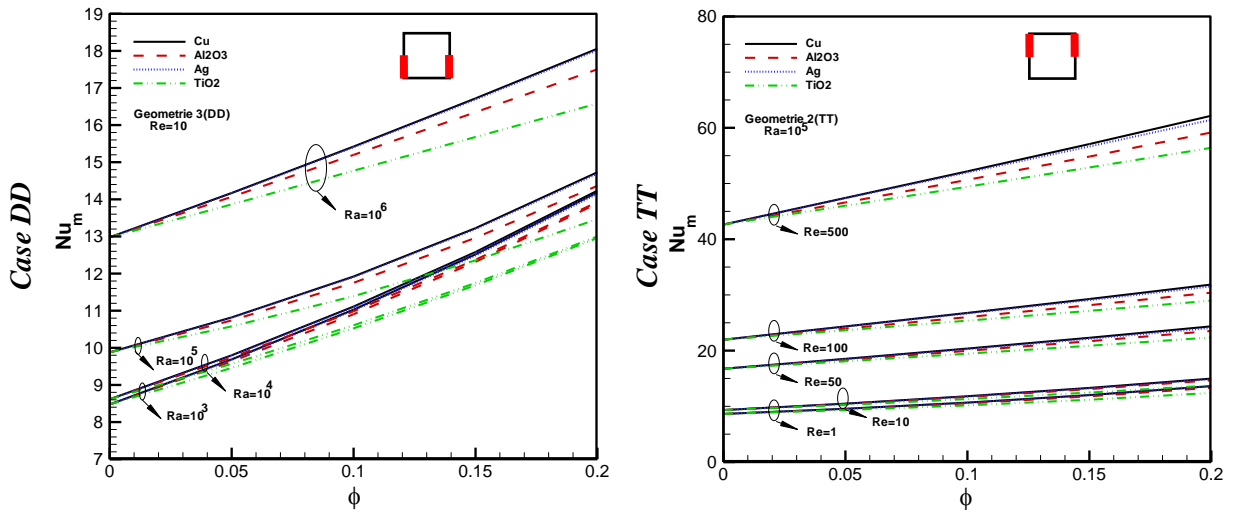


Figure 5 : Effet des nombres de Rayleigh et Reynolds sur la variation du nombre de Nusselt moyen (Effet de nanofluide).

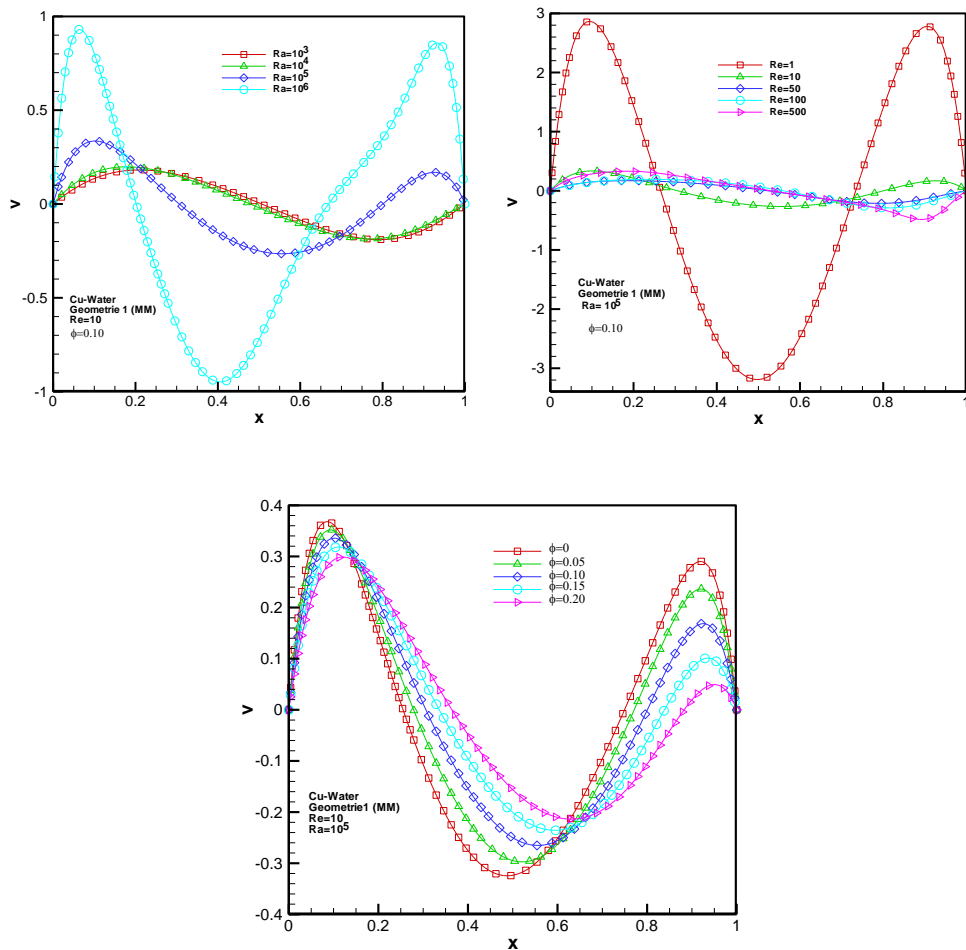


Figure 6 : Effet des nombres de Rayleigh, Reynolds et fraction volumique du nano fluide sur la vitesse verticale v dans le plan médian de la cavité (cas géométrie 1).

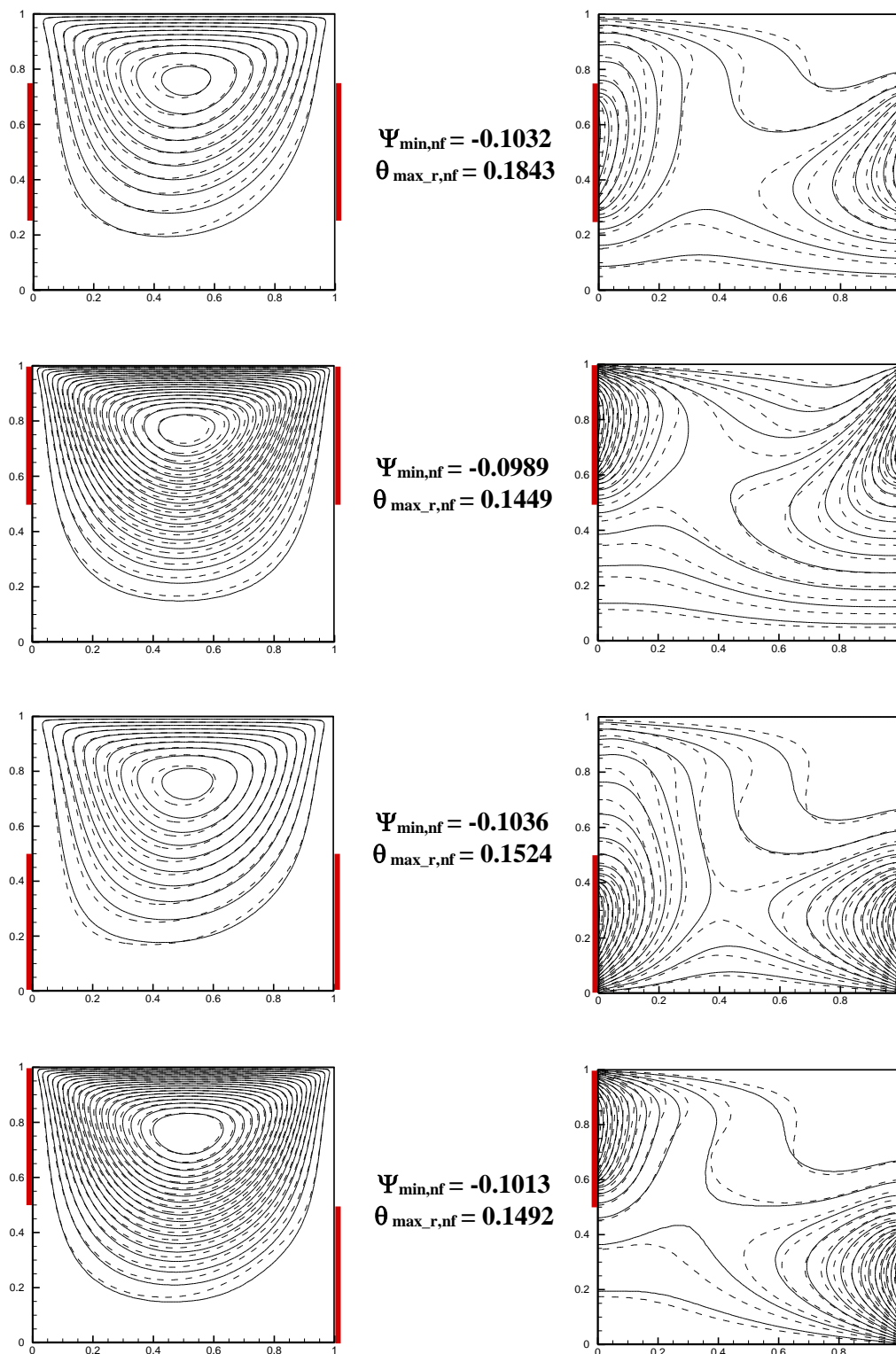


Figure 7 : Lignes de courant (à gauche) et isothermes (à droite), pour $\phi=0.10$ (—), et l'eau pure $\phi=0$ (----) pour nanofluide (Cu-eau), $Ra=10^4$ et $Re=10$, pour différentes positions de sources de chaleur. (Effet de la position des sources de chaleur).