

Etude numérique de la convection mixte lors de l'écoulement d'un nanofluide hybride (Ag-MgO/Eau) dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à l'action d'un champ magnétique

M. BENZEMA^a, Y.K. BENKAHLA^a, A. BOUDIAF^a, S. OUYAHIA^a

a. Laboratoire des Phénomènes de Transfert, FGMGP, USTHB, BP, 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie. E-mail : mehdi_benzema@yahoo.fr

Résumé :

Ce travail consiste en une caractérisation de l'écoulement laminaire et stationnaire d'un nanofluide traversant une cavité ventilée, ainsi qu'à la quantification des échanges convectifs qui s'y opèrent. La cavité en question est de forme géométrique trapézoïdale à angle droit et est, traversée par un écoulement d'un nanofluide hybride Ag-MgO / Eau (50:50 vol %) en régime laminaire et stationnaire. L'enceinte est supposée être de longueur infinie suivant la troisième direction, lui conférant ainsi un caractère bidimensionnel. De plus, la cavité est soumise à l'action d'un champ magnétique externe et uniforme. Le nanofluide est introduit dans l'enceinte travers une ouverture placée sur le coin inférieur droit de la paroi horizontale inférieure qui par ailleurs est adiabatique, tout comme la paroi verticale droite. Le fluide s'évacue alors à travers une ouverture représentant la base supérieure de la cavité. La paroi gauche que se trouve être inclinée, est quant à elle portée à une température constante et uniforme supérieure à celle du fluide à l'entrée de la cavité. Des corrélations empiriques spécifiquement développées pour le nanofluide hybride étudié (Ag-MgO / Eau) ont été utilisées pour le calcul de la viscosité dynamique du nanofluide ainsi que sa conductivité thermique. Les équations gouvernantes adimensionnelles ainsi que les conditions aux limites qui leur sont associées, sont résolues numériquement au moyen de la méthode des volumes finis en employant l'algorithme SIMPLER pour le couplage pression-vitesse. Les résultats issus des simulations qui obtenus pour le cas de la convection mixte pure, sont analysés d'une part, à travers les champs hydrodynamique et thermique au sein de la cavité, ainsi que des profils de vitesse. D'autre part, les échanges thermiques au niveau de la paroi active inclinée sont quantifiés par le calcul du nombre de Nusselt moyen. Dans le but d'obtenir une cavité offrant les meilleures performances thermiques, une étude paramétrique est réalisée en considérant les effets des nombres de Reynolds, de Hartmann ainsi que la fraction volumique totale en nanoparticules. L'examen des résultats indique que l'écoulement du nanofluide est fortement affecté par l'application d'un champ magnétique. En outre, l'augmentation des nombres de Reynolds et de Hartmann améliore les performances thermiques de la cavité. D'une manière générale, l'ajout de nanoparticules permet d'améliorer le transfert thermique. Cependant, l'apport de ces dernières sur l'amélioration du transfert thermique, devient moins probant avec l'augmentation du nombre de Hartmann.

Abstract:

This present study concerns the numerical analysis on mixed convection of hybrid nanofluid inside complex ventilated enclosure, in the presence of an external and uniform magnetic field. The nanofluid is made of Ag and MgO nanoparticles (50:50 vol %) dispersed in water as base fluid. The cavity is of right angled trapezoid shape, and is assumed to be of infinite length in the third

direction imparting a two-dimensional character to the flow. The cavity is subjected to a laminar and steady jet of fresh hybrid nanofluid entering the enclosure through an opening placed on the lower corner of the bottom wall which is adiabatic, just like the vertical right wall. The fluid is evacuated through an opening representing the upper base of the cavity. The left wall is inclined, and is maintained at a constant and uniform hot temperature. New correlations to predict the viscosity and thermal conductivity of Ag-MgO / water hybrid nanofluid are employed in the study. The dimensionless governing equations with the appropriate boundary conditions, are solved numerically by the finite volume method via the SIMPLER algorithm. All the simulations were performed for the case of pure mixed convection ($Ri = 1$), and are presented through hydrodynamic and thermal fields in the cavity as well as the velocity profiles. On the other hand, a special focus is granted to the heat transfer rate, through the evaluation of the average Nusselt number at the hot inclined wall. The study focuses on the determination of the conditions that provide the best thermal performance of the cavity. We investigate the effect of some parameters including the influence of the hybrid nanofluid jet intensity (Reynolds number), the magnetic field strength (Hartmann number) and nanoparticles volume fraction. The results indicate that the hybrid nanofluid flow is strongly affected by the increase in the intensity of the magnetic field. Globally, the average Nusselt number has been found to be an increasing function of both Reynolds and Hartmann numbers. We also note that, the increase in nanoparticles concentrations promotes the heat transfer. However, the contribution of nanoparticles on the improvement of heat transfer has a less significant impact with the increase in the number of Hartmann.

Mots clefs : Convection mixte ; Cavité trap zoidale ventilée ; Nanofluide hybride (Ag-MgO/Eau) ; Volumes finis

Nomenclature

B_0	Intensit� du champ magnétique <i>Tesla</i>	α	diffusivit� thermique, $m^2 \cdot s^{-1}$
cp	chaleur spécifique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	β	coefficient d'expansion thermique, K^{-1}
g	accélération de la pesanteur, $m \cdot s^{-2}$	θ	température adimensionnelle
H	hauteur de la cavité	μ	viscosité dynamique, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
Ha	nombre de Hartmann	ρ	masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
h	Largeurs des ouvertures $0,2 H$	φ	fraction volumique
k	conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$		
L	Largeur de la cavité		
Nu	nombre de Nusselt	<i>Indices et exposants</i>	
P	pression adimensionnelle	B	Brownien
Pr	nombre de Prandtl	C	chaud
Re	nombre de Reynolds	F	froid
Ri	nombre de Richardson	f	base fluide
T	température, K	m	moyen
U, V	composantes adimensionnelles de la vitesse	nf	nanofluide
X, Y	coordonnées adimensionnelles	S	particule
		*	normalisé
	<i>Symboles grecs</i>		

1 Introduction

L'une des nouvelles stratégies d'optimisation des échanges de chaleur, consiste à modifier la nature du fluide caloporteur afin d'améliorer ses propriétés thermiques. Les nanofluides sont aujourd'hui considérés comme étant une nouvelle catégorie de fluides, permettant d'améliorer les performances thermiques des systèmes faisant intervenir les échanges convectif, en comparaison aux fluides

caloporteurs traditionnels (l'eau, l'éthylène glycol ou le propylène glycol) [1]. Les nanofluides font référence à un liquide dans lequel sont mises en suspension, des particules de métaux ou d'oxydes de métaux de taille nanométrique [2]. Récemment, un nouveau type de nanofluide a suscité l'attention des chercheurs, il s'agit des nanofluides hybrides obtenus en dispersant, dans un fluide base, deux sortes de nanoparticules [3].

De nombreuses études ont traité de la convection mixte au sein des cavités, vue son implication dans divers systèmes et processus industriels, tels que les collecteurs solaires, le refroidissement des composants électroniques et les échangeurs de chaleur. Celle-ci s'opère lorsqu'on a affaire aux cavités ventilées et/ou celles dotées d'une paroi mise en mouvement translationnel [4]. En outre, les travaux portant sur l'étude des phénomènes convectifs au sein des cavités ventilées ont essentiellement concerné les géométries simples et régulières (carrées, rectangulaires, etc...). En revanche, peu d'études ont traité du cas des géométries plus complexes telles que celle de Tmartnhad *et al.* [5]. Ces derniers ont analysé numériquement le transfert thermique, dans d'une cavité trapézoïdale ventilée et traversée par de l'air.

Au cours de ces dernières années, certains auteurs ont mis en avant les bonnes performances thermiques qu'offrent les cavités ventilées traversées par les nanofluides. La littérature révèle que peu de travaux dans cet axe ont été élaborés, et que le domaine reste encore à explorer. Citons à titre d'exemple, l'étude entreprise par Soutiji *et al.* [6] dont l'étude numérique a porté sur le transfert thermique au sein d'une cavité carrée ventilée et traversée par un nanofluide (Al_2O_3 -eau). Ces derniers, ont fait varier l'emplacement de l'ouverture de refoulement. Il en ressort que le nombre de Nusselt moyen croît avec l'augmentation des nombres de Reynolds, de Richardson et de la fraction volumique. Shahi *et al.* [7] ont réalisé une étude numérique concernant la convection mixte au sein d'un nanofluide (Cu-Eau) dans une cavité carrée ventilée dont une portion de sa base est soumise à un flux de chaleur. Leurs résultats indiquent l'ajout de nanoparticules conduit à l'augmentation du nombre de Nusselt moyen. Récemment, Kalidasan *et al.* [8] ont considéré dans leur étude numérique, le cas d'une cavité carrée ventilée et dotée d'un obstacle adiabatique en son centre. Les auteurs se sont intéressés à l'apport de l'utilisation d'un nanofluide hybride (constitué de nanoparticules de diamant et d'oxyde de cobalt dans de l'eau comme fluide suspendant) sur les performances thermique de la cavité.

L'application d'un champ magnétique externe comme paramètre de contrôle de la convection dans les milieux confinés, a au cours de ces dernières années, attiré l'attention de beaucoup de chercheurs [9-11]. Cependant, peu de travaux ont porté sur cet effet lors de l'écoulement de nanofluides dans les cavités ventilées. La récente étude numérique de Kaseipoor *et al.* [12] a porté sur l'analyse de la convection mixte au sein d'un nanofluide (Cu-eau) remplissant une cavité ventilée de forme « T » soumise à un champ magnétique. Leurs résultats indiquent de manière générale, que la présence de nanoparticules dans l'eau améliore le transfert thermique, tout comme l'augmentation des nombres de Reynolds et Hartmann. Meherez *et al.* [13] ont analysé numériquement l'influence de l'angle d'inclinaison du champ magnétique sur le transfert thermique ainsi que sur la production d'entropie au sein d'une cavité ouverte traversée par un nanofluide.

Ainsi, l'objectif du présent travail consiste en une caractérisation de l'écoulement d'un nanofluide hybride (Ag-MgO / Eau) traversant une cavité trapézoïdale soumise à un champ magnétique, ainsi qu'à la quantification des échanges convectifs qui s'y opèrent. Les effets conjugués des intensités du jet de nanofluide, du champ magnétique ainsi que de l'influence de la concentration totale en nanoparticules sur les caractéristiques hydrodynamique et sur les performances thermiques de la cavité, sont analysés dans cette étude.

2 Description et mise en équations du problème physique

La cavité considérée ainsi que les conditions aux limites hydrodynamiques et thermiques sont présentées sur la figure 1. Il s'agit d'une cavité ventilée de section transversale trapézoïdale à angle droit, traversée par un écoulement d'un nanofluide hybride Ag-MgO / Eau (50:50 vol %) en régime laminaire et stationnaire. L'enceinte est supposée être de longueur infinie suivant la troisième direction Oz, orthogonale au plan xOy, conférant au problème physique un caractère bidimensionnel. De plus, la cavité est soumise à l'action d'un champ magnétique externe et uniforme, d'intensité B_0 orienté suivant la direction horizontale (fig.1). Le nanofluide est introduit dans l'enceinte à travers une ouverture placée au niveau du coin inférieur droit de la paroi horizontale inférieure, qui par ailleurs, est adiabatique tout comme la paroi verticale droite. Le fluide s'évacue alors à travers une ouverture qui s'étend sur toute la longueur de la base supérieure de l'enceinte. La paroi gauche qui se trouve être inclinée, est quant à elle portée à une température constante et uniforme, supérieure à celle du fluide entrant la cavité.

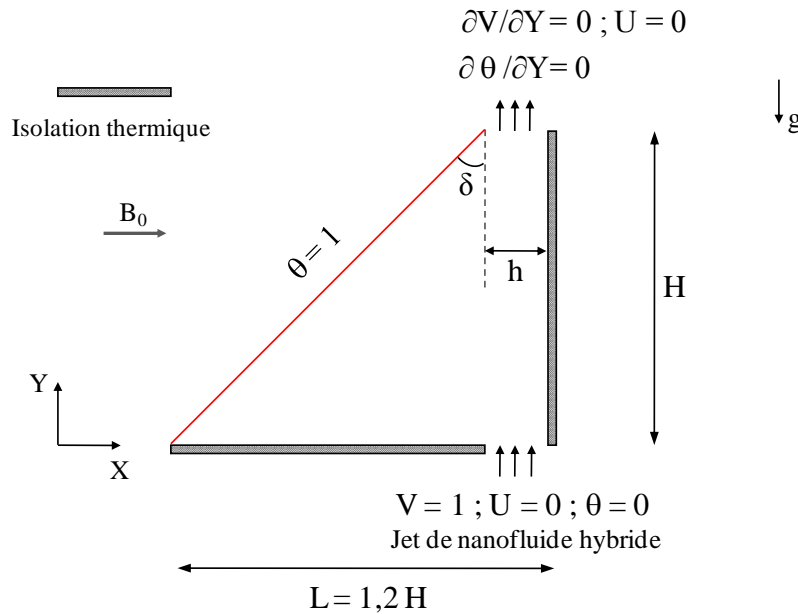


Figure 1 : Cavité considérée et conditions aux limites adimensionnelles

Le nanofluide est supposé se comporter sensiblement comme un fluide monophasique, newtonien et incompressible, satisfaisant l'approximation de Boussinesq pour tenir compte des effets de la poussée thermique. Il est supposé en outre que le champ magnétique induit est négligeable en comparaison avec le champ magnétique appliqué. L'action de ce dernier se traduit par l'apparition dans la projection de l'équation de la quantité de mouvement suivant Oy de la composante de la force de Lorentz, déduite par l'équation: $\vec{F} = \sigma_{nf} (\vec{V} \times \vec{B}_0) \times \vec{B}_0$. Compte tenu des hypothèses retenues, les équations de conservation régissant les phénomènes convectifs au sein de la cavité, à savoir celles de continuité (1), de la quantité de mouvement suivant les directions X et Y (2 et 3) et de l'énergie (4), mises sous leurs formes adimensionnelles peuvent être écrites comme suit :

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

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

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\rho_f \mu_{nf}}{\rho_{nf} \mu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho \beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ri \theta - \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{Ha^2}{Re} V \quad (3)$$

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

Les variables réduites utilisées lors de l' dimensionnement des équations (1-4) ainsi que les nombres de Reynolds, de Richardson, de Prandtl et de Hartmann sont respectivement données par les expressions suivantes :

$$X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{u}{U_0}, \quad V = \frac{v}{U_0}, \quad P = \frac{P}{\rho_{nf} U_0^2}, \quad \theta = \frac{T - T_F}{T_C - T_F}, \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho_f U_0 H}{\mu_f}, \quad Ri = \frac{g \beta_f \Delta T H}{U_0^2} = \frac{Gr}{Re^2}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f}} \quad (6)$$

La masse volumique du nanofluides hybride (ρ_{nf}), sa capacité calorifique (ρc_p)_{nf} ainsi que son coefficient d'expansion thermique ($\rho \beta$)_{nf} sont calculés par le biais des lois de mélanges donnés par les équations suivantes [14] :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi_1 - \varphi_2) \rho_f + \varphi_1 \rho_{S_1} + \varphi_2 \rho_{S_2} \quad (7)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \varphi_1 - \varphi_2) (\rho \beta)_f + \varphi_1 (\rho \beta)_{S_1} + \varphi_2 (\rho \beta)_{S_2} \quad (8)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi_1 - \varphi_2) (\rho c_p)_f + \varphi_1 (\rho c_p)_{S_1} + \varphi_2 (\rho c_p)_{S_2} \quad (9)$$

Où φ_1 et φ_2 sont respectivement les fractions volumiques des nanoparticules de MgO et de Ag, qui se trouvent être égales ($\varphi_1 = \varphi_2$). La somme de ces dernières nous donne la fraction volumique totale en nanoparticules dans la suspension, notée φ . Notons que pour le cas de l'étude entreprise, la viscosité dynamique du nanofluides ainsi que sa conductivité thermique sont estimées à l'aide des corrélations empiriques, proposées par Hemmat Esfe et *al.* [15], et spécifiquement développées pour le nanofluides hybride étudié :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 32,795 \varphi - 7214 \varphi^2 + 71400 \varphi^3 - 0,1941 \times 10^8 \varphi^4; \quad 0 \leq \varphi \leq 0,02 \quad (10)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{0,1747 \times 10^5 + \varphi}{0,1747 \times 10^5 - 0,1498 \times 10^6 \varphi + 0,1117 \times 10^7 \varphi^2 + 0,1997 \times 10^8 \varphi^3}; \quad 0 \leq \varphi \leq 0,03 \quad (11)$$

Le Tableau 1 regroupe les valeurs des différents paramètres utilisés afin d'estimer les propriétés thermophysiques du nanofluides hybride.

	ρ (kg m ⁻³)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	C _p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	$\beta \times 10^5$ (K ⁻¹)
Eau	997,1	0,613	4179	1,67
MgO	3560	45	955	1,13
Ag	10500	429	235	1,89

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques de l'eau de Mgo et de Ag à $T = 300$ K.[16-17]

L'estimation du taux de transfert thermique se fait par le calcul des valeurs du nombre de Nusselt moyen, évaluées au niveau de la paroi inclinée chaude. La distribution locale du nombre de Nusselt est

déterminée par l'équation (12), dont l'intégration le long de la surface d'échange rapportée à sa longueur, conduit par ailleurs à l'expression du nombre de Nusselt moyen de la cavité (13):

$$Nu_l = - \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{\text{Paroi inclinée}} \quad (12)$$

$$Nu_m = \frac{1}{\sqrt{2}H} \int_0^{\sqrt{2}H} Nu_l dS \quad (13)$$

où n est le vecteur unitaire, normal à la paroi inclinée, $n = \sqrt{dX^2 + dY^2}$.

3 Résolution numérique et validation du code de calcul

Le problème est résolu numériquement en utilisant un code de calcul programmé en langage Fortran, basé sur la méthode des volumes finis, proposée par Patankar [18]. Le schéma d'interpolation hybride est choisi pour la discrétisation spatiale des termes convectifs et diffusifs des équations de transport. Les équations algébriques obtenues sont résolues par une méthode implicite aux directions alternées (ADI). Le processus itératif tient compte de la correction de pression par l'implémentation de l'algorithme SIMPLER, et atteint la convergence lorsque la variation des variables dépendantes (U , V , P ou θ) d'une itération à une autre n'est plus significative. Un test d'arrêt du processus itératif lors de la convergence est donc imposé et est défini comme suit:

$$\frac{\|\xi^{\sigma+1} - \xi^{\sigma}\|}{\|\xi^{\sigma+1}\|} \leq 10^{-5} \quad (14)$$

où ξ est la valeur des variables dépendantes à l'itération précédente et σ est le nombre d'itération. Les équations de transports sont discrétisées sur un domaine de calcul uniformément structuré. La paroi inclinée est quant à elle approchée par une forme en zig-zag qui, en densifiant le maillage, réduit sensiblement l'erreur générée par cette forme. L'on trouvera les détails sur cette approche dans [9] et [19]. Le tableau 2 regroupe les essais effectués pour suivre la sensibilité des résultats au maillage et ce, pour $Re = 500$; $Ha = 50$ et $\varphi = 0,02$. Il y apparaît que pour un maillage de 150×180 (suivant les directions Y et X respectivement), la solution numérique n'est que très légèrement affectée par la taille du maillage.

Maillage ($Y \times X$)	120×144	130×156	140×168	150×180	160×192
Nu_m	15,200	15,143	15,028	14,977	14,953

Tableau 2 : Sensibilité des résultats au maillage

De manière à vérifier la fiabilité du code de calcul développé, nous confrontons nos résultats avec ceux de la littérature. Dans un premier temps, nous avons comparé qualitativement la structure de l'écoulement ainsi que les isothermes obtenus par Mahmoudi et al. [9], pour le cas de la convection naturelle au sein d'un nanofluide (Cu-Eau) remplissant une cavité trapézoïdale fermée soumise à un champ magnétique. Au vu de la figure 2, une grande similitude est constatée entre les lignes de courant et les isothermes, obtenues par notre code de calcul et celles de la référence [9].

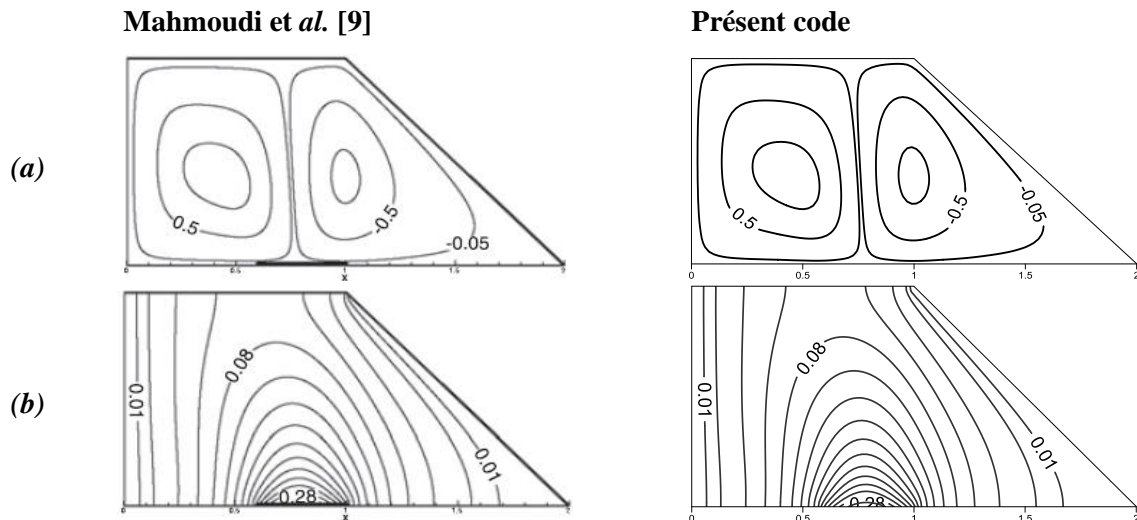


Figure 2 : Lignes de courant (a) et Isothermes (b) pour $Ra = 10^5$; $Ha = 50$; $\varphi = 0,0$.

De plus, une validation quantitative est effectuée en comparant nos résultats avec ceux obtenus par Sortiji et al. [6], qui ont traité numériquement le cas de la convection mixte au sein d'une cavité carrée ventilée, traversée par un nanofluide (Al_2O_3 -eau). La comparaison illustrée sur la figure 3, porte sur le tracé de la distribution du nombre de Nusselt local, calculé le long des quatre parois chaudes pour, $Ri = 0$; $Re = 500$ et $\varphi = 0,0$. Il apparaît clairement, d'après la figure 3, une bonne concordance entre nos résultats et ceux obtenus par les auteurs.

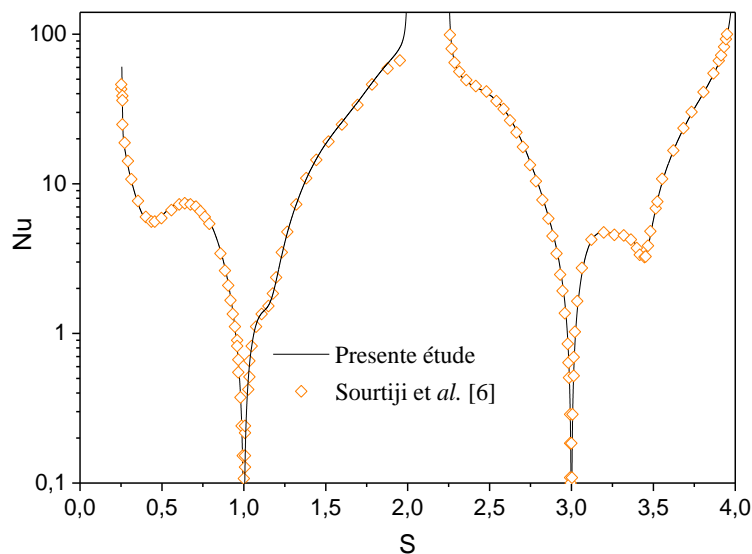


Figure 3: Evolution du nombre de Nusselt local le long des quatre parois chaudes. $Ri = 0$; $Re = 500$ et $\varphi = 0,0$

4 Principaux résultats

Pour cette étude, les résultats issus des simulations sont obtenus pour le cas de la convection mixte pure ($Ri = 1$). En vue de déterminer les conditions offrant les meilleures performances thermiques de la cavité trapézoïdale ; nous examinons les effets des nombres de Reynolds ($10 \leq Re \leq 400$), de

Hartmann ($0 \leq Ha \leq 100$), et l'influence de la concentration totale en nanoparticules exprimée en fraction volumique ($0 \leq \varphi \leq 0,02$). Pour tous les essais entrepris, le nombre de Prandtl est pris égal à 6,2. Les résultats sont analysés d'une part, à travers les champs hydrodynamique et thermique au sein de la cavité, mais aussi des profils de vitesse verticale. D'autre part, les échanges thermiques au niveau de la paroi active inclinée sont quantifiés par le calcul du nombre de Nusselt moyen.

La structure de l'écoulement est de manière générale constituée d'un écoulement principal (forcé), caractérisé par des lignes de courant ouvertes, reliant l'entrée et la sortie de la cavité. Les lignes de courant fermées indiquent quant à elle, l'existence d'une cellule de recirculation.

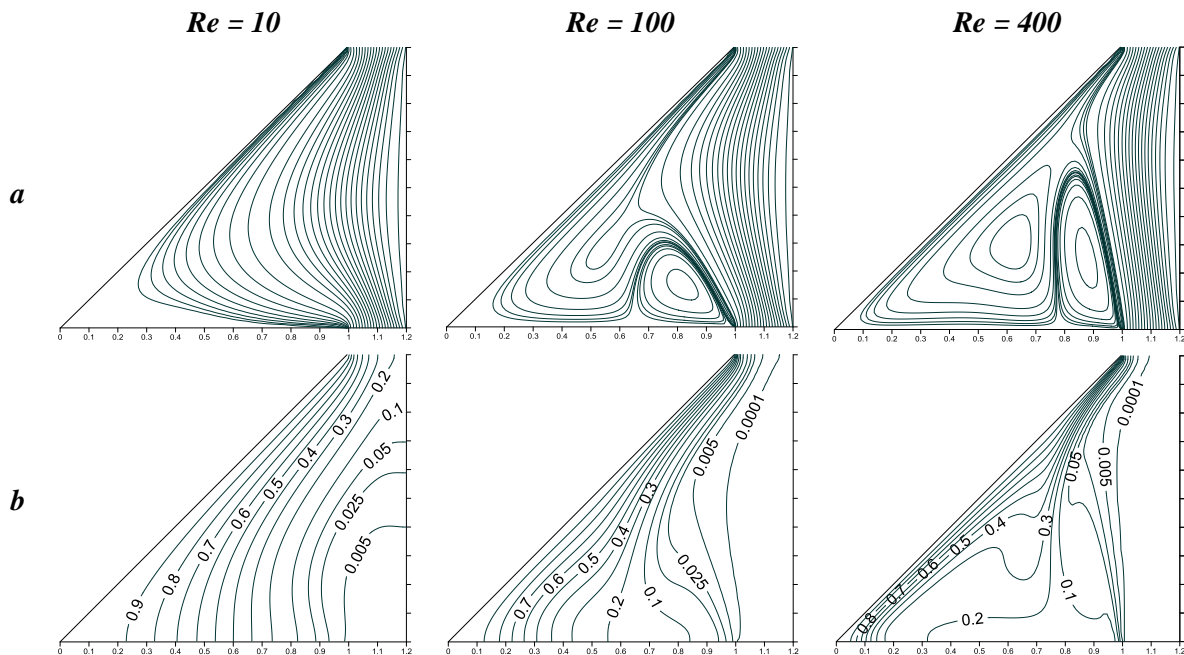


Figure 4: Champs hydrodynamique (a) et thermique (b) pour différents nombres de Reynolds en absence de champ magnétique appliqué à $\varphi = 0,02$

La figure 4 nous informe sur les comportements hydrodynamique (lignes de courant (a)) et thermique (isothermes (b)) à différentes valeurs du nombre de Reynolds, pour le cas de l'écoulement du nanofluide hybride ($\varphi = 0,02$), en absence de champ magnétique appliqué. L'analyse des résultats montre que lorsque le nombre de Reynolds est pris égal à 10, l'écoulement principal arrive à envahir l'ensemble de la cavité. Les isothermes correspondant à ce cas sont stratifiées, et le transfert de chaleur est essentiellement conductif.

Pour des valeurs du nombre de Reynolds plus importantes, un comportement différent est observé, et est caractérisé par un écoulement principal qui entraîne dans son sillage une cellule de recirculation localisée au voisinage de l'entrée et, tournant dans le sens antihoraire. En effet, avec l'augmentation de l'inertie (en augmentant Re), le fluide est plus rapidement évacué vers la sortie, tandis qu'une partie de la masse fluide restée piégée dans la cavité, se met en mouvement par l'écoulement forcé qui la contourne pour occuper le reste de l'enceinte. Il est intéressant de noter que pour le cas où $Re = 400$, une partie de l'écoulement principal reste coincée entre la paroi chaude et la cellule secondaire, donnant ainsi naissance à une nouvelle cellule convective, tournant dans le sens horaire. Ceci pourrait être attribué à la résistance que rencontrerait le fluide lors de son évacuation, étant donné l'inclinaison de la paroi active, ainsi qu'à l'augmentation de la taille de la première cellule de recirculation.

Lorsque le nombre de Reynolds prend les valeurs de 100 et de 400, nous constatons que les isothermes sont beaucoup plus incurvées, révélant la présence de courants de convection plus importants, s'intensifiant avec l'augmentation de l'inertie du fluide. Par ailleurs, pour tous les cas présentés sur la figure 4, les forts gradients de température (traduits par un resserrement des isothermes) sont observés au niveau la paroi active, en particulier au voisinage de la sortie. La chaleur ainsi transmise aux couches fluides pariétales est récupérée dans un premier temps par la première zone de recirculation pour céder à son tour, une partie de cette énergie thermique à l'écoulement principal longeant la paroi verticale.

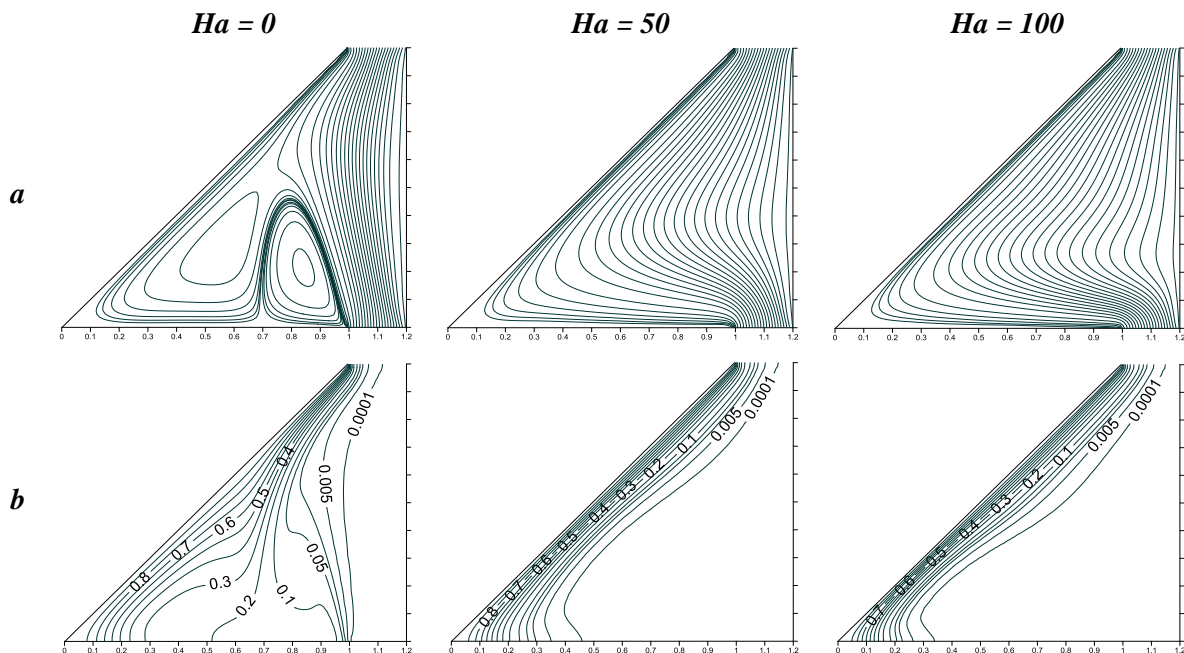


Figure 5: Champs hydrodynamique et thermique pour différents nombre de Hartmann, $Re = 200$; et $\varphi = 0,02$

La figure 5 met en évidence l'effet de l'application du champ magnétique sur la structure des lignes de courant (a) et des isothermes (b), pour différentes valeurs du nombre de Hartmann à $\varphi = 0,02$ et $Re = 200$. Il apparaît qu'en l'absence de champ magnétique ($Ha = 0$) les champs hydrodynamique et thermique ont de manière générale, les mêmes caractéristique que celles de la figure précédente, pour les cas où $Re = 100$ et 400 . En revanche, la présence du champ magnétique entraîne des changements notables sur la structure des écoulements. En effet, lorsque le nombre de Hartmann prend les valeurs de 50 et de 100, nous remarquons la disparition de la première cellule de recirculation, et les lignes de courant, à mesure que l'intensité du champ magnétique augmente, s'incurvent fortement pour aller longer la paroi inclinée. Ce résultat est relié à l'effet de la résultante de la force de Lorentz qui agit à l'encontre de l'écoulement ascendant. En effet, l'analyse de la projection de l'équation de la quantité de mouvement suivant Oy montre que l'augmentation du nombre de Hartmann conduit à la diminution du flux de transversal de la quantité de mouvement (situation rencontrée dans l'étude de Kaseipour et al. [12]). Les isothermes correspondantes, sont stratifiées et concentrées près de la source de chaleur où l'on observe un transfert thermique essentiellement conductif. Notons que cette stratification des isothermes se densifie avec l'augmentation de l'intensité du champ magnétique, induisant de forts gradients pariétaux de température.

Les figures 6 et 7 sont consacrées aux profils de la composante verticale de la vitesse à mi-hauteur de la cavité ($Y = 0,5$), pour $\varphi = 0,005$.

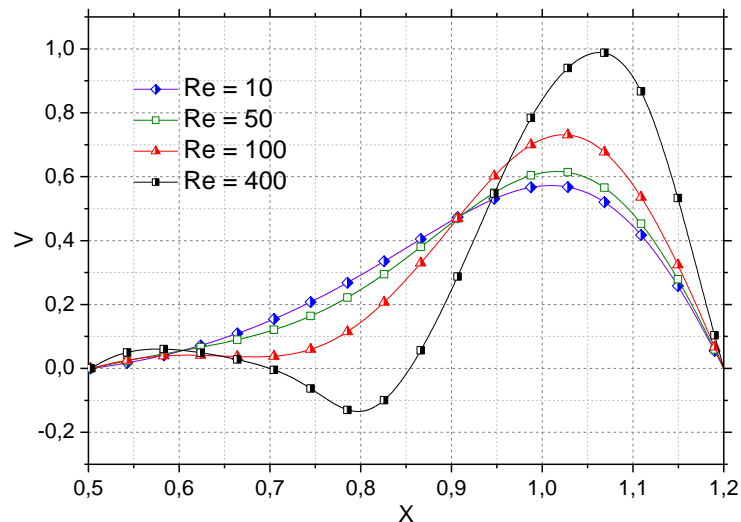


Figure 6 : Profils de vitesse verticale pour différents nombres de Reynolds, $Ha = 0$; $\varphi = 0,005$

La figure 6 montre l'effet du nombre de Reynolds sur cette dernière pour $Ha = 0$. Nous remarquons que la vitesse atteint un maximum qui augmente avec l'augmentation de l'inertie du fluide. Ce dernier est décalé vers la paroi verticale droite, où l'on note des gradients pariétaux de vitesse d'autant plus importants que le nombre de Reynolds augmente. Par ailleurs, pour $Re = 400$, des valeurs négatives de la vitesse sont observées dans l'intervalle compris entre $X = 0,70$ et $X = 0,85$, indiquant des courants descendants de fluide étant donnée la présence de la cellule de recirculation. La figure 7 présente l'influence de la force de Lorentz, exprimé par la variation du nombre de Hartmann, sur les profils de vitesse. Il y apparaît que pour une intensité du champ magnétique modérée ($Ha \ll 10$) l'allure du profil de vitesse est globalement similaire à celle de la figure précédente lorsque $Re = 400$. En outre, les optimums du cas $Ha = 10$ sont inférieurs à ceux observés au cas $Ha = 0$, étant donnée l'action de la force de Lorentz. En augmentant le nombre de Hartmann au-delà de la valeur 50, l'effet de la force de Lorentz se fait ressentir davantage limitant le déploiement de l'écoulement ascendant du nanofluide hybride. Il en résulte d'une part, des profils de vitesse radicalement différents des précédents, caractérisés par des profils aplatis et quasi-symétriques. D'autre part, les gradients pariétaux de vitesse que localisés au niveau des parois verticale et inclinée, sont d'autant plus importants que le nombre de Hartmann augmente.

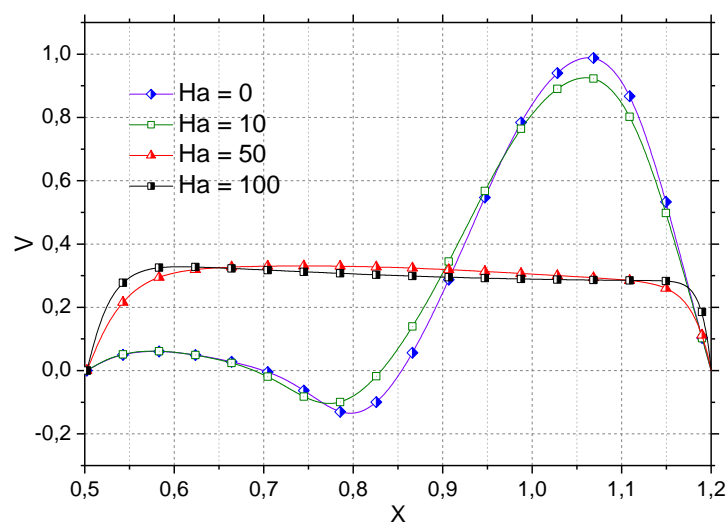


Figure 7 : Profils de vitesse verticale pour différents nombres de Hartmann, $Re = 100$; $\varphi = 0,005$

Nous présentons sur la figure 8 les variations du nombre de Nusselt moyen de la cavité en fonction du nombre de Hartmann, à différentes valeurs du nombre de Reynolds et ce, pour le cas du fluide pur et

celui du nanofluide concentré à $\phi = 0,02$. Il en ressort que l'augmentation du nombre de Hartmann mène à un accroissement du transfert de chaleur, quel que soit la valeur du nombre de Reynolds. Cela est dû au fait que l'intensification du champ magnétique appliqué provoque d'importants gradients pariétaux de température, comme observé sur la figure 5.

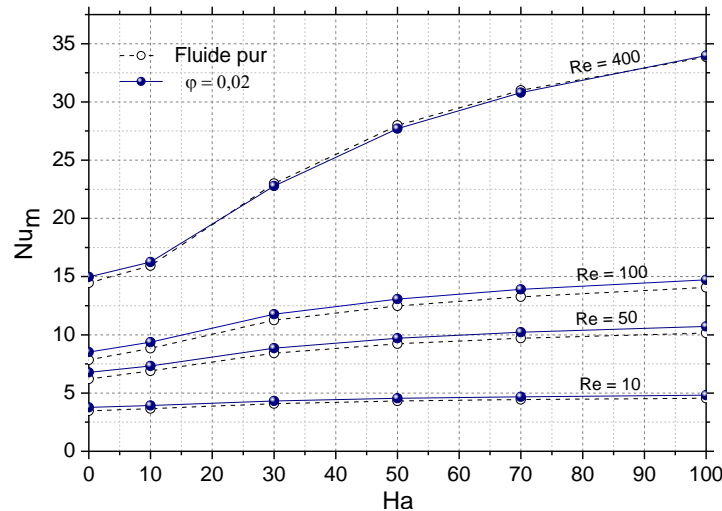


Figure 8 : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Hartmann, pour différentes valeurs du nombre de Reynolds à $\phi = 0,0$ et $0,02$

Notons que lorsque $Re = 10$, l'augmentation de Ha n'améliore que légèrement le taux de transfert de chaleur, cela est attribué au faible cisaillement pariétal de vitesse qui limite les échanges thermiques entre la paroi active et les couches fluides pariétales. En revanche, pour $Re = 400$, l'augmentation de Ha augmente de façon notable le taux de transfert de chaleur. Ce résultat est prévisible étant donné que l'augmentation de la vitesse du jet froid refoule vers l'extérieur de plus grandes quantités de fluide chaud. Ainsi, un accroissement du nombre de Reynolds de 10 à 400 se manifeste par une augmentation du nombre de Nusselt moyen de 332,92% en absence de champs magnétique et de 646,03% lorsque $Ha = 100$.

D'autres part nous constatons que la présence des nanoparticules de MgO et de Ag est bénéfique au transfert thermique lorsque $Re = 10$; 50 et 100. Cela pourrait être expliqué par l'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide hybride en comparaison avec celle relative au fluide pur (eau). En revanche l'augmentation du nombre de Reynolds à 400, tend à aliéner l'effet de la présence des nanoparticules. Cela pourrait être attribué aux forts cisaillements pariétaux induits par les grandes valeurs du nombre de Reynolds qui suffisent à eux seuls à intensifier les échanges.

Afin de mieux percevoir l'apport des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique, nous présentons la figure 9. Cette dernière représente les variations du nombre de Nusselt normalisé (Nu^*), estimé par le rapport $Nu_m(\phi) / Nu_m(\phi = 0)$, en fonction de la fraction volumique totale en nanoparticules, à différentes valeurs du nombre de Hartmann et pour $Re = 100$. D'une manière générale, les valeurs du nombre de Nusselt moyen pour le nanofluide sont plus élevées que celles relatives au fluide pur. En d'autres termes, l'augmentation de la concentration totale en nanoparticules favorise les échanges thermiques, étant donné l'effet de la conductivité thermique du fluide. Cependant cet effet devient moins significatif en augmentant le nombre de Hartmann. En effet, les forts gradients de vitesse situés dans la zone située près de la paroi chaude (Figure 7), engendrés par l'intensification du champ magnétique, sont principalement à l'origine de l'accroissement du transfert

de chaleur. Notons qu'au-delà de $Ha = 50$ les valeurs du Nu^* ne sont plus sensibles à l'augmentation du nombre de Hartmann et ne dépendent que de la fraction volumique en nanoparticules.

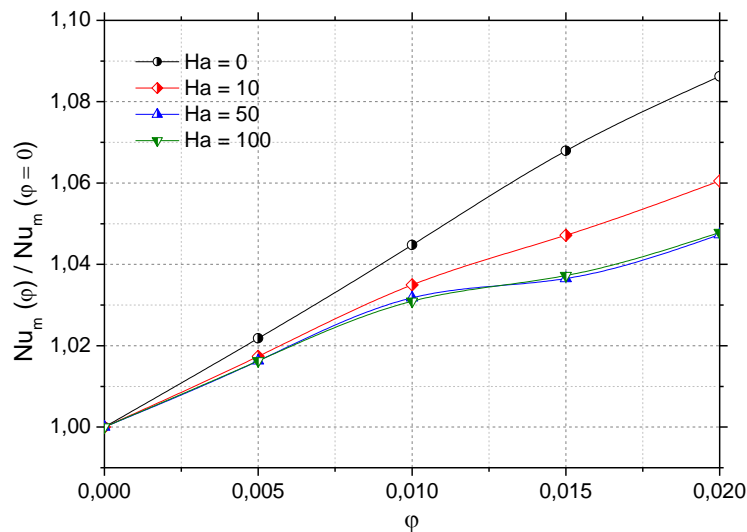


Figure 9 : Variation du nombre de Nusselt moyen normalisé à différentes valeurs du nombre de Hartmann, pour $Re = 100$.

5 Conclusion

Dans cette étude nous avons analysé numériquement les phénomènes convectifs lors de l'écoulement d'un nanofluide hybride au sein d'une cavité trapézoïdale ventilée et soumise à l'action d'un champ magnétique externe. Des corrélations empiriques spécifiquement développées pour le nanofluide hybride étudié (Ag-MgO / Eau) ont été utilisées pour le calcul de la viscosité dynamique du nanofluide ainsi que sa conductivité thermique. L'étude portait sur les effets des nombre de Reynolds de Hartmann ainsi que celui de la fraction volumique totale en nanoparticules sur les caractéristiques hydrodynamique et thermique au sein de cavité. Les résultats obtenus ont permis de faire ressortir les points suivants :

- L'application d'un champ magnétique uniforme a montré sur le plan hydrodynamique, un ralentissement de l'écoulement ascendant du nanofluide hybride dans la cavité. Ceci a permis de conclure, qu'augmenter le nombre de Hartmann a des conséquences sur les champs hydrodynamique et thermique. Ainsi, cette augmentation a entraîné d'importants gradients de température et de vitesse près de la paroi active.
- Les performances thermiques de la cavité se voient améliorées par l'augmentation de l'inertie du fluide ainsi que l'intensification du champ magnétique. D'une manière générale, l'ajout de nanoparticules permet d'améliorer le transfert thermique, à l'exception du cas où $Re = 400$ qui tend à aliéner l'effet de la présence des nanoparticules. Finalement, il y apparaît au travers de cette étude que l'apport des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique, devient moins probant avec l'augmentation du nombre de Hartmann.

Références

- [1] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G. Sheikhzadeh, M. Abbaszadeh, Numerical study of magnetic field on mixed convection and entropy generation of nanofluid in a trapezoidal enclosure, *22 Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 403 (2016) 133–145.
- [2] S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: D.A. Signier, H.P. Wang (Eds.), *Development and Applications of Non Newtonian Flows*, Vol. 66, ASME FED, vol.231/MD 99–105 (1995).
- [3] N. A. C Sidik, I. M. Adamu, M. M. Jamil, R. , G.H.R. Kefayati, R. Mamat, G.Najafi, Recent progress on hybrid nanofluids in heat transfer applications: A comprehensive review, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78 (2016) 68–79
- [4] S. MOJUMDER, S. SAHA, S. SAHA, M. A. H MAMUN, Combined effect of Reynolds and Grashof numbers on mixed convection in a lid-driven T-shaped cavity filled with water-Al₂O₃ nanofluid, *Journal of Hydrodynamic*, 27 (5) (2015) 782–794
- [5] I. Tmartnhad, M. El Alami, M. Najam, A. Oubarra, Numerical investigation on mixed convection flow in a trapezoidal cavity heated from below, *Ener. Conv. Management*, 49 (2008), 3205-3210.
- [6] E. Sourtiji, M. Gorji-Bandpy, D.D. Ganji, S.F. Hosseinizadeh Numerical analysis of mixed convection heat transfer of Al₂O₃-water nanofluid in a ventilated cavity considering different positions of the outlet port, *Powder Technology*, 262 (2014) 71-81
- [7] M.Shahi, A. Houshang Mahmoudi, F. Talebi, Numerical study of mixed convective cooling in a square cavity ventilated and partially heated from the below utilizing nanofluid, *Int. com. In heat and mass tranf*, 37 (2010) 201-213
- [8] K. Kalidasan , P. Rajesh Kanna, Natural convection on an open square cavity containing diagonally placed heaters and adiabatic square block and filled with hybrid nanofluid of nanodiamond - cobalt oxide/water, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 81 (2017) 64–71
- [9] A. H. Mahmoudi, I. Pop, M. Shahi, F. Talebi, MHD natural convection and entropy generation in a trapezoidal enclosure using Cu–water nanofluid, *Computers & Fluids*, 72 (2013) 46–62.
- [10] M. B. Uddin, M.M. Rahman, M.A.H. Khan, T. A. Ibrahim, Effect of buoyancy ratio on unsteady thermosolutal combined convection in a lid driven trapezoidal enclosure in the presence of magnetic field, *Computers & Fluids* 114 (2015) 284–296
- [11] F.S. fendigil, H. F. Öztop, A. J. Chamkha, MHD mixed convection and entropy generation of nanofluid filled lid driven cavity under the influence of inclined magnetic fields imposed to its upper and lower diagonal triangular domains, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 406 (2016) 266–281
- [12] A. Kasaeipoor, B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, Convection of Cu-water nanofluid in a vented T-shaped cavity in the presence of magnetic field, *Int. J. of Thermal Sciences*, 94, (2015), 50-60
- [13] Z. Mehrez, A. El Cafsi, A. Belghith, P. Le Quééré, MHD effects on heat transfer and entropy generation of nanofluid flow in an open cavity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374 (2015) 214–224
- [14] R. Nasrin, M.A. Alim, Free convective flow of nanofluid having two nanoparticles inside a complicated cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 63 (2013) 191–198
- [15] M. H. Esfe, A. A. A. Arani, M. Rezaie ,W.M. Yan, A. Karimipour, Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag–MgO/water hybrid nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66 (2015) 189–195
- [16] R. Davarnejad, M. Jamshidzadeh, CFD modeling of heat transfer performance of MgO-water nanofluid under turbulent flow, *Engineering Science and Technology, an International Journal xxx* (2015) 1–7
- [17] D.K. Smith, H.R. Leider, Low-Temperature Thermal Expansion of LiH, MgO and CaO, *J. Appl.Cryst.* 1 (1986) 246
- [18] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporating, New York: Taylor and Francis Group, (1980), 113-137.
- [19] S. Ouyahia, Y.K. Benkahla, N. Labsi, Numerical Study of the Hydrodynamic and Thermal Proprieties of Titanium Dioxide Nanofluids Trapped in a Triangular Geometry, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (2016) 1995–2009.