

Visa du chef de département des  
Sciences et Technologies  
Signature:.....  
Date:.....

## **SIMULATION NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS UNE ENCEINTE CARREE CONTENANT DE NANOFUIDES**

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique  
en «*Installations Energétiques*»

Encadreur: Dr. BAGHDAD  
Mohammed, MCB  
Signature: .....  
Date: .....

Réalisé par :  
Étudiante: Baha Zoulikha  
Signature : .....  
Date : .....

### *Membres du jury*

M. KHERRAB Mohamed	MAA	Président
M. KHERRIS Sahraoui	MCA	Examineur
M. BAGHDAD Mohammed	MCB	Encadreur



Visa du chef de département des  
Sciences et Technologies  
Signature:.....  
Date:.....

## **SIMULATION NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS UNE ENCEINTE CARREE CONTENANT DE NANOFLUIDES**

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique  
en «*Installations Energétiques*»

Encadreur : Dr. BAGHDAD  
Mohammed, MCB  
Signature : .....  
Date : .....

Réalisé par :  
Étudiante: Baha Zoulikha  
Signature : .....  
Date : .....

### *Membres du jury*

M. KHERRAB Mohamed	MAA	Président
M KHERRIS Sahraoui	MCA	Examineur
M. BAGHDAD Mohammed	MCB	Encadreur

## Résumé

Une simulation numérique est effectuée pour examiner la convection naturelle dans les nanofluides à base d'eau avec trois nanoparticules  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Cu et  $\text{TiO}_2$ . L'analyse utilise une cavité bidimensionnelle carrée, les conditions de transfert de chaleur ont été fixées pour la gamme de nombre de Rayleigh  $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ , et pour la fraction volumique des nanoparticules variant  $0 \leq \varphi \leq 0,10$ . Les équations régissant l'écoulement et le champ thermique ont été résolues avec la méthode des volumes finis en utilisant le code *Fluent*. Les résultats numériques sont présentés sous forme le nombre de Nusselt moyen. Les résultats indiquent clairement que la variation du le nombre de Nusselt moyen est une fonction croissante à la fois avec le nombre de Rayleigh et la fraction volumique de nanoparticules. Les résultats montrent également que la mise en valeur de transfert de chaleur est possible en utilisant des nanofluides par rapport à des fluides classiques, ce qui entraîne la compacité de nombreux appareils industriels.

**Mots clés** : Simulation numérique, Convection naturelle, Nanofluides, Cavité carrée, Transfert de chaleur.

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents.

À mes grands-mères et grands -pères.

À mes très chers frères : Aissa, Mostapha, Abd El-Kader et sa femme et ses enfants (Alilo, Zakaria, Bassma).

À ma très cher sœur : Fatma et son mari Salim.

A tous des étudiants de ma promotion de 2éme années master génie mécanique

Notamment : Fatiha, Sarah,sara, faiza, Fatiha22, Amel, khadidja, Fatima, Rahma

À mes proches et mes amis

À ma promotion de Génie mécanique

À tous ceux qui me sont chers.

## Remerciements

Avant tout, je dois remercier Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage et la force pour mener ce travail à terme.

En premier lieu, je tiens à remercier vivement mon encadreur le Dr. BAGHDAD Mohammed, maître de conférence à l'institut des sciences et technologies au Centre universitaire de Tissemsilt pour : sa disponibilité, ses conseils avisés et pour la confiance qu'il m'a accordé tout au long de ma formation.

Je souhaite également remercier tous les membres du jury Dr. KHERRIS Sahraoui. M. ZEBBAR MOHAMMED MAHDI pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire.

Je tiens à témoigner ma profonde reconnaissance à ma sœur pour sa gentillesse, son écoute attentive, son efficacité, sa grande passion pour la recherche et sa grande disponibilité au cours de la préparation de ce travail.

Je tiens à remercier aussi tous les enseignants de département des sciences et de la technologie qui ont participé à notre formation, et qui nous ont aidés à préparer ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent également à ma famille et mes amis pour leurs encouragements permanents, durant la réalisation de ce travail.

J'exprime aussi mes remerciements aux enseignants de génie mécanique, science de la matière.

En fin, je remercie tous ceux qui m'ont aidée et soutenue de près ou loin.

## Nomenclature

### Symboles Latins:

$C_p$	Chaleur spécifique du fluide à pression constante.	$\text{Kj. Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$g$	Accélération de la pesanteur	$\text{m.s}^{-2}$
$h$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
$K$	Conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$L$	Longueur de cavité	m
$p$	Pression du fluide	Pa
$P$	Pression adimensionnelle	
$T$	La température	K
$u, v$	Composante de vecteur de vitesse	$\text{m.s}^{-1}$
$U, V$	Composante adimensionnelle de vecteur de vitesse	
$v$	Volume	$\text{m}^3$
$x, y$	Coordonnées cartésiennes	m
$X, Y$	Coordonnées cartésiennes adimensionnelles	

### Symboles grecs :

$\beta$	Coefficient d'expansion thermique	$\text{K}^{-1}$
$\varphi$	La fraction volumique	
$\eta$	La viscosité dynamique	$\text{N.s.m}^{-2}$
$\rho$	La densité	$\text{Kg.m}^{-3}$
$\alpha$	La diffusivité thermique	$\text{m}^2.\text{s}$
$\Delta T$	La différence de température	K

### Nombres adimensionnels

$E$	Coef de transfert de chaleur
$Nu$	Nombre de Nusselt
$Pr$	Nombre de Prandtl
$Re$	Nombre de Reynolds
$Ra$	Nombre de Rayleigh

### Indices

$C$	chaude
$F$	froid
$f$	Fluide de base (l'eau)
$nf$	nanofluide
$s$	Particules solide

## Liste des figures

Fig.2.1-	Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau + nanotube ; eau + alumine ; eau + or à 20nm.....	12
Fig.2.2-	Procèdes de synthèse de nanofluide en une seule étape (Argonne National Laboratory, USA).....	14
Fig.3.1-	Schéma représentant le problème étudié .....	25
Fig.4.1-	Exemple de maillage utilisé 160×160.....	33
Fig.4.2-	Profil de la composante verticale de la vitesse à mi-cavité pour différents maillages ; a. $Al_2O_3$ , b. $Cu$ , c. $TiO_2$ .....	35
Fig.4.3-	Comparaison du nombre de Nusselt moyen entre le présent travail et celui de Ho et al. 2009, a. $Ra=10^3$ , b. $10^4$ , c. $10^5$ , d. $10^6$ .....	36
Fig.4.4-	Variation de nombre de Nusselt moyen sur la paroi chaude, a. $Ra=10^3$ , b. $10^4$ , c. $10^5$ , d. $10^6$ .....	37
Fig.4.5-	Transfert de chaleur, a. $Ra=10^3$ , b. $10^4$ , c. $10^5$ , d. $10^6$ .....	38
Fig.4.6-	Profils de la vitesse verticale à mi-hauteur de la cavité pour nanofluide d' $Al_2O_3$ , a. $Ra=10^3$ , b. $Ra=10^4$ , c. $Ra=10^5$ , d. $Ra=10^6$ .....	39
Fig.4.7-	Les lignes des courants pour $Ra=10^4$ .....	40
Fig.4.8-	Profils de la vitesse verticale à mi-hauteur de la cavité pour nanofluide d' $Al_2O_3$ , a. $\varphi=0.02$ , b. $\varphi=0.1$ .....	41
Fig.4.9-	les lignes de courants pour nanofluides $Al_2O_3$ et $Cu$ pour $\varphi=0.1$ .....	41
Fig.4.10-	Profil de la composante verticale de la vitesse à mi-cavité pour l'eau pure et pour différents nanofluides et différents fraction volumique.....	43
Fig.4.11-	l'effet du type de nanofluide sur lignes de courant dans l'enceinte carrée....	44
Fig.4.12-	Les contours de températures pour $Ra = 10^4$ .....	45
Fig.4.13-	Les contours de températures pour $Ra = 10^6$ .....	46



## Liste des tableaux

Tableau 3.1-	Propriétés thermophysiques des nanofluides.....	30
Tableau 4.1-	Effet du maillage sur le nombre de Nusselt moyen sur la paroi chaude.....	34
Tableau 4.2-	Valeurs du coefficient C et exposants m, n pour les différents modèles.....	35

## SOMMAIRE

<b>Chapitre 01 : Analyse bibliographique</b> .....	01
Introduction.....	02
1.1 Synthèse bibliographique.....	02
1.2 Objectifs du mémoire.....	08
<b>Chapitre 02 : Généralité sur les nanofluides</b> .....	10
Introduction.....	11
2.1 Définition de nanofluides.....	11
2.2 Préparation de nanofluides.....	12
2.2.1 Les procédés physiques.....	13
2.2.2 Les procédés chimiques.....	13
2.2.2.1 Décomposition de précurseurs organométalliques.....	13
2.2.2.2 Voie radiolytique.....	14
2.3 Les applications de nanofluides.....	15
2.3.1 Refroidissement des systèmes thermiques.....	15
2.3.2 La lubrification par nanofluide.....	15
2.3.3 Refroidissement des systèmes électroniques.....	15
2.3.4 Refroidissement des systèmes militaires.....	15
2.3.5 Refroidissement des systèmes nucléaires.....	16
2.3.6 La biomédecine.....	16
2.3.7 La réfrigération.....	16
2.3.8 Autres applications.....	16
2.4 Avantages des nanofluides.....	17
2.5 Défis des nanofluides.....	17
2.6 Propriétés thermo physiques des nanofluides .....	17
2.6.1 La fraction volumique.....	18
2.6.2 La masse volumique.....	18
2.6.3 Conductivité thermique.....	19
2.6.4 Viscosité dynamique.....	19
2.6.5 La Chaleur spécifique.....	20
2.6.6 Coefficient d'expansion thermique.....	20
<b>Chapitre03 : Modélisation et mise en équations</b> .....	22
Introduction.....	23
3.1 La convection naturelle .....	23

3.2 Description du Problème .....	24
3.3 Mise en Equations.....	25
3.3.1 Équation de continuité .....	25
3.3.2 Équations de Navier-Stokes.....	26
3.3.3 Equation d'énergie.....	26
3.3.4 Hypothèse de Boussinesq.....	27
3.3.5 Les variables adimensionnels.....	27
3.4 Conditions aux Limites .....	28
3.5 Transfert de Chaleur.....	29
3.5.1 Le nombre de Nusselt local.....	29
3.5.2 Le nombre de Nusselt moyen.....	30
3.6 Propriétés de type des nanofluides.....	30
3.7 Résolution numerique.....	31
<b>Chapitre 04 : Résultats et Discussions.....</b>	<b>32</b>
Introduction.....	33
4.1 Etude du Maillage.....	33
4.2 Validation .....	34
4.3 Nombre moyen de Nusselt.....	36
4.4 Transfert thermique.....	38
4.5 Champ d'écoulement.....	39
4.5.1 Effet la variation de fraction volumique.....	39
4.5.2 Effet de nombre de Rayleigh.....	40
4.5.3 Effet du type de nanofluide.....	42
4.6 Champs de températures.....	42
Conclusion générale .....	47
Références Bibliographies.....	48

## Conclusion générale

Le transfert de chaleur jouer un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité d'un tels processus est généralement limitée par les propriétés thermophysiques des fluides utilisés. Les fluides et les huiles normal que ont utilisé généralement pour le refroidissement présente un souci du volume de ces fluides, qui il peut être très considérable, par exemple pour refroidie un système, on a besoin d'un grand volume de fluide de refroidissement et quelque fois le refroidissement d'un système prend des temps long. L'utilisation des nanofluides pour augmenter le transfert de chaleur en convection naturelle est considérer comme une technique nouvelle qui peut répondre aux exigences de l'industrie avec une manière efficace. C'est-à-dire les nanofluide peuvent améliorer le phénomène de transfert de chaleur d'une façon remarquable avec une immense possibilité du remplacement des fluides et les huiles traditionnelle utilisé jusqu'à présent pour le refroidissement.

Dans ce mémoire, on a présenté une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle dans une enceinte carrée remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules. La configuration géométrique du modèle physique est une enceinte carrée avec les parois parallèles verticales sont soumises à des températures uniformes. Les autres parois sont considérées imperméables et adiabatiques. Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de Rayleigh ( $Ra=10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ ) avec différentes fractions volumiques pour le fluide pure ( $\phi =0$  à 10 %) et pour les nanofluide ( $Al_2O_3, Cu$  et  $TiO_2$ ). En se basant sur les approximations de Boussinesq, on a développé le modèle mathématique décrivant notre problème. On a mis également au point un modèle numérique basé sur la méthode de volumes finis. On a validé notre procédure de simulation numérique en comparant nos résultats avec ceux d'autres auteurs.

Les résultats montrent l'effet de variation de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh sur la performance du transfert de chaleur des nanofluides ( $Al_2O_3, Cu$  et  $TiO_2$  avec l'eau). On conclue que l'augmentation de la fraction volumique de nanofluide et le nombre de Rayleigh peut améliorer la performance du transfert de chaleur convective dans une cavité géométrique donnée. Donc on peut considère le nanofluide est un fluide favorable pour les systèmes des refroidissements par apport les autre fluide (les fluides de base). Le transfert thermique en présence des nanoparticules de  $Cu$  et  $Al_2O_3$ , s'améliorent relativement à celui des nanoparticules de  $TiO_2$ . En conséquence, le type de nanoparticule est un facteur principal pour le perfectionnement de transfert thermique.

# **Chapitre 1**

## **Analyse bibliographique**

## Introduction

Durant ces dernières années, plusieurs systèmes énergétique ont été développés dans le domaine industriel produisant un flux de chaleur très élevé, là où les fluides de refroidissement conventionnels (eau, éthylène glycol et l'huile) ne sont pas efficaces. L'idée d'améliorer les propriétés thermo-physique des fluides, est d'introduire des particules solides de très bonnes caractéristiques thermiques et de taille nanométrique au sien du fluide de base. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de « nanofluides ». Ce terme est introduit par Choi [1] au niveau de laboratoire d'Argonne en U.S American en 1995 et reste couramment utilise pour caractériser ce type de suspension colloïdale.

Nanofluides sont une nouvelle classe de fluides qui promettent d'améliorer considérablement les propriétés thermiques, rhéologiques et tribologiques des fluides technologiques. Elles sont obtenues par dispersion de nanoparticules solides (diamètre <100 nm) d'oxydes métalliques réalisés par, les métaux, les nanotubes de carbone,... dans les liquides courants, tels que l'eau, le glycol, les huiles et les réfrigérants.

Par exemple, également à des concentrations relativement faibles de nanoparticules, il est possible d'obtenir de fortes améliorations de conductivité et d'échange de chaleur coefficients thermiques, avec une amélioration correspondante de l'efficacité énergétique des installations et composants utilisant de tels fluides. D'autres paramètres qui influent sur la performance du nanofluides sont matériau, la forme et la taille des nanoparticules, potentiel zêta et le *PH* de la solution colloïdale, le type et la concentration des agents dispersants. Nombreuses sont les applications potentielles pour nanofluides, comme fluides secondaires, ils peuvent être utilisés dans la réfrigération commerciale, un refroidisseur, des panneaux solaires dans des systèmes d'absorption. Comme nano-lubrifiants, ils peuvent améliorer la dissipation thermique, anti-usure et extrême pression des compresseurs lubrifiants. La dispersion des nanoparticules directement dans le fluide frigorigène peut améliorer la performance thermodynamique des machines frigorifiques.

### 1.1 Synthèse bibliographique

Le terme « nanofluide » est proposé premièrement par Choi [1] pour désigner la suspension des nanoparticules solides dans un liquide de base. Choi a trouvé que la conductivité thermique effective du mélange eau- $Al_2O_3$  augmente de 20% pour une concentration en volume entre 1% et 5%. Le premier travail publié sur l'amélioration de la conductivité thermique utilisant l'oxyde d'aluminium a été mené par Massuda et *al.* (1993)

[2]. En dispersant des nanoparticules d' $Al_2O_3$  dans l'eau dont la taille des nanoparticules est de diamètre 13 nm. Ils ont obtenu une amélioration de la conductivité thermique de 30% pour une fraction volumique  $\varphi = 4.3\%$ . Ce résultat a été suivi par une autre étude publiée par Eastman et *al.* (1997) qui ont trouvé une amélioration de 30% de la conductivité thermique de nanofluides ( $Al_2O_3$ ) de taille 33 nm en suspension dans l'eau pour une fraction volumique de 5% [3].

Wang et *al.* (1999) ont été étudié numériquement la convection naturelle dans une cavité bidimensionnelle pour différents nombres de Grashof et pour différentes concentrations volumique. Ils ont été obtenu une amélioration de la conductivité thermique de 40% pour  $Al_2O_3$  à fluide de base éthylène glycol, et de 8% et 14% à fluide de base d'eau avec une fraction volumique de 4.5% [4]. Putra et *al.* (2003) ont été réalisé une étude expérimentale sur le transfert de chaleur en convection naturelle pour des nanofluides d' $Al_2O_3$  et  $CuO$  à base de l'eau à l'intérieur d'un cylindre horizontal dont les deux faces verticales sont soumises à des températures constantes et différentes. Ils ont trouvé que pour un nombre de Rayleigh du nanofluide entre  $10^6$  et  $10^9$ , le transfert de chaleur diminue au lieu d'augmenter lorsque l'on augmente la fraction volumique des nanoparticules. Donc observe une détérioration du transfert de chaleur [5]. En 2004, Sarris et *al.* ont été effectué une étude numérique de la convection naturelle dans les réservoirs rectangulaires chauffés localement au-dessous. Basé sur des prévisions numériques, les effets du nombre de Rayleigh et la géométrie de la source de chauffage et du réservoir sur les structures d'écoulement et le transfert thermique ont été étudiés pour le nombre de Rayleigh dans la gamme  $10^2$  à  $10^7$ . Leur étude a indiqué que l'augmentation de l'intensité de circulation d'écoulement augmente avec une augmentation de longueur de la source de chauffage [6].

Das et Choi (2006) ont étudié le comportement thermique dans les nanofluides. La concentration de petites particules améliorée la conductivité thermique de ces fluides avec concentration de petites particules est surprenante et ne pourrait pas s'expliquer par les théories existantes [7]. Doche et *al.* (2007) ont étudié l'amélioration du transfert de chaleur par des nanofluides, ils ont montré que la nouvelle technologie des nanofluides permette d'améliorer les performances de divers échangeurs de chaleurs [8]. Xiang et Arun (2008) ont été utilisant des suspensions de particules solides taille nanométrique dans la base de liquides, ces investigations récentes sur nanofluides, montre la sensibilité des propriétés de transport et transfert de chaleur [9].

Abu-Nada (2008) a mené des études numériques pour analyser l'effet d'employer différents nanofluides sur la distribution du champ des températures dans une enceinte de hauteur ( $H$ ) et de longueur ( $L$ ) remplie d'un mélange d'eau et de nanoparticule. Différents types du nanofluides ( $Cu$ ,  $AL_2O_3$ ,  $TiO_2$ ) et différents fraction volumique ( $\varphi = 0.1$ ,  $\varphi = 0.2$ ). La paroi gauche est maintenue à une température constante ( $T_H$ ) plus que la température de la paroi droite ( $T_L$ ). Ils ont montré que la valeur du nombre de Rayleigh, la taille du réchauffeur et la fraction volumique des nanofluides affecte la force de transfert thermique [10]. Abu-Nada et Oztop (2009) ont étudié numériquement les effets de l'angle d'inclinaison sur le transfert de chaleur par convection naturelle et l'écoulement des fluides dans une enceinte à deux dimensions remplie de  $Cu$ -nanofluide. La performance de nanofluides est testée à l'intérieur d'une enceinte en prenant en compte la dispersion de particules solides. L'angle d'inclinaison est utilisé comme un paramètre de contrôle pour le transfert de flux et de la chaleur. Il a été modifié de  $0^\circ$  à  $120^\circ$  avec un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^5$ . Ils ont constaté que l'effet de la concentration de nanoparticules sur le nombre de Nusselt est plus prononcé à la fraction de faible volume qu'à la fraction de volume élevé [11]. Salhi hicham (2009) a présenté une étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans une enceinte carrée chauffée et remplie d'un mélange d'eau et des nanofluides pour différentes positions de source de chaleur et différentes fractions volumiques pour les nanofluide. Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finis par l'utilisation d'un schéma hybride. Les champs thermique et dynamique ont été obtenus ainsi que le nombre de Nusselt. La procédure de simulation a été validée par comparaison des résultats obtenus avec ceux d'autres travaux. L'influence des paramètres nombre de Rayleigh, type de nanofluide et la position des sources de chaleur ont été considérés. Des corrélations entre le nombre de Nusselt et les différents paramètres de contrôle de la configuration en question ont été également obtenues [12].

Elhajjar et al. (2010) Ont étudié l'influence des nanoparticules sur le transfert de chaleur. Contrairement à ce que de nombreux auteurs ont obtenus, Ils ont montré que dans la configuration de Rayleigh-Bénard, après l'apparition de la convection, le transfert de chaleur est plus élevé dans le fluide de base par rapport au nanofluide. Le nombre de Rayleigh dans les nanofluides diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. Ainsi, les nanoparticules en suspension dans l'eau vont retarder l'apparition de la convection dans ce dernier [13]. Kaufui et Omar (2010) ont effectué une étude sur nanofluides, la suspension de nanoparticules dans les fluides montre une amélioration



significative de leurs propriétés à nanoparticules modeste concentrations. Cette étude se concentre sur la présentation de l'éventail des applications actuelles et futures qui impliquent les nanofluides, mettant l'accent sur leurs propriétés de transfert thermique améliorée qui sont contrôlables et les spécificités qui possèdent ces nanofluides qui font leur est approprié pour de telles applications [14]. Salhi et Si-Ameur (2012) ont été effectués une étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans une enceinte carrée chauffée par une section carrée et remplie d'un nanofluides. Les équations gouvernantes sont discrétisées par la méthode des volumes finis avec un schéma hybride. Un code de calcul a été conçu et réalisé dans ce contexte pour utiliser la simulation numérique. Les résultats sont analysés à travers les champs thermique et dynamique avec une attention particulière au nombre de Nusselt. Les résultats montrent que l'effet du nanofluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé, l'augmentation de la fraction volumique du nanofluide favorise davantage le transfert de chaleur, le transfert thermique en présence des nanoparticules  $Ag$  s'améliore relativement à celui des nanoparticules de  $TiO_2$  [15]. Cho et al. (2012) ont été effectués une étude numérique de la convection naturelle dans une cavité fermée remplie de nanofluide  $Al_2O_3$ -Eau. Les parois gauche et droite de la cavité sont ondulées. Les simulations examinent les effets de la fraction volumique des nanoparticules, le nombre de Rayleigh et les paramètres de la géométrie complexe ondulée. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de nombre de Rayleigh et la fraction volumique, le rendement de transfert de chaleur peut être optimisé en ajustant la géométrie ondulée selon le nombre de Rayleigh [16]. Sheikhzadeh et al. (2012) ont étudié la convection naturelle et la génération d'entropie dans une cavité carrée avec un obstacle, remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules de  $Cu$ , les résultats montrent que les nanoparticules de  $Cu$ , la position d'obstacle et le nombre de Rayleigh améliore le transfert thermique [17].

Ternik et Rudolf (2012) ont été analysés l'amélioration de transfert de chaleur en convection naturelle l'écoulement de l'eau base dans nanofluides confinés dans une enceinte carrée. L'analyse utilise une enceinte bidimensionnelle en convection naturelle des conditions de transfert de chaleur et a été effectuée pour le nombre de Rayleigh  $10^3 < Ra < 10^5$ , et pour la gamme de fraction volumique des nanoparticules  $0 < \phi < 0.10$ . Les équations régissant ont été résolus avec la méthode volume-fini en utilisant l'approximation de Boussinesq. Les résultats numériques sont présentés sous forme de nombre de Nusselt moyen et l'amélioration transfert de chaleur. Les résultats indiquent que le faible nombre

de Rayleigh montre plus en valeur le transfert de chaleur par rapport à un grand nombre de Rayleigh [18].

El-hattab *et al.* (2013) ont été présenté une étude numérique de la convection naturelle des nanofluides confinés dans une enceinte carrée chauffée par une source de chaleur isotherme montée sur sa paroi gauche. La viscosité dynamique et la conductivité thermique effective du nanofluide sont approximées respectivement par le modèle de Brinkman et de Maxwell Garnetts. Les simulations numériques sont effectuées dans le cas de l'eau pure et des nanofluides ( $Al_2O_3$ ,  $Cu$  et  $TiO_2$ ) pour un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^6$  et une fraction volumique entre 0 et 0,1. Les résultats obtenus montrent que le transfert de chaleur s'améliore si on augmente la fraction volumique des nanoparticules et le nombre de Rayleigh [19]. Une étude numérique réalisée par Mansour et Bakier (2013) pour étudier le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité fermée remplie de nanofluide (eau- $Al_2O_3$ ). Les parois gauche et droite de la cavité présentent une géométrie complexe ondulée, Les résultats montrent que pour toutes les valeurs du nombre de Rayleigh, le nombre de Nusselt, augmente avec l'augmentation de la fraction volumique, en outre, il est démontré que le taux de transfert de chaleur augmente lorsque la valeur de l'amplitude ondulée mur était élevé [20]. Safaei *et al.* (2014) ont été présenté l'application de nanofluides en améliorations de transfert de chaleur. L'objectif principal de cette étude est d'étudier en détail les recherches actuelles basées sur le transfert de la chaleur par convection naturelle, forcée et mixte. Les caractéristiques de nanofluides pour les modèles monophasés et deux exclusivement. La convection de nanofluides dans diverses conduites fermées est revue numériquement et expérimentalement. Plupart résultats obtenus par l'analyse numérique indiquent que les caractéristiques de nanofluides améliorent considérablement la capacité de transfert de chaleur du liquide caloporteur classique. Considérant que, les résultats expérimentaux décrits qui présence de nanoparticules détériore de transfert de chaleur systématiquement. Il a également obtenu que les études expérimenta ont été principalement avec un seul type de nanofluide qui était  $Al_2O_3$ -Eau. Ainsi, les références des expériences sont fortement souhaitées pour évaluer la validité des résultats numériques. En ce qui concerne les études numériques qui tentent d'expliquer l'augmentation anormale observée dans le transfert de chaleur, il est nécessaire d'approche non seulement modèle monophasé, mais aussi modèle en deux phases, ce qui semble être un meilleur modèle à décrire le flux de le nanofluide. Cela est dû au fait que la vitesse du glissement entre la particule et le fluide de base rôle important sur les performances de transfert de chaleur de nanofluides [21].

Ebrahimnia et al. (2015) ont été présenté une étude expérimentale de transfert de chaleur par convection laminaire pour deux types de nanofluides circulant dans un tube chauffé uniformément. Les nanofluides préparés sont constitués de nanoparticules d'argent et d'oxyde de titane dispersées dans de l'eau. La conductivité thermique et la viscosité dynamique de ces nanofluides ont été mesurées et modélisées pour différentes températures et concentrations. De plus, le coefficient de transfert de chaleur et les pertes de charge des nanofluides circulant dans le tube ont été mesurés pour différents nombres de Reynolds. Les résultats expérimentaux montrent que le coefficient de transfert de chaleur et les pertes de charge augmentent avec la concentration des nanoparticules et le nombre de Reynolds. Finalement, un critère a été introduit pour identifier les nanofluides appropriés pour leur utilisation dans les échangeurs de chaleur et les systèmes énergétiques [22].

Ting et Shuhn-Shyurng (2015) ont étudié numériquement le transfert convectif de chaleur nanofluides  $Al_2O_3$  à base d'eau qui coule à travers une section carrée avec un flux de chaleur constant dans des conditions d'écoulement laminaire. Les effets de la concentration en nanoparticules et le nombre de Peclet sur les caractéristiques de transfert de chaleur de nanofluides  $Al_2O_3$  dans l'eau sont enquête. Le diamètre des nanoparticules est de 25 nm et six concentrations de particules (0.2, 0.5, 1, 1.5, 2 et 2.5%) sont prises en compte. Les résultats numériques montrent que le coefficient de transfert de chaleur et nombre de Nusselt augmentes avec l'augmentation du nombre de Peclet ainsi que la concentration en volume des particules. Le coefficient de transfert de chaleur nanofluides est augmenté de 25.5% à une concentration en volume de particule de 2.5% et un nombre Peclet de 7500 par rapport à celle du fluide de base (eau pure) [23].

Al-Hafidh (2015) présente une étude numérique de la convection naturelle de nanofluides contenues dans cylindrique annulaire horizontale remplie de milieux poreux et soumis à un flux uniforme de chaleur le long de la paroi intérieure du cylindre. Le nombre de Rayleigh varie de  $10 \leq Ra \leq 500$ , et la fraction volumique de  $0 \leq \phi \leq 0.3$ . Deux types de nanoparticules sont pris en considération  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$  avec l'eau comme fluide à base. Deux modèles sont utilisés pour le calcul de la viscosité et conductivité thermique de nanofluides. On a constaté que l'addition de 0.5% de  $TiO_2$  provoquent d'augmenter du  $Nu$  local à 3.748 pour le modèle 1 et à 4.128 pour le modèle 2. Ajout de particules d' $Al_2O_3$  de 0.5% cause d'une augmentation du  $Nu$  local à 4.542 pour modèle 1 et 4.988 pour modèle 2. Une valeur maximale du  $Nu$  moyen de  $TiO_2$  est égal 16.446 pour modèl1 avec  $\phi = 0.5$  et  $Ra=500$ , tandis que  $Nu$  égale 4.54 pour le modèle 2. Une valeur maximale du  $Nu$  moyenne de 18.0007 pour  $Al_2O_3$  pour le modèle 1 et

5.004 pour le modèle 2 est obtenue avec  $\varphi = 0.5$  et  $Ra = 500$ . Une corrélation du  $Nu$  avec  $Ra$  et  $\varphi$  est obtenue pour  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$  [24]. Esfe et al. (2016) ont étudié numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle à l'intérieur d'une enceinte en forme de trapèze remplie de nanofluide en nanotube-EG-. Le fond et la paroi supérieure de l'enceinte trapézoïdale est maintenus à une température constante  $T_h$  et  $T_c$  respectivement, tandis que des parois latérales de la cavité sont isolées thermiquement. Des simulations ont été réalisées pour différentes des rapports d'aspect, des nombres de Rayleigh  $10^3$ - $10^6$ , ainsi que des fractions de volume de 0.0015, 0.03 et 0.045. Les résultats montrent que, à faible nombre de Rayleigh  $Ra < 10^4$ , la moyenne de nombre Nusselt  $Nu_{moy}$  diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison à toutes les fractions de volume. Alors que pour  $Ra$  égal  $10^6$ ,  $Nu_{moy}$  augmente avec l'angle d'inclinaison est diminué [25]. Meng et al. (2016) ont effectué une étude numérique de la convection naturelle des nanofluides sédimentation des nanoparticules. Considérant 0.64% nanofluide  $Al_2O_3$ /eau dans une cavité carrée à deux dimensions, la sédimentation des nanoparticules est censé avoir un impact considérable sur la convection naturelle de nanofluide lorsque le nombre de Rayleigh est dans la gamme de  $10^6$  et  $10^7$  avec une couche de sédimentation des nanoparticules au fond de la cavité, le nombre de Nusselt moyen le long de la paroi chauffante se trouve être inférieure à celle dans le cas simulé correspondant par l'intermédiaire d'une seule phase approche. En outre, l'effet de la convection naturelle nanofluide sur les nanoparticules de sédimentation est trouvé de plus en plus remarquable lorsque le nombre de Rayleigh est augmenté [26].

## 1.2 Objectifs du mémoire

Dans pratiquement tous les secteurs industriels, l'amélioration des transferts thermiques est un facteur déterminant de leur efficacité. Dans ce cadre, la miniaturisation des appareillages et les efforts visant à la maîtrise de l'énergie et de l'environnement (énergies renouvelables, refroidissement des moteurs, des composants électriques et électroniques, thermique du bâtiment, étangs solaires, ... etc.) ne sont efficaces que par la présence d'un système de refroidissement/réchauffement fiable permettant le transfert des grandes quantités de chaleur dissipées/reçues.

Le développement considérable récent des recherches traitant des nanofluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroître de façon appréciable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pure une faible concentration de nanoparticules.

Le présent travail est une contribution à l'étude des mouvements de convection naturelle se développant dans différentes configurations et une estimation des possibilités d'amélioration du transfert de chaleur par l'utilisation de nanofluides. Une manière innovante d'améliorer la conductivité thermique de fluides de transfert de chaleur est de suspension de petites particules solides dans les liquides. Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs nanofluides ont été utilisés.

Le mémoire est contiens quatre chapitres, le premier chapitre est consacre à une introduction, une revue bibliographique et une explication des objectifs de la thèse, les chapitres 2, 3, et 4 sont consacrés aux différentes parties du travail et leur combinaison forme un rapport de mémoire unifié.

Le chapitre 2, intitulé « *généralité sur les nanofluides* », présente des généralités sur les nanofluides : préparations, types et applications des nanofluides et à la fin les propriétés thermophysiques des nanofluides.

Dans le chapitre 3, la modélisation mathématique des phénomènes physiques. Les équations régissant le mouvement du fluide et le transfert de chaleur associé seront présentées.

Une fois tous les outils physiques et numériques décrits en détails dans ces chapitres, les résultats numériques obtenus seront exposés au chapitre 4. D'abord, des tests de sensibilité au maillage seront effectués pour garantir une solution indépendante de la grille choisie. Ensuite, des cas tests de validation seront étudiés en vue de juger de la qualité des solutions numériques obtenues par rapport aux résultats de la littérature. Enfin, une analyse des phénomènes rencontrés dans la cavité carrée en fonction de régime d'écoulement et le types des nanoparticules. Le mémoire se termine par des conclusions générales.

# **Chapitre 02**

## **Généralité sur les nanofluides**

## Introduction

Les transferts de chaleur au sein de fluides conduit à de nombreuses applications pratiques et industrielles, y compris dans le transport, l’approvisionnement en énergie, la climatisation et le refroidissement électronique, etc... L’essor actuel des nanosciences a pour origine la mise en évidence des propriétés spécifiques de la matière aux dimensions nanométriques. Ceci a suscité de nouveaux champs d’étude dans de très nombreux laboratoires et a permis le développement des fluides aux propriétés originales.

### 2.1 Définition de nanofluides

Les nanofluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d’en améliorer certaines propriétés. Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d’évaluer le potentiel d’échange de chaleur est la conductivité thermique. Or, les fluides les plus employés tels que l’eau, l’huile ou l’éthylène-glycol ne disposent que d’une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins. Avec les nanofluides, l’idée est alors d’insérer, au sein du fluide de base, des nanoparticules afin d’augmenter la conductivité thermique effective du mélange [27].

Les types de nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont [28] :

#### ✓ **Nanoparticules Métalliques :**

- l’aluminium, *Al*.
- le cuivre, *Cu*.
- l’Or, *Au*.
- l’argent, *Ag*.

#### ✓ **Les oxydes :**

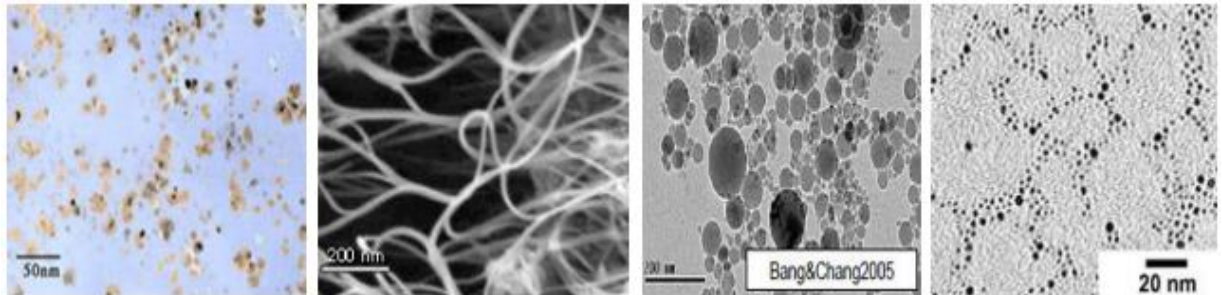
- l’oxyde d’aluminium,  $Al_2O_3$ .
- l’oxyde de cuivre, *CuO*.
- le dioxyde de titane,  $TiO_2$ .

#### ✓ **Nanotubes :**

- les nanotubes de carbone NTC.
- les nanotubes de titane  $TiO_2$ .
- Nanotube de silicium.

Un nanofluide est une solution colloïdale contenant des particules solides de petite taille, désignée sous le terme de « nanoparticules », en suspension dans un liquide de base dont on veut modifier au progresser certaines de propriétés, notamment thermiques.

Le choix des liquides de bases est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un telle fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants plus utilisés sont : l'eau, l'éthylène-glycol(EG), les huiles et le Toluène.



**Fig.2.1- Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau + nanotube ; eau + alumine ; eau + or à 20nm [29]**

## 2.2 Préparation de nanofluides

La fabrication des nanoparticules est une industrie nécessitant une technologie très précise, vu la taille et les différentes formes exigées par les expérimentateurs pour avoir plus d'études de cas, et la nécessité de certains traitements chimiques de surface pour les maintenir en suspension.

La préparation des nanofluides doit tenir compte surtout d'une suspension stable et durable et une agglomération minimale des nanoparticules, et doit assurer qu'elles n'entrent pas en échange chimique avec le fluide de base. Diverses techniques chimiques et physiques sont disponibles pour élaborer des nanoparticules. Ces différentes méthodes permettent d'obtenir des nanoparticules libres ou enrobées, encapsulées dans une matrice hôte.

Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories physiques et chimiques.



### **2.2.1 Les procédés physiques**

La méthode la plus simple consiste à subdiviser un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Toutefois, cette méthode présente d'importantes limitations car elle ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille. Afin d'obtenir un meilleur contrôle de la taille et de la morphologie, on peut utiliser d'autres méthodes physiques plus sophistiquées comme la pulvérisation d'un matériau cible, par exemple à l'aide d'un plasma (pulvérisation cathodique), ou d'un faisceau laser intense (ablation laser) [30], ou par le chauffage à très haute température (évaporation thermique) d'un matériau de manière à ce que les atomes qui le constituent s'évaporent. Ensuite un refroidissement adéquat de ces vapeurs permet une agglomération en nanoparticules [31].

En général, les méthodes physiques nécessitent un matériel coûteux pour un rendement en nanoparticules souvent très limité. Les nanoparticules ainsi synthétisées sont la plupart du temps déposées ou liées à un substrat.

### **2.2.2 Les procédés chimiques**

Aujourd'hui un grand nombre de méthodes de synthèse par voie chimique sont disponibles et présentent l'avantage d'être en général simples à mettre en œuvre et d'être souvent quantitatives et peu coûteuses. Ces méthodes permettent d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relativement étroite et de morphologies variées. Comme dans le cas de la voie physique, les nanoparticules peuvent être synthétisées sous deux formes : libres à l'état de poudre relativement facile à disperser dans un liquide ou un gel hôte, ou enrobées dans une matrice solide ou un polymère. Nous citons ici les méthodes chimiques les plus couramment utilisées.

#### **2.2.2.1 Décomposition de précurseurs organométalliques**

L'utilisation de précurseurs organométalliques permet d'élaborer différents systèmes de nanoparticules. Le procédé repose sur la décomposition, dans un solvant organique judicieusement choisi, d'un composé organométallique, dans lequel le métal est généralement à bas degré d'oxydation. Ceci permet d'éviter l'emploi de réducteurs chimiques puissants qui engendrent souvent des impuretés qui s'adsorbent à la surface des particules et sont difficiles à éliminer. La décomposition est réalisée par élimination des ligands de coordination. Cette élimination se fait en général par chauffage [32].

### 2.2.2.2 Voie radiolytique

Le principe de la synthèse radiolytique des nanoparticules consiste à réduire des ions métalliques en solution au moyen d'espèces produites (en général des électrons) par radiolyse. Dans de telles solutions, les ions métalliques en solution sont en concentration suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas d'effet direct des rayonnements sur ces ions. La synthèse peut donc se décrire en deux parties (la radiolyse du solvant, et les réactions de réduction des ions métalliques par les espèces produites par radiolyse suivies par la coalescence des atomes produits). [33]

Les méthodes chimiques ont souvent un rendement bien supérieur à celui des méthodes physiques. En outre, il existe deux méthodes principales pour produire des nanofluides :

**a-Procédé en une étape :** Consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base (synthèse direct dans un fluide de base) et de prévenir l'oxydation des particules de métal pur [34]. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et plus la conductivité thermique du mélange est améliorée. Néanmoins, pour une famille de nanofluides donnée, les résultats de la littérature présentent une dispersion assez forte. Cette dispersion peut être attribuée au mode de synthèse des nanofluides et/ou à la méthode de mesure.

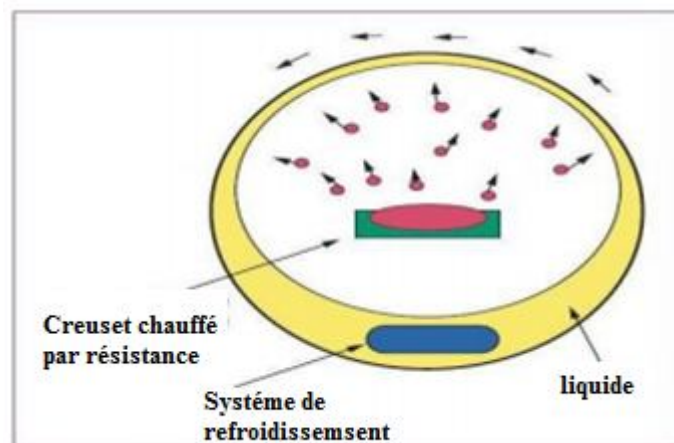


Fig.2.2-Procèdes de synthèse de nanofluides en une seule étape (Argonne National Laboratory, USA) [27]

**b-Procédé en deux étapes [34] :** La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules, et dans la seconde étape les nanoparticules sont dispersées dans un fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrason est souvent nécessaire afin de briser l'agglomérant. En outre,

pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, ondes forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le PH. On peut également utiliser les forces de répulsion stérique à l'aide de molécule adsorbé ou greffées sur la surface.

### **2.3 Les applications de nanofluides**

Les nanofluides ont connu beaucoup d'applications dans l'industrie ce qui a incité plusieurs recherches notamment expérimentales. Les applications peuvent être employées pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques. Dans cette section, quelques exemples d'applications seront présentés.

#### **2.3.1 Refroidissement des systèmes thermiques**

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides de dernier améliore te taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs grandes de chercheurs.

#### **2.3.2 Lubrification par nanofluide**

Les lubrifiants solides utiles dans des situations où la lubrification conventionnelle ne suffit pas de liquide, tels que la température et la pression de contact excessive. Leurs propriétés lubrifiantes sont dues à la structure de couche au niveau moléculaire avec une faible liaison entre les couches. Graphite et bisulfure de molybdène est le principal matériau utilisé comme lubrifiants solides. D'autres lubrifiants solides utiles incluent le nitrure de bore, le disulfure de tungstène, etc., pour améliorer les propriétés tribologiques des huiles lubrifiantes, des nanoparticules de lubrifiant solide à disperser.

#### **2.3.3 Refroidissement des systèmes électroniques**

Dans les circuits intégrés, les nanofluides ont été considérés comme fluides de refroidissement. Pour cela plusieurs études ont été effectuées. Tsai *et al.* [35] ont employé un nanofluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur.

#### **2.3.4 Refroidissement des systèmes militaires**

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermiques

très élevés, où les nanofluides ont montrés leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires, y compris les véhicules militaires, les sous-marins, et les diodes lasers à haute puissance.

### **2.3.5 Refroidissement des systèmes nucléaires**

L'institut de technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle nanotechnologie (nanofluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique, et de la performance économique des systèmes nucléaires.

### **2.3.6 La biomédecine**

Nanofluides ont de nombreuses applications dans l'industrie biomédicale. Par exemple, nanofluides sont utilisés pour produire un refroidissement efficace autour de la zone chirurgicale et améliorant ainsi le patient chances de survie et de réduire les risques de dommages aux organes. Dans une application contrastante pour le refroidissement, nanofluides pourraient être utilisés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines à proximité.

### **2.3.7 La réfrigération**

L'utilisation de nanofluides comme réfrigérants secondaires dans les systèmes de réfrigération par compression de vapeur a été largement étudiée dans les dernière années. Le nanofluide à base d'eau était censé circuler à travers la section circulaire interne de l'évaporateur, tandis que le réfrigérant a été laissé au passage annulaire. Différentes nanoparticules ( $Cu$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CuO$  et  $TiO_2$ ) ont été étudiées pour différentes fractions de volume et de particules de diamètre. Les résultats indiquent une réduction de la surface de l'évaporateur, avec l'utilisation de nanofluides comme réfrigérant secondaire, si on la compare à la base de fluide classique ( $H_2O$ ).

### **2.3.8 Autres applications**

Il y a des situations nombreuses où l'augmentation de l'efficacité du transfert thermique peut être liée à la qualité, la quantité, et ou coût d'un produit d'un processus. Par exemple, dans l'industrie de l'énergie renouvelable, les nanofluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur à partir des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité d'énergie. Les liquides réfrigérants de nanofluide ont une application

potentielle dans la majorité des industries de transformation, telles que les matériaux, la production chimique, la nourriture, le pétrole et le gaz.

#### **2.4 Avantages des nanofluides**

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominance mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.[29]

#### **2.5 Défis des nanofluides**

- l'absence d'accord des résultats obtenus par différents chercheurs
- manque de compréhension théorique des mécanismes responsables des changements dans les propriétés.
- mauvaise caractérisation des suspensions
- stabilité des nanoparticules dispersion
- stabilité de nanoparticules dispersion
- chute de pression accrue et la puissance de pompage
- performance thermique nanofluides dans turbulent le débit et la région
- viscosité supérieur pleinement développé, la chaleur spécifique plus faible
- coût élevé de nanofluides
- difficultés dans le processus de production

#### **2.6 Propriétés thermophysiques des nanofluides**

Les propriétés thermophysiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, l'expansion thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermophysiques du nanofluide obtenus, la nature des nanoparticules, leur taille,

la fraction volumique  $\varphi$ , la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu, *etc...*

De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées, lors de ces deux dernières décennies, en vue de mieux caractériser les propriétés physiques des nanofluides mais cette caractérisation est encore loin d'être satisfaisante. Les propriétés physiques du nanofluide dépendent essentiellement de fluide de base (liquide) et de la phase disperser (nanoparticules) sous une forme solide, donc leur définition nécessite un retour aux propriétés de chacun de ses composantes (fluide de base et nanoparticule).

### 2.6.1 La fraction volumique ( $\varphi$ ) :

La fraction volumique est la propriété la plus important pour le nanofluide, puisque les calculs des tous les autres propriétés se basés sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut défini la fraction volumique comme un rapport sans dimension entre deux volumes, le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules+fluide de base). La valeur de la fraction volumique est varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{\text{Volume solide}}{\text{Volume totale de nanofluide}} = \frac{v_s}{v_s + v_f} \quad (2.1)$$

où

$v_s$  : Volume des nanoparticules solides [ $\text{m}^3$ ].

$v_f$  : Volume du fluide de base (l'eau) [ $\text{m}^3$ ].

### 2.6.2 La masse volumique

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique à une température donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange. Dans le cas d'un mélange, la masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \left[ \frac{m}{v} \right]_{nf} = \frac{m_f + m_s}{v_f + v_s} = \frac{\rho_f v_f + \rho_s v_s}{v_f + v_s} \quad (2.2)$$

A partir de la relation (2.2), on déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_s \quad (2.3)$$

où

$\rho_{nf}$  : La masse volumique du nanofluide.

$\rho_f$  : La masse volumique du fluide de base (l'eau).

$\rho_s$  : La masse volumique de particule solide.

### 2.6.3 Conductivité thermique

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très importants dans le phénomène de transfert de chaleur, elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température. En plus de sa variation en fonction de la température, la conductivité thermique du nanofluide varie en fonction de la fraction volumique aussi, la conductivité thermique d'un nanofluide est calculée selon les modèles de Maxwell (1873).

Maxwell a présenté son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique de nanofluide, mais ce modèle est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, et que cette condition peut être considérée comme un point négatif pour le modèle, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules de forme sphériques. Le modèle de Maxwell (1873) est donné par la formule suivante [34] :

$$k_{nf} = k_f \frac{k_s + 2k_f + 2\varphi(k_s - k_f)}{k_s + 2k_f - \varphi(k_s - k_f)} \quad (2.4)$$

où

$k_{nf}$  : La conductivité thermique du nanofluide.

$k_f$  : La conductivité thermique du fluide de base.

$k_s$  : La conductivité thermique de particule solide.

### 2.6.4 Viscosité dynamique

La majorité des études qui ont traité de la viscosité des nanofluides ont eu recours, pour son calcul à partir de la viscosité du fluide de base et de la fraction volumique  $\varphi$ , aux relations de Stokes-Einstein ou de Brinkman. Ces relations ont été établies dans un cadre précis à savoir particules métalliques de forme sphérique, en faible concentration, parfaitement dispersées et sans interaction inter-particules. La viscosité relative est le

rapport de la viscosité du nanofluide sur celle du fluide de base  $\eta_{nf}/\eta_f$ . On a plusieurs modèles de la viscosité dynamique d'un nanofluide, on s'intéresse au modèle de Brinkman(1952) appliqué dans cette étude. Brinkman a étudié la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques [36].

$$\eta_{nf} = \eta_f / (1 - \varphi)^{2.5} \quad (2.5)$$

Pour les faibles fractions volumiques, la relation de Brinkman conduit exactement à celle d'Einstein. Ces relations n'intègrent pas les effets du mouvement Brownien ni ceux de la taille des particules.

### 2.6.5 La Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un system homogène  $C_p = \frac{dQ}{mdT}$ . (2.6)

La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on a la relation du Modèle de Xuan et Roetzel (2000) [37].

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s \quad (2.7)$$

avec

$(C_p)_{nf}$ : Chaleurs spécifique du nanofluide.

$(C_p)_f$ : Chaleurs spécifique du fluide de base.

$(C_p)_s$ : Chaleurs spécifique de particule solide.

### 2.6.6 Coefficient d'expansion thermique

La variation de la masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique  $\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$  appelé également coefficient de dilatabilité. (2.8)

Pour calculer la valeur de ce coefficient pour les nanofluides de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides, par analogie avec la relation (2.3).



On déduit l'expression suivante :

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_s \quad (2.9)$$

où

$(\beta)_{nf}$  : Le coefficient de dilatabilité du nanofluide.

$(\beta)_f$  : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

$(\beta)_s$  : Le coefficient de dilatabilité de particule solide.

# **Chapitre 3**

## **Modélisation et mise en équations**

## Introduction

La quasi-totalité des études effectuées sur les nanofluides ont visé principalement la détermination des performances énergétiques. Ces études ont démontré la faisabilité et la rentabilité de ce type de nanofluides en amélioration de transfert de chaleur.

Dans ce chapitre les équations traduisant les lois de conservation régissant l'écoulement de fluide dans une cavité carrée sont présentées en précisant toutes les hypothèses simplificatrices adoptées pour le cas qui nous intéresse, c'est à dire le cas d'un écoulement laminaire dans une cavité carrée. Ces équations mathématiques générales gouvernant l'écoulement, sont illustrées dans plusieurs ouvrages de mécanique des fluides et de transfert de chaleur. La fin de ce chapitre est consacrée à la présentation des caractéristiques principales de l'outil numérique utilisé pour suivre l'évolution des solutions du système. Suivi par une description des considérations de précision qui ont été respectées pour s'assurer de la bonne convergence numérique des résultats.

### 3.1 La convection naturelle

La convection naturelle a été particulièrement considérablement étudiée ces dernières années à cause de ses nombreuses applications tant au niveau technologique que théorique. En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions a température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse de courants descendants se produits pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud.

Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poids spécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ de pesanteur terrestre. L'intervention du poids a pour effet de donner à la verticale un rôle privilégie. La définition de la géométrie d'un système convectif doit donc faire intervenir la forme et les dimensions ainsi que la disposition par rapport à la verticale.

Les effets de convection naturelle sont familiers. On peut les observer quotidiennement dans l'eau que l'on chauffe dans un récipient, dans les panaches de certaines cheminées d'usines, la circulation atmosphérique, les vents, les tempêtes sont aussi des effets de la convection naturelle. En particulier, le besoin d'améliorer les transferts thermiques des fluides a donné naissance aux développements des nanofluides. [38]

Ces derniers sont des solutions contenant des nanoparticules en suspension dans un fluide base quelconque. Grace à leurs propriétés améliorées de transfert thermique, les nanofluides peuvent être utilisés dans une multitude d'applications en ingénierie : l'industrie automobile, le génie biomédical, le refroidissement des électroniques, etc...

### 3.2 Description du Problème

Le travail est consacré à l'étude de la convection naturelle dans une cavité carrée de côté ( $L$ ) remplie de nanofluides contenant différentes concentrations de nanoparticules de ( $Al_2O_3$ ,  $Cu$  et  $TiO_2$ ). La configuration de l'écoulement est illustrée sur la Figure (3.1). Les parois parallèles verticales sont soumises à des températures uniformes. Les autres parois sont considérées imperméables et adiabatiques.

Toute simulation repose sur une modélisation du problème. Cette dernière implique certaines hypothèses simplificatrices. Les hypothèses utilisées souvent dans l'étude de la convection naturelle sont énumérées comme suit :

- Le fluide est Newtonien, incompressible et l'écoulement engendré est laminaire ;
- l'écoulement est considéré 2D et stationnaire ;
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable ;
- absence de source de chaleur ;
- les propriétés thermophysiques du fluide sont constantes et sont évaluées à la température de référence (Température de ambiante);
- la dissipation visqueuse est négligée ;
- la variation de la masse volumique, qui est estimée par l'hypothèse de Boussinesq ;
- les propriétés de fluides dans la cavité sont homogènes.

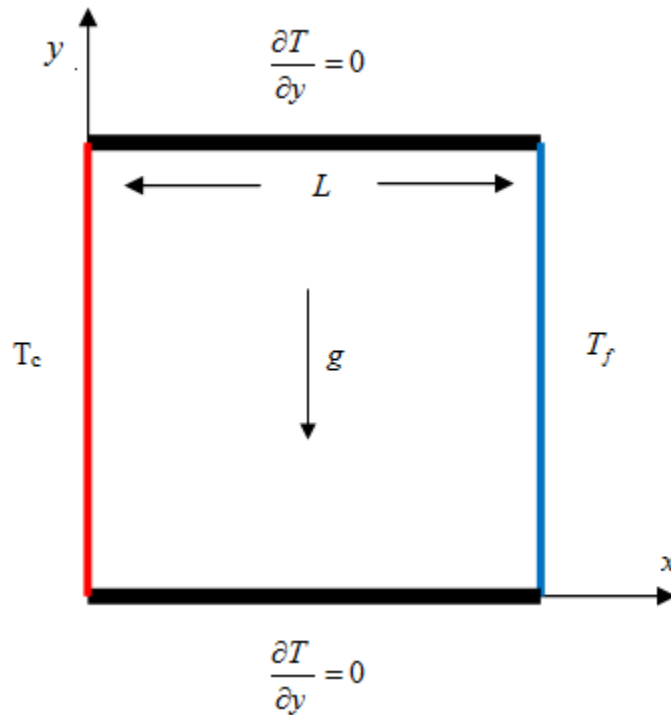


Fig.3.1- Schéma représentant le problème étudié

### 3.3 Mise en Equations

Les équations régissant l'écoulement sont les équations de continuité, de Navier-stokes et l'équation d'énergie, qui expriment, respectivement, la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Les champs de vitesses et de températures issues de ces équations peuvent être utilisés pour évaluer les paramètres de transfert de chaleur (nombre de Nusselt).

#### 3.3.1 Équation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

où  $\rho$  est la masse volumique,  $V$  est le vecteur de vitesse.

En considérant l'hypothèse d'un fluide incompressible, le principe de la conservation de la masse mène à l'équation de continuité. Pour un écoulement à deux-dimensions d'un fluide incompressible, l'équation de continuité se réduit à :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.2)$$

### 3.3.2 Équations de Navier-Stokes

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. D'après la deuxième loi fondamentale de la dynamique l'équation de la conservation de la quantité de mouvement (**Navier-Stokes**) écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D}{Dt}(\rho \mathcal{V}) = \rho g - \bar{\nabla}(p) + \mu \nabla^2 \bar{V} \quad (3.3)$$

où  $g$  est une force par unité de volume.

Le bilan de la quantité de mouvement aboutit, pour un écoulement 2D stationnaire, aux équations régissant le mouvement du fluide dans les directions  $x$  et  $y$  :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \rho (T - T_0) \quad (3.4)$$

### 3.3.3 Equation d'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T) = \nabla \cdot K \nabla T + \beta T \frac{Dp}{DT} + \rho \varphi \quad (3.5)$$

avec :

$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T)$  : La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(KT)$  : La variation d'énergie par conduction.

$\beta T \frac{Dp}{DT}$  : La variation d'énergie due à la compressibilité

$\rho \varphi$  : La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

Le principe de conservation de l'énergie pour un écoulement 2D stationnaire donne l'équation d'énergie suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \rho a + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial q_r}{\partial x_j} \quad (3.6)$$

### 3.3.4 Hypothèse de Boussinesq

Dans le cas où les variations de température sont prises comme suffisamment faibles pour que les propriétés physiques du fluide (tels que sa dilatabilité thermique, sa diffusivité thermique et sa viscosité cinématique) puissent être considérées comme constantes, les variations de la masse volumique au sein du fluide sont faibles. Ainsi, il est possible de considérer le fluide comme quasi incompressible. Les variations de  $\rho$  sont négligées partout, exceptées dans le terme de poussée à l'origine du mouvement.

L'hypothèse de Boussinesq suppose que la densité du fluide dans le terme des forces de volume, varie linéairement avec la température, ce qui amène à la relation suivante :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)] \quad (3.7)$$

où  $\rho_0$  et  $T_0$  dénotent respectivement, la masse volumique et la température de référence et  $\beta$  est le coefficient de dilatation thermique.

### 3.3.5 Les variables adimensionnels

Il est plus commode de présenter les équations régissant le problème sous une forme adimensionnelle. Des nombres sans dimensions caractéristiques vont apparaître et qui réduiront considérablement la complexité du problème.

Dans le présent travail, les équations régissant le phénomène de la convection naturelle dans une cavité ont été adimensionnées en utilisant des variables caractéristiques. A cet effet, la largeur  $L$  entre les deux parois isotherme de la cavité a été choisie comme longueur de référence. La vitesse est adimensionnée par rapport à la diffusivité thermique. Alors que la température est adimensionnée par rapport à l'écart de température  $\Delta T$  entre les parois isothermes. Les variables adimensionnelles sont données par :

$$\begin{aligned} u &= \frac{u^* L}{\alpha}, \quad v = \frac{v^* L}{\alpha}, \quad x = \frac{x^*}{L}, \quad y = \frac{y^*}{L}, \\ p &= \frac{(p^* - p_\infty) L^2}{\rho \alpha^2}, \quad \theta = \frac{(T - T_c)}{(T_h - T_c)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Dans le cas de l'approximation de Boussinesq, on introduit généralement un paramètre, le nombre de Rayleigh ( $Ra$ ), qui incorpore les effets des propriétés du fluide, des conditions aux limites et la géométrie du domaine physique dans un seul paramètre :

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu k} \quad (3.9)$$

Où  $g$  est l'accélération due à la pesanteur,  $\beta$  est le coefficient de dilatation thermique,  $\Delta T$  la différence de température entre les parois isothermes,  $L$  la largeur de la cavité,  $\nu$  la viscosité cinématique et  $k$  la diffusivité thermique.

Il est clair que le nombre de Rayleigh est un paramètre déterminant dans ce type de problème car il exprime la force d'entraînement (flottabilité) dans la cavité, sans laquelle il n'y aura aucune turbulence. Un nombre de Rayleigh plus élevé, engendre un effet de flottabilité plus grand et par conséquent plus de turbulence. Un nombre de Rayleigh moins élevé signifie qu'une faible flottabilité agisse sur l'écoulement, le rendant laminaire.

Plus le nombre de Rayleigh est élevé, plus la convection prend le pas sur la diffusion de chaleur ou de quantité de mouvement. Ce nombre, une fois le fluide choisi pour une enceinte fermée, ne dépend plus que de  $\Delta T$ , qui est ainsi le paramètre de contrôle.

Pour prendre en compte la nature du fluide utilisé, un autre nombre sans dimension est introduit, le nombre de Prandtl :

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{k} \quad (3.10)$$

Il compare les importances relatives de la diffusion de quantité de mouvement (viscosité) et de la diffusion de chaleur (conduction). Les différents cas à étudier peuvent être obtenus en variant la différence de température entre les parois chaude et froide (nombre de Rayleigh), la nature du fluide (nombre de Prandtl), ou la géométrie de la cavité (le facteur de forme, qui est le rapport de la hauteur de la cavité sur sa largeur).

### 3.4 Conditions aux Limites

Ce système d'équations différentielles est fermé à l'aide de conditions aux frontières appropriées. En plus du choix de la géométrie du confinement, il est nécessaire de fixer les conditions aux limites. Les conditions aux frontières représentatives du problème considéré dans cette étude sont les suivantes :

- **Frontières hydrodynamiques :** On impose sur les frontières de la cavité des conditions d'imperméabilité, ces dernières sont définies par :

$$u = v = 0 \quad x = 0, x = 1, y = 0, y = 1 \quad (3.11)$$

- **Frontières thermiques :** La cavité est composée de deux parois horizontales, supposées adiabatiques, et deux parois isothermes, maintenues à des températures constantes mais différentes. Les conditions thermiques aux frontières sont exprimées par :



$$\begin{aligned}
T &= T_C & x &= 0, \\
T &= T_F & x &= 1, \\
\frac{\partial T}{\partial y} &= 0 & y &= 0, \\
\frac{\partial T}{\partial y} &= 0 & y &= 1
\end{aligned} \tag{3.12}$$

### 3.5 Transfert de Chaleur

Le taux du transfert de la chaleur par convection est décrit par le nombre de Nusselt qui est le rapport entre la chaleur transférée par convection par rapport à la chaleur transférée par conduction. Le nombre de Nusselt mesure l'efficacité de la convection. C'est le rapport adimensionné entre le flux de chaleur vertical en surface du fluide et le flux que l'on mesurerait s'il n'y avait pas de convection dans la couche de ce fluide.

$$Nu = \frac{q_{mesuré}}{q_{conductif}} \tag{3.13}$$

Si  $Nu=1$  pas de convection. Plus le nombre de Nusselt est grand, plus le refroidissement par convection est efficace. En d'autres termes, le nombre de Nusselt peut être calculé par la formule suivante :

$$Nu = \frac{h.L}{k} \tag{3.14}$$

où  $h$  est le coefficient de transfert de chaleur par convection,  $L$  est longueur de la cavité et  $k$  est la conductivité thermique du fluide.

#### 3.5.1 Le nombre de Nusselt local

Pour une cavité chauffée différentiellement, le nombre de Nusselt moyen peut être calculé en moyennant les nombres de Nusselt locaux calculés au niveau de tous les nœuds de la paroi froide ou chaude. Le nombre de Nusselt local se calcule sur une paroi isotherme par l'expression suivante :

$$Nu_{local} = \left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=1} \tag{3.15}$$

### 3.5.2 Le nombre de Nusselt moyen

Le nombre de Nusselt moyen est donné par la relation suivante :

$$Nu = \frac{\sum_{noeuds} Nu_{local}}{n} \quad (3.16)$$

avec

$n$  : nombre de mailles.

Dans la présente étude, les taux de transfert de chaleur le long de la paroi verticale chaude, dans une enceinte carrée de dimension  $L$  avec des parois différentiellement chauffées face sont remplis avec nanofluides exprimé en termes de nombre de Nusselt local et signifie comme suit [18] :

$$Nu(y) = - \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial T(y)}{\partial x} \Big|_{x=0} \frac{L}{T_{x=0} - T_c} \quad (3.17)$$

$$\overline{Nu} = \int_0^L Nu(y) dy / L \quad (3.18)$$

### 3.6 Propriétés de type des nanofluides

Pour cette étude, l'écoulement est en régime permanent et le fluide est considéré comme incompressible. On suppose que l'eau est en phase liquide, homogène et en équilibre thermique. Les propriétés du fluide et les nanoparticules sont considérées comme constantes. Le tableau (3.1) présente les propriétés thermo-physiques de l'eau et des nanoparticules à la température de référence ( $T_{amb}$ ). On suppose en outre que l'approximation de Boussinesq est valable pour la poussée d'Archimède.

**Tableau 3.1 - Propriétés thermophysiques des composants de nanofluides**

	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J / kg K]	$k$ [W / m K]	$\beta$ [1 / K]
Eau pure	997,1	4179	0,613	$2,1 \times 10^{-4}$
$Al_2O_3$	3970	765	40	$8,5 \times 10^{-6}$
$Cu$	8933	385	400	$1,67 \times 10^{-5}$
$TiO_2$	4250	686,2	8,9538	$9,0 \times 10^{-6}$

### 3.7 Résolution numérique

La résolution numérique des équations a été effectuée pour une configuration bidimensionnelle par la méthode des volumes finis à l'aide du code *CFD Fluent 6.3.26*. Le problème a été résolu en utilisant un solveur « *pressure based* » avec l'algorithme *SIMPLE*. L'équation de pression est discrétisée par le schéma PRESTO, des schémas d'interpolation du deuxième ordre ont été adoptés pour les autres équations.

La solution est considérée comme convergente quand le résidu des équations algébriques est inférieur à  $10^{-6}$ .

Des maillages ont été testés pour un nombre de Rayleigh  $10^6$  et fraction volumique  $\varphi = 0.10$ .

# **Chapitre 4**

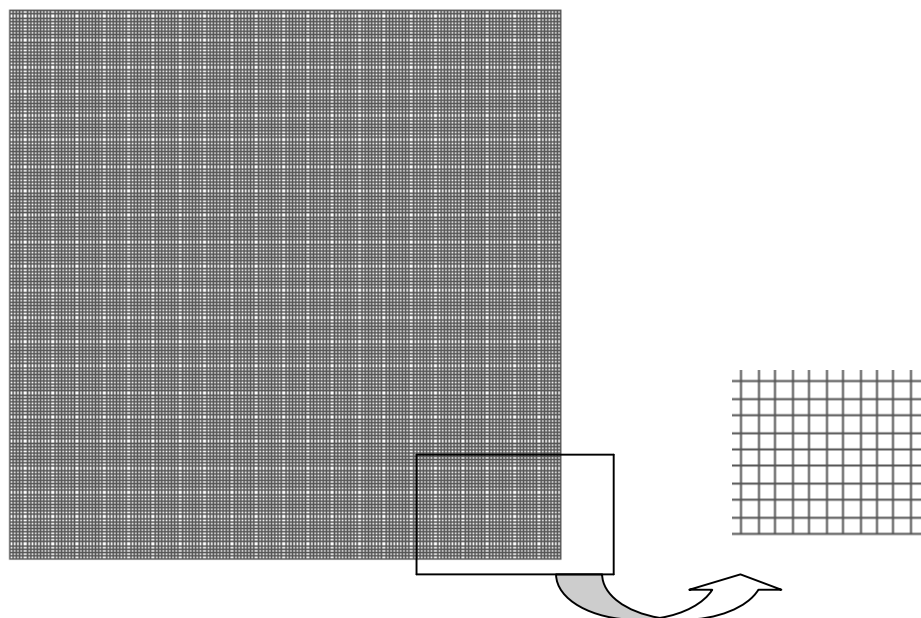
## **Résultats et discussions**

## Introduction

Ce chapitre est consacré principalement à la présentation et la discussion des résultats de la simulation numérique de la convection naturelle en régimes laminaire dans une cavité carrée contient de nanofluides. Le fluide confiné étant l'eau contenant différente de nanoparticules de ( $Al_2O_3$ ,  $Cu$  et  $TiO_2$ ). Le nombre de Rayleigh varie de  $10^3$  à  $10^6$ . Les calculs vont permettre de montrer l'influence du régime de l'écoulement, à travers le nombre de Rayleigh, et le type de nanofluides à travers la variation de nanoparticules et la fraction volumique des nanoparticules, sur le champ d'écoulement et le transfert de chaleur.

### 4.1 Etude du Maillage

Pour évaluer l'influence de la taille de la grille sur les résultats obtenus, le problème a été résolu numériquement en considérant des grilles de tailles différentes. L'influence du maillage sur la solution a été analysée par le calcul du nombre de Nusselt moyen sur la paroi chaude pour différentes grilles non uniformes. Les tests ont été réalisés pour des grilles allant de  $40 \times 40$  jusqu'à  $320 \times 320$  pour des nombres de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^6$ . Tous ces maillages ont été resserrés près des parois afin de capter les effets de la couche limite dans ces régions (Figure 4.1).



**Fig.4.1-Exemple de maillage utilisé 160×160**

Le Tableau 4.1 montre l'évolution du nombre de Nusselt moyen sur la paroi chaude en fonction du nombre de mailles. Il est constaté que l'augmentation du nombre de mailles ne va pas forcément changer la solution mais elle demande un temps de calcul plus élevé.

Pour des nombre de Rayleigh allant jusqu'à  $10^6$ , un maillage de  $160 \times 160$  est suffisant. Donc, les tests laminaires ont été effectués sur la base de ce maillage.

**Tab.4.1-Effet du maillage sur le nombre de *Nusselt* moyen sur la paroi chaude.**

nanofluides	$Nu_{moy}$			
	MI (40×40)	MII (80×80)	<b>MIII (160×160)</b>	MIV (320×320)
$Al_2O_3$	9.6046	9.2626	<b>9.1969</b>	9.1928
$Cu$	9.7081	9.2462	<b>9.1810</b>	8.9664
$TiO_2$	9.5982	9.2631	<b>9.1974</b>	9.1911

La composante verticale de la vitesse de l'écoulement est représentée sur la figure (4.2) en utilisant différents nanofluides pour différents maillages ( $40 \times 40$ ,  $80 \times 80$ ,  $160 \times 160$  et  $320 \times 320$ ). Les profils de vitesse montrent que la cellule circule dans le sens horaire. La composante verticale de la vitesse n'est pas sensible au type des maillages.

De plus, ces subdivisions ne peuvent être poursuivies indéfiniment, en raison, d'une part, l'augmentation de la densité du maillage implique une diminution de la taille des cellules au voisinage des parois. D'autre part, lorsque le maillage est tel que la dimension caractéristique des cellules est très petite, les erreurs d'arrondi peuvent devenir importantes lors des opérations matricielles nécessaires à la résolution des équations.

## 4.2 Validation

Le point le plus important est de vérifier l'exactitude des résultats obtenus. Le meilleur moyen est de les comparer à des données de la littérature. A cet effet, le modèle adopté a été validé en réalisant des calculs pour les mêmes conditions et comparé les résultats publiés par Ho et *al.* (2009) [39]. Dans la corrélation de Ho et *al.* (2009), le nombre de Nusselt moyen à la paroi chaude obtenue à partir les deux modèles à l'étude peuvent être respectivement, corrélation assez bien avec le nombre de Rayleigh ( $10^4 \leq Ra \leq 10^6$ ) et la fraction volumique des particules ( $0 \leq \phi \leq 0.1$ ) comme suit :

$$\overline{Nu} = C (1 + \phi)^m Ra^n \quad (4.1)$$

Où le coefficient  $C$  et les exposants  $m$ ,  $n$  pour les deux modèles sont rapportés sur le tableau (4.2).

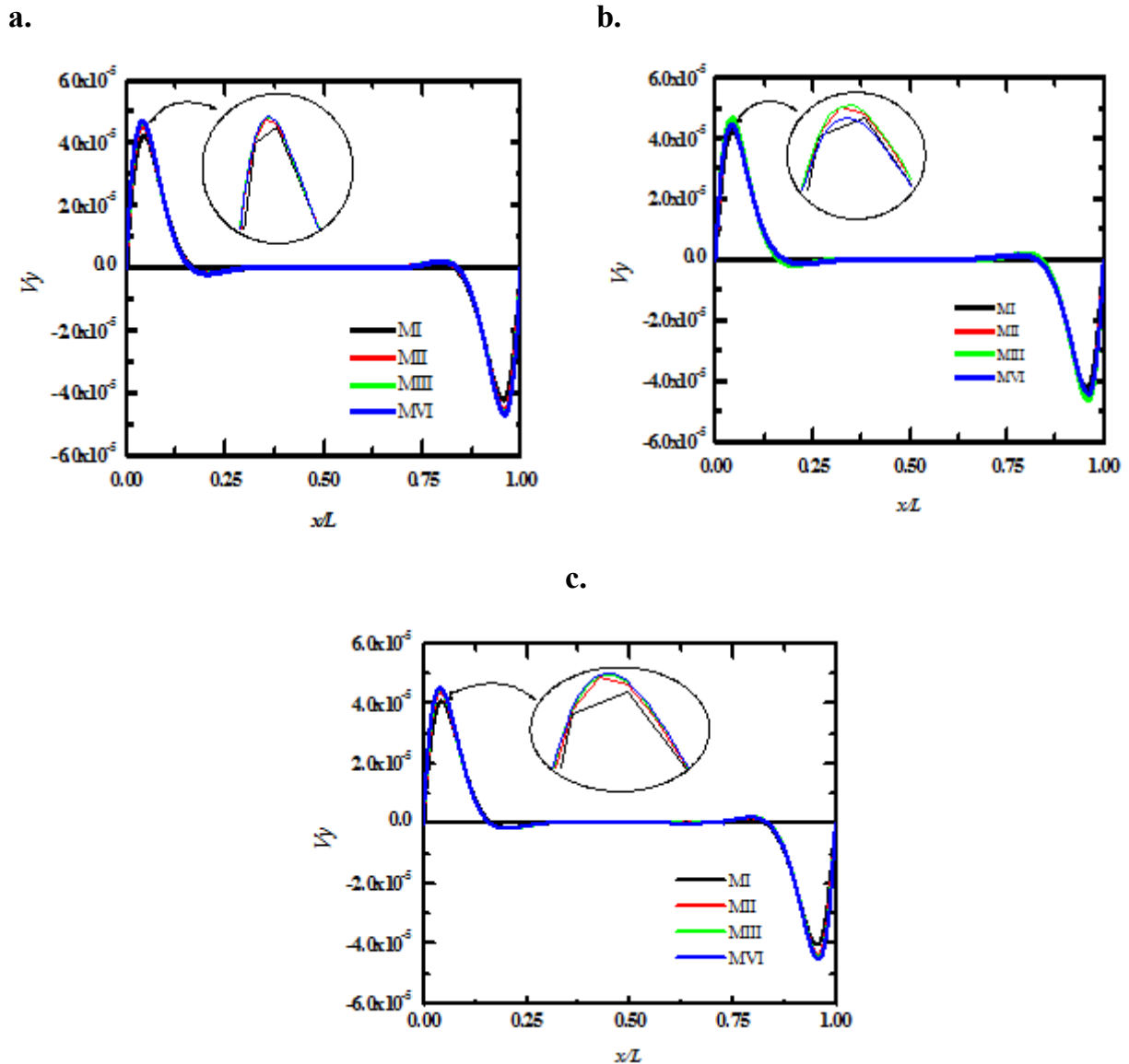


Fig.4.2-Profil de la composante verticale de la vitesse à mi-cavité pour différents maillages;  
a.  $AL_2O_3$ , b.  $Cu$ , c.  $TiO_2$

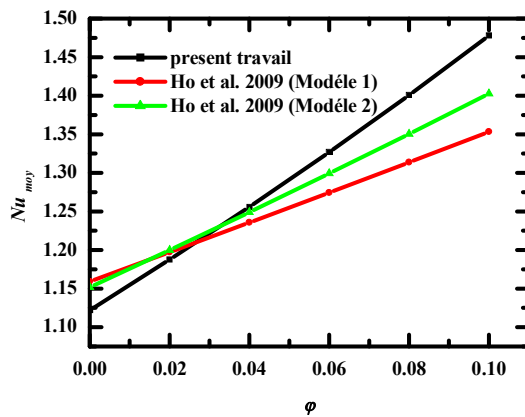
Tableau 4.2- Valeurs du coefficient C et exposants m, n pour les différents modèles

Modèle de <b>Ho et al.</b> (2009)	C	m	n	L'écart maximal	L'écart moyen	Coefficient de corrélation
<b>I</b>	0.149	1.624	0.297	5.65%	1.59%	0.999
<b>II</b>	0.145	2.067	0.300	4.58%	1.54%	0.999

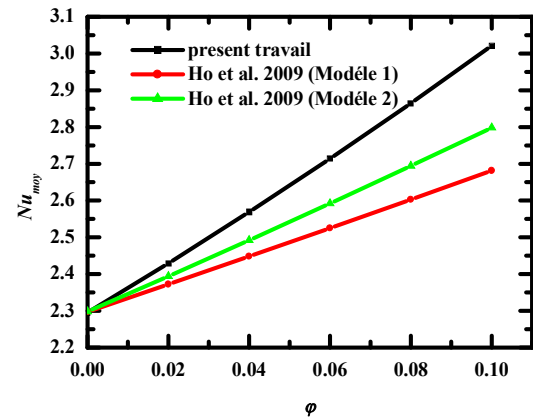
Les résultats se sont avérés en bon accord avec les résultats correspondants comme le figure (4.3).qui montre une comparaison de la variation de nombre de Nusselt moyen sur la paroi chaude dans la cavité carrée entre les corrélations de Ho et al. (2009) et les résultats issus des calculs sur *Fluent*. Il est constaté que les calculs reproduisent les mêmes effets du nanofluide que les données expérimentales. De leur part, le nombre de Nusselt moyen, telle qu'observé au cours des expérimentations décrites par Ho et al. 2009 (modèle I et II), est correctement prédite par les simulations numériques.

La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux est présentée que le nombre de Nusselt moyen sur la paroi chaude augmente avec l'augmentation de la fraction volumique pour quelque soit le nombre de Rayleigh. Les différences entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par les simulations numériques peuvent être expliqués par des incertitudes expérimentales et numériques. Les incertitudes numériques sont attribuées au maillage.

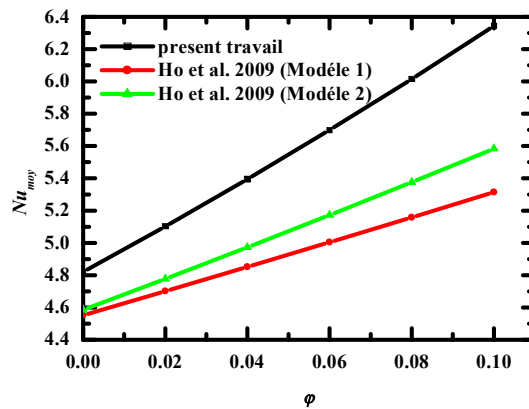
a.



b.



c.



d.

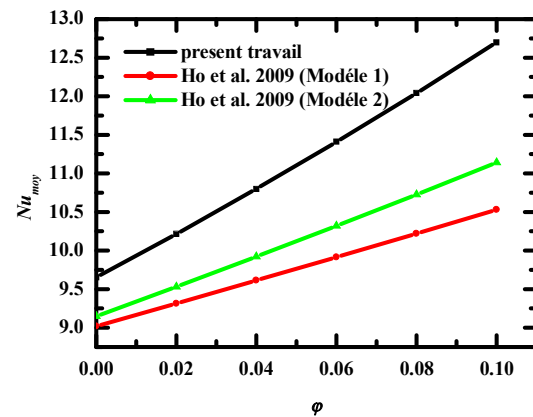


Fig.4.3- Comparaison du nombre de Nusselt moyen entre le présent travail et celui de Ho et al. 2009[39], a.  $Ra=10^3$ , b.  $10^4$ , c.  $10^5$ , d.  $10^6$

### 4.3 Nombre de Nusselt moyen

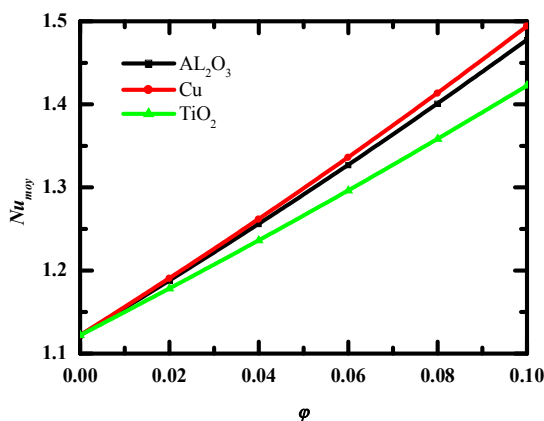
La variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique du solide  $\phi$  pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh est représentée dans la figure (4.4). On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de la fraction volumique pour quelque soit le nombre de Rayleigh.



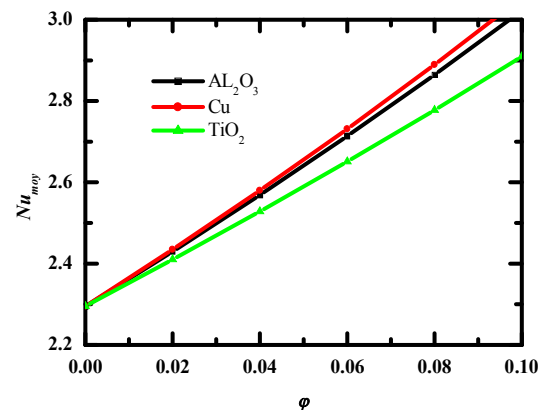
La variation de  $Nu$  est linéaire pour toutes les nanofluides à base d'eau étudiés, à noter aussi que les valeurs du nombre de Nusselt pour le nanofluides  $AL_2O_3$  et  $Cu$  sont supérieures à celles du nanofluides  $TiO_2$  pour différentes valeurs de nombre de Rayleigh. Ce qui montre que  $AL_2O_3$  et  $Cu$  sont des bon conducteur de chaleur par rapport au  $TiO_2$  et le transfert de chaleur plus faible a été obtenu pour le nanofluides de  $TiO_2$  due à la domination du mode de transfert de chaleur par conduction, depuis  $TiO_2$  à la plus faible valeur de la conductivité thermique par rapport à  $Cu$  et  $AL_2O_3$ . Donc, le type de nanofluides est un facteur principal pour le perfectionnement de transfert thermique.

Quand la fraction volumique est plus élevée ( $\varphi \geq 5\%$ ), l'augmentation relative du transfert de chaleur est plus faible pour nanofluides particulier  $TiO_2$  dues aux fortes valeurs de diffusivité thermique.

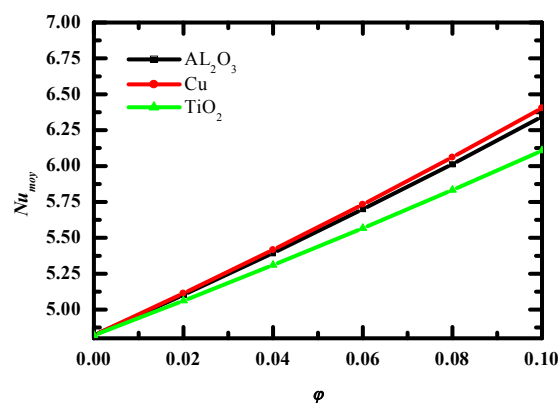
a.



b.



c.



d.

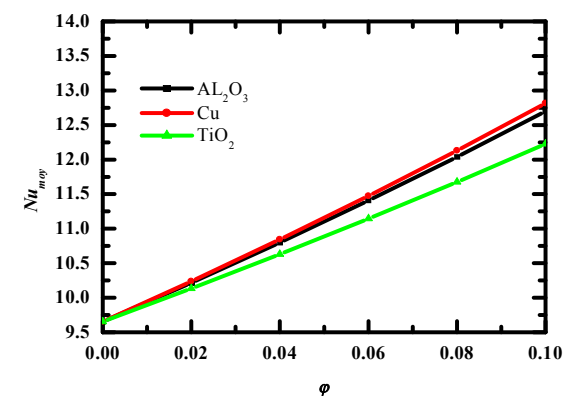


Fig.4.4-Variation de nombre de Nusselt moyen sur la paroi chaude, a.  $Ra=10^3$ , b.  $10^4$ , c.  $10^5$ , d.  $10^6$

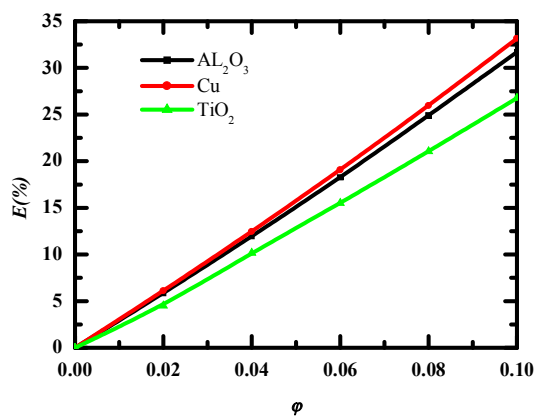
#### 4.4 Transfert thermique

Les résultats précédents indiquent que l'ajout de nanoparticules, augmente le transfert de chaleur. Pour estimer l'amélioration du transfert de chaleur entre le nanofluide à base d'eau et le cas de fluide pur ( $\varphi = 0$ ), l'amélioration est définie [11] :

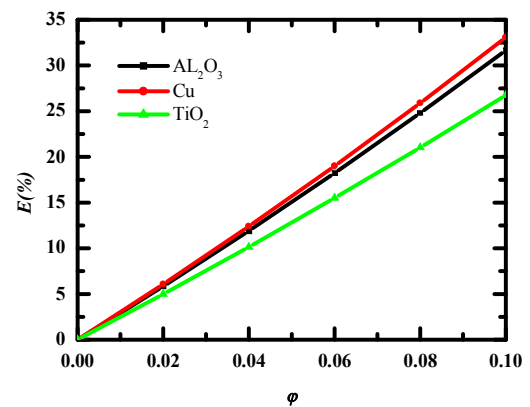
$$E = \frac{\overline{Nu}(\varphi) - \overline{Nu}(\varphi = 0)}{\overline{Nu}(\varphi = 0)} \times 100\% \quad (4.2)$$

L'amélioration du transfert de chaleur est tracée en fonction de la fraction volumique solide pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh sur la figure (4.5). Pour l'ensemble de la gamme de Rayleigh valeurs numériques, les chiffres montrent que l'amélioration du transfert de chaleur augmente pour augmenter fraction volumique solide  $\varphi$ . L'amélioration de transfert de chaleur est une fonction linéaire croissante de la fraction volumique pour les trois types de nanofluides à base d'eau sur toute la plage de  $Ra$ .

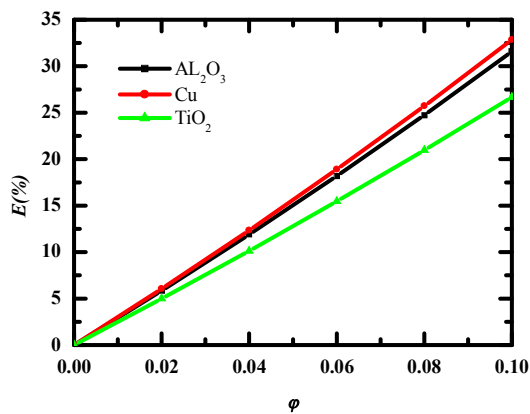
a.



b.



c.



d.

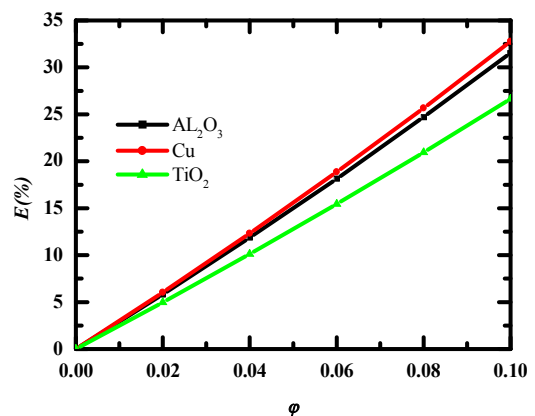


Fig.4.5- Transfert de chaleur, a.  $Ra=10^3$ , b.  $10^4$ , c.  $10^5$ , d.  $10^6$

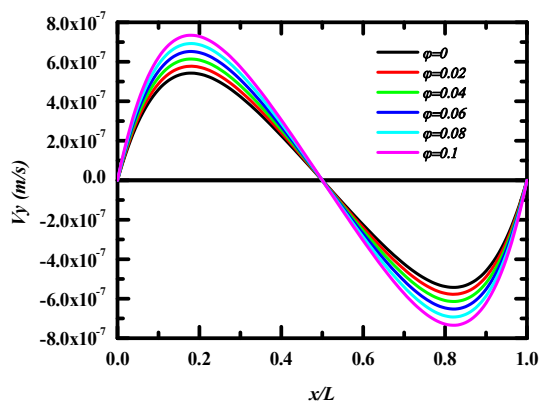
## 4.5 Champ d'écoulement

L'analyse du champ d'écoulement englobe l'étude des lignes de courant et les profils des vitesses verticales à mi-hauteur des cavités.

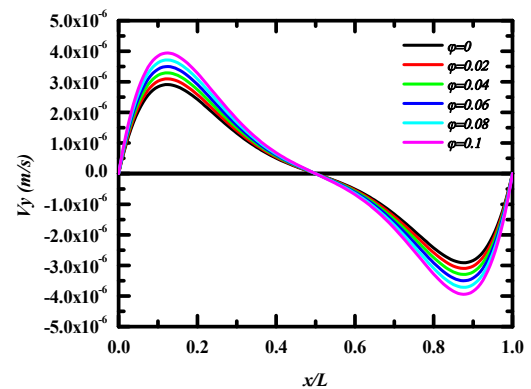
### 4.5.1 Effet la variation de fraction volumique

Les profils de la vitesse verticale à mi-hauteur de la cavité sont représentés sur la figure (4.6) Cette dernière englobe, les profils de la vitesse verticale pour le cas nanofluid  $Al_2O_3$ , pour le nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^6$ . Il est clair que quelque soit le nombre de Rayleigh, la courbe forme un sommet (un pic) aux voisinages des parois chaude et froide de façon symétrique révélant ainsi un écoulement intense près de celles-ci lorsque le nombre de Rayleigh augmente, les pics dont il est question précédemment se déplacent vers les parois verticales montrant que l'épaisseur de la couche limite diminue, et l'écoulement principal du fluide se produit près des parois de la cavité.

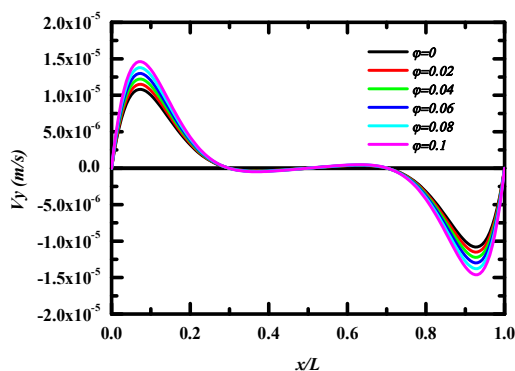
a.



b.



c.



d.

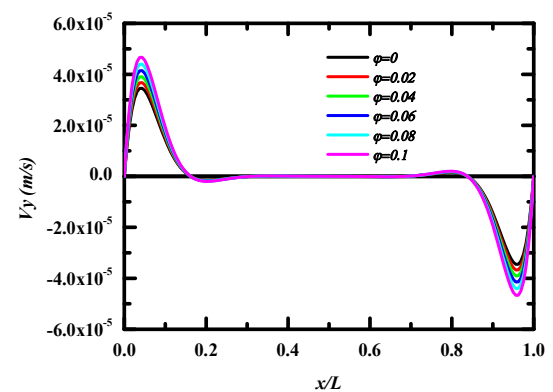


Fig.4.6- Profils de la vitesse verticale à mi-hauteur de la cavité pour nanofluid d' $Al_2O_3$ ,  
a.  $Ra=10^3$ , b.  $Ra=10^4$ , c.  $Ra=10^5$ , d.  $Ra=10^6$

Pour une valeur fixe de Rayleigh, la vitesse de nanofluide augmente avec l'augmentation de fraction volumique, ces résultats confirment la relation entre le nombre de Nusselt, le transfert thermique et la fraction volumique  $\varphi$ .

La figure (4.7) présente les lignes de courant pour différentes fractions volumiques d'un nanofluide avec l'eau pure et un nombre de Rayleigh  $Ra=10^4$ . Les modèles d'écoulement symétriques sont observés dans l'enceinte. On constate ça sur les valeurs des lignes de courants qui sont plus élevés.

Les lignes de courant deviennent plus serrées à côté des parois latérales à mesure que la fraction volumique augmente et plus grands pour le nanofluide  $Al_2O_3$  par rapport au  $TiO_2$ . Il noter aussi que la forme des cellules ne change pas avec la variation de fraction volumique.

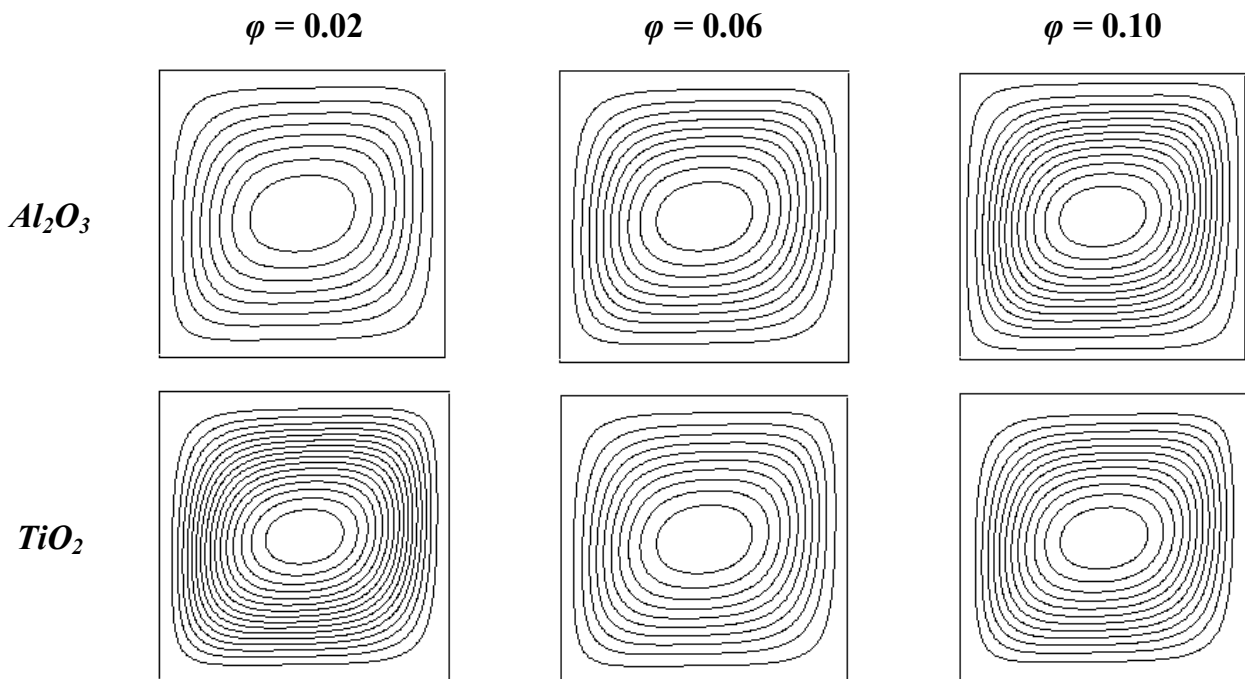


Fig.4.7-Les lignes des courants pour  $Ra=10^4$

#### 4.5.2 Effet de nombre de Rayleigh sur la vitesse verticale et lignes de courants.

Les profils de la vitesse verticale à mi-hauteur de la cavité pour nanofluide  $Al_2O_3$  sont représentés sur la figure (4.8). On constate que les courbes de profils de la vitesse verticale pour le cas nanofluide  $Al_2O_3$ , pour fraction volumique varie de 0.02 et 0.1 sont différentes, à chaque fois le nombre de Rayleigh augmenter la courbe de vitesse est formé sous forme du pic aux voisinages des parois chaude et froide de façon symétrique révélant et le Transfer de chaleur augmenter aussi.

A noter aussi que le transfert de chaleur plus supérieure pour une fraction volumique  $\varphi = 0.1$  par rapport à  $\varphi = 0.02$ . que montre l'augmentation de la fraction volumique améliore le transfert de chaleur.

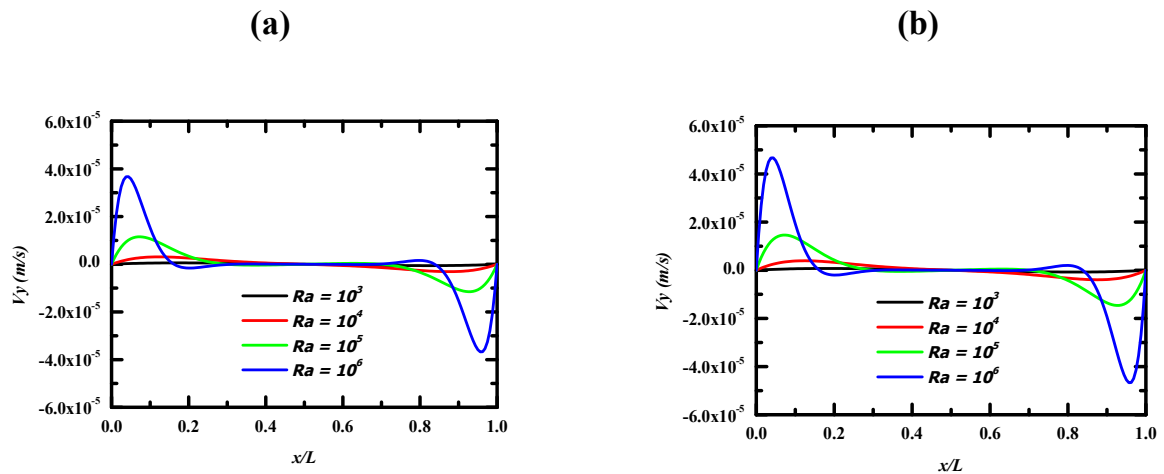


Fig.4.8- Profils de la vitesse verticale à mi-hauteur de la cavité pour nanofluide d' $Al_2O_3$ ,  
a.  $\varphi = 0.02$ , b.  $\varphi = 0.1$

La figure (4.9) montre les lignes de courant pour un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  jusqu'à  $10^6$ . L'écoulement est monocellulaire représenté par un vortex tournant appelé vortex primaire au sens contraire d'une aiguille d'une montre. Il faut noter également que la ligne de courant des zones de circulation symétriques est situé sur l'axe de symétrie de la source de chaleur quelque soit le nombre de Rayleigh.

Les lignes de courant deviennent plus serrées à côté des parois latérales à mesure que le nombre de Rayleigh augmente et plus grands pour le nanofluide  $Cu$  par rapport au  $Al_2O_3$ . Qui présentent aussi l'amélioration de la viscosité significativement plus élevée.

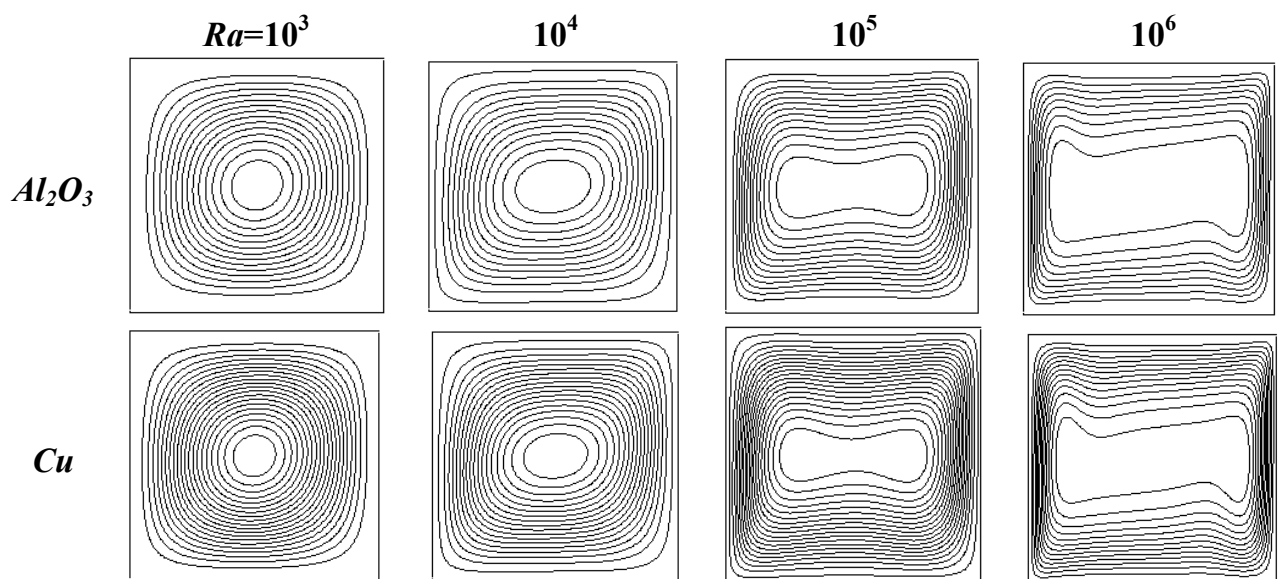


Fig.4.9- les lignes de courants pour nanofluides  $Al_2O_3$  et  $Cu$  pour  $\varphi=0.1$

### 4.5.3 Effet du type de nanofluide sur la vitesse verticale et lignes de courants.

La composante verticale de la vitesse  $V_y$  de l'écoulement est représentée sur la figure (4.10) en utilisant différents nanofluides et différents fraction volumique ( $\phi = 0.02, 0.06, 0.1$ ) pour  $Ra=10^3$ ,  $Ra=10^6$ . Les profils  $V_y$  montrent que la cellule circule dans le sens horaire. La composante verticale de la vitesse n'est pas sensible au type des nanoparticules pour utilise un nombre de Rayleigh uniquement.

La figure (4.11), présente l'effet du type de nanofluide sur lignes de courant dans l'enceinte carrée pour différentes fractions volumiques des nanofluides et de l'eau pure à différentes nombres de Rayleigh, étant donné que la source de chaleur se trouve au milieu de la paroi inférieur.

Les modèles d'écoulement symétriques sont observées dans l'enceinte. On observe aussi la formation de deux cellules contrarotatives, cet interprétation est valable pour toutes les différentes valeurs du nombre de Rayleigh.

On remarque aussi qu'avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, l'intensité de la recirculation à l'intérieur de l'enceinte augmente à cause les forces de flottabilités sont plus fort. On peut observer que les cellules circulantes sont de même forme ne changent pas avec le nombre de Rayleigh. Il faut noter que le contact de ligne des zones de circulation symétriques par rapport à l'axe de symétrie de la source de chaleur pour les nombres de Rayleigh considérés comme condition de calcul.

### 4.6 Champs de températures

Les figures (4.12), (4.13), présentent les isothermes pour différentes fractions volumiques de l'eau pure à différentes nombres de Rayleigh ( $Ra = 10^4, 10^6$ ) ces isothermes ont aussi de forme symétrique à chaque  $Ra$ . L'augmentation des fractions volumique résulte une déviation importante pour les isothermes entre le nanofluide et le fluide pure.

Le champ thermique est marqué par une stratification horizontale à l'intérieur de la cavité et par des forts gradients thermiques sur les parois actives, ce qui signifie que le transfert de chaleur se fait en grande partie par convection.

La comparaison entre les nanofluides utilisés montre qu' $AL_2O_3$  et  $Cu$  présentent un transfert thermique plus important que le  $TiO_2$ .

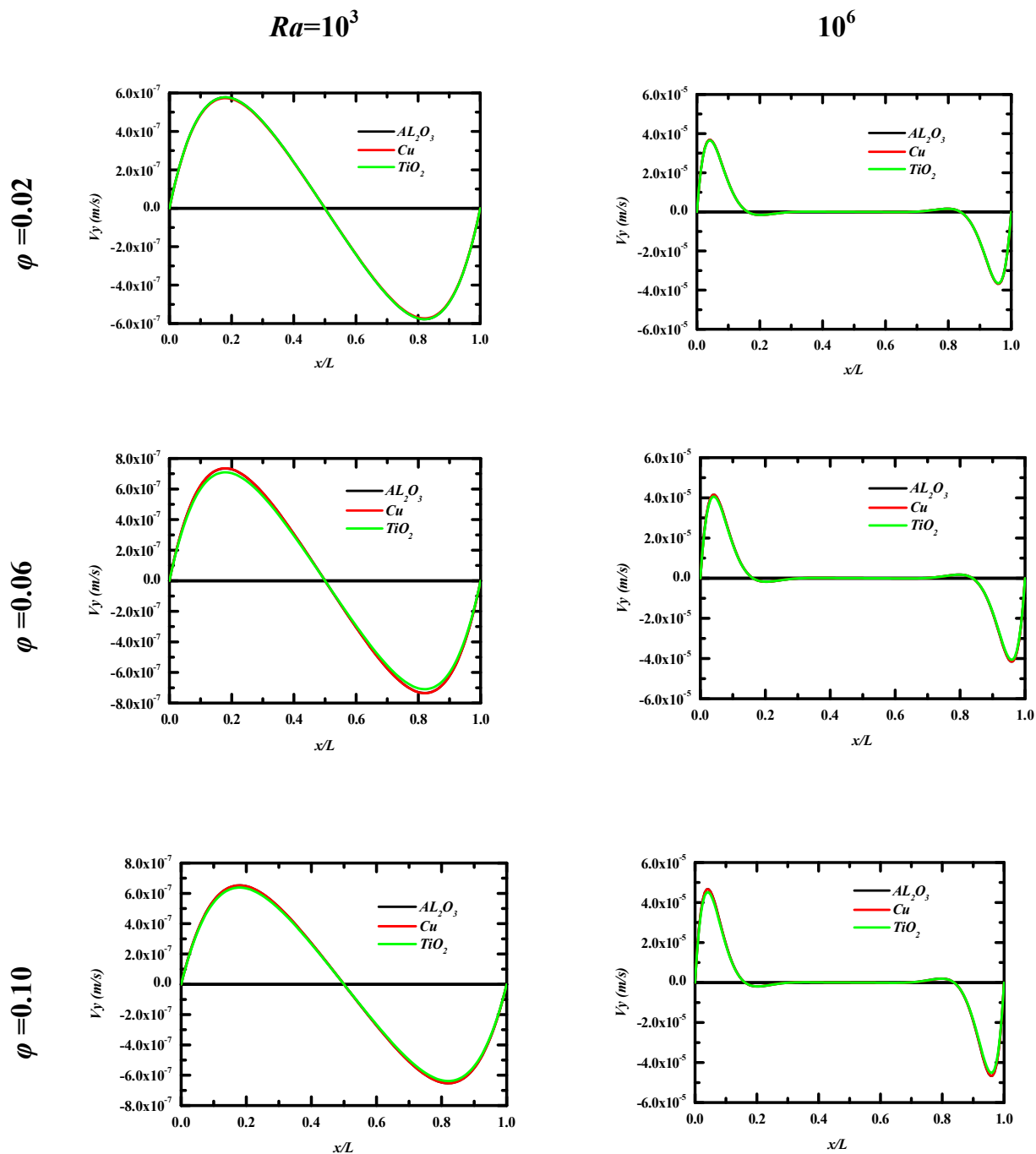


Fig.4.10- Profil de la composante verticale de la vitesse à mi-cavité pour l'eau pure et pour différents nanofluides et différents fraction volumique

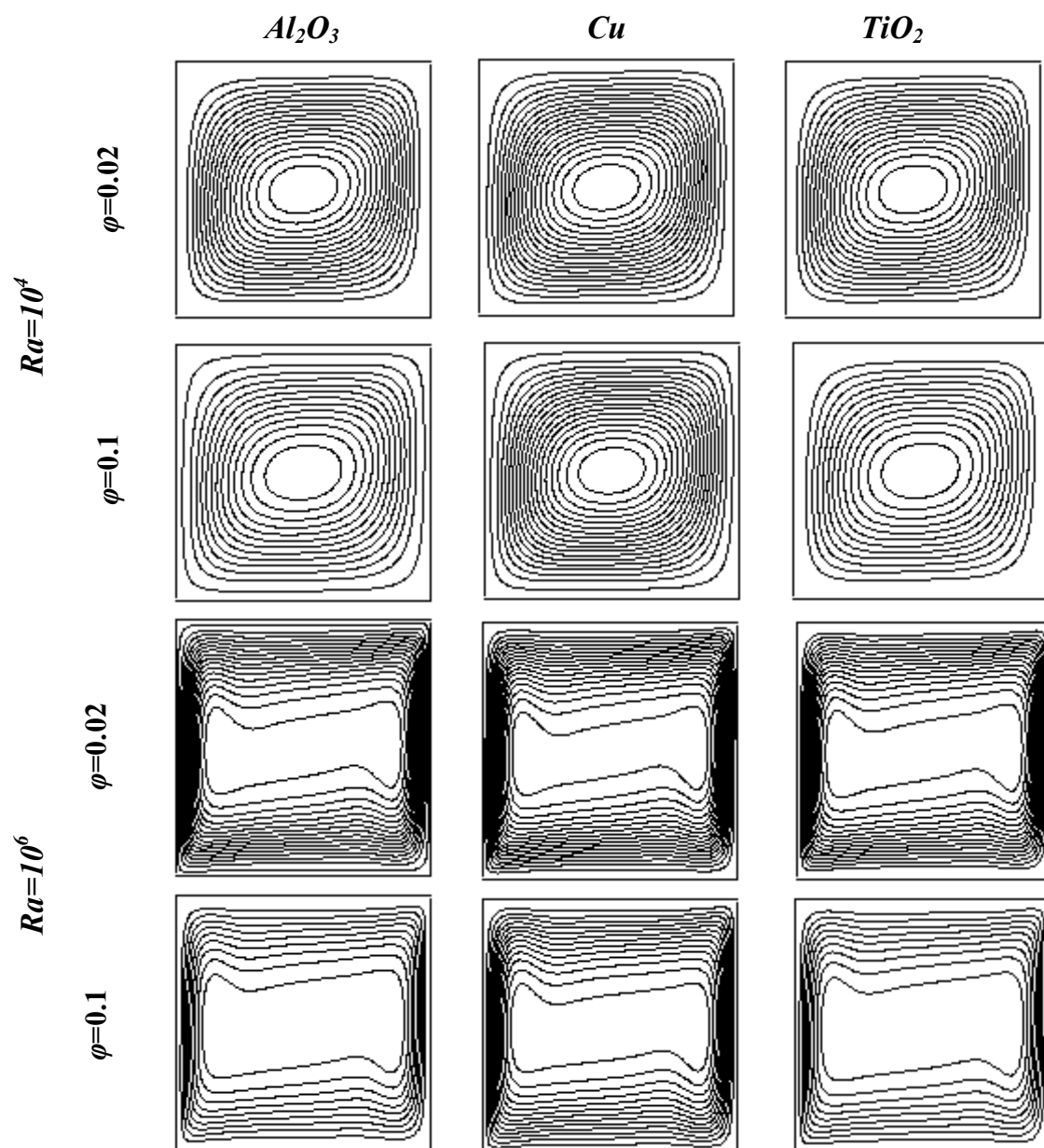


Fig.4.11- l'effet du type de nanofluide sur lignes de courant dans l'enceinte carrée



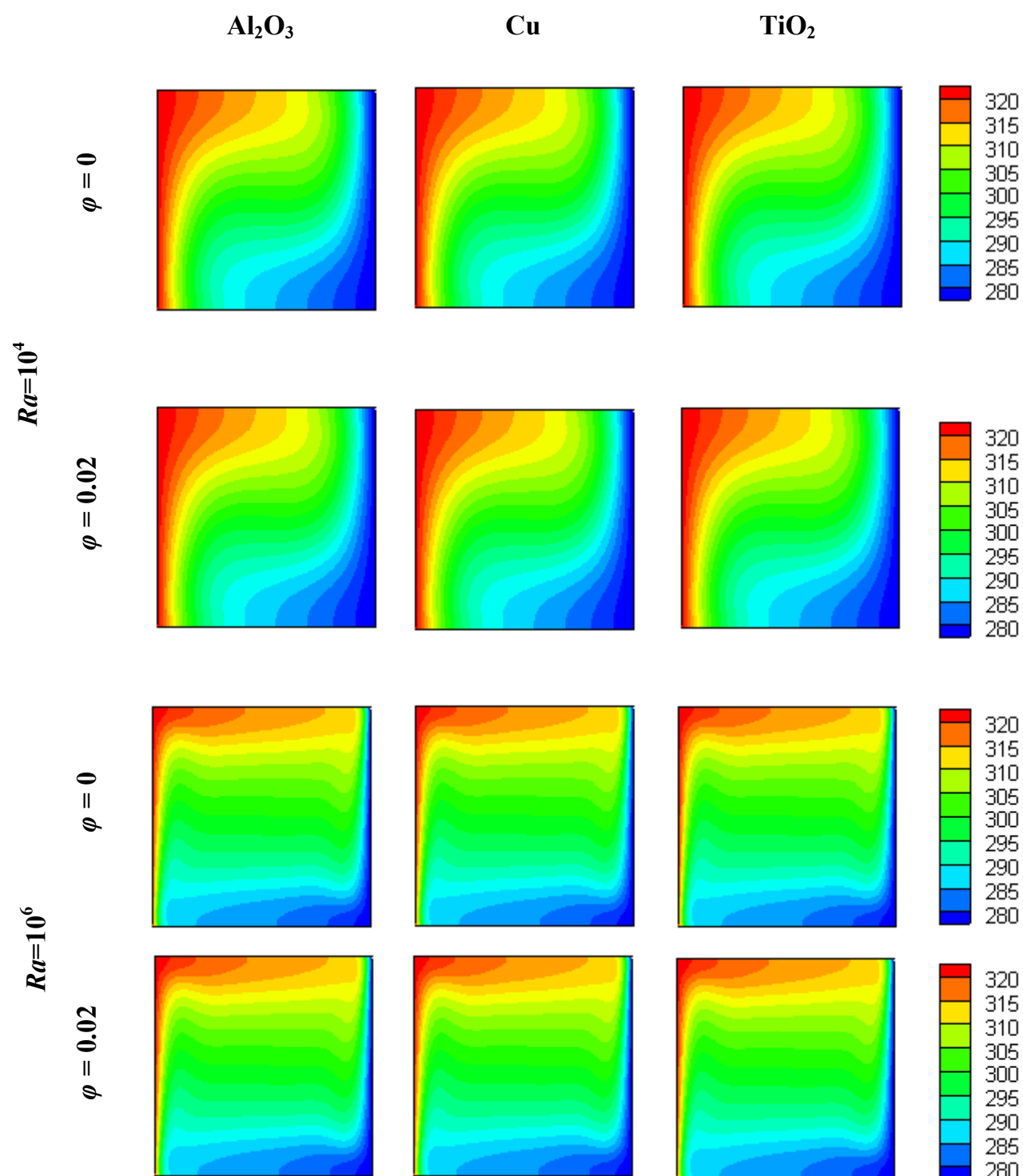


Fig.4.12- Les contours de températures pour  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = 0.02$ .

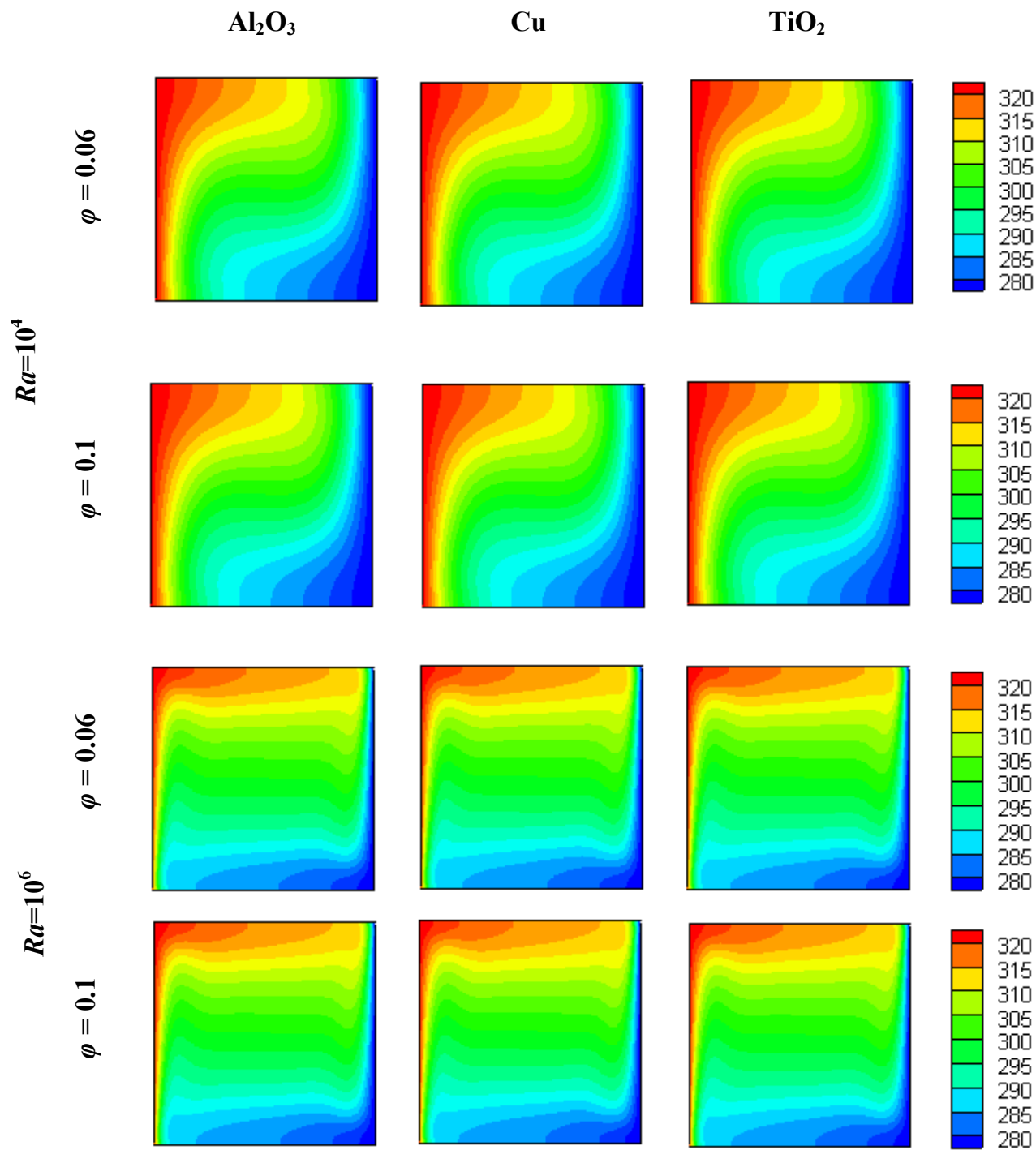


Fig.4.13- Les contours de températures pour  $\phi = 0.06$ ,  $\phi = 0.1$ .

## الملخص

يتم تنفيذ المحاكاة العددية للتحقيق في الحمل الحراري الطبيعي في النانوفلويد الذي قاعدته الماء مع ثلاثة أنواع من الجسيمات النانومترية  $TiO_2$  و  $Cu$ ،  $Al_2O_3$ . للتحليل نستخدم تجويف مربع ثنائي الأبعاد ، مجموعة رايلي محصورة بين  $10^3 \leq Ra \leq 10^5$  ، تتراوح نسبة حجم الجسيمات النانوية من 0 إلى 10% و يتم حل المعادلات التي تتحكم في التدفق وفي الانتقال الحراري بطريقة  $volume\ finis$  و استخدام *Fluent* . يتم تأكيد النتائج المحصل عليها بمقارنة متوسط عدد Nusselt مع الدراسات السابقة. حيث تشير النتائج بوضوح إلى أن ارتفاع في عدد رايلي و نسب حجم الجسيمات يؤدي إلى ارتفاع عدد Nusselt. كما تظهر النتائج أيضا أن تطور قيمة انتقال الحرارة من الممكن استخدام النانوفلويد مقارنة بالسوائل التقليدية، مما أدى إلى الإختزال في العديد من الأجهزة الصناعية.

كلمات البحث: نانوفلويد ، نقل الحرارة، الحمل الحراري الطبيعي ، المحاكاة العددية، تجويف مربع.

## Résumé

Une simulation numérique est effectuée pour examiner la convection naturelle dans les nanofluides à base d'eau avec trois nanoparticules  $Al_2O_3$ ,  $Cu$  et  $TiO_2$ . L'analyse utilise une cavité bidimensionnelle carrée, les conditions de transfert de chaleur ont été fixées pour la gamme de nombre de Rayleigh  $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ , et pour la fraction volumique des nanoparticules variant  $0 \leq \phi \leq 0,10$ . Les équations régissant l'écoulement et le champ thermique ont été résolues avec la méthode des volumes finis en utilisant le code *Fluent*. Les résultats numériques sont présentés sous forme le nombre de Nusselt moyen. Les résultats indiquent clairement que le nombre de Nusselt moyenne est une fonction croissante à la fois, le nombre de Rayleigh et la fraction volumique de nanoparticules. Les résultats montrent également que la mise en valeur de transfert de chaleur est possible en utilisant nanofluides par rapport à des fluides classiques, ce qui entraîne la compacité de nombreux appareils industriels. Cependant, de faibles nombres de Rayleigh montrent plus mise en valeur par rapport à un grand nombre de Rayleigh.

**Mots clés** : Simulation numérique, Convection naturelle, Nanofluides, Cavité carrée, Transfert de chaleur.

## Abstract

A numerical simulation is performed to investigate the natural convection in the water-based nanofluids with three nanoparticles  $Al_2O_3$ ,  $Cu$  and  $TiO_2$ . The analysis uses a two dimensional square cavity, heat transfer conditions were set for the number of Rayleigh range of  $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ , and the volume fraction of nanoparticles ranging  $0 \leq \phi \leq 0.10$ . The equations governing the flow and temperature field were solved with the finite volume method using the *Fluent* code. The numerical results are presented as the average Nusselt number. The results clearly indicate that the number average Nusselt is an increasing function of both, the Rayleigh number and the volume fraction of nanoparticles. The results also show that the development of heat transfer value is possible using nanofluids compared to conventional fluids, resulting in compactness of many industrial devices. However, low Rayleigh numbers show more enhancement with respect to a large number of Rayleigh

**Key words**: Numerical simulation, natural convection, nanofluids, square cavity, heat transfer.