

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

THÈME

Etude numérique de la convection naturelle dans une enceinte fermée différentiellement chauffée et remplie d'un nanofluide

Préparé par : Mr. BRAHIM Mohamed Amine

Mr. LAHMAR Meftah

Devant le jury :

Noms et prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وما أوتيتم من العلم الا قليلا

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,

L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que

Nous dédions ce travail à :

À nos chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer nos respects, notre amour éternel et notre considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour nous instructions et notre bien-être. Nous vous remercions pour tout le soutien et l'amour que vous nous portez depuis notre enfance et nous espérons que votre bénédiction nous accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que nous ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que
jamais nous ne vous déçoive.

À nos chers et adorables frères et sœurs

En témoignage de notre affection fraternelle, de notre profonde tendresse et reconnaissance, nous vous souhaitons une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À la mémoire de nos grands-pères et nos grandes mères

Nous aurons tant aimé que vous soyez présents.

Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.

À nos chers oncles, tantes, leurs époux et épouses

À nos chers cousins cousines

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À nos amis

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail à tous ceux que j'ai omis de citer.

Remerciements

Remerciements

Le présent travail a été effectué à l'université de Tiaret, faculté de science et technologie département de génie Mécanique.

En premier lieu et avant tout, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné la volonté et le courage pour achever ce modeste travail.

À notre encadreur de mémoire Monsieur Benameur BOUAMOUD

Nous vous remercions pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail.

Nous avons eu le grand plaisir de travailler sous votre direction, et avons trouvé auprès de vous le conseiller et le guide qui nous a reçu en toute circonstance avec sympathie, sourire et bienveillance.

Votre compétence professionnelle incontestable ainsi que vos qualités humaines vous valent l'admiration et le respect de tous.

Vous êtes et vous serez pour nous l'exemple de rigueur et de droiture dans l'exercice de la profession.

Veillez, cher Maître, trouvé dans ce modeste travail l'expression de notre haute considération, de notre sincère reconnaissance et de notre profond respect.

À Monsieur le président de mémoire Monsieur

C'est pour nous un grand honneur de vous voir siéger dans notre jury.

Nous vous sommes très reconnaissants de la spontanéité et de l'amabilité avec lesquelles vous avez accepté de juger notre travail.

Veillez trouver, chère Maître, le témoignage de notre grande Reconnaissance et de notre profond respect.

A Monsieur l'examineur de mémoire Monsieur

C'est pour nous un grand honneur de vous voir siéger dans notre jury. Nous vous sommes très reconnaissants de la spontanéité et de L'amabilité avec lesquelles vous avez accepté de juger notre travail. Veuillez trouver, chère Maître, le témoignage de notre grande Reconnaissance et de notre profond respect.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme finale de cette mémoire.

Nos remerciements s'adressent également aux enseignants et au personnel administratif de département de Génie Mécanique de l'université de Tiaret, où nous avons fait nos études de Licence et de Master, pour leurs conseils et encouragements.

Notre reconnaissance va à ceux qui ont plus particulièrement assuré le soutien affectif dans cette recherche : nos parents qui par leur présence et leurs encouragements étaient pour nous les piliers fondateurs de ce que nous sommes et ce que nous faisons.

Nous tenons à remercier tous les membres de nos familles pour leurs soutien moral et leurs encouragements durant toutes ces années.

Enfin, nos remerciements vont aussi à tous nos collègues, comme nous remercions tous ceux qui ont aidés de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur le transfert de chaleur et les nanofluides	
I.1 Introduction.....	4
I.2Transfer de chaleur	4
I.2.1 Modes de transfère de chaleur	4
I.2.2La conduction.....	4
I.2.3Types de convection	5
I.2.3.1 La convection forcée.....	5
I.2.3.2La convection naturelle.....	5
I.2.3.3Convection mixte	6
I.2.4.Le rayonnement thermique	6
I.3.Transfert thermique par convection	6
I.3.1 Définition de la convection	6
I.3.2Explication de la convection	6
I.4La différence entre la convection naturelle et la convection forcée	7
I.4.1 La convection naturelle.....	7
I.4.2La convection forcée.....	7
I.5Nanofluides	7
I.5.1Propriétés thermophysiques	8
I.5.2Préparation des nanofluides	8
I.5.3Méthode en une étape	8
I.5.4Méthode en deux étapes.....	9
I.5.5 Types de nanoparticules.....	9
I.5.6Domaines d'applications.....	10
I.5.7Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont.....	10
I.5.8Les liquides de base les plus utilisés sont:	10
I.5.9Modélisation	10
I.5.9.1 Single phase	10
I.5.9.2Two phases.....	10

I.6 Grandeurs fondamentales liées à la convection	11
I.6.1 Nombre de Grashof.....	11
I.6.2 Le nombre de Prandtl.....	11
I.6.3 Nombre de Nusselt.....	11

Chapitre II: Recherche bibliographique

II.1 Introduction	13
-------------------------	----

Chapitre III: description du problème et modèle mathématique

III.1 Description du problème	22
III.2 Les hypothèses simplificatrices.....	23
III.3 Approximation de Boussinesq	23
Le coefficient de dilatation thermique.....	23
III.4 Modèle mathématique	23
III.4.1 Équations gouvernantes dimensionnelles.....	23
III.4.2 Équations gouvernantes adimensionnelles	25
III.4.3 Conditions aux limites.....	25
III.4.4 Méthodes des volumes finis	22
III.5 Outil de simulation Gambit et fluent.....	26
III.5.1 L’outil Préprocesseur gambit.....	26
III.5.2 L’outil Solveur Fluent	27
III.5.2.1 l’algorithme SIMPLE	28
III.5.2.3 Critères de convergence.....	28

Chapitre IV: Résultats et discussion

IV.1 Optimisation du maillage	31
IV.2 Validation.....	35
IV.3 étude paramétrique	52
Conclusion.....	56

Liste des figures

Figure I.1: Modes de transfert thermiques.	6
Figure I.2 : Principe de la convection.	7
Figure I.1: Préparation de nanofluides selon la méthode en une étape.	8
Figure I.2 : Préparation de nanofluides selon une méthode en deux étapes.	9
Figure I.4 : Types de nanoparticules. [10].	10
Figure II.1 : Schéma du modèle physique.	14
Figure II.2 : Schéma du modèle physique.	15
Figure II.3 : Schéma du modèle physique.	15
Figure II.4 : Schéma du modèle physique.	16
Figure II.5 : Schéma du modèle physique.	16
Figure II.6 : Schéma du modèle physique.	17
Figure II.7 : Schéma du modèle physique.	17
Figure II.8 : Schéma du modèle physique.	18
Figure II.9 : Schéma du modèle physique.	19
Figure II.10 : Schéma du modèle physique.	19
Figure II.11 : Schéma du modèle physique.	20
Figure III.1 : Schéma du modèle physique.	22
Figure III.1 : Interface graphique du mailleur GAMBIT.	26
Figure III.2 : Menu principal de Gambit.	27
Figure III.3 : L'interface de FLUENT.	28
Figure IV.1 : Etude de maillage pour $Gr = 10^3$, nanofluide Cu-Eau $\phi = 0.06$: (a) la température-(b) Profil de la composante horizontale vitesse (c) Profil de la composante verticale de vitesse.	32
Figure IV.2 : Etude de maillage pour $Gr = 10^4$, nanofluide Cu-Eau $\phi = 0.06$: (a) la température-(b) Profil de la composante horizontale vitesse (c) Profil de la composante verticale de vitesse.	33
Figure IV.3: Etude de maillage pour $Gr = 10^5$, nanofluide Cu-Eau $\phi = 0.6$: (a) la température (b) Profil de la composante horizontale de la vitesse (c) Profil de la composante vertical de la vitesse.	35
Figure IV.4: Comparaison entre le présent travail (en couleurs) et le travail de G. BARAKOS [39]: lignes des courants (à gauche), Isothermes (à droite) pour $Ra=10^3$, $Pr = 0.71$	36
Figure IV.5: Comparaison entre le présent travail (en couleurs) et le travail de G. BARAKOS [39]: lignes des courants (à gauche), Isothermes (à droite) pour $Ra=10^4$, $Pr = 0.71$	37
Figure IV.6 : Comparaison entre le présent travail (en couleurs) et le travail de G. BARAKOS [39]: lignes des courants (à gauche), Isothermes (à droite) pour $Ra=10^5$, $Pr = 0.71$	38
Figure IV.7: Comparaison entre le présent travail (en couleurs) et le travail de G. BARAKOS [39]: lignes des courants (à gauche), Isothermes (à droite) pour $Ra=10^6$, $Pr = 0.71$	39

Figure IV.8: Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre Ra : Comparaison entre le présent travail avec des travaux publiés pour $Pr = 0.71$	40
Figure IV.9: Profils de température : Comparaison entre le travail présent et le travail de Khanafer et al[35] pour l'eau ($Pr = 6.2$)	41
Figure IV.10 : Profils de température : Comparaison entre le travail présent et le travail de Khanafer et al. pour le nanofluide ($\phi=10\%$).....	41
Figure IV.11 : Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi =00\%$, (a) $Gr =10^3$ -(b) $Gr=10^4$ -(c) $Gr=10^5$	42
Figure IV.12 : Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi =2\%$, (a) $Gr =10^3$, (b) $Gr=10^4$, (c) $Gr=10^5$	43
Figure IV.13: Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi =04\%$, (a) $Gr =10^3$ -(b) $Gr=10^4$ -(c) $Gr=10^5$	44
Figure IV.14 : Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi =06\%$, (a) $Gr =10^3$ -(b) $Gr=10^4$ -(c) $Gr=10^5$	45
Figure IV.15 : Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi =08\%$, (a) $Gr =10^3$ -(b) $Gr=10^4$ -(c) $Gr=10^5$	46
Figure IV.16 :Distribution de la composante verticale de vitesse pour différentes valeurs de ϕ , $Gr=10^4$	42
Figure IV.17 :Distribution de la composante verticale de vitesse pour différentes valeurs de ϕ , $Gr=10^5$	42
Figure IV.18 :Variations du nombre de Nusselt moyen Al_2O_3 -Eau en fonction de Gr et ϕ pour le nanofluide (Al_2O_3 -Eau)	48
Figure IV.19:Variations du nombre de Nusselt local Al_2O_3 -Eau en fonction de Gr et ϕ pour le nanofluide (Al_2O_3 -Eau).....	48
Figure IV.20: Isothermes (droite), lignes de courant (à gauche) pour Al_2O_3 -Eau 8% (--) et l'eau pure (- - -) : (a) $Gr =10^3$, (b) $Gr=10^4$, (c) $Gr=10^5$	49
Figure IV.21 : comparaison entre Al_2O_3 -Eau (--) et TiO_2 -Eau (- -), pour (a) $Gr =10^3$, (b) $Gr=10^4$, (c) $Gr=10^5$, $\phi =8\%$	50
Figure IV.22:Variations du nombre de Nusselt local pour différents nombres de Gr et différents types de nanoparticules $\phi =4\%$	51
Figure IV.23: comparaison entre les profils de vitesses (V -Vilocity) en fonction des types de nanoparticules pour $Gr=10^5$	52
Figure IV.24: Variations du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Gr , types de nanoparticules, concentration des nanoparticules ϕ	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Les propriétés effectives du l'eau et Nanoparticules.....	22
Tableau 2	Comparaison de nos résultats de nombre de Nusselt avec les résultats auteurs.	40

Nomenclature

- A Rapport de forme
 β Coefficient d'expansion thermique à pression constante [K⁻¹]
 C_p Chaleur spécifique massique [J/Kg.K]
 g gravitationnel accélération [m/s²]
T Champ de température [K]
 x Coordonnée spatiale [m]
 y Coordonnée spatiale [m]

Symboles grecs

- λ Conductivité thermique [W/m.K]
 μ Viscosité dynamique [kg/m.s]
 ν Viscosité cinématique [m²/s]
 Φ Densité surfacique de flux [W/m²]
 ρ Masse volumique [Kg/m³]

Paramètres géométriques de la cavité

- L Longueur et hauteur de la cavité [m]
 θ Température adimensionnelle [-]

Nombres adimensionnels

$$\text{Nombre de Grashof } Gr = \frac{g \beta L^3 (T_p - T_{ext})}{\nu^2}$$

$$\text{Nombre de Nusselt } Nu = h \frac{L}{\lambda}$$

Nombre de Nusselt local $Nu_x = h_x \frac{L}{\lambda}$

Nombre de Prandtl $Pr = \mu \frac{C_p}{\lambda}$

Nombre de Rayleigh $Ra = Gr. Pr = \frac{g\beta}{\nu\alpha}(T_s - T_\infty) L^3$

Indices

c Paroi chaude

f Paroi froide

Abbreviations

2D Bidimensionnel

CFD Computational Fluid Dynamics

SIMPLE Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

Introduction Générale

Introduction Générale

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques. Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont :

- l'augmentation de l'énergie transmise ou absorbée par une surface,
- l'obtention du meilleur rendement d'une source de chaleur,
- la réduction ou l'augmentation du passage d'un débit de chaleur d'un milieu à un autre.

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie. Lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un système à des températures différentes sont mises en contact, on constate une tendance à l'égalisation des températures. On dit qu'il y'a transfert de chaleur.

Le transfert de chaleur obéit aux principes fondamentaux de la thermodynamique, mais les lois de la thermodynamique ne suffisent pas pour expliquer de quelle manière s'effectue le transfert de chaleur ou pour prévoir la vitesse de ce transfert. Le transfert de chaleur est donc régi par d'autres lois, très importantes dans différentes branches de l'industrie. Citons par exemple pour le génie chimique.

La conception et le fonctionnement des évaporateurs, des condenseurs, des échangeurs entre fluide chaud et froid, des colonnes à distillation, des réacteurs, etc...

Les chercheurs manipulent toujours avec les données pour obtenir des meilleurs résultats et gagner du temps ou d'argent, mieux si gagner les deux.

Le transfert thermique est très important pour beaucoup de domaines d'applications par exemple : les systèmes mécaniques ou électroniques, les systèmes de chauffage de fluides, le séchage des produits agro-alimentaires, les échangeurs de chaleur et les serres agricoles, le domaine de climatisation et le chauffage d'habitat, le refroidissement....

Le transfert thermique se divise en quatre modes :

- Conduction.
- Rayonnement.
- Convection (naturelle, forcée et mixte) :

La convection naturelle ou libre, pour laquelle le mouvement du fluide résulte simplement de la variation de la masse volumique entre les régions chaudes et froides du fluide en présence d'un champ de gravité.

La convection forcée, pour laquelle le mouvement du fluide est produit par une action extérieure (pompe, ventilateur, vent...).

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur.

Toutefois, le développement de l'un quelconque de ces mécanismes nécessite l'existence d'une différence de température qui joue le rôle de différence de potentiel pour l'échange de chaleur.

Le but de notre travail est d'étudier numériquement et faire une simulation de la convection naturelle dans cette cavité qui a une paroi chaude du côté gauche et une paroi froide du côté droit tandis que les deux autres parois sont supposées adiabatiques.

On va remplir cette enceinte par l'air pour vérifier et comparé notre simulation avec d'autres études après on va simuler avec des nanofluides (Al_2O_3 , Cu, TiO_2)

Nous allons parler de tout ça dans le premier chapitre.

Dans le deuxième chapitre on va discuter la préparation et modélisation de ce nanofluide puis parler sur les applications utilisées surtout le code de calcul "FLUENT", et la recherche bibliographique.

Le troisième chapitre contient la description du problème.

Après la validation et discussion au quatrième chapitre.

On terminera par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Généralités sur le transfert de chaleur et les nanofluides

I.1 Introduction

Le développement industriel à un problème de fortes chaleurs, en peut surmontée Cette charge thermique élevée par l'augmentation de taux de transfert de chaleur. Qu'il va peut-être augmenter en augmentant le gradient de température, la zone de transfert de chaleur ou en améliorant les propriétés thermophysiques des fluides de transfert de chaleur. L'émergence de la technologie moderne offre une excellente opportunité de traitement et de production de particules d'une taille comprise entre 1 et 100 nm, appelées nanoparticules ayant une grande surface spécifique. La suspension colloïdale de nanoparticules dans le fluide conventionnel appelé nanofluide a une conductivité thermique supérieure à celle des fluides conventionnels.[1]

Dans ce chapitre, on va présenter des généralités sur le transfert de chaleur et ses modes. et Nous nous concentrons sur la convection naturelle, on va parler sur les enceintes, et donner des définitions sur les nanofluides, leur composants, leur propriétés thermophysiques, leur caractérisation thermo-hydraulique, et les applications des nanofluides. Après Nous allons définir des Grandeurs fondamentales liées à la convection.

I.2 Transfert de chaleur

Le Transfert de chaleur ou un transfert thermique, appelé plus communément chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes. D'autre façon les phénomènes de déplacement de chaleur d'un corps a un autre. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Contrairement au travail, la chaleur est le bilan de transferts d'énergie microscopiques et désordonnés. Le transfert se passe quand il y a deux systèmes ou plus, et d'un système ou la température est plus élevée vers un système ou elle est moins. On distingue trois types de transfert thermique.

I.2.1 Modes de transfère de chaleur

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons :

- Par conduction.
- Par rayonnement.
- Par convection.

I.2.2 La conduction

La conduction thermique est spécifique aux solides (bois, métaux, etc.), elle est un transfert direct au sein d'un milieu matériel, qui se fait par propagation de proche en proche de la chaleur. Le mouvement d'agitation thermique (flux de chaleur) va toujours des zones chaudes vers les zones froides. Les mauvais conducteurs (gaz, laine de verre ou polystyrène)

sont appelés isolants. Par exemples une conduction thermique se produit entre une personne pieds nus et un carrelage très chaud (le transfert de chaleur va se faire du carrelage aux pieds). Le beurre fond plus vite sur du métal chaud (poêle en acier) que sur d'autres matériaux chauffés (bois), donc le métal est un meilleur conducteur thermique, en effet la conductivité de l'acier ($50 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$) est plus élevée que celle du bois ($0,2 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$).

I.2.3 La convection

La convection thermique est spécifique aux fluides (liquide, gaz, air), ainsi qu'aux éléments déformables (comme les roches à hautes pressions dans le manteau terrestre), elle est liée au mouvement du fluide, donc à un transport de matière.

L'état fluide regroupe l'état gazeux et l'état liquide qui ont la faculté d'être déformables. Il s'adapte à la forme du récipient offert, et peuvent s'écouler. Lorsque que l'on met ses mains au-dessus d'un feu de cheminée (ou de barbecue), on ressent de l'air chaud, en effet celui-ci est produit par convection. En effet, la convection se fait grâce aux molécules d'air (dioxygène, diazote), qui se trouvent au-dessus du feu (ou d'une plaque chauffante) ; ces molécules montent vers le haut, où il fait plus froid (lors de leur montée, elles entrent en contact avec la main, d'où la sensation de chaleur). Lorsqu'on souffle sur une cuillerée de soupe brûlante, elle refroidit plus vite (les molécules du fluide chaud sont remplacées par de nouvelles molécules à plus basse température). [2]

I.2.3 Types de convection

Il y a deux types de convection :

I.2.3.1 La convection forcée

Elle est causée par l'effet d'une action mécanique, quand le mouvement du fluide est déterminé par des actions aérodynamiques étrangères au phénomène thermique lui-même, Affecté par un facteur externe à la convection naturelle.

I.2.3.2 La convection naturelle

Le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, qui est lui mêmes créé à cause des différences de température existant dans le fluide.

Le mouvement de fluide ou gaz, résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température, cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules fluide.

Le contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide Causant La convection naturelle et crée des différences de masse volumique, génératrice du mouvement au sein du fluide. [3]

I.2.3.3 Convection mixte

Quand les deux précédents types de convection (naturelle et forcée) peuvent avoir lieu simultanément on appelle cette phénomène convection mixte.

I.2.4. Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est une émission de rayonnement électromagnétique par un corps chaud (généralement très chaud), le rayonnement a la particularité de se déplacer dans le vide (rayonnement solaire). L'énergie électromagnétique reçue par le système est absorbée et convertie en énergie thermique (chaleur). [4]

Par exemple le fort rayonnement du Soleil fait chauffer l'eau des mers et les océans et les évaporer. Le rayonnement se fait grâce aux ondes électromagnétiques émises par le Soleil, réchauffant alors l'eau capte ces ondes électromagnétiques.

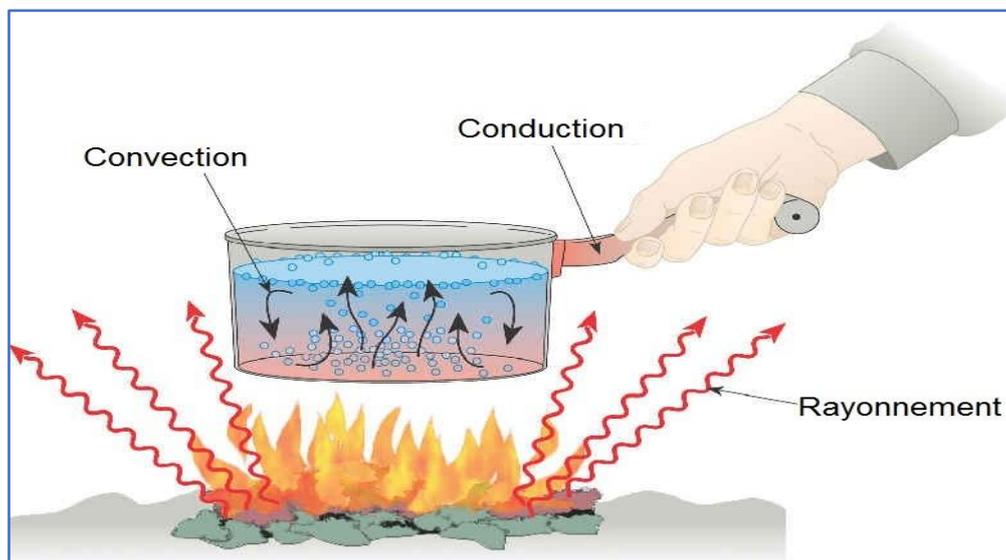


Figure I.1: Modes de transfert thermiques.

I.3 Transfert thermique par convection

I.3.1 Définition de la convection

Il s'agit d'un transfert de chaleur qui s'effectue grâce à un mouvement de matière dans un milieu liquide ou gazeux.

En effet, la circulation d'un fluide chauffe et fait circuler la chaleur. C'est donc un terme plutôt réservé aux fluides. La chaleur est propagée par déplacement de matière.

I.3.2 Explication de la convection

Lors de la convection les mouvements se produisent en général de manière spontanée sous l'effet d'une différence de température entre des zones d'un fluide.

En effet, la densité d'une substance dépend de sa température : un gaz ou un liquide possède une densité d'autant plus faible que sa température est élevée.

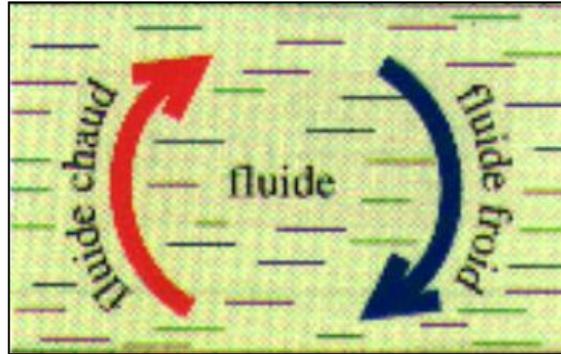


Figure I.2 : Principe de la convection.

Par conséquent, un fluide chaud a donc tendance à s'élever et un fluide froid à descendre ce qui provoque des courants ascendants ou descendants que l'on retrouve par exemple dans l'air ou dans l'eau. Au cours de ces mouvements, les fluides chauds transmettent de la chaleur aux fluides plus froids.

I.4 La différence entre la convection naturelle et la convection forcée

I.4.1 La convection naturelle

Il se retrouve dans les phénomènes environnementaux. Quand une zone de l'atmosphère change de température et se déplace verticalement : le changement de température influe sur sa masse volumique. Il crée un mouvement de convection à l'origine des phénomènes naturels comme par exemple les courants marins. [5]

I.4.2 La convection forcée

Ce phénomène résulte de l'intervention d'un facteur mécanique externe. On trouve ce système de convection forcée dans le chauffage central avec accélérateur, les chauffe-eaux solaires ou même la circulation sanguine ! (les échanges thermiques entre les organes et la peau se font essentiellement par convection, assurée grâce à la circulation sanguine). [6]

I.4.3 La convection mixte

Correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée), la vitesse d'écoulement fictives dues aux deux types de convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. [7]

I.5 Nanofluides

Un nanofluide est un fluide contenant des particules de taille nanométrique comprise de 1 à 100 nm, appelées nanoparticules. Ces fluides sont des suspensions colloïdales modifiées de nanoparticules dans un fluide de base. Les nanoparticules utilisées dans les

nanofluides sont généralement constituées de métaux, d'oxydes, de carbures ou de nanotubes de carbone. Les fluides de base courants comprennent l'eau, l'éthylène glycol et l'huile. [8]

I.5.1 Propriétés thermophysiques

Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu, etc.). De nombreux groupes de recherche tentent de comprendre quels sont le ou les mécanismes à l'origine de telles différences mais aucune phénoménologie n'a pu être encore formulée de manière concise et satisfaisante.

I.5.2 Préparation des nanofluides

Les nanofluides sont les suspensions colloïdales de particules de taille nanométrique (1 à 100 nm) dispersées dans des fluides de transfert de chaleur classiques (appelés fluides de base) tels que l'eau, l'éthylène glycol, l'huile de moteur, etc. Les nanofluides peuvent être préparés selon deux méthodes, à savoir :

I.5.3 Méthode en une étape

Une méthode en une étape est un processus qui combine la production de nanoparticules avec la synthèse de nanofluides. Les nanoparticules sont directement produites par une technique de dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou par condensation des nanoparticules issues de la phase vapeur dans un fluide à faible pression appelé VEROS (évaporation sous vide sur un substrat d'huile en cours d'exécution).

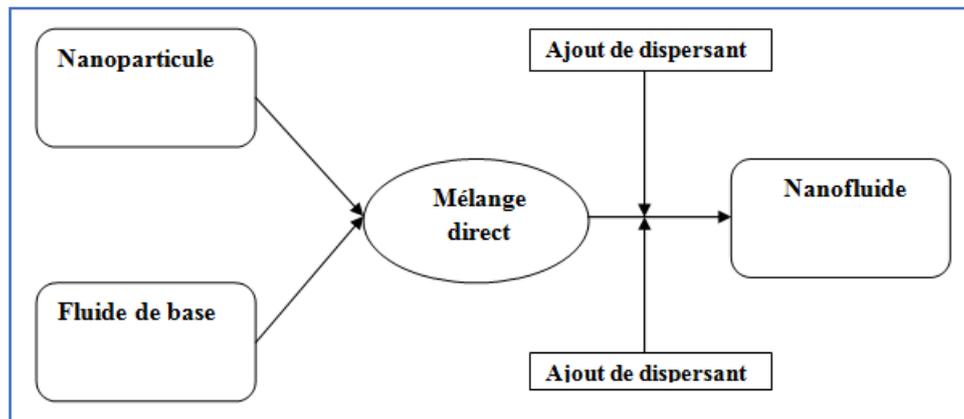


Figure I.1: Préparation de nanofluides selon la méthode en une étape.

I.5.4 Méthode en deux étapes

La méthode la plus largement utilisée pour la préparation de nanofluides est la méthode en deux étapes. Généralement, cette méthode comprend deux étapes (**Figure II.2**). Dans la première étape, des nanomatériaux tels que des nanoparticules ou des nanofibres, des nanotubes, etc. sont produits sous forme de poudre sèche. Au cours de la deuxième étape, les nanomatériaux produits se dispersent directement dans le fluide de base à l'aide d'un dispositif de dispersion tel qu'un agitateur magnétique, un homogénéisateur ou en utilisant des dispositifs à ultrasons tels qu'un bain à ultrasons, un processeur à ultrasons, etc.

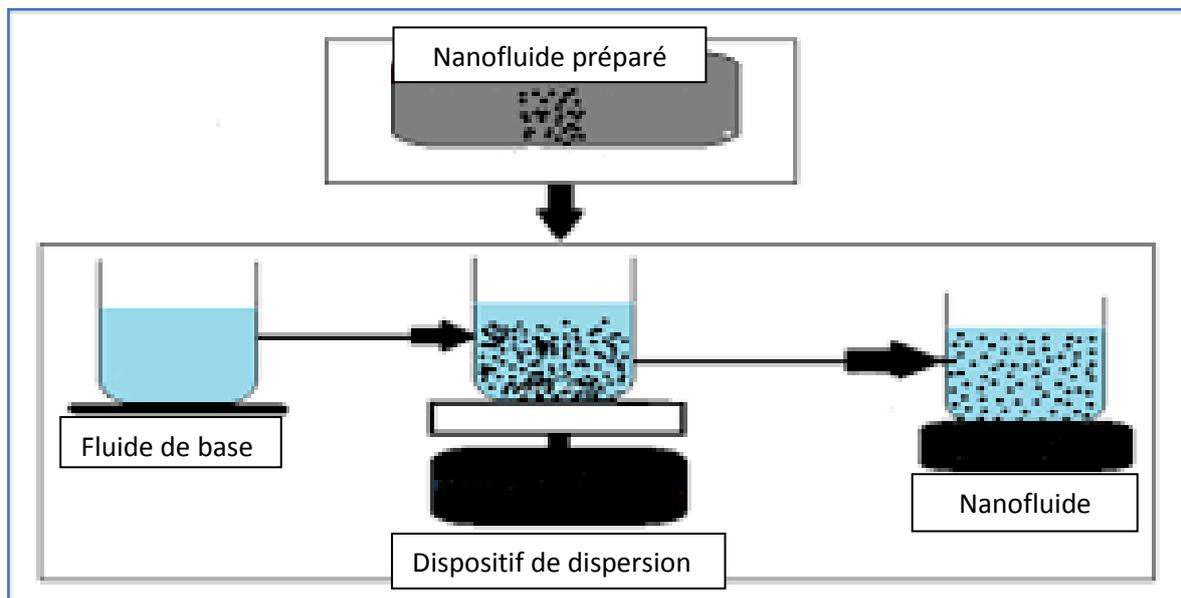


Figure I.2 : Préparation de nanofluides selon une méthode en deux étapes.

I.5.5 Types de nanoparticules

Les nanoparticules d'une manière générale peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories (**Figure II.4**) :

- _ Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou d'oxydes de cuivre (Oxyde d'aluminium Al_2O_3 , oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO_2 ...).
- _ Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO_2 , nanotube de silicium...). [9]

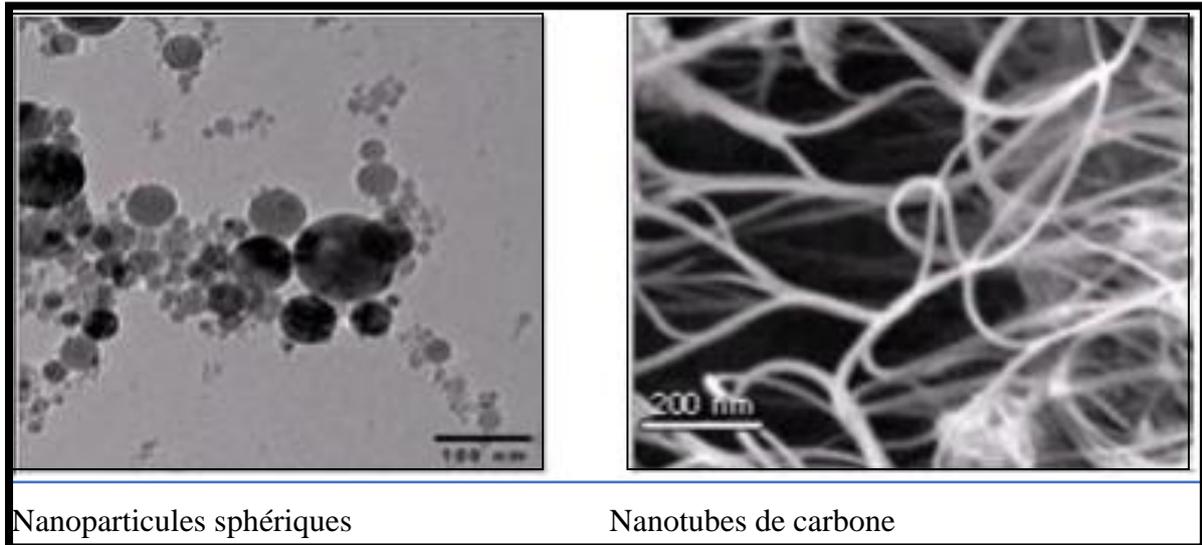


Figure I.4 : Types de nanoparticules. [10]

I.5.6 Domaines d'applications

Les transferts de chaleur au sein de nanofluides conduit à de nombreuses applications pratiques et industrielles, comme la climatisation et le refroidissement mécaniques ou électroniques [10], refroidissement industriel, fluides intelligents, réacteurs nucléaires, administration de médicaments à base de nanofluide, application automobile, liquide de refroidissement nanofluide, nanofluide dans le carburant, refroidissement des micropuces, applications fluidiques à petite échelle, extraction de l'énergie géothermique et d'autres sources d'énergie, Cryoconservation et nanocryochirurgie, détection et imagerie...

I.5.7 Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont

L'oxyde d'aluminium Al_2O_3 , l'aluminium Al, le cuivre Cu, l'oxyde de cuivre CuO , l'or, Au, l'argent Ag, les nanotubes de carbone, le silicone Si, le dioxyde de titane TiO_2 . [10]

I.5.8 Les liquides de base les plus utilisés sont:

L'eau, l'éthylène-glycol EG, les huiles, le Toluène. [10]

I.5.9 Modélisation

Pour faire une simulation il y a deux méthodes, supposons que le nanofluide est :

I.5.9.1 Single phase

Le mélange est homogène, et ça ce que nous allons supposer dans notre travail.

I.5.9.2 Two phases

Calculé les caractéristiques et faire la simulation du fluide seul à côté, et la simulation de nanoparticule (métal) à côté. Après ont collecté les résultats.

I.6 Grandeurs fondamentales liées à la convection

I.6.1 Nombre de Grashof

Nombre sans dimension correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses.

On le définit de la manière suivante :

Nombre de Grashof

$$Gr = \frac{g \beta L^3 (T_p - T_{ext})}{\nu^2} \quad (I.1)$$

Pour le nombre de Gr :

Si $Gr < 10^5$; l'écoulement est laminaire.

Si $Gr > 10^8$; l'écoulement est turbulent.

I.6.2 Le nombre de Prandtl

Nombre sans dimension. Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique.

Nombre de Prandtl

$$Pr = \mu \frac{C_p}{\lambda} \quad (I.2)$$

I.6.3 Nombre de Nusselt

Rapport de la quantité de chaleur échangée par convection à la quantité de chaleur échangée par :

Nombre de Nusselt
$$Nu = h \frac{L}{\lambda} \quad (I.3)$$

Nombre de Nusselt local

$$Nu_x = h_x \frac{L}{\lambda} \quad (I.4)$$

Chapitre 2 : Recherches Bibliographiques

II.1 Introduction

Dans notre étude, on va étudier numériquement la convection naturelle dans une enceinte carrée fermée différentiellement chauffée et remplie d'un nanofluide. De nombreuses recherches et études ont été menées les années passées sur la convection naturelle des nanofluides, son importance, ses domaines et son amélioration.

II.2 Recherche bibliographique

F. Hakan et al. [11] Ont étudié numériquement la convection naturelle dans une enceinte rectangulaire partiellement chauffée et remplie de nanofluide. La technique des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations qui régissent l'écoulement et le transfert de chaleur par convection naturelle. Les calculs ont été effectués pour les valeurs du nombre de Rayleigh ($10^3, 10^4, 10^5$), la hauteur de l'élément chauffant ($0.1 \leq h \leq 0.75$), l'emplacement de l'élément chauffant entre 0.25 et 0.75, le rapport de forme A est de 0.5 jusqu'à 2, différents types de nanoparticules ont été testés (Cu, TiO_2 , Al_2O_3). Leur étude a montré que l'amélioration du transfert est proportionnelle avec le nombre de Rayleigh et la valeur de la fraction volumique des nanoparticules, L'augmentation de la partie chauffée améliore le transfert de chaleur, Le type de nanofluide est un facteur clé du transfert de chaleur. Les valeurs les plus élevées sont obtenues en utilisant nanoparticules de Cu, Lors de l'augmentation de la taille de l'élément chauffant, la différence de transfert de chaleur les valeurs augmentent et dépendent principalement du type de nanofluide utilisé. Pour les enceintes rectangulaires, l'amélioration du transfert de chaleur en raison de la présence de nanoparticules, est plus importante en cas d'un rapport de forme faible.

Une étude numérique portant sur la convection naturelle dans les enceintes a été présentée par H. Salhi. [12] Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de Rayleigh ($Ra=10^3, 10^4, 10^5, 10^6$), l'angle d'inclinaison ($\gamma= 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$), différentes fractions volumiques pour le fluide pure ($\phi=0$) et pour les nanoparticules (Ag et TiO_2 , Φ égale à 0.1, 0.2). Il a trouvé dans son étude 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 , donc le type de nanoparticule est un facteur principal pour le perfectionnement du transfert thermique. Les paramètres de la géométrie complexe ondulée (longueur d'onde et le rapport d'amplitude) permettent d'améliorer le transfert de chaleur.

Benzema et al. [13] Présentent une étude numérique de la convection de Rayleigh-Bénard dans une enceinte carrée remplie de nanofluide et soumise à un champ magnétique

uniforme. L'étude a été faite pour un nombre de Rayleigh $Ra = 10^5$, $Pr = 6.2$, diamètre de nanoparticules Al_2O_3 utilisés égale à 100 nm. Ils ont observé que Le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation du nombre de Hartmann. L'ajout de nanoparticules au fluide de base améliore le transfert thermique uniquement en présence d'un champ magnétique.

Jou et al. [14] Ont effectué une recherche numérique par différence finies sur l'amélioration du transfert de chaleur par convection naturelle avec nanofluides dans des enceintes rectangulaires. La cavité étudiée est différentiellement chauffée. Ils ont utilisé les nanoparticules de cuivre (Cu) suspendues dans l'eau. Le nombre de Rayleigh a été varié entre 10^3 et 10^6 , le pourcentage de Cu Φ est de 0 à 20%, et le rapport de forme de $A = 0.5, 1, 2$. Les chercheurs ont trouvé que l'augmentation de fraction volumique de nanofluides augmenté le transfert de chaleur.

Ho et al. [15] ont fait une simulation numérique basée sur la méthode des volumes finis de la convection naturelle des nanofluides dans une enceinte carrée, effets dus aux incertitudes de viscosité et de conductivité thermique. Ils ont considéré l'eau qui contient des nanoparticules de Al_2O_3 , le nombre de Rayleigh varie entre 10^3 et 10^6 , la concentration entre 0 et 4% et le rapport de forme $A=1.0$. Leur étude montre une différence significative entre les améliorations de la viscosité dynamique estimées à partir des deux formules adoptées conduit à une efficacité de transfert de chaleur contradictoire du nanofluide $Nu = C (1+\phi)^m Ra^n$. N.S.

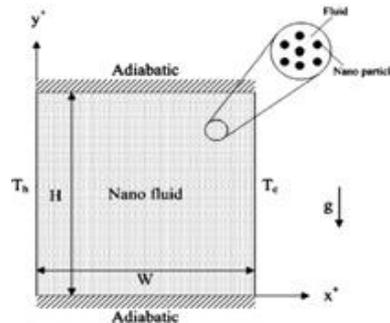


Figure II.1 : Schéma du modèle physique.

Chemloul et M.A. [16] Belmiloud ont fait une étude sur l'effet des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique dans une cavité carrée. Ils utilisent trois différents types de nanoparticules (Cu, TiO_2 , Al_2O_3), La fraction volumique des nanoparticules dans l'eau est de $0 \leq \Phi \leq 0.15$. Le nombre de Prandtl est fixé à $Pr = 6.2$, et le nombre de Rayleigh est de 10^3 jusqu'à 10^6 . Les résultats obtenus montraient que l'augmentation du nombre de Rayleigh améliore le transfert de chaleur. L'utilisation des différents types de nano fluides affecter le transfert thermique, dépend de l'augmentation de la valeur de la fraction volumique des nanoparticules. L'amélioration du transfert thermique le plus élevé est obtenu si les nanoparticules utilisées sont de cuivre (Cu).

Oztop et al, [17] ont étudié numériquement la convection naturelle dans les enceintes rectangulaires partiellement chauffés et remplies par différents nanofluides (Al_2O_3 , Cu, TiO_2) avec de l'eau, la concentration Φ est de 0 à 20%, le nombre de Rayleigh de 10^3 jusqu'à 10^6 et $A= 0.5$ à 2. On a trouvé que l'augmentation de la valeur de la fraction volumique des nanoparticules provoque une augmentation du transfert de chaleur. L'effet de la concentration en nanoparticules sur le nombre de Nusselt est plus prononcé à forte fraction volumique qu'à faible fraction volumique.

Un autre travail sur le refroidissement dans une enceinte carrée remplie avec des nanofluides (eau + Cu / TiO_2 / Al_2O_3 / Ag) a été réalisé par Aminossadati et al. [18] Ils utilisaient la méthode des volumes finis, le nombre de Rayleigh variant de 10^3 à 10^6 , $A = 1$, et Φ est de 0 à 20%. Ils ont trouvé que L'ajout de nanoparticules dans l'eau pure améliore les performances de refroidissement, en particulier à faible nombre de Rayleigh.

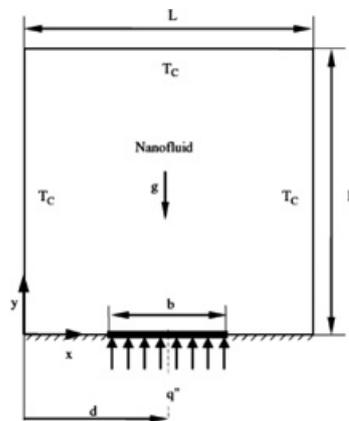


Figure II.2 : Schéma du modèle physique.

Lin et al. [19] Ont fait une recherche sur la convection naturelle par nanofluides dans une cavité verticale, ils ont étudié les effets d'un diamètre de particule et d'une température non uniformes sur la conductivité thermique, ils prennent l'eau + Al_2O_3 comme nanofluides, La fraction volumique des nanoparticules dans l'eau est de $0 \leq \Phi \leq 0.05$ et le Gr est de 10^3 jusqu'à 10^6 , le diamètre de nanoparticules est de 5 jusqu'à 250 nm et $A=1$. Ils ont trouvé que L'amélioration et l'atténuation du transfert de chaleur peuvent être attribuées à l'effet dominant du mouvement brownien provoqué par la convection thermique.

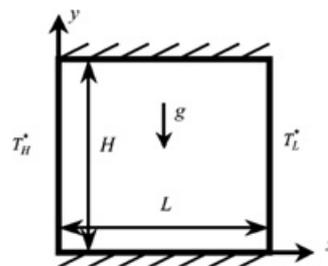


Figure II.3 : Schéma du modèle physique.

M. Corcione [20] ont mené une recherche sur les caractéristiques de transfert de chaleur des nanofluides à flottabilité dans des enceintes rectangulaires chauffées différemment au niveau des parois latérales. Ils ont utilisé Cu, TiO₂ et Al₂O₃ comme nanoparticules et l'eau ou EG (l'éthylène-glycol) comme fluide de base, la température a été variée entre 249 et 324 K, le diamètre de nanoparticules et de 25 jusqu'à 150 nm, A entre 1 et 40, la concentration de 0 à 6%. On a constaté que la fraction volumique optimale augmente légèrement avec la diminution de la taille des nanoparticules et augmente beaucoup plus remarquablement avec l'augmentation de la température moyenne des nanofluides et de la minceur de l'enceinte.

Santra et al. [21] ont présenté une étude sur l'augmentation du transfert de chaleur dans une cavité carrée chauffée de manière différente à l'aide d'un nanofluide d'eau et cuivre. Ils ont utilisé la méthode des volumes finies, le pourcentage de cuivre dans l'eau est $0 \leq \Phi \leq 5\%$, la valeur de Rayleigh entre 10^4 et 10^6 , le diamètre de nanoparticule est égal à 100 nm et le rapport de forme $A = 1$. Ils ont noté que le taux de transfert de chaleur diminue avec l'augmentation de la fraction de volume solide pour un nombre de Rayleigh particulier. Cependant, il augmente avec le nombre de Rayleigh pour une fraction de volume solide particulière.

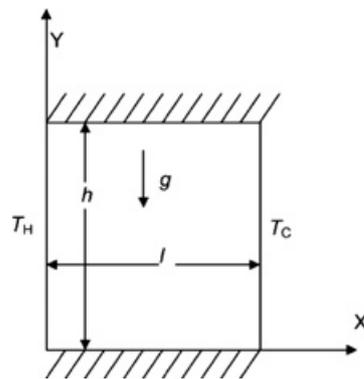


Figure II.4 : Schéma du modèle physique.

Rashmi et al. [22] ont étudié le transfert de chaleur par convection naturelle de nanofluides Al₂O₃-eau. Ils ont utilisé le programme Fluent pour simuler leur cas qui contient un pourcentage de 1% et 4% de Al₂O₃, et le rapport de forme $A = 1$. Ils ont remarqué que le taux de transfert de chaleur diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des particules

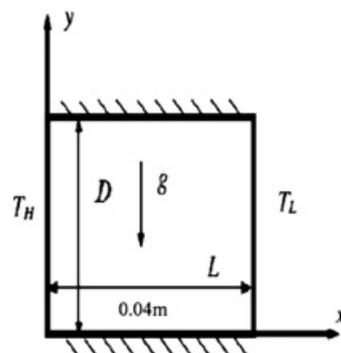


Figure II.5 : Schéma du modèle physique.

. Das et al. [23] Ont étudié l'augmentation du transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité carrée partiellement chauffée et partiellement refroidie en utilisant des nanofluides. Ils ont pris l'eau et les particules de cuivre comme nanofluide, $10^4 \leq Gr \leq 10^7$, le pourcentage Φ est de 0% jusqu'à 20% et $A = 1$. Les auteurs ont observé que le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

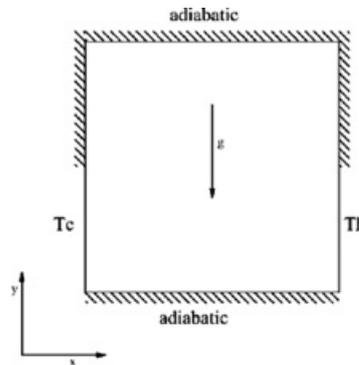


Figure II.6 : Schéma du modèle physique.

Ghasemi et al. [24] ont examiné l'effet du champ magnétique sur la convection naturelle dans une enceinte carrée remplie de nanofluide. La méthode des volumes finis a été utilisée pour traiter leur cas où le nanofluide est composé de l'eau et Al_2O_3 , $10^3 \leq Ra \leq 10^7$, le nombre de Hartmann est $10^3 \leq Ha \leq 10^7$, $0 \leq \Phi \leq 6\%$, $A = 1$. Ils ont observé que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, mais diminue avec l'augmentation du nombre de Hartmann.

Oztop et al. [25] ont analysé numériquement la distribution non isotherme de la température sur la convection naturelle dans des enceintes remplies de nanofluides. Ils ont testé Cu, TiO_2 , Al_2O_3 comme nanoparticules, le nombre de Rayleigh varie entre 10^3 et 10^5 , la concentration de nanoparticules Φ est de 0 à 10%, γ entre 0 et 90° , le rapport de forme $A = 1$. Une amélioration du transfert de chaleur a été enregistrée pour toute la gamme du nombre de Rayleigh. En utilisant la méthode de volumes finis.

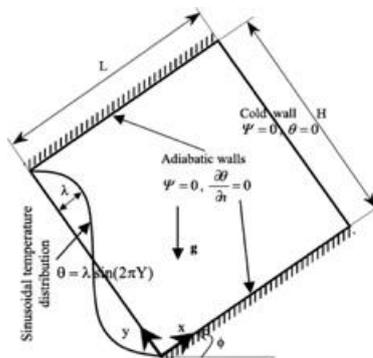


Figure II.7 : Schéma du modèle physique.

Aminossadati et al. [26] ont simulé la convection naturelle de nanofluide eau-CuO dans une cavité avec deux sources de chaleur. La valeur de Gr entre 10^3 et 10^6 , la concentration Φ et de 0 jusqu'à 4%, $A = 1$. Leur étude révèle que le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique solide.

Jahanshahi et al. [27] ont fait une étude numérique et expérimentale de la convection libre basée sur la conductivité mesurable expérimentalement dans une cavité carrée utilisant un nanofluide eau / SiO_2 . En supposant que la cavité contient un nanofluide de l'eau / SiO_2 , $10^3 \leq Gr \leq 10^6$, la concentration $0 \leq \Phi \leq 4\%$, et le rapport de forme $A=1$. Il a été observé que le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique solide.

Kefayati et al. [28] ont étudié la convection naturelle dans des enceintes de grande taille en utilisant un nanofluide eau / SiO_2 . Cette étude a été réalisée pour les paramètres suivantes : Le nombre de Rayleigh du fluide de base $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$, la fraction volumétrique des nanoparticules comprise entre 0 et 4% et le facteur de forme A de l'enceinte compris entre 0,5 et 2. La conductivité thermique des nanofluides est obtenue à partir de données expérimentales. Les comparaisons ont montré que le nombre de Nusselt moyen augmente à cause d'augmentation de volume de fraction pour toute la gamme de nombres de Rayleigh et d'aspects. De plus, l'effet des nanoparticules sur le transfert de chaleur augmente lorsque le rapport de forme de l'enceinte augmente.

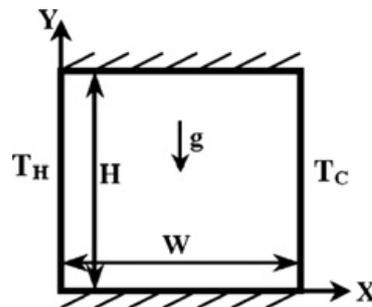


Figure II.8 : Schéma du modèle physique.

Ghasemi et al. [29] ont fait une recherche sur la convection naturelle périodique dans une enceinte remplie d'un nanofluide avec flux de chaleur oscillant. Ils ont utilisé la méthode de volumes finis, le type de nanoparticules $\text{Cu/TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, le nombre de Rayleigh entre 10^3 et 10^6 , la concentration est $0 \leq \Phi \leq 20\%$, et $A=1$. L'ajout de nanoparticules dans l'eau pure améliore sa conductivité thermique et facilite l'élimination de la chaleur de la source de chaleur.

Sheikhzadeh et al. [30] ont étudié la convection naturelle d'un nanofluide contenant de l'eau et des nanoparticules de cuivre dans une cavité à parois latérales partiellement actives. Ils ont utilisé la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations régissant l'écoulement pour un nombre de Rayleigh allant de 10^3 à 10^6 , et une concentration de nanoparticules $0 \leq \Phi \leq 15\%$. Leur étude montre que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et de la concentration des nanoparticules.

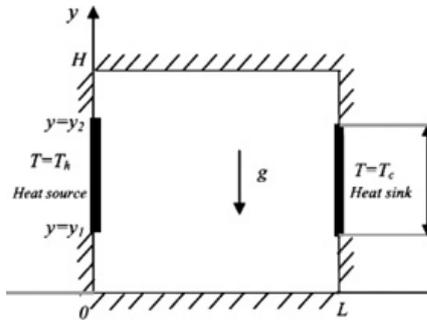


Figure II.9 : Schéma du modèle physique.

Lai et Yang. [31] Ont fait des simulations basées sur la méthode de Boltzmann sur réseau du transfert de chaleur par convection naturelle des nanofluides Al_2O_3 / eau et pour CuO / eau dans une enceinte carrée. Le nombre de Rayleigh a été varié de 10^3 , 10^4 et 10^5 , avec un rapport de forme 0.5, 1.0 et 2.0, et des fractions volumiques de nanoparticules de 1%, 3%, 5% et 10%. Les résultats montrent que, pour les deux nanofluides, l'augmentation de la fraction volumique entraîne l'augmentation du nombre de Nusselt moyen pour l'ensemble des rapports de forme et des nombres de Rayleigh. Z.

Haddad et al. [32] Ont étudié la convection naturelle dans les nanofluides, L'important des effets de la thermophorèse et du mouvement de Brownian pour l'amélioration du transfert de chaleur par les nanofluides, ils ont utilisé la méthode des volumes finis. Le nanofluide considéré se compose des nanoparticules de CuO suspendues dans de l'eau, les paramètres étudiés sont $10^3 \leq \text{Ra} \leq 10^6$, $0 \leq \Phi \leq 9\%$, $A=2.0$. Les résultats montrent que le transfert de chaleur plus élevé se forme avec la présence de l'effet brownien et de la thermophorèse.

Mahmoodi M. [33] Ont fait une simulation numérique basée sur la méthode des volumes finis de la convection libre d'un nanofluide dans des cavités en forme de L. Les nombres de Rayleigh simulés sont 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , la concentration $0 \leq \Phi \leq 10\%$, le rapport de forme $A = 0.2, 0.4, 0.6$. Les résultats obtenus montrent que le nombre de Nusselt moyen pour tous les rapports d'aspect de la cavité augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique solide du nanofluide. De plus, ont constaté que le taux de transfert de chaleur augmente avec la diminution du rapport de forme de la cavité.

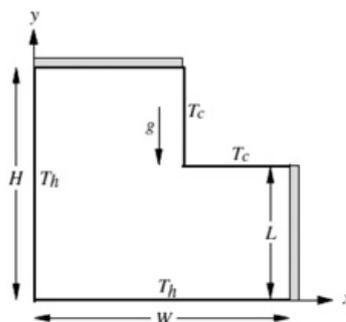


Figure II.10 : Schéma du modèle physique.

Elhajjar et al. [34] Ont fait une modélisation des transferts de chaleur en configuration de RayleighBénard dans les nanofluides. Ils ont analysé trois types de nanofluides Cu/TiO₂/Al₂O₃ avec l'eau pure, $0 \leq Ra \leq 10^4$, $0 \leq \Phi \leq 8\%$. Le nombre de nanofluides de Rayleigh diminue avec la diminution volumique de fraction de nanoparticules.

Khanafer K. et al. [35] ont étudié l'amélioration du transfert de chaleur par flottabilité dans une enceinte à deux dimensions utilisant des nanofluides. La plage du nombre Grashof Gr pour cette enquête varie entre $10^3 \leq Gr \leq 10^5$. La plage de la fraction volumique Φ utilisée dans cette étude varie entre $0 \leq \Phi \leq 25\%$, nombre de Prandtl = 6.2. Les résultats illustrent le fait que les nanoparticules en suspension augmentent sensiblement le taux de transfert de chaleur pour un nombre donné de Grashof. Les résultats aussi montraient que le taux de transfert de chaleur des nanofluides augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

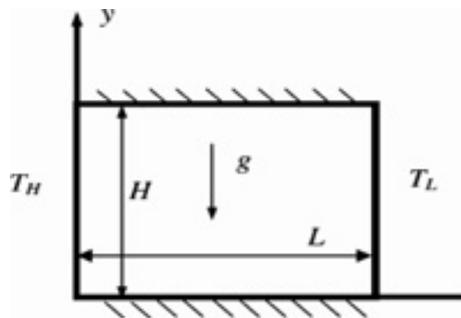


Figure II.11 : Schéma du modèle physique.

Chapitre 3 : Description du Problème et modèle mathématique

III.1 Description du problème

Considérons une enceinte carrée bidimensionnelle remplie d'un nanofluide, comme indiqué sur la (Figure. III.1). Les murs horizontaux sont supposés adiabatiques. Le nanofluide contenu dans l'enceinte est newtonien, incompressible. Les nanoparticules sont supposées avoir une sphérique forme et de taille uniforme. De plus, on suppose que la phase fluide et les nanoparticules sont en équilibre thermique et ils se déplacent à la même vitesse. Le mur vertical gauche est maintenu à haute température (T_c) alors que le mur vertical droit est maintenu à basse température (T_f). Les propriétés thermophysiques du nanofluide sont supposées être constantes sauf pour la variation de densité dans la force de flottabilité, qui peut être évaluée par l'approximation de Boussinesq. L'écoulement de la convection naturelle est étudié pour un régime laminaire $Gr = 10^3, 10^4, 10^5$, la concentration des nanoparticules a été variée de 0 à 8. Les nanofluides utilisés dans cette étude sont : CuO, Al₂O₃ et TiO₂.

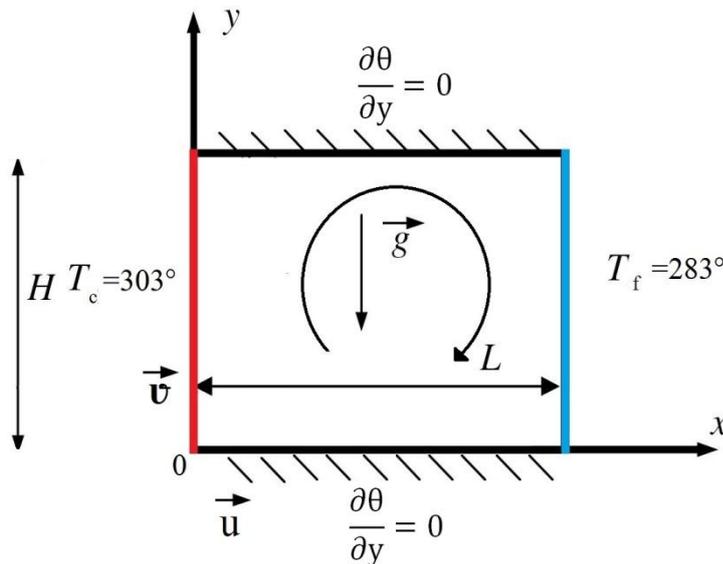


Figure III.1 : Schéma du modèle physique.

Propriété	Eau	Nanoparticules Al ₂ O ₃	Nanoparticules TiO ₂	Cu
C_p (J/kg.K)	4179	765	686.2	383
ρ (kg/m ³)	997.1	3970	4250	8954
k (W/m.K)	0.613	40	8.9538	400
β (1/K)	2.10E-04	8.50E-06	9.00E-06	1.67e-05
μ (kg/m.s)	9.09E-04	--	--	--

Tableau 1 Les propriétés effectives de l'eau et Nanoparticules

III.2 Les hypothèses simplificatrices

Dans la présente étude, on considère que :

- Le nanofluide est newtonien et incompressible, l'écoulement est supposé stationnaire et bidimensionnel en régime laminaire.
- L'approximation de Boussinesq est utilisée pour évaluer la variation de la densité.

III.3 Approximation de Boussinesq

Pour des configurations d'écoulements dans une cavité, la résultante des forces externes est limitée aux forces gravitationnelles de sorte que l'influence de la convection naturelle provoquée par des gradients de la température soit évidente. L'effet de la convection naturelle est pris en considération dans l'équation de la quantité de mouvement par la variation de la masse volumique, si en prenant un état pour la masse volumique ρ et une température T_0 . L'équation d'état pour la masse volumique ρ ; en utilisant le développement de Taylor devient. Pour les écoulements de la convection naturelle dans une cavité, la variation de densité peut être évaluée par l'approximation de Boussinesq :[37]

$$\rho = \rho_0 \left[1 - \frac{T - T_0}{T_0} \right] \quad (III.1)$$

En se limitant à un développement du premier ordre :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta_0 (T - T_0)] \quad (III.2)$$

Le coefficient de dilatation thermique

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (III.3)$$

III.4 Modèle mathématique

III.4.1 Équations gouvernantes dimensionnelles

Tenant compte des hypothèses ci-dessus, les équations régissant l'écoulement de la convection naturelle dans les directions x et y peuvent s'écrire ainsi :

- Équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (III.4)$$

- Équation de quantité de mouvement :

Suivant ox :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right] \quad (III.5)$$

Suivant oy :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{nf} g (T - T_c) \right] \quad (III.6)$$

- Équation d'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (III.7)$$

où ρ_{nf} , $(\rho\beta)_{nf}$, $(\rho C_p)_{nf}$ et α_{nf} sont les propriétés thermophysiques du nanofluide et qui peuvent être calculées à partir de :

- la densité effective : $\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p$
- le coefficient de dilatation thermique : $(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p$
- la capacité thermique : $(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p$
- la diffusivité thermique : $\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}}$

Où ϕ est la fraction volumique solide des nanoparticules

- la conductivité thermique est calculée à partir du modèle de Maxwell-Garnetts comme suit :

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f + k_p)}{(k_p + 2k_f) - \phi(k_f + k_p)} \right] \quad (III.8)$$

où K_p est la conductivité thermique des nanoparticules dispersées et K_f est la conductivité thermique du fluide pur.

- La viscosité dynamique est calculée à partir du modèle de Brinkmann comme suit :

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

III.4.2 Équations gouvernantes adimensionnelles

En introduisant les variables caractéristiques suivantes :

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{uL}{\alpha_f}, V = \frac{vL}{\alpha_f}, P = \frac{\rho L^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, Ra = \frac{g \beta_f L^3 (T_h - T_c)}{v_f \alpha_f}, Pr = \frac{v_f}{\alpha_f}$$

Les équations dimensionnelles deviennent :

- Équation de continuité :
$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

- Équation de quantité de mouvement :

Suivant ox :
$$u \frac{\partial U}{\partial X} + v \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right)$$

Suivant oy :
$$u \frac{\partial V}{\partial X} + v \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_{nf}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_{nf}} Gr Pr^2 \theta$$

- Équation d'énergie :
$$u \frac{\partial \theta}{\partial X} + v \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right)$$

III.4.3 Conditions aux limites adimensionnelles

Les conditions aux limites peuvent être écrites comme suit sous forme adimensionnelle :

$$U = 0; V = 0; \theta = 0 \text{ pour } X = 1, \quad 0 \leq Y \leq H$$

$$U = 0; V = 0; \theta = 1 \text{ pour } X = 0, \quad 0 \leq Y \leq H$$

$$U = 0; V = 0; \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \text{ pour } Y = 0, \quad 0 \leq X \leq L$$

$$U = 0; V = 0; \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \text{ pour } Y = 1, \quad 0 \leq X \leq L$$

III.4.4 Méthodes des volumes finis

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation permettant de convertir les équations différentielles aux dérivées partielles en équations algébriques faciles à résoudre par une méthode numérique. La méthode consiste à diviser le domaine de calcul en plusieurs volumes de contrôle [36]. Comparée avec d'autres méthodes de discrétisation telle que la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis, elle garantit la conservation de masse, de quantité de mouvement ainsi que la température sur chaque volume de contrôle.

III.5 Outil de simulation Gambit et fluent

III.5.1 L’outil Préprocesseur gambit

GAMBIT est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous le code FLUENT. Ce logiciel permet de créer la géométrie du modèle d’étude (surface ou volume) et de la mailler suivant le bon vouloir de l’utilisateur.

Le maillage est un prétraitement au logiciel de simulation. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

- Construction d'un maillage : Pour construire un maillage, il est bon de suivre la démarche suivante :
 - Définir la géométrie.
 - Réaliser le maillage.
 - Définir les paramètres des zones de calcul.

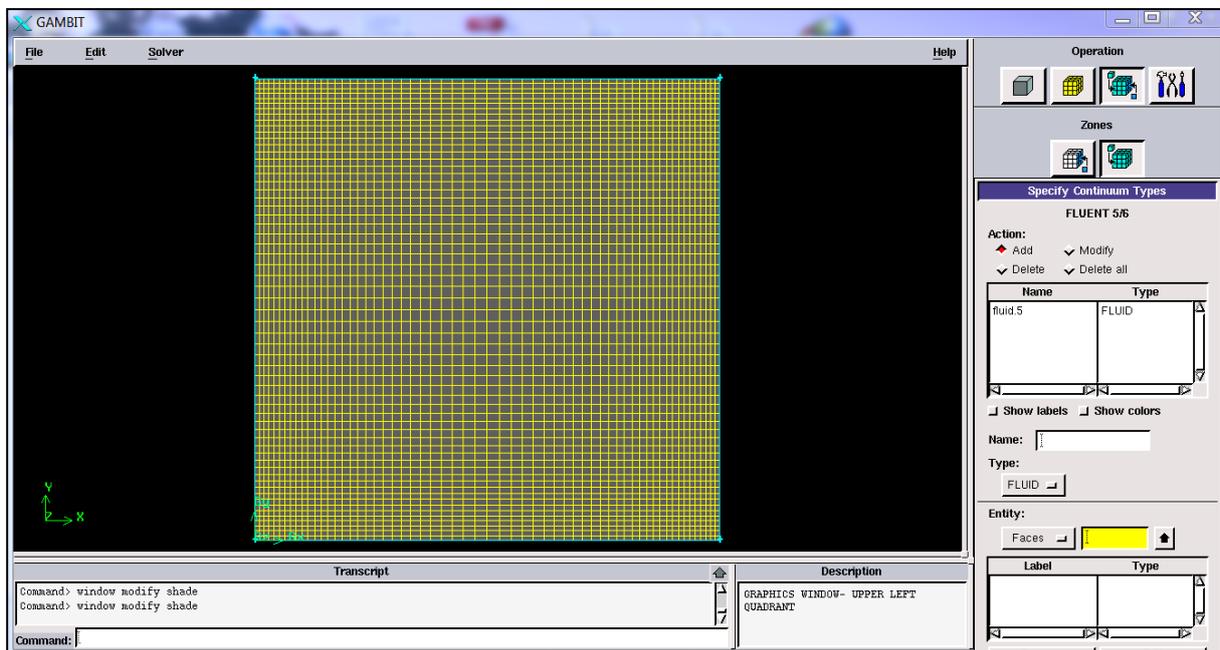


Figure III.1 : Interface graphique du mailleur GAMBIT

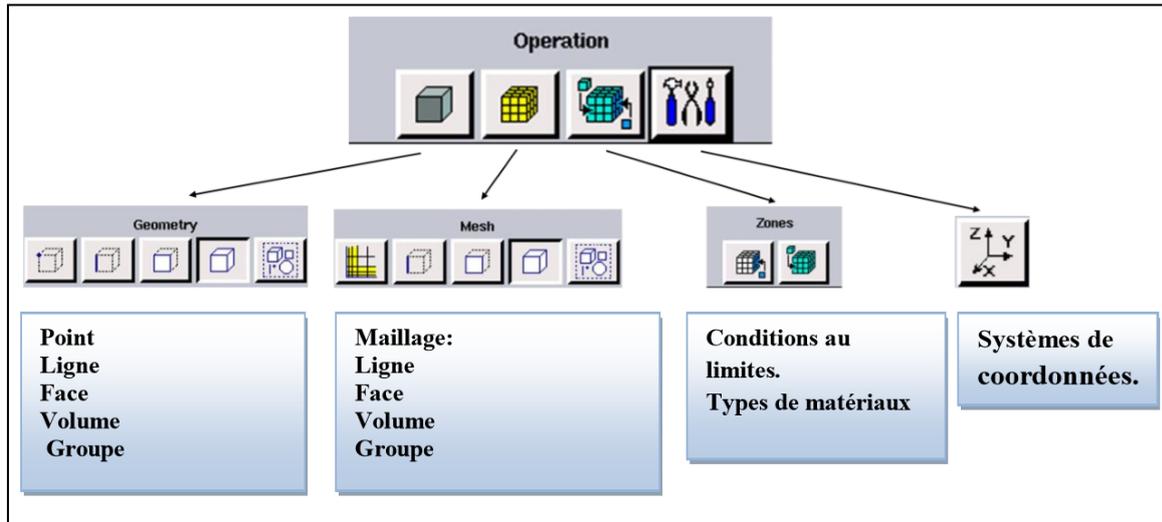


Figure III.2 : Menu principal de Gambit.

III.5.2 L'outil Solveur Fluent

La simulation en Mécanique des Fluides Numérique (Computational Fluid Dynamics CFD), est utilisée pour la modélisation, la visualisation et l'analyse des écoulements des fluides et transferts thermiques. Elle permet aux utilisateurs d'optimiser les performances des nouveaux concepts, tout en réduisant le cycle de commercialisation, les risques associés et les coûts.

Depuis plus de 10 ans, Fluent, leader mondial en Simulation numérique des écoulements Fluides logiciels et services. Il s'emploie à offrir la solution de simulation la plus adaptée, que ce soit pour l'ensemble de l'industrie, la recherche ou la formation des ingénieurs de demain. Cette solution passe par des services d'assistance technique, d'études à façon, et par des formations personnalisées.

Le siège du groupe Fluent est situé à Lebanon, New Hampshire, USA, et compte des filiales en Belgique, Angleterre, France, Allemagne, Inde, Italie, Japon et Suède. Ses logiciels sont aussi vendus à travers le monde grâce à des joint-ventures, des partenariats et des distributeurs en Corée, Australie, Brésil, Chine, Taïwan, République Tchèque, Moyen Orient et dans la plupart des pays européens.

Le logiciel Fluent est un code CFD commercial très utilisé dans l'industrie. Il permet de prédire les écoulements fluides (champs de vitesses, de température...), c'est la raison pour laquelle on l'a choisi pour réaliser notre simulation.

Ensuite l'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menus en partant de la gauche pour aller vers la droite. Le premier menu que nous allons étudier est le menu GRID. La première chose à faire est d'utiliser l'option check afin de vérifier si le maillage importé comporte des anomalies comme des problèmes de jointure entre les

Chapitre III : Description du problème et modèle mathématique

différentes surfaces du maillage. Pour choisir l'échelle d'étude du maillage et par conséquent réfléchir en nombres adimensionnels, il faut utiliser l'option scale (choix est très important car souvent suivant les dimensions du domaine, les phénomènes mis en jeu ne sont pas les mêmes). [38]

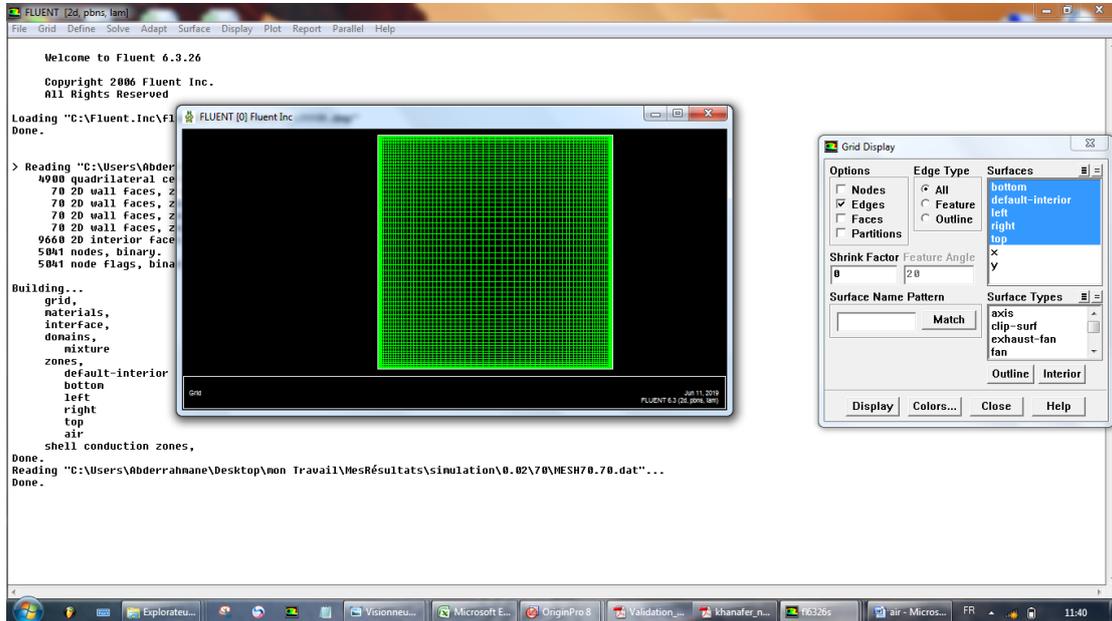


Figure III.3 : L'interface de FLUENT.

FLUENT fournit quatre types d'algorithmes distincts: SIMPLE, SIMPLEC, PISO et (pour les flux en fonction du temps utilisant l'étape NITA (Fractional Step, option d'avancement non itératif)).

III.5.2.1 l'algorithme SIMPLE

Les équations de Navier-Stokes sont des équations très compliqué à résoudre, les chercheurs ont créé un des algorithmes comme SIMPLE c'est un algorithmes utilisé pour résoudre les équations de Navier- Stokes facilement et gagné le temps, SIMPLE est l'acronyme de Méthode semi-implicite pour les équations liées à la pression.

Le mot SIMPLE ça veut dire Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations.

en utilisant cet algorithme, le temps de calcul va être diminué. Pour des problèmes relativement simples (par exemple laminaires, où la convergence est limitée par le couplage pression-vitesse), pour obtenir une convergence plus rapide.

III.5.2.2 Procédure numérique sous Fluent :

Dans notre étude, on a utilisé l'algorithme Simple ;

Presto pour : Le schéma PRESTO (PREssure STaggering Option) pour calculer la pression "décalée".

Chapitre III : Description du problème et modèle mathématique

Second order pour : la quantité de mouvement. Ce schéma peut apporter certaines améliorations par rapport aux schémas standard et linéaire, mais il peut poser quelques problèmes s'il est utilisé au début d'un calcul et / ou avec un mauvais maillage.

III.5.2.3 Critères de convergence :

On a choisi les valeurs suivantes des résidus pour chacune des équations à résoudre :

Equation de continuité : 10^{-3}

Equations de quantité de mouvement : 10^{-6}

Equations d'énergie : 10^{-6}

Le calcul itératif effectué par le code Fluent s'arrête une fois que les critères de convergences définies soient atteintes comme le montre la figure (**Figure III.4**)

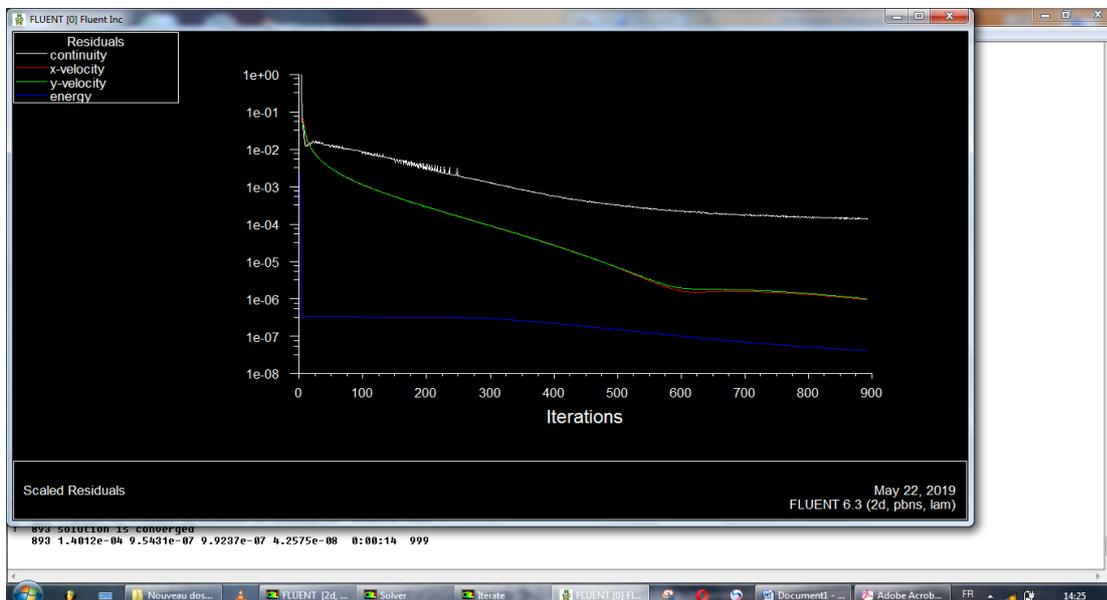
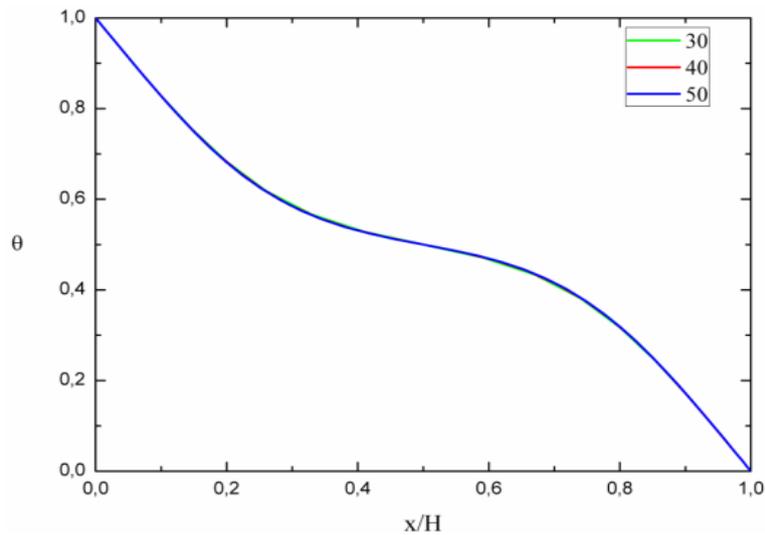


Figure III.4 Résidus pour les différentes équations $Pr = 0.71$, $Ra=10^3$

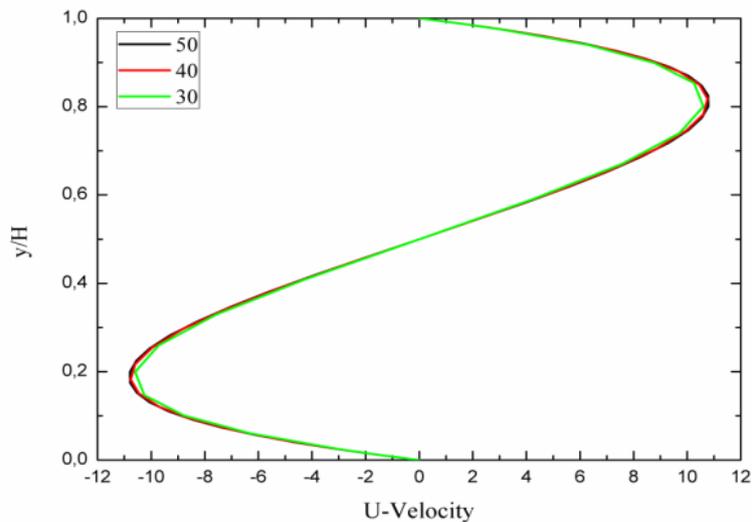
Chapitre 4 :Résultast et discussion

IV.1 Optimisation du maillage

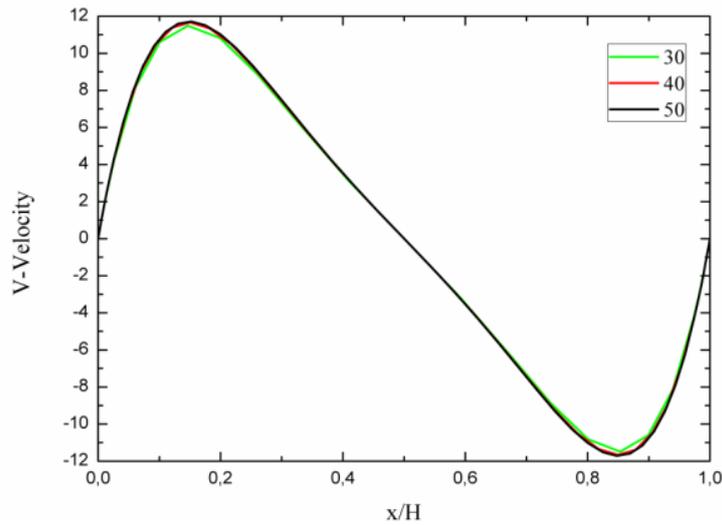
Pour choisir les maillages adéquats à l'étude de la convection naturelle des nanofluides dans une cavité carrée différentiellement chauffée, plusieurs tailles ont été examinées : (30x30), (40x40), (50x50), (60x60) et (70x70) pour des nombres de Grashof $Gr = 10^3$, 10^4 , 10^5 . Les résultats présentés en termes de profil de température ainsi que les composantes de la vitesse tracés à la mi-hauteur de la cavité. D'après (**Figures IV.1, Figure IV.2, Figure IV.3**), et en raison de la stabilisation des résultats, on a choisi les maillages (40x40), (50x50) et (70x70) pour simuler les nombres de Grashof $Gr = 10^3$, 10^4 , 10^5 respectivement.



(a)



(b)



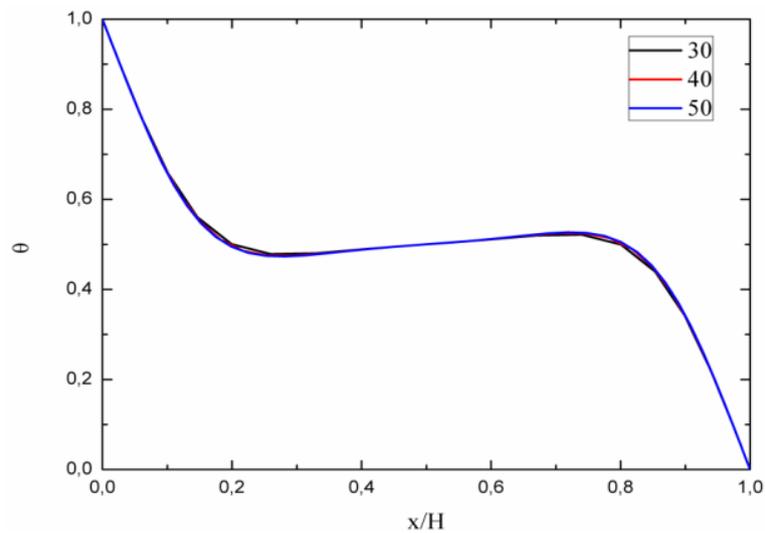
(c)

Figure IV.1 : Etude de maillage pour $Gr = 10^3$, nanofluide Cu-Eau $\phi = 0.06$: (a) la température- (b) Profil de la composante horizontale vitesse (c) Profil de la composante verticale de vitesse

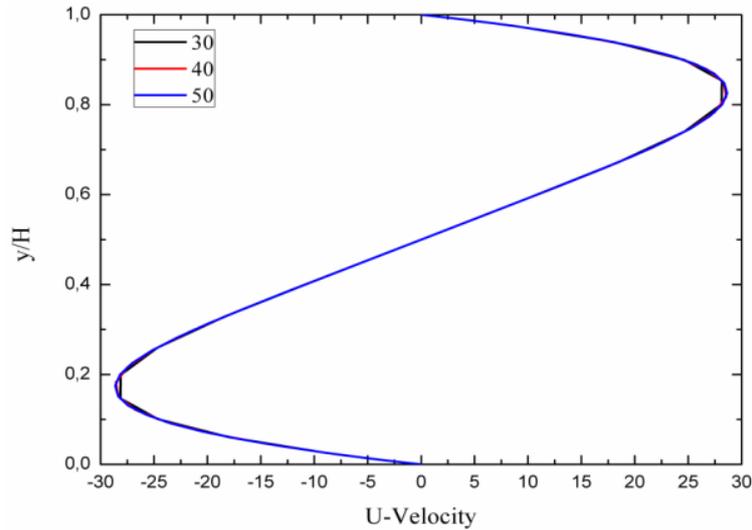
d'après les observations de (a) (b) (c) dans les Figures III.4 et III.5, les courbes montrent que le maillage de grille 40×40 suffit pour décrire correctement les processus de flux et de transfert de chaleur et de masse pour le $Gr = 10^3$.

le maillage 40 et maillage (50) sont compatibles, et ce n'est pas pareille avec maillage (30).

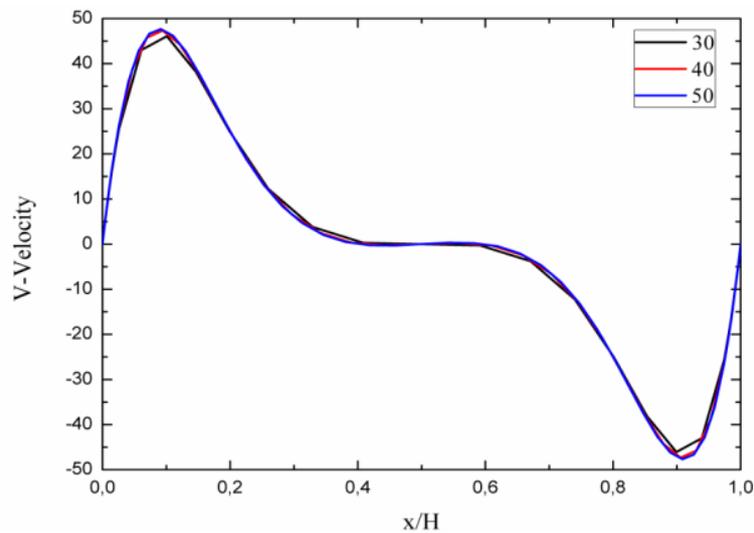
donc choix de maillage juste pour gagner de la mémoire et du temps.



(a)



(b)



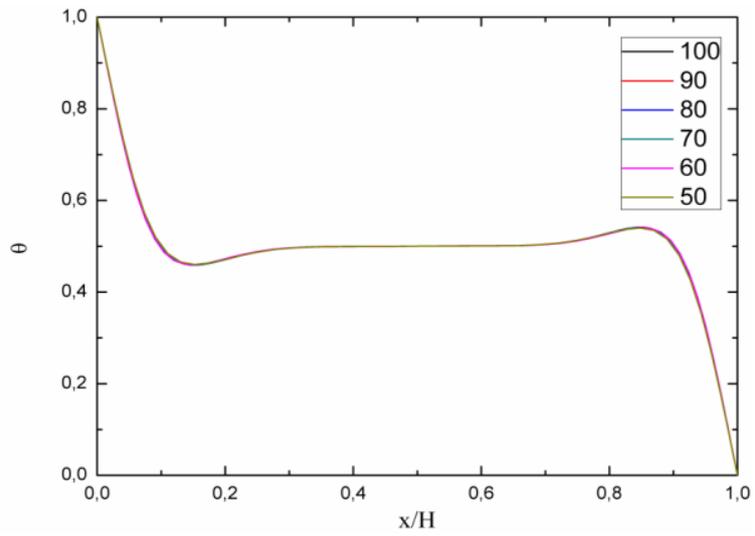
(c)

Figure IV.2 : Etude de maillage pour $Gr = 10^4$, nanofluide Cu-Eau $\phi = 0.06$: (a) la température- (b) Profil de la composante horizontale vitesse (c) Profil de la composante verticale de vitesse

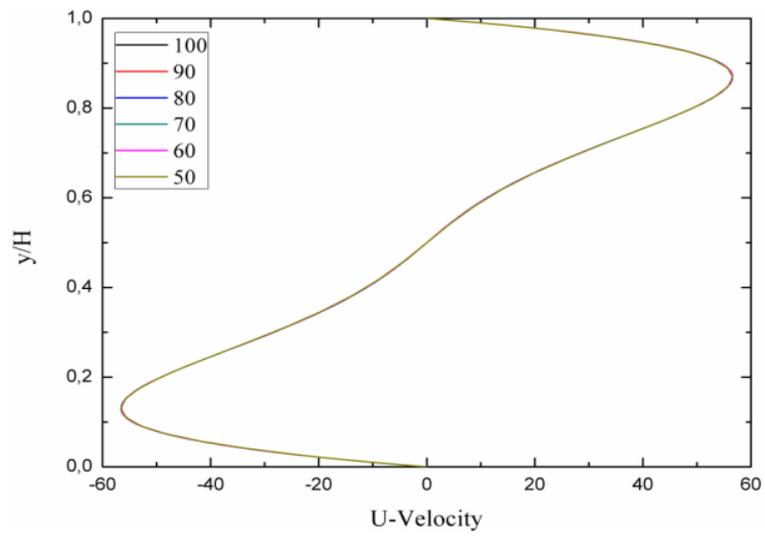
d'après les observations de (a) (b) (c) dans les Figures III.4 et III.5, les courbes montrent que le maillage de grille 50 x 50 suffit pour décrire correctement les processus de flux et de transfert de chaleur et de masse pour le $Gr = 10^4$.

donc choix de maillage juste pour gagner de la mémoire et du temps.

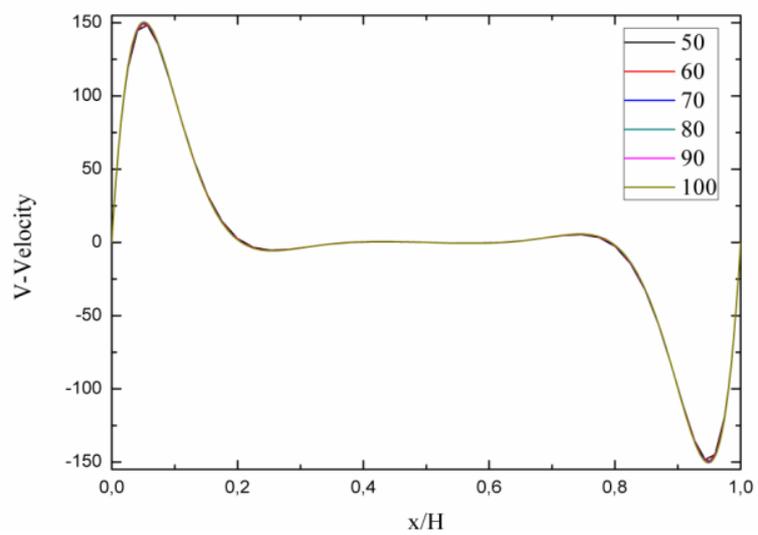
Chapitre IV : Résultats et discussion



(a)



(b)



(c)

Figure IV.3: Etude de maillage pour $Gr = 10^5$, nanofluide Cu-Eau $\phi = 0.6$: (a) la température (b) Profil de la composante horizontale de la vitesse (c) Profil de la composante vertical de la vitesse

D'après les observations de (a) (b) (c) dans les **Figures III.6**, les courbes montrent qu'un maillage de grille (70 *70) suffit à décrire correctement les processus de flux et de transfert de chaleur et de masse pour le $Gr = 10^5$. Car le maillage 70 et les maillages (80, 90, 100) sont pareils par rapport aux maillages (50, 60).

Le choix du maillage 70 est pour gagner de mémoire et de temps.

IV.2 Validation

Pour s'assurer de l'exactitude des résultats obtenus par le code Fluent, la simulation du problème de la convection naturelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée a été faite pour un fluide pur ($Pr = 0.71$) ainsi que pour un nanofluide Cu-Eau. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux trouvés dans la littérature. Les résultats présentés en termes de Nusselt moyen, isothermes, lignes de courants et les profils de température dans (**Figure IV.9**) montrent un excellent accord entre les présents résultats et les résultats des auteurs pour le pur fluide aussi bien que pour le nanofluide.

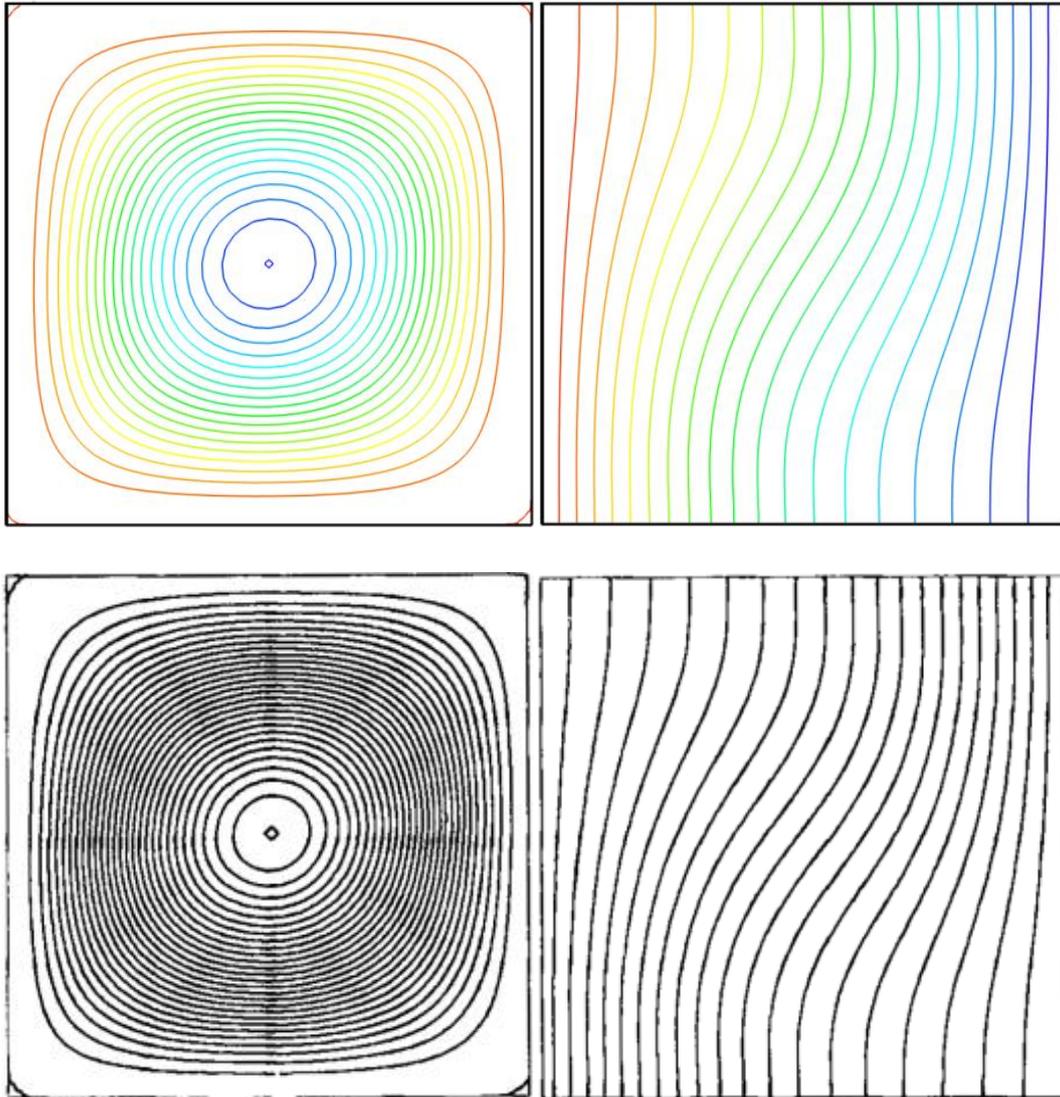


Figure IV.4: Comparaison entre le présent travail (en couleurs) et le travail de G. BARAKOS [39]: lignes des courants (à gauche), Isothermes (à droite) pour $Ra=10^3$, $Pr = 0.71$

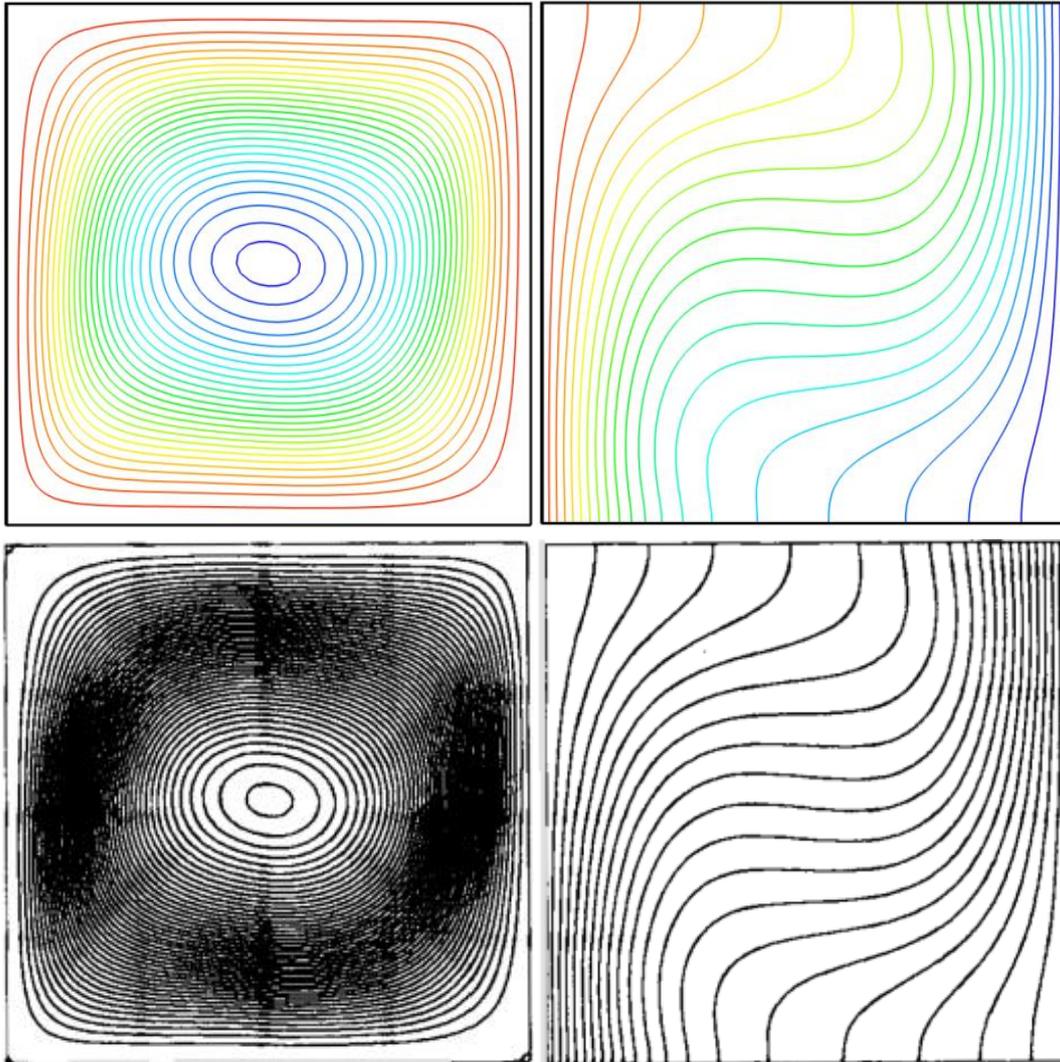


Figure IV.5: Comparaison entre le présent travail (en couleurs) et le travail de G. BARAKOS [39]: lignes des courants (à gauche), Isothermes (à droite) pour $Ra=10^4$, $Pr = 0.71$

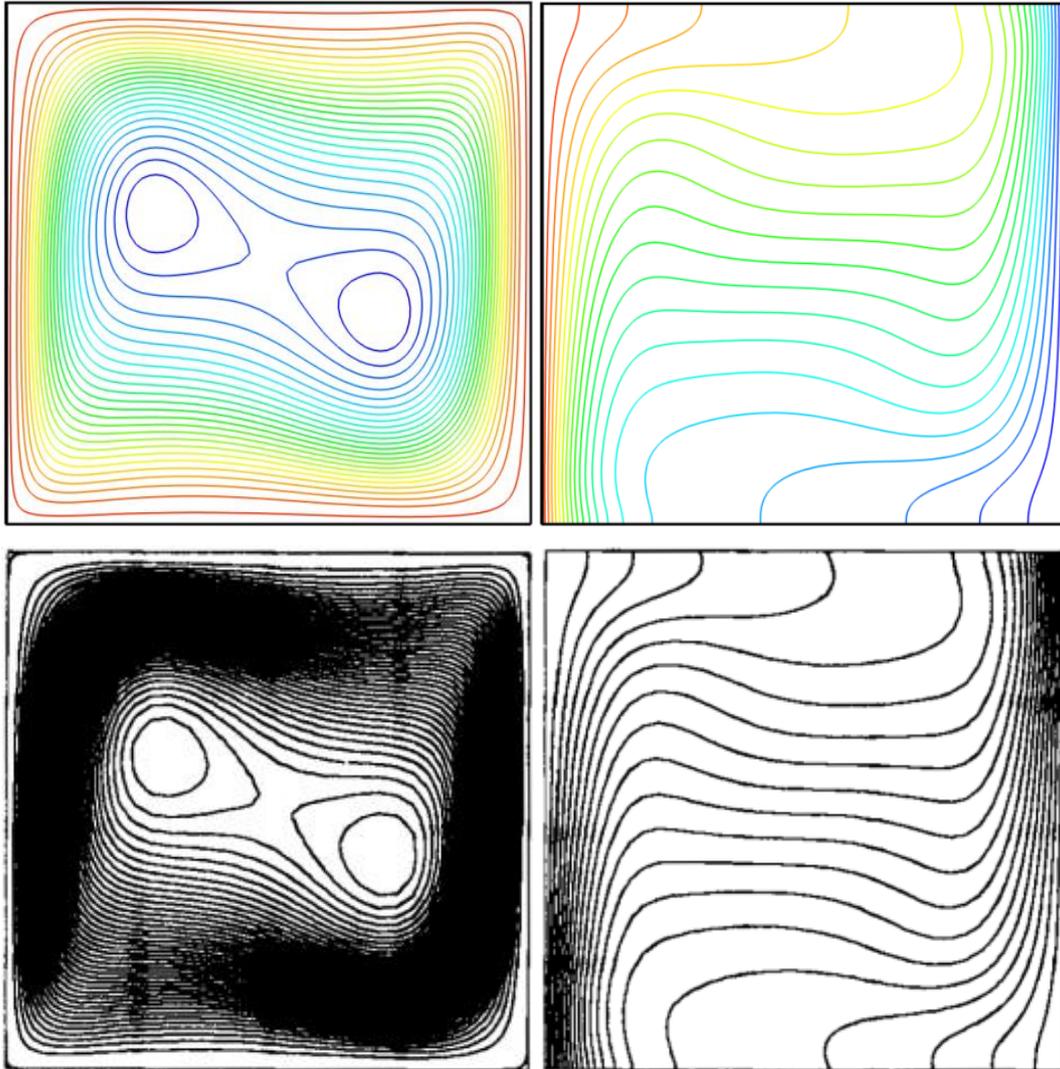


Figure IV.6 : Comparaison entre le présent travail (en couleurs) et le travail de G. BARAKOS [39]: lignes des courants (à gauche), Isothermes (à droite) pour $Ra=10^5$, $Pr = 0.71$

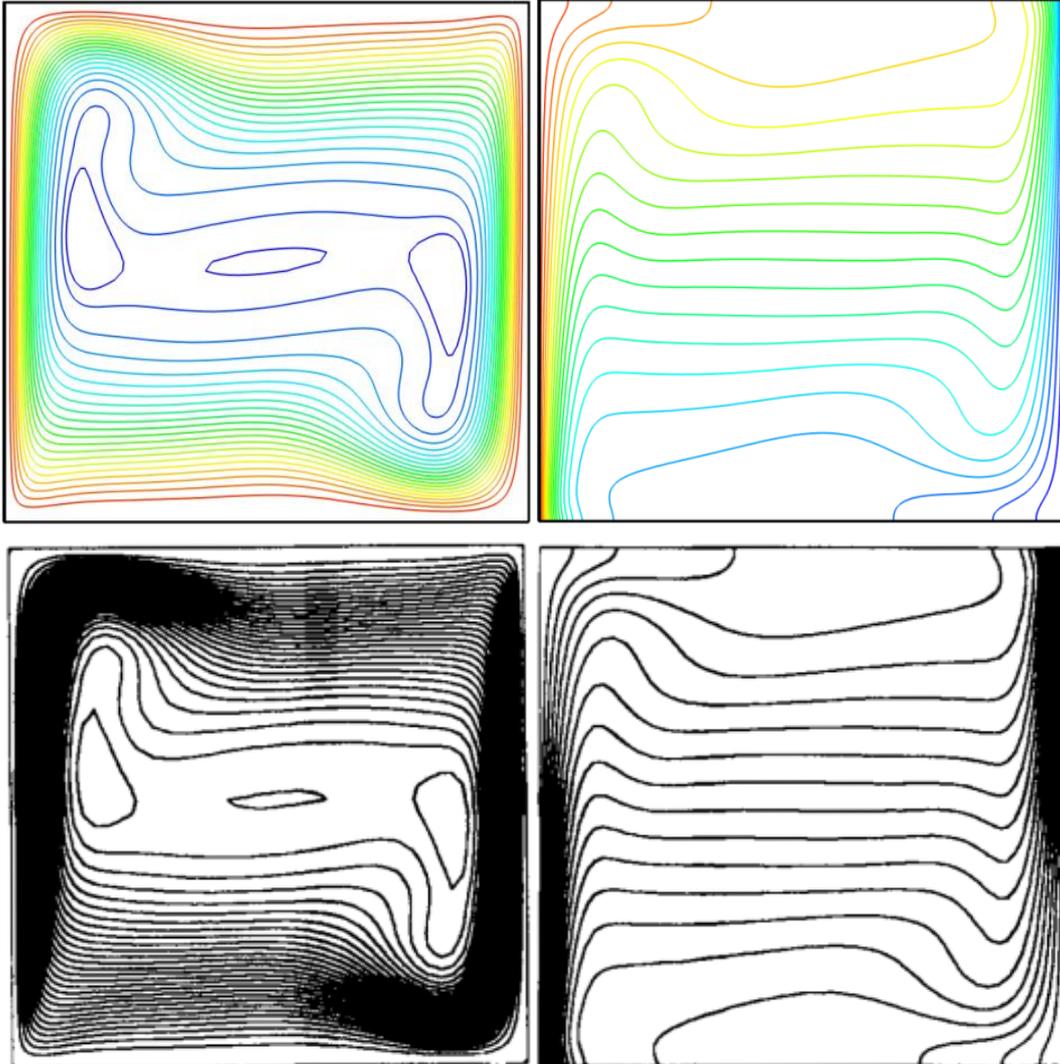


Figure IV.7: Comparaison entre le présent travail (en couleurs) et le travail de G. BARAKOS [39]: lignes des courants (à gauche), Isothermes (à droite) pour $Ra=10^6$, $Pr = 0.71$

Les (Figures IV.4-5-6-7) présentent une comparaison entre nos résultats et les résultats de K. Khanafer et al [35], les résultats obtenue pour l'air avec changement de nombre de Rayleigh de 10^3 jusqu'à 10^6 , pour valider notre méthode de travail. Les figures des lignes de courants et des contours isothermes sont presque identique, ça prouve que notre travaille est sur le bon chemin qui nous donne la main à faire notre simulation.

Ra	Résultats	Markatos et Pericleous [40]	De Vahal	Fusegi et al [42]
	Obtenus du Nu_m		Davis [41]	
10^3	1.112749	1.108	1.118	1.105
10^4	2.242646	2.201	2.243	2.302
10^5	4.516475	4.43	4.519	4.646
10^6	8.818129	8.754	8.799	9.012

Tableau 2 Comparaison de nos résultats de nombre de Nusselt avec les résultats auteurs.

Nos résultats trouvé sur ce tableau sont compatibles avec les résultats de markatos et pericleous ,de vahal davis et fusegi et al et qu'ils sont bien validés c'est-à-dire à l'intérieur de ses valeurs .

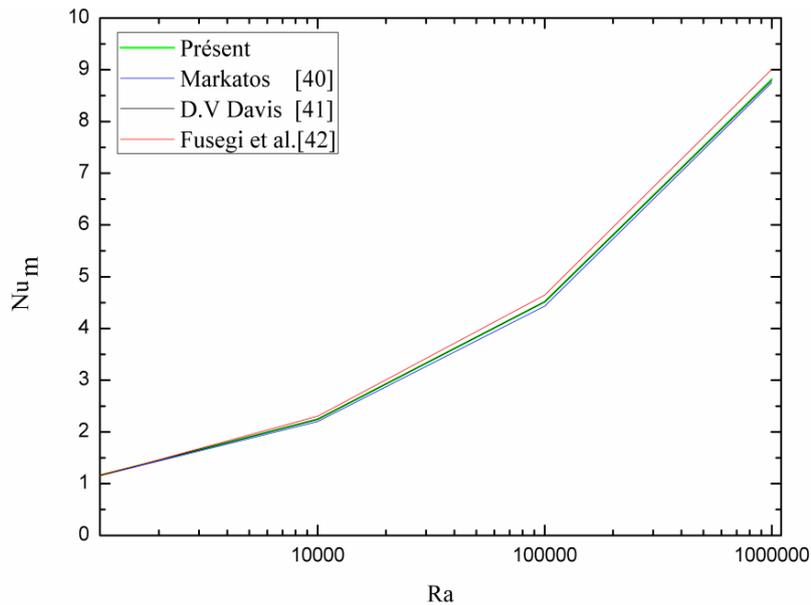


Figure IV.8: Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre Ra : Comparaison entre le présent travail avec des travaux publiés pour $Pr = 0.71$

Une procédure de test de maillage étendue (Figure IV.8) a été menée pour garantir une solution indépendante du réseau. Quatre combinaisons de mailles différentes ont été utilisées dans le cas. Ra est de 0 jusqu'à 10^6 . Le code actuel a été testé pour l'indépendance du réseau en calculant le nombre moyen de Nusselt sur le mur de gauche. La courbe prouve et définit que notre travaille presque compatible avec les travaux des auteurs.

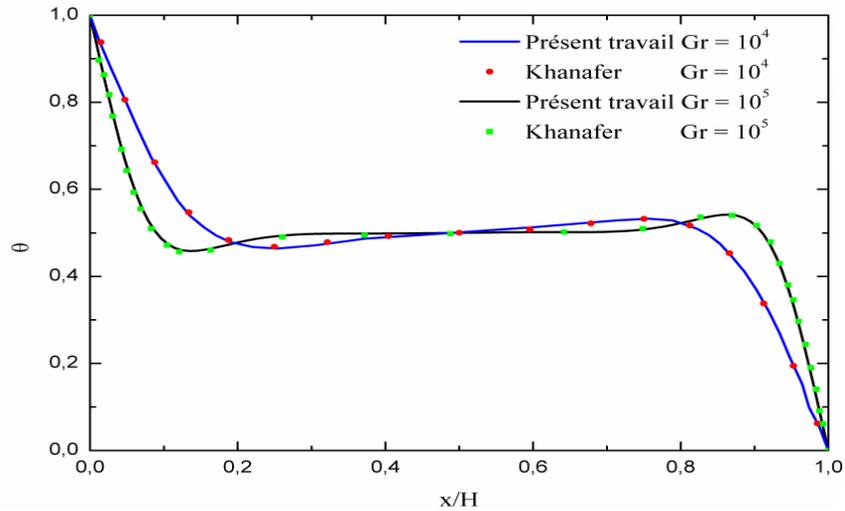


Figure IV.9: Profils de température : Comparaison entre le travail présent et le travail de Khanafer et al[35] pour l'eau ($Pr = 6.2$)

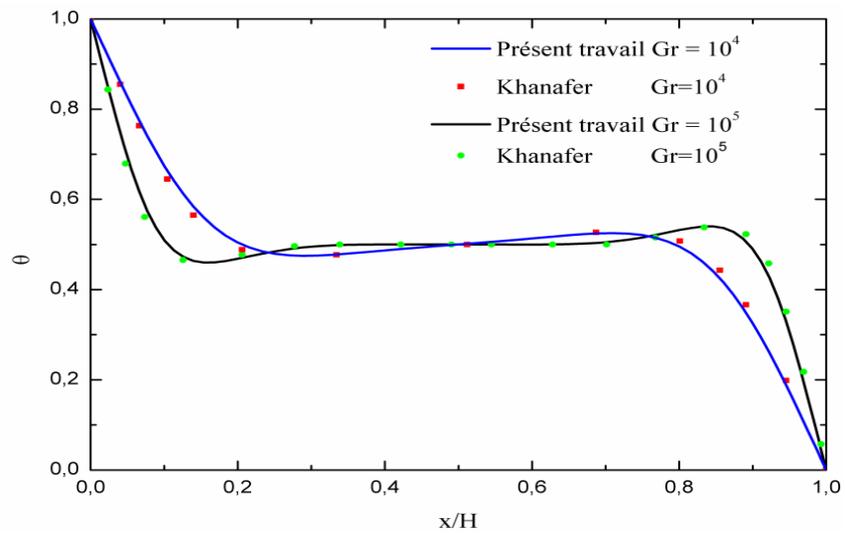


Figure IV.10 : Profils de température : Comparaison entre le travail présent et le travail de Khanafer et al. pour le nanofluide ($\phi=10\%$)

(Figure IV.9 et IV.10) la valeur convergée se compare très bien aux autres valeurs obtenues dans la théorie. La solution numérique actuelle est ensuite validée en comparant les résultats du code actuel pour $Gr = 10^4$ et $Gr = 10^5$ pour $\phi=00\%$ (Figure IV.9) et $\phi=10\%$ (Figure IV.10) à la simulation numérique de Khanafer et al.[36] (2003). Il est clair que le code actuel est en bon accord avec d'autres travaux rapportés dans la théorie, comme le montre les figures IV.9 et IV.10.

IV.3 Etude paramétrique :

Le code a été utilisé pour simuler la convection naturelle dans une enceinte fermée différentiellement chauffée remplie de nanofluides Al_2O_3 concentration 0.8, TiO_2 0.8 pour les nombres de GRASHOF 10^3 , 10^4 , 10^5 .

L'effet de la concentration, type de nanoparticules et le nombre de Grashof ont été étudiée

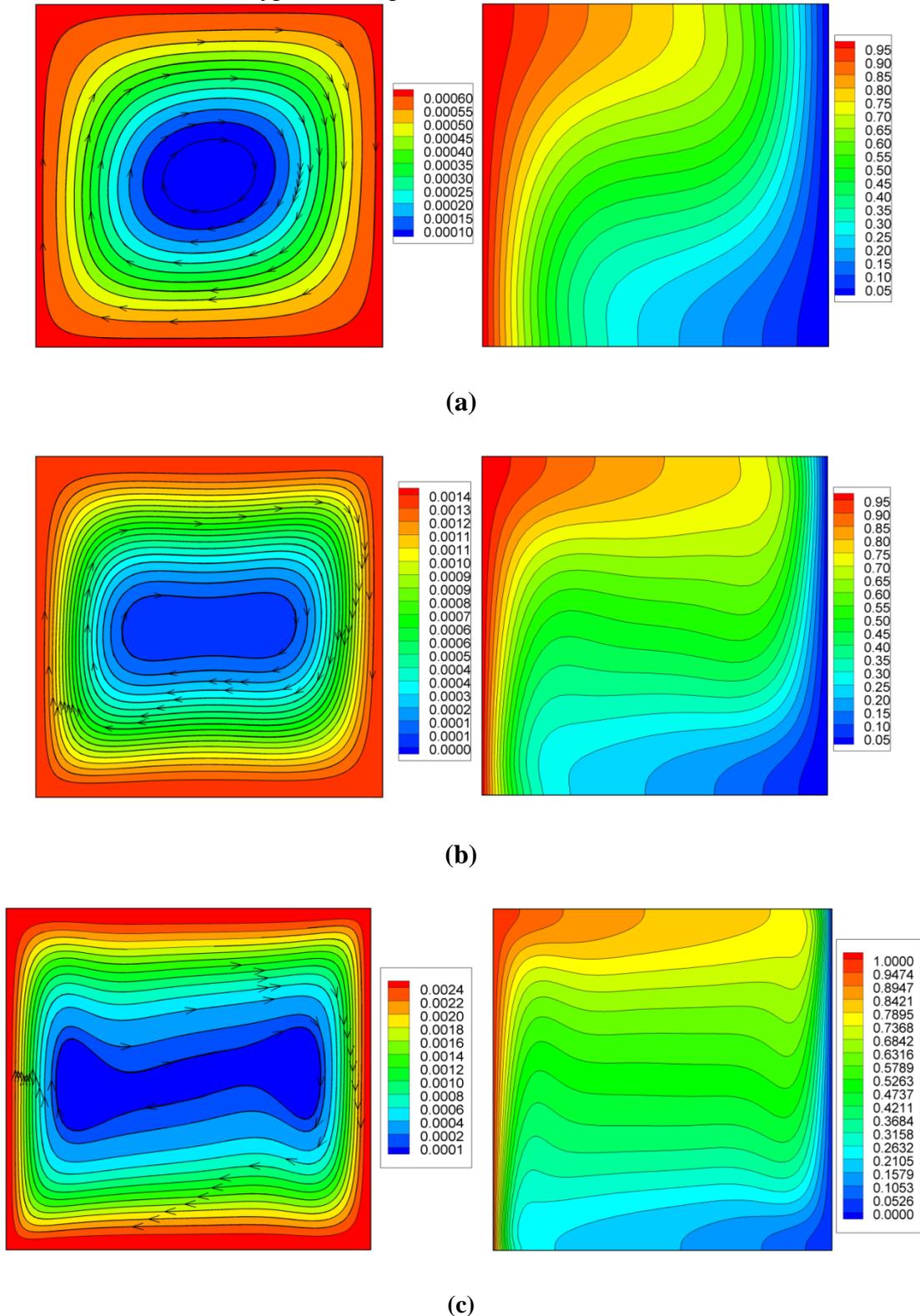
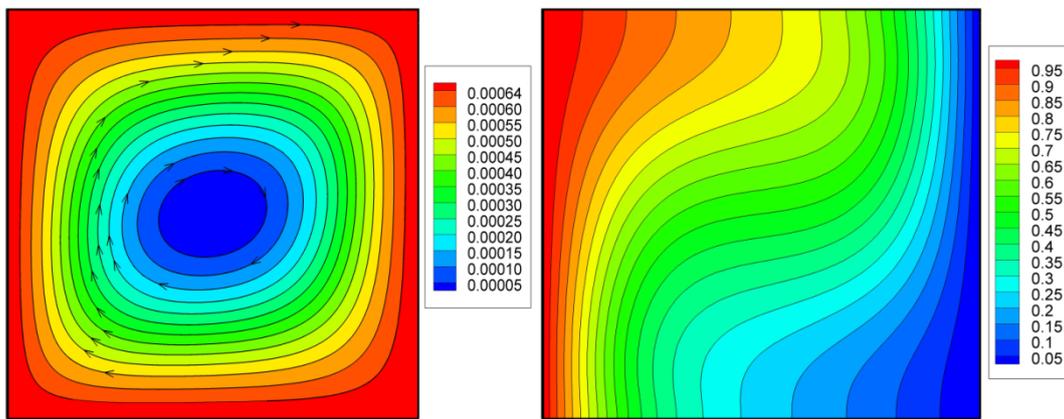
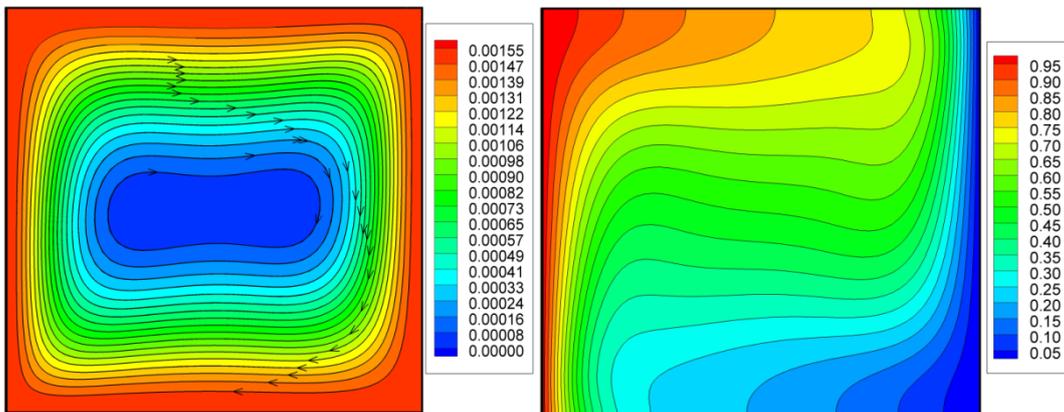


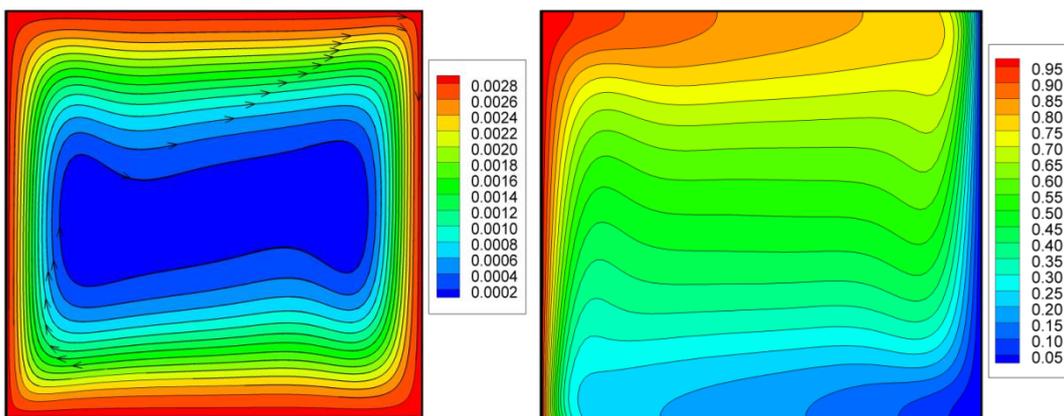
Figure IV.11 : Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi = 00\%$, (a) $Gr = 10^3$ - (b) $Gr = 10^4$ - (c) $Gr = 10^5$



(a)

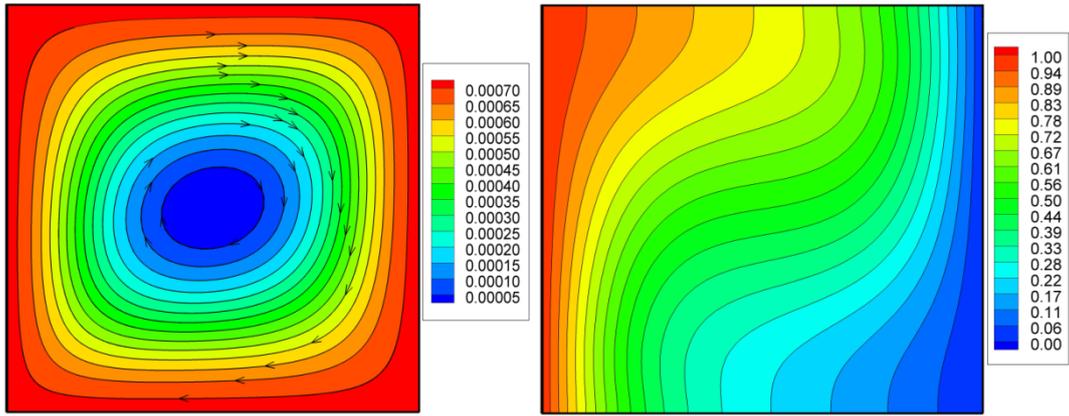


(b)

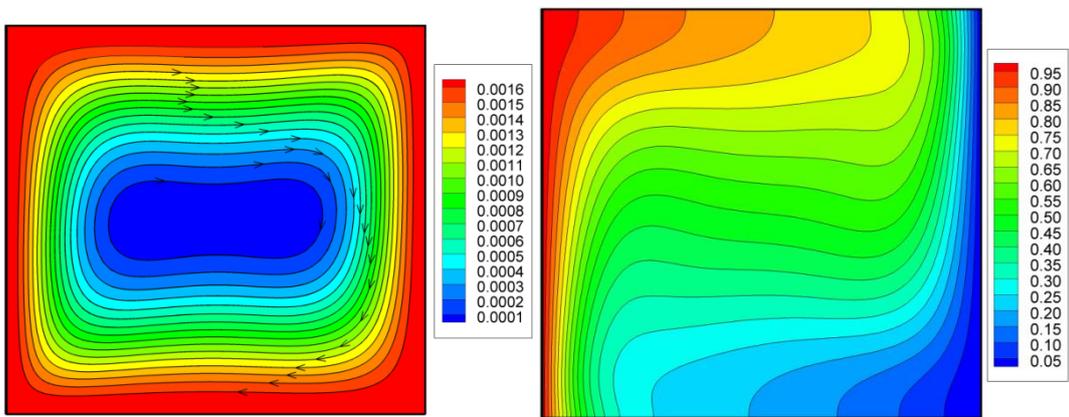


(c)

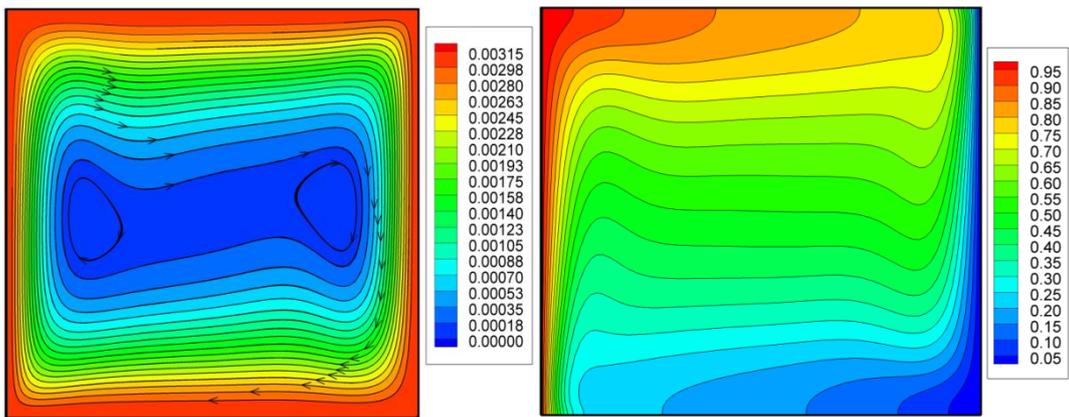
Figure IV.12 : Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi = 2\%$, (a) $Gr = 10^3$, (b) $Gr = 10^4$, (c) $Gr = 10^5$



(a)

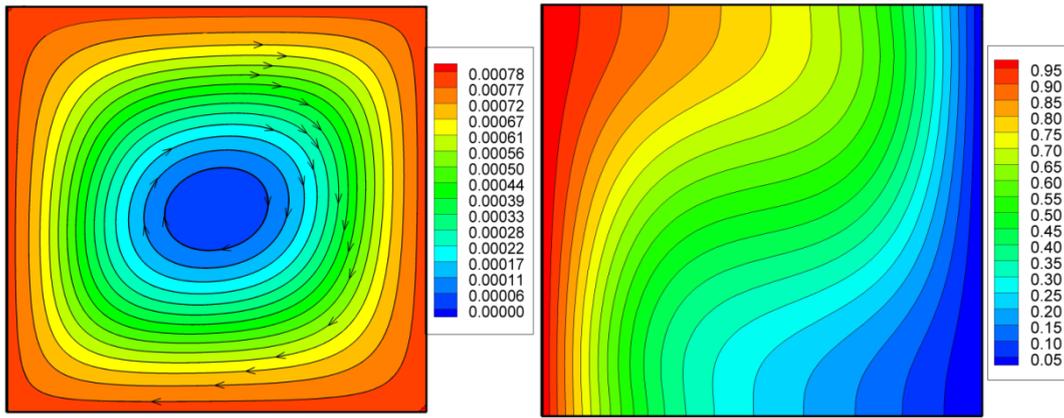


(b)

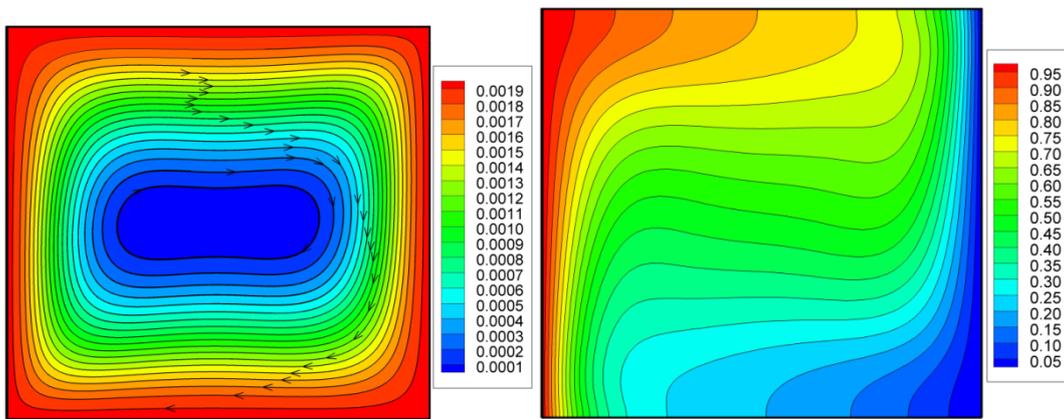


(c)

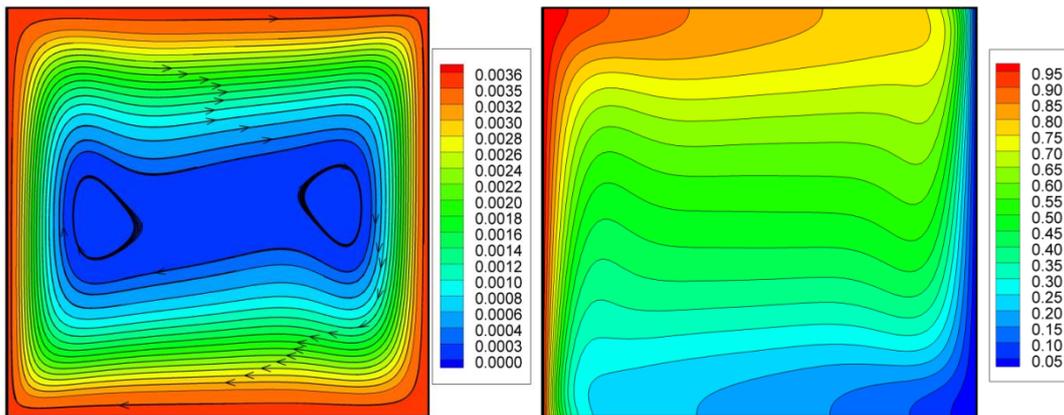
Figure IV.13: Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi = 04\%$, (a) $Gr = 10^3$ -(b) $Gr = 10^4$ -(c) $Gr = 10^5$



(a)

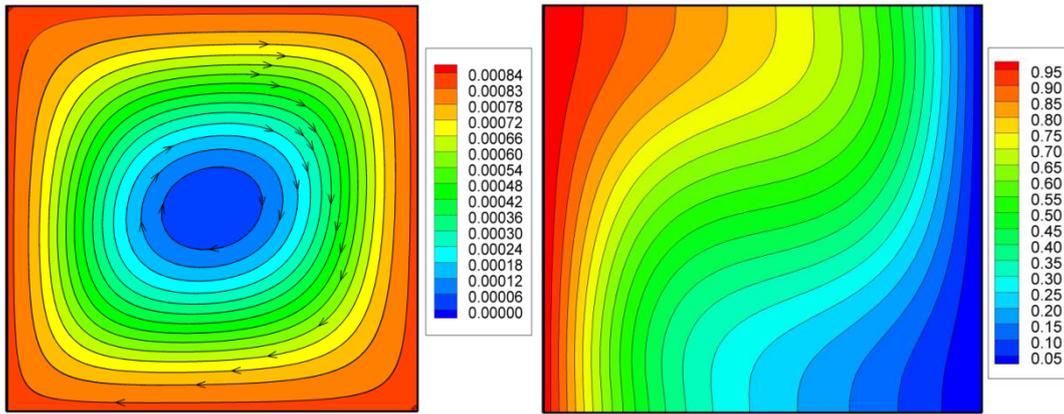


(b)

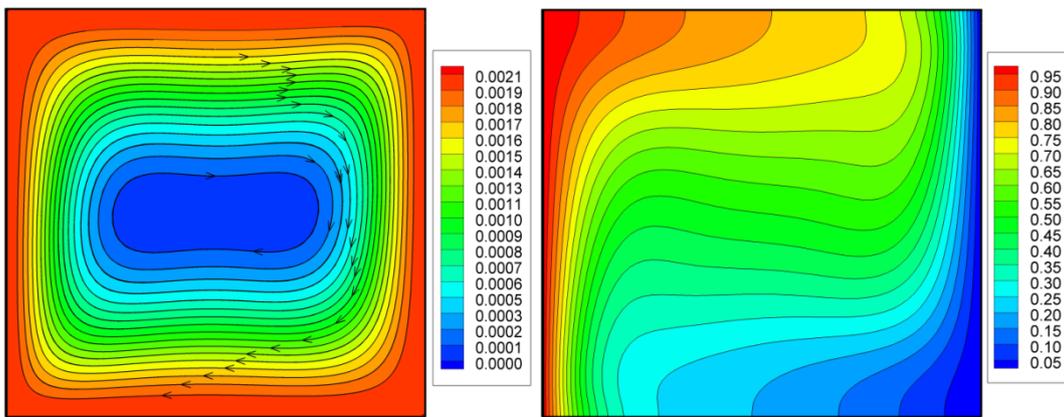


(c)

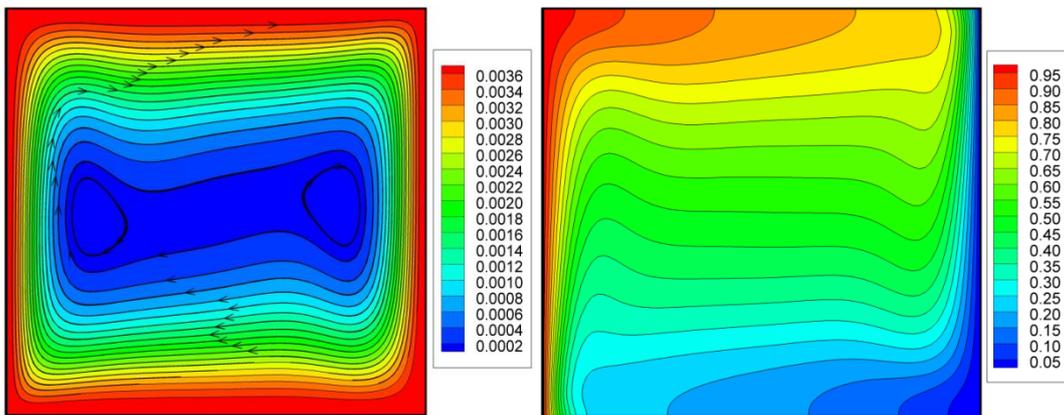
Figure IV.14 : Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi =06\%$, (a) $Gr =10^3$ -(b) $Gr=10^4$ -(c) $Gr=10^5$



(a)



(b)



(c)

Figure IV.15 : Lignes des courant (gauche), Isothermes pour $\phi = 08\%$, (a) $Gr = 10^3$ -(b) $Gr=10^4$ -(c) $Gr=10^5$

Figures IV. (11-12-13-14-15) montrent l'effet de l'ajout des nanoparticules à l'eau sur la structure de l'écoulement aussi bien pour les lignes de courant que les isothermes, la stratification verticale des isothermes se produit progressivement avec l'augmentation des

nombre de Grashof jusqu'à 10^5 , et aussi avec l'augmentation de concentration ϕ . Cela est dû à un certain nombre d'effets tels que la gravité, la concentration en nanoparticules et l'effet de dispersion.

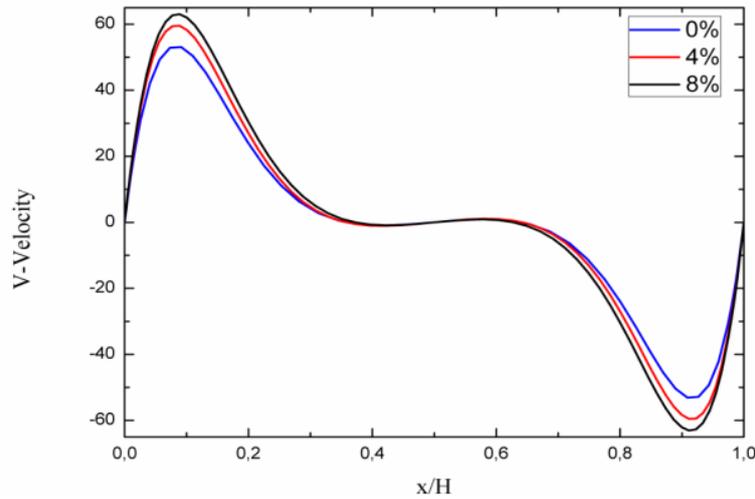


Figure IV.16 : Distribution de la composante verticale de vitesse pour différentes valeurs de ϕ , $Gr=10^4$

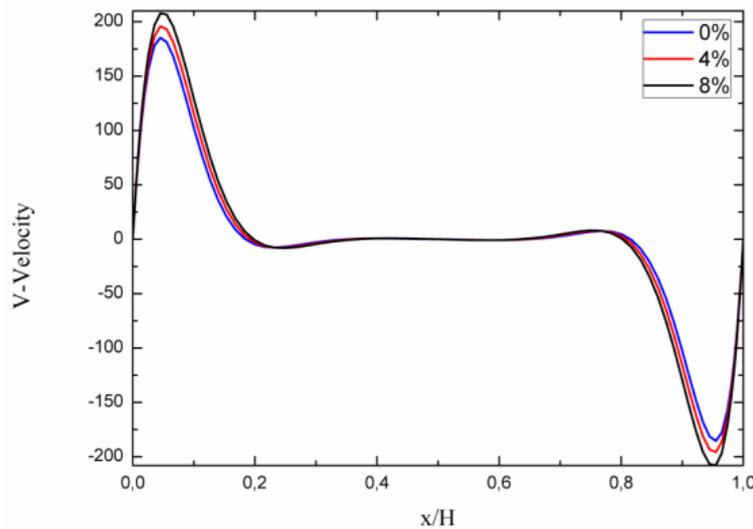


Figure IV.17 : Distribution de la composante verticale de vitesse pour différentes valeurs de ϕ , $Gr=10^5$

La vitesse de nanofluide est supérieure à celle du fluide pur du côté chaud et supérieure du côté froid au voisinage des parties actives et en remarque l'augmentation de vitesse quand on augmente la concentration. Cela signifie que la suspension de particules affecte le champ d'écoulement. La vitesse d'écoulement est presque nulle autour du centre de la cavité (Figure IV.16), (Figure IV.17).

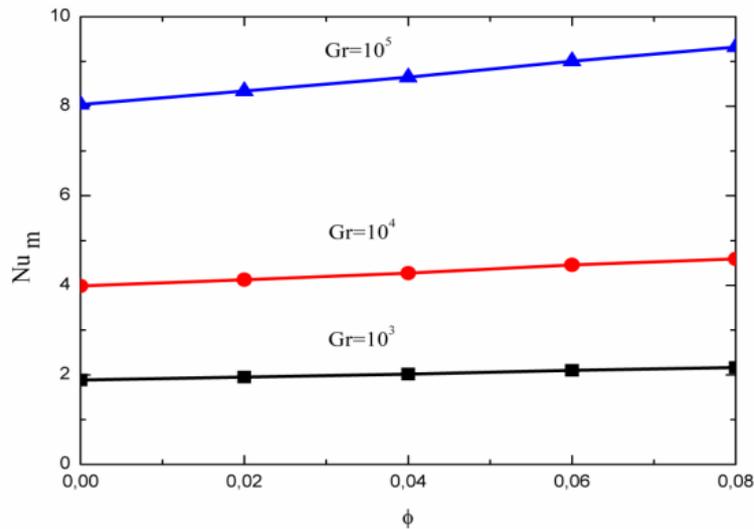


Figure IV.18 : Variations du nombre de Nusselt moyen Al_2O_3 -Eau en fonction de Gr et ϕ pour le nanofluide (Al_2O_3 -Eau)

Le long de la paroi chaude de la cavité, des résultats numériques pour divers nombres de Grashof et concentration est illustré à la (Figure IV.18). Cette figure montre une variation linéaire du nombre moyen de Nusselt avec la fraction solide. La présence de nanoparticules dans le fluide augmente le nombre de Nusselt pour $Gr 10^4$ et $Gr 10^5$ avec l'augmentation de la concentration de 0 à 0.08. Cette augmentation du nombre moyen de Nusselt joue un rôle important dans les applications d'ingénierie telles que le refroidissement électronique.

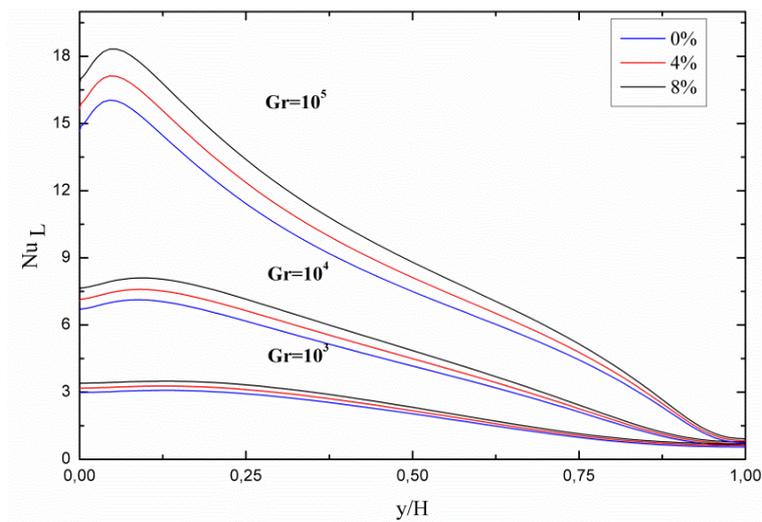


Figure IV.19: Variations du nombre de Nusselt local Al_2O_3 -Eau en fonction de Gr et ϕ pour le nanofluide (Al_2O_3 -Eau)

Chapitre IV : Résultats et discussion

Le long de la paroi chaude de la cavité, des résultats numériques pour divers nombres de Grashof et concentration est illustré à la (Figure IV.19). Cette figure montrer la diminution de nombre de Nusselt local le long de la distance adimensionnel, et le nombre de Nusselt moyen augment lorsqu'on augmente le nombre de Grashof et la concentration ϕ .

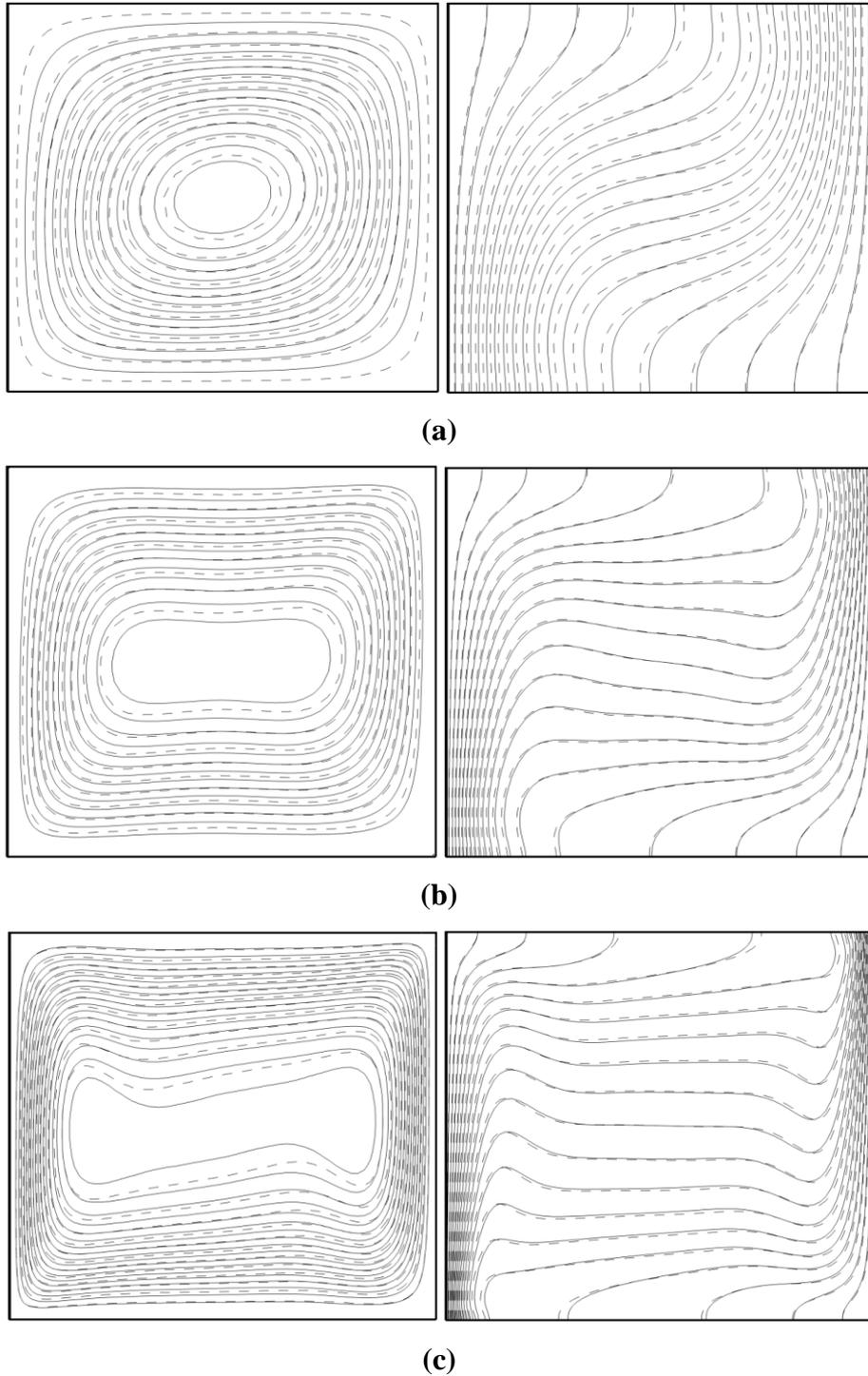


Figure IV.20: Isothermes (droite), lignes de courant (à gauche) pour Al₂O₃-Eau 8% (- -) et l'eau pure (- - -) : (a) Gr = 10³, (b) Gr = 10⁴, (c) Gr = 10⁵

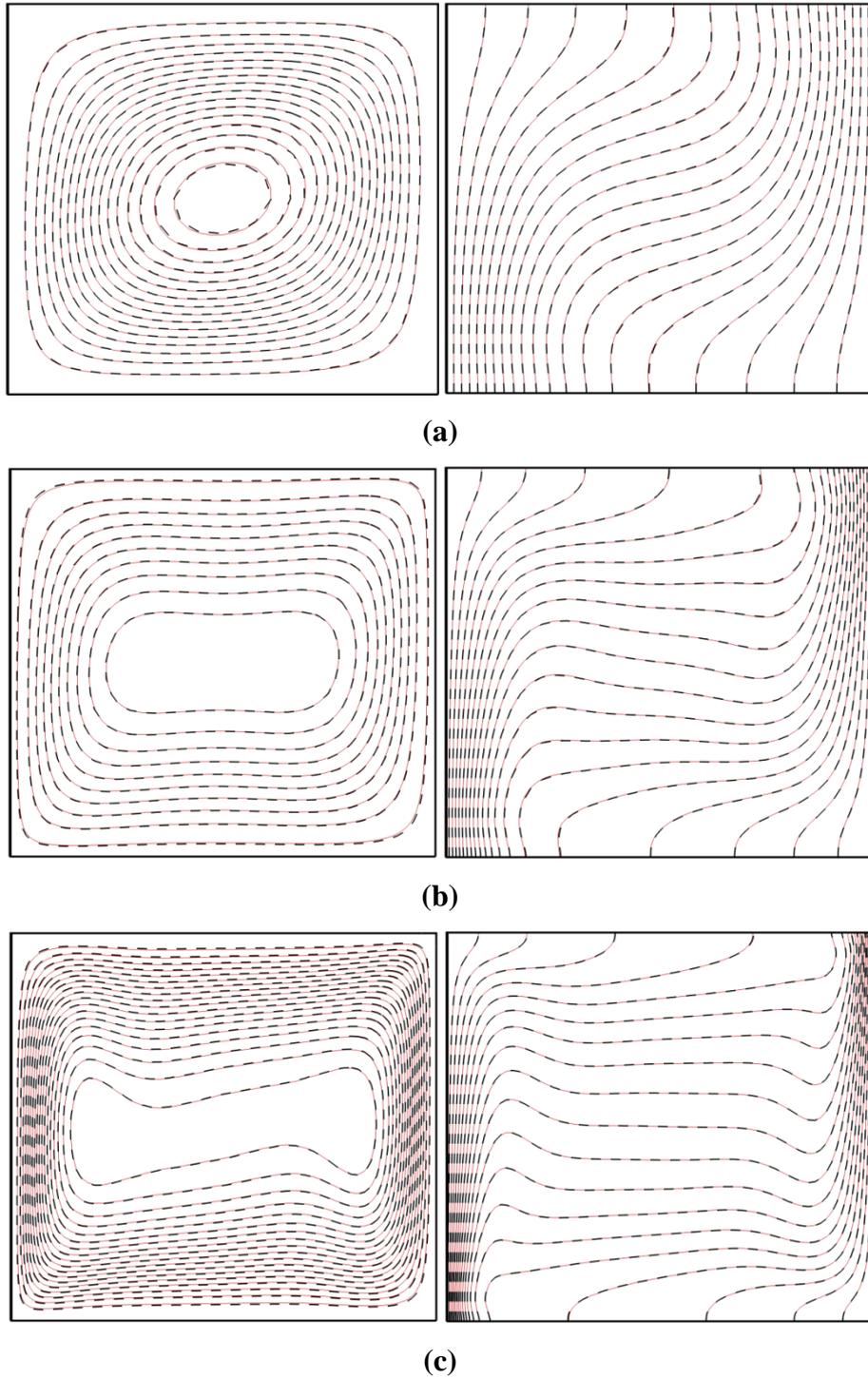


Figure IV.21 : comparaison entre $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Eau}$ (- -) et $\text{TiO}_2\text{-Eau}$ (- . -), pour (a) $\text{Gr} = 10^3$, (b) $\text{Gr} = 10^4$, (c) $\text{Gr} = 10^5$, $\phi = 8\%$

Une comparaison des lignes de courant et des contours isothermes entre le nanofluide Al_2O_3 et l'eau (**Figure IV.20**), et entre Al_2O_3 et TiO_2 (**Figure IV.21**). la simulation effectuée pour différents nombres de Grashof 10^4 , 10^5 , 10^6 et concentration de 8%. Ces figures montrent clairement l'impact de la présence de nanoparticules (pour la Figure III.22) sur les isothermes et les lignes de courant. pour trois valeurs de nombre Grashof. Les courbes d'un fluide pur montrent que le vortex central occupe une zone plus grande que celle du nanofluide. (La **Figure IV.21**) montre l'effet de changement de type de nanofluide.

Donc le nanofluide de Al_2O_3 est mieux que l'eau pure et que le TiO_2 pour le transfert de chaleur.

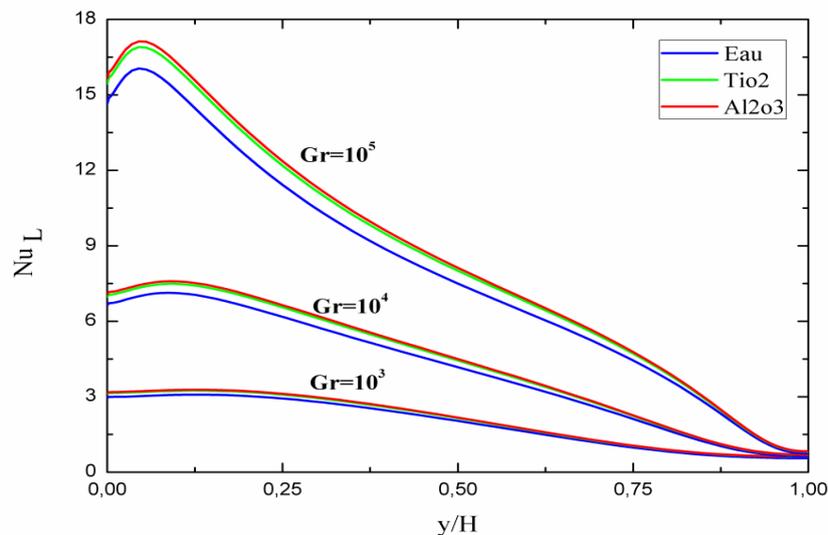


Figure IV.22: Variations du nombre de Nusselt local pour différents nombres de Gr et différents types de nanoparticules $\phi = 4\%$

La figure présente la variation du nombre moyen de Nusselt des différents types des nanofluides Al_2O_3 , TiO_2 et l'eau pure, nous avons étudié les nombres de Grashof 10^3 , 10^4 , 10^5 . Les valeurs du Nusselt local en cas de Al_2O_3 sont supérieures que celles obtenus pour le TiO_2 qui est supérieur que l'eau pur. Donc on dit que le nanofluide de TiO_2 transfère la chaleur mieux que l'eau, et le nanofluide Al_2O_3 est mieux que les deux.

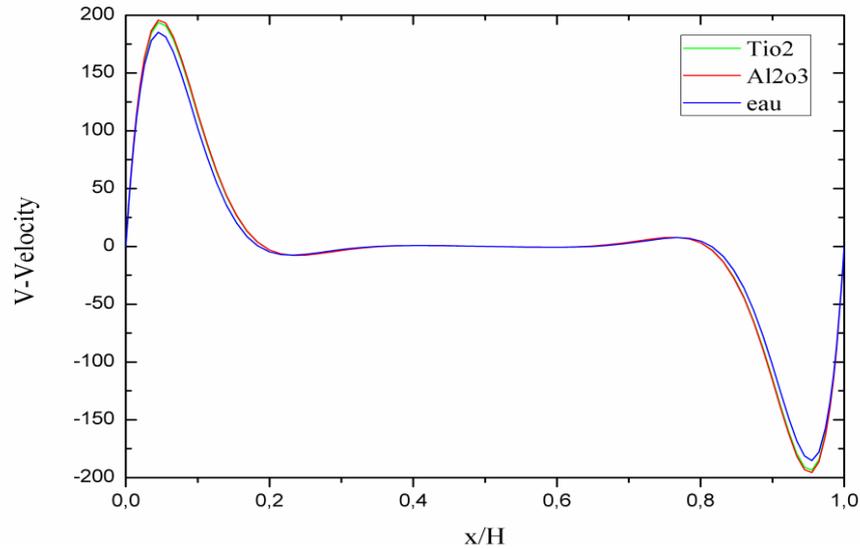


Figure IV.23: comparaison entre les profils de vitesses (V-Velocity) en fonction des types de nanoparticules pour $Gr=10^5$

La (Figure IV.23) présente une comparaison de vitesse entre les nanofluides qui contiennent les nanoparticules Al_2O_3 , TiO_2 , et l'eau pure. La vitesse de nanofluide est inférieure à celle du fluide pur du côté chaud et supérieure du côté froid. Cela signifie que la suspension de particules affecte le champ d'écoulement. La vitesse d'écoulement est presque nulle autour du centre de la cavité. Le profil donne également une idée du sens de rotation du flux. En remarquons aussi que la vitesse de Al_2O_3 est inférieure que la vitesse de TiO_2 dans le côté chaud et supérieure dans le côté froid.

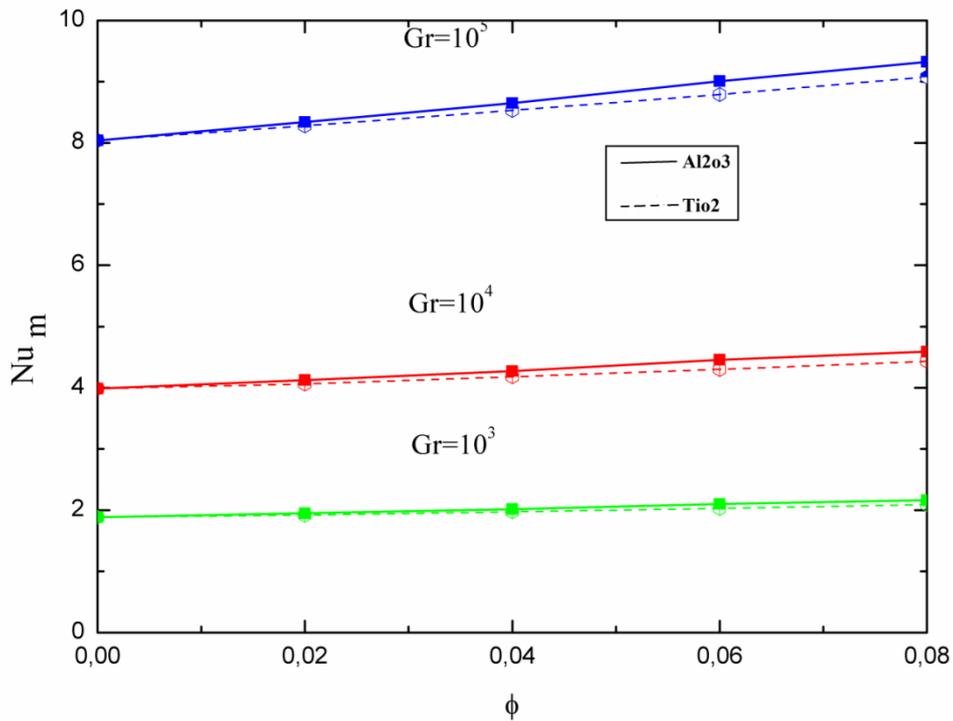


Figure IV.24: Variations du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Gr, types du nanoparticules, concentration des nanoparticules ϕ

Les deux modèles Al_2O_3 et TiO_2 ont mesurés sur la même concentration de nanoparticules de 0.0 jusqu' à 0.8, on fait la comparaison avec les mêmes nombres de Gr 10^3 , 10^4 , 10^5 . On remarque que le Nusselt moyen de Al_2O_3 est plus haut niveau que le Nusselt de TiO_2 . donc le nanofluide de Al_2O_3 est mieux pour le transfert de chaleur que le TiO_2 .

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans le présent travail, l'amélioration du transfert de chaleur dans une enceinte carrée différentiellement chauffée et remplie d'un nanofluide homogène a été étudié numériquement pour des nombres de Grashof, des fractions volumétriques solides et des types de nanoparticules. Les résultats présentés révèlent que l'ajout des nanoparticules solides dans l'eau et l'augmentation de leur concentration augmente le taux du transfert de chaleur à n'importe quelle valeur du nombre Grashof. En outre, les résultats montrent clairement que la présence des nanoparticules altère la structure de l'écoulement du fluide au niveau du champ dynamique et thermique. D'après les résultats, on constate que le type de nanofluide s'avère un facteur clé du transfert de chaleur.

Références bibliographiques

- [1]: Areview Babita, S.K. Sharma, Gupta Shipra Mital Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application. 2016.
- [2] <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>
- [3] KHIDER fatma zohra, Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base, thèse de Master Université de M'sila, 2016.
- [4] <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>
- [5] <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physiquechimie/terminales/thermodynamique/transferts-thermiques.html>
- [6] Bocquet L. et Charlaix E., 2009, Nanofluidics, from bulk to interfaces, Chemical Society Review
- [7] ZEGHBID Ilhem Etude de la Convection Mixte dans des Cavités. Présentée pour obtenir le diplôme de Doctorat en Sciences en Génie Mécanique. Soutenue en 2017
- [8] Eijkel, J. C. T. et van den Berg, 2005, *Microfluid. Nanofluid.* 1, 249
- [9] Salma Halelfadl. Caractérisation des propriétés thermo-physiques et d'échanges de chaleur des nanofluides à base de nanotubes de carbone. Génie mécanique (physics.class-ph). INSA de Rennes, 2014.
- [10] Gladés Bachir Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard Thèse de doctorat 2010
- [11] Hakan F. Oztop ,Eiyad Abu-Nada. Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids. International Journal of Heat and Fluid Flow 29 (2008) 1326–1336
- [12] Salhi Hicham étude numérique de la convection naturelle dans les enceintes par nanofluides. UNIVERSITE DE BATNA. 2015
- [13] Mahdi Benzema et al. Rayleigh-Bénard MHD convection of Al₂O₃–water nanofluid in a square enclosure: magnetic field orientation effect / Energy Procedia www.sciencedirect.com. 139 (2017) 198–203.
- [14] Jou RY, Tzeng SC. Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2006;33:727–36.

- [15] C.J. Ho et al. Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. / *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 51 (2008) 4506–4516
- [16] N. Sad Chemloul et M.A. Belmiloud. Effet des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique dans une cavité carrée. *Revue des Energies Renouvelables*. Vol. 19 N°3 (2016) 397 – 408.
- [17] Oztop et al Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 29 (2008) 1326–1336
- [18] Aminossadati SM, Ghasemi B. Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 2009;28:630–40.
- [19] Lin et al Natural convection heat transfer of nanofluids in a vertical cavity: effects of non-uniform particle diameter and temperature on thermal conductivity. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2010;31:236–45.
- [20] Corcione M. Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls. *International Journal of Thermal Science*. 2010;49:1536–46
- [21] Santra A K, Sen S, Chakraborty N. Study of heat transfer augmentation in a differentially heated square cavity using copper-water nanofluid. *International Journal of Thermal Science*. 2008;47:1113–22.
- [22] Rashmi W, Ismail AF, Khalid M. CFD studies on natural convection heat transfer of Al₂O₃–water nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, (accepted April 2010)
- [23] Das MK, Ohal PS. Natural convection heat transfer augmentation in a partially heated and partially cooled square cavity utilizing nanofluids. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*. 2009;19:411–31.
- [24] Ghasemi B, Aminossadati SM, Raisi A. Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid filled square enclosure. *International Journal of Thermal Science*. 2011;50:1748 :56.
- [25] Oztop H F, Abu-Nada E, Varol Y, Al-Salem K. Computational analysis of non isothermal temperature distribution on natural convection in nanofluid filled enclosures. *Super lattices Microstructures*. 2011;49:453–67.
- [26] Aminossadati S M, Ghasemi B. Natural convection of water-CuO nanofluid in a cavity with two pairs of heat source–sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011;38:672–8.

- [27] Jahanshahi M, Hosseinizadeh S F, Alipanah M, Dehghani A, Vakilinejad G R. Numerical Simulation of free convection based on experimental measured conductivity in a square cavity using water/SiO₂ nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010;37:687–94.
- [28] Kefayati O, Hosseinizadeh S F, Gorji M, Sajjadi H. Lattice Boltzmann simulation of natural convection in tall enclosures using water/SiO₂ nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011;38:798–805.
- [29] Ghasemi B, Aminossadati S M. Periodic natural convection in a nanofluid filled enclosure with oscillating heat flux. *International Journal of Thermal Science*. 2010;49:1–9.
- [30] Sheikhzadeh G A, Arefmanesh A, Kheirikhah M H, Abdollahi R. Natural convection of Cu–water nanofluid in a cavity with partially active side walls. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 2011;30:166–76.
- [31] Lai FH, Yang YT. Lattice Boltzmann simulation of natural convection heat transfer of Al₂O₃/water nanofluids in a square enclosure. *International Journal of Thermal Sciences* 2011;50:1930–41.
- [32] Haddad Z, Oztop HF, Abu-Nada E, Mataoui A. Natural Convection in Nanofluids: Are the thermophoresis and Brownian motion effects significant in nanofluid heat transfer enhancement. *International Journal of Thermal Sciences* 2012;57:152–62.
- [33] Mahmoodi M. Numerical simulation of free convection of a nanofluid in L shaped cavities. *International Journal of Thermal Science* 2011;50:1731–40.
- [34] Elhajjar B, Bachira G, Mojtabi A, Fakihi C, Charrier-Mojtabi MC. Modeling of Rayleigh–Bernard natural convection heat transfer in nanofluids. *CR Mecanique* 2010;338:350–4.
- [35] Khalil Khanafer et al. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 3639–3653.
- [36] MEKROUSSI Said. Etude de la convection mixte a travers des surfaces complexes. Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur ES-Science Soutenu le : 15 / 05 / 2014.
- [37] KESSALI Mohamed et SALL Daouda. Influence de la position de l'obstacle sur l'écoulement d'un fluide dans un élargissement brusque. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master II. 2015/2016
- [38] <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1063/8/CHAPITRE4.pdf>
- [39] G. Barakos, E. Mitsoulis, Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 18 (1994) 695–719.

- [40] N.C. Markatos, K.A. Pericleous, Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, *Int. J. Heat Mass Transfer* 27 (1984) 772–775.
- [41] G. De Vahl Davis, Natural convection of air in a square cavity, a benchmark numerical solution, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 3 (1962) 249–264.
- [42] T. Fusegi, J.M. Hyun, K. Kuwahara, B. Farouk, A numerical study of three-dimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure, *Int. J. Heat Mass Transfer* 34 (1991) 1543–1557.

الملخص

تركز الأطروحة على دراسة العلبة المربعة على مستوى ثنائي الأبعاد، و يتم معالجتها بواسطة الحمل الحراري الطبيعي ، تكشف النتائج المقدمة أن إضافة جسيمات نانوية صلبة في الماء وزيادة تركيزها تزيد من معدل انتقال الحرارة مهما كانت قيمة الرقم غراشوف. بالإضافة إلى ذلك ، أظهرت النتائج بوضوح أن وجود الجسيمات النانوية يغير هيكل تدفق السائل على مستوى المجال الديناميكي والحراري. أظهرت النتائج أن نوع المادة النانوية هو عامل رئيسي في انتقال الحرارة.

Résumé

Le mémoire porte sur l'étude d'une enceinte carrée en 2d traité par la convection naturelle. Les résultats présentés révèlent que l'ajout des nanoparticules solides dans l'eau et l'augmentation de leur concentration augmente le taux du transfert de chaleur à n'importe quelle valeur du nombre Grashof. En outre, les résultats montrent clairement que la présence des nanoparticules altère la structure de l'écoulement du fluide au niveau du champ dynamique et thermique. D'après les résultats, on constate que le type de nanofluide s'avère un facteur clé du transfert de chaleur.

Abstract

The thesis focuses on the study of a square enclosure in 2d treated by natural convection, The results presented reveal that the addition of solid nanoparticles in water and the increase of their concentration increases the rate of heat transfer to any value of the Grashof number. In addition, the results clearly show that the presence of the nanoparticles alters the structure of the fluid flow at the level of the dynamic and thermal field. The results show that the type of nanofluid is a key factor in heat transfer.