République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Farés de MÉDÉA



Faculté de Technologie

Département de Génie des procèdes et environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master 2

Filière : génie des procèdes

Spécialité : Génie chimique

Thème : Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité remplie d'un nanofluide.

Présenté par :

MEGDACHE Hemza

BENKRAOUCHE Khaled

Promoteur :

Dr. REBHI Redha

Pr. HADIDI NOUREDINE

***Soutenue le** : juin 2022*

Remerciement

Avant tous, nos remercions dieu qui nous donne le courage et la patience de faire **c**e travail, malgré toutes les difficultés. Prière et Salutation pour le plus honorable Messagère maitre de la création notre prophète "Mohamed" Commençons par les enseignants. Notre promoteur **Dr. REBHIRedha**, et notre Co- promoteur **Pr HADIDI NOUREDINE.**

De donnez-nous une chance de travailler sur ce sujet merveilleux, ettous les remerciements et appréciations.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui nous ont apporté directement Ou indirectement des conseils et du soutien et de l'assistance dans la réalisation de ce travail, Enfin une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants du Faculté des Sciences et technique pour leurs efforts et leursCollaborations lors de notre cursus.

Dédicace :

Mon plus profond et s'insère remerciement va tout d'abord «Allah» qui m'a donné la foi, la force et le courage pour mener ce travail a terme.

- A mes chers parents qui rêvaient de me voir en ce lieu, Pour leur amour, leur sacrifice, leur éducation et leur soutien au long de mes études.
- A mes chers frères, source de joie et de bonheur.
- A toute ma famille qui m'ont encourage durant le travail.
- A tout les amis intimes pour leur soutien moral et les bonheurs.
- A Mes amies ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont encouragé et aidé le long de mes études.
- **ToutelesAmisettoutcollèguesdel'universitédemédéa.**
- À tous mes collègues et mes amies surtout mon binôme KHALED.

HEMZA

Dédicace :

Mon plus profond et s'insère remerciement va tout d'abord «Allah» qui m'a donné la foi, la force et le courage pour mener ce travail a terme.

- A mes chers parents qui rêvaient de me voir en ce lieu, Pour leur amour, leur sacrifice, leur éducation et leur soutien au long de mes études.
- A mes chers frères, source de joie et de bonheur.
- A toute ma famille qui m'ont encourage durant le travail.
- A tout les amis intimes pour leur soutien moral et les bonheurs.
- A Mes amies ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont encouragé et aidé le long de mes études.
- **ToutelesAmisettoutcollèguesdel'universitédemédéa.**
- À tous mes collègues et mes amies surtout mon binôme HEMZA.

KHALED

نبذة مختصرة

نقدم في هذا العمل تأثير الحمل الحراري الطبيعي باستخدام سائل نانوي داخل مصفوفة مسامية مائلة ثنائية الأبعاد. تم استخدام نموذج Dupuit-Darcy لوصف التدفق داخل الوسط المسامي. المصفوفة مربعة محددة بواسطة جدار عمودي يسار مسخن لدرجة حرارة TC وجدار أيمن مبرد إلى درجة حرارة ثابتة TC بينما الجدران الأفقية حافظت على ثابت الحرارة. تم استخدام كود فورتران على أساس طريقة الحجم المحدود لحل المعادلات الحاكمة. تم إجراء الاختبار لوسط رغوة الألمنيوم المسامي المشبع بماء النحاس (Cu-H2O) النانوي الناتج عن عدد تأثيرات RT Rayleigh زاوية الميلαمع معامل التأثير بالقصور الذاتي الأفقي G وجزء حجم الجسيمات النانويةω.

أظهرت النتائج أن الزيادة في عدد t Rayleigh عديم الأبعاد له تأثير إيجابي على قدرة الحمل الحراري، وبالمثل فإن جزءًا كبيرًا من الجسيمات النانوية سيحسن هذه القدرة الحملية مقارنة بالجزء الأدنى، ومن ناحية أخرى الزيادة في معامل القصور الذاتي a G يرتبط التأثير السلبي على شدة الحمل الحراري وتحسين تأثير الحمل الحراري بقيمة منخفضة جدًا لـ G ، وبالتالي الميلαله تأثير كبير جدا على الحمل.

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي، سائل نانوي، مصفوفة مسامية مائلة، وسط مسامي، المعادلات الحاكمة، رغوة المنيوم، ماء النحاس، تأثير بالقصور الذاتي

ABSTRACT

In this work we present the effect of natural convection with a Nano fluid inside an inclined two-dimensional porous matrix. The Dupuis-Darcy model was used to describe the flow inside the porous medium. The matrix is square delimited by a vertical left wall heated to a temperature TC and a right wall cooled to the constant temperature TC While the horizontal walls kept adiabatic. A Fortran code based on the finite volume method was used to solve the governing equations The test was carried out for a porous aluminum foam medium saturated with Copper-Water nanofluid (Cu-H2O) generated by the Rayleigh number effects, the angle of inclination with the horizontal R, the inertial effect parameter G and the volume fraction of the nanoparticles G.

The results show that the increase in the dimensionless number of Rayleigh has a positive effect on the convective power, likewise a high fraction of the nanoparticles will improve this convective power compared to a minimum fraction, on the other hand the increase in the inertial parameter G has a negative effect on the convection intensity and the optimization of convective effect is related with a very reduced value of G, thus the inclination G has a very significant effect on convection.

Keywords: effect of natural convection, Nano fluid, inside an inclined two-dimensional, porous medium, governing equations, aluminum foam, Copper-Water nanofluid

RESUME

Dans ce travail nous présentons l'effet de la convection naturelle avec un nanofluide à l'intérieur d'une matrice poreuse bidimensionnelle inclinée. Le modèle Dupuit-Darcy a été utilisé pour décrire l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux. La matrice est carrée délimitée par une paroi gauche verticale chauffée à une température T_H et une paroi droite refroidie à la température constante T_C Tandis que les parois horizontales maintenues adiabatiques. Un code fortran basé sur la méthode des volumes finis a été utilisé pour résoudre les équations gouvernantes L'épreuve a été réalisée pour un milieu en mousse d'aluminium poreux saturé de nano fluide Cuivre-Eau (Cu-H_2O) engendré par les effets de nombre de Rayleigh R_T l'angle d'inclinaisonα avec l'horizontal, le paramètre d'effet inertiel G et la fraction volumique des nanoparticulesω.

Les résultats montrent que l'augmentation du nombre adimensionnel de Rayleigh a un effet positif pour le pouvoir convectif, de même une fraction élevée des nanoparticules va améliorer ce pouvoir convectif par rapport à une fraction minimale, par contre l'augmentation du paramètre inertiel G a un effet négatif sur l'intensité de convection et l'optimisation d'effet convectif est lié avec une valeur très réduite de G, ainsi l'inclinaison α a un effet très significatif sur la convection.

Mot clé : convection naturelle, nano fluide, matrice poreuse bidimensionnelle inclinée, équations gouvernantes, nano fluide Cuivre-Eau, mousse d'aluminium

Nomenclature

Symboles Latins:

Cp Chaleur spécifique du fluide à pression constante. J $Kg^{-1}K^{-1}$

G Accélération de la pesanteur $m{\cdot}s^{-2}$

H Coefficient de transfert de chaleur par convection W $m^{-2}K^{-1}$

Sϕ Terme source

T Température adimensionnelle

u.v. Composante de vecteur vitesse ms^{-1}

U, V Composante adimensionnelle du vecteur vitesse

x, y Cordonnées cartésiennes M

X, Y Cordonnées cartésiennes adimensionnelles

Symboles grecs:

α Diffusivité thermique m^2s^{-1}

υ Viscosité cinématique m^2s^{-1}

μ viscosité dynamique N s m^{-2}

Γ Coefficient de diffusion m^2s^{-1}

ρ Masse volumique Kg m^{-3}

ϕ, f Variables intervenant dans l'équation

de transport

β Coefficient de dilatation cubique du fluide k^{-1}

ΩVerticité adimensionnelle

ΨFonction de courant adimensionnelle

θTempérature adimensionnelle

θcTempérature de la source de chaleur

θ_{max}Température maximale

θ_{min}Température minimale

α1, α2amplitudes de la surface ondulée

λLongueur d'onde Rα rapport d'amplitude

γAngle d'inclinaison

ξηCordonnées cartésiennes changement de variable

φFraction volumique

Nombres adimensionnels:

Pr Nombre de Prandtl Pr =υ/α

Ra Nombre de RayleighRa =Δt g H^3β/υ.α

Nu Nombre de NusseltNu = hH/K

RT Nombre de ReynoldsRe =ul /V

Ri Nombre de Richardson Ri=p gBQ L /u K

Gr Nombre de Grashof Gr=p gBQ L/ u K

Ha Nombre de Hartmann Ha=B$L_c\sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}$

Liste des tableaux

Tableau1.1 Propriétés thermo physiques du fluide pur et des nanoparticules 23

Tableau 2.1 Propriétés thermo physiques du fluide (eau), cuivre (Cu), oxyde d'aluminium 31

Tableau 3.1L'effet de mouillage 37

Liste des figures

Figure I.1 Schème présentatif de Transfer thermique 5

Figure I-2 Transfer thermique par convection 6

Figure I-3 La conduction de la chaleur *6*

FigureI-4 Transfer thermique par rayonnement 7

Figure 1-5convections libres sur élément chauffant 8

Figure 1-6convections libres sur élément chauffant 9

Figure 1-7convections dans une cavité avec gradient de température horizontal 11

Figure 1 .8 volume élémentaire représentatif 13

Figure 1.9 La porosité 14

Figure 1.10 modelé de capillaire tortueux15

Figure1.11 Dispositif de mesure de perméabilité sur matériau consolidé 17

Figure 1-12 nanoparticules de différant diamètre 19

Figure 1.13 Préparation de nanofluides à l'aide d'une méthode en deux étapes20

Figure 1.14. Travaux de Selime fendigil et al20

Figure 1.14Nanoparticule (TiO2)21

Figure 1.15 Nanoparticule (Ag)21

Figure 1.16Nanoparticule (AL)22

Figure 2.1physical model and coordinate system27

Figure3.1Les lignes de courant et les champs des températures

et la vitesse pour L'effet de mouillage 38

Figure3.1Les lignes de courant et les champs des températures pour l'effet de Rayleigh 39

Figure3.2Les lignes de courant et les champs des températures pour l'effet d'inertie41

Figure3.3Les lignes de courant et les champs des températures pour l'effet d'angles41

Figure3.4Les lignes de courant et les champs des températures pour l'effet

fractionvolumique43

Figure3.5 Les lignes de courant et vitesse et la température pour l'effet de Rayleigh 46

Figure3.6 Les lignes de courant et vitesse et la température pour l'effet d'inertie47

Figure3.7 Les lignes de courant et vitesse et la température pour l'effet d'angles48

Figure3.8 Les lignes de courant et vitesse et la température pour l'effet fraction

Volumique49

Figure.3.9. Variation de la fonction de flux et nombre moyen de Nusselt pour l'effet

D'inertie 50

Figure.3.10. Variation de la fonction de flux et nombre moyen de Nusselt pour l'effet

D’angles 52

Figure.3.11. Variation de la fonction de flux et nombre moyen de Nusselt pour l’effet

Fraction Volumique 54

TABLE DES MATIERES

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

Chapitre I Généralités et synthèse bibliographique

I.1Introduction …… 5

I.2.Thermodynamique et Transfer thermique …… 5

I.3 Les trois modes de transfert de chaleur ……. 5

1.3.1 Convection ……6

I.3.2 Conduction ……6

I.3.3Rayonnement ……7

I.4 Type de convection ……7

I.4.1Convection forcée ……8

I.4.2 Convection naturelle……8

I.4.2.1Cavité avec gradient vertical de température ……9

I.4.2.2 Cavité avec gradient horizontal de température …… 10

I.4. 3 Grandeurs sans dimension ……11

I.4.3.1 Le Nombre de Reynolds…… 12

1I4.3.2Le Nombre de Nusselt ……12

I.4.3.3Le Nombre de Rayleigh ……12

I.4.3.4Le nombre de Richardson ……13

I.4.3.5 Le nombre de Grashof (Gr) ……13

I-5 Milieu poreux ……14

I-6.Caractéristiques des milieux poreux …… 14

I-6-1 La porosité ……14

I-6-2 La tortuosité ……. 15

I.6.3Aire spécifique ……16

I.6.4 La perméabilité ……16

I.7modelés découlement en milieu poreux ……17

I.7.1 modelés de darcy ……17

I.7.2 Modèle de Darcy-Brinkman ……20

I.7.3 Modèle de Darcy-Forchheimer …….. 21

I.7.4 Modèle de Darcy-Forchheimer-Brinkman (Modèle général) ……21

I.8. Nanofluides ……22

I.8.1Nanoparticules de Cuivre (Cu) ……23

I.8.2Nanoparticules de dioxyde de Titane (TiO2) ……24

I.8.3Nanoparticules d'Argent (Ag) ……25

I.8.4Nanoparticules d'aluminium (Al) ……25

I-9 Propriétés thermophysiques des nanofluides ……26

I-9 1La Masse volumique ……26

I-9 2La Chaleur spécifique ……27

I-9 3Conductivité thermique ……27

I-9 4La viscosité cinématique ……28

I.10. Application des nanofluides dans l'industrie ……29

I-10-1Applications de refroidissement industriel ……. 29

I-10-2Smart Fluides…….....30

I-10-3Extraction de l'énergie géothermique et d'autres sources d'énergie …… 30

Chapitre II Formulation mathématique

II.1 Formulation du problème …… 32

II.1 Equation de continuité ……..... 33

II.2 Equation de mouvement : loi de Dupuit-Darcy …….. 33

II.3 Equation de conservation de l'énergie ……33

II.3.1 Première application : c_u-eau nanofluide saturant un milieu poreux sans effet de champ magnétique …… 36

II.4 Conditions aux limites …… 38

II.4.1 Conditions aux limites hydrodynamiques ……... 38

II.4.2 Conditions aux limites thermiques ……..... 39

II.5 Transfert de chaleur ……..... 39

Chapitre III MÉTHODE NUMÉRIQUE

III.1 méthode numérique …….. 42

III.1 Thermal boundary conditions discretization ……... 44

III.2 Discretisation des equations énergétiques …… 44

III.3 Sécrétisation de l'équation de quantité de mouvement …… 50

III.4Discrétisation des champs de vitesse …….. 52

III.5 Conditions aux limites de vitesse …… 53

III.6 Algorithme aux calculs …… 53

III.7 Algorithme de calcul ……..... 55

Chapitre IVRésultats et discussions

IV.1 Résultats et discussions …… 58

IV.2.Enceinte carrée ……..... 58

IV.3.L'effet de la taille des maillages …… 59

IV.4.les lignes des courant et ses isotherme pour L'effet de nombre de Rayleigh ……. 60

IV.5les lignes des courant et ses isotherme pour L'effet de paramètre d'inertie……. 62

IV.6 les lignes des courant et ses isotherme pour L'effet d'inclinaison d'angle……..65

IV.7les lignes des courant et ses isotherme pour fraction volumique des nanoparticules. 67

IV.9. Les courbes d'effet de nombre de Rayleigh …… 68

IV.10. Les courbes d'effet de paramètre d'inertie ……. 71

IV.11 Les courbes d'effet defraction volumique des nanoparticules …… 73

IV.12.Les courbes d'effet d'inclinaison d'angle …… 76

Introduction général

Introduction générale

Le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance dans le domaine deL'industrie et des technologies. Bien qu'il se manifeste sous diverses formes (rayonnement,Conduction et convection), cette dernière est la plus visée dans certains domaines bien Spécifiés tels que le refroidissement des processeurs et des composantes électroniques, lesRadiateurs et les échangeurs de chaleurs des procédés industriels, etc.

L'amélioration du transfert de chaleur par convection est l'objet principal de plusieursTravaux, et pour se faire, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude d'essais numériques et expérimentaux portant sur la description des phénomènes gérant la convection,
L'effet de la nature des systèmes dans lesquels elle a lieu (géométrie spécialement), et lesPropriétés des fluides impliqués (propriétés physico-chimiques).

L'étude de la convection naturelle dans les enceintes a fait l'objet d'un très grand nombre de travaux tant théoriques qu'expérimentaux. L'intérêt de telles études réside dansons implication dans de nombreuses applications industrielles telles que le refroidissement Des composants électroniques, la thermique des bâtiments, l'industrie métallurgique, la Croissance des cristaux pour l'industrie des semi-conducteurs, et le cas d'une génération deChaleur accidentelle due à un incendie dans un bâtiment pour réacteur nucléaire,.....etc. L'enceinte carrée continue à être la géométrie qui présente le plus d'intérêt. Dans ce typeD'enceinte, généralement deux parois sont maintenues à des températures différentes tandis Que les autres sont isolées.

Les géométries complexes couvrent différents types de configurations géométriques, àSavoir les cavités à parois ondulées, les cavités à parois courbées concaves et convexes. ParmiLes travaux concernant x les effets de courbure des parois des enceintes fermées sur la convectionsont naturelle, la majorité ont été consacrés à la géométrie carrée et rectangulaire dontUne ou deux parois ondulées.

Chronologiquement, bien que les idées d'amélioration aient touché surtout la géométrie des systèmes, et la nature physico-chimique des milieux convectifs, les travauxn'ont touché que l'ordre macroscopique ou parfois microscopique du processus. Mais avecL'apparition et le développement rapide des nanosciences et nanotechnologies pendant la Deuxième moitié du 20eme siècle, la convection a pris une grande part de cette nouvelle Richesse, et a pris un autre aspect de perfectionnement : c'est au niveau nanométrique de la matière du milieu convectif que les récents travaux ont été concentrés.

Les nano fluides sont alors l'un des fruits d'une telle richesse. Dotés de propriétés Physico-chimiques particulières et intéressantes telle que leur importante conductivité Thermique, les nanofluides offrent un coefficient de transfert thermique imbattable par les autres caloporteurs. Les études menées dans cette nouvelle direction ont fournit une riche Bibliographie, mais très variée : bien qu'en majorité ils sont assez positifs.

CHAPITRE 0I

GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les connaissances actuelles relatives à la convection naturelle dans les enceintes, les nano-fluides et leurs applications éventuelles, tantD'un point de vue théorique qu'expérimental. On s'intéresse en particulier à l'effet de type du Nano fluide et leurs concentrations sur le transfert de chaleur. On s'attache également à décrireL'influence de plusieurs paramètres sur la convection naturelle talque la forme de la géométrie(Enceinte carrée et ondulée), l'angle d'inclinaison et la position de la source de chaleur …

I-2.Thermodynamique et Transfer thermique

La thermodynamique représente une partie importante de la physique technique qui étudie les lois de la production de la chaleur ayant à la base d'autres formes d'énergie. Sa transformation sa propagation et son utilisation pratique.

La notion de la chaleur et définie par la thermodynamique comme étant une grandeur de parcours représentant une forme transitoire d'énergie qui se propage à la suite d'une différence de températures :

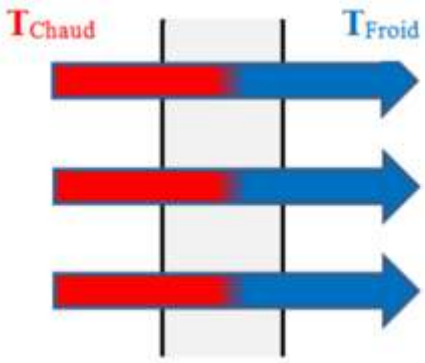


Figure 1.1 Schème présentatif de Transfer thermique

- Entre deux parties d'un système quelconque ;
- Entre le système et son environnement ;
- Entre deux systèmes séparés par un milieu matériel ou vide ;

I -3 Les trois modes de transfert de chaleur

I.3.1 Convection

La convection est une mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapesD'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules fluidesadjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de cesParticulesEnsuite ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie, celle-ci est à présent emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.[1]

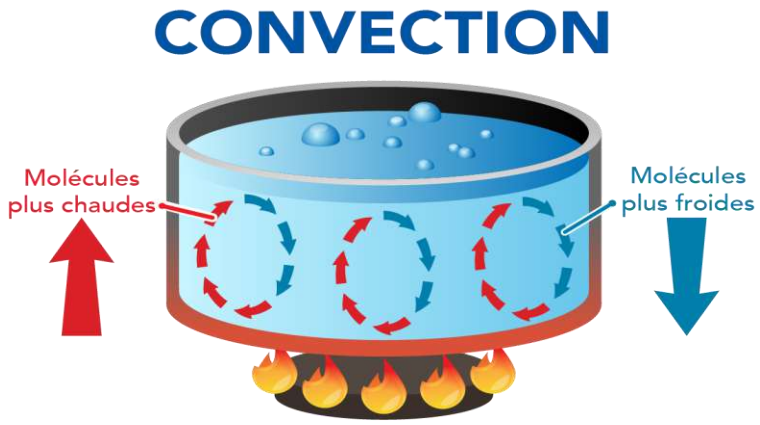


Figure I-2Transfer thermique par convection (parlons sciences)

I.3.2 CONDUCTION

Ce mode de transfert de chaleur se retrouve dans tous les composants "solides" d'une transmission, c'est le plus simple. Il correspond au transfert de chaleur dans un solide d'un point chaud vers un point froid. [2]

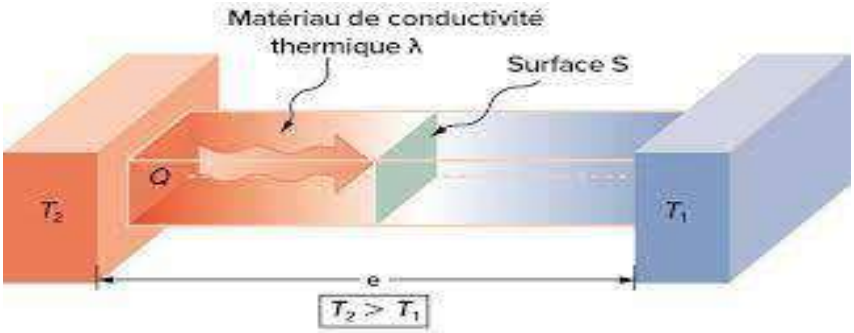


Figure I-3La conduction de la chaleur (openstax college physics)

I.3.3 Rayonnement

Tout corps chauffé émet un rayonnement électromagnétique. Il peut alors réchauffer à distance un corps absorbant ce rayonnement. La température d'un corps isolé ne varie plus lorsqu'il rayonne autant d'énergie qu'il en reçoit.La lave provenant d'une éruption volcanique émet un rayonnement thermique si fort qu'une protection est nécessaire pour s'en approcher.[3]



FigureI-4Transfer thermique par rayonnement (kartable.fr)

I.4. Type de convection

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulementDu fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des Courants dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que laConvection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué

par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à L'autre, la convection est dite mixte. [4]

I-4-1Convection forcée

Estprovoquée par une circulation artificielle (pompe, turbine) d'un fluide. Par exemple, dans un sèche-cheveux, un flux d'air est soufflé par un ventilateur à travers une résistance électrique chauffante : l'air est chauffé par convection forcée. [5]

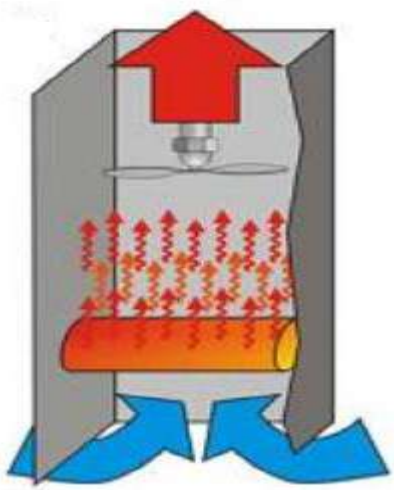


Figure I -5convections forces sur élément chauffant

I-4-2.Convection naturelle

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradientsDe densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc dePoids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant unMécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions à températureÉlevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse de courantsDescendants se produits pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle duFluide chaud.Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poidsSpécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ dePesanteur terrestre. L'intervention du poids a pour effet de donner à la verticale un rôle privilégie. LaDéfinition de la géométrie d'un système convectif doit donc faire intervenir la forme et lesDimensions ainsi que la disposition par rapport à la verticale. Les effets de convection naturelle sont familiers. On peut les observerQuotidiennement dans l'eau que l'on chauffe dans un récipient, dans les panaches de certaines cheminées d'usines, la

circulationatmosphérique, les vents, les tempêtes sont aussi des effetsDe la convection naturelle. [6]

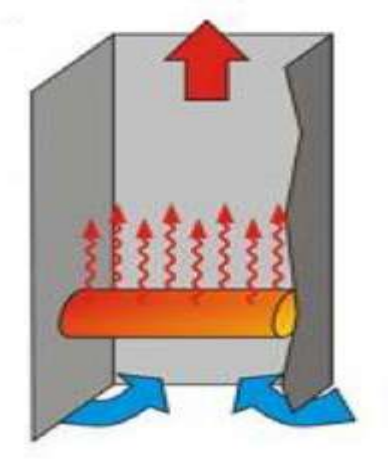


Figure 1-6convections libres sur élément chauffant

En outre et selon les conditions aux limites, les études relatives à la convection sontSouvent menés dans les cavités. On peut distinguer plusieurs types de problèmes dans les Cavités, on cite deux cas :

I.4.2.1 Cavité avec gradient vertical de température :

Quand on impose un gradient de température verticale du fond au sommet de la cavité, On a ce qu'on appelle la convection de Rayleigh- Bénard. Elle a une longue et riche histoireEllea été étudiée durant des décennies aussi bien pour ses différentes applications industrielles que du point de vue recherche fondamentale. Le mécanisme de base de cetteConvection est comme suit. Les parois horizontales de la cavité étant respectivementChauffées et refroidies, par suite de différence de température, la chaleur s'écoule entre leFluide et le corps et provoque une variation de densité des couches fluides au voisinage de laSurface. La différence de densité crée un écoulement descendant pour le fluide le plusLourd et un écoulement ascendant pour le fluide le plus léger. Quand le gradient deTempérature est vertical avec paroi supérieure chaude et paroi inférieure froide, on n'aura pasde mouvement

Et par conséquent pas de convection, le fluide est thermiquement stratifié etOn a le cas stable. [7]

I.4.2.2 Cavité avec gradient horizontal de température :

Dans cette configuration, les parois verticales sont chauffées et refroidie, alors que les parois horizontales sont adiabatiques. L'écoulement prend la forme d'un vortex avec le fluide ascendant le long de la paroi chaude et descendant suivant la paroi froide.[8]

Les premiers travaux portant sur la convection naturelle ont été entrepris, dans les années 60 du 20emesiècle, par Val Davis et al [9] et [10]. Ces auteurs ont utilisé la méthode des différences finies pour résoudre le problème de convection naturelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée. Ces études ont eu le mérite de lancer une compétition internationale sur le sujet. Elles ont montré que la distribution de température à mi-hauteur de la cavité est presque linéaire et le gradient thermique vertical tend vers zéro pour les valeurs du nombre de Rayleigh inférieures à 10_4

Mohammad, S.A. Gandjalikhan, Maryam, Masud [11] qui ont étudié la convection naturelle au sein d'une enceinte rectangulaire bidimensionnelle munie d'une source de chaleur discrète. Avecdes parois horizontales thermiquement isolées, une paroi verticale froide isotherme et une source de chaleur installée sur l'autre paroi verticale, ils ont obtenu numériquement la position de la source qui optimise le transfert thermique, en fonction du nombre de Rayleigh. Cette position optimale se trouve près du centre de la paroi verticale, mais glisse légèrement vers le bas à mesure que le nombre de Rayleigh augmente.

Anderson and Lauriat [12] ont étudié l'écoulement dans une enceinte carrée avec chauffage localisé au-dessous grâce à un flux uniforme ou par maintien d'une

Température constante tandis qu'un mur vertical était refroidi et isotherme. Les observations expérimentales ont confirmé l'absence de l'instabilité de type Rayleigh Bénard pour le flux, si les nombres de Rayleigh sont plus grands que 5×103. Francis [13] Ce travail présente des résultats expérimentaux obtenus dans une cavité différentiellement chauffée de 4 m de hauteur. Dans cette étude, des cartographies de température (micro thermocouples) ont été établie pour des écoulements de convection naturelle turbulente à grands nombres de Rayleigh ($4{,}0\times1010 \leq Ra \leq 1{,}2\times1011$) avec l'approximation de Bousines. L'exploitation des résultats expérimentaux a, entre autre, permis de caractériser la stratification thermique aucentre de la cavité ainsi que son évolution en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes émissivités des parois passives. En outre, cette caractérisation a permis de

connaitre les répartitions des flux échangés à la paroi, la typologie des écoulements au voisinage des parois actives et dans le plan vertical médian, ainsi que le cheminement du fluide dans la partie haute de la cavité. Ces résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus dans d'autres cavités différentiellement chauffées de moindres dimensions étudiées antérieurement au laboratoire.

L'ensemble de ces résultats montre une grande cohérence et permet de déterminer des lois d'évolution de la vitesse maximale atteinte dans la cavité et du transfert de chaleur aux parois, en fonction du nombre de Rayleigh, en régime laminaire et turbulent. En parallèle, une étude numérique 2D a été réalisée. Son objectif est d'étudier l'influence du rayonnement de surface ou volumique sur la structure de l'écoulement et sur les modes de transfert de chaleur. Un module de transferts radiatifs a été implanté dans un code de volumes finis de convection naturelle turbulente existant. La modélisation de la turbulence est réalisée par une approche LES avec un modèle de diffusivité de sous maille adapté à la convection naturelle.

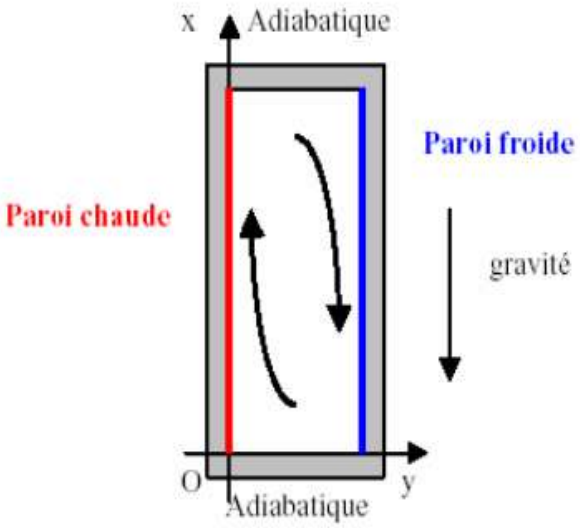


Figure 1-7schéma de la convection dans une cavité avec gradient de température horizontal

I.4. 3Grandeurs sans dimension

Une grandeur sans dimension (ou grandeur adimensionnelle) est une quantité permettant de décrire une caractéristique physique sans dimension ni unité explicited'expression. Elle est constituée du produit ou rapport de grandeurs à dimensions, de telle façon que le rapport des unités équivaut à un. Ces grandeurs sans dimension interviennent particulièrement en mécanique des fluides et pour la description de phénomène de transfert lorsqu'on utilise la similitude de modèles réduits ou théorie des maquettes et construit l'interprétation des résultats d'essais. Elles portent le nom de nombres sans dimension, nombres adimensionnels, ou encore de nombres caractéristiques.[14]

Les nombres adimensionnels les plus utilisé dans le domaine de la convection sont :

I.4.3.1Le Nombre de Reynolds :

Représente le rapport entre les forces d'inertie et les forcesvisqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant lesÉquations de Navier-Stokes. On le définit de la manière suivante [15]

$$\mathrm{Re} = \frac{ul}{V} \qquad (1.1)$$

Avec

U0 vitesse caractéristique du fluide [m/s]

L dimensions caractéristiques [m]

V viscosité cinématique du fluide [m2/s]

V viscosités dynamique du fluide [kg/ (m .s.)]

I.4.3.2Le Nombre de Nusselt

Est un nombre adimensionnel utilisé dans les opérations detransfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert thermique convectif et leTransfert thermique conductif à travers une interface (souvent fluide/solide). Si la conduction est le principal mode de transfert, alors le nombre de Nusselt sera de l'ordre de l'unité. En cas de présence de convection (due par exemple au déplacement d'un fluide en régime turbulent), le transfert thermique s'effectuera principalement par déplacement du fluide et aura pour conséquence de faire tendre le nombre de Nusselt vers l'infini. On le définit de la manière suivante : [16]

$$\mathrm{Nu} = \frac{hH}{K} \quad (1.2)$$

h: Coefficient de transfert thermique.

H: Longueur caractéristique.

K: Conductivité thermique du fluide.

I.4.3.3Le Nombre de Rayleigh

Est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides et caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide : inférieur à une valeur critique de 2000, le transfert s'opère essentiellement par conduction, tandis qu'au-delà de cetteValeur c'est la convection naturelle qui devient importante. On peut le définir comme le produit du nombre de Gras Hof, reliant les effets de la force gravifique à la viscose du fluide, et du nombre de Prandtl. Ce nombre porte le nom de Lord Rayleigh, physicien anglais. On le définit de la manière suivante :[17]

$$Ra = \frac{gBH^3(T_h - T_L)}{v_a} = Gt * \Pr \quad (1.3)$$

I.4.3.4 Le nombre de Richardson

Est le rapport du nombre de Grashof sur le carré du nombre de Reynolds.[18]

$$Ri = \frac{p^2 gBQ_v L^4}{u^2 K} \quad (1.4)$$

Si : Ri< 0.1 la convection est forcée.

Si : Ri> 10 la convection est naturelle.

Si :0.1 <Ri

I.4.3.5 Le nombre de Grashof (Gr)

Est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection libre dans un fluide :[19]

$$Gr = \frac{p^2 gBQ_v L^4}{u^2 K} \quad (1.5)$$

Avec $\rho g \beta \mu$ sont respectivement la gravité, le coefficient de dilatation thermique, la masse volumique et la viscosité dynamique.

I.4.3.6 le nombre de Hartmann

Le nombre de Hartmann (Ha)est un nombre sans dimension utilisé en magnétohydrodynamique pour caractériser le mouvement de fluides conducteurs en présence d'un champ magnétique. Il représente le rapport entre la force de Laplace et les forces visqueuses[20]

$$\mathrm{Ha}=\mathrm{B}L_c\sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \qquad (1.6)$$

Avec:

B - champ magnétique

L_c - longueur caractéristique

μ - viscosité dynamique

σ - conductivité électrique

I-5 milieu poreux

Un milieu poreux est généralement composé d'un empilement de particules solides dans lequel un fluide peut s'écouler librement dans les pores formés entre ces particules.

Un milieu poreux est caractérisé principalement par deux propriétés macroscopiques liées entre elles et qui sont la porosité et la perméabilité. Du fait que la disposition et la taille des pores sont irrégulières, la variation des paramètres régissant cet écoulement, elle sera aussi irrégulière. En pratique, ces paramètres sont mesurés à l'échelle macroscopique (moyenné). La technique utilisée est la méthode spatiale, définie comme étant une moyenne appropriée sur un volume élémentaire représentatif (V.E.R.) suffisamment large [21]

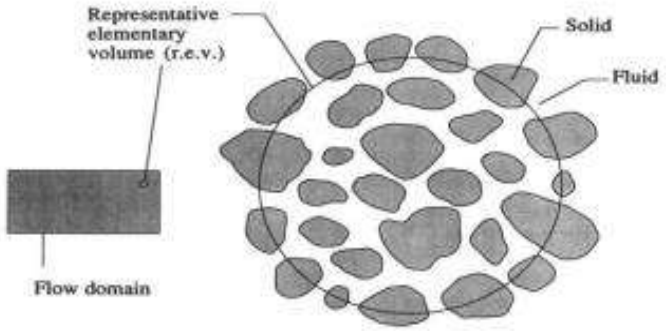


Figure 1 .8volumeélémentairereprésentatif (VER)

I-6.Caractéristiques des milieux poreux[22]

I-6-1.La porosité

Le volume total V_T d'un matériau poreux est constitué de la somme du volume des solides V_s et du volume des pores V_V (ou vides) présents dans le volume total du matériau :

$$V_T = V_V + V_s \qquad (1.7)$$

Lorsque le volume total considéré est unitaire, la somme ci-dessus est égale à l'unité. La Porosité est φ définie comme étant le rapport du volume des pores V_V d'un milieu poreux sur son volume total V_T :

$$\varphi = \frac{V_V}{V_T} \qquad (1.8)$$

φ Varie donc entre 0 (solide plein) et 1 (volume complètement vide).

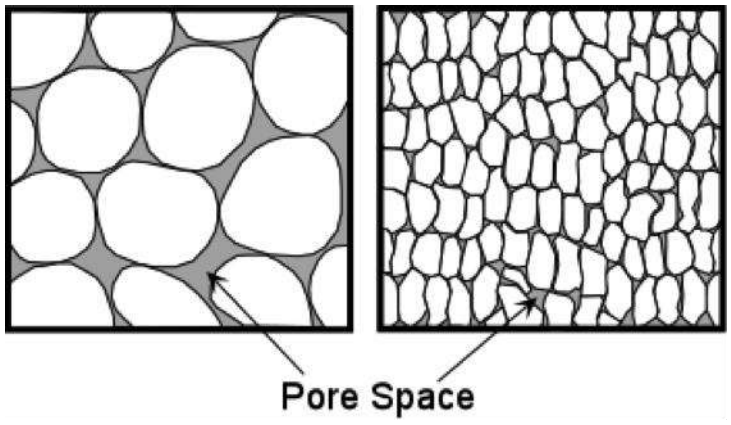


Figure 1.9La porosité

I-6-2.La tortuosité

La disposition des pores dans un milieux poreux fait intervenir la notion de connectivite qui caractérise le nombre pores de voisins a un pore ainsi que la notion de désordregéographique

.ces caractéristiques empêchent toute trajectoire en ligne droite incluse dans le volume des pores .on définit alors la tortuosité comme étant le rapport entre deux longueurs

$$\tau = \frac{L_E}{L} = \frac{longueur\ effective\ du\ capillaire}{longueur\ en\ ligne\ droite} \qquad (1.9)$$

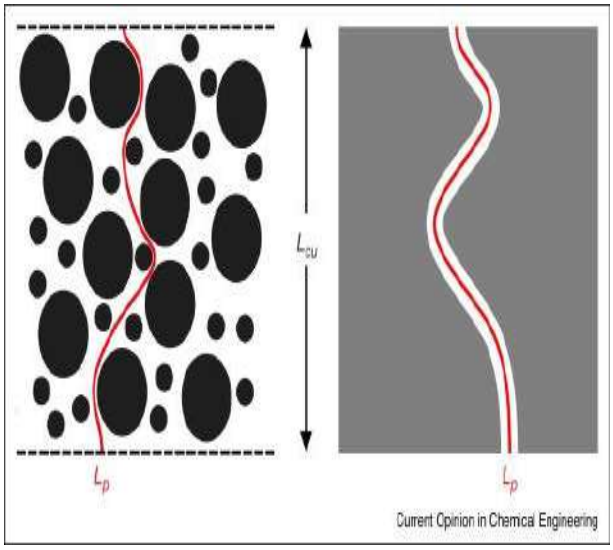


Figure1.10 modelé de capillaire tortueux (reseachgate)

I-9.1.6.3 Aire spécifique

Les milieux poreux se caractérisent par leur grande surface interne .pour interne échantillon de volume V_0 on peut définir sa surface interne de pores S. l'aire spécifique d'un poreux est définit par le rapport suivant :

$$A_S = \frac{S}{V_0} \qquad (1.9)$$

I-9.1.6.4 La perméabilité

La perméabilité est la propriété d'un matériau à transmettre un fluide sous pression, la perméabilité K dépende uniquement de la porosité est de géométrie de la matrice solide .plusieursévaluations de la perméabilité K en fonction de Ɛ et d'une dimension caractéristique de la matrice poreuse a l'échelle du pore ont été proposées .les différents expressions donnant la perméabilité dépendent de la géométrie du milieu poreux .la valeur de la perméabilité est généralement déterminée expérimentalement . Plusieurs modelés empiriques ont été proposes

.on rappelle notamment :

La relation de kozeny-carman (1927) pour un milieu poreux non consolide constitue d'éléments identiques de géométrie simple :

$$k=\frac{d^2}{36\,C_0}\frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} \qquad (1.11)$$

Ou d est la longueur caractéristique des pores ou le diamètre des particules et C_0 est une Constante qui dépond des fores des grains. Il est compris entre 3.5 et 5. La relation d'Argun (1952),semblable à l'équation ci-dessus en considèrent l'écoulement unidirectionnel d'un fluide incompressible au sein d'une colonne poreuse constitue de particules sphériques de diamètre d. la colonne est soumise a un gradient de pression.

$$K=\frac{dx^2\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)x^2} \qquad (1.12)$$

Cette relation est semblable à celle de kozeny-carman pour la valeur de C_0 =4.16 quand on

Modélise la matrice poreuse comme un faisceau de tubes capillaires parallèles conduit à l'expression suivante de la perméabilité :

$$K=\varepsilon^2\frac{dx^2}{32} \qquad (1.13)$$

Ou $$\varepsilon=\frac{n\pi dx^2}{4} \qquad (1.14)$$

Et n est le nombre de capillaires par unité de surface perpendiculaire au sens de l'écoulement

I.7modelés découlement en milieu poreux

En raison de la complexité géométrique de l'espace des pores,l'approche de la mécanique des milieux continus pour établir les modèles de conservation de la quantité du mouvement, de l'énergie et de la masse ,ne peut-être en appliques qu'après passage à une échelle macroscopique qui permet d'établir une équivalence entre le milieu réel disperse et un milieu continu fictif .d'établissement des équations macroscopiques de conservation est formellement obtenu a partir des équations microscopiques .Le premier modelé a été proposé par darcy (1856)

I.7.1Modèle de Darcy

La théorie des écoulements en milieu poreux est fondée sur les résultats d'expérience réalisée par darcy (1856).l'expérience de darcy consiste à mesurer un débit et un gradient de charge qui permettent de calculer une perméabilitégrâceà la formule (1 .9).cette expérience a été

développée au départ pour des sables ou des matériaux peu cohérents échantillon est dans un tube des rayon R, et soumis à un gradient de charge du a la différence de hauteur d'eau dans les deux réservoirs amont et aval , dont les niveaux sont maintenus constants. Le sens d'écoulement est inverse au gradient de charge .ce gradient de charge peut également être détermine grâce à la mesure de la différence de hauteur d'eau (Dh) dans deux tubes piézométriques distants de Fig. (1 .11)[22]

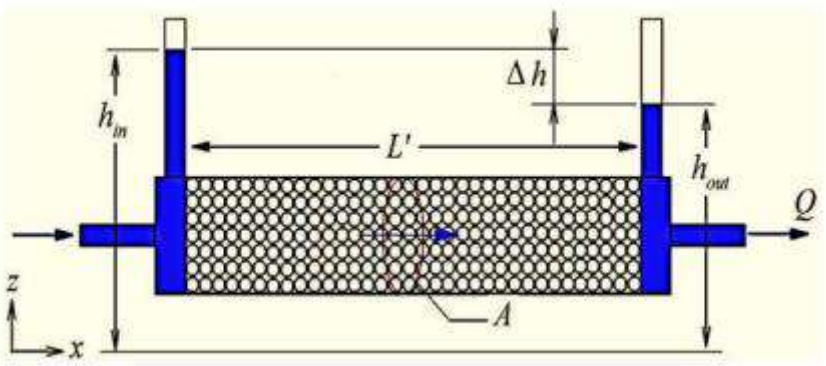


Figure 1.11 Dispositif de mesure de perméabilité sur matériau consolidé

Le liquide filtrant s'écoule depuis le niveau supérieure vers la base de la colonne à travers la couche poreuse et remonte dans les tubes manométrique a des décroissants dans le sens de

L'écoulement. La hauteur piézométrique déçoit linéairement en fonction de la distance verticale parcourue ; la pente de la droite piézométrique mesure la perte de charge linéaire :

$$J= \frac{h_{2-h_1}}{L} \quad (1.15)$$

Si le milieu poreux est assez fin, l'expérience montre que le débit de l'appareil est proportionnel à la pente de ce droit tant que celle-ci n'est pas trop forte ; avec la convection de signe habituelle, on a l'équation :

$$Q= -ka\frac{D_h}{L} \quad (1.16)$$

Ou k est une constante qui dépend à la fois du fluide et du milieu poreux.

Si, au lieu de raisonner en hauteur manométrique, on écrit la loi précédente en termes de pression on obtient ;

$$q=\frac{Q}{A}= -k\left(\frac{p_2-p_{1+pgh}}{h}\right) \quad (1.17)$$

La perméabilité peut être considérée comme significative de la surface utilisable pour l'écoulement, elle dépend de la géométrie du milieu poreux. La loi de Darcy, et donc la perméabilité est définie pour des conditions d'écoulement laminaire dans un milieu homogène, isotrope et continu; le fluide n'interagissant pas avec le milieu. On définit la conductivité hydraulique ; ou coefficient de perméabilité, comme :

$$K = \frac{k}{\mu}(1.18)$$

OùK est la conductivité hydraulique est caractéristique des conditions d'écoulement dans un matériau donné pour un fluide donné.

L'expression scalaire précédente est alors remplacée par une relation vectorielle suivante:

$$\tilde{V}=-\frac{k}{\mu}(\nabla p-g) \quad (1.19)$$

OùKest la perméabilité ν et la viscosité cinématique du fluide.

Cette loi n'est valable que pour des écoulements à basses vitesses et pour des milieux ayant une porosité relativement petite. Si les écarts de température imposés ne sont pas trop importants, les vitesses du fluide sont suffisamment faibles pour que les écoulements puissent être considérés comme Darcyens. La valeur du nombre de Reynolds est utilisée comme critère pour caractériser la transition d'un régime d'écoulement laminaire de type Darcy à un régime laminaire de type Dupuit. Pour cela on a défini un nombre de Reynolds de pore pour les écoulements en milieu poreux. En définissant d comme longueur caractéristique qui représente la dimension caractéristique des pores, le nombre de Reynolds s'écrit:

$$Re=V\frac{d}{\nu} \quad (1.20)$$

En termes de détermination de d, Collins (1961) a proposé l'expression $\mathbf{d} = \sqrt{\boldsymbol{k}/\varepsilon}$ alors que

Ward (1964) a plutôt suggéré que d = √K quel que soit la porosité.

Selon la valeur du nombre de Reynolds de pore, Bear (1972) distingue trois régimes d'écoulement. Dybbs et Edwards (1984), à l'aide de mesures de vitesse, distinguent plusieurs régimes d'écoulement que l'on peut classifier de la manière suivante :

Pour des nombres de Reynolds de pore inférieurs à 1, le régime d'écoulement est laminaire, les forces visqueuses sont prédominantes et la loi de Darcy est applicable.

Quand Re est compris entre 1 et 10, les couches limites aux niveaux des parois solides des pores se développent. En dehors de ces couches limites apparaît un régime d'écoulement inertiel. Les forces d'inertie deviennent alors importantes et il n'y a plus de proportionnalité entre le gradient de pression et la vitesse de filtration : la loi de Darcy n'est plus applicable.

Ce régime d'écoulement stationnaire laminaire, persiste jusqu'à un nombre de Reynolds environ de 150.

Pour des nombres de Reynolds de pore compris entre 150 et 300, unrégimed'écoulement laminaire instationnaire se développe. Ce régime est d'abord oscillatoire résultants de superposition plusieurs modes de période et d'amplitude distinctes.

Au-delà de Re de l'ordre de 300. Le régime d'écoulement devient chaotique, et présente les caractéristiques d'un écoulement turbulent.

I.7.2 Modèle de Darcy-Brinkman :

Pour de grandes valeurs de perméabilité et de porosité, les effets de viscosité et du non glissement sur les surfaces solides ne sont plus négligeables. Le modèle de Darcy-Brinkman dérivé du modèle de Stokes pour des forces visqueuses autour d'une sphère peut s'écrire sous la forme générale suivante : [24]

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K}\vec{V} + \mu_{eff}\nabla^2\vec{V} + \rho\vec{g} \qquad \text{(I.21)}$$

Cette loi empirique est connue sous le nom de formulation de Darcy – Brinkman. Le premier terme de droite de l'équation est le terme de Darcy et le deuxième est appelé le terme de Brinkman. Ce dernier, qui représente les forces visqueuses causées par le cisaillement macroscopique le long des frontières est très significatif dans les régions près des parois solides. Plusieurs auteurs ont montré l'influence du terme de Brinkman sur le champ dynamique qui permet de satisfaire la condition de d'adhérence aux parois. Concernantl'aspect thermique, l'omission de ce terme peut influer considérablement sur la valeur des coefficients de transfert.

I.7 .3 Modèle de Darcy-Forchheimer :

Pour une grande vitesse de filtration, la loi de Darcy s'éloigne du comportement linéaire pour la vitesse ; elle doit donc être corrigée par un terme inertiel non linéaire du second degré qui tient compte des effets inertiels macroscopiques. Le modèle ainsi défini est dit modèle de Darcy-Forchheimer et peut se mettre sous la forme générale suivante : [25]

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K}\vec{V} - \frac{\rho F}{\sqrt{K}}|\vec{V}|\vec{V} \quad \text{(I .22)}$$

Ou F représente le coefficient de Forchheimer caractéristique des forces d'inertie dans le milieu poreux. Il existe une région de transition, définie par rapport au nombre de Reynolds du pore, située entre $1<Re_p<10$. Au-dessous de $Re_p = 1$, le modèle de Darcy suffit à lui seul pour décrire fidèlement l'écoulement (écoulement lent), et les forces de pression sont prépondérantes. Au-dessus de$Re_p = 10$, les forces d'inerties sont dominantes, le modèle de Darcy n'est plus valable. Entre les deux, c'est la zone de transition et les deux modèles coexistent ensemble.

I.7.3 Modèle de Darcy-Forchheimer-Brinkman (Modèle général) :

Pour tenir compte de tous les effets cités précédemment, on associe à l'équation de Darcy, les termes de Brinkman et de Forchheimer. Le modèle ainsi formé est obtenu sous le nom du modèle de Darcy- Brinkman- Forchheimer. L'équation vectorielle de conservation de la quantité de mouvement à travers un milieu poreux s'écrit alors :

$$\frac{\rho}{\varepsilon}\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon}\vec{V}\cdot\nabla\vec{V} = -\nabla p + \mu_{eff}\nabla^2\vec{V} - \frac{\mu}{K}\vec{V} + \frac{\rho F\varepsilon}{\sqrt{K}}|\vec{V}|\vec{V} + \rho\vec{g} \quad \text{(I .23)}$$

OU

$\frac{\rho}{\varepsilon}\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon}\vec{V}\cdot\nabla\vec{V}$ Forces inertielles macroscopiques. Le terme $\frac{\rho}{\varepsilon}\vec{V}\cdot\nabla\vec{V}$ est généralement négligé

Sauf dans les régions d'entrée de l'écoulement.

∇p Gradient de pression

∇p $\mu_{eff}\nabla^2\vec{V}$ Terme visqueux de Brinkman

$\frac{\mu}{K}\vec{V}$ Terme De Darcy

I.8. Nanofluides

Avec les progrès récents en nanotechnologies, des particules de la taille desNanomètres peuvent être obtenus. Cet avancement technologique a donné l'idée de suspendre ces particules dans un liquide de base pour obtenir une amélioration de la conductivité thermique.

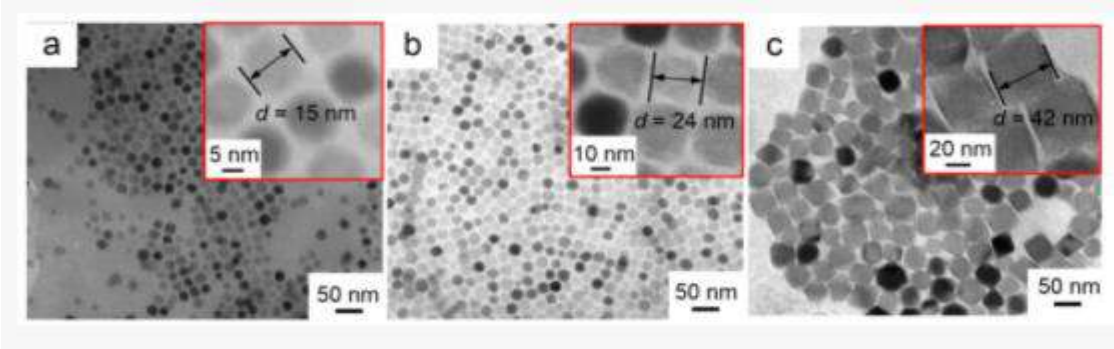


Figure 1-12 nanoparticules de différant diamètre

Une suspension de nanoparticules dans un fluide de base est appelée nano fluide. Ce terme a été proposé par Choi [26] en 1995 dans le laboratoire national d'Argonne. Le fluide de base est généralement de l'eau, de l'huile ou de l'éthylène glycol(EG).

-Les nanoparticules sont des fines particules nanométriques : leur diamètre est deQuelques nanomètres (<50nm).

- D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories :

- 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 Al2O3, oxyde de cuivre CUO, oxyde de titane TiO2…).

-Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO2,

Nanotube de silicium…).

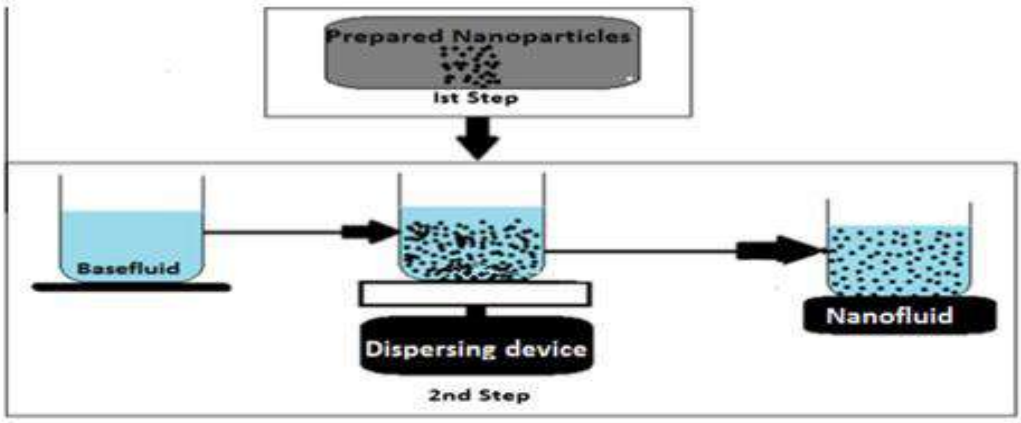


Figure 1.13 Préparation de nanofluides à l'aide d'une méthode en deux étapes

Dans nos thés, les nanoparticules utilisées sont :

a) **Nanoparticules de dioxyde de cuivre (Cu)**

La convection mixte et la génération d'entropie dans une simple cavité contient du nanofluide Cuo-eau a été étudiée numériquement par Selime fendigil et al [27]

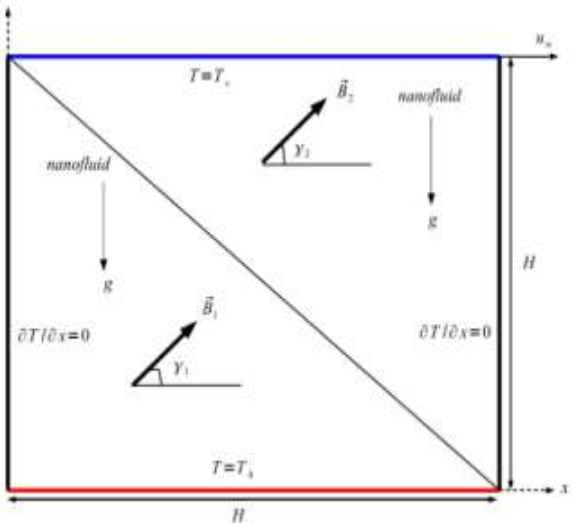


Figure 1.14. Travaux de Selime fendigil et al [27].

Ils ont conclu que, L'ajout de nanoparticules est un moyen efficace pour améliorer le transfert de chaleur tandis que le transfert thermique par convection ne diminue pasavec l'abaissement du nombre de Hartmann en particulier pour le domaine triangulaire inférieur. Il existe une relation presque linéaire entre les nombres de Nusselt et les valeurs de ϕ pour différents nombres de Hartmann et différents angles et la pente des lignes. La génération d'entropie diminue avec l'augmentation du nombre de Richardson et l'effet est plus prononcé dans le

domaine triangulaire inférieur qui est dû à l'augmentation des gradients de température escarpés le long du fond. La génération d'entropie diminue au fur et à mesure que la fraction volumique du nanofluide (ϕ) augmente. Ainsi, quand la valeur du nombre de Hartmann augmente en raison de la suppression du mouvement du fluide à l'intérieur de la cavité pour les domaines triangulaires inférieur et supérieur, la production d'entropie totale diminue. La génération d'entropie totale est abordable pour les domaines triangulaires inférieurs et supérieurs lorsque le champ magnétique est appliqué horizontalement pour les deux domaines.

Les nanofluides sont encore présentes dans les micros canaux. Li et Kleinstreuer [27] ont simulé la génération d'entropie dans des trapézoïdaux pour un écoulement laminaire d'eau pure et de nanofluides Cuo-eau. Ils ont constaté qu'il existe une gamme des nombres de Reynolds optimale pour une génération optimale de l'entropie, où la génération d'entropie augmente en fonction de l'augmentation des vitesses d'entrées. Autant, la génération d'entropie est très faible dans les nanofluides comparativement au fluide de base.

b)Nanoparticules de dioxyde de Titane (TiO_2)

Les nanoparticules de l'oxyde de Titane (TiO2) ont été étudies, dans plusieurs travaux de recherche, commeY.Phanindraa, and S.D Kumar[29] en dispersant des nanoparticules de 27 nm dans l'eau, ont obtenus une amélioration de la conductivité thermique de 10.7% pour une fraction volumique de 4,35%. Cette valeur est beaucoup plus faible que les 32% obtenue pour le nano fluide (eau+Al2O3) avec la même concentration des nanoparticules. Wen and Ding [30] ont étudié un écoulement de nano fluide entre deux disques horizontaux dont l'un est uniformément chauffé. Le nanofluide est composé des nanoparticules de dioxyde de Titanium (TiO2) de diamètre compris entre 30 et 40 nm, suspendues dans l'eau. Cette suspension a prouvé une bonne stabilité grâce à un système de mixage mécanique et un stabilisateur électrostatique, le coefficient de transfert de chaleur a eu une importante chute avec l'augmentation de la concentration du nanofluide qui se traduit par la décroissance des valeurs

Du nombre de Nusselt en fonction de la croissance du nombre de Rayleigh.

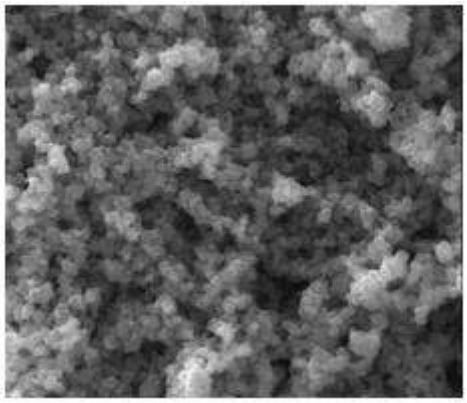


Figure 1.15Nanoparticule (TiO2)

c) Nanoparticules d'Argent (Ag)

La taille moyenne des nanoparticules d'argent (Ag) est de 60-80nm. Comme lesNanoparticules de l'oxyde de Titane (TiO2), l'argent (Ag) a étudié par plusieurs travaux de recherche, comme Patel et al. [31] ont étudié le nanofluide (Au-thiolate+toluene) a une température de 60°C, et ont obtenu une amélioration de 8.8% de la conductivité thermique pour une fraction volumique de nanoparticules φ =0.011%. Pour une solution de (Aucitrate+ eau), ils ont obtenu une amélioration de 8,3% de la conductivité thermique pour φ =0.00026. Par contre, pour une solution de (Ag-citrate+eau), ils ont obtenu une amélioration de4.5% pour φ =0.001%. Pour le nanofluide (Ag+eau) la conductivité thermique obtenue est plus faible que celle du nanofluide (or+eau) bien que l'argent soit meilleur conducteur de la chaleur que l'or.

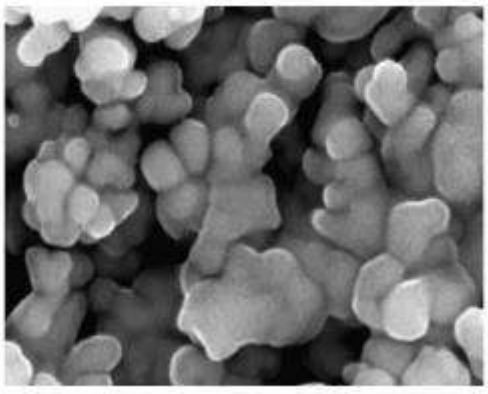


Figure 1.15 Nanoparticule (Ag)

c) Nanoparticules d'aluminium (Al)

La taille moyenne des nanoparticules d'aluminium (Al) est des 250 nm. Ont été étudies, dans plusieurs travaux de recherche, comme N. Sa Chemloul et M.A. Belmiloud [32] La convection naturelle est étudiée numériquement dans une cavité carrée dont la paroi horizontale inférieure et la paroi verticale droite sont chauffées à une température TH . La paroi verticale gauche et la paroi horizontale supérieure sont à la température TC <TH, l'espace restant des parois formant la cavité est supposé adiabatique. On utilisé le nanofluide (Al2O3). La fraction volumique des nanoparticules est prise dans l'intervalle $0 \leq \varphi \leq 0.15$. Le nombre de Rayleigh est compris entre 10^3 et 10^6, et le nombre de Prandtl est fixé à Pr =6.2.

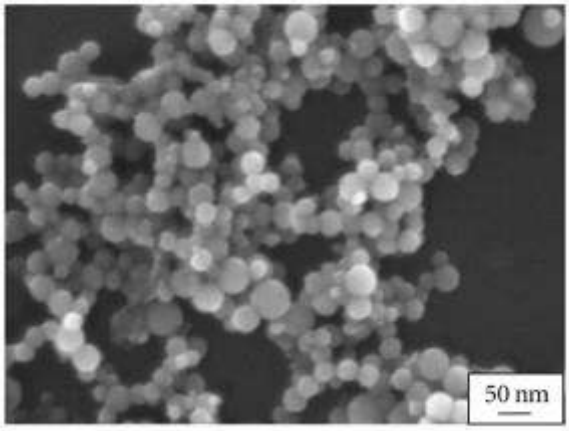


Figure 1.16 Nanoparticule (AL)

I-9Propriétés thermophysiques des nanofluides :

Les propriétés thermophysiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, ladilatation thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions sont profondément modifies par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermophysiques du nanofluide obtenus (la nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique$\forall$, la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu .... etc.). [33]

I-9.1La Masse volumique

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que nous supposerons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide de base) en fonction de la fraction volumique

(φ) a une température T donnée.[34]

La masse volumique de ce mélange est définie comme suite :

$$p_{nf} = \left(\frac{m}{v}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{v_s + v_f} = \frac{p_f m_f + p_s m_s}{v_s + v_f} \qquad (1.23)$$

La fraction volumique des nanoparticules ($\forall$) désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide).

φ = *Volume solide / Volume totale du nanofluide*

$$\varphi = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (1.24)$$

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$p_{nf} = (1-\varphi)p_f + \varphi p_s \quad (1.25)$$

Avec

p_{nf} : La masse volumique du nanofluide,

p_f : La masse volumique du fluide de base

p_s : La masse volumique des nanoparticules solides

I-9.2 La Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un system homogène[35]

$$c_p = \frac{d_Q}{mdT} \quad (1.26)$$

La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée.

I-9.3 Conductivité thermique

En l'absence de données expérimentales et de théorie fondée permettant ladétermination de la conductivité thermique d'un nanofluide, des relations utiliséesPrécédemment pour le calcul de la conductivité thermique d'une suspension de particules de plus grande taille de l'ordre micromètres ou millimètres dans un fluide, ont été adoptées pour calculer la conductivité thermique des nanofluides

I-9.4 La viscosité cinématique

Est le quotient de la viscosité dynamique par la https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique masse volumique du fluide. Elle représente la capacité de rétention des particules du fluide et quantifie sa capacité à s'épancher [36]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.27)$$

	$C_p(j/kg.k)$	$p(kg/m^3)$	$K(w/mk)$	$a(m^2/s)10^{-7}$	$B(1/K)10^{-5}$
EAU	4179	997.1	0.613	1.47	21
Cu	385	8933	400	1163.1	1.67
AL_2O_3	765	3970	40	131.7	0.85
TiO_3	686.2	4250	8.3579	30.7	0.9

Tableau 1: Propriétés thermo physiques du fluide pur et des nanoparticules

I.10. Application des nanofluides dans l'industrie [36]

Les nanofluides sont des suspensions de nanoparticules dans des fluides qui montrent une amélioration significative de leurs propriétés à des concentrations de nanoparticules modestes. De nombreuses publications sur les nanofluides traitent de leur comportement afin de pouvoir les utiliser là où une amélioration directe du transfert de chaleur est primordiale, comme dans de nombreuses applications industrielles, réacteurs nucléaires, transport, électronique, biomédecine et aliments. Le nanofluide en tant que fluide intelligent, dans lequel le transfert de chaleur peut être réduit ou amélioré à volonté.

I-10-1 Applications de refroidissement industriel :

Pour l'industrie américaine, le remplacement de l'eau de refroidissement et de chauffage par des nanofluides pourrait permettre de conserver 1000 milliards de Btu d'énergie. Pour l'industrie américaine de l'énergie électrique, l'utilisation de nanofluides dans les cycles de refroidissement en boucle fermée pourrait permettre d'économiser environ 10000 à 30000 milliards de Btu par an (équivalant à la consommation d'énergie annuelle d'environ 50000 à 150000 ménages). Les réductions d'émissions associées seraient d'environ 5,6 millions de tonnes métriques de dioxyde de carbone; 8600 tonnes d'oxydes d'azote; et 21000 tonnes métriques d'anhydride sulfureux. Pour les usines de pneumatiques de Michelin Amérique du Nord, la productivité de nombreux processus industriels est limitée par le manque de moyens permettant de refroidir efficacement le caoutchouc lors de son traitement. Cela nécessite l'utilisation de plus de 2 millions de gallons de fluides caloporteurs pour les usines Michelin en Amérique du Nord. Dans ce projet, Michelin a pour objectif d'obtenir une augmentation de productivité de 10% dans ses usines de traitement du caoutchouc si des nanofluides à base d'eau appropriée peuvent être développés et produits commercialement de manière rentable.

I-10-2 Smart Fluides :

Dans cette nouvelle ère de conscience active, nous manquons d'abondanceLes sources d'énergie propres et l'utilisation généralisée d'appareils alimentés par batterie, tels queLes téléphones portables et les ordinateurs portables, ont souligné le besoin de gestionTechnologie

intelligente pour les ressources énergétiques. Les nanofluides ont fait leurs preuvesCapable de gérer ce rôle dans certains cas comme un fluide intelligent.Montrer qu'une certaine classe de nanofluides peut être utilisée comme matériauActionnement intelligent en tant que vanne thermique pour contrôler le débitla chaleur. Le nanofluide peut être facilement formé soit dans un état "bas", oùIl conduit mal la chaleur, ou dans un état "élevé", où la dissipation est plus efficace. ATraversant le gouffre des technologies de chauffage et de refroidissement, les chercheursVous devrez prouver qu'un système d'exploitation stable répond à une gamme plus large Du flux de chaleur.

I-10-3 Extraction de l'énergie géothermique et d'autres sources d'énergie :

Lors de l'extraction d'énergie de la croûte terrestre dont la longueur varie entre 5 et 10 Km et la température entre 500 C°et 1000 C°, des nanofluides peuvent être utilisés pour refroidir les tuyaux exposés à de telles températures. Lors du forage, les nanofluides peuvent contribuer au refroidissement des machines et des équipements fonctionnant dans des environnements à fortes frictions et à hautes températures. En tant que « supraconducteur fluide », les nanofluides pourraient être utilisés comme fluide de travail pour extraire l'énergie du noyau terrestre et être traités dans un système de centrale REP utilisant une grande quantité d'énergie de travail.

Dans le sous-domaine de la technologie de conversion de puissance, améliorer les performances de transfert de chaleur pour les nanofluides à basse température et développer des conceptions d'installations pour des températures de ressources plus élevées dans la région de l'eau supercritique entraînerait un gain de l'ordre de grandeur (ou plus) des performances du réservoir et efficacité de conversion chaleur-énergie.

CHAPITRE II

Formulation mathématique

II .1 Formulation du problème :

Nous proposons dans cette section l'étude de la convection libre d'un milieu poreux en mousse d'aluminium incliné saturé en nanofluide Cuivre-Eau (Cu-Eau) ou la porosité et le matériau de la matrice ont été pris en compte sans l'effet du champ magnétique

La géométrie schématique du problème étudiée est illustrée à la figure 2.1, ou x et y sont les coordonnées cartésiennes. La longueur, la hauteur et la largeur du cavité sont désignées respectivement par L, H et W. On suppose que la paroi verticale gauche est chauffée et maintenue à la température constante T_h, tandis que la paroi verticale droite est refroidie à la température constante $T_{C.}$ Les parois horizontales sont adiabatiques et γ correspondent à l'angle d'inclinaison par rapport au plan horizontal. [37]

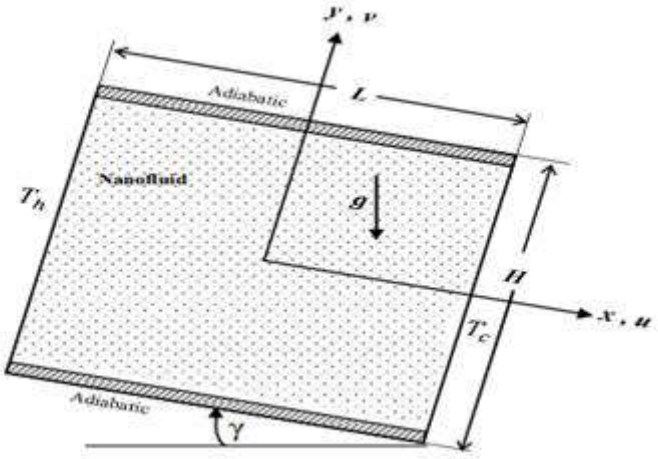


Figure 2.1physical model and coordinate system

Plusieurs approximations sont adoptées afin de simplifier la formulation du modèle mathématique : [38]

- La cavité est située dans un champ de gravité uniforme et constant.
- La largeur du l'enceinte W est supposée être suffisamment grande par rapport aux autres dimensions (W/L et W/H >>1) pour que les effets tridimensionnels deviennent négligeables.
- La solution est un fluide newtonien et incompressible
- Le flux généré est supposé être laminaire
- La matrice poreuse est isotrope, perméable et homogène

- Il n'y a pas de réaction chimique ni de source de chaleur ou de masse et le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable
- Le travail induit par les forces de visqueuses et de pression est négligeable.
- Les nanoparticules ont une forme sphérique.
- Un équilibre thermique entre le fluide de base et les nanoparticules solides.
- Une homogénéité et un équilibre thermique local dans le milieu poreux.
- Le nanofluide est simulé comme un fluide monophasé.
- Les propriétés thermophysiques du nanofluide sont constantes et sont évaluées à la température de référence à l'exception de la variation de densité, de la force de flottabilité qui a été évaluée selon l'approximation de Boussinesq.

Le champ magnétique induit est négligeable car le nombre magnétique de Reynolds Rm <<1

II.1 Equation de continuité

L'équation de continuité exprimant le principe de conservation de la masse d'un fluide en mouvement est donné par : [39]

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho(\nabla \cdot v) = 0 \quad (2.1)$$

Si l'écoulement est conservatif et que le fluide est incompressible, alors on a tout simplement :

$$\Delta.V = 0 \quad (2.2)$$

En coordonnées cartésiennes rectangulaires (x,y,z) cela s'écrit comme suit.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

II.2 Equation de mouvement : loi de Dupuit-Darcy

La formulation locale de l'équation de conservation du mouvement s'écrit comme suit :[40]

$$-\frac{K}{U}(\nabla p - \rho nf - I * B) = (1 + \frac{k}{u}\rho_{nf}\overrightarrow{/v/}).v \quad (2.4)$$

II.3 Equation de conservation de l'énergie :

La première loi de la thermodynamique permet d'établir les relations entre les différentes formes d'énergie se déroulant dans des milieux poreux. L'équation d'énergie dans laquelle les termes de dissipations visqueuses sont négligés s'écrit comme suit : [41]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + (V.\nabla)T = \alpha_{mnf}\nabla^2 T \quad (2.5)$$

Ou **V (u.v.)** est le vecteur vitesse, B (B_X , B_y) est l'induction magnétique, I est le courant électrique, P est la pression, g est le vecteur d'accélération gravitationnelle, α_{mnf} est la diffusivité thermique du milieu poreux saturé nanofluide , μ_{nf} est la viscosité dynamique nanofluide et τ est le temps . K et k sont la perméabilité du milieu poreux et le paramètre matériau qui mesure l'impédance inertielle de la matrice « Rees et Hussein 1999 » respectivement. C'est clair d'après l'Eq 2.2 qu'avec la loi de Darcy s'est rétablie.

La relation de Kozeny-Carman est difficilement utilisable car elle dépend de nombreux paramètres et pas uniquement de la porosité. De nombreuses études ont cherché à établir des relations plus générales mais toutes montrent leurs limites à cause d'un grand panel de modifications (listé dans [Xu and Yu, 2008])[46]. Cette relation est néanmoins souvent appliquée pour les milieux granulaires de forme simple. On peut par exemple utiliser la formule d'Ergun(1952) pour les relations K et k applicable dans les milieux poreux de porosité ε constitués d'un assemblage régulier de billes de diamètre moyen d : [42]

$$k = \frac{d^2\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon^2)} \qquad \tilde{K} = \frac{1.75d}{150(1-\varepsilon)} \quad (2.6)$$

Ou d est le diamètre caractéristique des pores ou des particules.

Nous savons que l'intensité du courant électrique est liée à la vitesse du fluide par la loi D'ohm [8].

La loi d'oh $J = \sigma(-V.0 + U \times B_9)$(2.7)

Conservation de la charge électriqu$\nabla . J = 0$(2.8)

Selon Garandet et Al (1992) Eqs (4.5) et (4.6) se réduisent $\nabla^2 * \varphi = 0$ a une solution unique $\nabla * \varphi = 0$ puisque la cavité est isolé électriquement. [43]

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (2.9)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{K}\left(1+\frac{\widetilde{K}}{\mu_{nf}}\rho_{nf}|\vec{V}|\right)\cdot u=-\frac{\partial p}{\partial x}-\rho_{nf}g\sin\gamma+\sigma_{nf}(vB^2\sin\xi\cos\xi-uB^2\sin^2\xi) \qquad (2.10)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{K}\left(1+\frac{\widetilde{K}}{\mu_{nf}}\rho_{nf}|\vec{V}|\right)\cdot v=-\frac{\partial p}{\partial y}-\rho_{nf}g\cos\gamma+\sigma_{nf}(uB^2\sin\xi\cos\xi-vB^2\cos^2\xi) \qquad (2.11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha_{mnf}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (2.12)$$

Nous éliminons la pression de l'équation de la quantité de mouvement de la manière habituelle et nous appliquons l'approximation de Boussinesq pour décrire la variation de densité de la force de flottabilité. [44]

Les équations gouvernantes deviennent :

$$\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\widetilde{K}}{\mu_n}\rho_{nf}\left[\frac{\partial}{\partial y}(|\vec{V}|\cdot u)-\frac{\partial}{\partial x}(|\vec{V}|\cdot v)\right]=$$
$$-\frac{gK\rho_{nf}}{\mu_{nf}}\beta_{mv\gamma}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\cos\gamma-\frac{\partial T}{\partial y}\sin\gamma\right)+\frac{\sigma_{\eta f}KB_0^2}{\mu_{nf}}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\sin^2\xi+2\frac{\partial v}{\partial y}\sin\xi\cos\xi+\frac{\partial v}{\partial x}\cos^2\xi\right) \qquad (2.13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha_{mv}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (2.14)$$

Les propriétés thermo physiques du nanofluide sont calculées à l'aide du modèle de Tiwari et Das Modèle de Tiwari et Das (2007), Bourantas et al. (2014), Mahian et al. (2018). [45]

Les propriétés physiques du nanofluide: p_{nf} densité μ_{nf}, viscosité, ($(pcp)_{nf}$), capacité thermique, k_{nf} conductivité thermique et $((pB_t)_{nf})$ d coefficient de flottabilité sont données par :

$$\rho_\psi=(1-\phi)\rho_t+\phi\rho_p,\mu_{\alpha f}=\mu_f/(1-\phi)^{25},(\rho C_r)_{nf}=(1-\phi)(\rho C_r)_f+\phi\left(\rho C_f\right), \qquad (2.15)$$

$$K_{nf}=K_{,}\left[\frac{\left(K_r+2K_f\right)-2\phi\left(K_f-K_r\right)}{\left(K_r+2K_f\right)+\phi\left(K_f-K_r\right)}\right],(\rho\beta_r)_v=(1-\phi)(\rho\beta_\tau)_f+\phi(\rho\beta_r)p \qquad (2.16)$$

Ou Φ la fraction volumique des nanoparticules f et p se réfère respectivement au fluide et à la (nano) particule. Les propriétés thermo physiques du fluide (eau) et des nanoparticules (Cu, Al_2O_3 et SWCNT) et de la structure sloid du milieu poreux (mousse d'aluminium) sont rapportées par le tableau2.1 Sachant que la conductivité thermique donnée par ce modèle n'est valable que pour les particules sphériques, qui a été utilisée dans cette étude pour calculer la conductivité thermique du nanofluide Cu-Eau et Al_2O_3- Eau . Pour le SWCNT-eau nanofluide,la conductivité thermique a été évaluée par le modèle Xue, Xue (2005), Khan et al.

(2013), où l'effet de la distribution spatiale et le rapport axial des nanotubes de carbone ont été pris en considération (Eq.2.11).

$$K_{nf} = K_f \left[\frac{1-\phi+2\phi\frac{K_{CNT}}{K_{CNT}-K_f}\ln\left(\frac{K_{CNT}+K_f}{2K_f}\right)}{1-\phi+2\phi\frac{K_f}{K_{CNT}-K_f}\ln\left(\frac{K_{CNT}+K_f}{2K_f}\right)} \right] \quad (2.17)$$

Où ϕEst la fraction volumique des nanoparticules, f et CNT faire référence respectivement au fluide et au nanotube de carbone.

La conductivité électrique du nanofluide est présentée en tenant compte à la fois des conductivités électriques du fluide de base et des nanoparticules telles que données par la formule de Maxwell (1904) [4

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = 1 + \frac{3(\alpha-1)v}{(\alpha+2)-(\alpha-1)v} \quad (2.18)$$

σ=k , $\phi = v, \chi = \alpha$

Où σ la conductivité électrique, σ_P est la conductivité électrique des nanoparticules, σ_f la conductivité électrique du fluide de base et x=σ_P/σ_f .

Dans notre étude, nous supposons que la cavité a une forme carrée (L = H).

Propriétés physiques	**Fluide de base**	**Cu**	**Aluminium foam**	**Al_2O_3**	**SWCNT**
C_p *(J.kg^{-1}.K^{-1})*	4179	385	897	765	425
ρ *(kg. m^3)*	997.1	8933	2700	3970	2600
K (W.m^{-1}.K^{-1})	0.613	400	205	40	6600
β **10^{-5}(K^{-1})*	225	1.67	2.22	0.85	1.6
σ *(Ωm^{-1})*	0.05	5.96*10^{-3}	-	3.5*10^{-6}	4.8*10^{-7}

Tableau 2.1. Propriétés thermophysiques du fluide (eau), cuivre (Cu), oxyde d'aluminium (Al2O3) et Single-Wall Carbon Nanotube (SWCNT), voir Zahmatkesh et al. (2019), Hayat et al (2017).[47]

II.3.1 Première application : c_u-eau nanofluide saturant un milieu poreux en mousse d'aluminium sans effet de champ magnétique

Dans cette application l'effet de champ magnétique n'a pas été pris en compte ce qui signifie qu'il n'y a pas de force de Lorentz appliquée et que le paramètre I*B=0 dans l'équation de moment (éq 2.2).

Afin d'explorer l'effet de la conductivité thermique et de la porosité de la matrice solide du milieu poreux, nous avons la capacité thermique par unité de volume et la conductivité thermique globale, pour le mode de conduction thermique parallèle dans les phases solide et fluide qui sont données par Nield et Bejan (2017), Xu et Al (2019) :

$$(\rho Cp)_m=\varepsilon(\rho Cp)_f+(1-\varepsilon)(\rho Cp)_s \text{ et } k_m=\varepsilon k_f+(1-\varepsilon)k_s \quad (2.19)$$

Ou s et f se réfèrent à la matrice solide du milieu poreux et des phases fluides. La conductivité thermique et la diffusivité thermique du milieu poreux saturé de nanofluide peuvent être évaluées en utilisant les propriétés thermophysiques du nanofluide (éq 2.16) comme suit :

$$(\rho Cp)_{m=f}=\varepsilon(\rho Cp)_{mf}+(1-\varepsilon)(\rho Cp)_s=(\rho Cp)_m\left[1-\varepsilon\varphi\frac{(\rho Cp)_f-(\rho Cp)_p}{(\rho Cp)_m}\right] \quad (2.20)$$

$$k_{mff}=\varepsilon k_{rf}+(1-\varepsilon)k_s=k_m\left[1-\frac{3\varepsilon\phi_f(k_f-k_p)}{k_m[k_p+2k_f+\phi'(k_f-k_p)]}\right] \quad (2.21)$$

$$\alpha_{nvf}=\frac{k_{nvf}}{(\rho Cp)_{nf}},\alpha_m=\frac{k_m}{(\rho Cp)_f} \quad (2.22)$$

En supposant que la cavité a une forme carrée (L=H) et on prenant la vitesse est sans dimension par rapport à la diffusivité thermique .de plus la température est sans dimension par rapport à la différence de température entre les deux parois horizontales de la cavité.

Les variables adimensionnelles sont données par :

$$X=\frac{x}{L},Y=\frac{y}{L},U=\frac{uL}{\alpha_{mj}},V=\frac{vL}{\alpha_{mvf}},\theta=\frac{T-T_c}{\Delta T},t=\frac{\tau\alpha_{mvf}}{HL} \quad (2.23)$$

De plus, la fonction de curant sans dimension est défini comme

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X} \tag{2.24}$$

En introduisant les équations de propriétés thermophysiques des nanofluides (2.16) la conductivité thermique et la diffusivité des équations de milieu poreux saturé en nanofluide (2.21) et (2.22) et les variables adimensionnelle (2.23) et (2.24) dans les équations (2.13) - (2.14) , nous obtenons les équations de gouvernance adimensionnelles de la conservation du mouvement et de l'énergie.

$$[1 + V_a \times G \times F(\phi)]\nabla^2 \Psi + \frac{G \times F(\phi)}{V_a} S_\Omega = -R_T \cdot H(\phi) \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \cos\gamma - \frac{\partial \theta}{\partial Y} \sin\gamma \right) \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial Y}\frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial \psi}{\partial X}\frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \tag{2.26}$$

Ou les paramètres R_T ,$S_\Omega, G, V_a, F(\phi), H(\phi)$ dans l'équation de la quantité de mouvement Sant donnés par :

$$S_{\mathrm{n}} = \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial X} \right)^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right)^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} + 2 \frac{\partial \Psi}{\partial X}\frac{\partial \Psi}{\partial Y}\frac{\partial \Psi}{\partial X\,\partial Y} \right] \tag{2.27}$$

$$V_a = [(\partial \Psi / \partial X)^2 + (\partial \Psi / \partial Y)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{2.28}$$

$G = \frac{\bar{K}\alpha_m}{v_f L}$ est le paramètre d'effet inertiel (2.29)

$R_T = \frac{\boldsymbol{gKL\Delta T(\rho\beta_r)_f}}{\boldsymbol{\mu_f \alpha_m}}$est le nombre de Darcy-Rayleigh (2.30)

$$F(\phi) = (1-\phi)^{25}\left(1 - \phi + \phi\frac{\rho_p}{\rho_f}\right) \times \frac{\left[1 - \frac{3\beta\phi k_f (k_f - k_p)}{k_m[k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)]}\right]}{1 - \phi + \phi\frac{(\rho Cp)_p}{(\rho Cp)_f}} \tag{2.31}$$

$$H(\phi) = (1-\phi)^{25}\left(1 - \phi + \phi\frac{(\rho\beta)_p}{(\rho\beta)_f}\right) \times \frac{\left[1 - \phi + \phi\frac{(\rho Cp)_p}{(\rho Cp)_f}\right]}{[1 - \frac{3\phi\phi k_f (k_f - k_p)}{k_m[k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p}]} \tag{2.32}$$

Les fonctions F (ϕ) et H (ϕ) dépendent de la structure solide du milieu poreux, des propriétés thermophysiques du nanofluide (fluide et nanoparticules) et de la concentration des nanoparticules ϕ.

Le paramètre G mesure les effets d'inertie et sa valeur représente le départ de la situation linéaire de Darcy. Pour une porosité élevée et pour un diamètre de particules ou de pores élevé, le paramètre K aura une valeur élevée et le paramètre non linéaire d'effet d'inertie G deviendra significatif.

Comme on peut le voir pour $\phi = 0$; F(ϕ)=H(ϕ)= (fluide clair) et pour G = 0 dans l'équation de mouvement eq 2.22 la loi de darcy récupérée .

II.4 Conditions aux limites :

II.4.1 Conditions aux limites hydrodynamiques :

Ces conditions expriment l'imperméabilité des parois de la cavité et sont données par :

$$\begin{cases} \Psi = 0 \ \text{à} X = \pm\frac{1}{2} \\ \Psi = 0 \ \text{à} Y = \pm\frac{1}{2} \end{cases} (2.33)$$

II.4.2 Conditions aux limites thermiques :

Les conditions aux limites sur les parois adiabatiques et imperméables de la cavité sont exprimées par :

$$\begin{cases} \theta = 0.5 \ \text{à} X = -\frac{1}{2} \\ \theta = -0.5 \ \text{à} X = +\frac{1}{2} \\ \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \ \text{à} Y = \pm\frac{1}{2} \end{cases} \quad (2.34)$$

II.5 Transfert de chaleur :

Dans la présente étude nous intéressons particulièrement aux calculs du taux de transfert de chaleur à une position donnée ; les grandeurs physiques d'intérêt sont le nombre de Nusselt local Nu et le nombre de Nusselt moyen Nu $_m$ aux parois verticales qui sont définies comme :

F k $_{mnf}$

$$Nu = -\frac{k_{mnf}}{k_f}\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X = \pm 0.5} \quad (2.35)$$

$$Nu = \int_{-1/2}^{+1/2} Nu dY \quad (2.36)$$

On note $\overline{Nu_L}$ le nombre Nusselt moyen de la paroi gauche et par $\overline{Nu_R}$ le nombre Nusselt moyen de la paroi droite

Chapitre III

MÉTHODE NUMÉRIQUE

MÉTHODE NUMÉRIQUE

La méthode des volumes finis est la méthode qui sera pour résoudre les équations précédentes (II.3 a II.5). Il existe des méthodes alternatives comme la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis qui sont également disponibles. Chaque méthode possède ses propres avantages et inconvénients.

La méthode des volumes finis est largement répandue dans la discrétisation des équations régissantes dans l'espace et le temps. La discrétisation transforme les équations différentielles du modèle mathématique en équations algébriques. Le principe de la méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations de transport sur un ensemble discret de volumes finis jointifs, appelés volumes de contrôle, couvrant le domaine physique. La méthode des volumes finis maintient une base physique, qui garantisse la conservation de masse et de quantité de mouvement dans chaque volume de contrôle et dans tout le domaine du calcul. il s'avère être le plus adapté et le plus simple d'utilisation pour des problèmes de géométrie simple. Cette méthode consiste à discrétiser les équations continues aux nœuds d'un maillage prédéfini

Voire (la figure 3.1).

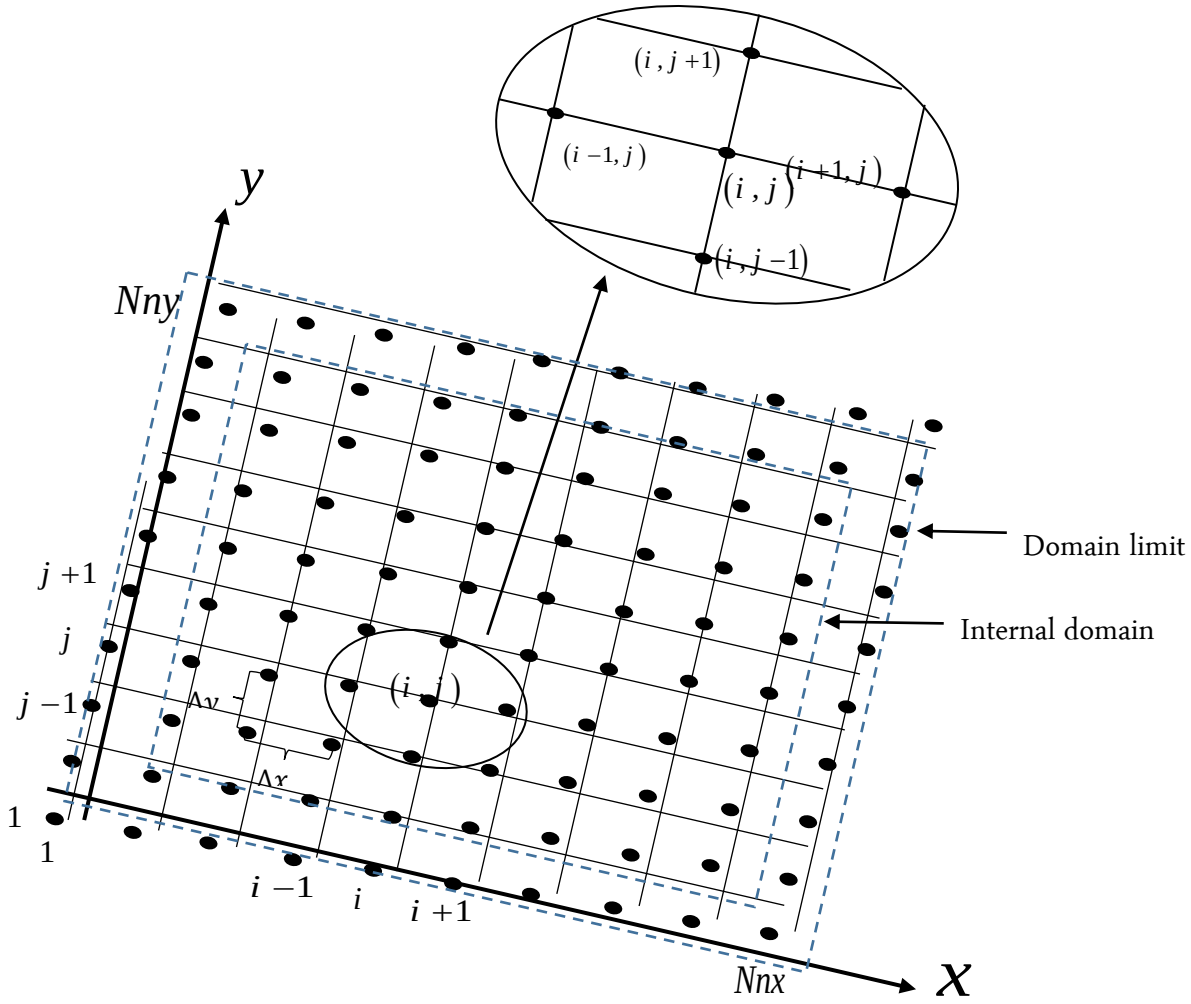


Figure 3.1: Maillage du domain de calcul en (i, j).

Dans un coordoner cartésien, chaque nœud est désigné par le couple d'indices désignant les lignes d'intersection du maillage. Les nœuds voisins sont implicitement définis en augmentant ou en diminuant l'un des indices d'un incrément unitaire.

L'équation d'énergie est discrétisée avec un schéma centré du second ordre et en utilisant la forme conservatrice pour les termes convectifs. Pour chaque pas de temps, la méthode implicite en directions alternées (ADI) donne lieu à deux systèmes matriciels tri-diagonaux à résoudre, l'un resultant de la discrétisation implicite en x et l'autre de la discrétisation implicite en y. La méthode (ADI) divise le pas de temps en deux parties égales, au premier demi-pas de temps, le système est implicitement en x mais explicitement en y et au second demi-pas de temps, et le système est implicitement en y et explicitement en x. Pour chaque pas de temps, la solution est obtenue en balayant le domaine de calcul dans la direction de x puis dans celle de y. Connaissant le champ de température à un instant (n+1) Δt, l'étape suivante consiste à calculer le champ de la fonction courante à partir de l'équation de quantité

de mouvement, une fois discrétisée avec un schéma centré classique et résolue avec la méthode des sur-relaxations ponctuelles successives (DORS). Cette méthode proposée par Frankel (1950), qui est une méthode explicite donnant directement la valeur de Ψ à l'instant (n+1) Δt, au nœud considéré, avec un nombre d'itérations suffisant pour que le critère de convergence recherché soit satisfait.

III.1 discrétisation des conditions aux limites thermiques

Les conditions aux limites (2.41) et (2.42) sont discrétisées selon un schéma aux différences finies décentré à droite et à gauche du second ordre selon la paroi considérée:

Pour les parois adiabatiques et imperméables:

$$\theta_{i,1} = \frac{4\theta_{i,2} - \theta_{i,3}}{3} \qquad \text{À} \qquad Y = -\frac{1}{2} \quad (3.1)$$

$$\theta_{I,Nny} = \frac{4\theta_{i,Nny-1} - \theta_{i,Nny-2}}{3} \qquad \text{À} \qquad Y = +\frac{1}{2} \quad (3.2)$$

Pour les murs actifs:

$$\theta_{1,j} = \frac{4\theta_{2,j} - \theta_{3,j} + 2\Delta X}{3} \qquad \text{À} \qquad X = -\frac{1}{2} \qquad (3.3)$$

$$\theta_{Nnx,j} = \frac{4\theta_{Nnx-1,j} - \theta_{Nnx-2,j} - 2\Delta X}{3} \qquad \text{À} \qquad X = \frac{1}{2} \quad (3.4)$$

III.2 Discretisation des equations énergétiques

L'équation de l'énergie étant parabolique par rapport au temps et elliptique par rapport aux coordonnées spatiales, la méthode implicite de direction alternée (ADI) est choisie comme outil de résolution. Etant donné l'équation de l'énergie (2.23) celle-ci se recruit comme suit:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + \frac{\partial(U\theta)}{\partial X} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial Y} = \frac{\partial^2\theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2} \quad (3.5)$$

Schéma implicite en x et explicite en y

C'est un schéma à différences centrées à l'instant (n+1/2) pour les dérivées en et à l'instant n pour les dérivées en y, chaque terme de l'équation (3.5) est discrétisé comme suit :

$$\left.\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}\right|_{i,j} = \frac{\theta^{n+1/2}_{i+1,j} - 2\theta^{n+1/2}_{i,j} + \theta^{n+1/2}_{i-1,j}}{\Delta X^2}, \left.\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}\right|_{i,j} = \frac{\theta^{n}_{i,j+1} - 2\theta^{n}_{i,j} + \theta^{n}_{i,j-1}}{\Delta Y^2} \quad (3.6)$$

$$\left.\frac{\partial(U\theta)}{\partial X}\right|_{i,j} = \frac{U^{n}_{i+1,j}\theta^{n+1/2}_{i+1,j} - U^{n}_{i-1,j}\theta^{n+1/2}_{i-1,j}}{2\Delta X}, \left.\frac{\partial(V\theta)}{\partial Y}\right|_{i,j} = \frac{V^{n}_{i,j+1}\theta^{n}_{i,j+1} - V^{n}_{i,j-1}\theta^{n}_{i,j-1}}{2\Delta Y} \quad (3.7)$$

$$\left.\frac{\partial\theta}{\partial t}\right|_{i,j} = 2\frac{\theta^{n+1/2}_{i,j} - \theta^{n}_{i,j}}{\Delta t} \quad (3.8)$$

En substituant les équations (3.6), (3.8) dans l'équation (3.5), on obtient un système matriciel tridimensionnel de la forme:

$$A_i\theta^{n+1/2}_{i+1,j} + B_i\theta^{n+1/2}_{i,j} + C_i\theta^{n+1/2}_{i-1,j} = D_i \quad (3.9)$$

Avec:

$$A_i = \left[\frac{U^{n}_{i+1,j}}{2\Delta X} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right], \quad B_i = 2\left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right], \quad C_i = \left[\frac{U^{n}_{i-1,j}}{2\Delta X} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right]$$

$$D_i = \left[-\frac{V^{n}_{i,j+1}}{2\Delta Y} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right]\theta^{n}_{i,j+1} + 2\left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right]\theta^{n}_{i,j} + \left[\frac{V^{n}_{j,j-1}}{2\Delta Y} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right]\theta^{n}_{i,j-1}$$

En remplaçant les conditions aux limites (3.1) - (3.4) dans l'équation (3.9) on obtient la forme discrète implicite en x sous la forme suivante :

Pour: $i = 2$

$$\left[A_2 - \frac{1}{3}C_2\right]q^{n+1/2}_{3,j} + \left[B_2 + \frac{4}{3}C_2\right]q^{n+1/2}_{2,j} = D_2 - \frac{2}{3}C_2\Delta X \quad (3.10a)$$

Pour: $i = N_{nx-1}$

$$\left[\frac{4}{3}A_{Nnx-1} + B_{Nnx-1}\right]q^{n+1/2}_{Nnx-1,j} + \left[C_{Nnx-1} - \frac{1}{3}A_{Nnx-1}\right]q^{n+1/2}_{Nnx-2,j} = D_{Nnx-1} + \frac{2}{3}A_{Nnx-1}\Delta X \quad (3.10b)$$

Avec la même approche, on obtient un système matriciel tridimensionnel pour l'équation énergétique (c. 2.32) pour le second cas de la forme:

$$A_i\theta_{i+1,j}^{n+1/2} + B_i\theta_{i,j}^{n+1/2} + C_i\theta_{i-1,j}^{n+1/2} = D_i \quad (3.11)$$

Avec:

$$A_i = \left[\frac{U_{i+1,j}^n}{2\Delta X} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right], \quad B_i = 2\left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right], \quad C_i = \left[\frac{U_{i-1,j}^n}{2\Delta X} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right] \quad (3.12)$$

$$D_i = \left[-\frac{V_{i,j+1}^n}{2\Delta Y} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right]\theta_{i,j+1}^n + 2\left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right]\theta_{i,j}^n + \left[\frac{V_{j,j-1}^n}{2\Delta Y} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right]\theta_{i,j-1}^n \quad (3.13)$$

Schéma implicite en y et explicite en x :

C'est un diagramme avec des différences centrées au temps (n+1/2) pour les dérivées en x et au temps (n+1) pour les dérivées en y. La discrétisation des dérivées partielles est donnée par:

$$\left.\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}\right|_{i,j} = \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta X^2}, \quad \left.\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right|_{i,j} = \frac{\theta_{i,j+1}^{n+1} - 2\theta_{i,j}^{n+1} + \theta_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta Y^2} \quad (3.14)$$

$$\left.\frac{\partial(U\theta)}{\partial X}\right|_{i,j} = \frac{U_{i+1,j}^n\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - U_{i-1,j}^n\theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta X}, \quad \left.\frac{\partial(V\theta)}{\partial Y}\right|_{i,j} = \frac{V_{i,j+1}^n\theta_{i,j+1}^{n+1} - V_{i,j-1}^n\theta_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta Y} \quad (3.15)$$

$$\left.\frac{\partial\theta}{\partial t}\right|_{i,j} = 2\frac{\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad (3.16)$$

En substituant les équations (3.12) - (3.14) dans l'équation (3.5), on obtient un système matriciel tridiagonal de la forme:

$$A_j'\theta_{i,j+1}^{n+1} + B_j'\theta_{i,j}^{n+1} + C_j'\theta_{i,j-1}^{n+1} = D_j' \quad (3.17)$$

$$A_j' = \left[\frac{V_{i,j+1}^n}{2\Delta Y} + \frac{1}{\Delta Y^2}\right], \quad B_j' = 2\left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta Y^2}\right], \quad C_j' = \left[\frac{V_{i,j-1}^n}{2\Delta Y} + \frac{1}{\Delta Y^2}\right] \quad (3.18)$$

$$D_j' = \left[-\frac{U_{i+1,j}^n}{2\Delta X} + \frac{1}{\Delta X^2}\right]\theta_{i+1,j}^{n+1/2} + 2\left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{1}{\Delta X^2}\right]\theta_{i,j}^{n+1/2} + \left[\frac{U_{i-1,j}^n}{2\Delta X} + \frac{1}{\Delta X^2}\right]\theta_{i-1,j}^{n+1/2} \quad (3.19)$$

En substituant les équations (3.12) - (3.14) dans l'équation (3.5), on obtient un système matriciel tridiagonal de la forme:

Pour: $j = 2$ $\left[A_2^{'} - \frac{1}{3}C_2^{'}\right]q_{i,3}^{n+1} + \left[B_2^{'} + \frac{4}{3}C_2^{'}\right]q_{i,2}^{n+1} = D_2^{'}$ (3.20a)

Pour: $j = N_y$ $\left[\frac{4}{3}A_{Nny-1}^{'} + B_{Nny-1}^{'}\right]q_{i,Nny-1}^{n+1} + \left[C_{Nny-1}^{'} - \frac{1}{3}A_{Nny-1}^{'}\right]q_{i,Nny-2}^{n+1} = D_{Nny-1}^{'}$ (3.20b)

Avec la même approche, on obtient un système matriciel tridimensionnel pour l'équation énergétique (éq. 2.32) pour le second cas de la forme:

$$A_j^{'}\theta_{i,j+1}^{n+1} + \theta_j^{'}T_{i,j}^{n+1} + C_j^{'}\theta_{i,j-1}^{n+1} = D_j^{'} \quad (3.21)$$

$$A_j^{'} = \left[\frac{V_{i,j+1}^n}{2\Delta Y} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right], \quad B_j^{'} = 2\left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right], \quad C_j^{'} = \left[\frac{V_{i,j-1}^n}{2\Delta Y} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta Y^2}\right] \quad (3.22)$$

$$D_j^{'} = \left[-\frac{U_{i+1,j}^n}{2\Delta X} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right]\theta_{i+1,j}^{n+1/2} + 2\left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right]\theta_{i,j}^{n+1/2} + \left[\frac{U_{i-1,j}^n}{2\Delta X} + \frac{E_1(\phi)}{\Delta X^2}\right]\theta_{i-1,j}^{n+1/2} \quad (3.23)$$

III.3 Sécrétisation de l'équation de quantité de mouvement

Le mouvement d'équation de quantité de mouvement dans le cas général s'écrit sous la forme suivante:

$$\left[1 + V_a \times G \times F(\phi)\right]\nabla^2\Psi + \frac{G \times F(\phi)}{V_a}\left[U^2\frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2} + V^2\frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2} - 2UV\frac{\partial^2\Psi}{\partial X\partial Y}\right] = -R_T \cdot H(\phi)\left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\cos\gamma - \frac{\partial\theta}{\partial Y}\sin\gamma\right) \quad (3.24)$$

Ou: $V_a = \left[\left(\partial\Psi/\partial X\right)^2 + \left(\partial\Psi/\partial Y\right)^2\right]^{1/2}$ (3.25)

Avant la sécrétisation de l'équation (3.16), nous supposons que les variables $v_a . U$ et V sont déjà connues.

Chaque terme de l'équation est discrétisé selon un schéma centré classique.

$$\left.\frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2}\right|_{i,j} = \frac{\Psi_{i+1,j}^{n+1} - 2\Psi_{i,j}^{n+1} + \Psi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta X^2}, \left.\frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2}\right|_{i,j} = \frac{\Psi_{i,j+1}^{n+1} - 2\Psi_{i,j}^{n+1} + \Psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta Y^2} \quad (3.26)$$

$$\left.\frac{\partial\theta}{\partial X}\right|_{i,j} = \frac{\theta_{i+1,j}^{n+1} - \theta_{i-1,j}^{n+1}}{2\Delta X} \quad (3.27)$$

On applique une discrétisation croisée pour le terme suivant :

$$\left.\frac{\partial^2\Psi}{\partial X\,\partial Y}\right|_{i,j} = \frac{1}{4\Delta x\Delta y}\left[\Psi^{n+1}_{i+1,j+1} - \Psi^{n+1}_{i-1,j+1} + \Psi^{n+1}_{i-1,j-1} - \Psi^{n+1}_{i+1,j-1}\right] (3.28)$$

On injecte ces équations (3.26)(3.27) et (3.28) dans l'équation (3.25) on obtient :

$$\begin{aligned}&\Psi^{(n+1),(k+1)}_{i,j} = \\ &\Psi^{(n+1),k}_{i,j} + \omega\Big\{a_x\left(\Psi^{(n+1),k}_{i+1,j} + \Psi^{(n+1),(k+1)}_{i-1,j}\right) + a_y\left(\Psi^{(n+1),k}_{i,j+1} + \Psi^{(n+1),(k+1)}_{i,j-1}\right) + a_{xy} \\ &\left(\Psi^{(n+1),k}_{i+1,j+1} - \Psi^{(n+1),k}_{i-1,j+1} - \Psi^{(n+1),(k+1)}_{i-1,j-1} + \Psi^{(n+1),k}_{i+1,j+1}\right) + a_{TSx}\left(T^{(n+1)}_{i+1,j} - T^{(n+1)}_{i-1,j}\right) + a_{TSy}\left(T^{(n+1)}_{i,j+1} - T^{(n+1)}_{i,j-1}\right)\Big\}\end{aligned} (3.29)$$

Ou les paramètres: $a_p, a_x, a_y, a_{xy}, a_{TSx}$ and a_{TSy} sont donnés par :

$$a_p = -\frac{\left[2\left(1+V_a\cdot F(\phi)\cdot G\right)\left(\Delta X^2+\Delta Y^2\right)V_a + 2\left(V^2\Delta Y^2 + U^2\Delta X^2\right)F(\phi)\cdot G\right]}{V_a\Delta X^2\Delta Y^2}$$

$$a_x = \left[\frac{\left(1+V_a\cdot G\cdot F(\phi)\right)V_a + V^2GF(\phi)}{V_a\Delta X^2}\right]/a_p \ ,$$

$$a_y = \left[\frac{\left(1+V_a\cdot G\cdot F(\phi)\right)V_a + U^2GF(\phi)}{V_a\Delta Y^2}\right]/a_p$$

$$a_{xy} = \left[\frac{UVGF(\phi)}{2V_a\Delta X\,\Delta Y}\right]/a_p \ , \ a_{TSx} = \frac{R_T H(\phi)\cos\gamma}{2\Delta X a_p} \ , \ a_{TSy} = -\frac{R_T H(\phi)\sin\gamma}{2\Delta Y a_p} (3.30)$$

Avec la même approche nous obtenons l'expression générale de l'équation de quantité de mouvement (eq.2.31) pour le second cas de la forme suivante :

$$\begin{aligned}&\Psi^{(n+1),(k+1)}_{i,j} = \\ &\Psi^{(n+1),k}_{i,j} + \omega\Big\{a_{x1}\left(\Psi^{(n+1),k}_{i+1,j} + \Psi^{(n+1),(k+1)}_{i-1,j}\right) + a_{y1}\left(\Psi^{(n+1),k}_{i,j+1} + \Psi^{(n+1),(k+1)}_{i,j-1}\right) + a_{xy1} \\ &\left(\Psi^{(n+1),k}_{i+1,j+1} - \Psi^{(n+1),k}_{i-1,j+1} - \Psi^{(n+1),(k+1)}_{i-1,j-1} + \Psi^{(n+1),k}_{i+1,j+1}\right) + a_{TSx1}\left(T^{(n+1)}_{i+1,j} - T^{(n+1)}_{i-1,j}\right) + a_{TSy1}\left(T^{(n+1)}_{i,j+1} - T^{(n+1)}_{i,j-1}\right)\Big\}\end{aligned} (3.31)$$

Les paramètres : $a_{p1}, a_{x1}, a_{y1}, a_{xy1}, a_{TSx1}$ and a_{TSy1} sont exprimés par :

$$a_{p1} = -\frac{\left[\begin{aligned}&2\left(1+V_a\cdot F(\phi)\cdot G\right)\left(\Delta X^2+\Delta Y^2\right)V_a + 2\left(V^2\Delta Y^2 + U^2\Delta X^2\right)F(\phi)\cdot G + \\ &2C_1\left(\Delta X^2\cos^2\xi + \Delta Y^2\sin^2\xi\right)V_a\end{aligned}\right]}{V_a\Delta X^2\Delta Y^2}$$

$$a_{x1}=\left[\frac{\left(1+V_a\cdot G\cdot F\left(\phi\right)+C_1\sin^2\xi\right)V_a+V^2GF\left(\phi\right)}{V_a\Delta X^2}\right]/a_{p1}\ ,$$

$$a_{y1}=\left[\frac{\left(1+V_a\cdot G\cdot F\left(\phi\right)+\cos^2\xi\right)V_a+U^2GF\left(\phi\right)}{V_a\Delta Y^2}\right]/a_{p1}$$

$$a_{xy1}=\left[\frac{UVGF\left(\phi\right)}{2V_a\Delta X\Delta Y}+C_1\sin\xi\cos^2\xi\right]/a_{p1}\ ,\ a_{TSx1}=\frac{R_TH\left(\phi\right)\cos\gamma}{2\Delta Xa_{p1}}\ ,\ a_{TSy1}=-\frac{R_TH\left(\phi\right)\sin\gamma}{2\Delta Ya_{p1}}$$

(3.32)

Le paramètre ω est le facteur de sur-relaxation ; sa valeur est comprise entre 1 et 2, pour accélérer la convergence sa valeur optimale ω_{opt} dépend de la forme du domaine du maillage et les conditions aux limites. Pour un maillage uniforme est donné par :

$$\omega_{opt}=\frac{2}{\zeta^2}\left[1-\sqrt{1-\zeta^2}\right]\ (3.26)$$

D'où $\zeta=\left[\frac{\cos\left(\pi/N_{x+1}\right)+\left(\Delta x^2/\Delta y^2\right)\cos\left(\pi/N_{y+1}\right)}{1+\left(\Delta x^2/\Delta y^2\right)}\right]$

N_{x+1} et N_{y+1} désigne respectivement les numéros des nœuds dans les directions horizontale et verticale.Le critère de convergence lors de la résolution de l'équation (3.20) est donné par:

III.4 Discrétisation des champs de vitesse :

Les composantes du champ de vitesse sont obtenues à partir de la fonction courante selon les relations (2.21). La discrétisation de ces équations par un schéma aux différences finies centrées du premier ordre donne :

$$U_{i,j}^{n+1}=\frac{\Psi_{i,j+1}^{n+1}-\Psi_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta Y}\ (3.33)$$

$$V_{i,j}^{n+1}=\frac{\Psi_{i,j+1}^{n+1}-\Psi_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta X}\ (3.34)$$

III.5 Conditions aux limites de vitesse :

Les conditions aux limites de vitesse sont discrétisées selon un schéma aux différences finis décentré à droite et à gauche de troisième ordre :

$$\left.\begin{array}{lll} U_{1,j}=0, \quad , & V_{i,1}=-\dfrac{18\Psi_{2,j}-9\Psi_{3,j}+2\Psi_{4,j}}{6\Delta X} & \text{à} \quad X=-\dfrac{1}{2} \\ U_{Nnx,j}=0, & V_{i,Nny}=\dfrac{18\Psi_{Nnx-1,j}-9\Psi_{Nnx-2,j}+2\Psi_{Nnx-3,j}}{6\Delta X} & \text{à} \quad X=\dfrac{1}{2} \end{array}\right\} (3.35)$$

$$\left.\begin{array}{lll} V_{i,1}=0, & U_{1,j}=\dfrac{18\Psi_{i,2}-9\Psi_{i,3}+2\Psi_{i,4}}{6\Delta Y} & \text{à} \quad y=-\dfrac{1}{2} \\ V_{i,Nny}=0, & U_{Ny+1,j}=-\dfrac{18\Psi_{i,Nny-1}-9\Psi_{i,Nny-2}+2\Psi_{i,Nny-3}}{6\Delta Y} & \text{à} \quad y=\dfrac{1}{2} \end{array}\right\} (3.36)$$

$$\frac{\sum_i\sum_j\left|\Psi_{i,j}^{k+1}-\Psi_{i,j}^{k}\right|}{\sum_i\sum_j\left|\Psi_{i,j}^{k}\right|}\le 10^{-6} (3.37)$$

III.7 Algorithme de calcul:

Les principales étapes de notre algorithme de calcul sont:

1. Génération de maillage.

2. Initialisation et lecture des données.

3. Calcul du facteur de sur-relaxation.

4. Présente des conditions initiales sur la température, et sur la fonction courante,

5. Évaluation initiale du champ de vitesse.

6. Début de la boucle temporelle.

6.1. Résolution des équations d'énergie (3.9) et (3.15) par la méthode ADI et calcul du champ de température.

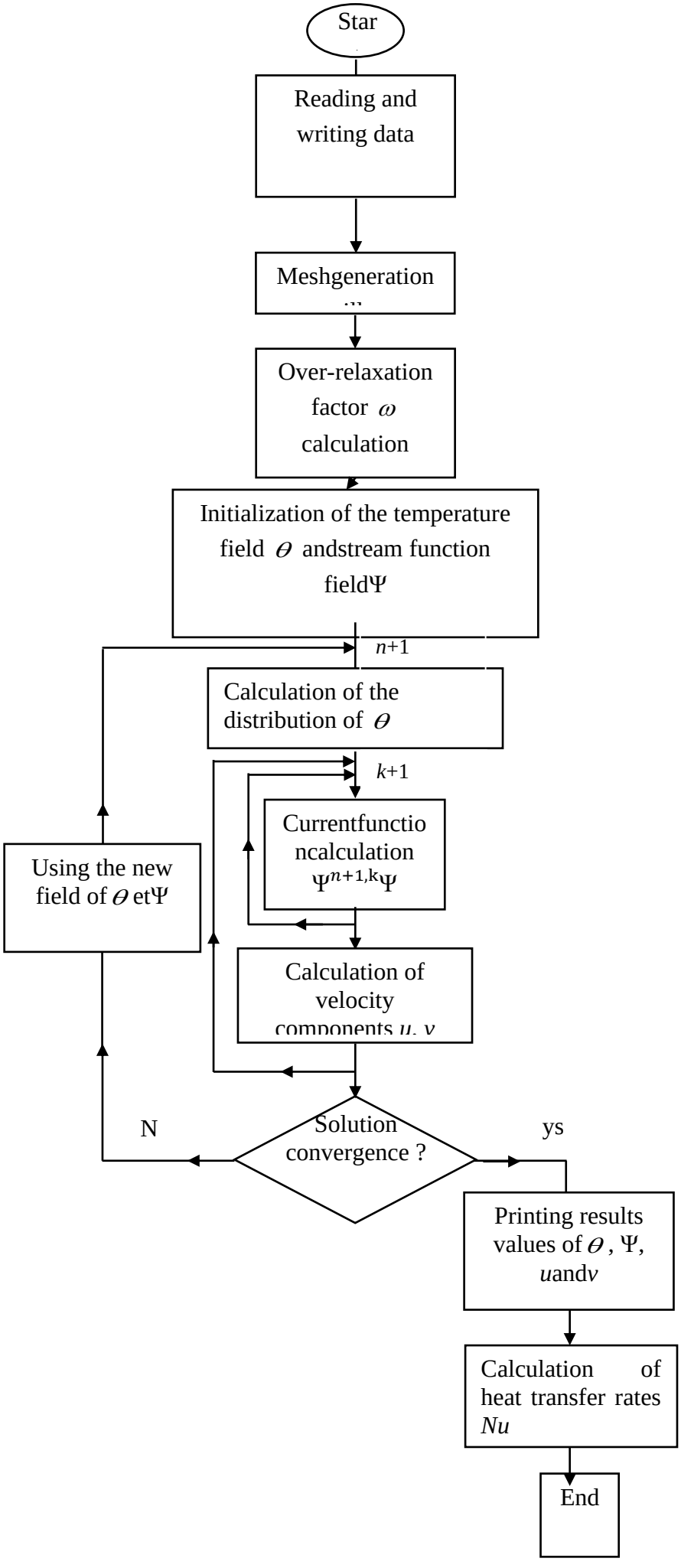
6.2. Résolution de l'équation du mouvement (3.22) par la méthode SOR et calcul du champ de la fonction courante.

6.3. Velocityfieldcalculation.

6.4. Répétez l'étape (6.1) jusqu'à ce que la solution converge vers une solution permanente ou oscillante.

7. Impression des résultats.

8. Fin du programme.


Star
Reading and writing data
Meshgeneration
Over-relaxation factor ω calculation
Initialization of the temperature field θ andstream function fieldΨ
n+1
Calculation of the distribution of θ
k+1
Currentfunctio ncalculation $\Psi^{n+1,k}\Psi$
Using the new field of θ etΨ
Calculation of velocity components u, v
Solution convergence ?
N
ys
Printing results values of θ , Ψ, $u$and$v$
Calculation of heat transfer rates Nu
End

Chapitre IV

Résultats et discussions

III.1 Résultats et discussions

Ce chapitre s'attache à présenter les résultats numériques. Dans ce cas, les résultats de la convection du nanofluide nanofluidique saturé d'eau de cuivre ont été.

Le milieu poreux de l'eau de cuivre carrée inclinée est illustré et discuté comme suit Paramètres de gestion Nombre de Rayleigh RT, fraction granulométrique des nanoparticules, effet d'inertie G, l'angle d'inclinaison de la cavité γ et la porosité du milieu poreux ε.

Les isothermes, les lignes de courant et le nombre de Nusselt sont présentés pour le cas traités; l'enceinte carrée.

III.2.Enceinte carrée

Dans cette partie, on présente les résultats d'une étude numérique du transfert de chaleur, par convection naturelle dans une enceinte carrée inclinée chauffée, par une source de chaleur d'une température aléatoire basée sur remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules.

L'objectif de ce travail est d'analyser les performances de transfert de chaleur d'un nano fluide (Eau Cu) saturé d'un milieu poreux fortement conducteur incliné (mousse d'aluminium) par

Étudier la relation entre le nombre de Rayleigh RT, nanoparticules volume fraction ϕ.inertiel effetparamètre G, inclination angle γ , and the porosité of poreux medium ε . Les résultats numériques rapportés dans cette étude couvrent les gammes.

$100 \leq RT \leq 1000, \quad 0.05 \leq \phi \leq 0.2, \quad 5 \leq G \leq 100, \quad 0\,° \leq \gamma \leq 90°$

Le tableau 3.1L'effet de la taille des maillages

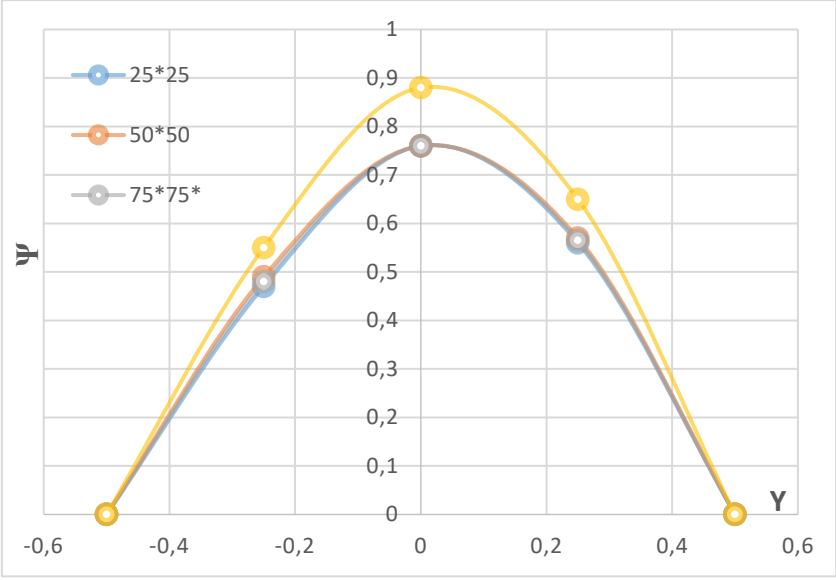
Les tailles de grille sont testées de 25×25 à 100×100. Tableaux. 3.1 montre l'effet de la taille du maillagesur le nombre de Nusselt moyen des parois chaudes et froides et la valeur absolue maximale dela valeur absolue maximale de la fonction de flux. On constate que la grille 25×25 est suffisamment suffisante pour résoudre le système d'équations Afin de prouver l'exactitude du code.

III.3.L'effet de la taille des maillages

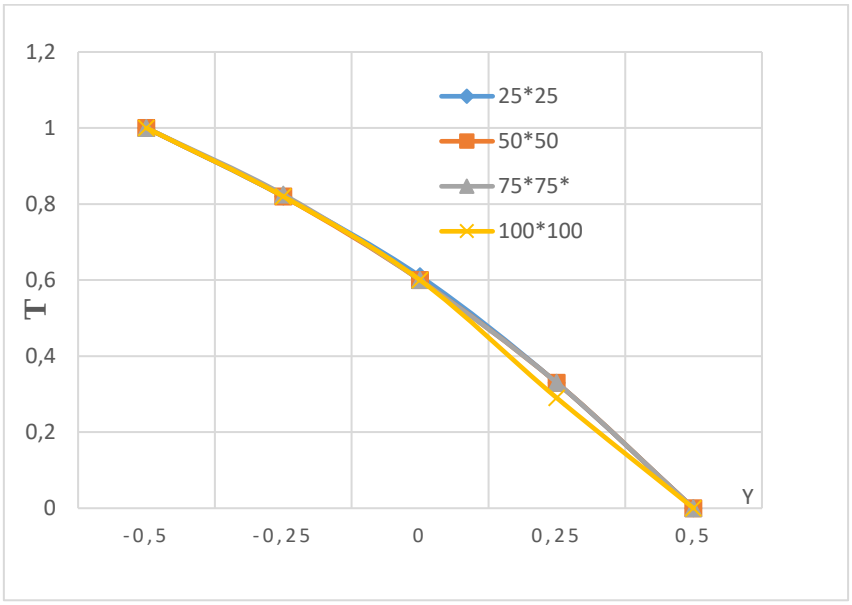
*Nx * Ny*	*25*25*	*50*50*	*75*75*	*100*100*
Ψ	**0.88377525**	**5.30339473**	**4.48724388**	**4.48749216**
Nu	**1.53504741**	**3.04041596**	**4.4**	**4.44668666**

Tableau 3.1. L'effet de mouillage pour RT=100 G=5 ϕ=0.2γ=90

(a)



(b)



(c)

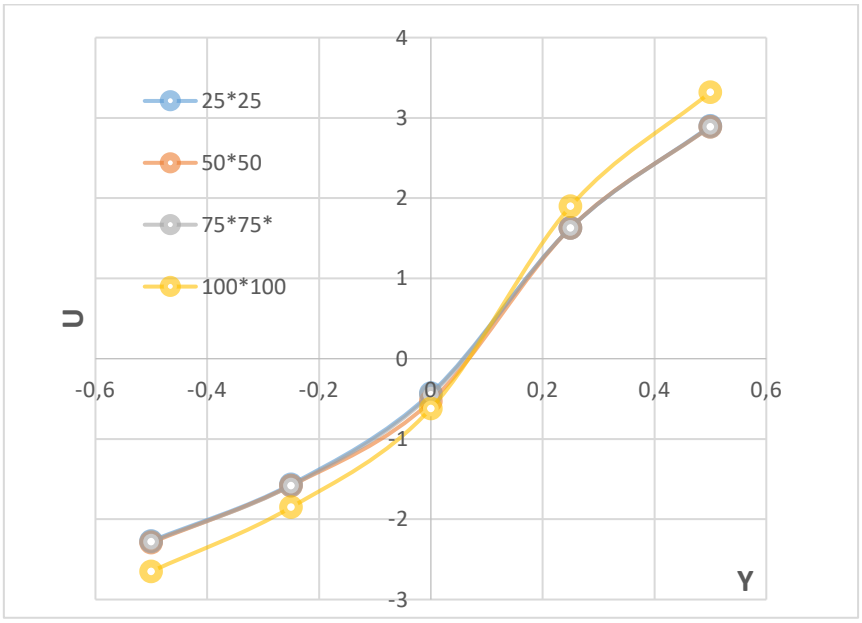


Figure3.1Les lignes de courant et les champs des températures et la vitesse pour RT=100 G=5 ϕ=0.2γ=90.

La figure 2présente les champs de température (en droite) et les lignes de courant (en gauche) pour un nanofluide pourcentages des nanoparticules (0 .2) avec une source de chaleur d'une température constante, et les différentes valeurs de nombre de RayleighRa =(100, 500,1000).

Il est clair, à partir de cette figure qu'on a une diversité des structures des cellules des lignes de courants pour le cas étudié (température constante). La même chose pour les champs de températures.

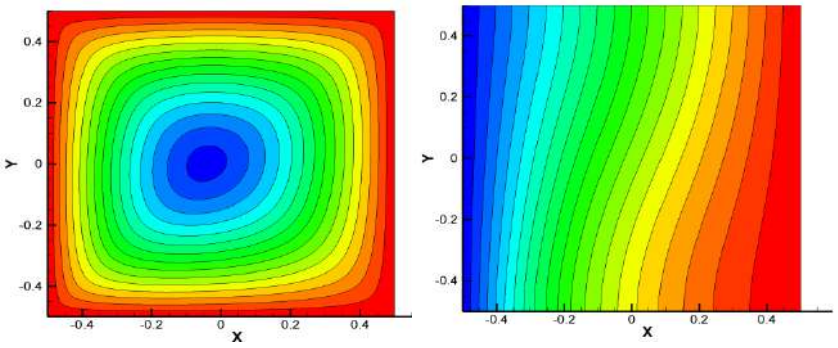
mais dans ce cas la diversité des isothermes est plus clair La figure (3.2) représente les champs de température et les lignes de courants respectivement pour un nanofluides, aux différentes valeurs de nombre de Rayleigh avec une source de chaleur d'une température constante.

Les résultats montrent que la déviation des isothermes augmente quand le nombre de Rayleigh augmente, et s'oriente vers le phénomène de stratification. L'effet de nombre de Rayleigh est clair pour les valeurs élevées de (Ψ). Ces derniers augmentent avec l'augmentation de nombre de Rayleigh.

La même chose est marquée pour le nombre de Nusselt et ce dernier augmente avec l'augmentation de nombre de Rayleigh.

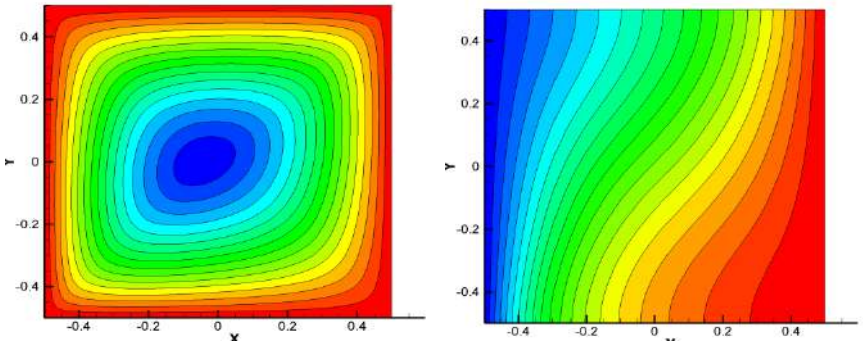
IV.4.les lignes des courant et ses isotherme pour L'effet de nombre de Rayleigh

Ψ **T**



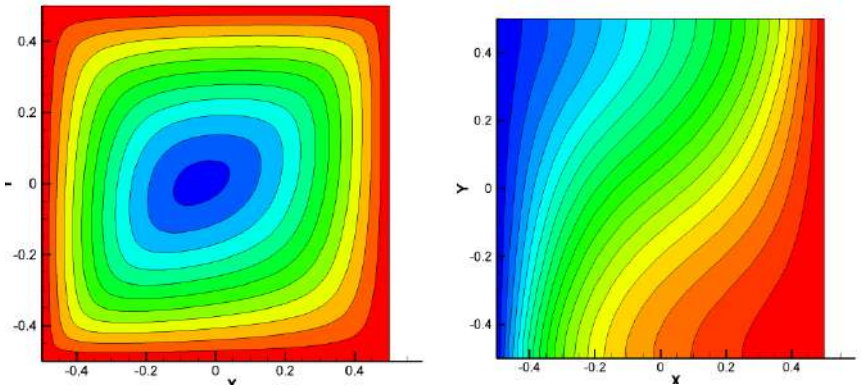
Ra=100

Ψ= 0.7552699 **Nu= 1.55828099**



Ra=500

Ψ=1.64841452 **Nu=1.73395879**



Ra=1000

Ψ=2.23379948 **Nu=1.88881966**

Figure3.2Les lignes de courant et les champs des températures pour G=5, α=90 , ϕ =0.2 et différents nombre de Rayleigh

La figure 3 présente les champs de température (à droite) et les lignes de courant (à gauche) d'un nanofluide de pourcentage volumique des nanoparticules de (0 .2) et Nombre de Rayleigh (500) etd'angle (90°).avec une source de chaleur d'une température constante et différentes valeurs d'inertie G=(5 , 10 , 100)

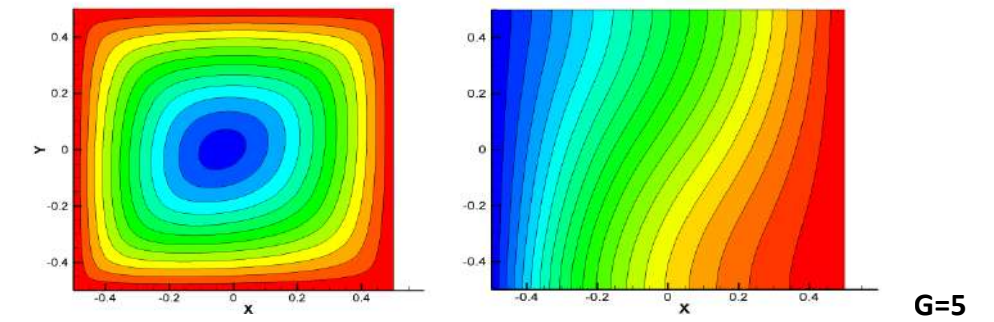
Il est clair, à partir de cette figure qu'on a une diversité des structures des cellules des lignes de courants pour le cas étudié (température constante). La même chose pour les champs de températures, mais dans ce cas la diversité des isothermes est plus claire.

Les figures (2) représentent les champs de température et les lignes de courants respectivement pour un nanofluides, aux différentes valeurs nombre de l'inertie avec une source de chaleur d'une température constante.

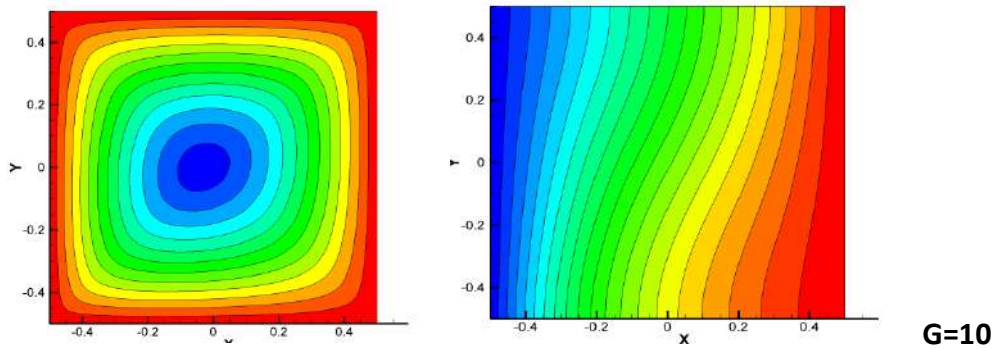
Les résultats montrent que la déviation des isothermes diminuer quand nombre de l'inertie augmente. L'effet de l'inertie est clair pour les valeurs élevées de (Ψ). Ces derniers augmentent avec l'augmentation de de nombre de l'inertie.

La même de nombre de Nusselt augmentation de nombre de l'inertie diminué nombres de Nusselt

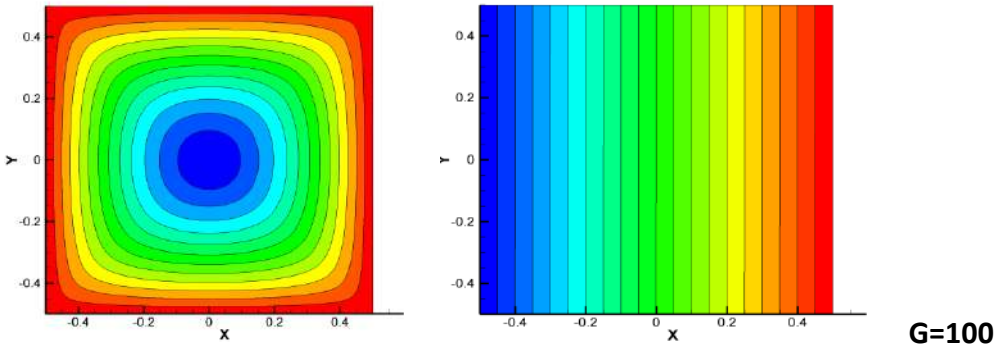
IV.5 les lignes des courant et ses isotherme pour L'effet de paramètre d'inertie ΨT



Ψ= 1.23105573 **Nu=1.53808719** **G=5**



Ψ= 1.24379020 **Nu=1.45778226** **G=10**



Ψ= 1.29449504 **Nu=1.00215357** **G=100**

Figure3.3. Les lignes de courants et Les champs des températures pour Ra=500, α=90 , ϕ =0.1 et différents nombres d'inertie G.

La figure 3 .4 présente les champs de température (à droite) et les lignes de courant (à gauche) pour un nanofluide de fraction volumique des nanoparticules de (0 .2) ; un Nombre de Rayleigh (500).L'effet inertiel (G=5).avec une source de chaleur d'une température constante, ou aléatoire et les différentes angles d'inclinaison α= (0.45.90).

Il est clair, à partir de cette figure qu'on a une diversité des structures des cellules des lignes de courants pour le cas étudié (température constante). La même chose pour les champs de températures, mais dans ce cas la diversité des isothermes est plus claire.

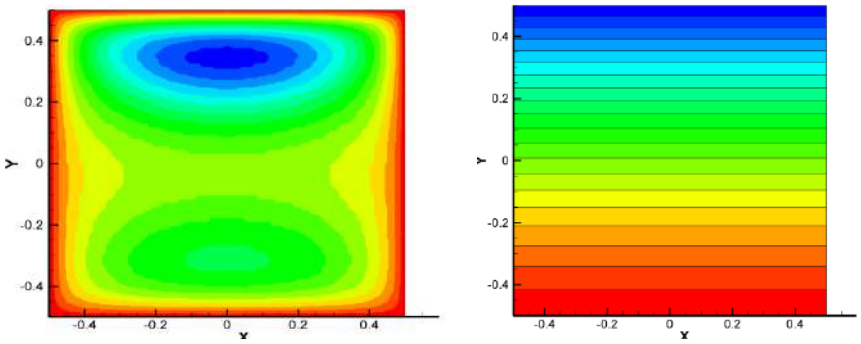
Les figures (3) représentent les champs de température et les lignes de courants respectivement pour un nanofluides, aux différentes valeurs d'angle d'inclinaison avec une source de chaleur d'une température aléatoire.

Les résultats montrent que la déviation des isothermes augmente quand l'inclinaison de l'angle augmente. L'effet de l'inertie est clair pour les valeurs élevées de (Ψ). Ces derniers augmentent avec l'augmentation de l'angle.

La même de nombre de Nuselt augmentation de l'angle augmenté nombres de Nusselt

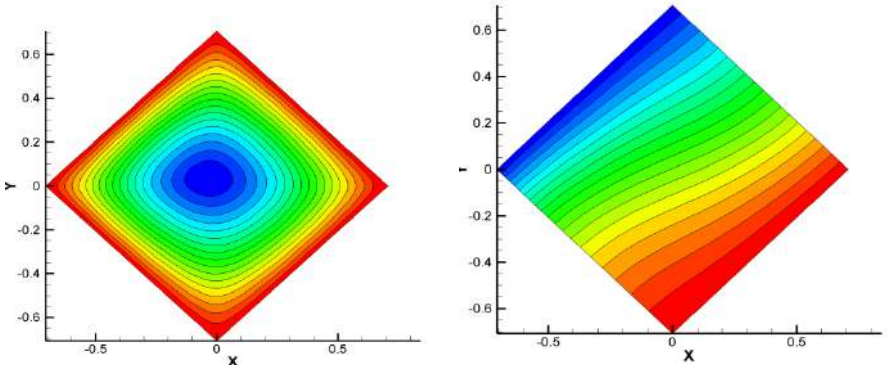
IV.6 les lignes des courant et ses isotherme pour L'effet d'inclinaison d'angle

ΨT



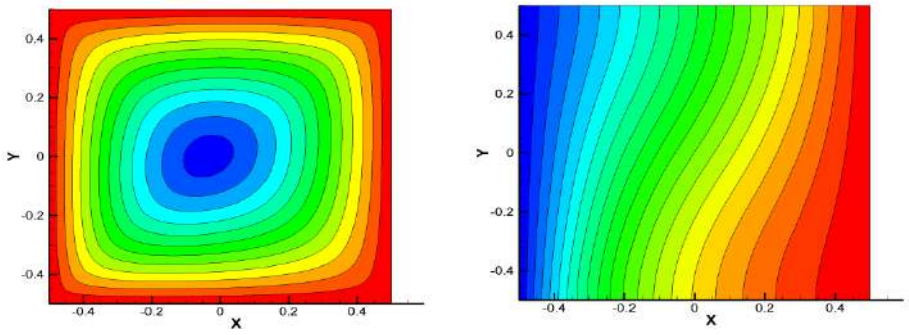
α=0

Ψ =0.00002893Nu=1.43210239



α=45

Ψ =0.87838023 Nu=1.48800928



α=90

Ψ =1.23105573Nu=1.53808719

Figure3.4. les lignes de courants et Les champs des températures pour Ra=500, G=5 , ϕ =0.2 et différents des angles

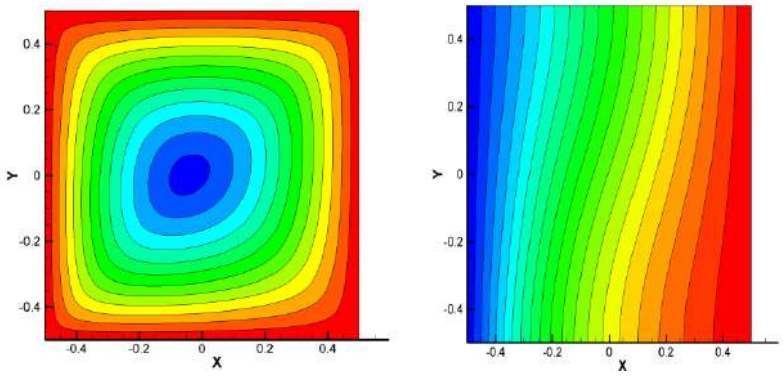
Le figure (5) montrent les champs de température et les lignes de courant pour un fluide pur et pour différents type de nanofluide (**c_u-eau**), les fractions volumiques (φ égale à 0.05 ,0.1, 0.2), et le nombre de Rayleigh 500, angle 90°, inertie 5. Avec une source de chaleur d'une Température constante.

Les résultats montrent que la déviation des isothermes augmente quand les fractions volumiques augmentent. La comparaison entre les nanofluides et le fluide pur montrent une déviation importante dans les isothermes.

Les valeurs de (Ψ) augmentent avec l'augmentation de La fraction volumique. Les lignes de courant deviennent plus serrées à côté des parois latérales, et la forme des cellules a changé totalement

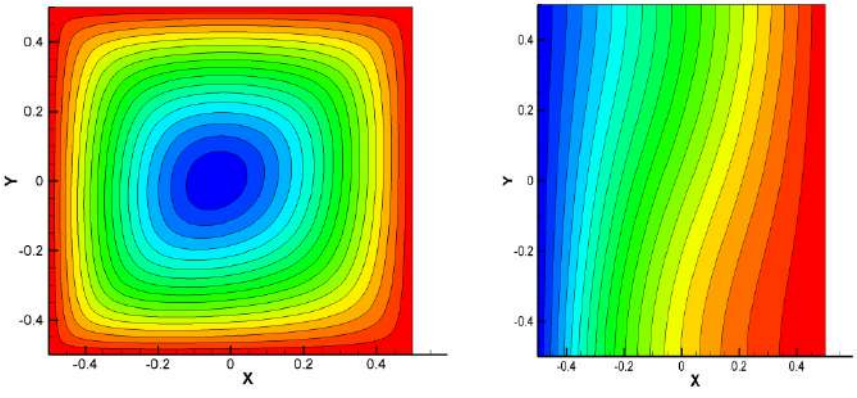
IV.7 les lignes des courant et ses isotherme pour fraction volumique des nanoparticules

ΨT



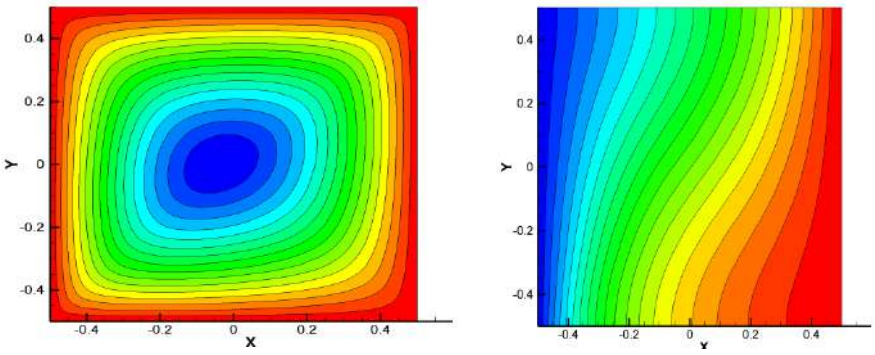
ϕ=0.05

Ψ=0.88035036Nu =1.57662222



ϕ=0.1

Ψ=1.23105573 Nu =1.53808719



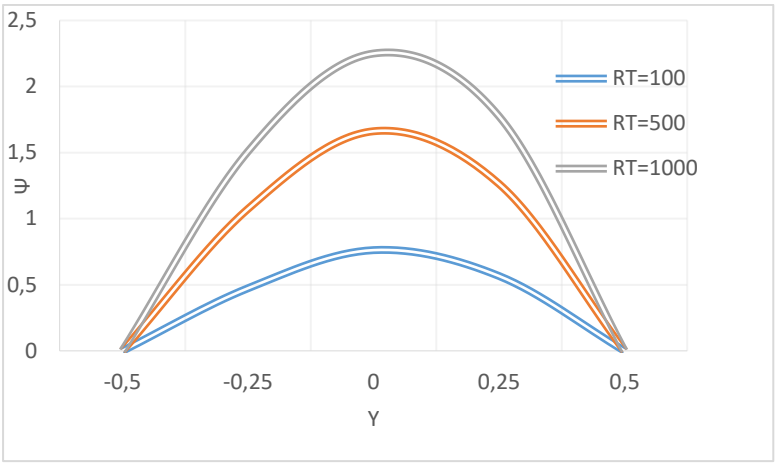
ϕ =0.2

Ψ=1.68199007 Nu =1.61711162

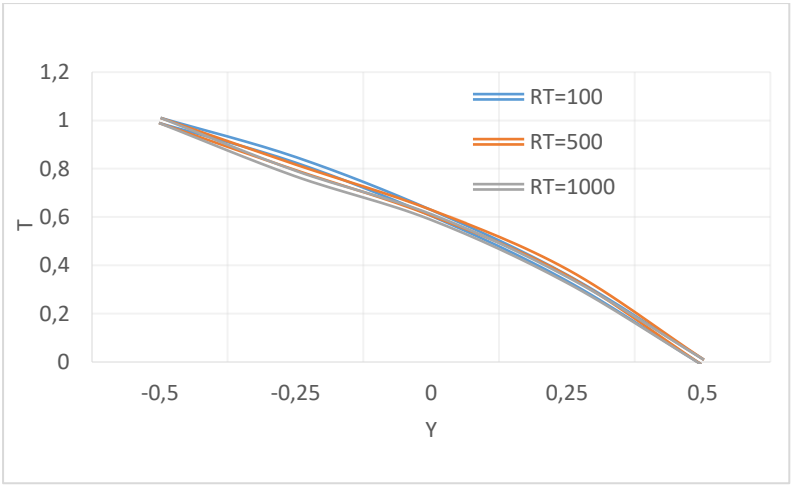
Figure3.5. les lignes de courants et Les champs des températures pour Ra=500, G=5 , α=90 et différents de la fraction volumique des nanoparticules ϕ

IV.9 . Les courbes d'effet de nombre de Rayleigh

(a)



(b)



(c)

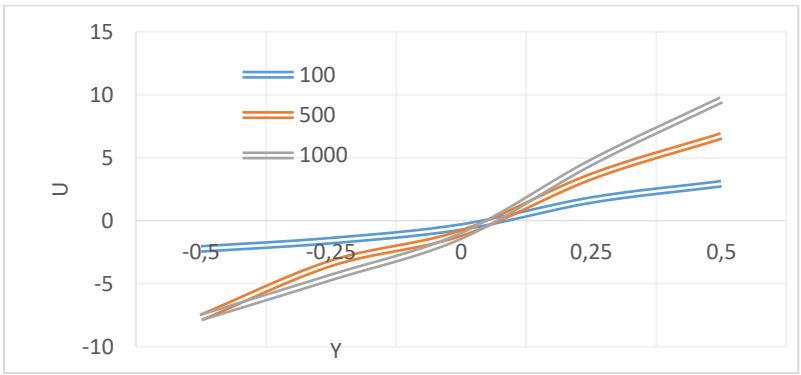


Figure3.6 Les lignes de courant et vitesse et la température pour G=5, α=90° , ϕ=0.2 et différents nombre de Rayleigh

Discussions pourd'effet de nombre de Rayleigh

Pour ce graphe on remarque un plan de symétrie pour toute valeur de RT et la valeur de Ψ est optimale au point y =0 et cette valeur se diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle s'annule aux extrémités y = (-0.5 et +0.5) et cela explique que l'effet de convection est plus important au centre Et qu'il est nul aux extrêmes par ce que l'effet de conduction thermique est le dominant.

La figure (b) l'effet de température est important par-dessous de la cavité (le coté chaud) remarquant une faible dissemblance aux trajectoires pour les trois valeurs de RT sauf aux extrémités et au centre ou l'intersection est marqué.

La figure (c) illustre l'effet de nombre de RT sur la vitesse ou on peut observer une relation de concordance proportionnelle entre RT et U ; élever le nombre de RT provoque une évolution de vitesse à la hausse et cela est remarquable aux bornes horizontales de la cavité. Mais la vitesse au centre est nulle pour les 03 valeurs de RT

IV.10 . Les courbes d'effet de paramètre d'inertie

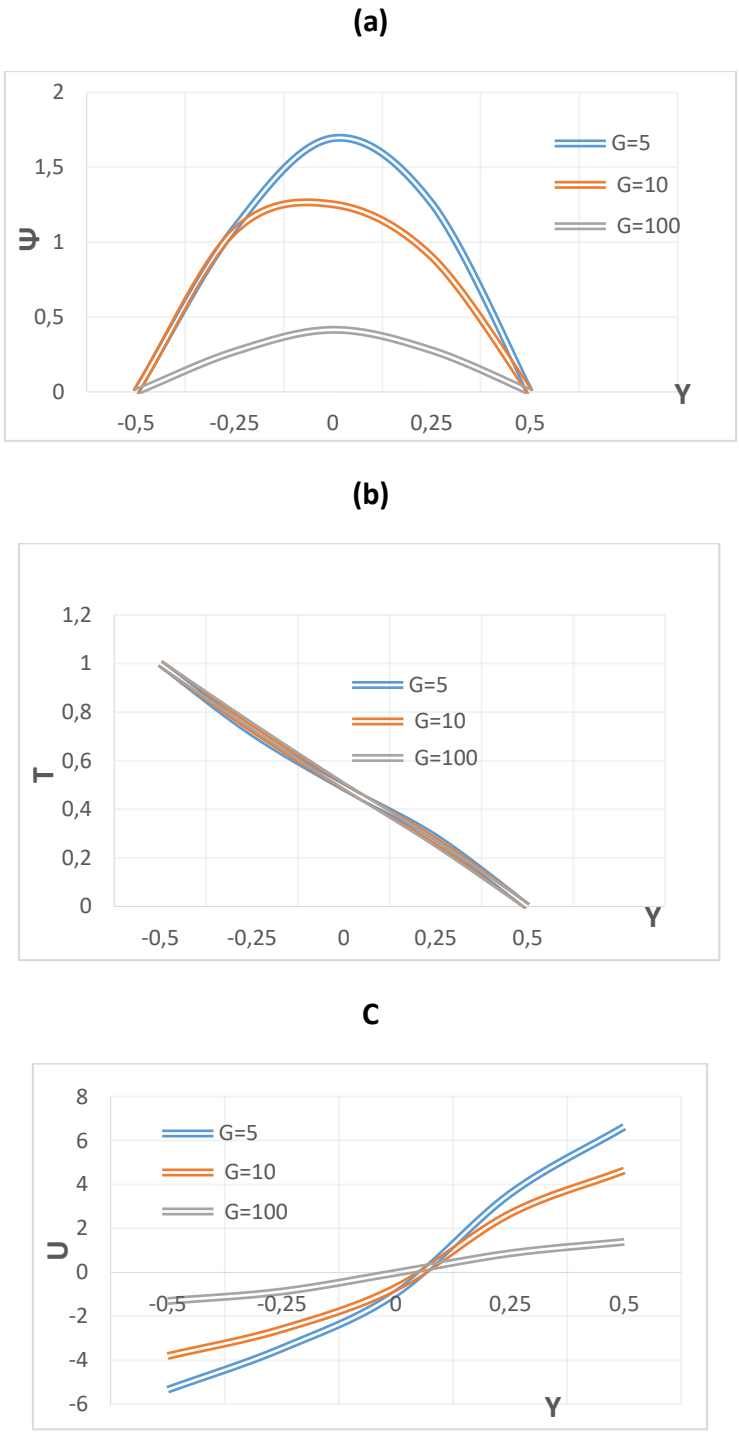


Figure3.7. Les lignes de courant et vitesse et la température pour Ra=500, α=90 , ϕ =0.2 et différents valeurs d'effet d'inertie

Discussions pourL'effet de paramètre d'inertie G

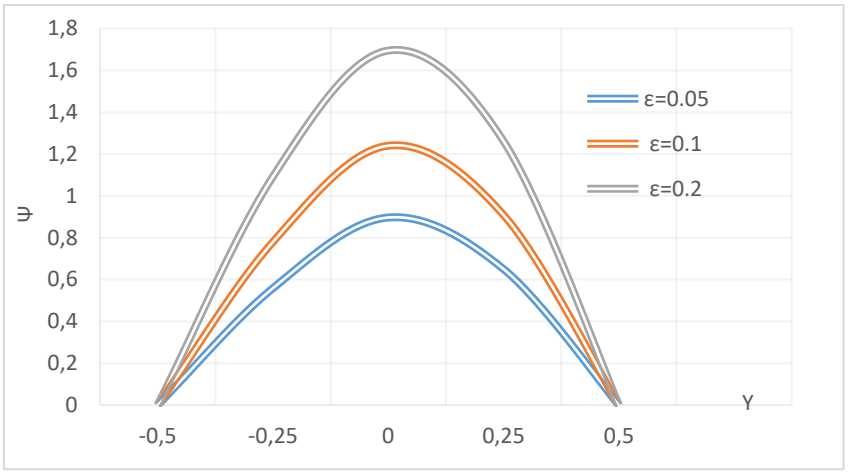
Figure 3.7 qui démontre .Les lignes de courant Ψ, de vitesse U et la température T pour Ra=500, α=90 , ϕ=0.2 avec différentes valeurs d'effet d'inertie G.

La figure (a) illustre l'évolution de fonction de courant le long de la paroi, on peut remarquer que l'effet de convection est important dès l'approche du centre ou il marque sa valeur optimale à cette zone et se minimise progressivement lorsqu'on s'éloigne de là et devient nulle aux extrémités.

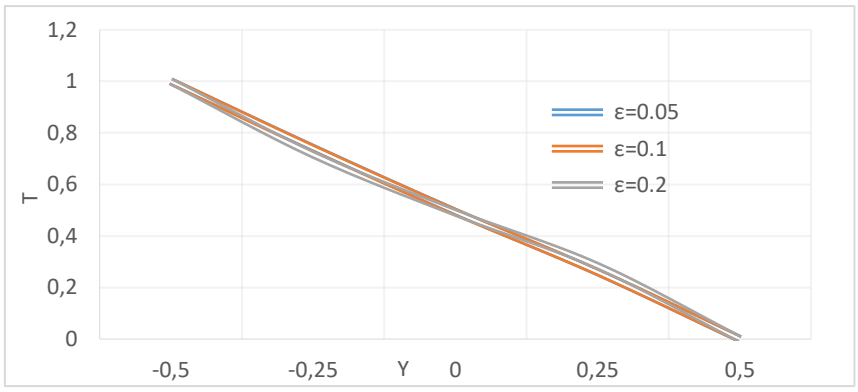
Pour l'effet de G y'a une relation de proportion inverse d'où augmenter l'effet inertiel va minimiser la fonction Ψet cela est identique pour la vitesse pésentée à lafigure (c) ou $|U|^{G=5}>|U|^{G=10}>|U|^{G=100}$ et le liquide tend vers l'etat stationnaire. Faisons la liaison de ces résultats avec le nombre de Nusselt Nu marqué à la figure 3.2 précedement qui diminu avec l'augmentation de G on peut destinguer que la convection est inhibée avec l'augmentation de paramètre inertiel G et pour les grandes valeurs de ce dernier le mode de transfert de chaleur par conduction est le dominant

IV.11 Les courbes d'effet de fraction volumique des nanoparticules

(a)



(b)



(c)

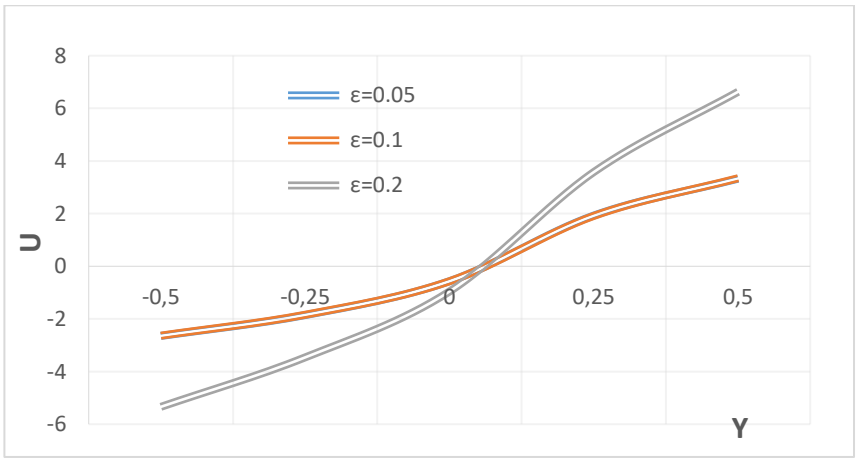


Figure3.8. Les lignes de courant et vitesse et la température. Ra=500, G=5 , α=90 et différents de fraction volumique des nanoparticules ϕ

Discussions pour L'effet de la fraction des nanoparticules :

L'impact des fractions des nanoparticules est illustré à la Figure3.8 qui présente les lignes de courant de vitesse et de température avec fixation des nombres de RT=500, G=5 , α=90 et différentes fractions volumique des nanoparticules ϕ=0.05 ,0.1 et 0.2

La figure (a) montre clairement que l'ajout des nanoparticules a un impact positif pour la fonction de flux à ces conditions et cela est soutenu avec la figure (c) ou la vitesse U avec une fraction de 0.2 est importante par rapport la vitesse des fractions minimales.

Le profil de température (figure (b)) est semblable pour les différentes fractions étudiées, optimale le bas de la paroi et se minimise vers le haut.

IV.12 . Les courbes d'effet d'inclinaison d'angle

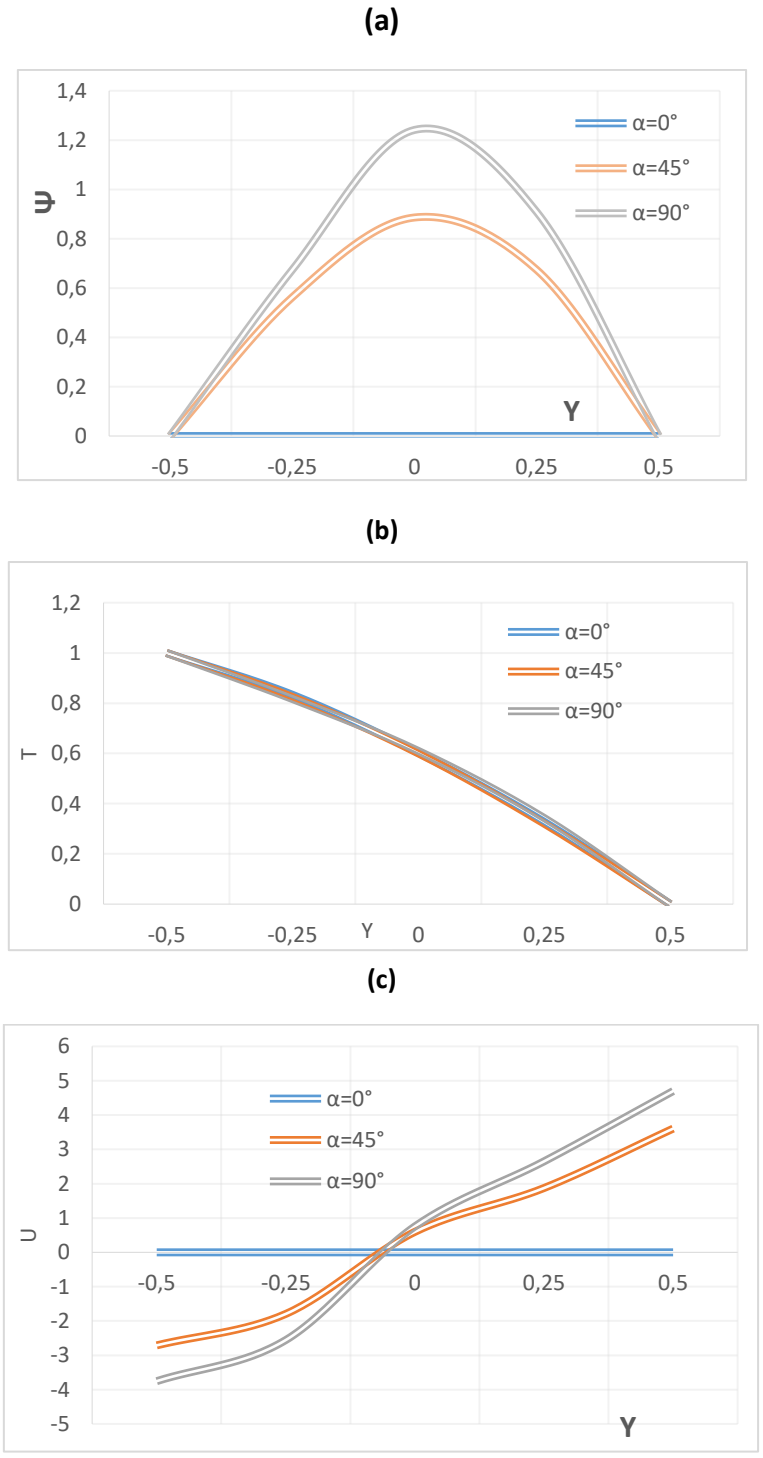


Figure3.9. Les lignes de courant et vitesse et la température pour Ra=500, G=5, ϕ =0.2 et différentesangles α.

Discussions pour L'effet d'angle d'inclinaison α

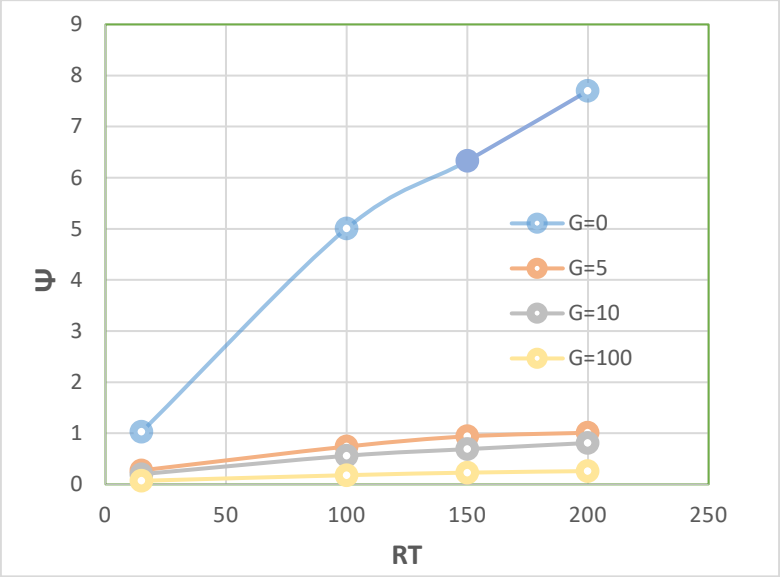
La figure 3.9 montre l'effet d'inclinaison d'angle α avec fixation des paramètres pour RT=500, G=5,ϕ =0.2 sur les lignes de courant Ψla température T et la vitesse U

La figure (a) démontre l'effet d'angle sur la fonction de courant qui est quasément nul pour α=0 donc y'a pas de convection thermique pour cet angle et la conduction est le seul moyen d'echange thermique , au-delà de cet angle la fonction Ψ commence à surcroit progressivement avec l'augmentaion de α jusqu'à l'angle α=90 ou atteint sa valeur maximale donc un vortex fort de convection est formé par rapport aux autres angles .

La figure (b) démontre le profil de température le long de la paroi gauche ou atteint l'optimal au coté bas le plus proche de source chaude et diminue avec l'eloignement de cette zone ,les profiles de température sont presque identiques et cela peut s'expliquer par la haute conductivité de la matrice poreuse.

La vitesse est présentée à **la figure (c)** pour les 03 angles cités avant ,une vitesse nulle pour un α=0° ,l'effet convectif est inhibé .Au de là de cet angle quand on accroit l'inclinaison de α la vitesse s'accroit proportionnelement avec jusqu'à l'optimal à α=90°.et comme on peut voir l'angle d'inclinaison a un effet significatif sur la valeur de fonction de flux et le nombre de Nusselt .

(a)



(b)

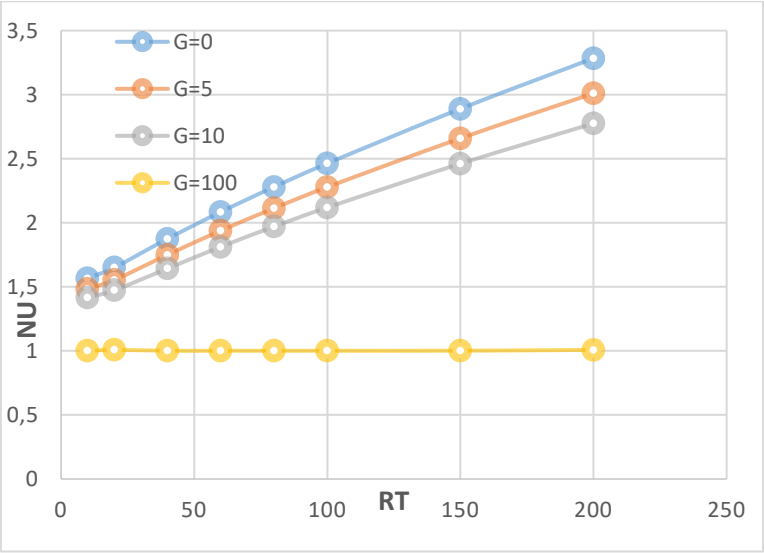


Figure.3.10. Variation de la fonction de flux absolu maximum (a) nombre moyen de nusselt(b) pourdifférentes valeurs nombre de Rayleigh et différentes valeurs du paramètre d'effets inertiels G et $\phi=10^5$, $\gamma= 90°$.

Variation de la fonction de flux absolu maximum le nombre de Rayleigh et le nombre moyen de Nusselt et différentes valeurs du paramètre d'effets inertiels Gpour $\phi= 0.05$, $\gamma= 90°$.et le (Cu-eau), mousse comme matrice solide du poreuxmoyen. Le nombre moyen de Nusselt est

calculé le long du mur de gauche pour différents Rayleighnombre et terme non-Darcy différent G (paramètre des effets inertiels).

Il est clair que lorsque inertiels G augmente, Avec une diminution de la valeur de nombre de Nusselt ,et augmentation de nombre de RA correspondant à une augmentation de la valeur de nombre de Nusselt la convection naturelle est inhibée,Plus la valeur n'est élevéedu paramètre d'effets inertiels G.G par rapport aux valeurs élevées de ce dernier. Aucun changement n'est enregistré dans la moyennepour tous les nombres de Rayleigh (de 0 à 150)

La variation est insignifiante. A ces valeurs du paramètre d'effets inertiels G (G =1 à 10), le transfert de chaleur par mode de conduction est dominé et le fluide est approximativement stationnaire. En l'absence de convection (RT=0), le mode de conduction est le seul mécanisme de transfert de chaleur, qui est présenté par le Ψ=0.

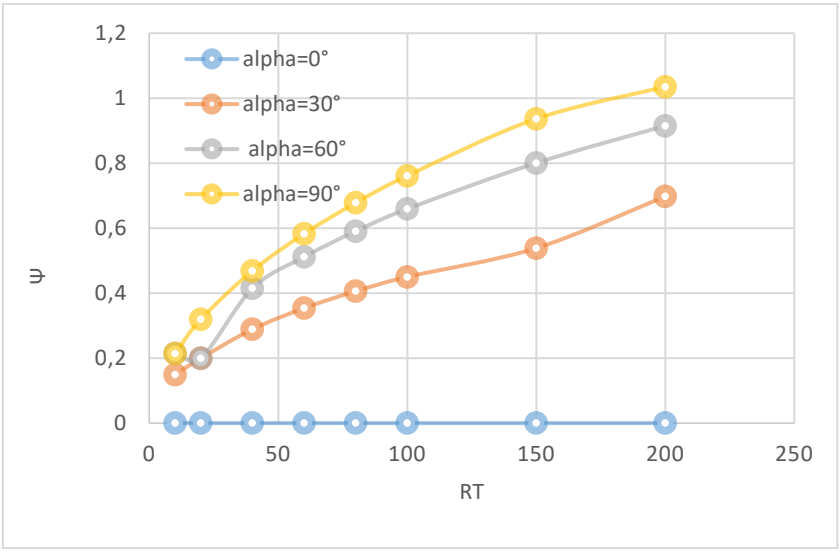
Pour ϕ= 0.02, γ=90° RT =100, G = 5, G=10 nombre de Nusselt respectivement Nu=2,2784 Nu= 2,11928407nous remarquons que la valeur denombre de Nusselta diminué avec l'augmentation de G effets inertiels.

Et pour Figure.3.10APlus de la valeur d'inertiels Gestélevée, plus la valeur de Ψ. et augmentation de nombre de RAcorrespondant à une augmentation de la valeur de la fonction de flux la convection naturelle est inhibée.

La variation est insignifiante. A ces valeurs du paramètre d'effets inertiels G (G =1 à 10), le transfert de chaleur par mode de conduction est dominé et le fluide est approximativement stationnaire. En l'absence de convection (RT=0), le mode de conduction est le seul mécanisme de transfert de chaleur, qui est présenté par le Ψ=0.

Pour ϕ= 0.02, γ=90° RT =200, G = 5, G=10 nombre de Nusselt respectivement Nu=7,92335915 Nu=8,32129199 nous remarquons que la valeur denombre de Nusseltà augmenter la valeur de G effets inertiels et augmenter.

(a)



(b)

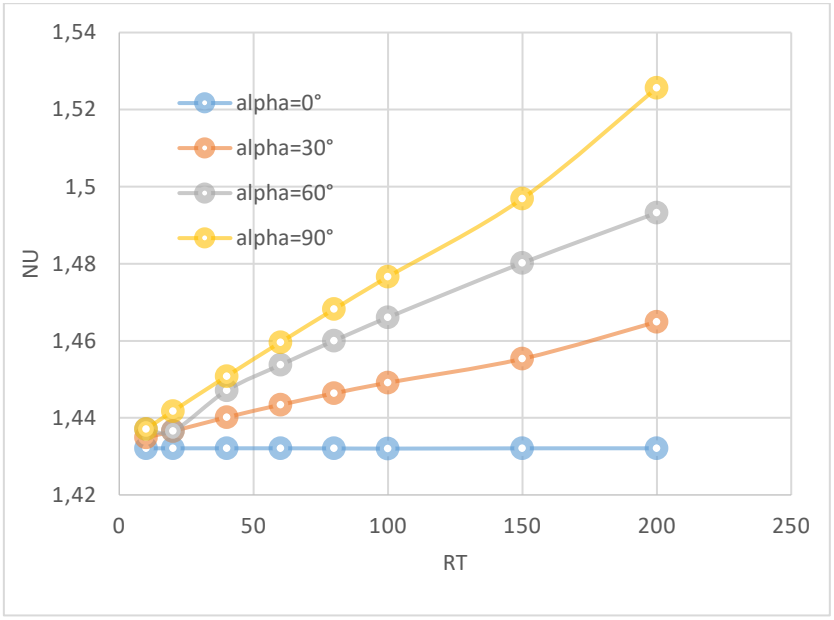


Figure.3.11. Variation de la fonction de flux absolu maximum (a) nombre moyen de Nusselt (b) pourdifférentes valeurs le nombre de Rayleigh et différentes valeurs l'angle ϕ= 0.02,

Variation de la fonction de flux absolu maximum le nombre de Rayleigh et le nombre moyen de Nusselt avec différentes valeurs d'angle α (0°,30°,60°,90°) pour G=5 ϕ= 0.2 et le (Cu-eau), mousse comme matrice solide du moyen poreux.

Le nombre moyen de Nusselt est calculé le long du mur de gauche pour différents Rayleighnombre et terme non-Darcy avec différentes valeurs d'angle.

Il est clair que lorsque l'angle augmente pour une valeur fixée de RT, la valeur de nombre de Nusselt augmente progressivement sauf pour α=0 .Ou aucun changement n'est enregistré dans la moyennepour tous les nombres de Rayleigh (de 0 à 200) admettant que l'effet de transfert par convection est inhibé et le transfert de chaleur par mode de conduction est dominé et le fluide est approximativement stationnaire,et pour une valeur de α (30° , 60° ,90°)avec augmentation de nombre de RT la valeur de nombre de Nusselt se concorde proportionnellement à la hausse.

Pour ϕ= 0.2, G = 5, RT =100,γ= 30° , γ= 90° nombre de Nusselt respectivement Nu=1,4491Nu= 1,4766nous remarquons que la valeur denombre de Nusselta augmenté avec l'augmentation d'angle α et la variation est signifiante pour les valeurs élevées de RT

Et pour **Figure.3.11 A** Plus de la valeur d'angle α est élevée, plus la valeur de Ψ augmente avec augmentation de nombre de RT

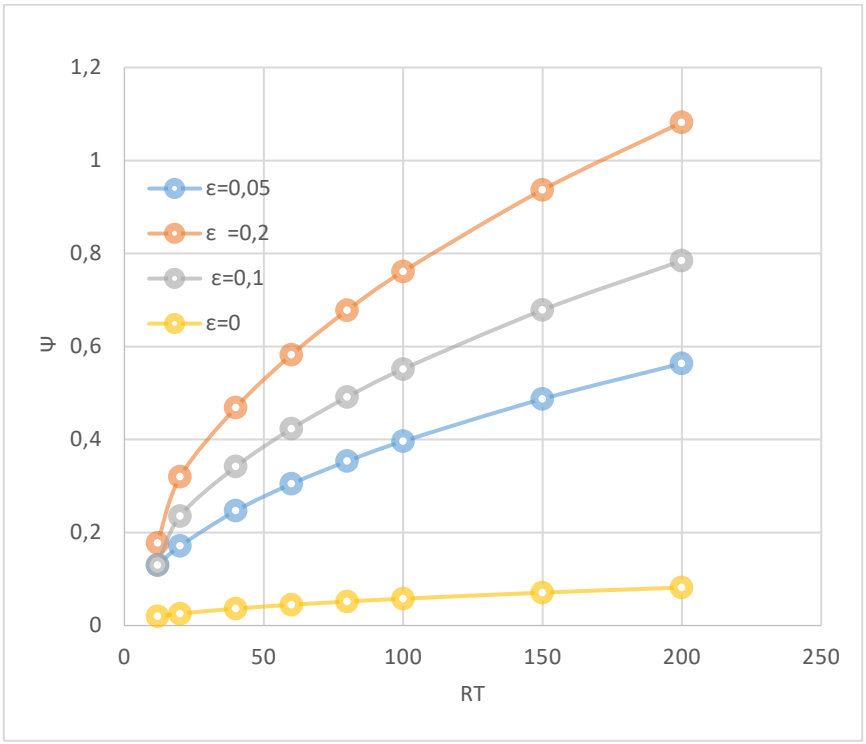
La fonction de courantest calculé le long du mur gauche pour différents Rayleighnombres et terme non-Darcien avec différentes valeurs d'angle α.

La figure illustre l'évolution de la fonction de courant Ψ et le nombre de RTavec différentes angles d'inclinaison α. La valeur Ψ s'élève progressivement sauf pour α=0 Ou aucun changement pour tous les nombres de Rayleigh (de 0 à 200) admettant que l'effet de transfert par convection est inhibé et le transfert de chaleur par mode de conduction est dominé et le fluide est approximativement stationnaire,et pour une valeur de α (30° , 60° ,90°)avec augmentation de nombre de RT la valeur deΨ se concorde proportionnellement à la hausse , ces valeurs du angle (α =0° à 90°),. En l'absence de convection (RT=0), le mode de conduction est le seul mécanisme de transfert de chaleur, qui est présenté par le Ψ=0.

Pour ϕ= 0.2, γ=90° RT =100, α=30°, α=90°respectivement la valeur deΨ=0,45014

Ψ=0,76131nous remarquons que la valeur deΨaugmente avec l'inclinaison de α.

(a)



(b)

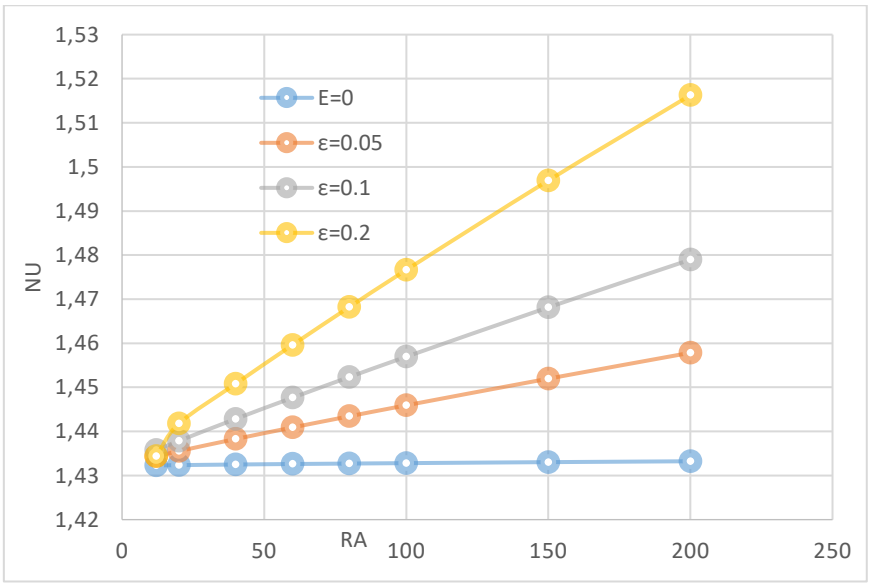


Figure.3.12. Variation de la fonction de flux absolu maximum (a) nombre moyen de Nusselt (b) pourdifférentes valeurs le nombre de Rayleigh et différentes fractions volumiques des nanoparticules ϕet γ=90°, G =5.

Variation de la fonction de flux absolu maximum le nombre de Rayleigh et le nombre moyen de Nusselt et différentes fractions volumiques des nanoparticules ϕpour γ=90°, G=5.et le (Cu eau) mousse comme matrice solide du poreuxmoyen. Le nombre moyen de Nusselt est calculé le long du mur de gauche pour différents fractions volumiques des nanoparticulesϕ.

Il est clair que lorsque fractions volumiques des nanoparticules ϕaugmente, Avec une augmentation de la valeur de nombre de Nusselt ,et augmentation de nombre de RA correspondant à une augmentation de la valeur de nombre de Nusselt la convection naturelle est inhibée,Plus la valeur n'est élevéedu fractions volumiques des nanoparticules ϕ, Par rapport aux valeurs élevées de ce dernier. Aucun changement n'est enregistré dans la moyennepour tous les nombres de Rayleigh (de 0 à 150)

La variation est insignifiante. A ces valeurs des fractions volumiques des nanoparticules ϕ (ϕ =0 à 0.2), le transfert de chaleur par mode de conduction est dominé et le fluide est approximativement stationnaire. En l'absence de convection (RT=0), le mode de conduction est le seul mécanisme de transfert de chaleur, qui est présenté par le Ψ=0.

Pour G=5, γ=90° RT =100, ϕ=0.05, ϕ=0.2 nombre de Nusselt respectivement Nu=1,445Nu=1,476nous remarquons que la valeur denombre de Nusseltàaugmenter avec l'augmentation de fractions volumiques des nanoparticules.

Et pour Figure.3.12APlus de fractions volumiques des nanoparticules estélevée, plus la valeur de Ψ. et augmentation de nombre de RA correspondant à une augmentation de la valeur de la fonction de flux la convection naturelle est inhibée.

La variation est insignifiante. A ces valeurs des fractions volumiques des nanoparticulesϕ (ϕ =0 à 0.2), le transfert de chaleur par mode de conduction est dominé et le fluide est approximativement stationnaire. En l'absence de convection (RT=0), le mode de conduction est le seul mécanisme de transfert de chaleur, qui est présenté par le Ψ=0.

Pour G=5, γ=90° RT =200, ϕ =0.05, ϕ =0.2 nombre de Nusselt respectivement Nu=0,30475391Nu=0,4231545 nous remarquons que la valeur denombre de Nusseltà augmenter la valeur de G effets inertiels et augmenter.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle dans une enceinte inclinée remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules.

Les configurations géométriques du modèle physique sont des enceintes carrées, cette dernière est chauffée du côté droit et l'autre chauffée par une source de chaleur. Les deux enceintes chauffées par une température aléatoire basée sur la fonction de Random, et remplies d'un mélange d'eau et des nanoparticules (Cu).

Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de Rayleigh (Ra=100, 500,1000) l'angle d'inclinaison (γ = 0°, 30°, 60°, 90°), différentes fractions volumiques pour le fluide pure (φ =0) et pour les nanoparticules (Cu,φ égale à 0, 0.05, 0.1, 0.2), et paramètre des effets inertiels G (0, 5, 10, 100).

En se basant sur les approximations de Boussinesq, on a développé le modèle mathématique décrivant notre problème. On a mis également au point un modèle numérique basé sur la méthode de volumes finis avec un schéma hybride pour discrétiser les équations gouvernantes. On a validé notre procédure de simulation numérique en comparant nos résultats avec ceux d'autres auteurs.

Les résultats principaux se résument dans :

a) Le transfert de chaleur est influencé par la température et l'angle d'inclinaison dans la cavité
b) L'effet du nanofluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé.
c) l'augmentation de la fraction volumique du nanofluide favorise d'avantage le transfert de chaleur.
d) L'effet du nombre de Rayleigh qui caractérise l'intensité de la convection naturelle a été mis en évidence, le transfert thermique augmente avec le nombre de Rayleigh, et cet accroissement est plus important avec un paramètre inertiel minimal

PERSPECTIVES

Ce travail mérite d'être élargi par des études complémentaires pour mieux comprendre ce phénomène de convection naturelle dans les enceintes, pour cela nous suggérons ce qui suit

- Une étude tridimensionnelle expérimentale et numérique de ce phénomène.
- L'influence de l'instationnarité et le régime d'écoulement.
- La génération de l'entropie dans les enceintes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES

[1] Salhi Hicham ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES, Thèse de Doctorat, université de Batna 2013

[2] Mohamed Comparaison Entre l'Isolation Thermique Extérieure et Intérieure d'une pièce

D'un Habitat Situé Dans Le Site De Ghardaïa, Thèse de Magister, université de Tlemcen 2011

[3] Mohamed Comparaison Entre l'Isolation Thermique Extérieure et Intérieure d'une pièce D'un Habitat Situé Dans Le Site De Ghardaïa, Thèse de Magister, université de Tlemcen 2011

[4]Salhi Hicham ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES, Thèse de Doctorat, université de Batna 2013

[5]Salhi Hicham ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES, Thèse de Doctorat, université de Batna 2013

[6]Salhi Hicham ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES, Thèse de Doctorat, université de Batna 2013

[7]. [8]IBRIR NADIA ETUDE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS UNE CAVITE RECTANGULAIRE CONTENANT DU METAL LIQUIDE UNIVERSITE DE BATNA 2006

[9] G.DE Vahl Davis, laminar natural convection in an enclosed rectangular cavity, vol.l l, pp.l675-1693 Int. J. Heat Mass Transfer,1960Salhi Hicham

[10] G.DE Vahl Davis, C.F. Kettleborough, Natural Convection in an Enclosed Rectangular Cavity, Trans. I. E. Aust., MC1, 43-49, 1968.Salhi Hicham

[11] Mohammad Foruzan Nia, S.A. Gandjalikhan Nassab, Maryam Ghodrat, Masud Behnia Numerical simulation of the transient turbulent natural convection in an inclined rectangular shaped solar air heater University of Kerman, Kerman, IranSCIENCE DIRECT 2021

[12] Anil Kumar Sharma. Velusamy. Balaji. Turbulent natural convection in an enclosure with localized heating from below Heat Transfer and Thermal Power Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras2017

[13] Francis Lénine, Convection naturelle turbulente en cavitée differentiellement chauffée à grands nombres de Rayleigh : caractérisation expérimentale des écoulements et des transferts thermiques, étude numérique du couplage convection-rayonnement,(2006)

[14]Salhi Hicham Salhi Hicham ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES, Thèse de Doctorat, université de Batna 2013

[15] GHADBANE Abdelouahab Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur Université de M'sila 2019

[17] Mohamed Comparaison Entre l'Isolation Thermique Extérieure et Intérieure d'une pièce D'un Habitat Situé Dans Le Site De Ghardaïa, Thèse de Magister, université de Tlemcen2010

[19] [20]GHADBANE Abdelouahab Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur Université de M'sila 2019

[21] HASSINET Liamena SIMULATION NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE LAMINAIRE DANS UNE CAVITE POREUSE UNIVERSITE DE BATNA 2018

[22]GHADBANE Abdelouahab Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur Université de M'sila 2019

[23] ALILAT DJAMEL Contribution to the Study of Heat Transfers in Cavities Containing a Nanofluid and Subjected to an External Magnetic Field UNIVERSITY MEDEA 2021

[24] Nacer KOULAL SIMULATION NUMERIQUE DES ECHANGES THERMIQUES PAR CONVECTION FORCEE DANS UN CANAL PLAN, REMPLI D'UN MILIEU POREUX UNIVERSITE DE TIZI-OUZOU 2016

[26] S.U.S.Choi, enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticules, developments and applications of Non –Newtonian flows.1995

[27] BOUDAOUD Warda Simulation numérique de la convection naturelle dans des cavités remplies des nanofluides université d'Oran 2021

[28] Abdullah, Al-Rasheda, Amin Shahsavarb , Sajad Entezarib , Numerical investigation of non-Newtonian water-CMC/CuO nanofluid flow in an offset strip-fin microchannel heat sink: Thermal performance and thermodynamic considerations 2019

[29] Y.Phanindraa, and S.D KumarB.C. . Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer 1998

[30] Javier.Vallejo, Jose I.Prado b,Luis Lugo Hybrid or mono nanofluids for convective heat transfer applications. A critical review of experimental research 2022

[31]H.E. Patel, S.K. Das, T. Sundararajan, A.S Nair, B. George, and T. Pradeep. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. Applied Physics Letters, 2003

[32] M.A. Belmiloud * et N. Sad Chemloul Simulation numérique du transfert de chaleur mixte dans une cavité carrée: effet de la présence des chicanes Université TIARET 2016

[33] Salhi Hicham ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES, Thèse de Doctorat, université de Batna 2013

[34] Salhi Hicham ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES, Thèse de Doctorat, université de Batna 2013

[35] BOUDAOUD Warda Simulation numérique de la convection naturelle dans des cavités remplies des nanofluides université d'Oran 2021

[36] GHADBANE Abdelouahab Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur Université de M'sila 2019

[37]ALILAT DJAMEL Contribution to the Study of Heat Transfers in Cavities Containing a Nanofluid and Subjected to an External Magnetic Field 2021

[38] Salhi Hicham ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES: NANOFLUIDE 2015

[39]RAM CHANKAR SUBRAMANIAN. Continuity Equation. R. Shankar Subramanian Department of Chemical and Biomolecular Engineering Clarkson University, Potsdam, New York 2019

[40]. ALILAT DJAMEL Contribution to the Study of Heat Transfers in Cavities Containing a Nanofluid and Subjected to an External Magnetic Field 2021

[42] Peng Xu, Boming Yu 2007 Hubei, PR China Developing a new form of permeability and Kozeny–Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry 2007

[43] Stephane Batany. Influence d'un macropore sur l'écoulement et le transport de solutés en milieu poreux : expérimentations sur sol modèle macroporé et simulations numériques. Matériaux. Université Paris-Est, 2016.

[44]. Laurent Davoust. Convection naturelle MHD dans une cavité horizontale ´élancée. Electromagnétisme. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 1996. Français.

[46] Peng Xu, Boming Yu 2007 Hubei, PR China Developing a new form of permeability and Kozeny–Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry

[47] R. Moghadassi1. M Hosseini1, D. Henneke A MODEL OF NANOFLUIDS EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY BASED ON DIMENSIONLESS GROUPS University of Waterloo, Ontario, Canada 2005

[48] Iman Zahmatkesh Effect of nanoparticle shape on the performance of thermal systems utilizing nanofluids: A critical review 2021

[49] R. Moghadassi1. M Hosseini1, D. Henneke A MODEL OF NANOFLUIDS EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY BASED ON DIMENSIONLESS GROUPS University of Waterloo, Ontario, Canada 2005

[50] Iman Zahmatkesh Effect of nanoparticle shape on the performance of thermal systems utilizing nanofluids: A critical review 2021

[51] BELAHMADI Esma Simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée poreuse UNIVERSITÉ CONSTANTINE 2013

[52] ALILAT DJAMEL Contribution to the Study of Heat Transfers in Cavities Containing a Nanofluid and Subjected to an External Magnetic Field 2021