

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations énergétiques et Turbomachines

Par :

Akriche Lamine

Allaoua Hacene

Thème

**Investigation numérique d'un écoulement convectif d'un nanofluide dans une
conduite verticale**

Soutenu le 22/09/2022 devant le jury composé de:

Mr. BOUTALBI N

Président

Mr. ALI AGHA H

Rapporteur

Mr. ADNANI M

Examineur

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, la première personne que nous tenons à remercier est notre encadrent Mr Ali Agha pour sa disponibilité, pour son orientation et sa patience, qu'il trouve ici un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nos vifs remerciements aux membres de jury pour avoir accepté de juger et examiner notre travail.

Enfin un grand merci à nos familles pour leurs soutiens et encouragements durant toutes nos années d'étude.

Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail

A ma maman qui m'a soutenue et encouragé durant toutes mes années d'étude, que dieu te garde pour moi maman

A mon très cher père, pour tous ces sacrifices et l'éducation qui m'a apporté qui m'ont permis de vivre ce jour là

A mes deux cher tentes paternelles Nora et Hayat, qui ont était toujours à mes cotés, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection

A ma très chère sœur, ma source de joie et d'espoir et de motivation

A ma prof en école primaire Mme Merah, qu'elle trouve ici ma reconnaissance

A toute la famille AKRICHE

A.Lamine

Dédicaces :

Pour

Mes Chères parents, source de mon bonheur et de ma fierté, qui m'ont éclairés le chemin en me donnant la main tout au long de mes années d'étude.

« Que Dieu me les gardes »

A mes frères.

A mes sœurs.

A la mémoire de ma Grande Mère.

Mes très chers amis...Ainsi que mes collègues avec qui j'ai partagé les meilleurs Moments.

Enfin Je dédie ce modeste travail à tout ce qui mon aidé à le réaliser.

A. Hacene

Sommaire

| | |
|--|-------------|
| Remerciements..... | i |
| Dédicaces..... | ii |
| Sommaire..... | iv |
| Liste des figures..... | vi |
| Liste des tableaux..... | viii |
| Nomenclature..... | ix |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : Recherche bibliographique..... | 3 |
| I.1. Introduction..... | 3 |
| I.2. Notions sur les transferts de chaleur..... | 3 |
| I.3. Notions sur la convection dans les conduites..... | 4 |
| I.3.1. Types de convection thermique..... | 4 |
| I.3.2. Convection laminaire et turbulente..... | 7 |
| I.3.3. Ecoulement laminaire et turbulent..... | 8 |
| I.3.4. Equations générales de la convection..... | 9 |
| I.3.5. Nombres adimensionnelles..... | 10 |
| I.3.6. Lois de corrélation en convection..... | 11 |
| I.4. Nanofluide..... | 12 |
| I.4.1. Définition du nanofluide..... | 12 |
| I.4.2. Définition de nanoparticules..... | 12 |
| I.4.3. Types de nanoparticules..... | 13 |
| I.4.4. Propriétés thermophysique des nanofluides..... | 13 |

| | |
|--|-----------|
| I.4.5. Domaines d’application des nanofluides..... | 18 |
| I.5. Etat de l’art..... | 20 |
| I.6. Conclusion..... | 23 |
| Chapitre II : Problématique et modélisation mathématique..... | 24 |
| II.1. Introduction..... | 24 |
| II.2. Présentation du problème..... | 24 |
| II.3. Hypothèses simplificatrices..... | 25 |
| II.4. Formulation du problème..... | 26 |
| II.5. Formulation adimensionnelle..... | 27 |
| II.6. Conclusion..... | 29 |
| Chapitre III : Résultats et Discussions..... | 30 |
| III.1. Introduction..... | 30 |
| III.2 Validation du code..... | 30 |
| III.3. Résultats et discussion..... | 31 |
| III.3.1. profil de vitesse adimensionnelle..... | 31 |
| III.3.2. Profil de température adimensionnelle..... | 34 |
| III.3.3. Variation du nombre de Nusselt..... | 36 |
| III.4. Conclusion..... | 37 |
| Conclusion générale..... | 38 |
| Références bibliographiques..... | 40 |
| Annexe..... | 43 |
| Résumé..... | 48 |
| Abstract..... | 48 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Transfert thermique par convection..... | 4 |
| Figure I.2 : Convection naturelle..... | 5 |
| Figure I.3 : Convection forcée..... | 7 |
| Figure I.4 : Convection mixte..... | 7 |
| Figure 1.5 : Types de régime d'écoulement..... | 9 |
| Figure I.6 : Nanoparticules sphériques, nanotubes de carbone..... | 13 |
| Figure I.7 : Schéma du modèle physique Rachidi et Al (2016)..... | 22 |
| Figure II.1 : Géométrie du problème et système de coordonnées..... | 25 |
| Figure III.1 : Variation de profil de vitesse U selon Y pour φ variable dans le cas asymétrique..... | 31 |
| Figure III.2 : Variation de profil de vitesse U selon Y pour φ variable dans le cas symétrique..... | 31 |
| Figure III.3 : Variation de profil de vitesse U selon Y pour Br variable dans le cas asymétrique..... | 32 |
| Figure III.4 : Variation de profil de vitesse U selon Y pour Br variable dans le cas symétrique..... | 33 |
| Figure III.5 : Variation de profil de vitesse U selon Y pour A variable dans le cas symétrique..... | 33 |
| Figure III.6 : Effet de la fraction volumique sur la température adimensionnelle dans le cas asymétrique..... | 34 |
| Figure III.7 : Effet du nombre de Brinkman sur la température adimensionnelle dans le cas asymétrique..... | 34 |
| Figure III.8 : Effet de la fraction volumique sur la température adimensionnelle dans le cas symétrique..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figure (III.9) : effet du nombre de Brinkman sur la température adimensionnelle dans le cas symétrique..... | 35 |
| Figure III.10 : Variation de la température adimensionnelle selon Y pour A variable dans le cas symétrique..... | 36 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau (II.1) : Comparaison des valeurs de η et θ pour un chauffage asymétrique avec $Ri=100$, $\varphi=0.0$ avec celles de Barletta..... | 30 |
| Tableau (III.2) : variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique et du nombre de Brinkman dans le cas asymétrique..... | 36 |
| Tableau (III.3) : variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique et du nombre de Brinkman dans le cas symétrique..... | 37 |

Nomenclature

| Symboles | Définition | Unité |
|------------|--|--------------------|
| P | Pression | Pa |
| T_{moy} | Température moyenne | K |
| T | Température | K |
| V | Vitesse | $m.s^{-1}$ |
| Q | Densité | $W.m^{-2}$ |
| C_p | Chaleur spécifique | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |
| L_c | Longueur caractéristique du système étudié | m |
| V_c | Vitesse critique | $m.s^{-1}$ |
| ΔT | Ecart température caractéristique système étudié | K |
| g | Accélération de pesanteur | $m.s^{-2}$ |
| h | Coefficient de transfert de chaleur | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| C | Concentration massique | $kg.m^{-3}$ |
| u, v | Composant de vecteur vitesse | - |
| x, y | Cordonnées cartésiennes | - |
| T_1, T_2 | Température au niveau des parois | K |
| Re | Nombre de Reynold | - |
| Gr | Nombre de Grashof | - |
| Pr | Nombre de Prandtl | - |
| Nu | Nombre de Nusselt | - |
| K_H | Coefficient de Huggins | $ml.mg^{-1}$ |
| U, V | Composant adimensionnelle du vecteur vitesse | - |
| Ra | Rapport d'amplitude | |
| V | Volume | m^3 |

| | | |
|----|--------------------------|----|
| m | Masse | kg |
| Br | Nombre de Brinkman | - |
| A | Gradient de pression | - |
| Ri | Nombre de Richardson | - |
| Rt | Température de référence | - |

| Symboles grecs | | |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Symboles | Définition | Unité |
| Φ | Fonction de dissipation | |
| φ | Fraction volumique des nanoparticules | - |
| ρ | Masse volumique | $kg.m^{-3}$ |
| β | Coefficient de dilatabilité | K^{-1} |
| λ | Conductivité thermique | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| α | Diffusivité thermique du fluide | $m^2.s^{-1}$ |
| ν | Viscosité cinématique du fluide | $m^2.s^{-1}$ |
| μ | Viscosité dynamique du fluide | $kg.m^{-1}.s^{-1}$ |
| η | Viscosité intrinsèque | |
| ψ | Fonction du courant | - |
| θ | Température adimensionnelle | - |
| ∂ | Dérivée | - |

| indices | | |
|---------------------|-----------------------------------|---|
| f | Fluide | - |
| nf | Nanofluide | - |
| ns | Nanoparticule solide | - |
| Abréviations | | |
| EDO | Equation différentielle ordinaire | - |
| IVP | Problème valeur initiale | - |
| BVP | Problème valeur limite | - |

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine de l'industrie et de la technologie, le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance. Bien qu'il puisse se manifester de diverses manières, notamment par rayonnement, conduction et convection, cette dernière est plus fréquemment utilisée dans des applications très spécifiques comme le refroidissement de processeurs, de composants électroniques, d'éléments rayonnants et d'échangeurs de chaleur.

La conductivité et la capacité thermique des fluides de transfert de chaleur jouent un rôle majeur dans la détermination de l'intensité du transfert de chaleur. Un nouveau fluide a fait surface ces dernières années: le nanofluide. Le terme "nanofluide" désigne un fluide caloporteur tel que l'eau, l'eau glycolée ou l'huile auquel ont été ajoutées des nanoparticules d'oxyde métallique ou non métallique (telles que SiO_2 , Al_2O_3 ou Au) ou des nanoparticules métallique ou non métallique (telles que Al, Cu, Ag ou Au) (formes allotropiques du carbone). Dans des quantités relativement faibles, ces nanofluides pourraient augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas des fluides conventionnels en modifiant de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur.

Les performances de divers échangeurs de chaleur peuvent être améliorées grâce à cette amélioration du transfert de chaleur, ce qui fait des nanofluides une technologie nouvelle et prometteuse dans le domaine des transferts thermiques.

Ainsi dans ce travail ou nous avons considéré une conduite verticale à deux parois différentes de température T_1 et T_2 , l'écoulement est ascendant parcouru par un nanofluide constitué d'un fluide de base (eau) et des nanoparticules d'aluminiums Al.

Le but de ce travail est de présenter une étude numérique d'un écoulement convectif d'un nanofluide dans une conduite verticale.

Cette présente étude est divisée en trois chapitres, organisée de la manière suivante:

Le premier chapitre est divisé en trois parties dont la première est consacrée à l'étude théorique de transfert thermique la convection et les types de convection dans un milieu fluide. La deuxième partie est consacrée pour les nanofluides, leurs principales définitions, les propriétés essentielles liées à leurs utilisations ainsi que leurs applications dans divers domaines d'industrie. Et la troisième partie est consacrée à la synthèse bibliographique.

Dans le deuxième chapitre nous introduisons à la problématique ainsi la partie mathématique du problème étudié, ce chapitre sera consacré à la description du problème physique, la géométrie du problème, ou nous exprimons les équations de conservations et les

conditions aux limites sous forme adimensionnelle. Et aussi nous introduisons les principales grandeurs dynamiques et thermiques.

Dans le dernier chapitre, nous discutons les résultats obtenus. Ensuite, nous examinons l'influence des paramètres de contrôle du problème sur la vitesse, la température et la variation du nombre de Nusselt le long du canal dans les deux cas symétrique et asymétrique.

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1. Introduction :

Ce chapitre a pour but de présenter les connaissances actuelles relatives à la convection dans les conduites, les nanofluides et leurs propriétés et aussi leurs applications éventuelles, tant d'un point de vue théorique qu'expérimental.

On rappelle que lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a donc un échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Le mécanisme de cette transmission de chaleur s'effectue suivant trois modes : conduction, convection et rayonnement.

On peut définir la convection comme la réunion de deux modes de transfert de chaleur : la conduction qui s'effectue à l'échelle microscopique et l'advection qui est de nature macroscopique.

I.2. Notions sur les transferts de chaleur :

I.2.1 Définition du transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur est aussi appelé transfert thermique, il est défini comme transfert d'énergie thermique d'une source à une autre, un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid. C'est un transfert de chaleur irréversible [1].

Le flux de chaleur dont la densité locale est notée ϕ est une grandeur vectorielle, ce qui signifie que le flux de chaleur est caractérisé par son intensité et par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance ($\frac{W}{m^2}$).

Il existe alors trois modes de transfert thermique : par convection, par rayonnement et par conduction.

I.2.2 Modes de transfert thermique :

La convection, la conduction et le rayonnement thermique sont trois modes de transmission d'énergie thermique. Lorsque la chaleur est transportée d'un corps à l'autre par contact, elle est appelée conduction. Lorsqu'un corps se déplace, la chaleur qu'il contient se déplace avec lui. Ceci est appelé convection, ce mécanisme de transmission implique un mouvement de matière dans le milieu, le matériau est ensuite advecté par au moins un fluide.

Enfin le terme rayonnement fait référence à l'ensemble de tous les corps qui produisent de la lumière et ils sont chauffés par elle. C'est l'exemple des rayons de soleil [1].

I.3. Notions sur La convection dans les conduites :

La convection est un type de transfert de chaleur qui implique la conduction, de l'accumulation d'énergie et du mouvement du milieu. la convection est le processus le plus important pour transférer de l'énergie d'une surface solide à un liquide ou à un gaz. Plusieurs phases sont effectuées lors du transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure.

Pour commencer, la chaleur est transférée de la surface aux particules fluides proches par conduction.

L'énergie ainsi transmise va élever la température et l'énergie interne de ces particules. Ensuite, dans un environnement à basse température, ces particules se mélangent à d'autres particules et transmettent une partie de leur énergie [2].

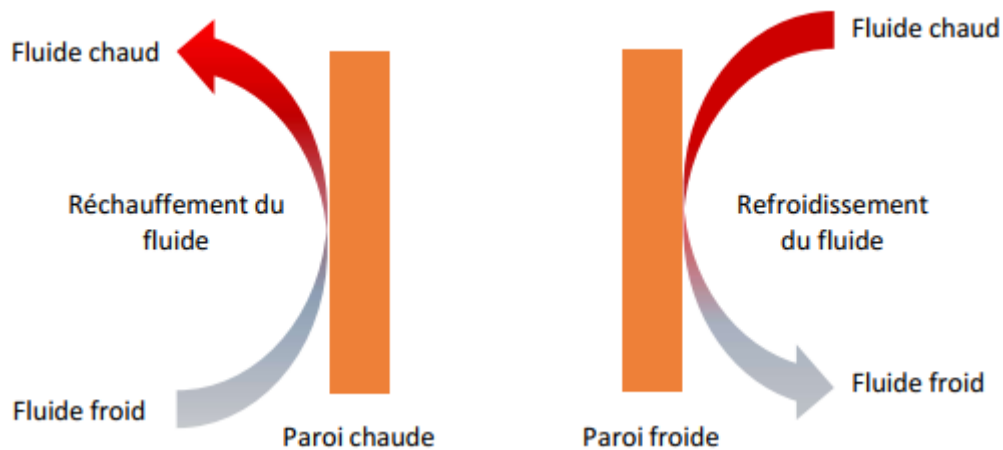


Figure I.1 : transfert thermique par convection [3].

I.3.1. Types de convection thermique :

Le transfert de chaleur par convection est caractérisé selon le mode d'écoulement du fluide.

La convection naturelle ou libre fait référence aux différences de densité produite par les gradients de température. par contre la convection forcée est le processus du mouvement d'un fluide lorsque il est provoqué par une action externe comme la pompe ou un ventilateur.

Si les deux modes existent simultanément, sans que l'un soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte.

I.3.1.1. Convection thermique naturelle :

La convection naturelle, souvent appelée convection libre, est un mécanisme ou une forme de transmission de masse et de chaleur, dans lequel le mouvement du fluide est provoqué uniquement par des différences de densité causées par des gradients de température dans le fluide, plutôt que par une source externe comme une pompe, ventilateur, dispositif d'aspiration, etc.

La convection naturelle se produit lorsqu'un fluide entoure une source de chaleur et absorbe la chaleur. [4]

Le nombre de Grashof caractérise la convection naturelle de telle sorte que Grashof est plus élevé, alors la convection naturelle est d'effet plus important.

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

$$\text{Si } Gr \approx 0 \left\{ \begin{array}{l} \beta \approx 0 \\ (T_s - T_\infty) \approx 0 \\ V \rightarrow \text{grand} \end{array} \right\} \text{ pas de mouvement induit par } \Delta T$$

Dans les cas simple la corrélation prend la forme : $\overline{Nu}_{Lc} = C.Ra_{Lc}^n$ mais d'une façon générale on peut trouver des fonctions plus sophistiquées : [5]

$$Nu_{Lc} = f(Gr_{Lc}, Pr) \text{ Et/ou } \overline{Nu} = g(Gr_{Lc}, Pr).$$



Figure I.2 : convection naturelle [2]

I.3.1.2. Convection thermique forcée :

Ce type de convection se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une force extérieure sans rapport avec la différence de température.

Par exemple : une pompe ou un ventilateur ou un agitateur ou même le vent.

La poussée d'Archimède dans ce type de convection est négligeable devant les forces servant à mettre le fluide en mouvement [2].

L'application du théorème de Buckingham à un problème de convection forcée, pour un écoulement établi en vitesse et en température avec un fluide dont les propriétés thermomécaniques sont constantes, fait apparaître trois groupements ou nombres sans dimension en relation sous la forme suivante :

$$Nu = C.Re^a .Pr^b \quad (I.2)$$

Avec :

$$Re = \frac{U_{Lc}}{\nu} \text{ Le nombre de Reynolds.}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \text{ Le nombre de Prandtl}$$

Cette somme représente une fonction (f) nommée corrélation car elle ne peut être, le plus souvent, précisée que par l'expérience. Dans ce cas, la forme prise par la corrélation peut être différente de l'expression simple proposée plus haut. De façon générale toutefois, la littérature scientifique fournit des fonctions selon les différentes conditions étudiées : [5]

$$Nu_{Lc} = f(Re_{Lc}, Pr) \text{ Et/ou } \overline{Nu}_{Lc} = g(Re_{Lc}, Pr).$$

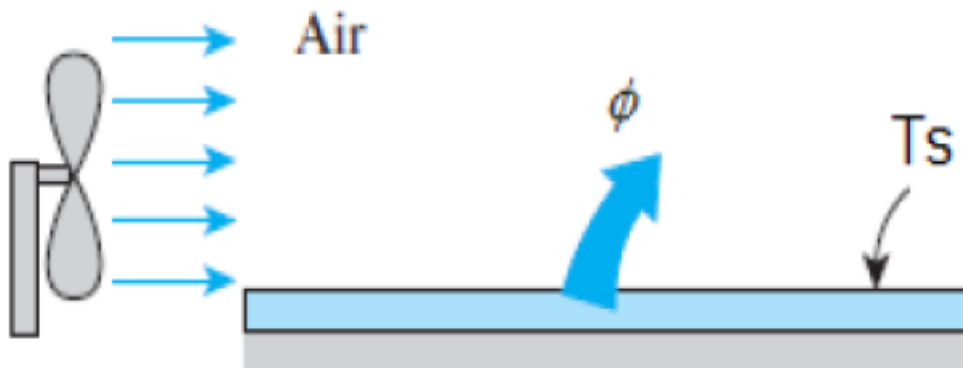


Figure I.3 : convection forcée [2]

I.3.1.3. Convection thermique mixte :

La combinaison entre les des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) est connue sous le nom de convection mixte, quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur [4].

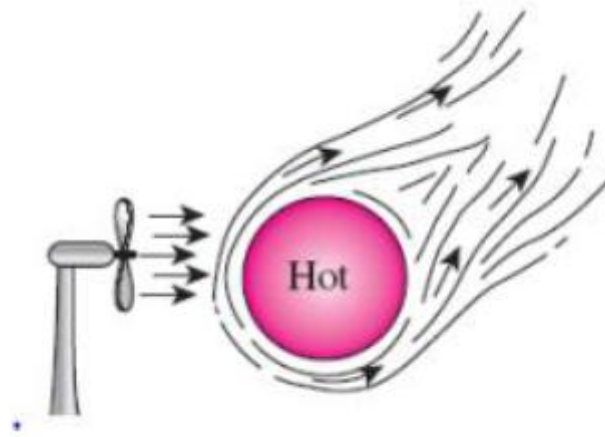


Figure I.4 : convection mixte [6]

Alors pour un fluide en mouvement dans un champ de température, on dit que la convection est : [6]

Forcée dominante si $\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$

Naturelle dominante si $\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$

Mixte si $\frac{Gr}{Re^2} \approx 1$

I.3.2. Convection laminaire et turbulente :

L'étude de la convection thermique exige une étude préalable des règles d'écoulement du fluide. Dans chaque cas, il y a deux types d'écoulement à considérer, les filets gazeux s'écoulent en parallèle sans se mélanger dans un écoulement laminaire, et on a aussi un écoulement turbulent dans lequel, en chaque point, des variations de vitesse aléatoires à macro échelle se superpose à la vitesse globale. A chaque fois que la loi d'écoulement est connue, l'équation de transfert de chaleur au sein d'un fluide peut être écrite jusqu'à la paroi. Cependant, la solution à cette équation n'est possible que dans des instances simples physiquement spécifiées comme la convection le long d'un plan ou d'un obstacle profilé, ou la convection dans une conduite circulaire en régime dynamique établi. En revanche, si le régime d'écoulement n'est pas défini l'équation de chaleur ne peut pas être résolue mathématiquement en raison de règles de vitesse excessivement complexes. En conséquence on nous en somme réduit à faire des simplifications assez importantes afin de répondre aux ordres de grandeur des échanges thermiques [7].

I.3.3. Écoulement laminaire et turbulent :

Les filets fluides ne se mélangent pas dans un écoulement laminaire pur, et seul le mouvement moléculaire est utilisé pour transférer la matière d'une couche à une autre. En conséquence, le nombre de Prandtl (C_p/l) est proche de l'unité pour de nombreux gaz. Il peut aller de quelques unités dans le cas des liquides non métalliques, et à quelques centaines d'unités pour les liquides visqueux, le nombre de Prandtl pour les liquides métalliques varie entre 0,1 à 0,01.

Les filets fluides perdent leur caractère unique et se mélangent progressivement dans un écoulement turbulent en raison des tourbillons transportant des quantités macroscopiques de matière [8].

Le mouvement des fluides est permanent ou variée, le mouvement permanent est un mouvement dans lequel les paramètres du fluide tels que la vitesse V , pression P et masse volumique ρ restent constants. La principale condition du mouvement permanent est que le débit masse reste constant comme le décrit l'équation de continuité : $V.S.\rho = cte$.

Comme l'a établi Osborne Reynolds, Lorsqu'un fluide s'écoule en régime permanent dans une conduite, l'écoulement peut prendre différentes formes. Selon la vitesse V on aura deux régimes différents, si $V < V_c$ le régime est laminaire et si $V > V_c$ le régime est turbulent. Tel que V_c est la vitesse critique.

En réalité, le régime d'écoulement est influencé non seulement par la vitesse, mais aussi par la nature du fluide qui est caractérisé par sa viscosité et du diamètre du tube. La nature de l'écoulement ne peut pas être déterminée par une seule de ces trois propriétés, ces trois caractéristiques sont groupé par Reynolds dans le nombre Re , le nombre de Reynolds est

$$Re = V \cdot \frac{l}{\nu}$$

C'est un nombre sans dimension, et qui caractérise l'écoulement. Il n'est pas possible d'utiliser une seule valeur précise pour que R distingue les deux régimes laminaire et turbulent. On admet toutefois que si $Re < 2000$ c'est un régime laminaire, et $Re > 2000$ si c'est un régime turbulent.

Le nombre de Prandtl, le nombre de Peclet, le nombre de Nusselt Nu , et le nombre de Stanton caractérisent aussi l'écoulement. Pour la convection forcée les nombres de Nusselt et de Stanton sont des coefficients interchangeables de transfert de chaleur sans dimension [9].

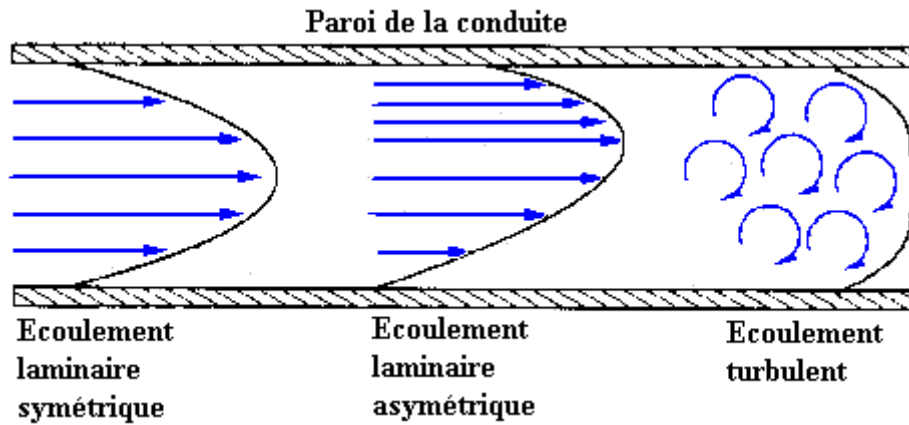


Figure I.5 : types de régime d'écoulement [10]

I.3.4. Equations générales de la convection :

L'analyse de la convection thermique se fonde sur l'application des trois lois fondamentales de la physique générale : conservation de la masse, de la quantité de mouvement, et de l'énergie. L'objectif visé étant la détermination de la distribution de la température, de la concentration et des vitesses dans le système considéré.

Dans le but d'établir la formulation du phénomène de la convection nous considérons les équations classiques de Navier-Stokes écrites sous forme vectorielle :

➤ Equation de conservation de masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (\text{I.3})$$

➤ Equation de conservation de quantité de mouvement :

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{I.4})$$

➤ Equation de conservation d'énergie :

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \mu \phi \quad (\text{I.5})$$

En deux dimensions, L'opérateur ∇ est un vecteur est défini comme suit :

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} \quad (\text{I.6})$$

Et :

$$\frac{D}{Dt} = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial t} \quad (\text{I.7})$$

Φ est la fonction de la dissipation définie en deux dimensions comme suit [11] :

$$\phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (\text{I.8})$$

I.3.5. Nombres adimensionnels :

I.3.5.1. Nombre de Reynolds : Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension quantifie l'importance de forces inertielles par rapport aux forces visqueuses, c'est le nombre qui caractérise le régime d'écoulement en convection forcé. Il est donné par : [12]

$$\text{Re} = (\text{forces d'inerties}) / (\text{forces visqueuses}) = \frac{V.Lc}{\nu} = \frac{\rho.V.Lc}{\mu} \quad (\text{I.9})$$

Où :

V est la vitesse caractéristique de l'écoulement ($m.s^{-1}$).

Lc est une longueur caractéristique du système étudié (m).

ν est la viscosité cinématique du fluide ($\frac{m^2}{s}$).

μ est la viscosité dynamique du fluide ($kg.m^{-1}.s^{-1}$).

ρ est la masse volumique du fluide ($kg.m^{-3}$).

I.3.5.2. Nombre de Grashof :

Le nombre de Grashof est nombre non dimensionnel mesure l'importance des forces d'Archimède par rapport aux forces visqueuses, ce nombre caractérise le régime d'écoulement en convection naturelle. Il est donné par : [12]

$$\text{Gr} = (\text{forces d'Archimède}) / (\text{forces visqueuses}) = \frac{g.\beta.\Delta T.Lc}{\nu^2} \quad (\text{I.10})$$

Où :

g est l'accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$).

β est le coefficient de dilatation thermique (K^{-1}).

ΔT est un écart de température caractéristique du système étudié (K).

Lc est une longueur caractéristique du système étudié (m).

ν est la viscosité cinématique du fluide ($\frac{m^2}{s}$).

I.3.5.3. Nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl, qui quantifie l'importance de la diffusivité de quantité de mouvement par rapport à la diffusivité thermique, caractérise le comportement d'un fluide en matière d'échange thermique par convection. Il est donné par : [12]

$$\text{Pr} = (\text{diffusivité de quantité de mouvement}) / (\text{diffusivité thermique}) = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{I.11})$$

Où :

$$\alpha \text{ est la diffusivité thermique du fluide m}^2/\text{s définie par : } \alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}. \quad (\text{I.12})$$

λ est la conductivité thermique du fluide ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

C_p est la chaleur spécifique du fluide ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

ν est la viscosité cinématique du fluide ($\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$).

ρ est la masse volumique du fluide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

I.3.5.4. Nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt quantifie l'importance du flux thermique par convection par rapport au flux thermique par conduction. Il est donné par :

$$\text{Nu} = (\text{flux convectif}) / (\text{flux conductif}) = \frac{h \cdot L_c}{\lambda} \quad (\text{I.13})$$

On peut également définir un nombre de Nusselt local basé sur le coefficient d'échange local associé au flux de chaleur échangé localement entre une paroi et le fluide, ou bien un nombre de Nusselt moyen basé sur le coefficient d'échange moyen associé au flux de chaleur global sur toute la surface de la paroi. [12]

I.3.6. Lois de corrélation en convection :

Le transfert de chaleur par convection dépend du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et de la nature du fluide.

On cherchera à établir des corrélations qui relient le nombre de Nusselt aux nombres de Reynolds et de Prandtl : $\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$, dans le cas de la convection forcée.

On cherchera à établir des corrélations qui relient le nombre de Nusselt aux nombres de Grashof et de Prandtl $\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr})$, dans le cas de la convection naturelle [12].

I.4. Nanofluide :

Les particules de taille d'un nanomètre sont désormais possible grâce aux récents développements de la nanotechnologie. Cette avancée technologique a donnée naissance à l'idée de suspendre ces particules dans un liquide de base pour améliorer la conductivité thermique. Une suspension de nanoparticules dans un fluide de base est appelée "nanofluide".

Choi a proposé ce terme en 1995 au laboratoire national d'Argonne. L'eau, l'huile ou l'éthylène glycol sont couramment utilisés comme fluide de base.

Les nanoparticules sont des particules microscopiques ayant un diamètre de quelques nanomètres ou moins (50 nm) [13].

I.4.1. Définition des nanofluides :

Les nanofluide sont des dispersions de particules de taille nanométrique (d'un diamètre inférieur à 100 nanomètres), nommées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'augmenter certaines propriétés, depuis la découverte de leurs propriétés thermiques uniques, ce type de solution a suscité beaucoup d'intérêt.

La conductivité thermique est l'un des premiers critères à prendre en compte pour améliorer le potentiel d'échange de chaleur.

Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. En effet, les fluides de base utilisés dans les applications de refroidissement et de chauffage ont une conductivité thermique très faible, limitant leur capacité à transporter la chaleur.

Le concept est de mélanger les nanoparticules à conductivité élevée avec des liquides de base pour améliorer la performance thermique en augmentant la conductivité thermique du mélange [14].

I.4.2. Définition des nanoparticules :

Une nanoparticule est un élément constitué de quelques centaines à quelques milliers d'atomes qui a au moins une dimension nanométrique (1 à 100 nanomètres). Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental, elles sont très étudiées de nos jours. De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, tandis que d'autres physiciens les étudient pour apprendre davantage sur leurs propriétés. Et les biologistes les utilisent en tant que marqueurs cellulaires.

Les liquides de base les plus fréquents utilisés dans la fabrication de nanofluides, sont couramment utilisés dans des applications de transfert thermique comprennent l'eau, l'éthylène glycol, l'huile de moteur et d'autres. Les nanoparticules peuvent être à base de métaux, d'oxydes, de carbures, de nitrures ou de carbone [14].

I.4.3. Types de nanoparticules :

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) est un domaine de recherche en évolution constante, et seules les nanoparticules les plus souvent utilisées dans les applications de transfert thermique sont brièvement abordées ici.

Les nanoparticules peuvent être classées en deux grandes catégories en fonction de leur caractéristique physique.

- Les nanoparticules sphériques, pour lesquelles une variété de matériaux peut être utilisée pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent être constituées de métaux (aluminium Al, cuivre Cu, fer Fe, argent TiO_2) ou d'oxydes (oxyde d'aluminium Al_2O_3 , oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO_2).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO_2 , nanotube de silicium) [14].

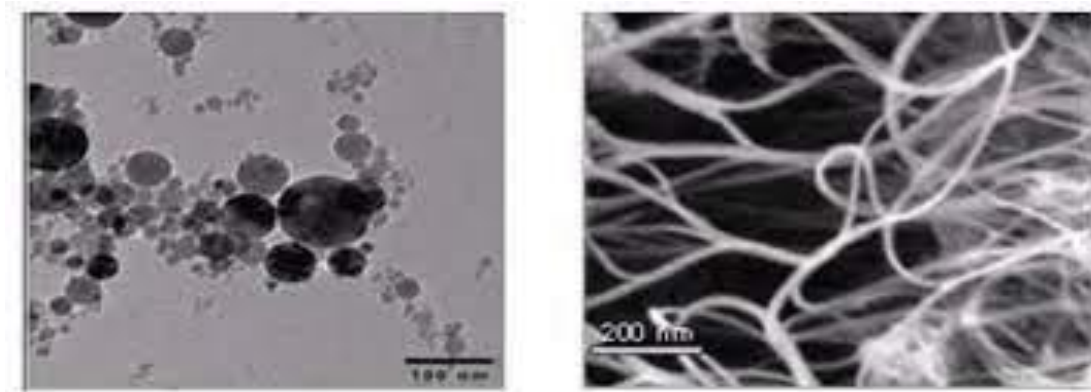


Figure I.6 : nanoparticules sphérique, nanotubes de carbone [15].

I.4.4. Propriétés thermophysiques des nanofluides :

L'ajout de nanoparticules modifie les propriétés thermophysiques des solutions (masse volumique, chaleur spécifique, dilatation thermique, viscosité dynamique et conductivité thermique). De nombreuses caractéristiques de ces nanoparticules peuvent avoir un impact significatif sur les valeurs des paramètres thermophysiques du nanofluide obtenu (nature, taille, fraction volumique des nanoparticules, conductivité du fluide de base et de celle des nanoparticules, température ambiante).

I.4.4.1. Masse volumique :

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que l'on suppose parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide de base) en fonction de la fraction volumique (φ) à une température T donnée.

La masse volumique de ce mélange est définie comme suite :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{mf + ms}{Vs + Vf} \quad (\text{I.14})$$

La fraction volumique des nanoparticules (φ) est le volume solide sur le volume total (fluide + solide).

$$\varphi = \frac{Vs}{Vs + Vf} \quad (\text{I.15})$$

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide : [13]

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{I.16})$$

Avec :

ρ_{nf} : La masse volumique de nanofluide.

ρ_f : La masse volumique de fluide de base.

ρ_s : La masse volumique de nanoparticules solides.

I.4.4.2. Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $Cp = \frac{dQ}{mdT}$.

La chaleur spécifique correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de substance de 1 K pendant la transition en question. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on a les des deux relations suivantes :

Xuan et roetzel on utilisés : [13]

$$(\rho Cp)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho Cp)_f + \varphi(\rho Cp)_s \quad (\text{I.17})$$

Pak et cho on utilisés: [13]

$$(Cp)_{nf} = (1 - \varphi)(Cp)_f + \varphi(Cp)_s \quad (\text{I.18})$$

Avec :

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

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

$(Cp)_s$: Chaleurs spécifique des nanoparticules.

I.4.4.3. Coefficient d'expansion thermique :

La variation de la masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique :

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \text{ appelé également coefficient de dilatabilité [16].}$$

Pour calculer la valeur de ce coefficient pour les nanofluides de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides, par analogie avec la relation (I.16)

On déduit l'expression suivante :

$$\rho \beta_{nf} = (1 - \varphi) \rho \beta_f + \varphi \rho \beta_s \quad (\text{I.19})$$

Avec :

β_f : Coefficient de dilatabilité du fluide.

β_s : Coefficient de dilatabilité de solide.

Kim et al [16] ont émis l'hypothèse que le coefficient de dilatation thermique d'un fluide est plus beaucoup élevé que celui des nanoparticules solides. Cela simplifie l'équation (6) sous la forme suivante :

$$\rho \beta_{nf} = (1 - \varphi) \rho \beta_f \quad (\text{I.20})$$

I.4.4.4. Conductivité thermique :

En absence de données expérimentales et de fondements théoriques pour déterminer la conductivité thermique d'un nanofluide, les relations précédemment utilisées pour calculer la conductivité thermique d'une suspension de particules plus grandes de l'ordre du micromètre ou du millimètre dans un fluide ont été adoptées pour calculer la conductivité thermique des nanofluides [13].

I.4.4.4.1. Modèle de Maxwell :

Il a supposé que les particules sont séparées d'une distance suffisante ce qui entraîne l'absence d'interaction mutuelle entre elles [17].

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s + 2\lambda_f - 2\varphi(\lambda_f - \lambda_s)}{\lambda_s + 2\lambda_f + \varphi(\lambda_f - \lambda_s)} \quad (\text{I.21})$$

Avec :

λ_{nf} : La conductivité thermique du nanofluide.

λ_f : La conductivité thermique du fluide de base.

λ_s : La conductivité thermique de la particule solide.

I.4.4.4.2. Modèle de Hamilton :

Est une extension du modèle de Maxwell. Il concerne les particules de forme quelconque défini comme suit : [18]

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s + (n-1)\lambda_f + (n-1)(\lambda_f - \lambda_s)\varphi}{\lambda_s + (n-1)\lambda_f + \varphi(\lambda_f - \lambda_s)} \quad (\text{I.22})$$

Avec :

$\psi = \frac{3}{n}$: Facteur de forme empirique (n = 3 pour les particules sphériques et n = 6 pour les particules cylindriques).

I.4.4.4.3. Modèle de Yu et Choi :

Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. [19]

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s + 2\lambda_s - 2(1-\beta)^3(\lambda_f - \lambda_s)\varphi}{\lambda_s + 2\lambda_f + (1+\beta)^3(\lambda_f - \lambda_s)\varphi} \quad (\text{I.23})$$

Avec :

β : Rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules

I.4.4.5. Viscosité dynamique :

La viscosité d'un fluide détermine sa capacité d'écoulement. Toute application nécessitant le transport de fluides requiert ses connaissances. L'ajout de nanoparticules peut augmenter et améliorer la conductivité thermique d'un nanofluide, mais il peut également entraîner une augmentation négative de la viscosité dynamique. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'estimer ou de mesurer la viscosité dynamique des nanofluides, ainsi que de quantifier l'importance des principaux paramètres d'influence. Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions. Dans cette section, nous allons examiner les modèles les plus couramment utilisés dans le cas des nanofluides [14].

I.4.4.5.1. Modèle d'Einstein :

Einstein a calculé la quantité d'énergie dissipée autour d'une particule unique dans un fluide en rapportant son énergie au travail effectué pour propulser la particule en avant par rapport au fluide. Sur la base de ce résultat, il a établi l'affirmation décrivant une dépendance linéaire de la viscosité des suspensions dans un fluide avec la concentration.

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) \quad (I.24)$$

La formule d'Einstein a été testée en laboratoire et s'est avérée satisfaisante pour les suspensions de particules sphériques très diluées.

Typique pour des concentrations volumiques inférieures à 1 %. Il est important de noter que ce modèle ignore les effets de la taille des particules et des interactions interarticulaires [20].

I.4.4.5.2. Modèle de Brinkman :

La formule de Brinkman (1952) complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4%

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (I.25)$$

Il convient de noter que cette relation décrit une relation non linéaire entre la viscosité dynamique et la concentration volumique, mais elle ignore les collisions entre les particules. [21]

I.4.4.5.3. Modèle de Batchelor :

En effet, le taux d'évaporation autour de chaque particule est influencé par la présence d'autres particules à proximité et par les collisions entre particules. Par conséquent, dans le modèle de Batchelor (1976), cela se traduit par la prise en compte d'un terme ω^2 [22].

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + \eta\phi + K_H\phi^2) \quad (I.26)$$

Avec :

η : La viscosité intrinsèque

K_H : Le coefficient de Huggins

La valeur de η et K_H de 2.5 et 6.5 respectivement pour des particules sphériques.

I.4.4.5.4. Modèle Maiga et al :

D'autres relations ont été proposées dans la littérature limitée à des applications bien précises. Maiga et al. À partir de résultats de mesurés ont proposé la corrélation

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (I.27)$$

En comparant cette corrélation aux modèles d'Einstein et de Brinkman, on découvre que ces deux derniers sous-estiment les valeurs expérimentales de la viscosité du nanofluide [23].

I.4.4.5.5. Modèle Pack et Cho :

Pack et Cho ont proposé une corrélation pour les nanoparticules Al_2O_3 dispersés dans l'eau donnée par : [24]

$$\mu_{nf} = \mu_f (533.9\phi^2 + 39.11\phi + 1) \quad (I.28)$$

I.4.5. Domaine d'application des nanofluides :

Les nanofluides peuvent être utilisés pour améliorer la transmission de la chaleur et l'efficacité énergétique dans une variété de systèmes thermiques. Plusieurs exemples d'applications seront présentés dans cette partie, notamment dans les domaines du transport, de la micro-électronique, de la défense, de l'énergie nucléaire, de l'espace et de la biomédecine.

I.4.5.1 Refroidissement des systèmes thermiques :

Dans les moteurs de véhicules, un mélange d'éthylène-glycol et d'eau est utilisé comme liquide de refroidissement. Le taux de refroidissement de ces liquides est amélioré lorsque des nanoparticules sont ajoutées. Cette question est étudiée par un certain nombre de groupes de recherche, tzung et all. Des nanoparticules de CuO et d' Al_2O_3 ont été dispersées dans l'huile de refroidissement de la transmission. Dans une autre application, Zhang et Al. Ont présenté une étude qui utilisait des nanoparticules pour réduire la lubrification (graissage) et améliorer les propriétés tribologiques et la résistance à l'usure en réduisant le frottement entre les éléments mécaniques mobiles [25].

I.4.5.2. Refroidissement des systèmes électroniques :

Les nanofluides ont été utilisés comme fluides de refroidissement dans les circuits intégrés. Plusieurs études ont été menées à cet égard. Tsai et Al. Ont utilisé un nanofluide à base de glace pour refroidir une unité centrale de traitement dans un micro-ordinateur. Ma et Al. Ont étudié l'effet du nanofluide sur la capacité d'un caloduc à transporter la chaleur. Ils ont découvert qu'à une puissance d'entrée de 80 W et seulement pour une concentration volumétrique de 1%, la différence de température entre le vaporisateur et le condensateur est de 16,6°C [25].

I.4.5.3. Refroidissement des systèmes militaires :

Les exemples des applications militaires comprennent le refroidissement de l'électronique de haute puissance et les armes à énergie dirigée. Ces systèmes nécessitent des flux thermiques élevés ($q > 500$ à 1000 W/cm²), et les nanofluides ont démontré leur efficacité pour refroidir ces systèmes, ainsi que d'autres systèmes militaires tels que les véhicules militaires, les sous-marins et les diodes laser de forte puissance [25].

I.4.5.4. Refroidissement des systèmes spatiaux :

Pour les applications dans l'espace, You et AL. Et Vassallo et Al. Ont mené des recherches pour démontrer que la présence de nanoparticules dans les fluides de refroidissement électroniques joue un rôle important dans les applications spatiales à haute densité de puissance [25].

I.4.5.5. Refroidissement des systèmes nucléaire :

Le Massachusetts Institute de la technologie a créé un centre multidisciplinaire consacré uniquement aux nouvelles nanotechnologies (nanofluides) dans le secteur de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'influence potentielle de l'utilisation de nanofluides sur la sécurité neutronique et les performances économiques du système nucléaire [25].

I.4.5.6. Biomédecine :

Les nanofluides et les nanoparticules ont un large éventail d'applications biomédicales. Par exemple, les nanoparticules de fer ont été utilisées comme transporteur de médicaments pour éviter certains effets secondaires associés aux méthodes traditionnelles de traitement du cancer. De plus, en générant un refroidissement efficace autour de la région chirurgicale, une chirurgie plus sûre peut être réalisée. Jordan et Al. Ont mené des recherches pour savoir si les nanofluides pouvaient être utilisés pour générer une température plus élevée autour des tumeurs afin de tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines situées à proximité [25].

I.4.5.7. Autres applications :

Il existe de nombreux cas où l'augmentation de l'efficacité du transfert thermique peut être liée à la qualité, à la quantité et au coût d'un produit ou d'un processus. Les nanofluides, par exemple, sont utilisés dans l'industrie des énergies renouvelables pour améliorer la transmission de chaleur des panneaux solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité énergétique. Les liquides refroidis par nanofluides pourraient aider la majorité des industries de transformation, notamment les matériaux, la fabrication de produits chimiques, l'alimentation, les boissons, le pétrole et le gaz [25].

I.5. Etat de l'art :

Le transport de la chaleur par convection dans les nanofluides est un sujet d'actualité dans le domaine des sciences et de l'ingénierie, De nombreux chercheurs et ingénieurs ont mené des études théoriques et expérimentales sur le sujet depuis sa découverte. Nous présentons ici un aperçu bibliographique de quelques études antérieures sur la convection thermique dans les nanofluides.

Depuis la fin des années cinquante l'effet de la convection naturelle sur la convection forcée a été pris en compte dans les conduites. À des faibles nombres de Reynolds, **Hanratty et al** [26] expérimentent la convection mixte dans une conduite verticale. Une enveloppe en plastique encerclé autour du tube a été utilisée pour réaliser les conditions aux limites (Imposition du flux de chaleur sur la paroi). Ce travail examine deux cas : un écoulement ascendant chauffé dans lequel ils ont vu que l'écoulement avant la paroi s'accélère, alors qu'il est ralenti au centre de la conduite, et un écoulement descendant chauffé, dans ce cas l'écoulement près de la paroi est retardé, alors qu'il est augmenté au centre de la conduite. L'écoulement devient en régime transitoire lorsque le nombre de Reynolds égale à 10 et que la différence de température entre la paroi et la zone d'entrée égale à 10°C.

Maiga [27] a utilisé la méthode de contrôle de volume pour étudier le comportement hydrodynamique et thermique d'un écoulement à convection forcée dans un tube uniformément chauffé dans les régimes laminaire et turbulent. Les résultats obtenus pour deux nanofluides (Ethylène glycol- Al_2O_3 et eau- Al_2O_3) démontrent clairement que l'ajout de nanoparticules améliore le transfert thermique pariétal. Cependant, la présence de nanoparticules a provoqué une augmentation du frottement pariétal, selon l'auteur. Dans le cas de l'écrasement laminaire.

Buongiorno [28] a développé une analyse théorique (numérique) des phénomènes de transport convectif dans les nanofluides. Il a examiné les mécanismes comme l'inertie, la diffusion brownienne, la thermophorèse et la diffusiphorèse qui peuvent produire une vitesse relative entre les nanoparticules et le fluide de base. Il a ensuite examiné la signification de chacun de ces mécanismes, pour conclure que seules la diffusion brownienne et la thermophorèse peuvent provoquer une vitesse de glissement entre le fluide de base et les nanoparticules, un modèle analytique général des transferts de quantité de mouvement, de chaleur et de masse pour les nanofluides en circulation a été établi en utilisant ces deux mécanismes. En outre, par rapport aux effets de la conduction ou de la convection, l'influence de la dispersion thermique des particules sur l'échange de chaleur est insignifiante, selon une analyse de l'ordre de grandeur des termes de l'équation énergétique.

Behzadmehe et Coll. [29], Ils présentent une étude numérique de la convection forcée d'un nanofluide (eau/Cu) dans un tube circulaire uniformément chauffé, ils ont étudié l'effet de l'ajout de nanoparticules sur le comportement thermique et hydrodynamique de l'évaporation en utilisant deux approches (modèles monophasique et diphasique). Ils ont découvert que lorsque les résultats des deux méthodes étaient comparés, la stratégie de mélange décrivait mieux le comportement hydraulique et thermique du nanofluide. Il est également intéressant de noter que les auteurs ont développé le modèle de mélange en utilisant des corrélations empiriques acceptables pour les mélanges gaz-solides.

L'étude numérique de la convection forcée d'un écoulement laminaire d'un nanofluide dans un canal à différents angles d'inclinaison du champ magnétique a été réalisée par **selimfendigil et ztop** [30]. La température de la paroi du canal inférieur est maintenue constante, tandis que les autres parois du canal sont considérées adiabatiques. Les équations gouvernantes ont été résolues en utilisant l'approche des éléments finis. L'effet des nombres de Reynolds (entre 20 et 200), des nombres de Hartmann (entre 0 et 50), et de la fraction volumique des nanoparticules (entre 0 et 0,04) sur le flux et le transfert de chaleur a été étudié pour différents angles d'orientation du champ magnétique. Ils ont découvert que le nombre de Nusselt moyen augmente lorsque le nombre de Reynolds augmente, et que cet effet est plus prononcé pour des valeurs d'angle d'agrandissement plus élevées. Lorsque le nombre de Hartmann augmente dans un champ magnétique incliné ou vertical, la zone de recirculation dans le canal est supprimée, ce qui entraîne une amélioration du transfert de chaleur. Pour un champ magnétique orienté

horizontalement, le rapport de la génération totale d'entropie augmente lorsque les valeurs du nombre de Reynolds, de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Hartmann augmentent.

Rashidi et al. [31] ont étudié la transmission numérique de la chaleur par convection mixte d'un nanofluide dans un canal vertical à parois sinusoïdales sous l'influence d'un champ magnétique. Le transport de chaleur et les propriétés hydrodynamiques ont été étudiés. Cette recherche a été effectuée pour différents nombres de Reynolds ($500 \leq Re \leq 1000$), Grashof $5.10^4 \leq Gr \leq 10^6$ et Hartmann (0,5 et 10), ainsi que pour trois amplitudes sinusoïdales (0,1 et 0,2 et 0,3). L'évaporation est supposée être bidimensionnelle, laminée, stable et incompressible. De plus, les propriétés thermophysiques du nanofluide sont supposées être constantes. Ils ont découvert que l'augmentation du nombre de moyennes de Nusselt augmente le nombre de Grashof pour différents fraction volumique de nanoparticules. En outre, les nombres de Nusselt et de Poiseuille augmentent lorsque les nombres de Hartmann et de Reynolds augmentent. [29]

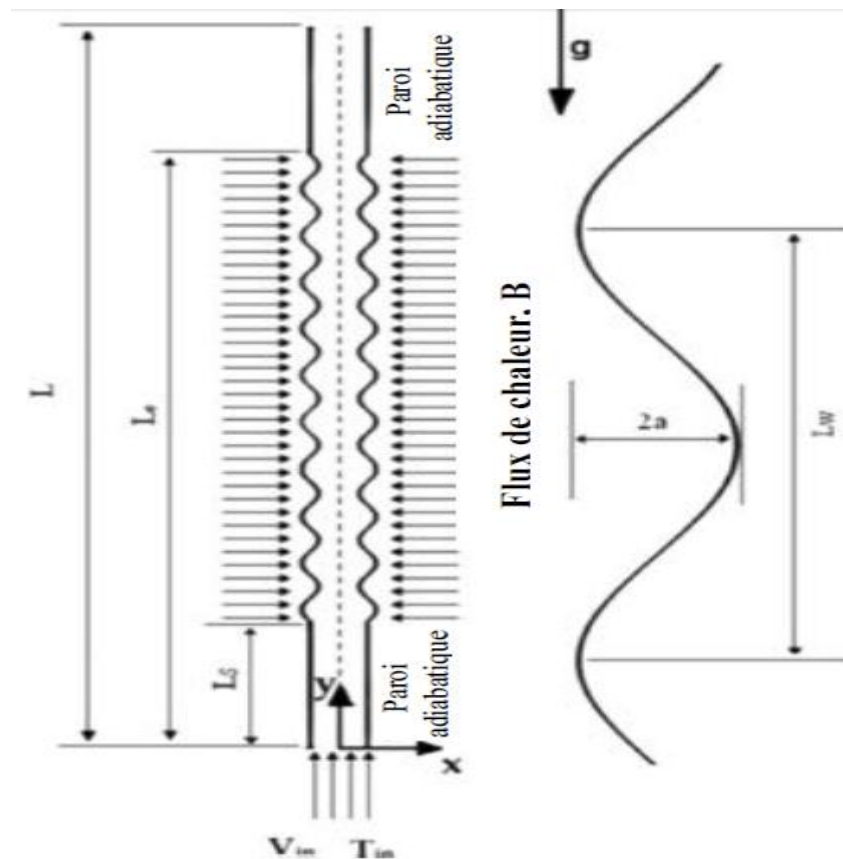


Figure I.7 : Schéma du modèle physique, Rashidi et al. [31].

Pak et Cho [20] ont utilisé des nanoparticules d'aluminium (13 nm) et des nanoparticules de dioxyde de titane (27 nm) avec une fraction volumique allant de 0 à 3 pour cent distribuées dans l'eau comme fluide de base pour étudier le transfert de chaleur convectif des nanofluides pour un

écoulement turbulent. Ils ont découvert que le nombre de Nusselt croît au fur et à mesure que Reynolds augmente.

Yang et al. [32] Ont étudié le transfert convectif d'un nanofluide comprenant des nanoparticules de graphite de 20 à 40 nm de diamètre dispersées dans une huile synthétique pour un écoulement laminaire dans un tube circulaire avec des nombres de Reynolds allant de 5 à 110, et ont changé la fraction volumique de 0% à 2%. Ils ont découvert que lorsque le fluide caloporteur est un nanofluide, le nombre de Nusselt augmente d'environ 22 %. Ils ont donc présentés une corrélation basée sur le diamètre des tubes et la viscosité dynamique.

Sajadi et Kazemi [33] ont publié une étude expérimentale de la convection thermique en régime turbulent dans un tube contenant des nanoparticules de dioxyde de titane (30 nm) en suspension dans l'eau dans des fractions allant de 0,2 à 0,25 %. Ils ont découvert que la présence de nanofluides améliore le transfert thermique et augmente la différence de pression, et ils ont proposé une corrélation empirique pour un Reynolds :

$$5.10^3 \leq Re \leq 3.10^4$$

$$Nu = 0.067.Pr^{0.34} .Re^{0.71} + 0.0005.Re \quad (I.29)$$

I.6. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons donné dans un premier temps une notion générale sur le transfert de chaleur ou nous avons définie le transfert thermique et les différents modes. Dans cette étude théorique nous avons établis des recherches sur les modes de convection et les nombres adimensionnelles qui caractérisent le régime d'écoulement par convection. Et puis on a présenté les nanofluides en détaillons leurs propriétés thermophysiques et leurs applications dans de nombreux problèmes.

Une synthèse bibliographique est consacrée à une revue des différents travaux pour mieux comprendre les caractéristiques de l'écoulement des nanofluides convectifs dans des conduites. L'analyse de ces travaux permet d'identifier les différents paramètres qui peuvent influencer le comportement thermique et rhéologique des nanofluides. Dans cet objectif, le chapitre suivant expose une détermination de l'effet de certains paramètres en détaillons mathématiquement l'écoulement de différents types de nanofluides convectifs dans une conduite verticale.

Chapitre II
Problématique et modélisation
Mathématique

II.1. Introduction :

Dans ce deuxième chapitre, nous présentons la problématique ainsi les modèles mathématiques appliqués et les hypothèses simplificatrices. Nous formulons le problème physique régissant l'écoulement convectif d'un nanofluide dans une conduite verticale. Nous exprimons les équations de conservations et les conditions aux limites sous forme adimensionnelle. Et aussi nous introduisons les principales grandeurs dynamiques et thermiques.

II.2. Présentation de problème :

On considère une conduite verticale à deux parois différentes de température T_1 et T_2 (une paroi chaude et l'autre est froide), l'écoulement du nanofluide est considéré ascendant dans le canal.

Un schéma représentatif pour le problème physique, l'axe x est parallèle aux parois du canal de largeur L et l'axe y est perpendiculaire à ces dernières, la composante de vitesse U est prise le long de l'axe x . nous avons un écoulement permanent et monodimensionnel d'un nanofluide, avec les propriétés u_0 , T_0 qui sont respectivement la vitesse et la température. Le nanofluide entre en contact avec les parois de la conduite verticale (écoulement convectif) tel qu'il est montré sur le schéma, dont les propriétés thermophysiques du nanofluide (ρ_{nf} , $(Cp)_{nf}$, β_{nf} , μ_{nf} , α_{nf}) qui sont respectivement la masse volumique, la chaleur spécifique, le coefficient d'expansion thermique, la viscosité thermique et la diffusivité thermique, et sans négliger la gravité g qui influence sur l'écoulement.

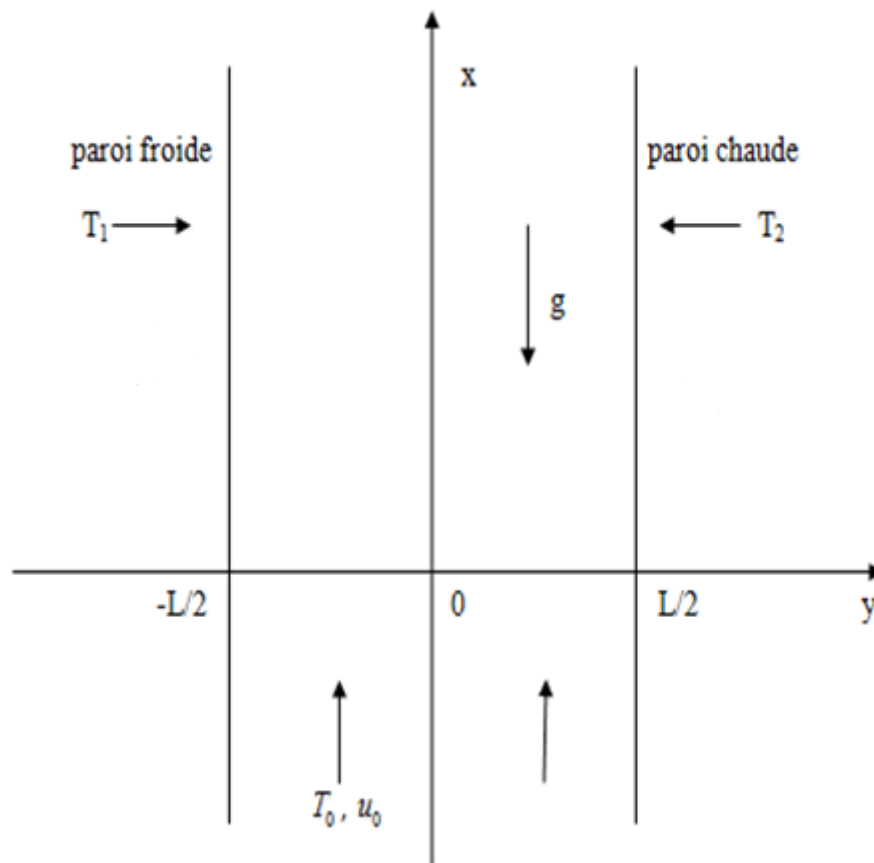


Figure II.1 : géométrie du problème et système de coordonnées.

II.3. Hypothèses simplificatrices :

La modélisation du système étudié est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le régime d'écoulement est permanent $\frac{\partial}{\partial t} = 0$
- L'écoulement est unidirectionnel selon (x), $v=0$
- Le fluide est newtonien et incompressible $(\rho, \mu) = cte$
- Les propriétés du nanofluide $(\rho_{nf}, (Cp)_{nf}, \mu_{nf}, \beta_{nf}, \alpha_{nf})$ sont constantes.
- On applique l'approximation d'Overbeck Boussinesq :

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial T} (T - T_0) \quad (\text{II.1})$$

II.4. Formulation du problème :

II.4.1. Equations de conservation :

Le système d'équations qui gouverne l'écoulement convectif et le transfert de chaleur en coordonnées cartésiennes après la simplification des équations de conservations (I.3), (I.4), (I.5), s'écrivent comme suit :

➤ **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.2})$$

➤ **Equation de quantité de mouvement :**

Selon (x) :

$$\mu_{nf} \frac{d^2 u}{dy^2} + g(\rho\beta)_{nf} (T - T_0) - \frac{dp}{dx} = 0 \quad (\text{II.3})$$

➤ **Equation d'énergie :**

$$\alpha_{nf} \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{\mu_{nf}}{(\rho.Cp)_{nf}} \left(\frac{du}{dy} \right)^2 = 0 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$\alpha_{nf} = \frac{\lambda_{nf}}{(\rho.Cp)_{nf}} \quad (\text{II.5})$$

II.4.2. Conditions aux limites :

$$\text{à } y = \left(-\frac{L}{2}\right) \begin{cases} u\left(-\frac{L}{2}\right) = 0 \\ T\left(-\frac{L}{2}\right) = T_1 \end{cases}$$

$$\text{à } y = \left(\frac{L}{2}\right) : \begin{cases} u\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \\ T\left(\frac{L}{2}\right) = T_2 \end{cases}$$

Avec :

u : la vitesse d'écoulement aux parois.

T₁ : la température froide.

T₂ : la température chaude.

II.5. Formulation adimensionnelle :

Pour résoudre le problème schématisé ci-dessus il est nécessaire et même très important d'utiliser le dimensionnement des variables qui nous permettent d'avoir des informations généralisées à une variété de problèmes ayant les même grandeurs de coefficients de similitude et réduire le nombre de paramètres d'un problème.

Et pour faire apparaître les paramètres de contrôle du problème, il est nécessaire d'introduire les grandeurs de référence.

II.5.1. Principales grandeurs physiques et variables adimensionnelles :

Le nombre de Reynolds qu'on a introduit est défini par : $Re = \frac{u_0 \cdot L}{\nu_f}$

Le nombre de Grashof est défini par : $Gr = \frac{g(\rho\beta)_f \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu_f^2}$

Et le gradient de pression est défini : $A = -\frac{L^2}{u_0} \frac{dp}{dx}$

Nous présentons aussi les variables :

$$U = \frac{u}{u_0}, X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}$$

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_2 - T_1}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$T_{moy} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$R_T = \frac{T_1 + T_2}{\Delta T}$$

II.5.2. Equations adimensionnelles :

➤ **Equation de quantité de mouvement :**

Selon (ox) :

$$(1-\varphi)^{-2.5} U'' + \left[(1-\varphi) + \varphi \frac{(\rho\beta)_s}{(\rho\beta)_f} \right] Ri \cdot \theta + A = 0 \quad (\text{II.6})$$

➤ **Equation d'énergie :**

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} \theta'' + Br(1-\varphi)^{-2.5} U'^2 = 0 \quad (\text{II.7})$$

Les paramètres sont défini par :

$$\text{Nombre de Richardson : } Ri = \frac{Gr}{Re}$$

$$\text{Le nombre de Brinkman : } Br = \frac{\mu_f u_0^2}{\Delta T \cdot \lambda_f}$$

$$\text{Le nombre de Nuselt est défini comme suit : } Nu = \frac{L(q_w)}{\lambda_f \cdot \Delta T}$$

$$\text{D'où la densité thermique : } q_w = -\lambda_f \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=\pm \frac{L}{4}}$$

Les conditions limites associées sous la forme adimensionnelle sont :

$$U\left(-\frac{1}{4}\right) = U\left(\frac{1}{4}\right) = 0$$

$$\begin{cases} \theta\left(-\frac{1}{4}\right) = \frac{-R_T}{2} \\ \theta\left(\frac{1}{4}\right) = \frac{R_T}{2} \end{cases}$$

Le nombre dimensionnel de Nuselt est calculé comme suit :

$$Nu_1 = \left. \frac{d\theta}{dY} \right|_{y=-\frac{1}{4}} = \theta'(-\frac{1}{4})$$

$$Nu_2 = \left. \frac{d\theta}{dY} \right|_{y=\frac{1}{4}} = \theta'(\frac{1}{4})$$

II.6. Conclusion :

Pour le positionnement de notre problème cité ci-dessus, nous avons utilisé les équations de Navier-stocks en coordonnées cartésiennes et les équations d'énergie et de quantité de mouvement qui gouvernent notre problème. On a donné les hypothèses simplificatrices qui vont nous permettre de résoudre les équations adimensionnelles à l'aide de changement de variable pour notre cas. Enfin nous allons traiter notre problème avec une méthode numérique en utilisons Matlab.

Chapitre III

Résultats et Discussion

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous décrivons la méthode numérique utilisés pour résoudre les équations de base formulées dans le chapitre II, et est consacré à la présentation des résultats obtenue après avoir programmé les équations différentielles ordinaire qui régissent le problème étudié.

Rappelons que le problème étudié est un écoulement convectif d'un fluide dans une conduite verticale.

Afin de résoudre le système constitué des équations de Navier-Stockes en coordonnées cartésiennes et les équations de conservations associées des conditions initiales et aux limites correspondantes, on utilise plusieurs méthodes de discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles actuellement telles que : la méthode des volumes finies, des différences finies, etc. Parmi ces méthodes, nous avons choisi la méthode des différences finies.

III.2. Validation du code :

Afin de valider l'exactitude de la méthode utilisée, les résultats actuels correspondants sont comparés à ceux obtenus par Barletta [36] (tableau III.1), il ressort de ce tableau que les résultats actuels sont en bon accord avec ceux rapportés par le travail cité.

| Br | Nu_1 | | Nu_2 | |
|------|---------------|---------|---------------|---------|
| | Barletta [36] | Présent | Barletta [36] | Présent |
| 0 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 0,05 | 2,05302 | 2,046 | 1,918 | 1,959 |
| 0,1 | 2,099 | 2,09 | 1,834 | 1,9163 |
| 0,2 | 2,205 | 2,1723 | 1,657 | 1,8249 |
| 0,3 | 2,319 | 2,2481 | 1,471 | 1,7245 |

Tableau (III.1) : Comparaison des valeurs de Nu_1 et Nu_2 pour un chauffage asymétrique avec $Ri=100$, $\phi =0.0$ avec celles de Barletta [36].

III.3. Résultats et discussion :

Une étude paramétrique a été réalisée en utilisant la méthode décrite précédemment, un ensemble représentatif des résultats graphiques a été obtenu pour les profils de vitesse U , et de température θ , en utilisant le nanofluide (eau aluminium). Cela pour plusieurs conditions paramétriques, l'effet de la fraction volumique ϕ , le nombre de Brinkman Br , le coefficient de dilatibilité du fluide de base β_f et du solide β_s , ainsi la masse volumique du fluide ρ_f et du solide ρ_s , et aussi la fraction de la conductivité $m = \frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f}$, et les paramètres (A , Ri , Rt) qui sont respectivement le gradient de pression, le nombre de Richardson, et la température de référence.

III.3.1. Profil de vitesse adimensionnelle :

La variation de distribution de la vitesse adimensionnelle suivant Y dans les deux cas asymétrique et symétrique pour le nanofluide (eau-aluminium) est représenté sur les figures (III.1), (III.2), (III.3), (III.4) et (III.5) pour quelques ensemble de valeurs de ϕ , Br , Ri , Rt , A .

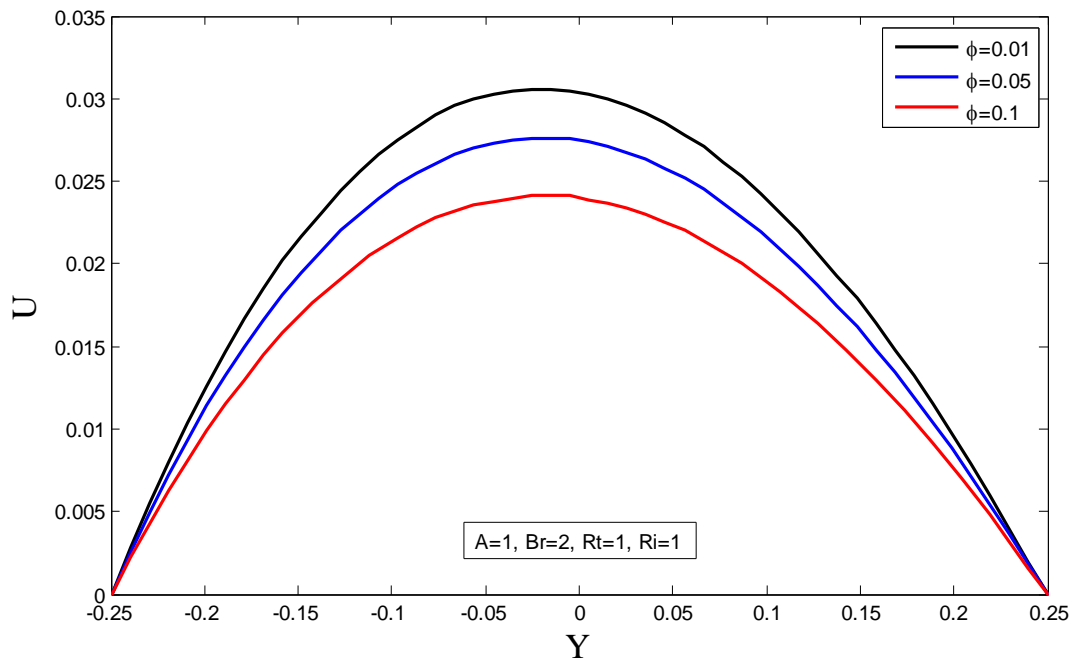


Figure (III.1) : variation de profil de vitesse U selon Y pour ϕ variable dans le cas asymétrique.

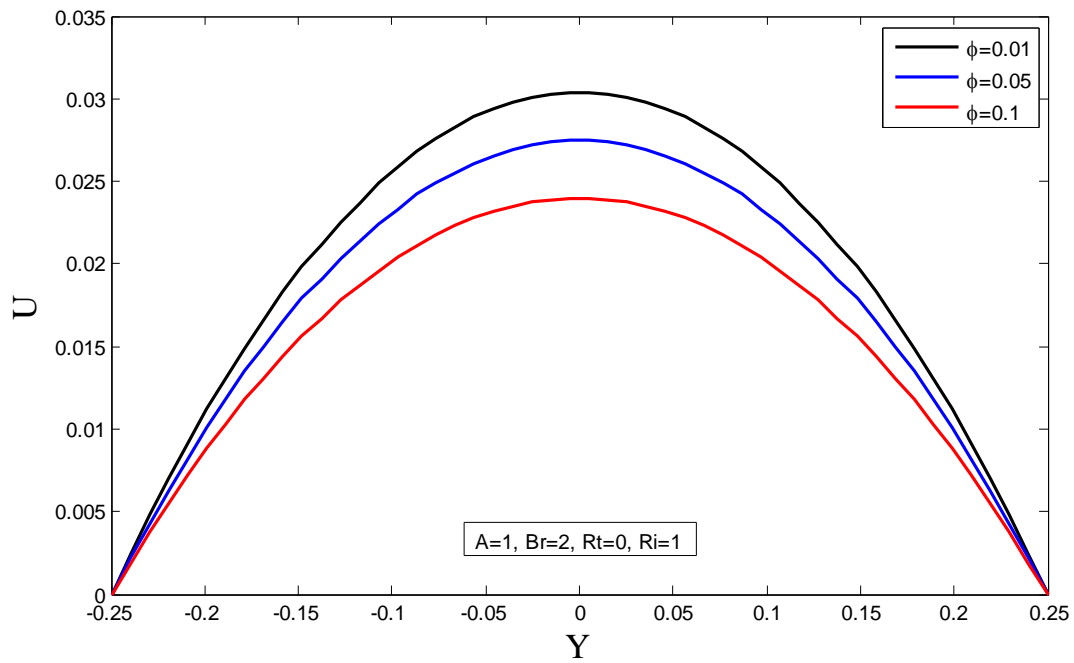


Figure (III.2) : variation de profil de vitesse U selon Y pour ϕ variable dans le cas symétrique.

Les figures (III.1) et (III.2) illustrent que la vitesse diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. Ceci est à cause de la diminution de la densité du fluide.

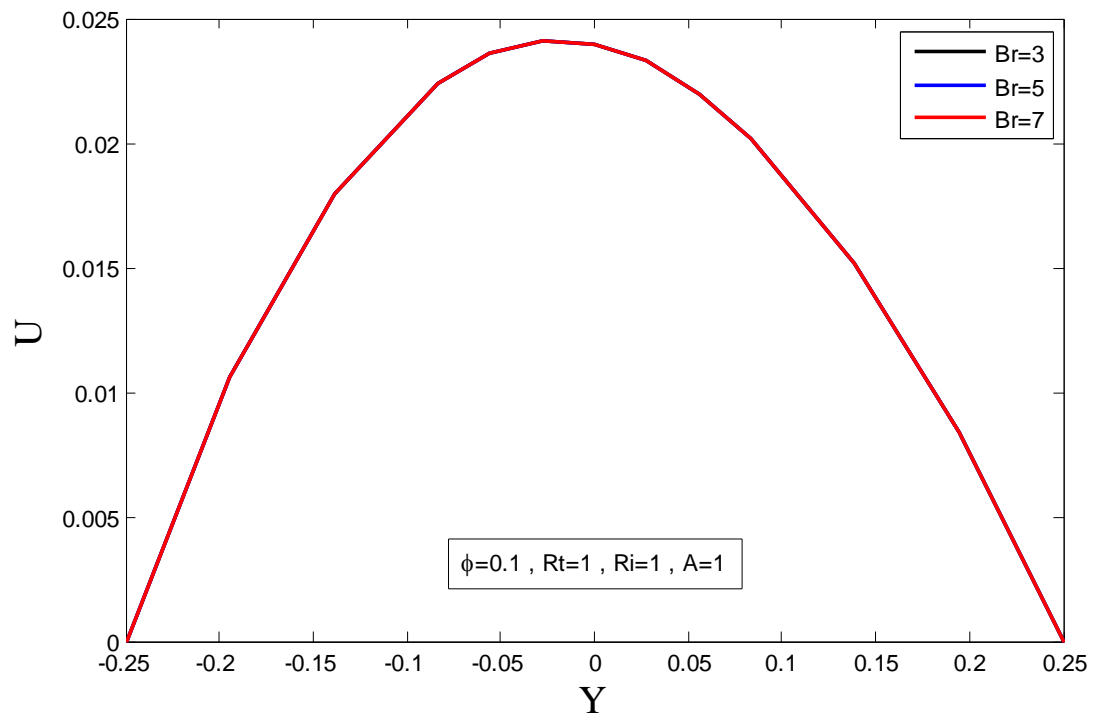


Figure (III.3) : variation de profil de vitesse U selon Y pour Br variable dans le cas asymétrique.

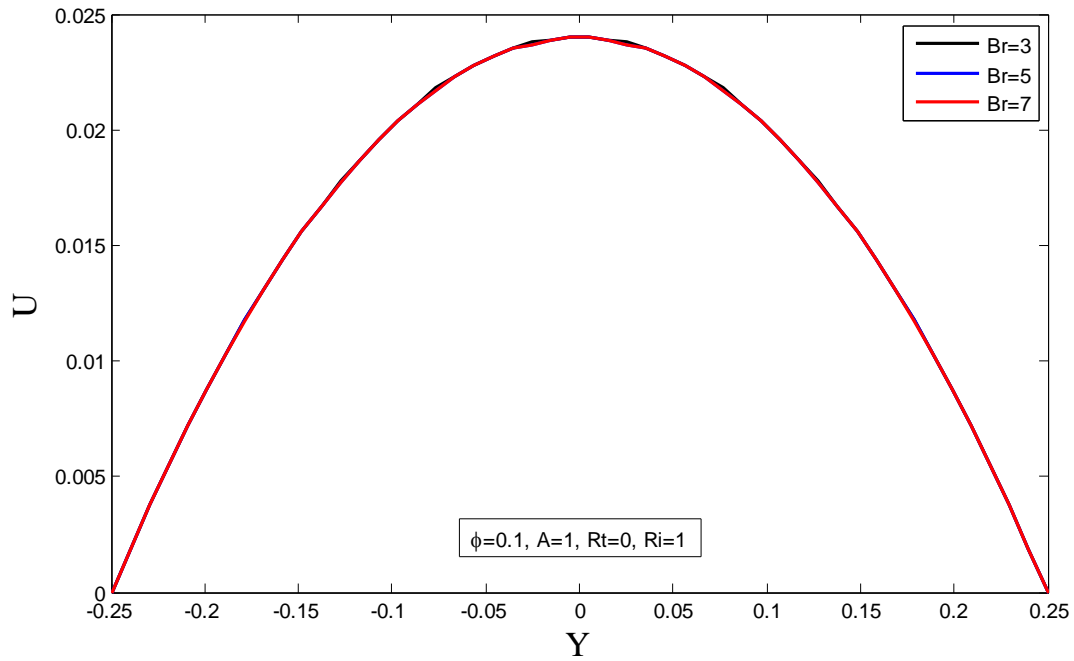


Figure (III.4) : variation de profil de vitesse U selon Y pour Br variable dans le cas symétrique.

La figure (III.3) et (III.4) nous schématisent que le nombre de Brinkman n'a aucun effet sur le profil de vitesse dans les deux cas asymétrique et symétrique.

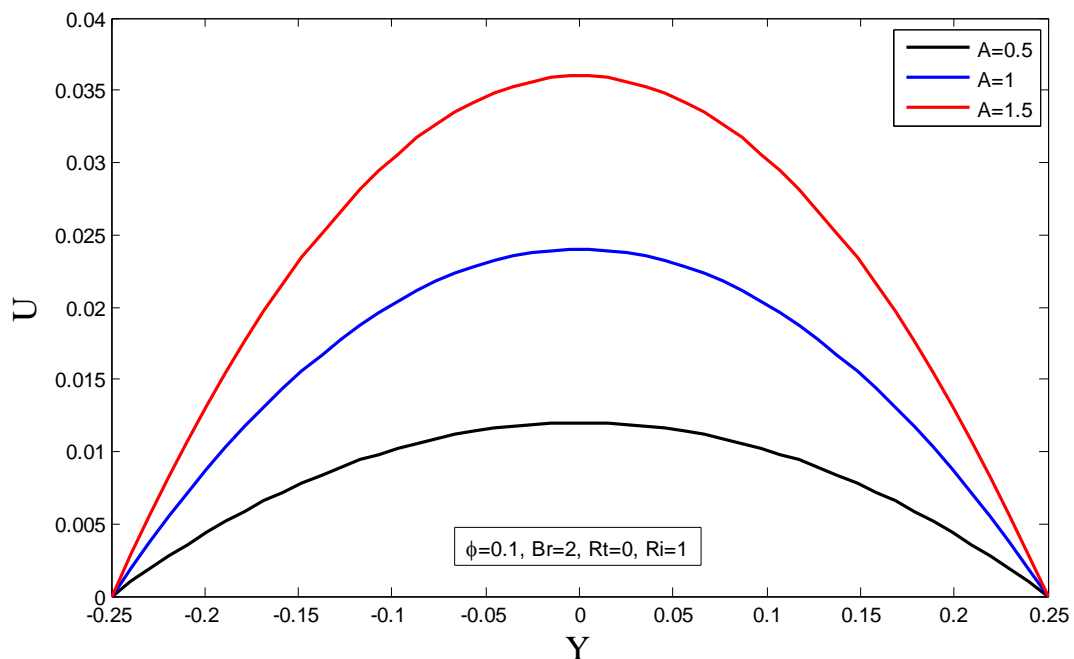


Figure (III.5) : variation de profil de vitesse U selon Y pour A variable dans le cas symétrique.

La figure (III.5) nous montre que la vitesse augmente avec l'augmentation du gradient de pression, car le débit augmente avec l'augmentation de la pression ce qui fait l'augmentation de la vitesse dans le canal.

III.3.2. Profil de température adimensionnelle :

La variation de la distribution de la température adimensionnelle selon Y dans les deux cas asymétrique pour le nanofluide (eau-aluminium) est symétrique est représentée sur les figures (III.6) à (III.10) pour quelques ensembles de valeurs ϕ , Br, Ri, Rt et A.

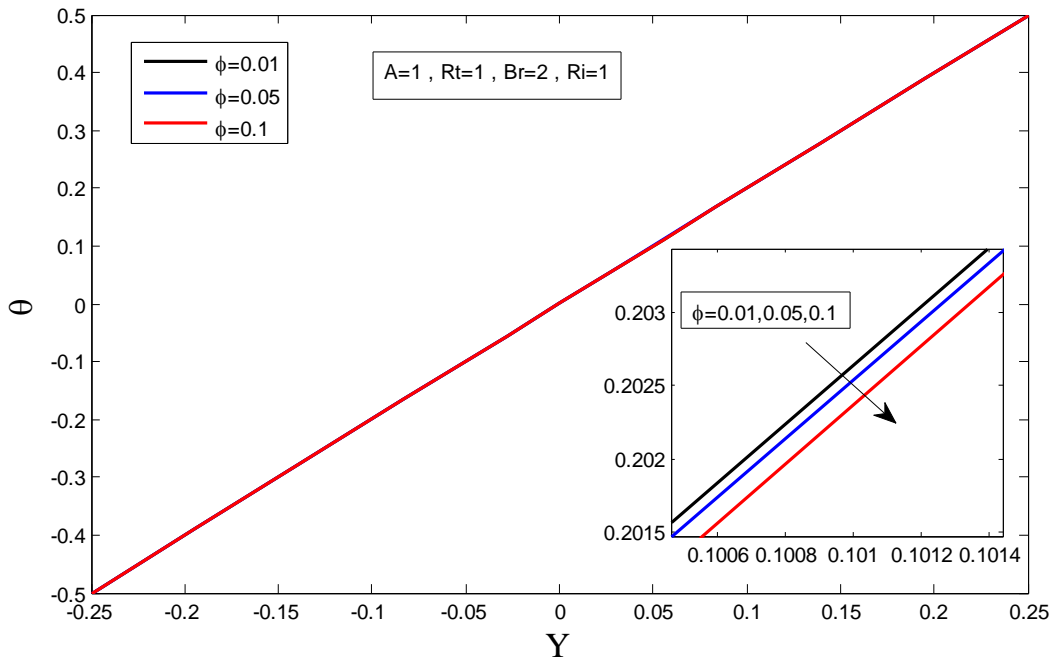


Figure (III.6) : effet de la fraction volumique sur la température adimensionnelle dans le cas asymétrique.

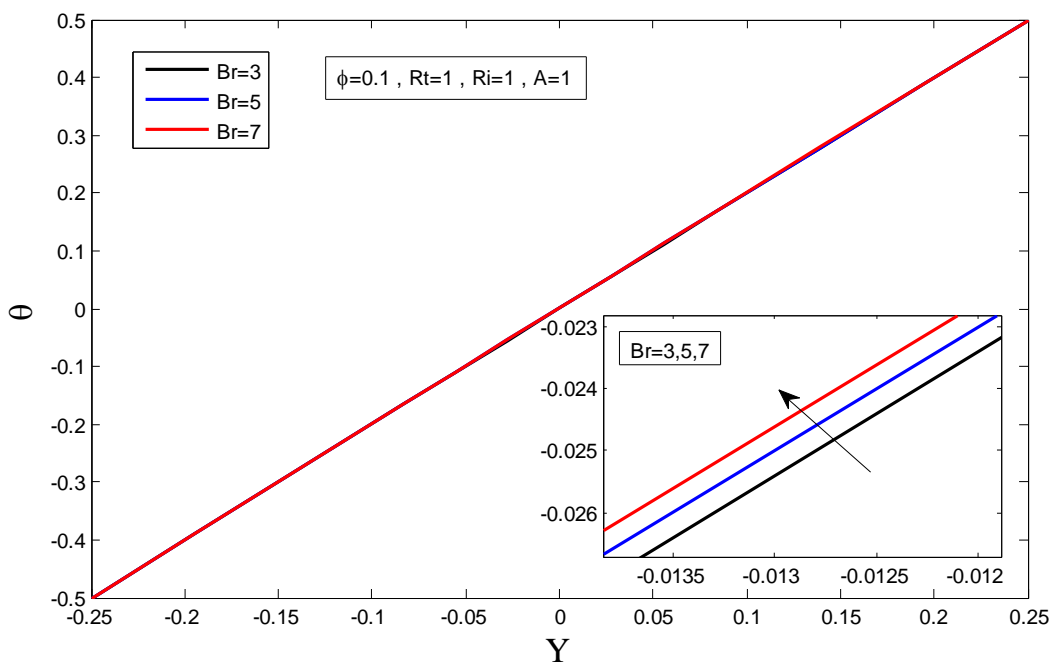


Figure (III.7) : effet du nombre de Brinkman sur la température adimensionnelle dans le cas asymétrique.

Les figures (III.6) et (III.7) nous montrent que l'augmentation de la fraction volumique et de nombre de Brinkman ont un effet minimal sur la variation de la température.

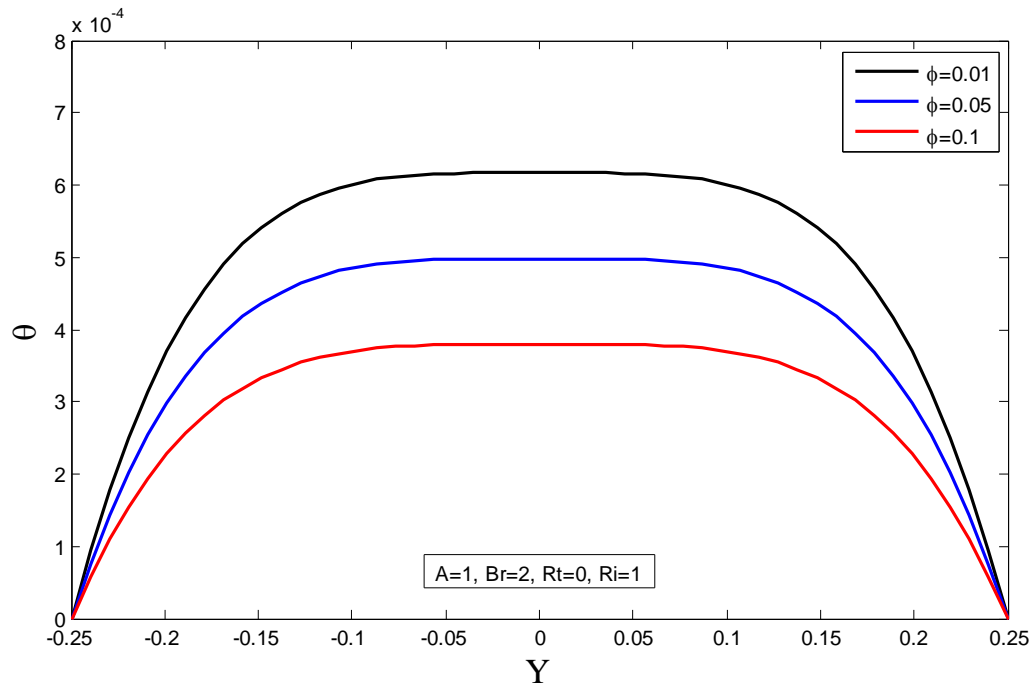


Figure (III.8) : effet de la fraction volumique sur la température adimensionnelle dans le cas symétrique.

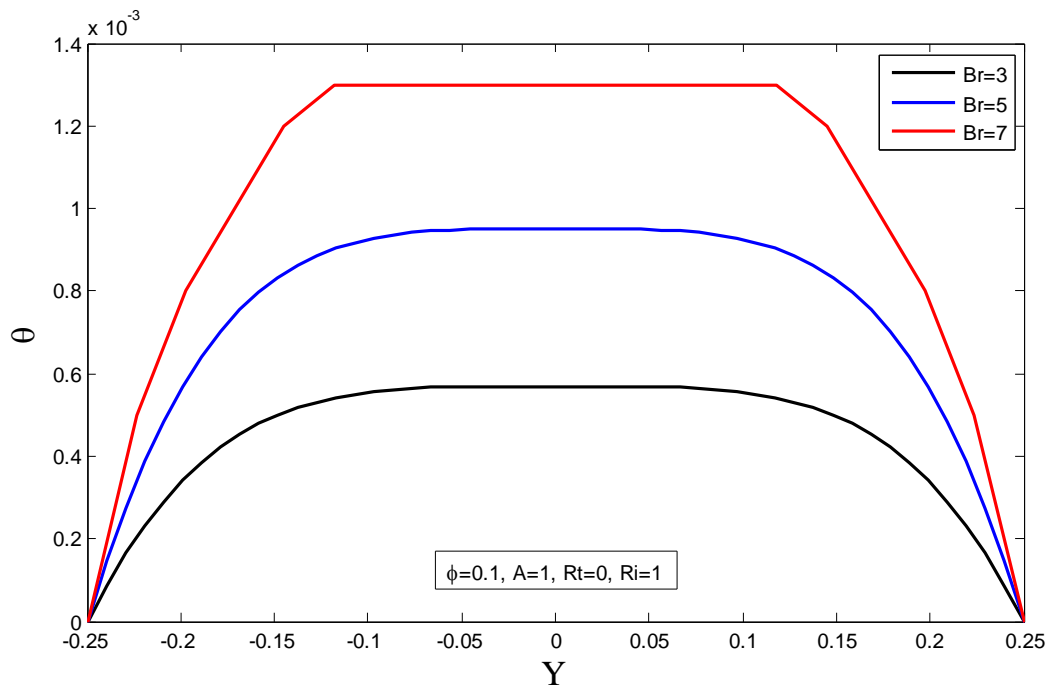


Figure (III.9) : effet du nombre de Brinkman sur la température adimensionnelle dans le cas symétrique.

La figure (III.8) nous schématise que la température diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, tandis que dans la figure (III.9) la température augmente avec l'augmentation du nombre de Brinkman.

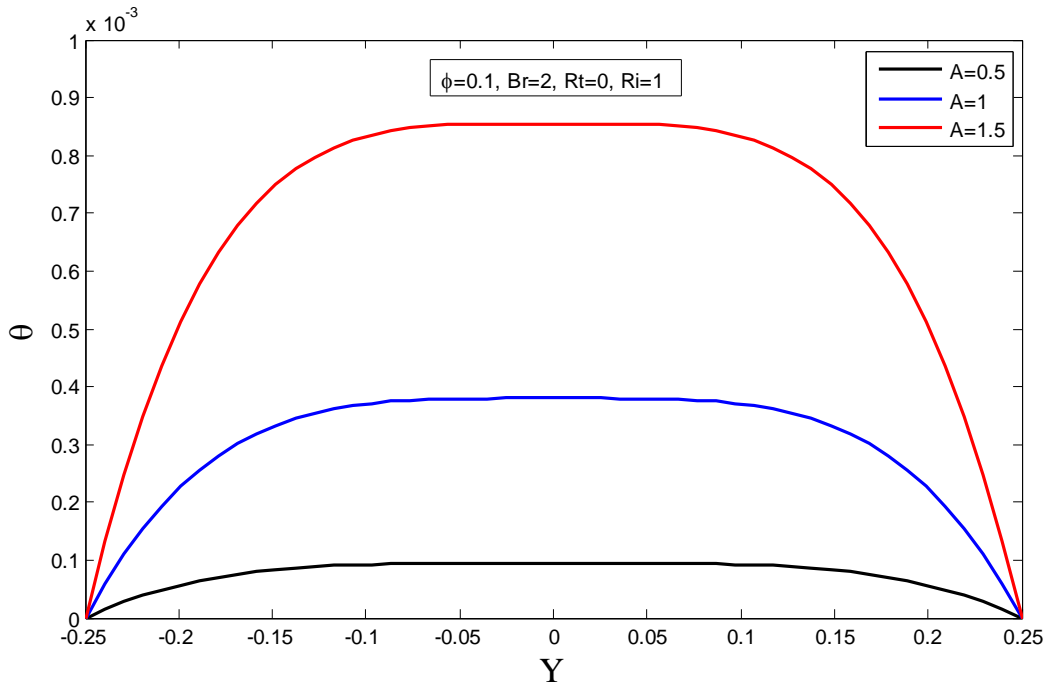


Figure (III.10) : variation de la température adimensionnelle selon Y pour A variable dans le cas symétrique.

La figure (III.10) nous montre que la température augmente avec l'augmentation du gradient de pression A, car en augmentons la pression, le risque de collisions augmente ce qui fait une augmentation de l'énergie cinétique des nanoparticules et pour cette raison la température augmente.

III.3.3. Variation du nombre de Nusselt :

Les deux tableaux (IV.2) et (IV.3) nous montre la variation du nombre de Nusselt le long du canal pour de différentes valeurs de fraction volumique et de nombre de Brinkman dans les deux cas asymétrique et symétrique.

| Br | Nu_1 | | | | Nu_2 | | | |
|----|-------------|----------------|----------------|---------------|-------------|----------------|----------------|---------------|
| | $\varphi=0$ | $\varphi=0.01$ | $\varphi=0.05$ | $\varphi=0.1$ | $\varphi=0$ | $\varphi=0.01$ | $\varphi=0.05$ | $\varphi=0.1$ |
| 1 | 2.0060 | 2.0057 | 2.0045 | 2.0035 | 1.9954 | 1.9956 | 1.9965 | 1.9973 |
| 2 | 2.012 | 2.0113 | 2.0091 | 2.0069 | 1.9908 | 1.9913 | 1.9929 | 1.9946 |
| 3 | 2.018 | 2.017 | 2.0137 | 2.0103 | 1.9862 | 1.9869 | 1.9894 | 1.9919 |
| 4 | 2.0239 | 2.0226 | 2.0182 | 2.0138 | 1.9816 | 1.9829 | 1.9859 | 1.9892 |

Tableau (III.2) : variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique et du nombre de Brinkman dans le cas asymétrique.

Le tableau (III.2) nous montre que les valeurs du nombre de Nusselt augmentent dans la paroi gauche avec l'augmentation du nombre de Brinkman, et diminuent avec l'augmentation de la fraction volumique.

Par contre dans la paroi droite les valeurs du nombre de Nusselt diminuent avec l'augmentation du nombre de Brinkman, et augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique de nanoparticules. Ceci est dû à une amélioration de la conductivité thermique du nanofluide comparable à celle du fluide de base, la chaleur se transmet mieux aux fluides pour des fractions volumiques élevées.

| Br | Nu_1 | | | | Nu_2 | | | |
|----|-------------|----------------|----------------|---------------|-------------|----------------|----------------|---------------|
| | $\varphi=0$ | $\varphi=0.01$ | $\varphi=0.05$ | $\varphi=0.1$ | $\varphi=0$ | $\varphi=0.01$ | $\varphi=0.05$ | $\varphi=0.1$ |
| 1 | 0.0052 | 0.0049 | 0.004 | 0.003 | -0.0052 | -0.0049 | -0.004 | -0.003 |
| 2 | 0.0104 | 0.0099 | 0.008 | 0.0061 | -0.0104 | -0.0099 | -0.008 | -0.0061 |
| 3 | 0.0156 | 0.0148 | 0.0119 | 0.0091 | -0.0156 | -0.0148 | -0.0119 | -0.0091 |
| 4 | 0.0208 | 0.0197 | 0.0159 | 0.0122 | -0.0208 | -0.0197 | -0.0159 | -0.0122 |

Tableau (III.3) : variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique et du nombre de Brinkman dans le cas symétrique.

Dans ce deuxième cas (symétrique), le tableau (III.3) nous montre que dans la paroi gauche les valeurs du nombre de Nusselt augmentent avec l'augmentation du nombre de Brinkman, et diminuent avec l'augmentation de la fraction volumique.

Par contre dans la paroi droite, les valeurs du nombre de Nusselt diminuent avec l'augmentation du nombre de Brinkman, et augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique. Ceci est à cause de l'amélioration de la conductivité thermique du nanofluide.

III.4. Conclusion :

L'écoulement convectif du nanofluide (eau-aluminium) dans une conduite verticale est étudié numériquement dans ce chapitre en utilisant la méthode de différence finie. Les équations différentielles représentant le problème physique ont été transformées en données numériques en utilisant une méthode adéquate, les résultats numériques sont affichés par des illustrations graphiques.

L'analyse montre que les profils de vitesse et de températures dans les deux cas symétrique et asymétrique dépendent de cinq paramètres adimensionnels, à savoir le nombre de Brinkman, la fraction volumique, le nombre de Richardson, la température de référence et le gradient de pression.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Le travail initial de cette recherche consiste en une analyse théorique, ou plus précisément une simulation numérique, des transferts thermiques convectifs dans un canal vertical à deux parois.

Un écoulement ascendant de nanofluide composé d'une base fluide et de nanoparticules d'aluminium se déplace via l'espace annulaire du conduit. Le nanofluide est présent à l'entrée de la conduite avec une température et une vitesse constantes.

Différentes approches et différents modèles peuvent être utilisés pour modéliser mathématiquement ce problème physique. Les équations de mouvement régissant l'écoulement sont réduites à un système d'équations différentielles ordinaires qui se présente sous forme d'un problème aux valeurs limites BVP, ces équations sont résolues numériquement en utilisant la méthode des différences finies. Cette approche nous a permis de cerner les effets de différents paramètres de contrôles.

L'analyse montre que les profils de vitesse, de température dépendent des paramètres adimensionnels Br , Ri , A , Rt et de fraction volumique des nanoparticules. En outre les présentations graphiques des études paramétriques.

Les conclusions tirées de cette étude sont comme suite :

- Le graphe de variation de profil de vitesse U selon Y pour φ variable dans le cas asymétrique et symétrique illustrent que la vitesse diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.
- Le graphe de variation de profil de vitesse U selon Y pour A variable dans le cas symétrique montre que la vitesse augmente avec l'augmentation du gradient de pression.
- Le graphe d'effet du nombre de Brinkman sur la température adimensionnelle dans le cas asymétrique et asymétrique montre que l'augmentation de la fraction volumique et de nombre de Brinkman ont un effet minimal sur la variation de la température.
- Le graphe de l'effet de la fraction volumique sur la température adimensionnelle dans le cas symétrique et le graphe de l'effet du nombre de Brinkman sur la température adimensionnelle dans le cas symétrique schématisent que la température diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, tandis qu'elle augmente avec l'augmentation du nombre de Brinkman.

- Le graphe de variation de la température adimensionnelle selon Y pour A variable dans le cas symétrique montre que la température augmente avec l'augmentation du gradient de pression A .

Finalement, on peut conclure que les paramètres de contrôle du problème ainsi les propriétés thermophysiques du fluide ont un effet considérable sur le transfert de chaleur et de masse. La présence des nanoparticules dans le fluide de base joue un rôle majeur sur l'évolution de transfert thermique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] **Mohamed Gacem**, « Comparaison Entre l'Isolation Thermique Extérieure et Intérieure d'une pièce D'un Habitat Situé Dans Le Site De Ghardaïa », (Mémoire magister en physique option : physique électronique et modélisation université Abou-Bekr Belkaid tlemcen (2010-2011)).
- [02] **S.Lyès**, « La convection mixte dans un canal horizontal muni de blocs chauffés », (Mémoire magister en Génie des Procédés option: Energétique et Procédés Université Kassdi Merbah Ouargla (2012-2013)).
- [3] **FLAVIE WIDMAIER**, article « Exploration technique de phénomènes naturels : la capillarité et la convection thermique » Info technique Non classé Secteur de l'éco-construction, le 15/04/2020.
- [4] **A.KORICHI, A.ISSAADI**, « Simulation numérique de l'écoulement d'un fluide à seuil dans une conduite cylindrique. Application au transport de boue de forage », (mémoire de master Génie Mécanique spécialité: Energétique Université Abderrahmane MIRA Bejaia).
- [5] **BENYAHIA IDIR , ADDALOU LAMINE** , mémoire master « Effet Soret sur un écoulement en convection mixte devant une plaque plane verticale » spécialité installations énergétiques et turbomachines, université Abderrahmane Mira de Béjaia (2021).
- [6] **Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar McGraw-Hill** "NATURAL CONVECTION " Mehmet Kanoglu University of Gaziantep. Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications Fourth Edition, Chapter 9, 2011.
- [7] **Benacer Bousaria** : mémoire de master « étude de la convection forcée en régime laminaire sur une plaque plane chaude pour différents angles d'attaque », spécialité énergétique, université Mohamed Khider de Biskra (2019).
- [8] **G. KIBAUD**. Convection laminaire et convection turbulente. La Houille Blanche 1, 12-18 (1957).
- [9] **S. BENTHAMI**. Modélisation numérique d'un four électrique à convection forcée Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières, (2004).
- [10] **Mouloud guemana** _ mesure des gras débits de gaz contribution des venturi_ Tuyèresa col sonique mémoire de magister. 2002
- [11] **BOUAYED ZINE-ELABIDINE**, Mémoire Magister « Etude de la convection mixte laminaire dans une cavité ventilée par la méthode de Boltzmann sur réseau » spécialité génie mécanique, université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem (2014).
- [12] **A. HADDAD**. Transferts thermiques un cours de base pour les étudiant en cycle de graduation, Dar-El-Djazairia, Alger, (2001).
- [13] **SALHI Hichem**, Doctorat, Spécialité en Énergétique " ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES: NANOFLUIDE " Université Batna (2015).

- [14] **KHENTOUL Moussa**, Doctorat 3^{em} cycle (LMD), spécialité en Génie thermique et Energétique " étude numérique de la convection mixte dans un canal horizontal contenant des Alliettes" Université des Frères Mentouri-Constantine (20016).
- [15] **Bang, I. C., & Chang, S. H.** (2005). Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃–water nano-fluids from a plain surface in a pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(12), 2407-2419.
- [16] **J. Kim, Y.T. Kang, and C.K. Choi.** Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids. *Physics of Fluids*, 16(7): 2395-2401, 2004.
- [17] **J.C. Maxwell.** A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., 1891.
- [18] **R.L. Hamilton, O.K. Crosser.** Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(3), 187-191, 1962
- [19] **W. Yu, SUS. Choi.** The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *J. nanoparticle Res* 5: 167-71, 2003.
- [20] **A. Einstein.** Investigations on the Theory of the Brownian Movement. Dover Publications, New York, 1956.
- [21] **H.C. Brinkman.** The viscosity of concentrated suspensions and solution. *J. Chem. Phys.*, 20, 571–581, 1952.
- [22] **G.K. Batchelor.** Brownian Diffusion of particles with Hydrodynamic Interaction. *Journal of Fluid Mechanics*, 74(1): 1-29, 1976.
- [23] **S. Maiga, S. Palm, S. Nguyen, C. Roy, and G. Galanis.** Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26, 530-546, 2005.
- [24] **B.C. Pak and Y.I. Cho.** Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151–170, 1998.
- [25] **HADDAD Aghilass, CHAOUCH Oualid**, Master, Spécialité en Énergétique " Ecoulement convectif naturel d'un nanofluide devant une plaque verticale avec un flux surfacique imposé " Université Abderrahmane MIRA BEJAIA (2019-2020).
- [26] **T. J. Hanratty, E. M. Rosen, R. L. Kabel,** Effect of Heat Transfer on Flow Field at Low Reynolds numbers in Vertical Tubes, *Industrial Engineering Chemistry*, Vol. 50, N°5, pp. 815-820, (1958).

- [27] **MAIGA S. E.B.** (2005). Etude numerique du transfert thermique des nanofluides dans un tuyau chauffee uniformement a la parol. These de maitrise, Universite de Moncton, Canada.
- [28] **BUONGIORNO J.** (2006). Convective transport in nanofluids, Journal of heat transfer Transaction of the ASME vol 128.p. 240-250.
- [29] **BEHZADMEHR A. Saffar-Avval, Galanis N** (April 2007). Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach, International Journal of Heat and Fluid Flow, v 28, n2, p 211-219.
- [30] **Selimefendigil, F., Oztop, H., F.** (2015): Influence of inclination angle of magnetic field on mixed convection of nanofluid flow over a backward facing step and entropy generation, Advanced Powder Technology, vol. 26, pp. 1663 – 1675.
- [31] **Rashidi, M., M., Nasiri, M., Khezerloo, M., Laraqi, N.,** (2016) : Numerical investigation of magnetic field effect on mixed convection heat transfer of nanofluid in a channel with sinusoidal walls, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 401, pp. 159 – 168.
- [32] **Y. Yang, Z. G. Zhang, E. A. Grulke, W. B. Anderson, G. Wu,** Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow, International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (6) (2005) 1107-1116.
- [33] **Sajadi AR, Kazemi MH.** Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube. International Communications in Heat and Mass Transfer 2011;38:1474–8.
- [34] **Cheng P, Minkowycz WJ.** Free convection about a vertical flat plate embedded in a porous medium with application to heat transfer from a dike. J Geophys Res.
- [35] **J. Kierzenka** « studies in the numerical solution of ordinary differential equations », these de doctorat, southern Methodist University, Dallas, TX, (1998).
- [36] **Barletta, A. :** Laminar mixed convection with viscous dissipation in a vertical channel. Int. J. Heat Mass Transf. 41, 3501-3513 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00074-X)

Annexe

Annexe A : Résolution du problème des valeurs aux limites pour les équations différentielles ordinaires dans Matlab avec bvp4c.

A. 1 introduction :

Dans cette partie, nous décrivons la méthode numérique utilisée pour résoudre les équations de base formulées dans le chapitre II.

Nous allons être amenés à étudier un problème d'équations différentielles ordinaires (EDO) aux limites (BVP), dont le comportement est très différent de celui d'un problème aux valeurs initiales (IVP). Dans l'application, nous utilisons la méthode de différence finie avec le solveur bvp4c créé en MATLAB qui permet de résoudre le problème aux limites (BVP) qui implémente la formule de Lobatto à trois étapes de collection.

A.2 Equation différentielle ordinaire :

Les Equations différentielles ordinaires décrivent des phénomènes qui changent en permanence. Ils se posent en modèles à travers les mathématiques, les sciences et l'ingénierie. En soi un système d'équations différentielles à nombreuse solutions. Communément une solution d'intérêt est déterminée en spécifiant les valeurs de tous ses composants en un seul point $x=a$. c'est un problème de valeur initiale (IVP). Cependant, dans de nombreuses applications d'une solution est déterminée d'une manière plus complexe.

Un problème de valeur limite (BVP) spécifie les valeurs ou des équations pour composants de la solution a plus d'un x . Contrairement de IVP, un problème de valeur limite ne peut être avoir une solution, ou peut avoir un nombre fini, ou peut avoir une infinité. De ce fait, les programmes de résolution de BVP, les utilisateurs doivent fournir une estimation de la solution souhaitée. Souvent ; il existe des paramètres qui doivent être déterminés de tel sort que le BVP a une solution. Encore une fois il pourrait y avoir plus d'une possibilité, afin que les programmes nécessitent une estimation pour les paramètres souhaite. Singularités dans les coefficients et les problèmes posés sur des intervalles infinis ne sont pas inhabituelles.

Ce qui montre comment formuler, résoudre et tracer la solution d'un BVP avec le programme bcp4c MATLAB. Il vise à rendre la résolution d'un problème type d'un BVP aussi facile que possible. BVPs sont beaucoup plus difficiles à résoudre qu'un IVP et tout solveur peut échouer même avec de bonnes estimations pour la solution et des paramètres inconnus. Bvp4c est un solveur efficace, mais la méthode sous-jacente et l'environnement de calcul ne sont pas

appropriés pour de grandes précisions, ni pour des problèmes avec très brusques changements de leurs solutions.

A. 3 Problème de valeur aux limites :

Si la fonction f est continue sur l'intervalle $[a, b]$, le problème de valeur initiale $y' = f(x, y)$. Avec $y(a)$ donné, possède une solution unique. Les problèmes de valeurs aux limites à deux bouts sont illustrés par l'équation :

$$y'' + y = 0 \quad (\text{A.1})$$

Avec les conditions aux limites suivantes : $y(a) = A$, $y(b) = B$. Une manière d'analyser ce problème est de considérer une famille de solutions d'IVP.

Soit $y(x, s)$, la solution de l'équation (A.1) avec les valeurs initiales $y(a) = A$ et $y'(a) = s$. Chaque $y(x, s)$, s'étend jusqu'à $x = b$, maintenant la question et de déterminer les valeurs de s pour lesquelles $y(b, s) = B$.

S'il existe une solution S pour cette équation algébrique, la valeur $y(x, s)$, correspondante constitue une solution de l'équation différentielle qui satisfait les deux conditions aux limites. En utilisant la linéarité, nous pouvons trier les possibilités aisément.

Soit $u(x)$ la solution définie par $y(a) = A$, $y'(a) = 0$ et $v(x)$ la solution définie par $y(a) = 0$, $y'(a) = 1$. La linéarité implique que $y(x, s) = u(x) + sv(x)$, et la condition à la limite $B = y(b, s) = u(b) + sv(b)$ n'est autre qu'une équation algébrique linéaire qui définit la pente initiale inconnue s . Les faits familiers de l'existence et l'unicité de solutions d'équations algébriques linéaires nous disent alors qu'il y a soit une solution exactement à la BVP, ou il y a des valeurs limites B pour lesquels il n'existe aucune solution et d'autres pour lesquels il existe une infinité de solutions.

A. 4 Méthode numérique :

En générale pour résoudre ce genre de problème la méthode la plus connue à laquelle ont recours des ingénieurs n'est autre que la méthode Runge-kutta avec une technique de tir, ce qui

peut surprendre que la routine `bvp4c` n'est pas un code de technique de tire (shootingméthode). `BVP4c` met une méthode de collection pour la solution du BVP de la forme

$$y' = f(x, y, p), \quad a < x < b \quad (\text{A.2})$$

Avec de non-linéaire générale, deux points conditions aux limites

$$g(y(a), y(b), p) = 0 \quad (\text{A.3})$$

Ici p est un vecteur de paramètres inconnus. Pour plus de simplicité, il est supprimé dans les expressions qui suivent. La solution d'approximation $s(X)$ est une fonction de continue qu'est un polynôme cubique sur chaque sous-intervalle $[\mathbf{X}_n, \mathbf{X}_{n+1}]$ d'une maille $a = \mathbf{X}_0 < \mathbf{X}_1 < \dots < \mathbf{X}_n = b$. Il satisfait les conditions aux limites

$$g(s(a), s(b)) = 0 \quad (\text{A.4})$$

Et qu'il satisfait aux équations différentielles (de col locatives) aux deux extrémités et le point médian de chaque sous-intervalle

$$s'(x_n) = f(x_n, s(x_n)) \quad (\text{A.5})$$

$$s'((x_n + x_{n+1})/2) = f((x_n + x_{n+1})/2, s((x_n + x_{n+1})/2)) \quad (\text{A.6})$$

$$s'(x_{n+1}) = f(x_{n+1}, s(x_{n+1})) \quad (\text{A.7})$$

Ces conditions conduisent à un système d'équations algébrique non linéaire pour les coefficients définissant $s(x)$. A la différence de la technique de tir, la solution $y(X)$ est évaluée sur tout l'intervalle $[a, b]$ et les conditions aux limites sont prises en compte à tous les moments. Les équations algébriques non linéaire sont résolues de manière itérative par linéarisation, si cette approche s'appuie sur les solveurs d'équations linéaires de MATLAB plutôt que ces codes IVP. La méthode de base de `bvp4c`, que l'on appelle la méthode de Simpson, est bien connue et se trouve dans un certain nombre de codes. Il peut être démontré que les hypothèses modestes, $s(X)$ est une approximation de quatrième ordre a une solution isolée $y(X)$

c'est-à-dire, $\|y(x) - s(x)\| \leq Ch^4$. h est la valeur maximale de la taille de pas $h_n = x_{n+1} - x_n$ et C , est une constante. Parce que ce n'est pas vrai de certaines méthodes de collocation populaires, nous insistants sur le fait important que cette borne est vraie pour tout x dans $[a, b]$ après $s(X)$ est calculer sur un maillage avec `bvp4c`, il peut être évalué a peu de frais a tout x , ou un ensemble de x , dans $[a, b]$ avec la fonction `bvpval`.

Parce que BVPs peuvent avoir plus d'une solution, les codes de BVP obligent les utilisateurs à fournir une Estimation pour la solution souhaitée. L'estimation comprend estimation d'un maillage initial Révèle que le comportement de la solution souhaité. Les codes ensuite adapté le maillage de manière à obtenir une solution numérique exacte avec un nombre réduit de points de maillage. Venir avec suffisamment bonne supposition est souvent la partie la plus difficile de résoudre un BVP [34]. `Bvp4c` adopte une approche inhabituelle pour le contrôle d'erreur qui lui permet de traiter avec suppositions pauvres. La continuité de $s(X)$ sûr $[a, b]$ et collocation aux extrémités de chaque sous-intervalle implique que $s(X)$ a également une dérivée continue sur $[a, b]$ pour une telle approximation, le résidu $r(x)$ dans l'équation différentielle est définie par :

$$r(x_n) = s'(x) - f(x, s(x)) \quad (\text{A.8})$$

Autrement dit, cela dit que $s(X)$ est la solution exacte d'ODEs perturbent.

$$s'(x) = f(x, s(x) + r(x)) \quad (\text{A.9})$$

De même, le résidu dans les conditions aux limites est $g(s(a), s(b))$. `Bvp4c` contrôle les tailles de ces résidus. Si les résidus sont uniformément petits, $s(X)$ est une bonne solution dans le sens que cet est la solution exacte d'un problème proche de celui fourni au solveur. En outre, pour un problème relativement bien conditionne, les petits impliquent que $s(X)$ est proche de $y(X)$, même quand h n'est pas assez petit pour que le quatrième ordre de convergence est évident. Les codes de techniques de tir peuvent également être décrite comme contrôlant la taille de ces résidu : à chaque étape, un code d'IVP contrôle l'erreur locale, ce qui équivalent à contrôler la taille du résidu d'un prolongement continu approprié de formule utiliser, et le résolveur d'équations non linéaires est utilisé pour trouver des valeurs initiales pour lesquelles le

résiduel dans les conditions aux limites est faible. La suppression résiduelle a des vertus importantes : les résidus sont bien définis, peu importe à quel point la solution approchée, et les résidus peuvent être évalués peu importe ou simplement en évaluation $f(x, s(x))$ ou $g(s(a), s(b))$. Bvp4c est basée sur des algorithmes qui sont plausibles, même lorsque le maillage initial est très faible ; mais fournir des résultats corrects que h tend vers 0 [34]. Ils exploitent des propriétés très intéressantes de la méthode de Simpson.

BVPs se posent dans les formes les plus diverses. A peu près tout BVPs peuvent être formulés pour solution avec bvp4c. La première étape consiste à écrire l'ODE comme un système de premières équations différentielles d'ordre.

C'est une tâche familière, car elle doit également être faite pour IVP solveur de MATLAB. L'idée de base est d'introduire de nouvelles variables, une pour chaque variable dans le problème d'origine et l'autre pour chacun de ses dérivés à un de moins que le dérivé le plus élevé apparaisse. C'est tout ce qui est nécessaire pour résoudre un IVP, mais BVP peut-être beaucoup plus compliqué : comme nous l'avons déjà vu, contrairement IVPs, problèmes aux limites n'ont pas nécessairement une solution, et quand ils le font, la solution n'est pas nécessairement unique.

En effet, BVP implique généralement des valeurs de paramètres pour lesquels le problème a une solution. En outre, les singularités de toutes sortes ne sont pas du tout inhabituel [35]

A.5 conclusions :

Dans cette partie nous avons rappelé succinctement quelque notion sur les équations différentielles ordinaires et nous avons présenté brièvement la méthode qui est utilisée par le solveur bvp4c.

Dans le chapitre suivant nous allons entamer l'exposition des résultats ainsi que l'analyse et l'interprétation de ces derniers.

Résumé :

Ce travail vise à étudier numériquement l'écoulement convectif d'un nanofluide (eau-aluminium) dans une conduite verticale, dans cette thématique nous avons étudiés un écoulement considéré permanent, incompressible et unidirectionnel dans un canal vertical. Pour cela nous avons eu recours aux équations de Navier-Stokes et aux équations de conservations par lesquelles nous avons aboutis à deux équations différentielles ordinaires que nous avons résolues numériquement par la méthode de différences finies avec le solveur `bvp4c` par le logiciel MATLAB afin de définir l'influence de certains paramètres adimensionnels tel que le nombre de Brinkman et la fraction volumique, le nombre de Richardson, la température de référence et le gradient de pression sur les profils de vitesses et de températures et aussi sur la variation du nombre de Nusselt dans les deux cas symétrique et asymétrique.

Mots clés : convection mixte, nanofluide, conduite verticale.

Abstract :

This work aims to study numerically the convective flow of a nanofluid (water-aluminum) in a vertical pipe, in this theme we studied a flow considered permanent, incompressible and unidirectional in a vertical channel. To do this, we have used the Navier-Stokes equations and the conservation equations by which we have come up with two ordinary differential equations which we have solved numerically by the finite difference method with the `bvp4c` solver by the MATLAB software in order to define the influence of certain dimensional parameters such as the Brinkman number and the volume fraction, the Richardson number, the reference temperature and the pressure gradient on the velocity and temperature profiles and also on the variation of the Nusselt number in both symmetrical and asymmetrical cases.

Keywords : mixed convection, nanofluid, vertical channel.