



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en
Filière : **Génie Mécanique**
Spécialité : **Installation Energétique et Turbomachines**

Présentée par : **KOUFI Mohamed**

Thème

Simulation numérique de l'Effet du champ magnétique sur le transfert thermique dans les nanofluides

Soutenu le, 16 /09/2021

Devant le Jury :

BAGHDAD Mohammed	Encadreur	M.C.A	Univ-Tissemsilt
BENLEKKAM Mohamed Amine	Examineur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
TRARI Tayeb	Examineur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2020-2021



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en
Filière : **Génie Mécanique**
Spécialité : **Installation Energétique et Turbomachines**

Présentée par : **KOUFI Mohamed**

Thème

Simulation numérique de l'Effet du champ magnétique sur le transfert thermique dans les nanofluides

Soutenu le, 16/09/2021

Devant le Jury :

BAGHDAD Mohammed	Encadreur	M.C.A	Univ-Tissemsilt
BENLEKKAM Mohamed Amine	Examineur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
TRARI Tayeb	Examineur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2020-2021

Remerciements

Toute la gratitude et le merci à ALLAH de m'avoir donné la santé, le courage, la force et la patience de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à remercier en premier lieu et très chaleureusement mon encadreur Dr. Mohammed BAGHDAD, Enseignant et Doyen de Faculté Science et Technologie à l'université de Tissemsilt, de m'avoir suivi et dirigé tout au long de la réalisation de ce travail, et pour ses précieux conseils.

Un remerciement chaleureux est adressé à Monsieur BENLEKKAM M. enseignant à l'Université de Tissemsilt pour avoir accepté d'intervenir comme président du jury.

Je remercie également Monsieur TRARI T. enseignant à l'Université de Tissemsilt pour accepter d'examiner mon travail.

Je remercie très sincèrement tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin nos remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'universitaire de Tissemsilt.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon très Cher Père.

À ma très Chère Mère

À mon Frères Soufyane.

À tous mes Sœurs.

À mes chers et fidèles Amis

Hakim Fethi Noureddine Mohamed

Lakhdar Hafid.

À toutes la famille koufi.

À toute la promotion Génie mécanique.

Résumé

La présente étude examine numériquement les effets du transfert de la chaleur des nanofluides dans un tube circulaire soumis à un flux de chaleur constant et un champ magnétique. L'écoulement visqueux turbulent de AL_2O_3 -eau est étudié en monophasé. Les conditions d'écoulement turbulent sont considérées avec un nombre de Reynolds allant de 3500 à 9500 et ont utilisé quatre concentrations volumiques de nanoparticules de AL_2O_3 -eau (0.1, 0.5, 1 et 2 %) avec un nombre de Hartmann 10, 20 et 40. En résolvant numériquement les équations de continuité, d'énergie, de quantité de mouvement, à l'aide du code commercial *Fluent*. Les effets de régime d'écoulement, flux de chaleur et le champ magnétique sur les variables d'écoulement et le transfert thermique ont été discutés numériquement et expliqués graphiquement.

Mots clés: transfert de la chaleur, nanofluides, champ magnétique, tube circulaire.

Abstract

The present study numerically examines the effects of heat transfer from nanofluids in a circular tube subjected to a constant heat flow and a magnetic field. The turbulent viscous flow of AL_2O_3 -water is studied in single phase. Turbulent flow conditions are considered with a Reynolds number ranging from 3500 to 9500 and used four volume concentrations of AL_2O_3 -water nanoparticles (0.1, 0.5, 1 and 2%) with a Hartmann number of 10, 20 and 40. By solving the equations of continuity, energy, momentum numerically, using the *Fluent* business code. The effects of flow regime, heat flux and magnetic field on flow variables and heat transfer have been discussed numerically and explained graphically.

Keywords: heat transfer, nanofluids, magnetic field, circular tube.

التلخيص

تبحث الدراسة الحالية عددًا في آثار انتقال الحرارة من السوائل النانوية في أنبوب دائري يخضع لتدفق حراري ثابت و مجال مغناطيسي. تمت دراسة التدفق اللزج المضطرب لمياه AL_2O_3 على مرحلة واحدة. تعتبر ظروف التدفق المضطرب مع عدد رينولدز الذي يتراوح من 3500 إلى 9500 و استخدمت أربعة تراكيز حجمية من جزيئات الماء النانوية AL_2O_3 (0.1، 0.5، 1 و 2%) مع رقم هارتمان 10 و 20 و 40. من خلال حل معادلات الاستمرارية و الطاقة و مقدار الحركة عددًا. باستخدام رمز التجاري *Fluent*. تمت مناقشة تأثيرات نظام التدفق و التدفق الحراري و المجال المغناطيسي على متغيرات التدفق و نقل الحرارة رقميًا و شرحها بيانيًا.

الكلمات المفتاحية: نقل الحرارة، السوائل النانوية، المجال المغناطيسي، الأنبوب الدائري.

Nomenclature

Notations latines

B	champ magnétique [$\text{kg s}^{-2}\text{A}^{-1}$].
C_p	la chaleur spécifique à pression constante [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$].
D_h	Diamètre hydraulique [m].
D_k	diffusion turbulence.
\bar{F}	La force électromagnétique [N].
g	Accélération de la pesanteur [m s^{-2}].
G_b	interaction vitesse-pression moyenne
G_k	le terme de production
h	Coefficient de transfert de chaleur [$\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$]
k	Conductivité thermique [$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$]
L	Longueur caractéristique [m].
m	La masse [kg].
p	La pression [Pa].
P	périmètre [m].
q	La charge électrique de l'ion [C].
S	Aire de la surface [m^2]
T_{ext}	Température externe [K].
T_p	Température des parois [K].
T_s	Température de surface du solide [$^{\circ}\text{C}$]
T_{∞}	Température du fluide loin de la surface du solide [$^{\circ}\text{C}$]
U	vitesse moyenne de l'écoulement. [m s^{-1}].
V	La vitesse du fluide [m s^{-1}].
v_s	Volume des nanoparticules solides [m^3].
v_f	Volume du fluide de base [m^3].
x_i	Les coordonnées arbitraires
Y_M	le terme d'interaction des pressions fluctuantes
$\bar{\rho}\varepsilon$	la dissipation de k

Les indices

c, n, m constantes dépendant des caractéristiques géométriques

f	fluide de base.
nf	Nanofluide
s	Nanoparticules.
i	Vecteur unitaire suivant x
j	Vecteur unitaire suivant y
AL_2O_3	oxyde d'aluminium

Symbole Grecque

α	la diffusivité thermique [$m^2 s^{-1}$]
β	Coefficient de dilatation ou d'expansion thermique [$1/K$].
φ	La fraction volumique
ρ	la masse volumique. [$kg m^{-3}$].
ν	viscosité cinématique du fluide. [$m^2 s^{-1}$].
μ	viscosité dynamique du fluide [$kg m^{-1} s^{-1}$].
μ_0	La perméabilité magnétique du vide [$kg m A^{-1} s^{-1}$].
δ_{ij}	Le symbole de Kronecker
σ	Constante de Stefan [$5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$]
σ_f	conductivité électrique
ε	Facteur d'émission de la surface
dQ	Flux de chaleur [W].

Nombres sans dimensions

Gr	Nombre de Grashof
Ha	Nombre de Hartmann
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prantl
Ra	Nombre de Rayleigh
Re	Nombre de Reynolds
Rm	Nombre de Reynoldsmagnétique

Abréviation

CFD	Computational Fluid Dynamics.
MHD	Magnétohydrodynamiques
2D, 3D	Dimension

Liste de figures

Figure.2.1	Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection entre un solide (T_s) et fluide en mouvement (T_∞).....	9
Figure.2.2	Schéma de la convection forcée.....	10
Figure.2.3	Principe de la conduction thermique, le flux de chaleur dQ qui circule en x	12
Figure.2.4	Principe du rayonnement thermique	13
Figure.2.5	Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape.....	14
Figure.2.6	Courant induit dans un fluide conducteur en présence d'un champ magnétique...	20
Figure.2.7	(a et b) Effet du champ magnétique sur l'écoulement du fluide conducteur, (c) Loi de la main droite. (Ligne bleue: champ magnétique, ligne mauve: courant, ligne verte: mouvement.).....	21
Figure.3.1	<i>a.</i> Géométrie de tube cylindrique ; <i>b.</i> Dimension de la géométrie de tube cylindrique.....	22
Figure.3.2	Facteurs de sous relaxation et types de discrétisation utilisés.....	30
Figure.4.1	Effet de champs magnétique et la fraction volumique des nanoparticules sur le nombre de Nusselt, <i>a.</i> $Re = 3500$, <i>b.</i> 5000, <i>c.</i> 6500, <i>d.</i> 8000, <i>e.</i> 9500.....	32
Figure.4.2	Effet de régime d'écoulement sur température radiale à la section avec $x = L/2$, $Ha = 20$ et $\varphi = 1\%$	33
Figure.4.3	Effet de régime d'écoulement sur température axiale avec $Ha = 20$ et $\varphi = 1\%$...	34
Figure.4.4	Effet de champs magnétique sur température radiale à la section avec $x = L/2$, $Re = 6500$ et $\varphi = 1\%$	34
Figure.4.5	Profils des vitesses axiales.....	35

Liste de tableaux

Tableau.3.1	Propriétés thermophysiques du fluide de base eau pure et nanoparticule.....	26
Tableau.3.2	Constantes du modèle <i>k-ε standard</i>	29

Sommaire

Nomenclature.....	i
List des figures.....	iii
List des tableaux	iv
Sommaire.....	v

Chapitre 1 Analyse Bibliographique

1.1	Introduction.....	1
1.2	État de l'art.....	2
1.2.1	Travaux antérieures sur les nanofluides.....	2
1.2.2	Effet du champ magnétique sur le transfert thermique.....	6
1.3	Objectif.....	7

Chapitre 2 Généralité sur le transfert thermique et les nanofluides

2.1	Introduction.....	8
2.2	Transfert thermique.....	8
2.2.1	Convection.....	8
2.2.2	Conduction.....	12
2.2.3	Rayonnement.....	11
2.3	Nanofluides.....	13
2.3.1	Fabrication et préparation des nanofluides.....	14
2.3.2	Applications des nanofluides.....	15
2.3.3	Les avantages et les inconvénients des nanofluides.....	15
2.4	Nombres adimensionnels.....	15
2.4.1	Nombre de Reynolds.....	15
2.4.2	Nombre de Nusselt.....	16
2.4.3	Nombre de Grashof.....	17
2.4.4	Nombre de Prantl.....	17
2.4.5	Nombre de Rayleigh.....	18
2.4.6	Nombre de Hartmann.....	18
2.5	Champ magnétique.....	18
2.5.1	Relation entre courant électrique et champ magnétique.....	19
2.5.2	Magnétohydrodynamique.....	19
2.5.3	Loi de la force de Lorentz.....	20

2.6	Différentes modélisations de la MHD.....	21
2.6.1	Magnétohydrodynamique idéale.....	21
2.6.2	Magnétohydrodynamique résistive.....	21

Chapitre 3 Mise en Equation

3.1	Introduction.....	22
3.2	Géométrie du problème.....	22
3.3	Propriétés thermophysiques de nanofluide.....	23
3.3.1	Fraction volumique.....	23
3.3.2	Masse volumique.....	23
3.3.3	Conductivité thermique.....	24
3.3.4	Viscosité dynamique.....	24
3.3.5	Chaleur spécifique.....	25
3.3.6	Coefficient d'expansion thermique.....	25
3.3.7	Diffusivité thermique.....	26
3.3.8	Conductivité électrique du nanofluide.....	26
3.4	Equations gouvernantes.....	26
3.4.1	Equation de continuité.....	27
3.4.2	Equation de quantité de mouvement.....	27
3.4.3	Equation d'énergie.....	27
3.5	Modèle de turbulence (Modèle $k-\varepsilon$ Standard)	28
3.6	Conditions aux limites.....	30
3.7	Résolution numérique.....	30

Chapitre 4 Résultats et Discussion

4.1	Introduction.....	31
4.2	Nombre de Nusselt.....	31
4.3	Champs de température.....	33
4.4	Profils des vitesses	35
	Conclusion.....	36
	Référence.....	37

Chapitre 1

Analyse Bibliographique

1.1 Introduction

Le transfert thermique est une science fondamentale qui étudie le taux de transfert d'énergie thermique. Le transfert de chaleur est courant dans les systèmes d'ingénierie et d'autres aspects de la vie. Il joue un rôle important dans la conception de nombreux équipements, tels que les radiateurs de voiture, les capteurs solaires, divers composants des centrales électriques et même les engins spatiaux. L'épaisseur d'isolation optimale des murs et des toits de la maison, des conduites d'eau chaude ou de vapeur ou des chauffe-eau est à nouveau déterminée sur la base d'une analyse du transfert de chaleur avec des considérations économiques. Le transfert de chaleur peut être effectué par trois mécanismes différents, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement. Par conséquent, des connaissances de base dans ce domaine sont essentielles pour comprendre et maîtriser l'application pratique de ces phénomènes.

La nécessité d'améliorer le transfert thermique des fluides a donné naissance à une nouvelle catégorie appelée nanofluides. Maxwell (1873) a d'abord introduit le concept de dispersion de particules solides dans un fluide. Il disperse des particules de taille millimétrique et micrométrique dans le fluide de base pour améliorer ses propriétés thermophysiques.

Les nanofluides sont des fluides caloporteurs avancés qui contiennent des nanoparticules (généralement de 1 à 100 nm) dispersées dans un liquide conventionnel (tel que l'eau). Le terme nanofluide utilise par **Choi [1]**. En ajoutant des nanoparticules, il est bien connu que la conductivité thermique des solides est supérieure à celle des liquides. Les propriétés thermophysiques du fluide, c'est-à-dire la conductivité thermique, la viscosité dynamique, la capacité thermique et la densité ont été considérablement modifiées. Cette modification dépend de plusieurs paramètres, tels que le type de matériau du fluide de base et des particules, leur taille, leur concentration, la température moyenne, le mouvement brownien, et est liée à la taille nanométrique des particules, minimisant les problèmes de décantation rencontrés avec les particules plus grosses, réduction de l'érosion dans le canal. Les fluides caloporteurs actuellement disponibles, sont largement utilisés dans de nombreux domaines

industriels, tels que les procédés de chauffage, le refroidissement, la production chimique, la microélectronique, la production d'électricité et l'air.

Cependant, l'application de ces fluides a rencontré des problèmes liés à leur stabilité, à l'encrassement et à l'érosion, grâce à la nanotechnologie. Ce sont des solutions contenant des nanoparticules en suspension dans un fluide de base. En raison de leur capacité à améliorer les performances de transfert de chaleur, les nanofluides peuvent être utilisés dans une variété d'applications domestiques et industrielles. Les nanofluides ont généralement une bonne conductivité thermique et électrique, par conséquent, la présence d'un champ magnétique peut induire une magnétohydrodynamique.

1.2 État de l'art

1.2.1 Travaux antérieurs sur les nanofluides

Le transfert de chaleur est un sujet qui continue de susciter un grand intérêt. Cet intérêt se reflète dans de nombreuses applications techniques et industrielles. La nécessité d'améliorer le transfert de chaleur est au centre de nombreuses études. L'une des méthodes utilisées pour améliorer les échanges thermiques consiste à ajouter des nanoparticules aux liquides (nanofluides). En raison de l'importance du problème, un grand nombre d'études numériques, expérimentales et analytiques ont été menées. Les recherches dans ce domaine se concentrent sur le transfert thermique en flux laminaires et turbulents avec des flux de chaleurs sur les parois. A cet égard, La possibilité d'augmenter la surface de contact entre le liquide et les particules en changeant la forme des particules a été étudiée par **Hamilton et Crosser [2]**. Ils ont obtenu une nouvelle expression de la conductivité thermique effective d'un mélange solide-liquide. Il comprend un coefficient appelé coefficient sphérique, qui représente l'influence des particules de différentes formes sur la conduction effective et le coefficient de transfert de chaleur. Plus tard, d'autres paramètres ont été étudiés, tels que l'épaisseur des molécules liquides autour des particules. **Pak et Cho [3]** ont étudié le transfert de chaleur des nanofluides eau- Al_2O_3 et eau- TiO_2 par convection dans un état turbulent, et ils ont constaté que le nombre de Nusselt du nanofluide augmente avec la fraction volumique des nanoparticules en suspension et le nombre de Reynolds

Les technologies de nanofluides répondent à d'énormes améliorations du flux de chaleur. Comparé aux métaux et aux oxydes métalliques, le transfert de chaleur dans les fluides traditionnels (tels que l'eau, le glycol et l'huile) a une conductivité thermique faible. Par

conséquent, le fluide contenant des particules solides en suspension devrait avoir de meilleures performances de transfert de chaleur.

Xuan et al, [4] et Das et al, [5] ont étudié le transfert de chaleur par convection et caractéristiques d'écoulement des nanofluides. Leurs résultats ont montré que le coefficient de transfert de chaleur convectif augmente avec la vitesse d'écoulement et la fraction volumique des nanoparticules, et est supérieur à celui de l'eau pure.

Ding et al, [6] ont étudié l'utilisation du nanofluide d'alumine dans un tube horizontal dans des conditions d'écoulement laminaire et signalent une augmentation significative du transfert de chaleur. **Lee et Modawar et al, [7]** ont étudié l'utilisation des nanofluides d'alumine ont été utilisés dans un écoulement laminaire à microcanaux et une augmentation significative du transfert de chaleur a été observée. **Choi [8]** a constaté que pour Al_2O_3 avec une concentration volumique comprise entre 1% et 5%, la conductivité thermique effective du mélange eau- Al_2O_3 augmentait de 20%. **Choi et al, [9]** ont été montré que l'ajout de certains types de nanoparticules au liquide, même à très faible concentration (1% en volume), augmentera la conductivité thermique de ce dernier de 150%. **Roy et al, [10]** ont été menée une étude numérique pour évaluer le transfert de chaleur et le taux de cisaillement de paroi de l'écoulement laminaire radial dans le système de refroidissement. Ils ont utilisé un nanofluide (Al_2O_3 /eau) et comparé son efficacité avec celle de l'eau, du glycol et du pétrole.

Maïga et al, [11] ont montré que si la concentration volumique ou le nombre de Reynolds augmente, le coefficient de transfert thermique de la paroi et le taux de cisaillement sont importants. **Maïga et al, [12]** ont proposé une formule numérique pour étudier le transfert de chaleur par convection forcée (eau, Al_2O_3) du fluide dans le tube chauffant, ils utilisent un modèle monophasique. Les résultats ont montré que le transfert de chaleur augmentait avec l'augmentation de la fraction volumique. Le transfert de chaleur par convection de particules de nanofluide Al_2O_3 à base d'eau (diamètre 27-56 nm) à travers un tube de cuivre d'un diamètre de 4.5 mm et d'une longueur de 970 mm sous flux laminaire a été étudié par **Wen et ding [13]**. Ils ont découvert que si la concentration en particules et le nombre de Reynolds sont augmentés, l'inclusion de nanoparticules d' Al_2O_3 peut augmenter considérablement le coefficient de transfert de chaleur par convection. De plus, l'augmentation du coefficient de transfert thermique est particulièrement importante dans la zone d'entrée, et diminue à mesure que la distance axiale augmente. **Heris et al, [14]** ont étudié le flux laminaire de deux nanofluides (CuO /eau et Al_2O_3 /eau) à travers un tube circulaire en cuivre d'une longueur de 1 m et un diamètre intérieur de 6 mm et un tube extérieur en acier inoxydable d'une épaisseur de 0.5 mm et d'un diamètre de 32 mm. La vapeur saturée a été distribuée pour créer une

température constante sur le mur. La comparaison des résultats expérimentaux montre que le coefficient de transfert thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Péclet. Ils montrent également que le transfert thermique du nanofluide ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$) augmente le mieux. **Namburu et al, [15]** ont proposé un modèle monophasique est également pour étudier les caractéristiques de transfert de chaleur des nanofluides dans un tube circulaire, où l'écoulement est turbulent. On constate que pour les petits diamètres, la viscosité et le nombre de Nusselt sont plus importants. **Mansour et al, [16]** ont étudié l'influence de l'incertitude des propriétés physiques du nanofluide $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ sur ses performances thermo-hydrodynamiques, l'écoulement laminaire et la convection forcée turbulente sont entièrement développés dans un tube avec un flux de chaleur uniforme. Ils ont analysé deux types de problèmes : le remplacement de fluides simples par des nanofluides dans un dispositif donné et la conception de dispositifs basiques de transfert de chaleur. Ils ont montré que la puissance de pompage requise pour un taux de transfert de chaleur fixe et une longueur de tube requise ainsi qu'un débit massique et une température globale fixes varient considérablement avec les propriétés thermophysiques du nanofluide. **Daunghongsuk et al, [17]** ont étudié la stabilité de certains nanofluides dans le temps peut provoquer l'agglomération des nanoparticules et modifier leur conductivité thermique. Cependant, dans l'état actuel des recherches, ces deux effets sont encore moins importants lors de l'utilisation de nanofluides que lors de la mise en suspension de particules traditionnelles. **Yang [18]** a utilisé de nanofluides comme fluide caloporteur dans l'échangeur et montre que l'ajout de nanoparticules au liquide va augmenter sa viscosité et donc la pression va chuter. **Aminossadati et Ghasemi [19]** ont étudié le refroidissement par convection naturelle d'une cavité remplie de nanofluide avec une source de chaleur noyée. Les parois supérieures et verticales du boîtier sont maintenues à une température relativement basse. Les effets de paramètres connexes tels que le nombre de Rayleigh, l'emplacement et la géométrie de la source de chaleur, le type de nanofluide et la fraction volumique de nanoparticules sur les performances de refroidissement sont analysés. Les résultats montrent que l'ajout de nanoparticules à de l'eau pure peut améliorer les performances de refroidissement, en particulier à faible nombre de Rayleigh. De plus, le type de nanoparticules ainsi que la longueur et l'emplacement de la source de chaleur ont une influence significative sur la température maximale de la source de chaleur. Une étude numérique sur la convection naturelle de nanofluides Al_2O_3 dans une enveloppe circulaire verticale est réalisée par **Matin et Vaziri [20]**. La coque est exposée à un flux de chaleur variable par le bas. La paroi inférieure du boîtier est divisée en six parties sans fin, dont chacune reçoit une partie de la

chaleur totale, c'est-à-dire que le flux appliqué à chaque partie est différent. Les parois latérales sont maintenues à une température constante et la paroi supérieure est supposée adiabatique. L'objectif est de trouver la répartition du flux de chaleur avec le meilleur coefficient de transfert de chaleur. En plus de la distribution du flux de chaleur, le nombre de Rayleigh ($10^4 \leq Ra \leq 10^6$), la fraction volumique des nanoparticules ($\phi < 0.08$), le rapport d'aspect ($A = 0.5, 1$ et 1.5) sur l'isotherme, et le Nusselt nombre ont été analysés. Ils ont observé qu'il existe des conditions physiques qui optimisent les caractéristiques de transfert de chaleur. **Pouranfard et al, [21]** a étudié expérimentalement la forte réduction des nanofluides dans des tubes horizontaux sous écoulement turbulent. **Bianco et al, [22-24]** ont étudié numériquement le transfert de chaleur convectif de nanofluides dans un tube circulaire dans des conditions d'écoulement turbulent, un modèle mono-phase et diphasique sont comparés. Ils ont mentionné que des propriétés physiques plus précises des nanofluides peuvent être utilisées pour améliorer la précision des modèles. Différents modèles de turbulence sont utilisés pour étudier numériquement le transfert de chaleur convectif turbulent de nanofluides dans un tube circulaire sous l'action d'un flux de chaleur à paroi régulière comme celui de **Sekrani et al, [25]**. **Manay and Mandev [26]** ont étudié expérimentalement le transfert de chaleur de la convection mixte dans des micro-canaux circulaires et ont utilisé de l'eau et du nanofluide à base d'eau SiO_2 avec des concentrations en volume de 0.2 et 0.4 %. Lorsque la fraction volumique est de 0.2 et 0.4%, le transfert de chaleur global augmente de 12-14% et 29-32%, respectivement. Une expérience aborde le transfert de chaleur du nanofluide argent-eau par convection forcée dans un tube circulaire avec des conditions de flux de chaleur uniformes par **Iyahraja et al, [27]**. Même avec l'ajout de nanoparticules d'argent à faible concentration, les performances thermiques ont été considérablement améliorées. Pour une concentration de 0.1 % et $Re = 2.1 \times 10^4$, le nombre de Nusselt passe à 32.6%. **Arunachalam et al, [28]** ont exploré expérimentalement les propriétés hydrothermales des nanofluides alumine-eau et des nanofluides hybrides Cu-alumine-eau s'écoulant dans des tubes droits avec et sans inserts en ruban torsadé coupé en V. Le nanofluide hybride Al_2O_3 -Cu/eau avec une concentration de 0.01 % donne des propriétés hydrothermales supérieures. Le coefficient de frottement est supérieur à celui du nanofluide Al_2O_3 /eau et du fluide de base. **Ny et al, [29]** ont utilisé le nanofluide argent/graphène (Ag/Heg) pour améliorer le transfert de chaleur par convection forcée dans le tuyau. Les résultats montre que lorsque le nombre de Reynolds passe de 10^5 à 2×10^5 , une augmentation maximale du nombre de Nusselt d'environ 17.97 % est atteinte à une concentration volumique de 0.1%. Diverses concentrations volumiques de nanofluides d'eau Ag/Heg sont utilisées pour améliorer le transfert de chaleur

dans les tuyaux circulaires par **Zainal et al**, [30]. Les résultats montrent que lorsque la fraction volumique augmente, le nombre de Nusselt et le coefficient de transfert thermique diminuent.

1.2.2 Effet du champ magnétique sur le transfert thermique

L'analyse des écoulements MHD a été trouvée dans plusieurs domaines métallurgiques, d'ingénierie et industriels. Une magnétohydrodynamique a plusieurs applications importantes, notamment la biomécanique, les technologies pétrolières, les études de plasma, les mesures de flux sanguin, les générateurs MHD, etc.

En présence d'un champ magnétique horizontal et d'une source de chaleur, la convection naturelle dans une cavité carrée chauffée latéralement remplie de lithium liquide a été étudiée numériquement par **Sarris et al**, [31]. Les deux paramètres principaux de ce problème sont le nombre de Rayleigh externe Ra_E , qui représente l'influence du gradient de température de paroi latérale, et le nombre de Rayleigh interne Ra_I , qui représente la force génératrice de la source. Ils ont constaté qu'à mesure que le rapport augmentait, le débit devenait oscillant. **Mahmoudi et al**, [32] ont étudié l'effet d'un champ magnétique sous la convection naturelle dans une cavité carrée remplie d'eau Al_2O_3 . Ils ont découvert que l'augmentation du nombre de Rayleigh peut améliorer le transfert de chaleur. Ils ont montré que le transfert de chaleur dépend de la direction du champ magnétique. **Mahmoudi et al**, [33] ont étudié le MHD dans une enceinte triangulaire remplie de nanofluide cuivre-eau. Ils ont découvert que la présence de particules d'anode améliore le transfert de chaleur lorsqu'il s'agit de faibles valeurs de Rayleigh. En revanche, il n'est pas sensible aux changements du nombre de Hartmann. **Mahmoudi et al**, [34] En réalisant une MHD dans une cavité trapézoïdale, on constate que l'influence des nanoparticules est plus prononcée aux faibles valeurs de Rayleigh et a un mode de conduction dominant. Concernant les cavités chauffées différemment, qui ont une inclinaison par rapport au plan horizontal et sont affectées par le champ magnétique, peu de travaux ont été trouvés. **Juel et al**, [35] Une étude expérimentale et numérique sur l'influence du champ magnétique sur la convection naturelle du gallium fondu est présentée ($Pr = 0,025$). Le champ magnétique est appliqué dans une direction perpendiculaire à la circulation principale. Ils ont prouvé que les oscillations trouvées dues à de grands changements de température peuvent être éliminées en appliquant un champ magnétique. **Hof et al**, [36] Les résultats de la recherche expérimentale de l'atténuation magnétohydrodynamique de la convection dans une cavité rectangulaire remplie de gallium sont rapportés. Ils ont étudié la suppression de la convection en appliquant des champs

magnétiques dans les trois directions. **Meherez et al, [37]** ont étudiée numériquement l'influence de l'inclinaison du champ magnétique sur le transfert de chaleur et l'influence sur l'entropie dans la cavité ouverte traversée par le nanofluide. **Kaseipoor et al, [38]** se sont focalisés sur l'analyse de la convection mixte dans le nanofluide (Cu-eau), qui remplit une cavité ventilée en forme de "T" affectée par un champ magnétique. Leurs résultats indiquent généralement que la présence de nanoparticules dans l'eau améliore le transfert de chaleur, tout comme l'augmentation du nombre de Reynolds et du nombre de Hartmann. **Ali et al, [39]** Sont étudiés Les effets du champ magnétique directionnel et du cylindre rotatif dans le canal rainuré, et il est rapporté que le transfert de chaleur moyen est significativement augmenté par l'augmentation du nombre de Reynolds et de la fraction volumique, mais diminue avec l'augmentation du nombre de Hartmann. En présence d'effets de champ magnétique, une étude numérique de convection mixte de différentes géométries a été réalisée par **Ali et al, [39, 40]**. Ils suggèrent que le taux de transfert de chaleur dépend de différents paramètres physiques et configurations géométriques. De plus, le taux de transfert de chaleur diminue avec l'augmentation de l'intensité du champ magnétique.

1.3 Objectif

L'objectif de ce mémoire est d'apporter une contribution sur la simulation numérique de l'écoulement de transfert thermique dans les nanofluide soumis à un champ magnétique. Pour atteindre cet objectif, le code de calcul *CFD Fluent* a été utilisé pour la prédiction de l'écoulement à l'intérieur d'un tube. La turbulence a été prise en compte en utilisant le modèle *k-ε* standard.

En plus de ce chapitre introducteur (Chapitre 1), qui contient une introduction, une revue bibliographique et une explication des objectifs du mémoire, les chapitres 2, 3 et 4 sont consacrés aux différentes parties du travail et leur combinaison forme le manuscrit du mémoire. Le chapitre 2 présente généralité sur les nanofluides, leurs applications et une petite définition sur le champs magnétique. Dans le troisième chapitre, les équations régissant le mouvement des fluides et le transfert de chaleur associé sont présentées. Le chapitre englobe également des détails sur la procédure numérique adoptée. Les résultats des simulations numériques obtenus sont exposés au chapitre 4. Une analyse des champs d'écoulement et de transfert thermique le long des tubes a été réalisée. Le mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre 2

Généralité sur le transfert thermique et les nanofluides

2.1 Introduction

Ce chapitre comprend une révision nécessaire associée aux transferts de chaleur et les nanofluides. Une brève définition et les différents modes de transfert thermique sont donnés. De plus, il présente la définition des nanofluides et leurs applications. L'écoulement de fluide et le transfert de chaleur se produisent à la fois dans des situations industrielles naturelles et artificielles. Il s'agit d'un sujet de longue date qui a été largement étudié à l'aide de différents modèles d'écoulement des fluides.

Le transfert de chaleur joue un rôle important dans la mécanique des fluides et se pose dans de nombreux domaines des sciences naturelles et appliquées. Les nanofluides sont des liquides de transfert de la chaleur qui ont été récemment développés et qui dispersent des nanoparticules solides. Des recherches récentes ont montré que les nanofluides améliorent la conductivité thermique et peuvent améliorer les propriétés de transport de chaleur des fluides, améliorant ainsi l'efficacité énergétique. Il existe donc un potentiel important d'application des nanofluides dans le domaine du transfert de chaleur amélioré, notamment dans des domaines tels que la géophysique, le génie pétrolier, les géosciences, la mécanique et la biologie.

2.2 Transfert thermique

2.2.1 Convection

Chaque fluide se déplace par rapport à un élément fixe (paroi, plaque, tube, etc.) à une température différente de la température du fluide, ou lorsque deux fluides de températures différentes entrent en contact, la convection se produit. Selon le schéma d'écoulement du fluide, la convection fait référence à la convection libre et à la convection forcée. Lorsqu'un courant électrique apparaît dans le fluide uniquement en raison de la différence de densité causée par le gradient de température, on peut dire que la convection est une convection

naturelle ou une convection libre. En revanche, si le mouvement du fluide est provoqué par une action extérieure, telle qu'une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. Si ces deux raisons existent en même temps, et que l'une d'elles est négligeable par rapport à l'autre, alors la convection est dite mixte [41], et les modes de transport implique le déplacement de fluides gazeux ou liquides (flux) et leur échange avec des surfaces à différentes températures. Par conséquent, il a tendance à s'élever pour flotter au-dessus des zones froides plus denses. Ceci explique l'apparition de boucles convectives. Ce mélange permet d'utiliser un seul radiateur ou tout le volume d'eau pour chauffer toute la pièce en ne chauffant que le fond de la marmite [42].

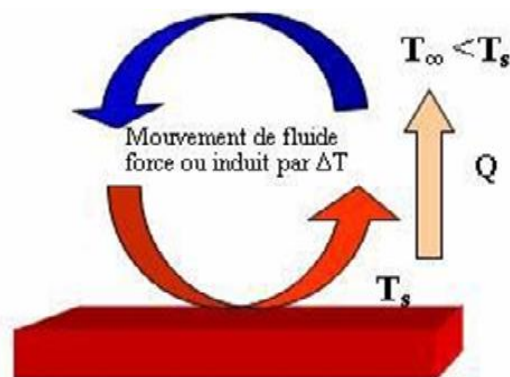


Figure 2.1 Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection entre un solide (T_s) et fluide en mouvement (T_∞) [41]

Le flux de chaleur échangé entre la surface et le fluide en mouvement est régi par la loi de Newton. La relation est donnée comme suit:

$$\Phi = h \times S (T_s - T_\infty) \quad (2.1)$$

Φ : Flux de chaleur transmis par convection [W]

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection [$\text{Wm}^{-2} \text{°C}^{-1}$]

T_s : Température de surface du solide [$^{\circ}\text{C}$]

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide [$^{\circ}\text{C}$]

S : Aire de la surface de contact solide/fluide [m^2]

a. Convection naturelle

Si le mouvement du fluide n'est dû qu'à des changements de densité, il s'agit de convection libre ou naturelle. Ces gradients de densité entraînent l'écoulement du fluide. Basé sur le fait que le déplacement de la matière : il ne fait donc intervenir que des fluides (liquides et gaz). Contrairement à la conduction du transfert de chaleur par contact, donc, comprendre le mécanisme de la convection naturelle est important pour accéder aux modèles et prédire l'impact sur l'environnement [43]. Les applications de convection naturelle sont

nombreuses :

- Chauffage d'une maison,
- Formation de courants océaniques,
- Formation des vents dans l'atmosphère,
- Isolation des bâtiments.

La relation de convection libre ou naturelle est :

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.2)$$

Le transfert de chaleur qui s'effectue suivant ce type de convection, obéit donc à la relation suivante (écoulement laminaire ou turbulent) [43]

$$Nu = c(Gr \times Pr)^n = c(Ra)^n \quad (2.3)$$

Où

c et n sont des constantes dépendant des caractéristiques géométriques, Gr est le nombre de Grashof, Pr est le nombre de Prandtl et Ra est le nombre de Rayleigh.

b. Convection forcée

La convection forcée se produit lorsque le mouvement se produit en raison d'un processus mécanique, et n'a rien à voir avec des phénomènes thermiques, tels que des pompes ou des ventilateurs, c'est donc le gradient de pression externe qui provoque le mouvement des particules fluides. Par conséquent, l'étude du transfert de chaleur par convection est étroitement liée à l'étude du transfert de chaleur. L'écoulement d'un fluide. [44]

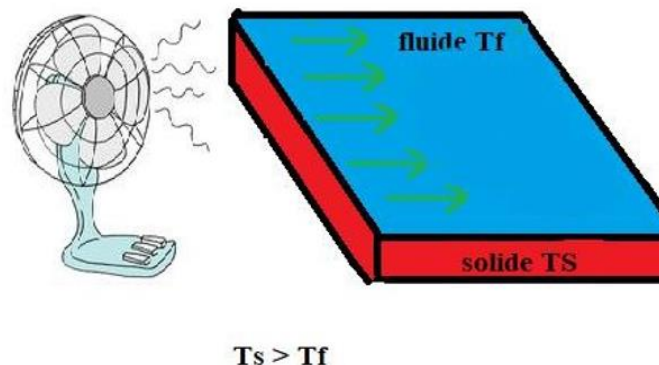


Figure 2.2 Schéma de la convection forcée [45]

La relation générale pour la convection forcée est $Nu=f(Re, Pr)$. Le nombre du Nusselt

donné par la relation suivante:

$$Nu = c Re^n \times Pr^m \quad (2.4)$$

Ou,

c , n et m sont des constantes dépendant des caractéristiques géométriques [44].

2.2.2 Conduction

La conduction est le transfert de chaleur d'une partie chaude vers une partie plus froide, c'est-à-dire le même objet ou deux objets en contact avec des objets sans mouvement de matière important. Ce mode peut être effectué dans les solides et les fluides. Cependant, c'est le seul mécanisme par lequel la chaleur peut traverser des solides opaques. En régime permanent, la loi de Fourier exprime la chaleur de base dQ traversant la surface S d'épaisseur dx en x au temps dt [45]. C'est le transfert de chaleur dans le milieu opaque, il n'y a pas de déplacement de matière, et pas de différence de température. La programmation de la chaleur par conduction dans le corps repose sur deux mécanismes différents : la transmission par vibration d'atomes ou de molécules et la transmission par électrons libres. Les nanofluides améliorent et amplifient la conductivité thermique. La conductivité thermique, notée k [W/m.K], est la capacité d'un matériau à conduire ou à transférer la chaleur. La conductivité thermique liée aux performances thermiques du fluide caloporteur est une caractéristique très importante [46]. La conduction est un mode de transfert de chaleur qui est provoqué par la différence de température entre deux zones du même milieu ou entre deux milieux en contact, et se produit sans déplacement global du matériau. L'énergie se diffuse dans le milieu et la température augmente progressivement (par exemple, si la cuillère est placée dans une plaque chauffante, sa queue s'étire et la chaleur est transférée à la queue de la cuillère par conduction) gaz ou liquide, l'énergie est transmise à travers contact direct entre les molécules, Il n'y a pas de déplacement moléculaire significatif. Dans un solide, la vibration de l'atome autour de sa position se transmet progressivement. Dans le cas des cristaux, la vibration du réseau présente une hétérogénéité, formant des « particules », à savoir des phonons. Ces phonons interagissent avec les électrons libres, c'est pourquoi la conductivité thermique et la conductivité électrique sont interdépendantes (par exemple, les métaux sont de bons conducteurs d'électricité et de chaleur).

La loi de Fourier est la loi principale qui décrit le processus de dégagement de chaleur. La relation est donc donnée comme suit:

$$dQ = k \times S \frac{dT}{dx} dt \quad (2.5)$$

dQ : Flux de chaleur transmis par conduction [W]

k : Conductivité thermique du milieu [$\text{Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur [m^2]

dT/dx : Gradient de température en x en [K^{-1}]

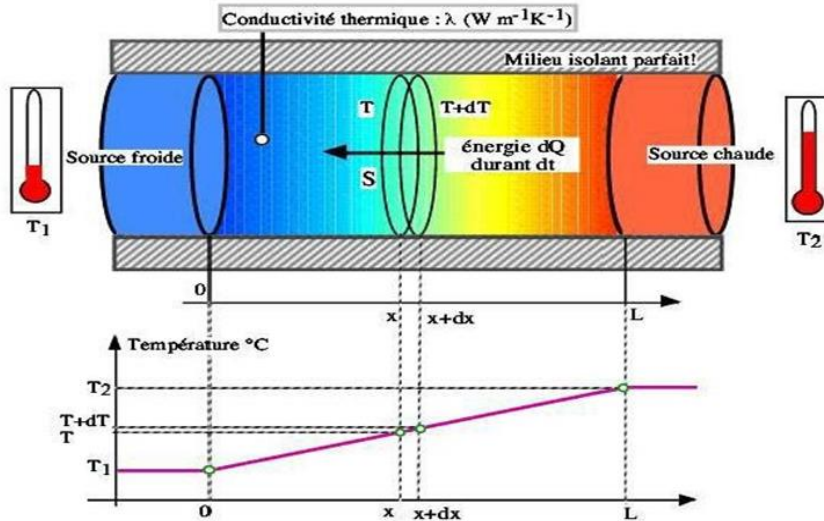


Figure 2.3 Principe de la conduction thermique, le flux de chaleur dQ qui circule en x [45]

2.2.3 Rayonnement

Le rayonnement est la seule transmission d'énergie sans aucun support matériel. Tout corps matériel à une température de zéro non absolu émettra un rayonnement sur sa surface en fonction de sa température et des conditions de surface. Il peut également absorber tout ou partie du rayonnement reçu des surfaces environnantes, de l'atmosphère environnante et du rayonnement solaire. Avec l'introduction du facteur de forme, l'équilibre thermique entre les flux sortant et entrant constitue le niveau d'échange thermique du corps. C'est le transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Le rayonnement consiste en l'échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent, comme le montre la figure (2.4). Ce flux peut prendre la forme suivante [47]. Le rayonnement thermique est le transfert de chaleur d'un objet à haute température à un autre objet à basse température. L'énergie est protégée par des ondes électromagnétiques (par exemple : infrarouge) ou par atténuation (par exemple : radioactivité alpha). Ce mode de transfert ne nécessite aucun support matériel, ni n'implique le mouvement des matériaux ou le contact entre les objets ou le support d'échange d'énergie [48].

La relation est donnée comme suit:

$$\Phi = \varepsilon \times \sigma \times s (T_2^4 - T_1^4) \quad (2.6)$$

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement [W]

σ : Constante de Stefan [$5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$]

ε : Facteur d'émission de la surface

T_1, T_2 : Températures des parois 1 et 2 [K]

S : Aire de la surface [m^2]

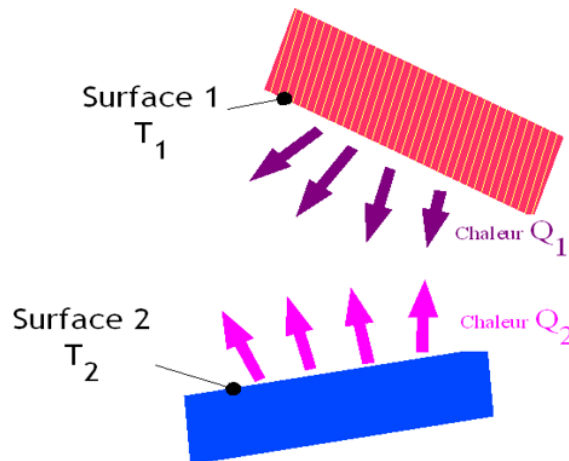


Figure 2.4 Principe du rayonnement thermique [49]

2.3 Nanofluides

Le nanofluide est une suspension colloïdale de nanoparticules solides dans un liquide. Des expériences récentes ont montré que la conductivité thermique des nanofluides est significativement plus élevée que celle des fluides de base. Parmi les nombreux avantages des nanofluides par rapport aux suspensions solides-liquides traditionnelles, il convient de mentionner que la surface spécifique est plus élevée, la suspension colloïdale est plus stable et la puissance de pompage nécessaire pour atteindre le taux de transfert de chaleur équivalent est plus faible. Deuxièmement, en modifiant le matériau, la concentration, la taille et la forme des particules, par rapport aux colloïdes congénitaux, le blocage des particules est réduit et le niveau de contrôle de la thermodynamique et des caractéristiques de transmission est amélioré. [50, 51]. Bien que des tentatives aient été faites pour expliquer les raisons physiques de cette amélioration des nanofluides, il existe encore de nombreuses lacunes. Il y a au moins quatre raisons pour lesquelles la théorie établie des nanofluides n'existe pas toujours [52].

— La difficulté la plus difficile est peut-être liée au problème multi-échelle. En fait, les nanofluides impliquent au moins quatre échelles : l'échelle moléculaire, la micro-échelle, la méso-échelle et la macro-échelle. La principale difficulté réside dans la façon

de corrélérer et d'optimiser l'interaction entre ces échelles.

— Le comportement thermique est trop différent des composites solide-solides ou des suspensions solides-liquides standards.

— Comprendre la physique derrière les nanofluides nécessite une approche multidisciplinaire.

2.3.1 Fabrication et préparation des nanofluides

Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories, les procédés physiques, comme le broyage mécanique et les procédés chimiques, comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique. Il y a deux manières pour obtenir un nanofluide,

a. Méthode en une seule étape

Consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules. Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur (figure 2.5). [53]

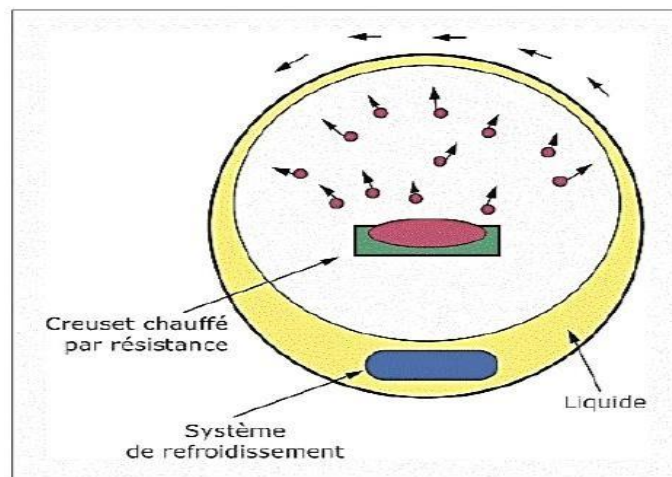


Figure 2.5 Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape [53]

b. Méthode en deux étapes

Il s'agit d'abord de produire des nanoparticules puis de les disperser dans le fluide de base. Afin d'obtenir une bonne dispersion, il est généralement nécessaire d'utiliser un agitateur rotatif ou des ondes ultrasonores pour une forte action mécanique pour briser les agglomérats. De plus, afin d'éviter l'agglomération causée par l'attraction entre les particules, la surface des particules est chargée en ajustant la valeur du pH, utilisant ainsi la répulsion

électrostatique [53].

2.3.2 Applications des nanofluides

Les nanofluides se caractérisent par leurs applications dans divers domaines, notamment industriels et techniques. Les nanofluides sont également utilisés pour refroidir les composants électriques et électroniques, les automobiles et les radars. Les nanofluides sont utilisés dans le domaine des énergies renouvelables pour augmenter le transfert de chaleur des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et augmenter la densité énergétique. Et son applicabilité dans la plupart des industries manufacturières, telles que les matériaux, les aliments et les boissons, la production chimique, le pétrole et le gaz [54].

2.3.3 Les avantages est les inconvénients des nanofluides

a. Les avantages de nanofluides

- Dispersion et stabilité élevées, principalement dues au mouvement brownien des particules.
- Grande surface de transfert de chaleur entre les particules et le fluide.
- Par rapport aux boues traditionnelles, il réduit les particules de colmatage, ce qui est bénéfique pour Ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés réglables, y compris la conductivité thermique et la mouillabilité la surface, en changeant selon les différentes concentrations de particules application. [55]

b. Les inconvénients du nanofluides

- Difficultés dans le processus de production.
- Manque de compréhension théorique du mécanisme responsable modifications d'attributs.
- Mauvaise caractérisation de la suspension.
- Manque de consensus sur les résultats obtenus par les différents chercheurs.
- Haute viscosité, faible chaleur spécifique.

2.4 Nombres adimensionnels

2.4.1 Nombre de Reynolds

C'est Reynolds, un ingénieur britannique en dynamique des fluides, qui a introduit ce nombre souvent utilisé dans les calculs d'écoulement. L'écoulement peut être laminaire, transitoire ou

turbulent. Dans le premier cas, le fluide s'écoule sous forme de lignes parallèles à la paroi. Dans le troisième cas, la notion de lignes n'existe plus, et le mouvement des particules fluides est aléatoire. Dans le second cas, l'écoulement du fluide est entre laminaire et turbulent. Afin de comprendre le régime d'écoulement, nous utilisons le nombre de Reynolds. Ce nombre est fonction de la densité, de la viscosité dynamique μ , de la vitesse moyenne et du diamètre hydraulique [56].

Le nombre de Reynolds il est défini comme :

$$Re = \frac{\rho \times U \times L}{\mu} = \frac{U \times L}{\nu} \quad (2.7)$$

U : vitesse moyenne de l'écoulement. [$m\ s^{-1}$].

L : Longueur caractéristique. [m].

ν :viscosité cinématique du fluide. [m^2s^{-1}].

μ : viscosité dynamique du fluide [$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$].

ρ : la masse volumique. [$kg\ m^{-3}$].

Pour les écoulements internes la dimension caractéristique du système à utiliser dans le calcul du nombre de Reynolds est le diamètre hydraulique [m] qui est donne par :

$$D_h = \frac{4 \times S}{P} \quad (2.8)$$

D_h : Diamètre hydraulique. [m].

S : La surface du tuyau. [m^2].

P : Est son périmètre. [m].

Si le nombre de Reynolds du système est plus petit que sa valeur critique Re_{crit} l'écoulement est laminaire, si par contre sa valeur dépasse Re_{crit} l'écoulement est turbulent [57].

— Ecoulement interne $Re_{crit} \approx 2300$

— Ecoulement externe $Re_{crit} \approx 300000$

2.4.2 Nombre de Nusselt

C'est le rapport entre le flux de chaleur transféré par convection et le flux de chaleur par conduction. Le nombre de Nusselt est défini comme [57]:

$$Nu = \frac{h \times L}{K} \quad (2.9)$$

L : Longueur caractéristique [m].

K : Conductivité thermique du fluide [$W\ m^{-1}K^{-1}$].

h : Coefficient de convection.

2.4.3 Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof est le rapport entre l'effet de flottaison par force motrice d'Archimède et l'effet résistif de l'écoulement.

$$Gr = \frac{g \times \beta \times L^3 \times (T_p - T_{ext})}{\nu^2} \quad (2.10)$$

g : Accélération de la pesanteur [ms^{-2}].

β : Coefficient de dilatation ou d'expansion thermique [$1/\text{K}$].

T_p : Température des parois [K].

T_{ext} : Température externe [K].

L : Longueur caractéristique [m].

ν : Viscosité cinématique [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$].

Le nombre de Grashof joue un rôle identique à Re en convection forcée, Le rapport de Gr/Re^2 détermine quelle type de convection [57] :

On a :

$Gr/Re^2 \ll 1 \Rightarrow$ convection forcée.

$Gr/Re^2 \gg 1 \Rightarrow$ convection naturelle.

$Gr/Re^2 \approx 1 \Rightarrow$ convection mixte.

2.4.4 Nombre de Prantl

Le nombre de Prantl est défini comme [57]:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.11)$$

α : la diffusivité thermique [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

Avec

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times C_p} \quad (2.12)$$

Le nombre de Prantl peut aussi être écrit comme :

$$Pr = \frac{\mu \times C_p}{k} \quad (2.13)$$

C_p : la chaleur spécifique à pression constante [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$].

k : la conductivité thermique [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$].

2.4.5 Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh regroupe les nombres de Prantl et Grashof et est donné par :

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g \times \beta \times L^3 (T_p - T_{ext})}{\nu \times \alpha} \quad (2.14)$$

Sa valeur nous indique si on est en laminaire ou turbulent pour un système en convection naturelle. [57]

2.4.6 Nombre de Hartmann

Est un nombre sans dimension utilisé en magnétohydrodynamique, il permet de comparer les effets magnétiques aux effets visqueux, il s'écrit :

$$Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma f}{\mu f}} \quad (2.15)$$

B_0 : champ magnétique [$\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$].

L : longueur caractéristique [m].

μ_f : viscosité dynamique [$\text{kgm}^{-1} \text{s}^{-1}$].

σ_f : conductivité électrique [$\text{A}^2 \text{s}^3 \text{m}^{-3} \text{kg}^{-1}$].

2.5 Champ magnétique

En physique, un champ magnétique est une grandeur caractérisée par des données d'intensité et de direction, définie en tout point de l'espace et déterminée par la position et la direction des aimants et des électroaimants, ainsi que par le déplacement des charges électriques. L'existence de ce champ entraîne l'existence de forces agissant sur des charges en mouvement (appelées forces de Lorentz), ainsi que divers effets (paramagnétisme, diamagnétisme ou ferromagnétisme selon les situations) affectant certains matériaux. L'amplitude de l'interaction entre le matériau et le champ magnétique est déterminée par la susceptibilité magnétique.

Le champ magnétique et le champ électrique forment ensemble les deux composantes du champ électromagnétique décrites par l'électromagnétisme. Les ondes qui mélangent les champs électriques et magnétiques peuvent se propager librement dans l'espace et la plupart des matériaux. Ces ondes sont appelées ondes électromagnétiques et correspondent à toutes les manifestations lumineuses dans tous les domaines de longueur d'onde (ondes radio, micro-

ondes, infrarouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma). Le sujet de l'étude du champ magnétique statique (indépendant du temps) est la magnétostatique [58].

2.5.1 Relation entre courant électrique et champ magnétique

Le courant électrique, plus généralement tout mouvement de charge électrique, produit un champ magnétique dont la valeur dépend de la quantité et de la vitesse de la charge électrique en mouvement.

La valeur du champ magnétique généré par le courant traversant un seul fil est assez faible, mais en raison de l'enroulement du fil qui forme la bobine, un champ magnétique puissant peut être obtenu [59].

2.5.2 Magnétohydrodynamique

La magnétohydrodynamique (MHD en abrégé) est une discipline, tout comme la thermodynamique, c'est un ensemble d'équations et de modèles. MHD est l'exemple le plus spectaculaire et le plus récent de fluide conducteur, étudiant le mouvement du fluide conducteur en présence d'un champ magnétique

Le débit MHD peut être très différent du débit hydrodynamique ordinaire équivalent. Le mouvement des particules métalliques à travers les lignes de force magnétique génère un courant électrique, qui interagit avec le champ magnétique pour générer une puissance électromagnétique (EM) pour contrer le mouvement du liquide. Même un champ magnétique faible peut fournir une force d'amortissement électromagnétique suffisante pour éliminer la plupart des turbulences et de l'instabilité en mouvement, éliminant ainsi de nombreux micro-défauts dans le cristal. Le taux d'amortissement dépendra en vertu de la force du champ magnétique appliqué aussi bien que son orientation en ce qui concerne la circulation convective [60].

La magnétohydrodynamique est le champ magnétique moyen, le liquide et le mouvement. La (figure 2.6) montre l'idée de base de MHD. La (figure 2.7) illustre le mécanisme d'influence de la force de Lorentz sur le mouvement des fluides. La loi de droite est illustrée dans la figure ci-dessous, qui détermine la direction de la force de Lorentz. Afin de simuler MHD, les équations de Maxwell doivent être résolues et couplées aux équations de Navier-Stokes.

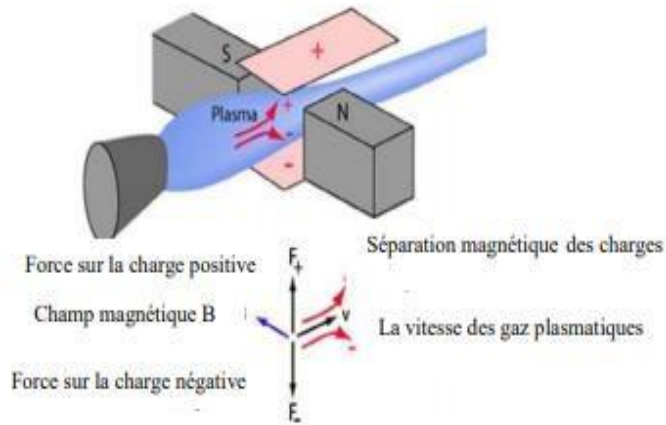


Figure 2.6 Courant induit dans un fluide conducteur en présence d'un champ magnétique [61]

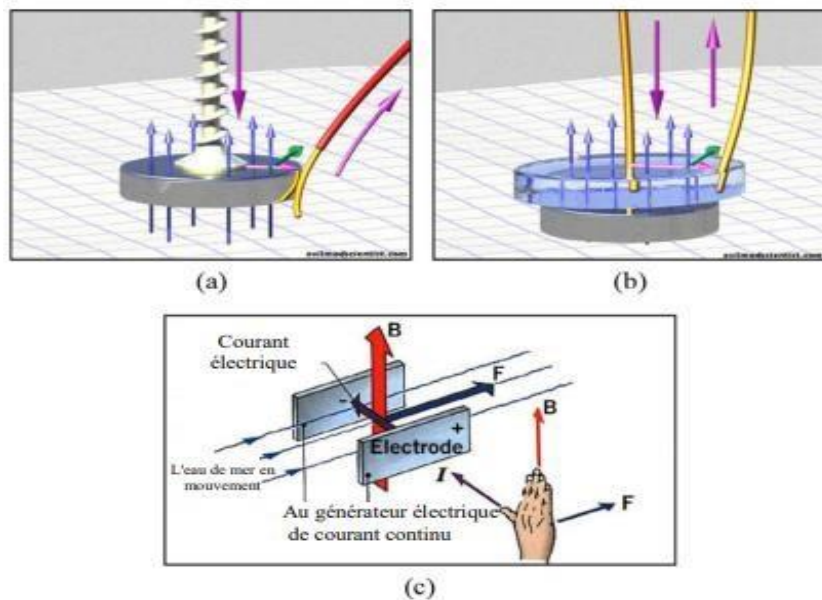


Figure 2.7 (a et b) Effet du champ magnétique sur l'écoulement du fluide conducteur, (c) Loi de la main droite. (Ligne bleue : champ magnétique, ligne mauve : courant, ligne verte : mouvement.) [61]

2.5.3 Loi de la force de Lorentz

Le champ magnétique B tout comme le champ électrique est défini à partir de la force de Lorentz.

La force de Lorentz calculée comme [62] :

$$\vec{F} = q \times \vec{u} \wedge \vec{B} \quad (2.16)$$

\vec{F} : La force électromagnétique [N].

q : La charge électrique de l'ion [C].

\vec{u} : La vitesse de charge [m s^{-1}].

\vec{B} : Champ magnétique [T].

2.6 Différentes modélisations de la MHD

2.6.1 Magnétohydrodynamique idéale

Le MHD idéal est caractérisé par un nombre de Reynolds magnétique très élevé (R_m), et un fluide fortement magnétisé est considéré comme ayant peu ou pas de résistance électrique et est assimilé à un conducteur parfait. Ce MHD idéal est étudié dans les plasmas thermiques, tels que l'astrophysique et les plasmas thermonucléaires d'origine naturelle (étoile) ou artificielle (tokamak). Les équations du MHD idéal comprennent l'équation de continuité, la loi de la quantité de mouvement, le théorème d'Ampère et l'équation thermodynamique (conservation de l'énergie). Nous approximons le flux de chaleur à travers des conditions adiabatiques ou isothermes [63].

a. Nombre de Reynolds magnétique

Il indique le rapport entre les termes de convection et de diffusion dans un fluide magnétique [63].

$$R_m = \mu_0 \times \sigma \times V \times L \quad (2.17)$$

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide [$\text{kg mA}^{-1} \text{s}^{-1}$].

σ : La conductivité électrique [Sm^{-1}].

V : La vitesse du fluide [ms^{-1}].

L : La longueur [m].

2.6.2 Magnétohydrodynamique résistive

La caractéristique de la résistance MHD est que le faible nombre de Reynolds magnétique (R_m) décrit un fluide magnétisant plutôt qu'un conducteur parfait. Ce que nous appelons habituellement la résistivité générée par la collision entre les composants du plasma convertit l'énergie magnétique en chaleur. Lorsque la résistivité n'est pas négligeable, (petit nombre de Reynolds) [63].

Chapitre 3

Mise en équations

3.1 Introduction

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

3.2 Géométrie du problème

La figure 3.1 est illustrée la géométrie du tube pour étudier le transfert de chaleur associé au un champ magnétique. Le diamètre du tube est de 0.02 m avec une longueur de 1.5 m.

a.



b.

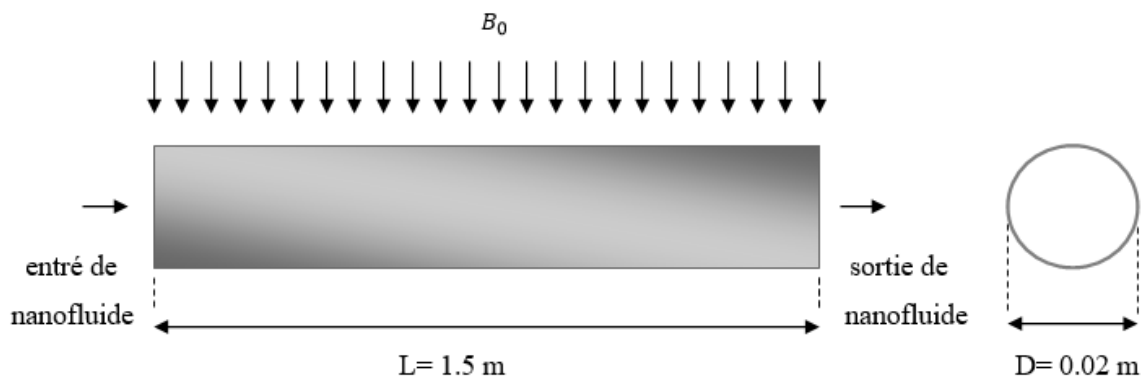


Figure 3.1 a. Géométrie de tube cylindrique ;b. Dimension de la géométrie de tube cylindrique

3.3 Propriétés thermophysiques de nanofluide

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

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

3.3.1 Fraction volumique (φ)

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

$$\varphi = \frac{\text{Volume solide}}{\text{Volume totale de nanofluide}} = \frac{v_s}{v_s + v_f} \quad (3.1)$$

Où

v_s : Volume des nanoparticules solides [m³].

v_f : Volume du fluide de base [m³].

3.3.2 Masse volumique

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

$$\rho_{nf} = \left[\frac{m}{v} \right]_{nf} = \frac{m_f + m_s}{v_f + v_s} = \frac{\rho_f v_f + \rho_s v_s}{v_f + v_s} \quad (3.2)$$

A partir de la relation (3.1), on déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_s \quad (3.3)$$

Où

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules.

3.3.3 Conductivité thermique

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

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

$$k_{nf} = k_f \frac{k_s + 2k_f + 2\varphi(k_s - k_f)}{k_s + 2k_f - \varphi(k_s - k_f)} \quad (3.4)$$

Où

k_{nf} : La conductivité thermique du nanofluide.

k_f : La conductivité thermique du fluide de base.

k_s : La conductivité thermique des particules solides.

3.3.4 Viscosité dynamique

La majorité des études qui ont traité de la viscosité des nanofluides ont eu recours, pour son calcul à partir de la viscosité du fluide de base et de la fraction volumique φ , aux relations de

Stokes-Einstein ou de Brinkman. Ces relations ont été établies dans un cadre précis à savoir particules métalliques de forme sphérique, en faible concentration, parfaitement dispersées et sans interaction inter-particules. La viscosité relative est le rapport de la viscosité du nanofluide sur celle du fluide de base μ_{nf}/μ_f . On a plusieurs modèles de la viscosité dynamique d'un nanofluide, on s'intéresse dans cette étude au modèle de Brinkman(1952) [64] qui a étudié la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (3.5)$$

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

3.3.5 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un system homogène $C_p=dQ/mdT$. La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 °K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on a la relation du Modèle de Xuan et Roetzel (2000) [65].

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s \quad (3.6)$$

Avec

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

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

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

3.3.6 Coefficient d'expansion thermique

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

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 (3.3).

On déduit l'expression suivante :

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_s \quad (3.7)$$

Où

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

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

$(\beta)_s$: Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

3.3.7 Diffusivité thermique

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (3.8)$$

3.3.8 Conductivité électrique du nanofluide

$$\sigma_{nf} = \sigma_f \left(1 + \frac{3(\zeta - 1)\varphi}{(\zeta + 2) - (\zeta - 1)\varphi} \right) \quad (3.9)$$

$$\zeta = \frac{\sigma_s}{\sigma_f}$$

On va utiliser cette équation pour calculé les propriétés thermophysiques du nanofluide.

Tableau 3.1 Propriétés thermophysiques du fluide de base eau pure et nanoparticule [66]

Propriétés physiques	eau pure	Al_2O_3
$C_p(J\ kg^{-1}\ K^{-1})$	4179	765
$\rho(kg\ m^{-3})$	997.1	3970
$k(W\ m^{-1}\ K^{-1})$	0.613	40
$\alpha \times 10^7(m^2\ s^{-1})$	1.47	131.7
$\beta\ (K^{-1})$	21×10^{-5}	0.85×10^{-5}
$\mu(kg\ m^{-1}\ s^{-1})$	0.001003	-

3.4 Equations gouvernantes

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

3.4.1 Equation de continuité

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.10)$$

3.4.2 Equation de quantité de mouvement

Le bilan de la quantité de mouvement aboutit, pour un écoulement 3D stationnaire, aux équations régissant le mouvement du fluide

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \rho (T - T_0) \quad (3.11)$$

3.4.3 Equation d'énergie

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

$$\frac{D}{Dt}(\rho C_p T) = \nabla \cdot K \nabla T + \beta T \frac{Dp}{DT} + \rho \varphi \quad (3.12)$$

Avec :

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho a + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial q_r}{\partial x_j} \quad (3.13)$$

3.5 Modèle de turbulence (Modèle $k-\varepsilon$ Standard)

Le modèle $k-\varepsilon$ et ses variantes sont aujourd'hui très bien implantées dans la plupart des codes et son utilisation peut se faire facilement. Il a été utilisé depuis de nombreuses années. Il combine économie, robustesse et large domaine d'application. Il est toutefois critiquable dans bien des situations: écoulements très cisailés, zones de recirculation, échanges thermiques. Dans ces cas, il surestime la valeur de l'énergie cinétique turbulente.

L'équation de l'énergie cinétique turbulente moyennée au sens de Favre est obtenue de la même approche qu'en écoulement incompressible (*Fluent*, 2003):

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j k}{\partial x_j} = D_k + G_k + G_b + Y_M - \bar{\rho} \varepsilon \quad (3.14)$$

Avec,

- D_k diffusion turbulence : $D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu S_{ij} \bar{u}_j'' - \delta_{ij} \overline{p' u_j''} - \frac{1}{2} \bar{\rho} u_i'' \bar{u}_j'' u_j'' \right)$

$$\text{Où } S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

- G_k le terme de production : $G_k = -\bar{\rho} u_i'' u_j'' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$

- G_b interaction vitesse-pression moyenne : $G_b = -\bar{u}_i'' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j}$

- Y_M le terme d'interaction des pressions fluctuantes ; $Y_M = \overline{p' \frac{\partial u_j''}{\partial x_j}}$

- $\bar{\rho} \varepsilon$ la dissipation de k ; $\bar{\rho} \varepsilon = \overline{\mu S_{ij}'' \frac{\partial u_j''}{\partial x_j}}$

L'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique ε a la forme suivante :

$$\frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j \varepsilon}{\partial x_j} = F \quad (3.15)$$

où F comprend plus de 20 termes.

Pour la fermeture de l'équation de k , l'hypothèse de Boussinesq est toujours considérée. Le tenseur de Reynolds prend la forme suivante en fonction du champ moyen:

$$R_{ij} = u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \theta_0}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \theta_0}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad (3.16)$$

Et la viscosité turbulente est donnée par :

$$\mu_t = C_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

Le terme de diffusion est modélisé de la même manière qu'en incompressible:

$$D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (3.18)$$

Les termes où la pression intervient sont regroupés et modélisés par :

$$G_b + Y_M = \frac{c_k \bar{\rho}}{\bar{p}} \left(\theta_0 R_{ij} \theta_0 \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial x_k} \quad (3.19)$$

L'équation de k s'écrit finalement :

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \theta_0 k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \bar{\rho} \varepsilon + \frac{c_k \bar{\rho}}{\bar{p}} \left(\theta_0 R_{ij} \theta_0 \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial x_k} \quad (3.20)$$

Le dernier terme dans cette équation prend en compte les effets de compressibilité. En effet, il est nul en incompressible de part le fait que le champ de vitesse est à divergence nulle. Par contre, il pose un problème car comme il dépend de la vitesse moyenne, il n'est pas invariant par changement de repère galiléen. Dans certaines versions du modèle k - ε compressible, on le regroupe avec le terme de dissipation de k en introduisant un nombre de Mach turbulent (basé sur k), on retrouve alors l'invariance galiléenne (Estivale es, 2005).

En procédant de la même manière, on obtient pour l'équation de la dissipation de k la forme suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \theta_0 \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k \\ &\quad - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \frac{c_k \bar{\rho}}{\bar{p}} \left(\theta_0 R_{ij} \theta_0 \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Les constantes du modèle k - ε compressible sont résumées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.2. Constantes du modèle k - ε *standard* [67]

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	c_k
0.09	1.0	1.3	1.45	1.92	2.0	1.0

3.6 Conditions aux limites

Un tube circulaire de diamètre est 0.02 m et de longueur 1.5 m. dans le tube circulé un nanofluide Al_2O_3 -eau, et nombre de Reynolds 3500, 5000, 6500, 8000 et 9500. Les concentrations des nanoparticules sont 0.1, 0.5, 1 et 2 %.

A l'entrée du tube et en fixant la température à 293 K, on applique un champ magnétique B_0 dans la paroi suivantes x pour le nombre de Hartmann 0, 10, 20, 40.

3.7 Résolution numérique

La résolution numérique des équations a été effectuée sur une configuration tridimensionnelle par la méthode des volumes finis à l'aide du code *CFD Fluent* 6.3.26. Le maillage utilisé a été réalisé par blocs de 2.000.000 cellules sur *Gambit* 6.3.26 pour la configuration étudiée. Le problème a été résolu en utilisant un solveur « *pressure based* ». L'équation de pression est discrétisée par le schéma *PRESTO*, les autres équations sont discrétisé par un schéma de deuxième ordres. La solution est considérée comme convergente quand le résidu des équations algébriques est inférieur à 10^{-6} .

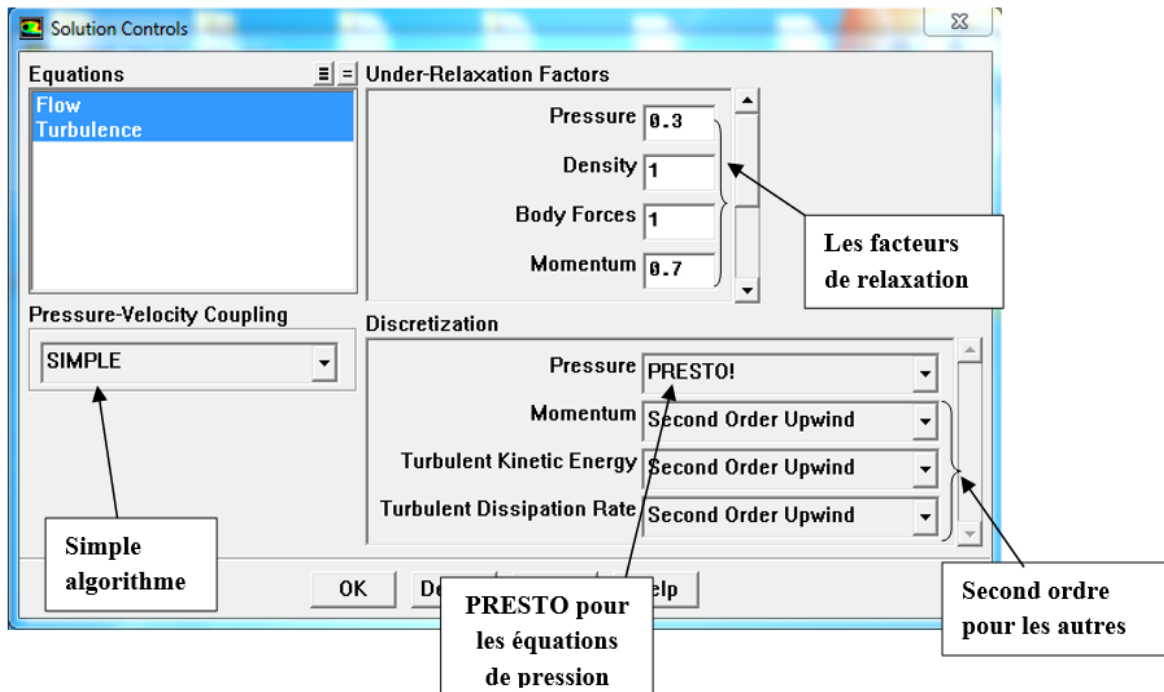


Figure 3.2 Facteurs de sous relaxation et types de discrétisation utilisés.

Chapitre 4

Résultats et Discussions

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré principalement à la présentation et la discussion des résultats de la simulation numérique de l'écoulement nanofluide dans un tube soumis à un flux thermique et un champ magnétique à différentes fractions volumiques de nanoparticules. Le nombre de Reynolds varie de 3000 à 10000.

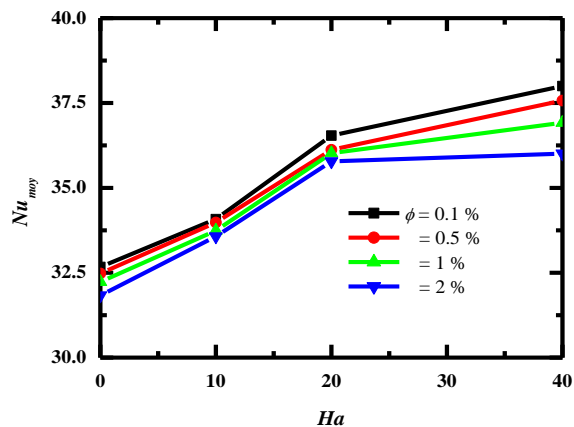
Les calculs vont permettre de montrer l'influence du régime de l'écoulement, à travers le nombre de Reynolds, et l'intensité de champs magnétique et différentes fractions volumiques de nanoparticules dans le fluide de base (eau), sur le champ d'écoulement, le transfert de chaleur.

4.2 Nombre de Nusselt

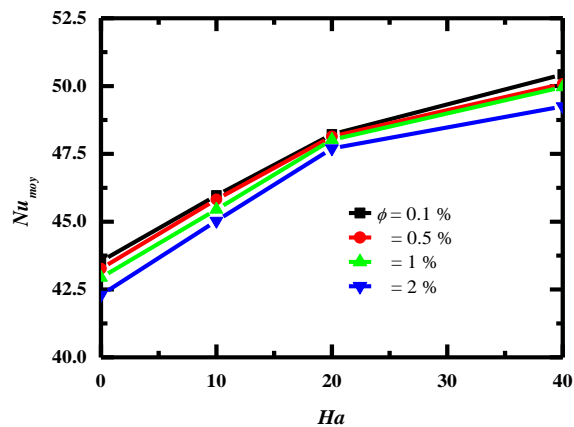
Le nombre caractérisant l'efficacité du transport de chaleur est le nombre de Nusselt, qui n'est autre que la puissance de ce transfert. Il est ramené à une forme sans dimension en rapportant cette puissance à celle du transfert par diffusion (sans la convection). La mesure du nombre de Nusselt passe ainsi par la mesure de la puissance à fournir à la paroi soumise à un flux de chaleur pour maintenir une différence de température.

La Figure (4.1) montre l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Ha pour différentes fractions volumiques de nanofluides et à plusieurs régimes d'écoulement. Il est constaté que pour les différentes fractions de nanoparticules, l'évolution du nombre de Nusselt avec le nombre de Ha est croissante,

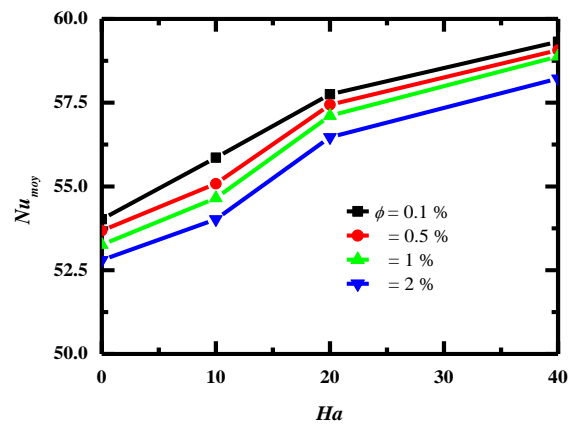
a.



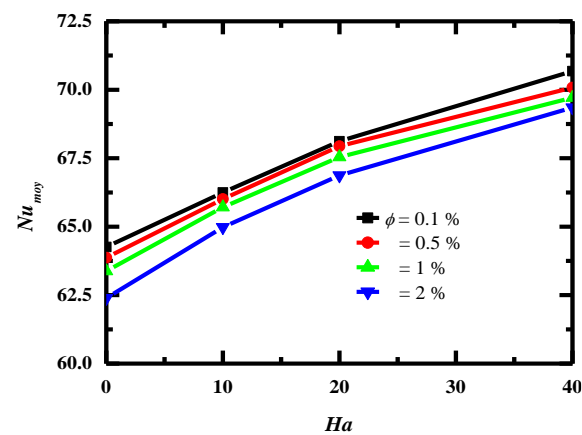
b.



c.



d.



e.

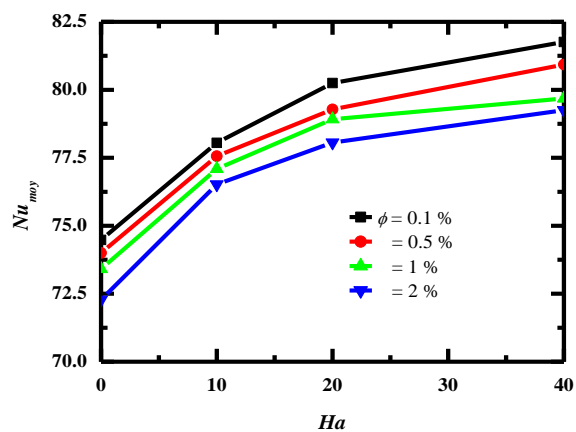


Figure 4.1 Effet de champs magnétique et la fraction volumique des nanoparticules sur le nombre de Nusselt, a. $Re = 3500$, b. 5000, c. 6500, d. 8000, e. 9500

4.3 Champs de température

Sur la figure 4.2, les profils radiaux de température à $x/L=0.5$ sont rapportés pour plusieurs nombre de Reynolds, $Ha = 20$ et $\varphi = 1\%$. La température dépend de régime d'écoulement. Une couche limite thermique est produit près de parois, l'épaisseur de cette couche est diminué avec l'augmentation de vitesse d'écoulement. On remarque que la diminution de vitesse à l'entrée augmente la température de fluide et l'épaisseur de la couche limite thermique important. Pour une concentration de 1% et pour un nombre de Reynolds supérieure à 7000, les écarts de profils températures est moins par rapport au faible régime. Pour tout le régime, les profils présente une grande partie plate au milieu du tube, montre que le transfert de chaleur est faible dans la direction radiale.

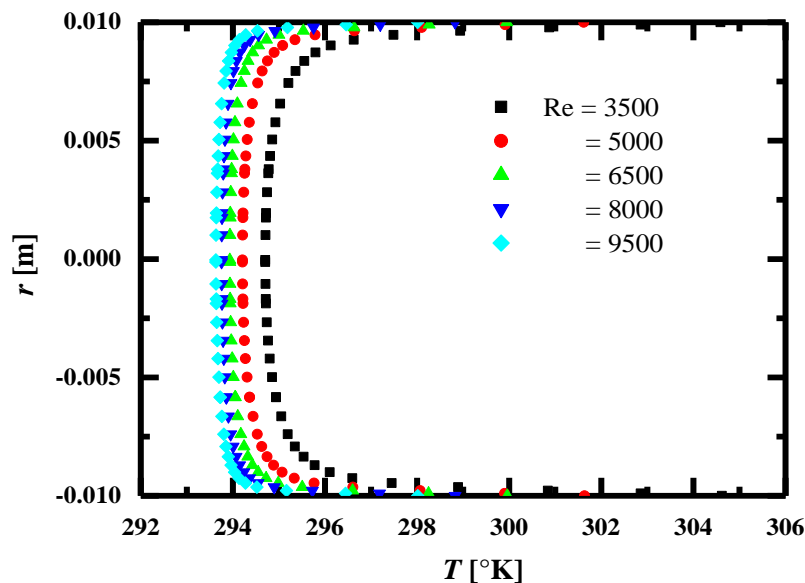


Figure 4.2 Effet de régime d'écoulement sur température radiale à la section avec $x = L/2$,
 $Ha = 20$ et $\varphi = 1\%$.

Les figures 4.3 montre les profils de température le long de l'axe du tube pour $Ha = 20$ et $\varphi = 1\%$. Après la zone de développement de l'écoulement ($\approx 12 D$), le profil de la température est linéaire.

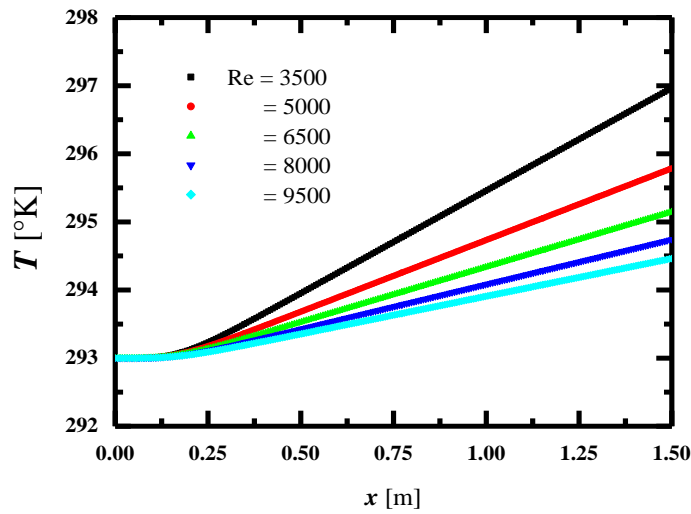


Figure 4.3 Effet de régime d'écoulement sur température axiale avec $Ha = 20$ et $\varphi = 1\%$.

L'effet de champs magnétique sur la température est montré dans la figure 4.4. Une augmentation plus élevée du coefficient de transfert de chaleur moyen, en particulier pour $j = 1\%$, comme le montre la figure 7a. Par conséquent, le nanofluide offre, comme prévu, une capacité thermique supérieure à celle du fluide de base. On note également qu'avec une conductivité thermique plus élevée du mélange, le transfert de chaleur par convection entre paroi et fluide devrait par conséquent être plus efficace.

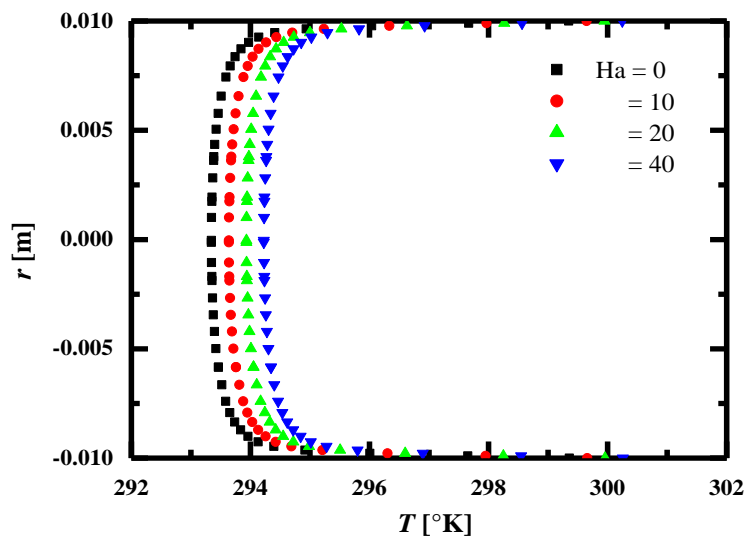


Figure 4.4 Effet de champs magnétique sur la température radiale à la section avec $x = L/2$, $Re = 6500$ et $\varphi = 1\%$.

4.4 Profils des Vitesses

La structure de l'écoulement est analysée par des distributions radiales dans différentes sections le long du tube. Les sections considérées englobent les positions suivantes (Figure 4.3): près de l'entrée du refroidisseur ($Z = 100$ mm), en son milieu ($Z = 300$ mm) et à sa sortie ($Z = 500$ mm).

De plus, des distributions dans le plan médian du refroidisseur ont été également analysées. Tous les calculs ont été réalisés pour une pression d'admission de l'air égale à 101 kPa.

La configuration de l'écoulement est analysée par les distributions radiales des profils de la vitesse axiale, la principale composante, dans les trois sections montrées ci-dessus.

La Figure 4.5 montre l'évolution de la vitesse axiale le long de la direction radiale. Les valeurs maximales sont atteintes au milieu du tube. Il est intéressant de constater que le profil de vitesse s'aplatit en avançant vers la sortie. De plus, l'intensité de la vitesse est atténuée en s'éloignant de l'entrée où la forte vitesse est imposée par le débit massique introduit.

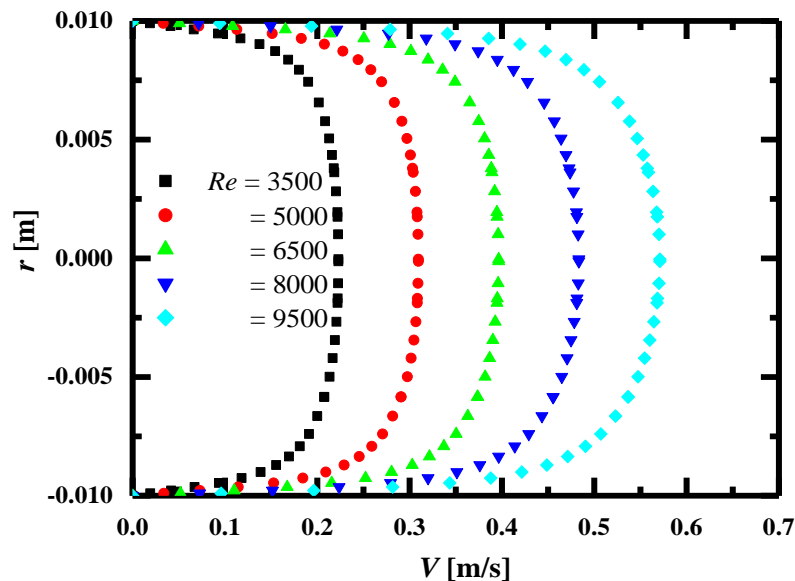


Figure 4.5 Profils des vitesses axiales

Conclusions

Le transfert de la chaleur joue un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité d'un tels processus est généralement limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés. Les fluides et les huiles normales qui sont utilisés généralement pour le refroidissement présentent un souci de volume, qui peut être très considérable, par exemple pour refroidir un système, on a besoin d'un grand volume de fluide de refroidissement et parfois ce système prend le refroidissement des temps long. L'utilisation des nanofluides pour augmenter le transfert de chaleur est considéré comme une technique nouvelle qui peut répondre aux exigences de l'industrie avec une manière efficace. C'est-à-dire les nanofluides peuvent améliorer le phénomène de transfert de chaleur d'une façon remarquable avec une immense possibilité du remplacement des fluides et les huiles traditionnelle utilisés jusqu'à présent pour le refroidissement.

Cette étude porte sur l'analyse du transfert de chaleur et de l'écoulement visqueux de nanofluides dans un tube soumis à un flux de la chaleur constant à paroi et un champ magnétique perpendiculaire à la direction de l'écoulement. Les simulations numériques sont effectuées pour une large marge de nombre de Reynolds ($Re= 3500 - 9500$) avec différentes fractions volumiques pour le fluide pure ($\varphi =0$ à 4 %) et pour les nanofluides (Al_2O_3) avec un nombre de Hartmann 10, 20 et 40.

Dans la première partie on a l'évolution du nombre de Nusselt avec le nombre de Ha est croissante pour toutes les fractions des nanoparticules et à plusieurs régime d'écoulement. Dans la deuxième partie on déduit que les profils de température à x/L est faible dans la direction radiale et le profil de la température est linéaire au long de l'axe du tube, l'effet du champs magnétique sur la température montre une augmentation plus élevée du coefficient de transfert de chaleur moyen. Dans la troisième partie on a l'évolution de la vitesse axiale le long de la direction radiale. Les valeurs maximales sont atteintes au milieu du tube. Il est intéressant de constater que le profil de vitesse s'aplatit en avançant vers la sortie. De plus, l'intensité de la vitesse est atténuée en s'éloignant de l'entrée où la forte vitesse est imposée par le débit massique introduit

Les résultats montrent l'effet de variation de la fraction volumique et le régime d'écoulement sur la performance du transfert de chaleur des nanofluides (Al_2O_3). On conclue que l'augmentation de l'intensité de champs magnétique et le régime d'écoulement peut améliorer la performance du transfert. Donc on peut considérer l'application d'un champ magnétique à un effet favorable sur les systèmes de refroidissement.

Références Bibliographies

- [1]. Choi, S. (1995) Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. In: Siginer, D.A. and Wang, H.P., Eds., Development and Applications of Non-Newtonian Flows, Vol. 12, ASME, New York, 99-105.
- [2]. Hamilton, R. L. and Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. Industrial and Engineering Chemistry — Fundamentals, volume 1, numero 3, p. 187-9.
- [3]. B. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle, Exp. Heat Transfer 11 (1998) 151–170.
- [4]. Y.M. Xuan and Q. Li, Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 125, pp. 151 –155, 2003.
- [5]. S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen and W. Roetzel, Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids, Journal of Heat Transfer, Vol. 125, N°4, pp. 567–574, 2003.
- [6]. D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, Int. J. Heat Mass Transf. 47 (2004) 5181–5188.
- [7]. Z J. Lee, I. Mudawar, Assessment of the effectiveness of nanofluids for single phase and two-phase heat transfer in micro-channels, Int. J. Heat Mass Transf. 50 (3–4) (2007) 452–463.
- [8]. S.U.S. Choi. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles Developments and applications of Non-Newtonian Flows. D.A. Siginer and H.P. Wang(Eds.), FED-vol. 231/MD-vol. 66, ASME, New York, pp. 99-105, (1995).
- [9]. S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, and E.A Grulke. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension. Applied Physics Letters, 79(14), pp. 2252-2254, (2001).
- [10]. Roy G, C.T Nguyen, P.R Lajoie, Numerical investigation of laminar flow and heattransfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids, Super lattices and Microstructures 35 (2004) 497-511.
- [11]. Maïga S.E.B, S.J Palm, C.T Nguyen. Heat transfer Enhancement by using Nanofluids in Forced Convection Flows. I. Journal of Heat and Fluids Flow (2005).

- [12]. S.E.B. Maiga, C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, Heat transfer behavior of nanofluids in a uniformly heated tube, *Superlattices and Microstructures* ,35, pp .543–557(2004).
- [13]. Wen D, Y. Ding, Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbonnanotubes (carbon nanotube nanofluids), *Journal ofThermo-physics and HeatTransfer* 18 (4) (2004) 481-485.
- [14]. Heris S.Z,S GhEtemad and M.N Esfahany, Experimental Investigation of OxideNanofluides Laminar Flow Convertive Heat Transfer ,*Internatinal Communicationsin Heat and Mass Transfer* 33(2006): 529-535.
- [15]. P.K. Namburu, D.K. Das, K.M. Tanguturi, R.S. Vajjha, Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties, *International Journal of Thermal Science* ,48,pp. 290–302, (2009).
- [16]. R. B. Mansour, N. Galanis, and C. T. Nguyen, “Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids,” *Applied Thermal Engineering*, vol.27, no. 1, pp. 240–249, 2007.
- [17]. W. Daungthongsuk, S. Wongwises. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. *Renewable Sustainable Energy Review*, 11, pp.797, (2005).
- [18]. Y. Yang, Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson, and G. Wu. Heat transfer properties of nanoparticle in fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, pp .1107, (2005).
- [19]. Aminossadati, S., M., Ghasemi, B. (2009):Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 28, pp. 630-640.
- [20]. Matin, M., H., Vaziri, S. (2016): Natural convection of Al₂O₃-Water nanofluid inside a vertical circular enclosure exposed to a non-uniform heat flux, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76, pp. 337 –347.
- [21]. A.R. Pouranfard, D. Mowla, F. Esmailzadeh. "An experimental study of drag reduction by nanofluids through horizontal pipe turbulent flow of a Newtonian liquid."*Journal of Industrial and Engineering Chemistry*20 (2014):633-637.
- [22]. V. Bianco, O. Manca, S. Nardini, "Numerical investigation on nanofluids turbulent convection heat transfer inside a circular tube."*International Journal of Thermal Sciences*50 (2011):341-349.
- [23]. V. Bianco, O. Manca, and S. Nardini. "Numerical simulation of water/ Al₂O₃nanofluid turbulent convection."*Advances in Mechanical Engineering* 2 (2010):_976-254.

- [24]. V. Bianco, O. Manca, S. Nardini. "Entropy generation analysis of turbulent convection flow of Al₂O₃-water nanofluid in a circular tube subjected to constant wall heat flux." *Energy Conversion and Management* 77 (2014):306-314.
- [25]. G. Sekrani, S. Poncet, P. Proulx. "Modeling of convective turbulent heat transfer of water-based Al₂O₃nanouids in an uniformly heated pipe." *Chemical Engineering Science* 176 (2018):205-219.
- [26]. E. Manay, E. Mandev, "Experimental investigation of mixed convection heat transfer of nanofluids in a circular microchannel with different inclination angles." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 135 (2019):887-900.
- [27]. S. Iyahraja, J.S. Rajadurai, S. Rajesh, R.S.T. Pandian, M.S. Kumaran, G. Selvakumar. "Studies on heat transfer and pressure drop in turbulent flow of silver -water nanofluids through a circular tube at constant wall heat flux." *Heat and Mass Transfer* 54 (2018):2089-2099.
- [28].] U. Arunachalam, M. Edwin."Experimental studies on laminar flow heat transfer in nanofluids flowing through a straight circular tube with and without V-cut twisted tape insert." *Heat and Mass Transfer* 54 (2018):673-683.
- [29]. G. Ny, N. Barom, S. Noraziman, S. Yeow. "Numerical study on turbulent-forced convective heat transfer of Ag/Heg water nanofluid in pipe." *Journal of Advanced Research in in Materials Science* 22, no. 1(2016):11-27.
- [30]. S. Zainal, C. Tan, C. J. Sian, T. J. Siang. "ANSYS simulation for Ag/HEG hybrid nanofluid in turbulent circular pipe." *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics* 23, no. 1(2016):20-35.
- [31]. I. E. Sarris, S. C. Kakarantzas, A. P. Grecos, & N. S. Vlachos, MHD natural convection in a laterally and volumetrically heated square cavity, *Inter. J. Heat and Mass Transfer*, 48 (2005), 3443–3453.
- [32]. A. Mahmoudi, I. Mejri, M. A. Abbassi, Lattice Boltzmann simulation of MHD natural convection in a nanofluid-filled cavity with linear temperature distribution, *Powder Technology*, 256(2014), 257-271.
- [33]. A. H. Mahmoudi, I. Pop, M. Shahi, Effect of magnetic field on natural convection in a triangular enclosure filled with nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 59 (2012), 126-140.
- [34]. A. H. Mahmoudi, I. Pop, M. Shahi, F. Talebi, MHD natural convection and entropy generation in a trapezoidal enclosure using Cu–water nanofluid, *Computers & Fluids*, 72 (2012), 46-62.

- [35]. B. Hof, A. Juel et T. Mullin, Magneto hydrodynamic damping of convective flows in molten gallium, *J. of Fluid Mech.*, Volume 482, pp 163–179, 2003.
- [36]. S. Wakashima et T. S. Saitoh, Benchmark solutions for natural convection in a cubic cavity using the high-order time–space method, *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Volume 47, pp 853-864, 2004.
- [37]. Z. Mehrez, A. El Cafsi, A. Belghith, P. Le Quéré, MHD effects on heat transfer and entropy generation of nanofluid flow in an open cavity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374(2015) 214–224.
- [38]. A. Kasaeipoor, B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, Convection of Cu-water nanofluid in a vented T-shaped cavity in the presence of magnetic field, *Int. J. of Thermal Sciences*, 94, (2015), 50-60.
- [39]. Ali, M. M., Alim, M.A., Ahmed, S.S., Oriented magnetic field effect on mixed convective flow of nanofluid in a grooved channel with internal rotating cylindrical heat source, *International Journal of Mechanical Sciences*, 151, 2019, 385–409.
- [40]. Ali MM, Alim MA, Ahmed SS, et al. Magneto hydrodynamic mixed convection flow in a hexagonal enclosure. *Procedia engineering*. 2017;(194):479–486.
- [41]. Diane DUVAL. Ailettes thermique, Institut National Des Sciences Appliquées de Rouen, Département Sciences et Techniques Pour l’Ingénieur ,2013.
- [42]. BENSADA S. BOUZIANE M.T. : Transfert de Chaleur, mémoire de Magister- l’Université BISKRA.
- [43]. Lahcen B. Yves L. Brahim B. (2012) : Instabilité thermoconvective d’un écoulement Poiseuille-Rayleigh-Bénard-Marangoni dans un canal ouvert à surface libre, thèse de doctorat Université Ibn Zohr-Agadir.
- [44]. SOUIADI L. NEMOUCHI.Z. KADJA .M. (2013) : la convection mixte dans un canal horizontal muni de blocs chauffe, Mémoire de Magister- l’Université KASSDI MERBAH – OUARGLA.
- [45]. Philippe MARTY. Cours de transfert thermique université de Joseph Fourier, Grenoble, Edition 2012-2013.
- [46]. Salma Halefadi. Caractérisation des propriétés thermo-physiques et d’échanges de chaleur des nanofluides à base de nanotubes de carbone. Génie mécanique [physics.class-ph]. INSA de Rennes, 2014. Français.
- [47]. S. SADDAM. Amélioration de la convection mixte dans un dissipateur de chaleur à ailette elliptiques creuse. Mémoire de Master Université de M’sila.2015.

- [48]. Adjadj H. Lahrech J. et Gourari S. (2016) : Dimensionnement et calcul d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre lors des échanges convectifs- Université Des Frères Mentouri Constantine.
- [49]. Zhongda ZHANG. Gestion thermique des composants d'électronique de puissance - Utilisation du diamant CVD, Thèse en vue d'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, 2012.
- [50]. Choi, S. Eastman, JA. -Enhancing thermal conductivity of fluids with nano-particles. ASME-Publications-FED.1995; 231:99–106.
- [51]. Saidur, R. leong, K. Y, Mohammad. H A.—A review on applications and of nanofluids, Renew SustEnerg Rev.2011;15, no.3:1646-1668.
- [52]. Das, SK. Choi, S U S. Yu, W.Pradeep, T. Nanofluids: Science and Technology. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [53]. KHENTOUL MOUSSA. étude numérique de la convection mixte dans un canal horizontal contenant des ailettes. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle (LMD) en génie mécanique, option : génie thermique et énergétique, université de Constantine 2016.
- [54]. João-Paulo RIBEIRO. Jean-Antoine GRÜSS. article, Nanofluides pour les applications thermiques, 2009.
- [55]. OULD AMER Nassira. OUADAH Sabrina. Simulation numérique d'un écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un dissipateur de chaleur , Mémoire de Master Université de M'sila, 2017- 2018.
- [56]. KHIDER fatma Zohra, Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base, Mémoire de Master Université de M'sila, 2016.
- [57]. [https:// fuuu.be/polytech/.../TP/MECAH300_NombresAdimensionnels.pdf](https://fuuu.be/polytech/.../TP/MECAH300_NombresAdimensionnels.pdf).
- [58]. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Champ-magnetique.html>.
- [59]. <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physiquechimie/premieres/mecanique/champs-magnetiques.html>.
- [60]. Bessaïh, R. Marty, P. & Kadja, M. (2003): Hydrodynamics and Heat transfer in disk drivenflows under axial magnetic fields. Int. J. of Transport Phenomena, 259-278.
- [61]. Sheikholeslami, M. & Rokni, H. B. (2017): Simulation of nanofluid heat transfer in presence of magnetic field: A review. International Journal of Heat and Mass Transfer, 115, 1203-1233.
- [62]. <http://www.ctpe.be/pdf/mde/EM170011112.pdf>.

- [63]. W. Baumjohann et R. A. Treumann (2012), Basic Space Plasma Physics, Imperial College Press.
- [64]. H.C. Brinkman. The viscosity of concentrated suspensions and solution. J. Chem.Phys., 20, 571–581, 1952.
- [65]. Y. Xuan and W. Roetzel. Conception for heat transfer correlation of nanofluids. International (2000).
- [66]. Rujda Parveen , T R Mahapatra, Numerical simulation of MHD double diffusive natural convection and entropy generation in a wavy enclosure filled with nanofluid with discrete heating. Article. Septembre 2019.
- [67]. A. Zeghib et K Talbi, Comparaison des différents modèles de turbulence d'un écoulement aérodynamique dans un cyclone. Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi (2008) 311 – 324.