

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de Master

En : Génie Mécanique

Spécialité : ÉNERGÉTIQUE

Par :

- BOUKHARI Bachir
- NAIM Abdelillah

Sujet

Etude des performances thermiques et dynamiques des canaux de différentes formes en présence des nanofluides

Soutenue publiquement, le , devant le jury composé de :

Mr. SARI HASSOUN Zakaria	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mr. SAIM Rachid	Prof	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mme. MOSTEFAOUI Amina	Dr.	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur
Mr. BENRAMDANE Mohammed	MCA	Univ. Tlemcen	Examinateur

Année universitaire 2020-2021

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier vivement :

Professeur SAÏM Rachid et Melle MOSTEFAOUI Amina, qui ont manifestés leur entière disponibilité pour nous aider, leurs orientations et leurs inactivitéspour diriger ce travail de master, aussi pour la confiance et la compréhension qu'ils nous ont toujours prouvés. Nous remercions également Mr. SARI HASSOUN Zakaria (président du jury) et Mr. BENRAMDAN E Mohammed (notre examinateur) de l'intérêt dont ils font preuve à notre égard pour lire ce mémoire.

Nous pensons en particulier à nos amis, pour nous avoir encouragés dans les moments critiques, et pour l'esprit d'équipe qu'ils ont et qui nous ont permis d'échanger avec eux des idées dans le même axe de travail.

Enfin, nous remercions toute personne de près ou de loin participant pour rendre ce travail réalisable et présentable.

MERCI A TOUS

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents avant tout et pour tout ;

A mon frère « Zakaria » et ma chère sœur « Amina »

A mon cousin « Mohammed »

A mes oncles

A mes amis

A tous mes enseignants, du primaire jusqu'au niveau supérieur

Je dédie également ce travail à :

Tous ceux qui me chers.

Naim Abdelillah

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :
A mes parents pour leur soutien, leur
patience, leur encouragement durant mon
parcours universitaire,
A ma sœur et mon frère
ainsi que tout ma famille.*

*A tous mes amis,
A mes amis de groupe Osboha 180.*

*A tous mes enseignants, du primaire au
niveau supérieur surtout le monsieur Oularbi
Abdelkader.*

Boukharî Bachîr



المخلص

في هذه الدراسة ، أجرينا محاكاة عددية ثنائية الأبعاد للانتقال الحراري للتدفق الصفحي لسائل نانوي ($Al_2O_3 - eau$) في قناة تخضع لظروف درجة الحرارة على الجدران . تقدم هندسة القناة المدروسة ثلاثة أشكال من التموجات، وهي شبه منحرف ، مستطيل وبسيط. تم استخدام برنامج *Fluent* ، لإعادة إنتاج الأشكال الهندسية المدروسة ولتحديد معادلات الحفظ المقابلة (للكتلة والزخم والطاقة). تُستخدم خوارزمية SIMPLE في اقتران السرعة . يتم اختبار النموذج المقترح أولاً ومقارنته بنتائج الأعمال الرقمية من الدراسات السابقة. تمت دراسة العمل على حساسية الشبكة أيضاً قبل تحليل تأثير الكميات المميزة للنظام وهندسة القناة وتركيز الحجم وقطر الجسيمات النانوية ، إلخ.

النتائج التي تم الحصول عليها ، توزيع السرعة ودرجة الحرارة ، تم استغلالها ومناقشتها من حيث عدد نسلت ومعامل فقدان الضغط والاحتكاك. أظهرت النتائج الرئيسية أن استخدام القنوات المموجة شبه المنحرفة تجعل من الممكن زيادة عدد نسلت وبالتالي تحسين نقل الحرارة. من ناحية أخرى ، فإن تغيير تركيزات حجم الجسيمات النانوية يساعد أيضاً على زيادة نقل الحرارة. كما لوحظ تأثير كبير لشكل وحجم الجسيمات النانوية المستخدمة في النقل الحراري.

الكلمات المفتاحية :

الموائع النانوية ، نقل الحرارة المترافق ، القناة ، التموج ، الفحص الرقمي ، التدفق الصفحي.

Résumé

Dans cette étude, nous avons mené une investigation numérique bidimensionnelle du transfert thermique d'un écoulement laminaire de nanofluide $Al_2O_3 - eau$ dans un canal soumis à une condition de température sur les parois. La géométrie du canal étudiée présente trois formes différentes d'ondulations, à savoir trapézoïdale, rectangulaire et simple. Le logiciel Fluent, a été utilisé pour reproduire les géométries étudiées et pour la résolution des équations de conservation correspondantes, à savoir (de la masse, quantité de mouvement et énergie). L'algorithme SIMPLE est utilisé pour le couplage vitesse-pression. Le modèle proposé est d'abord testé et comparé avec des résultats de travaux numériques issus de la bibliographie. Un travail sur la sensibilité du maillage a été également étudié avant d'analyser l'influence de grandeurs caractéristiques du système, géométrie du canal, concentration volumique et du diamètre de nanoparticules...ect.

Les résultats obtenus, caractérisant le comportement dynamique et thermique du nanofluide basé sur la distribution de vitesse et de température, ont été exploités et discutés en termes de nombre de Nusselt et de coefficient de perte de charge et de frottement. Les principaux résultats ont montré que l'utilisation des canaux trapézoïdaux ondulés permet d'augmenter le nombre de Nusselt et donc d'améliorer le transfert thermique. D'autre part, la variation des concentrations volumiques des nanoparticules contribue également à augmenter le transfert de chaleur. On a observé aussi un effet non négligeable de la forme et de la taille des nanoparticules utilisées sur le transfert thermique.

Mots clés:

Nanofluide, transfert de chaleur conjugué, canal, ondulation, investigation numérique, écoulement laminaire.

Abstract

In this study, we conducted a two-dimensional numerical investigation of the thermal transfer of a laminar flow of nanofluid ($Al_2O_3 - eau$) in a channel subjected to a temperature condition on the walls. The geometry of the studied channel presents three forms of undulations, namely trapezoidal, rectangular and simple. The Fluent software was used to reproduce the studied geometries and for the resolution of the corresponding conservation equations (of mass, momentum and energy). The SIMPLE algorithm is used for speed-pressure coupling. The proposed model is first tested and compared with the results of digital work from the bibliography. Work on the sensitivity of the mesh was also studied before analyzing the influence of characteristic quantities of the system, channel geometry, volume concentration and the diameter of nanoparticles, etc.

The numerical results obtained, characterizing the dynamic and thermal behavior of the nanofluid, based on the speed and temperature distribution, were exploited and discussed in terms of Nusselt number and coefficient of pressure loss and friction. The main results have shown that the use of corrugated trapezoidal channels makes it possible to increase the Nusselt number and therefore to improve heat transfer. On the other hand, varying the volume concentrations of nanoparticles also helps to increase heat transfer. On a observé aussi un effet non négligeable de la forme et de la taille des nanoparticules utilisées sur le transfert thermique.

Keywords:

Nanofluid, conjugate heat transfer, channel, ripple, numerical study, laminar flow.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 01 :Revue bibliographique sur le transfert de chaleur dans les canaux	4
1.1. Introduction.....	5
1.2. Transfert de chaleur.....	5
1.3. Les techniques d'amélioration du transfert thermique [3].....	6
1.3.1. Les techniques passives.....	6
1.3.2. Les techniques actives.....	8
1.4. Ecoulement des fluides à travers différents types des canaux.....	9
1.4.1. Différentes régions caractérisant l'écoulement dans un canal.....	10
1.4.2. Facteurs agissant sur les écoulements dans un canal [3].....	12
1.5. Revue bibliographique sur l'amélioration de transfert de chaleur avec les nanofluides.....	12
1.6. Conclusion.....	23
Chapitre 02 :Généralités sur les nanofluides	25
2.1. Introduction.....	26
2.2. Les nanoparticules.....	26
2.2.1. Définition.....	26
2.2.2. Type des nanoparticules.....	27
2.3. Les nanofluides.....	28
2.3.1. Définition.....	28
2.3.2. Préparation des nanofluides [32].....	28
2.3.2.1. Méthode en une seule étape.....	29
2.3.2.2. Méthode en deux étapes.....	29
2.3.2.3. Stabilité du nanofluide.....	30
2.4. Les propriétés thermophysiques des nanofluides.....	31
2.4.1. fraction volumique.....	31
2.4.2. masse volumique et la capacité thermique.....	31
2.4.3. conductivité thermique.....	32

Table des matières

2.4.4.	viscosité dynamique	38
2.5.	Domaine d'utilisation des nanofluides pour l'amélioration du transfert thermique	42
2.6.	Conclusion.....	43
Chapitre 03 : Description du problème physique étudié.....Erreur ! Signet non défini.		
3.1.	Introduction.....	45
3.2.	Description du problème étudié	45
3.2.1.	Description de la section d'essai	46
3.3.	Formulation mathématique	47
3.3.1.	Hypothèses simplificatrices	47
3.3.2.	Équations Gouvernantes.....	48
3.3.2.1.	Équation de continuité.....	48
3.3.2.2.	Équation de quantité de mouvement.....	48
3.3.2.3.	Équation de conservation de l'énergie.....	49
3.3.3.	Propriétés thermo-physiques	49
3.3.3.1.	Masse volumique	49
3.3.3.2.	Chaleur spécifique.....	50
3.3.3.3.	Conductivité thermique.....	50
3.3.3.4.	Viscosité dynamique	51
3.3.4.	Conditions aux limites.....	52
3.3.5.	Étude du maillage	53
3.3.6.	Grandeurs caractéristiques du système	55
3.3.6.1.	Coefficient de transfert de chaleur par convection	55
3.3.6.2.	Nombre de Nusselt.....	55
3.3.6.3.	Facteur de frottement	55
3.3.6.4.	Indice de performance thermo-hydraulique	56
3.4.	Conclusion.....	56
Chapitre 04 : Résultats et discussions Erreur ! Signet non défini.		
4.1.	Introduction.....	58

Table des matières

4.3. Validation du code de calcul	59
4.4. Résultats et discussions	60
4.4.1. L'effet de la géométrie du canal	60
4.4.2. L'effet de la fraction volumique des nanoparticules.....	65
4.4.3. L'effet du diamètre des nanoparticules.....	67
Conclusion et perspectives	68

Liste des figures

Listes des figures

Figure 1.1. différents types de transfert thermique dans une maison.....	6
Figure 1.2. Ecoulement laminaire.	9
Figure 1.3. Ecoulement transitoire.	10
Figure 1.4. Ecoulement turbulent.	10
Figure 1.5. Etablissement du profil de vitesse dans la conduite.....	11
Figure 1.6. Les étapes de développement de la couche limite.	11
Figure 1.7. Canal contenant un seul obstacle chauffé.	13
Figure 1.8. système expérimental de la fonction de transfert de chaleur par convection pour le nanofluide.....	14
Figure 1.9. Schéma sur le système de refroidissement radial.	15
Figure 1.10. Schéma de circuit expérimental.	16
Figure 1.11. Schéma de conduit étudié.	17
Figure 1.12. Géométrie du problème étudié.....	18
Figure 1.13. Géométrie du problème actuel.	19
Figure 1.14. Géométrie des problèmes étudiés.	20
Figure 1.15. Différentes formes de nervures.....	21
Figure 1.16. Schéma des micro-canaux étudiés.	22
Figure 2.1. Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre.	26
Figure 4.2. Comparaison des nombres de Nusselt moyens avec ceux d’Ahmed et al [21] en fonction du nombre de Reynolds.	60
Figure 4.5. Variation du: (a) nombre de Nusselt, (b) chute de pression en fonction du nombre de Reynolds pour différentes formes des canaux pour un écoulement d’eau pure.....	64

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 3.1. Propriétés thermo-physiques de l'eau et des nanoparticules à 20 °C.....	46
Tableau 3.2. Dimensions de canal ondulé.....	47

Nomenclature

Nomenclature

Symboles

A	Surface d'échange	m^2
a	Pas trapézoïdal	m
Al_2O_3	Oxyde d'aluminium	
Al	Aluminium	
Ag	Argent	
Au	Or	
C	Graphite	
C_p	Chaleur spécifique	$J / (Kg.K)$
Cu	Cuivre	
CuO	Oxyde de cuivre	
d_f	Diamètre équivalent (fluide de base)	mm
d_p	Diamètre de nanoparticule	nm
D_h	Diamètre hydraulique	mm
e	Hauteur trapézoïdale	mm
f	Facteur de frottement	
f_0	Facteur de frottement pour un canal simple	
Fe	Fer	
H	Hauteur du canal	m
h	Coefficient de convection	$W / (m^2.K)$
k_B	Constante de Boltzmann, 1.3807×10^{-23}	j / K
L	Longueur caractéristique	mm
L_1	Longueur de la zone adiabatique 1	mm
L_2	Longueur de la zone chauffée	mm
L_3	Longueur de la zone adiabatique 2	mm
M	Masse molaire	g / mol
N	Nombre d'Avogadro	
Nu	Nombre de Nusselt	

Nomenclature

Nu_0	Nombre de Nusselt pour un canal simple		
P	Pression		Pa
p	Périmètre	M	
ϕ	Flux de chaleur		W/m ²
Re	Nombre de Reynolds		-----
R_{th}	Résistance thermique		(m ² °C)/W
SiC	Carbure de silicium métallique		-----
SiO_2	Dioxyde de silicium		
T	Température		K
$T(x)$	Température moyenne le long du cana		K
TiO_2	Dioxyde de Titanium		
u	Composante axiale de la vitesse		m / s
u_p	Vitesse du mouvement brownien		m / s
v	Composante radiale de la vitesse		m / s
V	Volume		m ³
V_p	Volume des nanoparticules dispersées		m ³
V_T	Volume total		m ³
Δp	Chute de pression		Pa
x, y	Coordonnées cartésiennes		
ZnO	Oxyde de zinc		

Indice

ch	Canal
eff	Efficace
f	Fluide
in	Entrée
nf	Nanofluide
p	Particule
w	Wall
∞	L'infini

Nomenclature

Symboles grecs

α	Diffusivité thermique	m^2 / s
μ	Viscosité dynamique	$Kg / (m.s)$
ρ	Densité	Kg / m^3
φ	Fraction volumique	(%)
β_T	Coefficient d'expansion thermique	K^{-1}
λ	Conductivité thermique	$W / (m^2 .K)$
η	Performance thermique	

Abréviations

EDP Equations aux Dérivées Partielles

CFD Computational Fluid Dynamics

CNT Nanotube de Carbone

UDF User Defined Function

Introduction générale

Le transfert de chaleur est l'un des moyens les plus importants utilisés dans le domaine industriel, où l'amélioration de l'efficacité et l'intensification de ces échanges sont devenues un problème majeur pour ceux qui se soucient de l'avenir de l'énergie dans le monde et de l'épuisement progressif de ses ressources.

L'amélioration de l'efficacité du transfert de chaleur peut s'accompagner d'une consommation d'énergie moindre et nous distinguons plusieurs façons d'améliorer cette efficacité, notamment l'utilisation des grandes surfaces, l'application des vibrations aux surfaces de transfert de chaleur, l'utilisation des canaux ondulés et une augmentation de la conductivité thermique du fluide caloporteur et l'utilisation de nanoparticules.

Durant ces dernières années de nombreux systèmes électriques ont été développés dans le domaine industriel pour produire des flux de chaleur extrêmement élevés, où les réfrigérants conventionnels (eau, éthylène glycol et huile) sont inefficaces, telle que la conductivité thermique des particules solides est plus efficace que celle des fluides, et en conséquence, diverses techniques ont été proposées pour modifier les propriétés thermo physiques des fluides, y compris la suspension de nanoparticules solides dans ces fluides. Cette technique a conduit à l'émergence d'une nouvelle classe des fluides caloporteurs appelés nanofluides, et cette technologie a fait sensation, ce qui a suscité la curiosité de nombreux chercheurs, ingénieurs et concepteurs de systèmes thermiques en raison de sa qualité à améliorer le transfert de chaleur.

Les nanofluides sont obtenus en mélangeant un fluide appelé fluide de base et des particules métalliques d'une taille nanométrique inférieure à 100 nanomètres. Ils ont des propriétés physico-chimiques particulières et intéressantes, qui, d'un point de vue thermique, contribuent à l'amélioration des échanges thermiques dans de nombreux systèmes thermiques.

Dans ce travail de mémoire de master, nous avons effectué une étude numérique de la convection forcée d'un écoulement laminaire de nanofluide ($Al_2O_3 - eau$) à travers différents canaux. Cette étude a pour objectif d'analyser numériquement les performances dynamique et thermique de cet écoulement de nanofluide, qui contiennent des particules solides de différents diamètres et différentes concentrations volumiques. Les équations gouvernantes de l'écoulement à savoir l'équation de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie sont

Chapitre 01 Généralités et revue bibliographique

intégrées et discrétisées selon l'approche des volumes finis. Les simulations numériques sont effectuées à l'aide du code CFD Fluent. De ce fait, l'effet de différents paramètres sur les champs dynamiques et thermiques, à savoir la forme de la géométrie, le type et la taille des nanoparticules ainsi que le nombre de Reynolds sont analysés.

Le contenu de ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres, organisés de la manière suivante :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique des différentes techniques utilisées pour l'amélioration du transfert de chaleur dans les canaux avec l'utilisation des nanofluides.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation d'une revue bibliographique des principaux travaux publiés sur l'utilisation de nanofluides comme fluide de base. On présente quelques résultats de modèles proposés pour l'estimation des propriétés thermo-physiques des nanofluides ainsi que leurs influences sur le transfert de chaleur.
- Le troisième chapitre présente le problème étudié ainsi les formalismes mathématiques utilisés dans notre étude.
- Dans le quatrième et dernier chapitre, les résultats numériques issus des simulations sont présentés et discutés. Le modèle numérique est ensuite validé par les résultats de la littérature.
- Une conclusion générale suivie d'un ensemble de perspectives à retenir pour des développements futurs clôt ce mémoire.

Chapitre 01

*Revue bibliographique sur
le transfert de chaleur dans
les canaux*

1.1. Introduction

Le transfert de chaleur est l'un des processus industriels les plus importants dans notre vie quotidienne. Dans ce jour, l'intensification du transfert de chaleur et l'amélioration de l'efficacité énergétique sont devenues un problème majeur dans l'industrie, les organismes de réglementation et aussi la société qui prend conscience de l'épuisement progressif des ressources énergétiques mondiales et se soucie de l'avenir de l'énergie. En raison de ces enjeux énergétiques et environnementaux, l'enjeu technologique est de développer de nouveaux procédés pour une meilleure gestion de l'énergie.

Ce chapitre est divisé en trois parties : La première partie sur l'écoulement à travers différents types des canaux, la deuxième partie est sur le transfert de chaleur et son amélioration générale et la troisième partie est une recherche bibliographique sur l'amélioration de transfert de chaleur avec les nanofluides.

1.2. Transfert de chaleur

La chaleur peut être transférée d'un corps à un autre ou d'un endroit à un autre dans un même corps. Cette opération est connue sous le nom de transfert de chaleur qui est la science qui cherche à prédire l'énergie transférée entre les corps à la suite d'une différence de température.

La chaleur circule d'un corps à température plus élevée vers un autre à température plus basse. Bien que cela semble évident, cette loi naturelle est très importante du point de vue de la thermodynamique. La science du transfert de chaleur ne cherche pas à expliquer comment la chaleur est transférée, mais également de prédire le taux auquel l'échange aura lieu dans certaines conditions précises.

Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents : le rayonnement, la convection qui est le transfert de chaleur par le déplacement de l'air ou du fluide et la conduction dans les solides, les gaz et fluides immobiles qui dépendent de l'échange d'énergie cinétique entre les molécules. Deux types de convection sont importants, la convection forcée et la convection libre où (naturelle) qui résulte d'une différence de densité [1].

Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps [2].

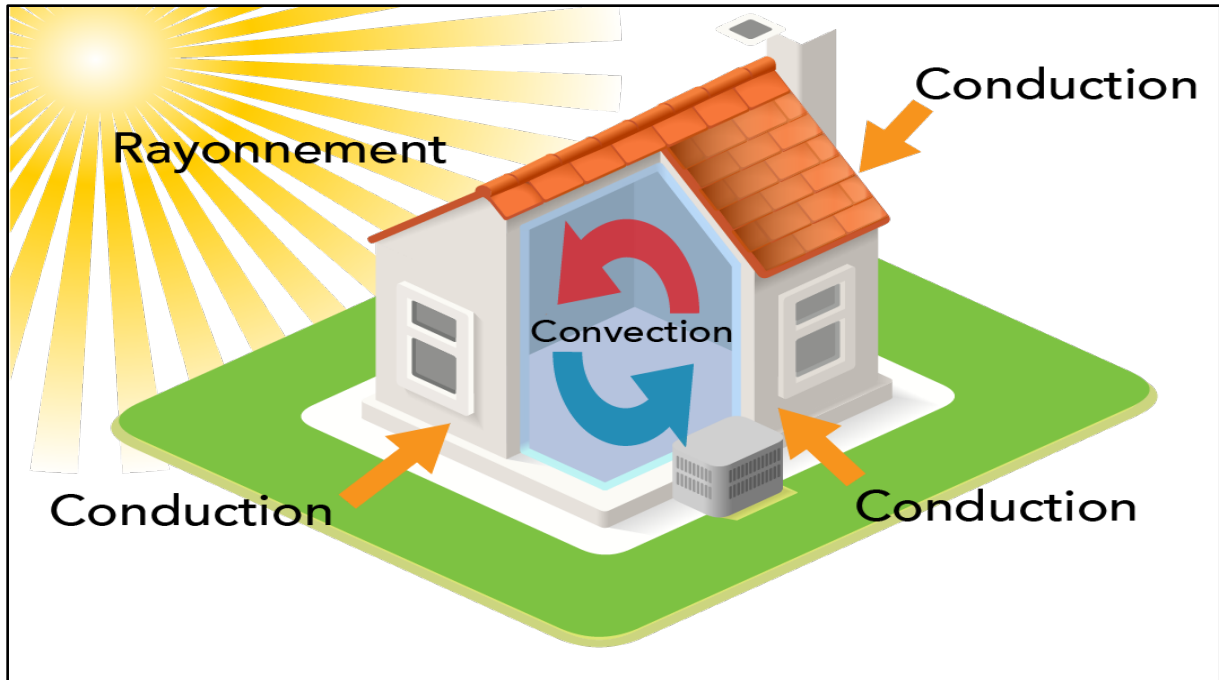


Figure 1.1.différents types de transfert thermique dans une maison.

1.3. techniques d'amélioration du transfert thermique [3]

L'amélioration du transfert de chaleur par convection est l'un des domaines du transfert de chaleur qui connaît la croissance la plus rapide. Il y'a deux techniques pour améliorer le transfert de chaleur :

1.3.1. techniques passives

Les techniques passives présentent également certains avantages par rapport aux autres techniques d'amélioration du transfert de chaleur, telles qu'un faible coût, une production et une installation faciles.

Chapitre 01 Généralités et revue bibliographique

- **Les surfaces rugueuses :** Ils peuvent être soit solidaires de la base surface, ou fait en plaçant une "rugosité" adjacent à la surface. La rugosité intégrale est formée par usinage, ou « restructurer » la surface. Pour monophasé débit, la configuration est généralement choisie pour favoriser le mélange dans la couche limite près de la surface, plutôt que d'augmenter la chaleur surface de transfert.
- **Les surfaces étendues :** Ils sont couramment utilisées dans de nombreux échangeurs. Comme le montre l'ancienne équation, la température et la résistance peuvent être réduites en augmentant le coefficient de transfert de chaleur h , ou la surface S , ou les deux h et S . L'utilisation d'un aileron simple peut fournir seulement une augmentation de superficie.
- **Les dispositifs d'insertion déplacés :** sont des dispositifs insérés dans le canal d'écoulement pour améliorer le transport d'énergie à la surface chauffée indirectement.
- **Les dispositifs d'écoulement tourbillonnaire :** Ils comprennent un certain nombre d'arrangements géométriques ou inserts de tubes pour flux forcé qui créent des rotations ou flux secondaires, ils peuvent être utilisés pour les écoulements à une seule.
- **Tubes enroulés :** représentent une technique relativement appropriée pour les échangeurs de chaleur, ils peuvent fournir des échangeurs de chaleur plus compacts. Le flux secondaire dans le tube enroulé produit plusieurs coefficients monophasés et une amélioration dans la plupart des régimes d'ébullition.
- **Les additifs pour liquides :** incluent les particules solides ou bulle de gaz dans les écoulements monophasiques. Ces additifs réduisent généralement la tension superficielle du liquide pour des systèmes d'ébullition.
- **Les additifs gazeux :** sont des gouttelettes liquides ou des particules solides qui pénètrent dans le flux de gaz en une seule phase, soit en phase diluée (gaz-solide suspensions) ou en phase dense (tubes garnis et lits fluidisés).

1.3.2. Les techniques actives

Les techniques actives sont plus complexes que les techniques passives dans l'expression de la conception et de l'application en raison de la nécessité d'une énergie externe pour ajuster le débit de fluide de manière à obtenir une amélioration du rendement thermique. Fournir de l'énergie externe dans la plupart des applications n'est pas facile ; pour cette raison, l'utilisation de techniques actives dans les domaines scientifiques est limitée.

- **La vibration des surfaces :** C'est une méthode utilisée principalement soit à basse ou haute fréquence pour améliorer le transfert de chaleur monophasé. Un piézoélectrique dispositif peut être utilisé pour faire vibrer une surface et projeter de petites gouttelettes sur une surface chauffée pour promouvoir le « refroidissement par pulvérisation ».
- **La vibration des fluides :** C'est une technique plus pratique d'amélioration des vibrations en raison de la masse de la plupart des échangeurs de chaleur. Les vibrations vont des pulsations d'environ 1 Hz aux ultrasons. Les fluides monophasiques sont une préoccupation majeure.
- **Champs électrostatiques :** Ils sont appliqués dans les systèmes d'échange impliquant des fluides diélectriques. D'une manière générale, les champs électrostatiques peuvent être dirigés pour provoquer un mélange plus important de fluide au voisinage de la surface de transfert de chaleur.
- **L'injection :** Il est utilisé en fournissant du gaz à travers une surface poreuse de transfert de chaleur à un écoulement de liquide ou en injectant le même liquide en amont de la section de transfert de chaleur. Le gaz injecté augmente le flux monophasique. Le dégazage de surface des liquides peut produire des effets similaires.
- **Impact de jet :** Il force un fluide monophasique normalement ou obliquement vers la surface. Des jets simples ou multiples peuvent être utilisés, selon leur direction d'injection, dans les écoulements à une seule phase ou dans les applications d'ébullition.

1.4. Écoulement des fluides à travers différents types des canaux

La notion de régime d'écoulement a été introduite par Reynolds [4]. Un écoulement principal (en blanc) parcourt un tube cylindrique par l'intermédiaire d'un second tube plus fin aligné axialement avec le premier, un colorant est injecté. Afin de limiter les instabilités à l'interface fluide -colorant, les vitesses des deux écoulements sont aussi proches que possible. Trois régimes d'écoulement sont identifiés : le régime laminaire, le régime transitoire et le régime turbulent [5].

- Dans l'écoulement laminaire dans les tuyaux, les particules de fluide se déplacent en couches parallèles sans se mélanger les unes aux autres. Dans la zone périphérique, le fluide est freiné par le frottement de la canalisation et se déplace plus lentement que l'axe de la canalisation. L'écoulement laminaire reproduit des vitesses plus faibles et à une viscosité élevée.

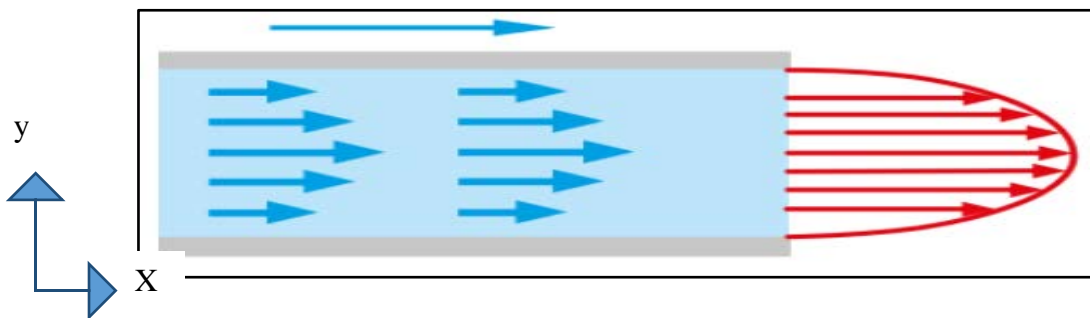


Figure 1.2. Écoulement laminaire.

- En régime transitoire : Lorsque la vitesse d'écoulement augmente, des instabilités hydrodynamiques apparaissent entre les couches liquides entraînant l'apparition d'oscillations et un début de mélange des tranches fluides sur la figure 1.3.

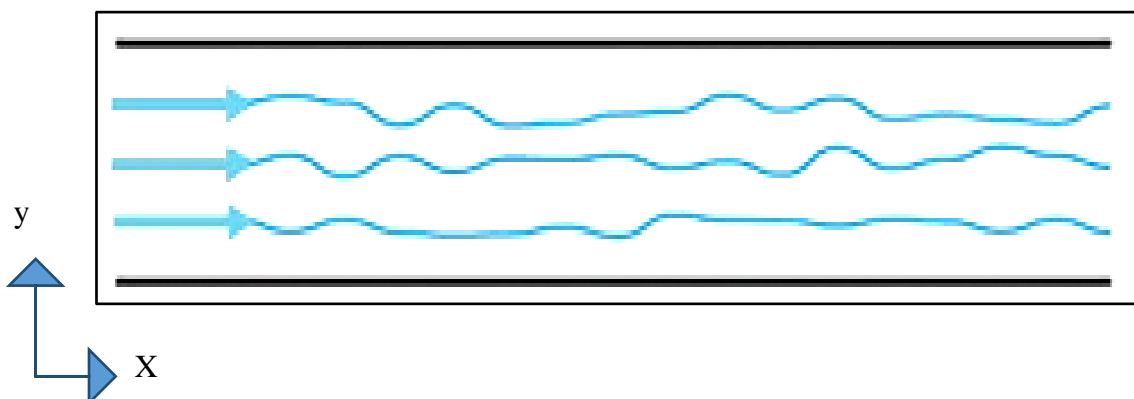


Figure 1.3. Ecoulement transitoire.

- Dans un écoulement turbulent (figure 1.4), les différentes couches de fluide s'entremêlent en tourbillonnant et en échangeant de l'énergie entre elles. La forme du flux qui se forme est caractérisée par des mouvements tridimensionnels, imprévisibles et non stationnaires. Une couche limite laminaire subsiste en partie, mais uniquement dans la zone périphérique de la conduite. La distribution des vitesses est pratiquement constante sur une grande partie de la section de conduite. Contrairement à l'écoulement laminaire, la perte de charge est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne du fluide.

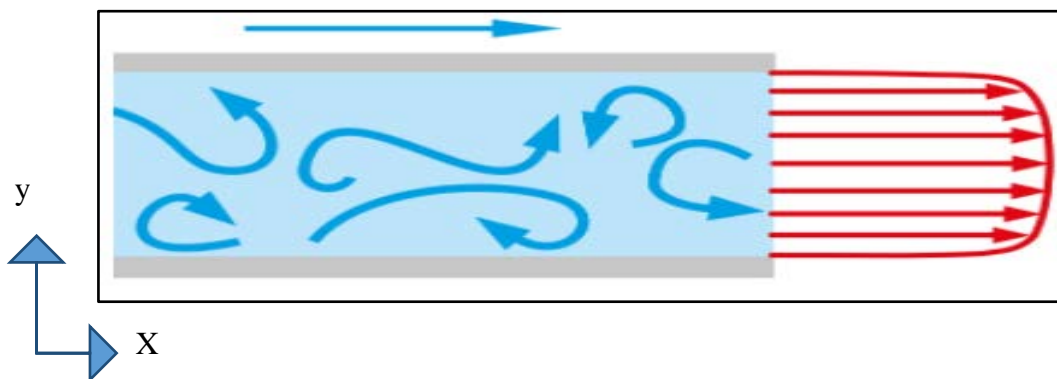


Figure 1.4. Ecoulement turbulent.

1.4.1. Différentes régions caractérisant l'écoulement dans un canal

L'entrée du fluide à l'intérieur du tube est appelée longueur d'entrée où l'écoulement a un comportement non visqueux. La figure 1.5 montre que les profils de la vitesse sont pratiquement établis dans la région développée [3].

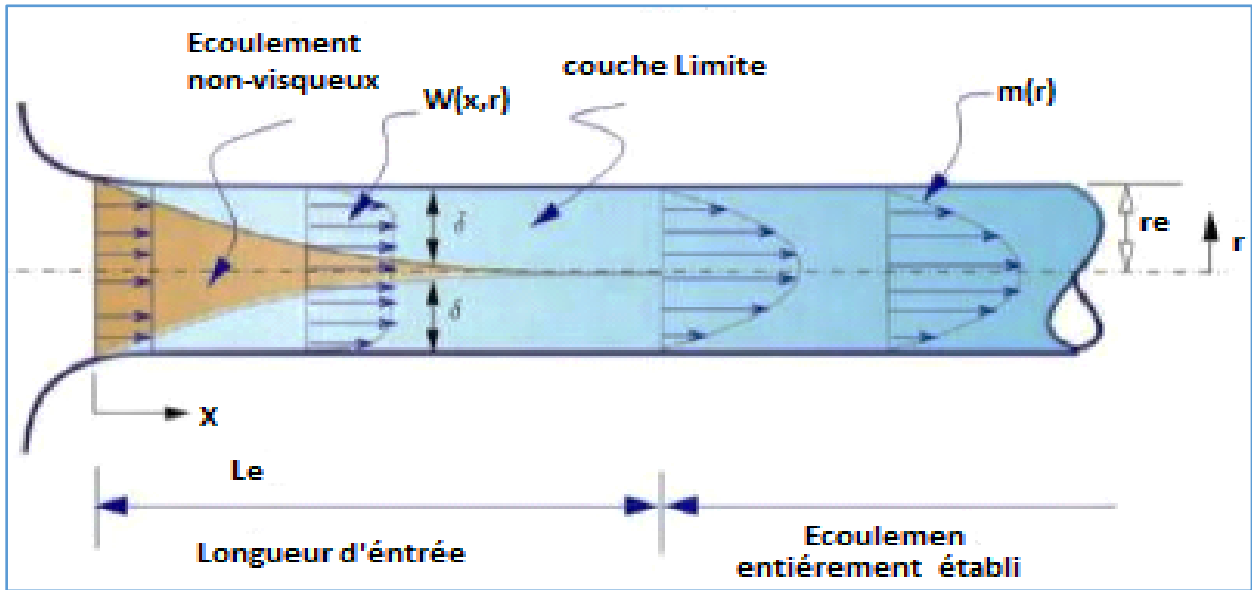


Figure 1.5. Etablissement du profil de vitesse dans la conduite.

Développement d'une couche limite sur une plaque plane. Trois régimes d'écoulement sont visibles : laminaire (1), transitoire (2) et turbulent (3). Une sous-couche laminaire en dessous de la couche turbulente. Lorsque la distance au bord d'attaque devient supérieure à une valeur critique $X_c(m)$, la couche limite subit une transition turbulente.

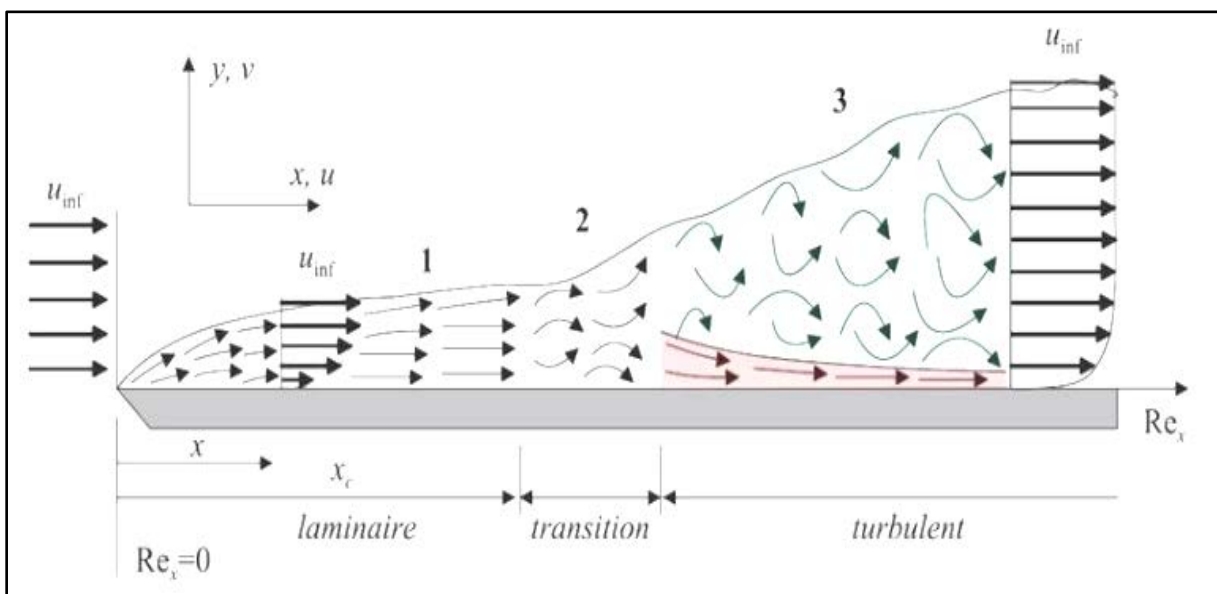


Figure 1.6. Les étapes de développement de la couche limite.

Chapitre 01 Généralités et revue bibliographique

Le critère de turbulence d'un écoulement en paroi pour un écoulement externe est donné par le nombre de Reynolds dans lequel le diamètre hydraulique, inexistant dans ce cas, est remplacé par la distance $X(m)$ au bord d'attaque.

Pour le régime laminaire, White [4] propose la relation suivante : $Le = 50 Dh$ pour l'établissement de l'écoulement.

1.4.2. Facteurs agissant sur les écoulements dans un canal [3]

Il y'a quatre principaux facteurs qui impacte l'écoulement des fluides dans une conduite :

- **La vitesse d'écoulement** : d'un liquide ou d'un gaz est proportionnelle à son débit. Etant donné que la section est proportionnelle au carré du diamètre, la vitesse est inversement proportionnelle au carré du diamètre de la canalisation.
- **Frottement sur la conduite** : Ce facteur est considéré comme négatif car il réduit le débit de fluide dans les tubes de sorte que la vitesse du fluide chute considérablement près des parois des tubes. Si le tuyau est lisse, propre et a un grand diamètre, le facteur de frottement a peu d'effet sur le débit de sortie du fluide.
- **Viscosité dynamique** : Elle réduit, le frottement et le débit de l'écoulement. Elle augmente ou diminue en fonction des variations de la température et pour les nanofluides la densité des nanoparticules.
- **Masse volumique** : Elle influence également sur le débit, car plus un fluide est dense plus il requiert une charge supérieure pour obtenir le débit souhaité. Le caractère compressible de certains fluides (gaz) nécessite souvent différentes méthodes pour mesurer les débits.

1.5. Revue bibliographiquesur l'amélioration de transfert de chaleur avec les nanofluides

L'augmentation de la conductivité thermique du fluide caloporteur permet d'améliorer l'efficacité du processus de transfert thermique associé. Lorsque la convection forcée dans les

Chapitre 01 Généralités et revue bibliographique

échangeurs compacts ou la convection naturelle dans les enceintes est considérée, il est prévu que le coefficient de transfert de chaleur s'améliore en utilisant les nanofluides et que l'amélioration est principalement due à la conductivité thermique du nanofluide, en raison de la définition de nombre de Nusselt. Cependant, la recherche sur le transfert de chaleur par convection de nanofluide a indiqué que l'amélioration du coefficient de transfert de chaleur dépend l'amélioration de conductivité thermique des nanofluides. Pour expliquer cette amélioration supplémentaire, plusieurs modèles ont été proposés par les chercheurs [7].

En 1998, les chercheurs Young et al. [8] Ont mené une investigation numérique de la convection forcée pour un fluide compressible dans un canal contenant une rangée d'obstacles chauffés et attachés à sa paroi inférieure, pour voir l'influence de quelques paramètres tels que le nombre de Reynolds, de la hauteur, de la largeur et de l'espacement des obstacles ainsi que de leur conductivité thermique. Les résultats montrent que tous ces paramètres ont des influences remarquables sur la variation du nombre de Nusselt moyen, la structure d'écoulement et de la distribution de la température au sein du fluide.

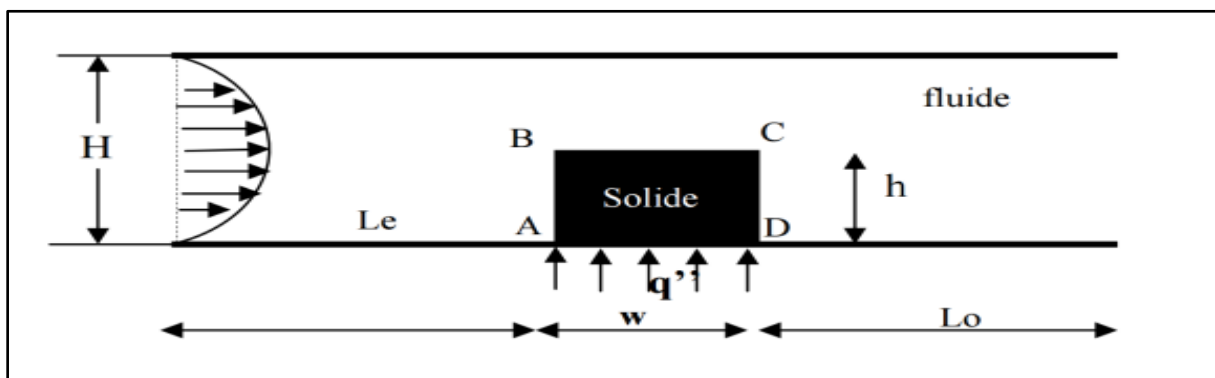


Figure 1.7. Canal contenant un seul obstacle chauffé.

Xuan et Li.[9] ont réalisé une étude expérimentale pour calculer le coefficient de transfert convectif des nanofluides pour des écoulements laminaire et turbulent dans un tube horizontal. Pour se faire ils ont utilisé l'eau comme fluide de base avec une suspension de nanoparticules de cuivre ($dp < 100nm$) pour plusieurs fractions volumique (0.2, 0.5, 0.8, 1, 1.5et 2%). Ils ont conclu que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de la fractionvolumique et de la vitesse. En se basant sur ces résultats expérimentaux, ils ont établi

deux corrélations en introduisant le terme de nombre de Peclet qui caractérise l'effet de la dispersion thermique causé par la microconvection et la microdiffusion des nanoparticules.

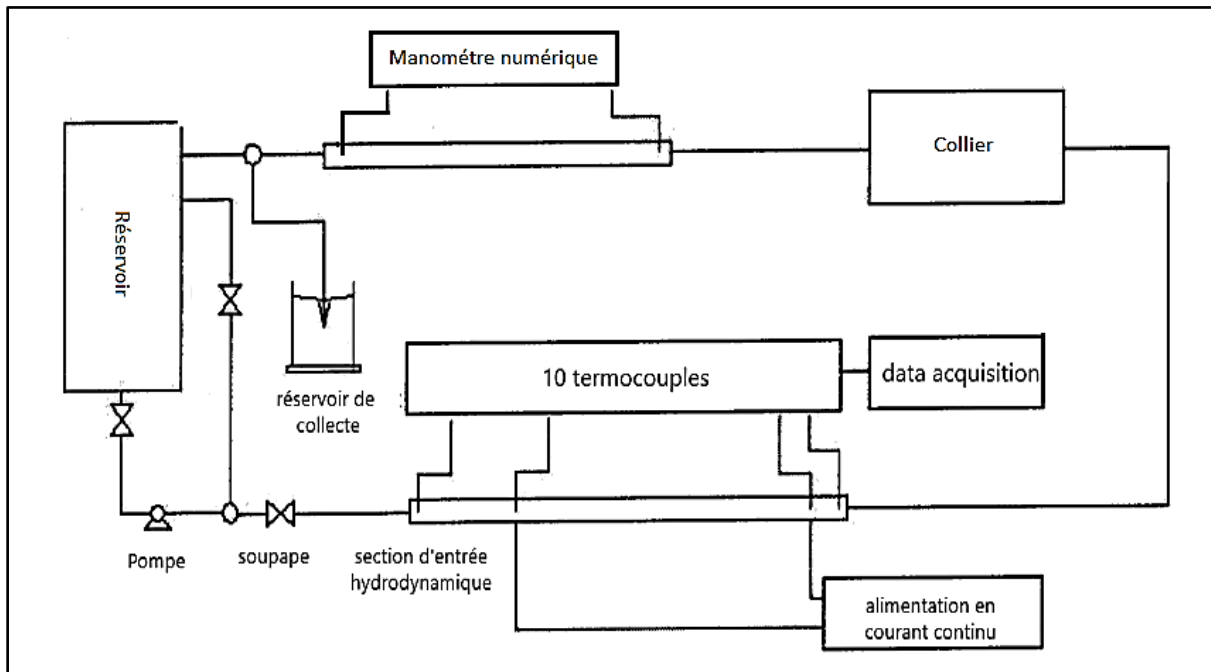


Figure 1.8. système expérimental de la fonction de transfert de chaleur par convection pour le nanofluide.

Dans l'étude de Roy et al. [10] les champs hydrodynamiques et thermiques d'un nanofluide Al_2O_3 -eau dans un système de refroidissement radial à écoulement laminaire sont considérés, avec des propriétés thermophysiques constantes et dépendantes de la température telles que la conductivité thermique et la viscosité dynamique. Les résultats indiquent qu'une amélioration considérable du transfert de chaleur est possible, permettant même d'atteindre le double dans le cas de nanofluides contenant 10% en fraction volumique de nanoparticules. D'autre part, une augmentation de la contrainte de cisaillement de la paroi est également remarquée avec une augmentation de la concentration volumique de particules.

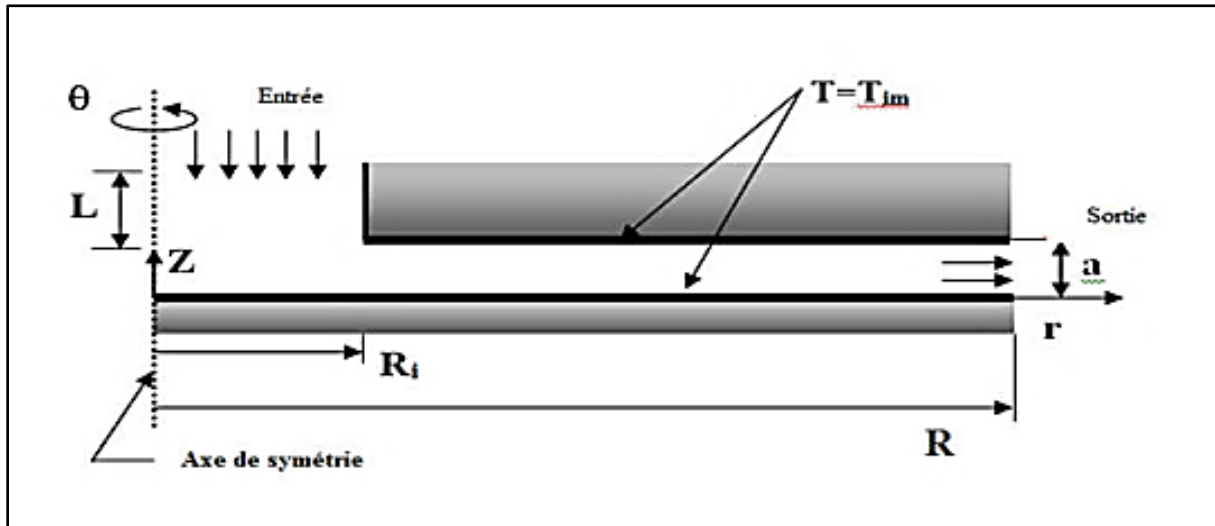


Figure 1.9. Schéma sur le système de refroidissement radial.

Yang et al. [11] ont effectué une étude expérimentale sur le transfert convectif d'un nanofluide contenant des nanoparticules de graphite de diamètre varie de 20 à 40 nm dispersées dans une huile synthétique pour un écoulement laminaire dans un tube circulaire où le nombre de Reynolds varie de 5 à 110, et ils ont fait varier la fraction volumique de 0 à 2%. Ils ont conclu que le nombre de Nusselt augmente environ 22% pour le cas où le fluide caloporteur est un nanofluide donc ils ont présenté une corrélation en fonction de dimensions de tube ainsi que la viscosité dynamique.

Maiga et al. [12] ont présenté un travail numérique pour mesurer le coefficient de transfert convectif des nanofluides pour un écoulement laminaire dans un tube circulaire, pour réaliser cette étude ils ont choisi l'eau comme fluide de base et l'alumine comme nanoparticules avec une concentration volumique comprise entre 0 et 10%, les résultats indiquent que l'inclusion des nanoparticules produit une augmentation remarquable dans le flux thermique, ils ont proposé deux corrélations, une pour une température constante et l'autre pour un flux constant. Ces formules sont valables pour un Reynolds inférieur à 1000 et Prandtl compris entre 6 et 753.

Heris et al. [13] ont mené une enquête exploratoire pour déterminer la perte de charge et les qualités d'échange thermique des nanofluides $Al_2O_3 - eau$ et $CuO - eau$ dans un conduit triangulaire sous flux de chaleur constant où le flux était laminaire.

Chapitre 01 Généralités et revue bibliographique

Les résultats expérimentaux soulignent que la corrélation monophasique avec les propriétés des nanofluides (modèle homogène) n'est pas en mesure de prédire l'amélioration du coefficient de transfert de chaleur des nanofluides. La comparaison entre les résultats expérimentés obtenus pour les nanofluides $CuO-eau$ et Al_2O_3-eau indique que les ratios de coefficient de transfert de chaleur pour le modèle nanofluide au modèle homogène à faible concentration sont proches les uns des autres, mais en augmentant la fraction volumique, une amélioration du transfert de chaleur plus élevé pour Al_2O_3-eau peut être observé.

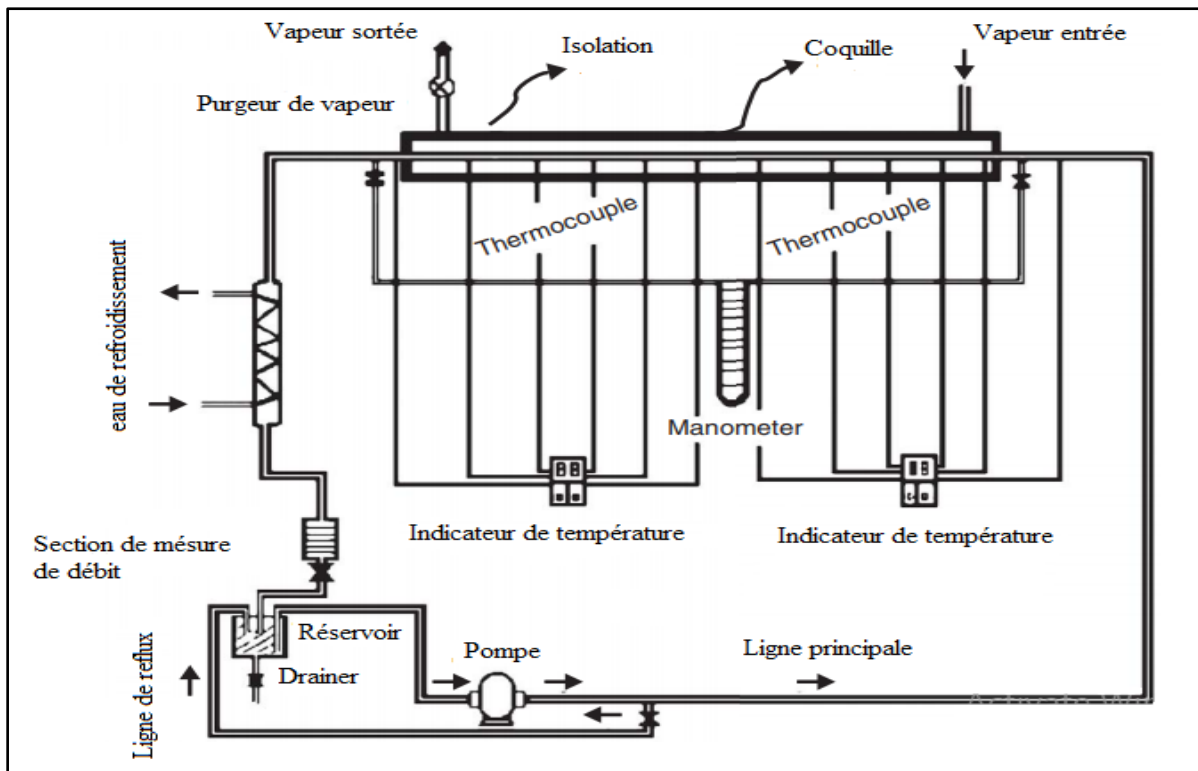


Figure 1.10. Schéma de circuit expérimental.

Ho et al.[14] ont développé une étude numérique portant sur la convection dans une cavité chauffée remplie par le nanofluide Al_2O_3-eau . Ils ont montré que les résultats obtenus ont une forte influence sur le transfert de chaleur. Ils ont fait des simulations pour des nombres de Reynolds variant de 103 à 106 et pour une fraction volumique variant de 0 à 4%. Ils ont alors relevé que le recours à l'une ou l'autre des relations donnant les grandeurs thermophysiques d'un nanofluide conduit à des résultats différents pour le transfert de chaleur dans cette configuration.

Anoop et al. [15] conduit des expériences de transfert de chaleur par convection dans la région de développement de flux laminaire ($300 < Re < 2200$) avec des nanofluides $Al_2O_3 - eau$ de deux tailles de nanoparticules. Le nanofluide contenant des nanoparticules plus petites présente un coefficient de transfert de chaleur plus élevé. L'amélioration du transfert de chaleur dans la région d'entrée dépasse celle de la région presque développée.

Izadi et al. [16] ont mené une étude numérique pour déterminer la valeur de coefficient convectif et pour un écoulement laminaire d'un nanofluide de $Al_2O_3 - eau$ de concentration volumique variant entre 0%, 1%, 3% et 5% et de Reynolds de 100 et 900. Leurs résultats montrent que le coefficient de convection augmente avec la concentration de nanoparticules et l'augmentation de Reynolds.

Heidary et Kermani [17] ont étudié numériquement l'amélioration du transfert de chaleur et le champ d'écoulement de nanofluide (cuivre-eau) dans un canal sinusoïdal. Cette simulation numérique a été réalisée sur une plage de nombre de Reynolds entre 5 et 1500, et une fraction volumique entre 0 et 20%. Ils ont observé que l'amélioration du transfert de chaleur augmente en fonction du nombre de Reynolds, de l'amplitude du canal ainsi que de la fraction volumique des particules.

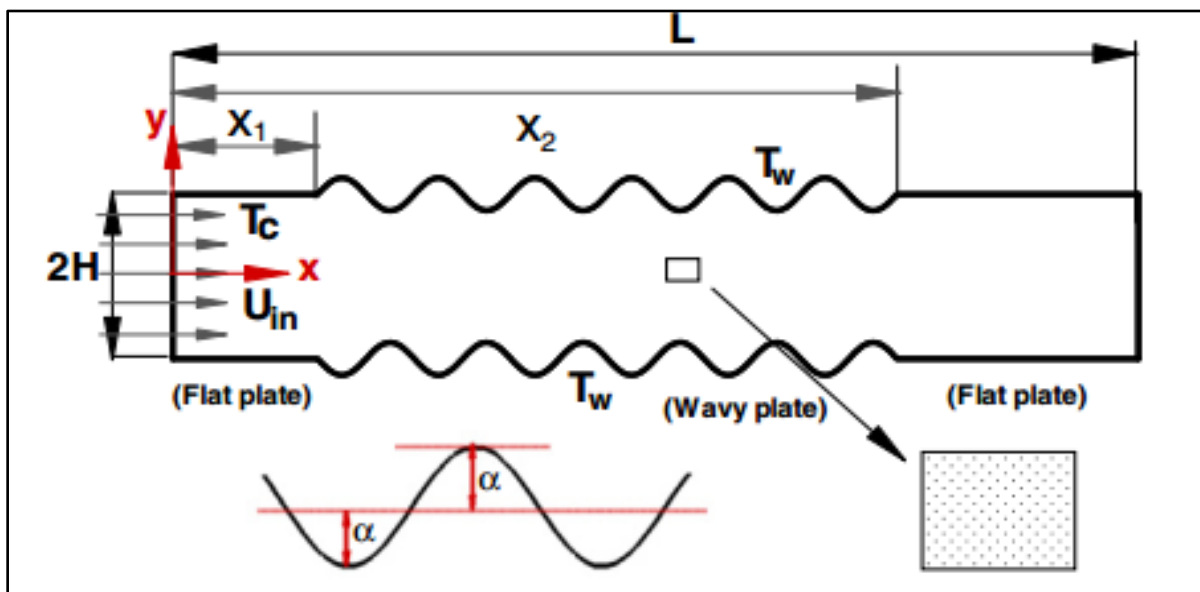


Figure 1.11. Schéma de conduit étudié.

Ahmed et al. [18] ont étudié numériquement l'amélioration du transfert de chaleur et la chute de pression d'un écoulement laminaire de nanofluide *cuivre – eau* à travers un canal ondulé chauffé en utilisant la méthode des différences finies. Dans cette étude, le nombre de Reynolds et les fractions volumiques des nanoparticules étaient respectivement de 100 à 1000 et de 0 à 0.05%. Ils ont observé que l'amélioration du transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique de la nanoparticule et du nombre de Reynolds.

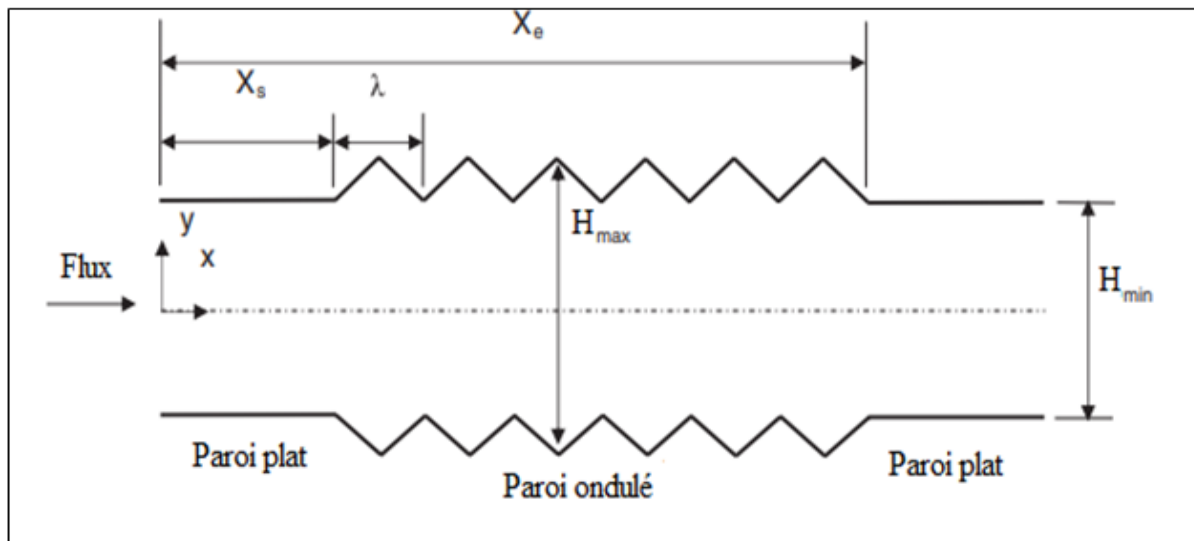


Figure 1.12. Géométrie du problème étudié.

Sajadi et Kazemi[19] ont présenté une investigation expérimentale de la convection thermique d'un régime turbulent dans un tube contenant des nanoparticules de dioxyde de titane (30 nm) de fraction volumique variant de 0.2 à 0.25% suspendues dans l'eau, ils ont remarqué que la présence des nanofluides cause une amélioration du transfert thermique et une augmentation dans la différence de pression.

Sharjil et Manu [20] ont présenté des recherches numériques sur le développement d'un flux de convection forcée laminaire de nanofluide d'alumine-eau dans un tube circulaire soumis à un flux de chaleur de paroi uniforme. Les effets du diamètre des particules, du nombre de Reynolds et de la fraction volumique des particules sont étudiés sur le coefficient de transfert de chaleur moyen. La présente étude utilise la modélisation en phase discrète qui est une approche d'Euler Lagrangienne. Le fluide est traité comme un milieu continu et le champ

Chapitre 01 Généralités et revue bibliographique

d'écoulement est résolu sur la base des équations de Navier-Stokes. Le modèle numérique validé est utilisé pour formuler une matrice de conception à trois facteurs avec chacune des trois variables indépendantes considérées à trois niveaux différents. La matrice considère la taille des particules (de 50 nm, 75 nm et 100 nm), le nombre de Reynolds (250, 750 et 1250) et la fraction volumique des particules (1, 2.5 et 4 pour cent). Les résultats de cette étude ont montré que le coefficient de transfert de chaleur augmente linéairement avec le nombre de Reynolds et la fraction volumique, et il y a une diminution parabolique non linéaire avec l'augmentation de la taille des particules.

Ahmed et al. [21] ont étudié numériquement l'amélioration du transfert de chaleur et la chute de pression d'un écoulement laminaire de nanofluide *cuivre-eau* dans un canal ondulé trapézoïdal en utilisant la méthode des volumes finis. Dans cette étude, le nombre de Reynolds et les fractions volumiques des nanoparticules étaient respectivement de 100 à 700 et de 0 à 5 %.

Leurs résultats révèlent que le taux de transfert de chaleur augmente lorsque la fraction volumique des nanoparticules, le nombre de Reynolds et l'amplitude du canal augmentent au prix d'une chute de pression croissante.

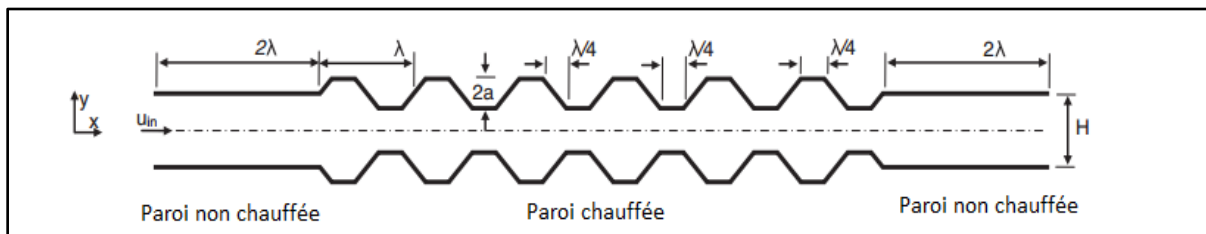
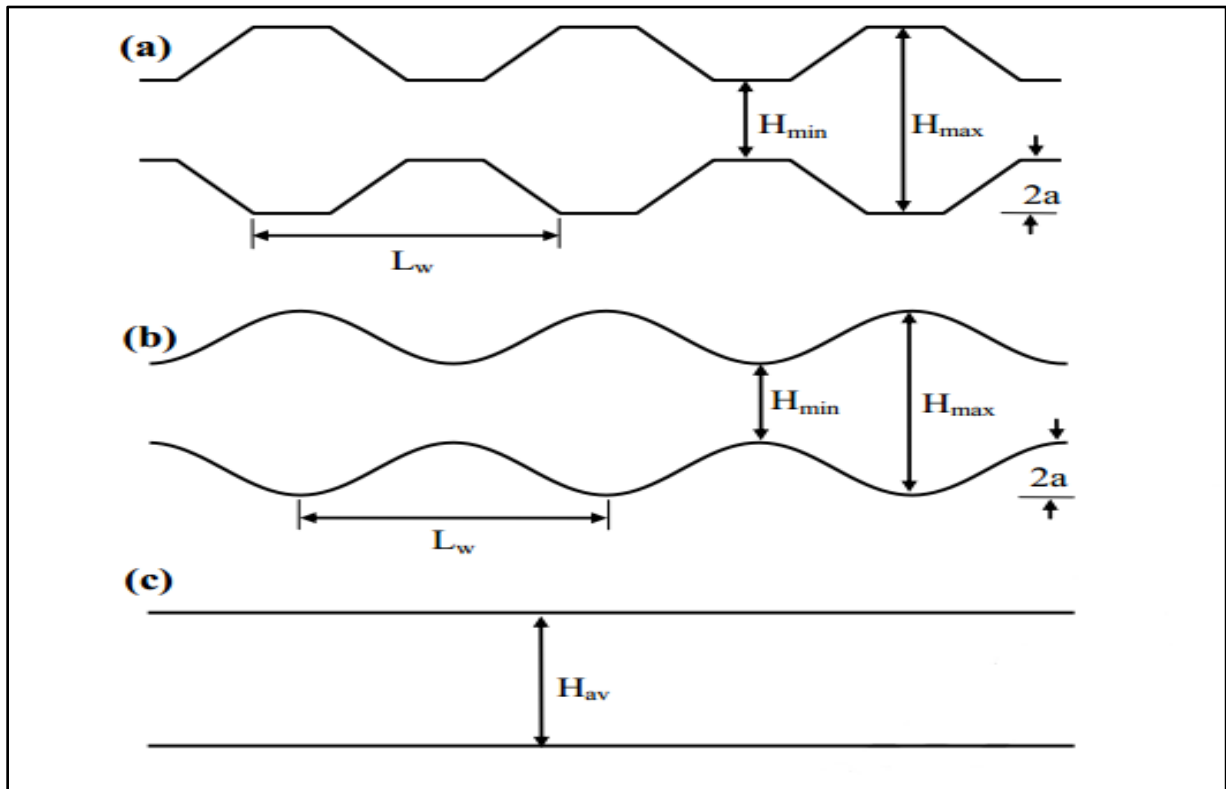


Figure 1.13. Géométrie du problème actuel.

Khoshvaght-Aliabadi et al. [22] ont étudié expérimentalement les effets des géométries des canaux plaque-ailette sur les performances thermo hydrauliques à l'aide de nanofluide cuivre-eau. Leurs expériences ont été réalisées pour différentes géométries de canaux à ailettes, y compris les canaux lisses, générateurs de vortex, broches, bandes décalées, persiennes, perforées et ondulées, avec des différentes fractions volumiques (0 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % et 0,4 %). Il a été observé que le coefficient de transfert de chaleur et la chute de pression pour tous les canaux augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules

et du débit volumétrique. De plus, le coefficient de transfert de chaleur et la perte de charge pour le canal simple sont inférieurs à ceux des autres canaux.

Ahmed et al. [23] ont étudié numériquement et expérimentalement le transfert de chaleur par convection du flux de nanofluide $SiO_2 - eau$ dans des canaux avec différentes formes pour nombre de Reynolds varie de 400 à 4000. Les trois canaux différents, tels que trapézoïdale, sinusoïdale et droite ont été fabriqués et testés. Leurs résultats ont montré que le nombre de Nusselt moyen et l'amélioration du transfert de chaleur augmentent lorsqu'il y a une augmentation de la fraction volumique de nanoparticules, et le canal trapézoïdal-ondulé donne une amélioration de transfert de chaleur le plus élevée suivie par le canal sinusoïdal-ondulé et le canal droit.



Bharath et al. [24] ont fait une étude détaillée sur les caractéristiques d'écoulement turbulent et de transfert de chaleur de différentes configurations de nervures, (incliné de 45° , en forme V, en forme W et en forme M) dans un canal stationnaire à deux passages. Les équations de Navier-Stokes moyennées ont été résolues avec le logiciel commercial FLUENT pour un

nombre de Reynold entre 20.000 et 70.000. Les résultats de cette simulation, l'amélioration du transfert de chaleur fournie par les nervures en forme V était 7%, 28% et 35% plus élevé par rapport aux autres nervures.

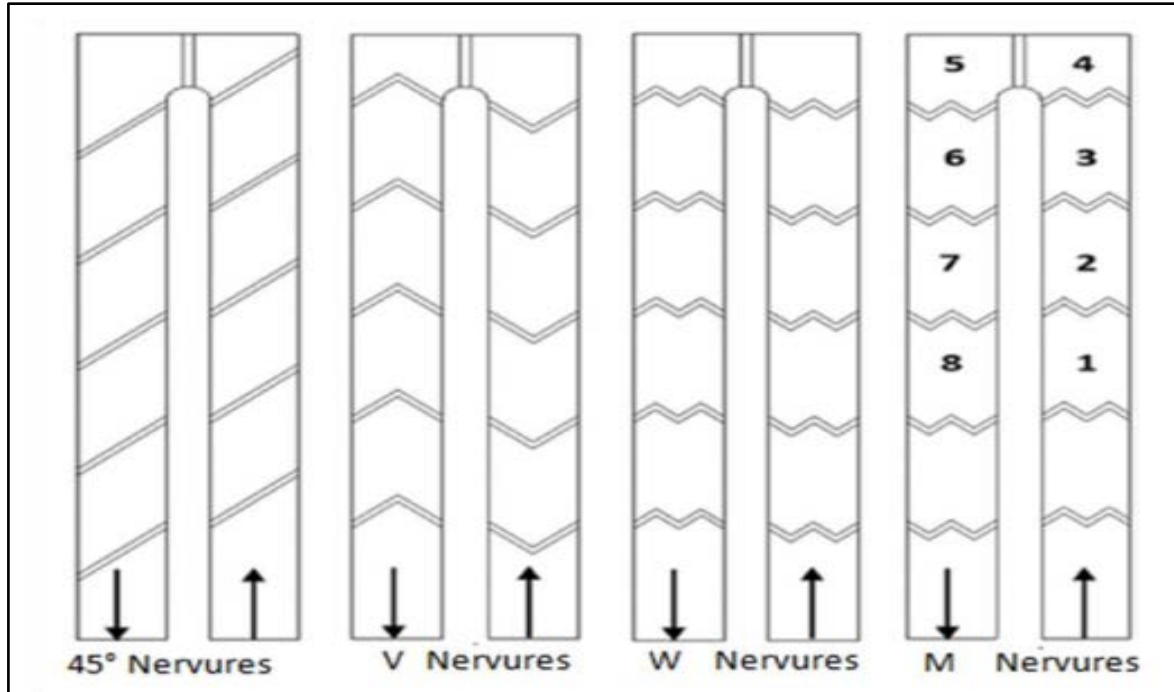


Figure 1.15. Différentes formes de nervures.

Behnampour et al. [25] Ils étudient numériquement les effets des ondulations rectangulaires, triangulaires et trapézoïdales sur le transfert de chaleur en régime laminaire de nanofluide dans un canal sous un flux de chaleur constant. Les résultats indiquent que la forme rectangulaire a fait plus d'efficacité dans les lignes de courant et la forme triangulaire aux meilleures valeurs de critères d'évaluation de la performance thermique. Pour tous les nombres de Reynold étudiés, les valeurs de transfert de chaleur sont les moins importantes pour les rectangulaires. Par contre, les trapézoïdales sont recommandées dans les nombres de Reynold élevés.

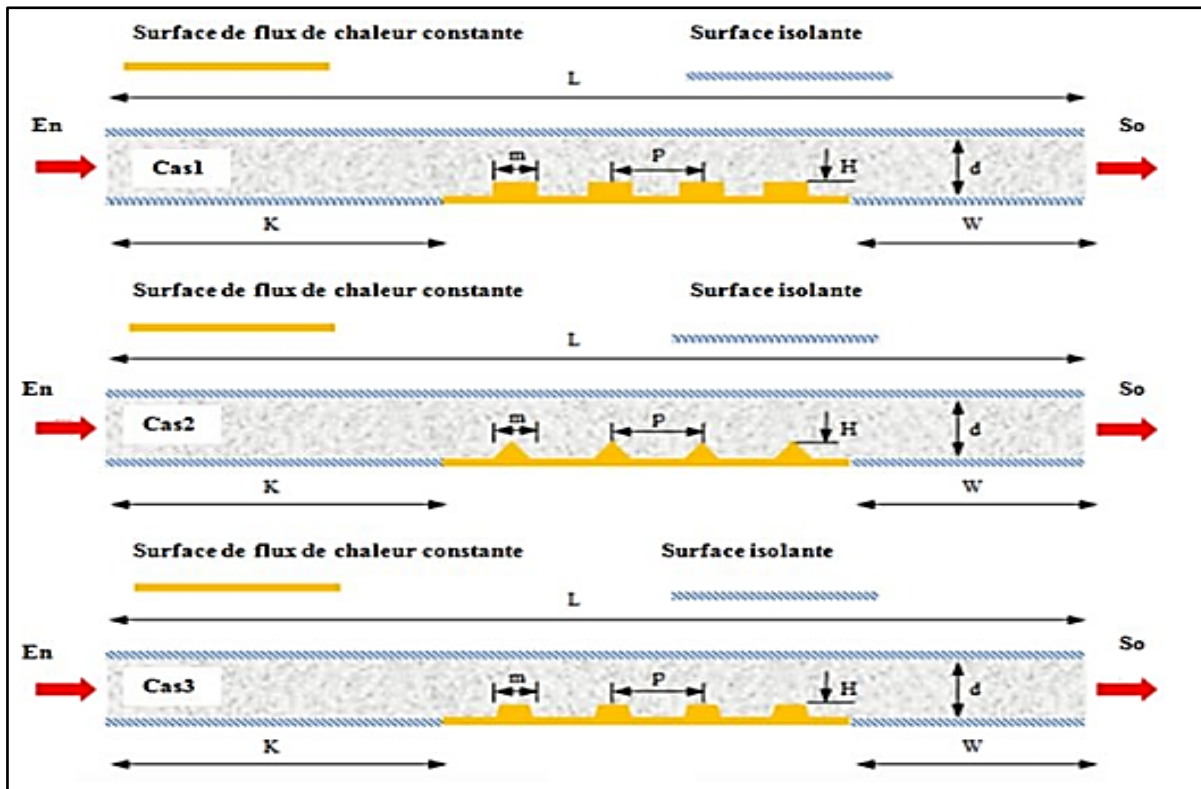


Figure 1.16. Schéma des micro-canaux étudiés.

À travers la recherche d'Ahmed et al. [26] Il a été pris comme étude l'arrangement en draient des bancs de tubes circulaires afin d'étudier numériquement le transfert de chaleur de Al_2O_3 par convection d'eau sur les bancs du tube dans des conditions de température constante du dispositif. Les équations gouvernantes ont été résolues en utilisant l'approche des volumes finis basée sur la technique SIMPLE en coordonnées ajustées au corps. Le nombre de Reynolds comprises entre 100 et 600 et la fraction volumique allant de 0 à 0.05. L'effet du degré longitudinal a été étudié et discuté par pas transversal de concentration de nanoparticules sur les lignes de courant, température et facteurs de frottement. Les résultats ont montré que la meilleure performance est obtenue pour un rapport de pas longitudinal de 1.5, un rapport de pas transversal de 2.5 et une fraction volumique de nanoparticules de 5% sur les plages de nombre de Reynolds.

Tahsin et al. [27] Ont développés une étude d'analyse numérique du transfert de chaleur par convection d'un canal ondulé pour un écoulement laminaire dans la région pleinement développée. Un nanofluide d'eau d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 et d'oxyde de cuivre CuO est

utilisé pour étudier la relation entre les caractéristiques de transfert de chaleur avec la géométrie ondulée et le nanofluide. L'équation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie monophasée du second ordre est résolue à l'aide du logiciel de dynamique des fluides numérique ANSYS 16. Différentes fractions volumiques (1% à 5%) ont été considérées ici avec de l'eau fluide de base pour augmenter les propriétés thermiques dans une plage de nombres de Reynolds de 50 à 100 pour assurer un écoulement laminaire à travers la section ondulée. La puissance de pompage, le nombre de Nusselt et le facteur de friction sont calculés et tous les résultats sont comparés avec de l'eau pure. Les résultats révèlent que $CuO - eau$ a un taux de transfert de chaleur plus élevé et un nombre de Nusselt qui est de 12,2208% plus que l'eau pure. La puissance de pompage requise est de 71,78343% plus élevée pour le nanofluide $Al_2O_3 - eau$. L'étude montre comment la différence de propriétés thermofluides des nanofluides affecte les performances globales de transfert de chaleur lorsqu'elles sont utilisées dans une géométrie ondulée sinusoïdale.

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs travaux antérieurs ont été cités, concernant les écoulements de nanofluides à travers différentes formes et géométries de canaux et différents types d'élargissements et d'ondulation de parois dans le but de mieux positionner le problème abordé dans ce travail.

En ce qui concerne les applications dans le domaine du transfert de chaleur, de nombreuses recherches numériques et expérimentales ont été menées depuis une dizaine d'années sur le transfert de chaleur par convection de nanofluide ont montré que l'amélioration du coefficient de transfert de la chaleur dépend de l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides.

Le travail que nous développons dans ce mémoire porte sur la convection forcée d'un écoulement laminaire d'un nanofluide à travers un canal. Cette étude a l'objectif d'analyser numériquement les performances d'un nanofluide composé de particules solides dispersées dans un fluide de base (Eau pure) à différentes concentrations volumiques et différentes diamètres de nanoparticules. De ce fait, l'effet de différents paramètres sur les champs

Chapitre 01 Généralités et revue bibliographique

dynamique et thermique, à savoir la forme de la géométrie, le type et la taille des nanoparticules et le nombre de Reynolds sont analysés.

Chapitre 02

Généralités sur les nanofluides

2.1. Introduction

Grace aux avancements récents en nanotechnologie, la production des particules avec des tailles de l'ordre de nanomètres (nanoparticules) peut être réalisée facilement. En conséquence, l'idée de mettre des nanoparticules en suspension dans un liquide de base pour améliorer la conductivité thermique a été proposée récemment.

Ce type de suspension est appelé (nanofluide). En raison de leur petite taille, les nanoparticules se mélangent aisément et d'une manière homogène avec le fluide de base, et en conséquence, le colmatage des conduites où s'écoulent ces fluides et la corrosion de leurs parois ne sont plus un problème. Il est même possible d'utiliser les nanofluides dans les micro-canaux. Lorsqu'il s'agit de la stabilité de la suspension, la sédimentation des particules peut être empêchée en utilisant des agents dispersants appropriés [28].

2.2. Les nanoparticules

2.2.1. Définition

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100 nm).

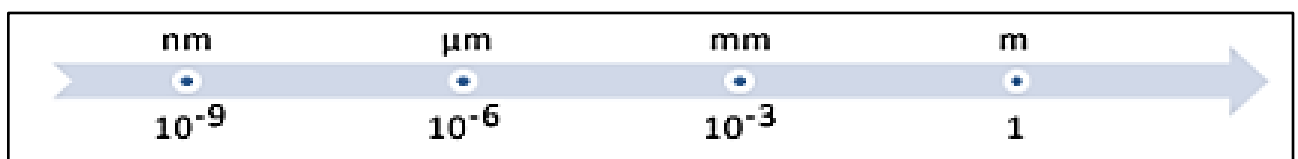


Figure 2.17.Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre.

Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué et sont très étudiées de nos jours. De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires. (Figure 2.18).

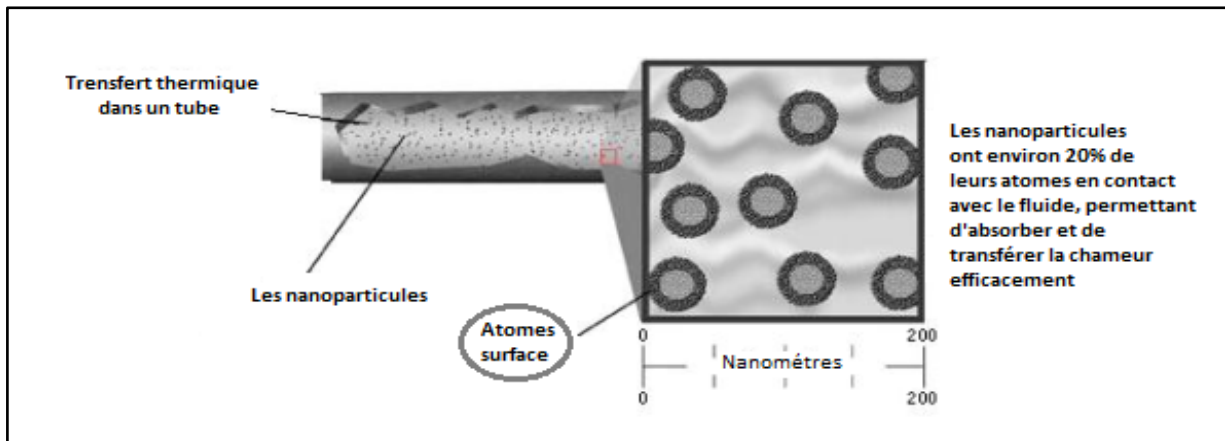


Figure 2.2. Nanoparticules dans un tube [29].

2.2.2. Type des nanoparticules

- ✓ Les nanoparticules des oxydes métalliques:
 - L'oxyde d'Aluminium,
 - L'oxyde de Cuivre,
 - L'oxyde de Silicium,
 - L'oxyde de Titanium.
- ✓ Les nanoparticules métalliques:
 - L'aluminium,
 - Le cuivre,
 - L'argent,
 - L'or,
 - La silicone.
- ✓ Les nanoparticules non métalliques:
 - Les nanotubes de carbone,
 - Le graphite.
- ✓ Les nanoparticules de carbure métallique:
 - Le carbure de silicium métallique.

2.3. Les nanofluides

2.3.1. Définition

Les nanofluides sont des solutions colloïdales constituées des particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide porteur. Ce type de solution suscite un grand intérêt depuis la découverte de leurs propriétés thermiques particulières. En effet, les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent leur capacité de transfert de chaleur.

L'idée est alors d'insérer au sein des liquides de base des nanoparticules de conductivité très élevée, afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer ces performances thermiques.

Les liquides de base, généralement utilisés dans la préparation des nanofluides, sont ceux d'usage commun dans les applications de transfert de chaleur tels que l'eau, l'éthylène glycol, l'huile de moteur etc [30].

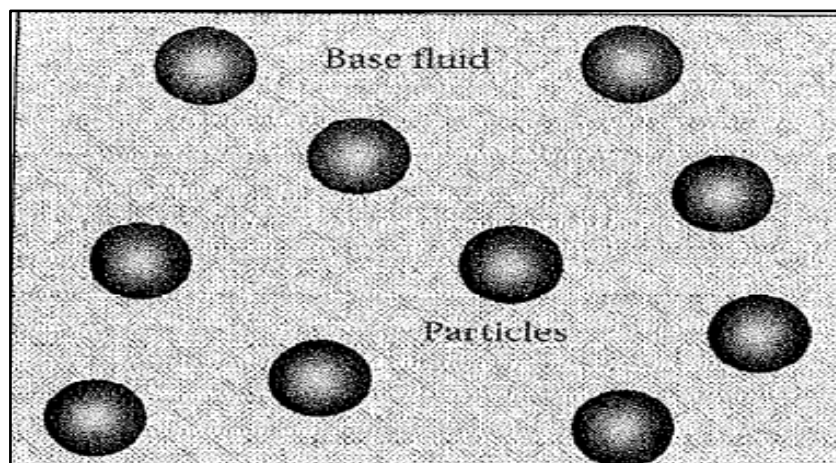


Figure 2.3.Représentation schématique des nanofluides [31]

2.3.2. Préparation des nanofluides [32]

Les nanofluides sont préparés en dispersant des nanoparticules dans le fluide de base. Une bonne dispersion est une condition préalable à l'application du nanofluide. C'est pourquoi on utilise

parfois des tensioactifs qui améliorent la stabilité des nanofluides. En outre, modification de surface des particules dispersées et application d'une force considérable sur les grappes de nanoparticules dispersées peut augmenter la stabilité de nanofluides. Il existe deux méthodes fondamentales pour préparer des nanofluides qui sont physiques en une étape et en deux étapes. Le processus chimique est une autre technologie émergente dans la préparation de nanofluides.

2.3.2.1. Méthode en une seule étape

Dans cette méthode, certains processus sont évités comme le séchage, le stockage, le transport et la dispersion des nanoparticules. Le nanofluide stable est préparé par la technique de dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Deposition PVD) dans laquelle l'évaporation directe et la condensation des nanoparticules sont transportées dans le fluide de base. Des nanoparticules pures et uniformes sont produites par cette méthode. Ainsi, l'accumulation de nanoparticules est réduite. Les principaux inconvénients de la méthode en une étape sont que les réactifs résiduels sont laissés dans les nanofluides et que le coût est également élevé.

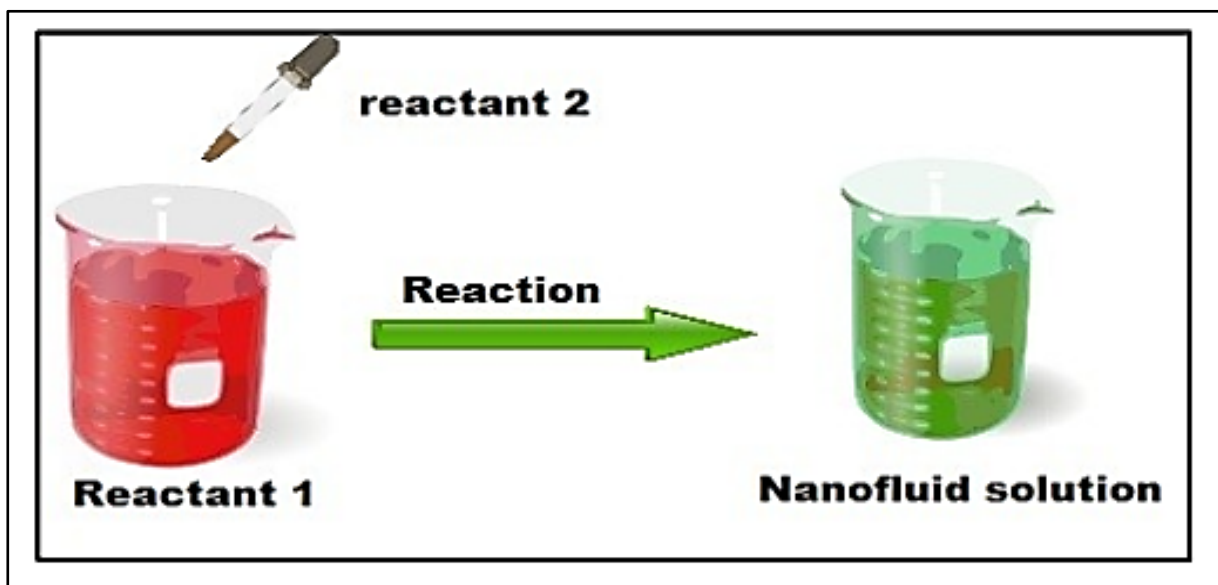


Figure 2.4. Processus de préparation en une étape des nano fluides.

2.3.2.2. Méthode en deux étapes

C'est la méthode la plus économique pour la préparation à grande échelle de nanofluide. Dans une méthode en deux étapes, les nanoparticules sont obtenues par différentes méthodes, puis ces nanoparticules sont dispersées dans le liquide de base pour le nanofluide souhaité. Ce processus

de production est peu coûteux et massif. Le principal inconvénient de la méthode en deux étapes est l'agrégation des nanoparticules. En raison de l'instabilité, un tensioactif est utilisé. C'est la méthode commerciale pour préparer le nanofluide. La plupart des chercheurs préfèrent cette méthode dans la préparation de nanofluide pour la recherche.

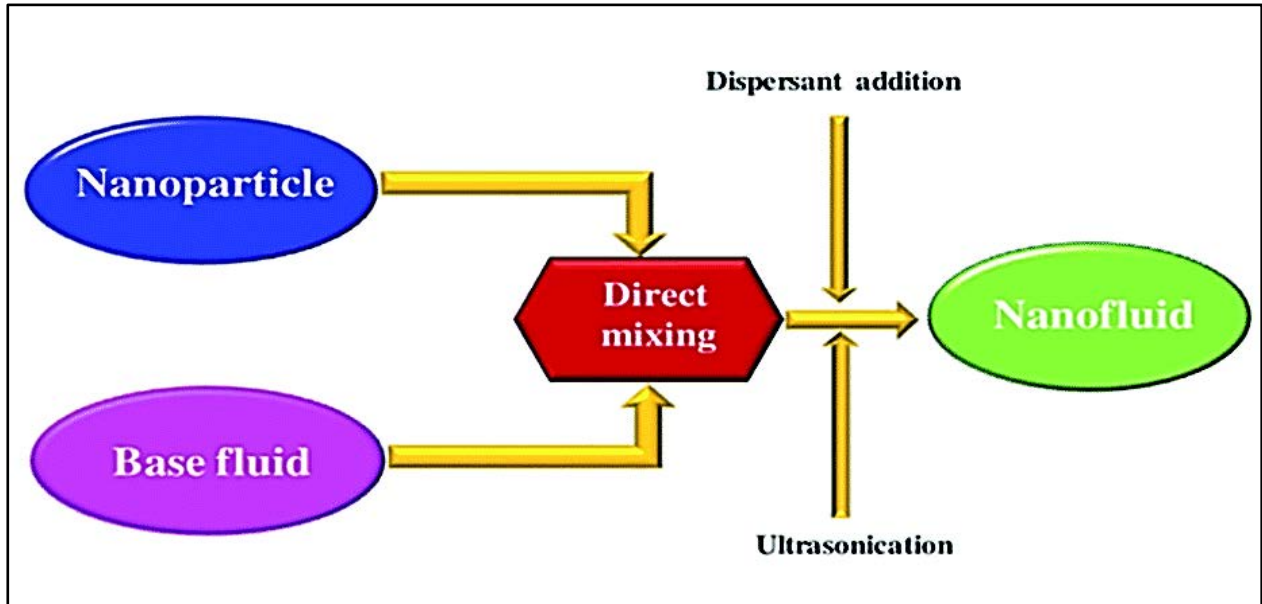


Figure 2.5. Processus de préparation en deux étapes de nano fluides [33].

2.3.2.3. Stabilité du nanofluide

La stabilité du nanofluide est importante pour obtenir les mêmes propriétés thermophysiques. La stabilité du nanofluide est liée à la force de répulsion électrique à double couche (Electrical Double Layer Repulsive Force EDLRF) et à la force d'attraction de Van der Waals. La force répulsive électrique à double couche doit être supérieure aux forces d'attraction de Van der Waals pour obtenir un nanofluide stable. Les forces d'attraction de Van der Waals entre les nanoparticules provoquent un regroupement en raison des forces d'attraction. Si cette force est élevée, les nanoparticules se séparent du fluide de base et ces nanoparticules agrégées se déposent au fond du récipient en raison de la force gravitationnelle. D'autre part, EDLRF agit comme opposé à la force d'attraction de Van der Waals qui sépare les particules les unes des autres.

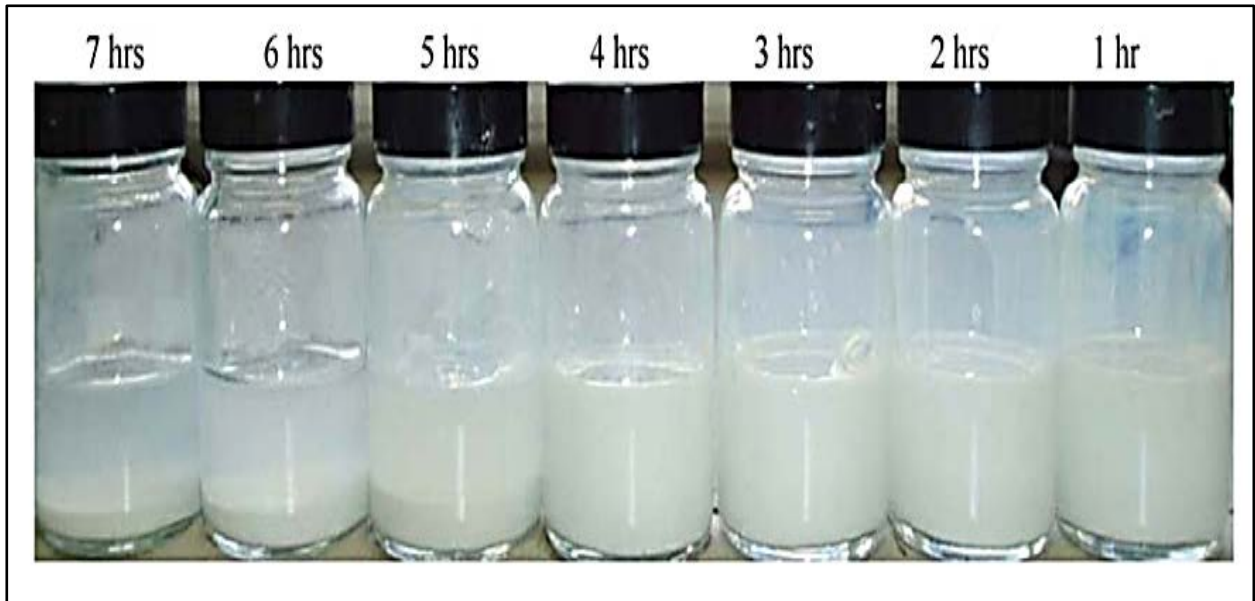


Figure 2.6. Sédimentation de nanoparticules d' Al_2O_3 sans stabilisant [34].

2.4. Propriétés thermo physiques des nanofluides

2.4.1. Fraction volumique

C'est la propriété la plus importante pour un nanofluide, elle est définie comme étant le rapport entre le volume des nanoparticules dispersées (V_p) sur le volume total (V_t). La valeur de la fraction volumique varie de 0 (fluide de base pur) et 1 (entièrement nanoparticules) [35].

La relation est donnée comme suit :

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.1)$$

2.4.2. Masse volumique et capacité thermique

La masse volumique et la capacité thermique de nanofluides sont supposées être des fonctions linéaires de la fraction volumique à une température donnée.

La masse volumique est calculée par la relation classique de Xuan et Roetzel [36] :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (2.2)$$

En outre, la chaleur spécifique est définie par deux relations :

- Celle de Roetzel et Xuan [36] relative à la chaleur massique :

$$(\rho Cp)_{nf} = (1 - \phi)(\rho Cp)_f + \phi(\rho Cp)_p \quad (2.3)$$

- Celle de Pak et Cho [37] relative à la chaleur spécifique:

$$Cp_{nf} = (1 - \phi)Cp_f + \phi Cp_p \quad (2.4)$$

2.4.3. Conductivité thermique

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur, c'est la propriété la plus importante pour l'amélioration des performances thermique d'un fluide caloporteur, la plupart des recherches théoriques et expérimentales ont été consacré pour estimer la valeur de la conductivité thermique d'un nanofluide. Cette propriété dépend de multiples paramètres tels que la température de milieu, la conductivité de fluide de base, les propriétés thermo-physiques des nanoparticules, la taille et la forme des particules, le mouvement Brownien et la fraction volumique des particules en suspension. Les études menées dans cet axe ont fourni une riche bibliographie, mais très variée.

Maxwell [38] a étudié théoriquement la conductivité thermique d'un nanofluide contient uniquement des nanoparticules de forme sphérique. Il a supposé que les particules ont le même diamètre et elles sont séparées d'une distance suffisante conduisant à l'absence d'interaction mutuelle entre elles, la conductivité thermique dans son modèle dépend seulement de la fraction volumique des nanoparticules en suspension, la conductivité thermique de fluide de base et celle des nanoparticules.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \frac{\lambda_p + 2\lambda_f - 2\phi(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_p)} \quad (2.5)$$

Bruggeman[39] a présenté théoriquement la conductivité thermique d'un nanofluide contenant des nanoparticules de forme sphérique avec une concentration volumique élevée, il a déclaré la relation suivante dépend des trois variables la conductivité thermique du fluide et des

nanoparticules ainsi que la fraction volumique. Ce modèle semble mieux approximer certains résultats expérimentaux pour le cas des nanoparticules sphérique.

$$\lambda_{nf} = \frac{1}{4} \left[(3\phi - 1)\lambda_p + (2 - 3\phi)\lambda_f \right] + \frac{\lambda_f^2}{4} \sqrt{\Delta}$$

Où :(2.6)

$$\Delta = \left[(3\phi - 1)^2 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi)^2 \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \right]$$

Hamilton et Crosser [40] ont modifié la formule proposée par Maxwell en introduisant le facteur de forme des nanoparticules. Pour prendre en considération la forme géométrique des nanoparticules, Hamilton et Crosser ont utilisé le coefficient de sphéricité (ψ) définit comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. Cette relation est applicable dans le cas où le rapport entre la conductivité thermique des nanoparticules et celle de fluide de base est supérieur à 100.

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_p + (n-1)\lambda_f - \phi(n-1)(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + (n-1)\lambda_f - \phi(\lambda_f - \lambda_p)} \lambda_f \quad (2.7)$$

Où : n est le facteur de forme calculé par la relation empirique donnée par : $n = \frac{3}{\psi}$

Ce qui conduit à $n = 3$ pour les particules sphérique et $n = 6$ pour les particules cylindriques.

Donc dans le cas où les particules de forme sphérique le modèle de Hamilton est identique à celui de Maxwell.

Xuan et Li[41] ont développé le modèle de Hamilton pour estimer la

Valeur de la conductivité thermique en variant le coefficient ψ de 0.5 à 1, les résultats obtenu dans le cas où $\psi = 0.7$ est compatible aux résultats expérimentaux. Par contre, Lee et al. Ont trouvé que leurs résultats expérimentaux sont identiques à ceux théorique dans le cas où $\psi = 0.1$ pour le nanofluide *Alumine – eau* .

Lu et Lin [42] ont proposé une nouvelle formule pour n'importe quelle forme des nanoparticules en introduisant des variables dépendant de la conductivité thermique des nanoparticules dispersées, la relation étant donnée comme suit :

$$\lambda_{nf} = [1 + a\phi + b\phi^2] \lambda_f \quad (2.8)$$

Yu et Choi [43] ont proposé une nouvelle formule pour calculer la conductivité d'un nanofluide. Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. En plus ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique est supérieure à celle du liquide.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \frac{\lambda_p + 2\lambda_f - 2\phi(\lambda_f - \lambda_p)(1 + \beta)^3}{\lambda_p + 2\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_p)(1 + \beta)^3} \quad (2.9)$$

Bhattacharya et al. [44] Ont représenté théoriquement une nouvelle relation ressemble à la formule de Xuan and Roetzel définissant la masse volumique d'un nanofluide, en prenant en considération le mouvement Brownien des particules. On définit le mouvement Brownien autant qu'une description mathématique des déplacements aléatoires des nanoparticules au sein du liquide de base. Ce mouvement est causé par les collisions avec les molécules du liquide de base qui se déplacent dans toutes les directions sous l'effet de l'excitation thermique. Les nanoparticules sont suffisamment petites pour être poussées par les chocs reçus et elles peuvent alors parcourir une certaine distance (très petite), avant de repartir dans une autre direction suite à de nouveaux chocs et ainsi de suite. Il en résulte un mouvement d'ensemble chaotique que l'on appelle le mouvement brownien. La formule de la conductivité thermique calculée par Bhattacharya et al. est exprimée comme suit :

$$\lambda_{nf} = \lambda_p \phi + (1 - \phi) \lambda_f \quad (2.10)$$

Keblinski et al. [45] Ont investigué la conductivité de plusieurs nanofluides et les mécanismes contribuant à l'augmentation de cette propriété. Ils ont présenté les relations empiriques suivantes :

Pour le nanofluide : $Al_2O_3 - EG$

$$\lambda_{nf} = \lambda_f (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1) \quad (2.11)$$

Pour le nanofluide : $Al_2O_3 - eau$

$$\lambda_{nf} = \lambda_f (-13\phi^2 + 6.3\phi + 1) \quad (2.12)$$

Pour le nanofluide : $Cu - eau$

$$\lambda_{nf} = \lambda_f (11.6\phi^2 + 9.6\phi + 1) \quad (2.13)$$

Koo et Kleinstreuer, [46] ont discuté théoriquement la conductivité thermique d'oxyde de cuivre de 28.8 nm de diamètre dispersée dans l'eau. Ils ont modifié la formule de Maxwell en introduisant le Rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules, la masse volumique, la chaleur spécifique ainsi que le diamètre des nanoparticules et une fonction dépend de la température et la fraction volumique.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \frac{\lambda_p + 2\lambda_f - 2\phi(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_p)} + 5 \times 10^4 \beta \rho_p C_p \sqrt{\frac{K_B T}{\rho_p d_p}} f(T, \phi) \lambda_f \quad (2.14)$$

Ou les paramètres β et $f(T, \phi)$ sont donnés comme suit :

$$f(T, \phi) = (-134.63 + 1722.3\phi) + (0.4705 - 6.04\phi) \frac{T}{T_0}$$

$$\begin{cases} \beta = 0.0137(100\phi)^{-0.8229} & \text{pour } \phi < 0.01 \\ \beta = 0.0011(100\phi)^{-0.7272} & \text{pour } \phi > 0.01 \end{cases}$$

La formule de Koo et Kleinstreuer est valable dans le cas où la fraction volumique des nanoparticules est comprise entre 1 et 4% et la température varie de 300 à 325K.

Xue [47] a étudié la conductivité thermique d'un nanofluide contenant des nanotubes de carbone, il a discuté l'influence de diamètre des nanoparticules, concluant que la taille des nanoparticules

n'influence pas trop sur l'augmentation de la conductivité thermique. Il a établi une formule classique dépend uniquement des trois variables de base la conductivité thermique des nanoparticules et de fluide de base ainsi que la fraction volumique.

$$\lambda_{nf} = \frac{1 - \phi + 2\phi \frac{\lambda_p}{\lambda_p - \lambda_f} \ln \frac{\lambda_p + \lambda_f}{2\lambda_f}}{1 - \phi + 2\phi \frac{\lambda_f}{\lambda_p - \lambda_f} \ln \frac{\lambda_p + \lambda_f}{2\lambda_f}} \lambda_f \quad (2.15)$$

Li et Peterson[48] ont expérimentalement étudié l'influence de la variation de température ainsi que la fraction volumique des nanoparticules en suspension sur la conductivité thermique de deux nanofluides Al_2O_3 -eau et CuO -eau. Pour effectuer cette étude les diamètres des Al_2O_3 et CuO étaient prise 29 et 36nm respectivement suspendu dans l'eau distillé avec une fraction volumique de 2, 4, 6 et 10%. Ils ont proposé deux formules différentes pour chaque nanofluide.

Al_2O_3 - eau :

$$\lambda_{nf} = \lambda_f [0.764\phi + 0.0187(T - 273.15) - 0.462] + \lambda_f \quad (2.16)$$

CuO - eau :

$$\lambda_{nf} = \lambda_f [3.761\phi + 0.0179(T - 273.15) - 0.307] + \lambda_f \quad (2.17)$$

Timofeeva et al. [49] Ont étudié expérimentalement et théoriquement la conductivité thermique de Al_2O_3 dans l'eau et Al_2O_3 dans l'éthylène glycol, ils ont rapporté une corrélation qui dépend seulement de la conductivité thermique du fluide de base et la concentration volumique de l'alumine suspendu.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f (1 + 3\phi) \quad (2.18)$$

Avsec et Oblak[50] ont expérimentalement investigué la conductivité thermique de trois différents nanofluides : l'alumine dans l'eau, le cuivre dans l'éthylène glycol et le dioxyde de

titanium dans l'eau, la formule proposée par Avsec et Oblack est une extension de la formule de Hamilton et Crosser ainsi que le modèle de Yu et Choi.

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_p + (n-1)\lambda_f - (n-1)\phi(\lambda_f - \lambda_p)(1+\beta)^3}{\lambda_p + (n-1)\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_p)(1-\beta)^3} \quad (2.19)$$

Duangthongsu et Wongwises[51] ont expérimentalement discuté l'influence de la température sur la conductivité thermique des nanoparticules de dioxyde de titane de forme sphérique et de diamètre $d_p=21\text{nm}$ dispersée dans l'eau. Ils ont formulé les relations suivantes dépendant de la fraction volumique ainsi que des coefficients varient en fonction de la température.

$$\lambda_{nf} = (a + b\phi)\lambda_f \quad (2.20)$$

T = 15°C	a = 1.0225	b = 0.0272
T = 25°C	a = 1.0204	b = 0.0249
T = 35°C	a = 1.0139	b = 0.0250

Patel et al. [52] Ont expérimentalement étudié l'influence de la température et la taille des nanoparticules, en utilisant des nanoparticules de forme sphérique de diamètre, ils ont proposé une corrélation de la conductivité thermique d'un nanofluide valable pour une température comprise entre 293 et 323K, et une fraction volumique varie de 0.1 à 3%.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \left(1 + 0.135 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f} \right)^{0.273} \left(\frac{T}{20} \right)^{0.547} \left(\frac{100}{d_p} \right)^{0.234} \phi^{0.467} \right) \quad (2.21)$$

Godson et al. [53] Ont expérimentalement mesuré la conductivité thermique de nanofluide contenant des nanoparticules métallique (Argent) suspendu dans l'eau. Ils ont exprimé la conductivité thermique en fonction de la fraction volumique et la conductivité thermique du fluide.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f (0.9692\phi + 0.9508) \quad (2.22)$$

Corcione et al. [54] Ont présenté une corrélation pour la prédiction de la conductivité d'un nanofluide contenant des nanoparticules de type métallique ou oxyde métallique dispersées soit

dans l'eau ou dans l'éthylène glycol. La plage de température, diamètre des nanoparticules ainsi que la fraction volumique étaient respectivement : 294-324 K, 10-150 nm, 0.002-0.09.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \left(1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f} \right)^{0.03} \phi^{0.66} \right) \quad (2.23)$$

$Re = \frac{2K_B \rho_f T}{\pi \mu_f^2 d_p}$ et T_{fr} est la température de fusion de fluide de base.

Azmi et al. [55] Ont développé une nouvelle corrélation pour les nanofluides qui contiennent des nanoparticules d'oxyde métallique incorporées dans l'eau, cette formule est valable pour une concentration volumique inférieur à 4% et une température comprise entre 293 et 343K.

$$\lambda_{nf} = 0.8938 \lambda_f \left(1 + \frac{\phi}{100} \right)^{1.37} \left(1 + \frac{T}{70} \right)^{0.2777} \left(1 + \frac{d_p}{150} \right)^{-0.0336} \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_f} \right)^{0.01737} \quad (2.24)$$

Dont la température est exprimée en °C et la fraction volumique en %.

2.4.4. Viscosité dynamique

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler, c'est un paramètre important pour les applications pratiques car elle affecte directement la chute de pression à convection forcée.

L'ajout de particules solides dans un liquide provoque une augmentation, plus ou moins importante de la viscosité du mélange obtenu. Là encore, de nombreux facteurs peuvent être à l'origine des disparités constatées. Pour des nanoparticules identiques (nature, taille) et un même fluide de base, la qualité de la dispersion, et la température peuvent influencer considérablement sur la viscosité. Par conséquent, pour permettre l'utilisation de nanofluides dans des applications pratiques, le degré d'augmentation de la viscosité des nanofluides par rapport aux fluides purs doivent être soigneusement étudiée. Afin d'expliquer l'effet des nanoparticules sur la viscosité, de nombreuses corrélations ont été présentées.

Einstein [56] a été le premier qui a étudié la viscosité dynamique d'un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides en faible concentration volumique (moins que 0.02). La relation est présentée comme suit :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi) \quad (2.25)$$

Brinkman[57] a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques. Sa relation conduit à la relation d'Einstein pour les faibles fractions volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (2.26)$$

Ces deux premières relations n'intègrent pas les effets de mouvement Brownien ni de la taille des nanoparticules en suspension.

Batchelor[58] a étudié théoriquement la viscosité dynamique d'un nanofluide en tenant en compte l'effet de l'interaction hydrodynamique entre deux nanoparticules sphériques, il a montré que la viscosité dynamique d'un nanofluide n'est pas une fonction linéaire de la fraction volumique comme les relations de « Einstein et Brinkman ».

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2) \quad (2.27)$$

Wang et al. [59] Ont expérimentalement discuté la viscosité dynamique d'un nanofluide se composant de l'eau comme fluide de base et des nanoparticules d'alumine, ils ont confirmé la proposition de Batchelor en présentant l'équation suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad (2.28)$$

Tseng et Lin [60] ont mené une étude expérimentale pour mesurer la viscosité de deux nanofluides $Al_2O_3 - \text{éthylène glycol}$ et $TiO_2 - \text{eau}$. Leur formule prend la forme exponentielle suivante :

$$\mu_{nf} = 13.47\mu_f \exp(35.98\phi) \quad (2.29)$$

Maiga et al. [61] Ont présenté expérimentalement la viscosité dynamique des nanoparticules d'alumine dispersées dans l'eau et dans l'éthylène glycol. La corrélation de la viscosité

dynamique du nanofluide $Al_2O_3 - eau$ était identique à l'équation (2.27) pour l'autre nanofluide la relation s'identifie comme suit :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - 0.19\phi + 306\phi^2) \quad (2.30)$$

Song et al. [62] Ont calculé la viscosité dynamique du nanofluide $SiO_2 - eau$, ils ont montré que la viscosité dynamique d'un nanofluide est une fonction linéaire de la fraction volumique.

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - 56.5\phi) \quad (2.31)$$

Koo et Kleinstreuer[46] ont étudié expérimentalement et théoriquement la viscosité dynamique d'oxyde de cuivre de 28.8 nm de diamètre dispersées dans l'eau, en prenant en considération l'effet de l'agitation Brownienne et l'épaisseur de la couche nanométrique (mentionné dans [46]).

$$\mu_{nf} = 5 \times 10^4 \beta \rho_f \phi \sqrt{\frac{K_B T}{\rho_p d_p} \left[(-134.63 + 1722.3\phi) + (0.4705 - 6.04\phi) \frac{T}{T_0} \right]} \quad (2.32)$$

Kulkarni et al. [63] Ont étudié l'influence de la température sur la viscosité d'un nanofluide contenant des nanoparticules d'oxyde de cuivre dispersées dans l'eau, ils ont proposé une relation valable dans une gamme de température variant de 5 à 50°C.

$$\mu_{nf} = \exp \left[- (2.8751 + 53.54\phi - 1047.12\phi^2) + (1078.3 + 15857\phi + 20587\phi^2) \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.33)$$

Buongiorno[64] a estimé la viscosité dynamique de deux nanofluides $Al_2O_3 - eau$ et $TiO_2 - eau$ en concluant deux corrélations non-linéaire de la fraction volumique définit comme suit :

Pour le nanofluide : $Al_2O_3 - eau$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 5.54\phi + 108.2\phi^2) \quad (2.34)$$

Pour le nanofluide : $TiO_2 - eau$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2) \quad (2.35)$$

Nguyen et al. [65] Ont étudié l'influence de la taille des nanoparticules sur la viscosité dynamique d'un nanofluide contenant Al_2O_3 en variant leurs diamètre d_p , ils ont présenté deux formules différentes montrant l'effet de la taille des nanoparticules sur la viscosité effective.

$$\mu_{nf} = 0.904\mu_f \exp(0.1483\phi) \text{ pour } d_p = 47nm \quad (2.36)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 0.025\phi + 0.015\phi^2) \text{ pour } d_p = 36nm \quad (2.37)$$

Masoumi et al. [66] Ont expérimentalement mesuré la viscosité du nanofluide $Al_2O_3 - eau$ en prenant en compte l'effet de mouvement Brownien, ils ont proposé l'expression suivante:

$$\mu_{nf} = \mu_f + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72C\delta} \quad (2.38)$$

Où : C est une constante et $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi}} d_p$

Chandrasekar et al. [67] Ont investigué expérimentalement et théoriquement la viscosité dynamique de *alumine - eau* nanofluide, en contribuant les aspects électromagnétique et mécanique ils ont conclu la formule suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f + 1631\mu_f \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right)^{2.8} \quad (2.39)$$

Corcione[68] Ont présenté expérimentalement la viscosité dynamique d'un nanofluide contenant des nanoparticules de dioxyde de silicium dispersées dans l'éthanol. Le diamètre des nanoparticules ainsi que la fraction volumique étaient respectivement : 10-150nm, 0.2 à 9%.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{-1.03}} \quad (2.40)$$

Où : d_f est le diamètre moléculaire du fluide de base donné par la relation

$$d_f = 0.1 + \left(\frac{6M}{N\pi\rho_f} \right)^{\frac{1}{3}}$$

2.5. *Domaine d'utilisation des nanofluides pour l'amélioration du transfert thermique*

La convection est le transfert de chaleur résultant du mouvement complet du matériau qui la supporte et il y'a plusieurs types :

- La convection forcée comme une pompe ou un ventilateur tel que le fluide se déplace par une action interne.
- La convection libre provoquée par une variation de la masse volumique du fluide en fonction de la différence de températures appliquée au fluide.
- La convection mixte résultant des deux effets précédents se produit lorsqu'il y a une cause externe au mouvement du fluide, ce qui n'est pas suffisant pour négliger la poussée d'Archimède.

Pour améliorer les performances, il est nécessaire de réduire l'épaisseur de la couche limite en augmentant la vitesse du fluide, comme cela se produit dans les jets d'eau, ou en ajoutant de petits obstacles pour augmenter le brassage à la paroi. Ces effets contribuent à pousser le liquide froid dans la paroi chaude autant que possible afin d'améliorer le processus de transfert de chaleur.

Les nanofluides ont une grande conductivité thermique qui permet d'améliorer l'énergie thermique à travers la sous-couche visqueuse. Le comportement rhéologique du liquide peut se modifier en fonction de la suspension des nanoparticules en adoptant un arrangement structural particulier dans la couche limite. Selon leur nature et leur forme, on peut observer un comportement de rhéofluidification qui tend à diminuer la viscosité apparente tout près

de la paroi (effet lubrifiant) lors de l'augmentation de la vitesse de cisaillement. Cette diminution de viscosité entraîne une réduction de l'épaisseur de la couche limite dynamique et thermique, par une augmentation directe du coefficient d'échange à la paroi [69].

2.6. Conclusion

- Dans ce chapitre nous avons introduit la définition des nanofluides, leurs méthodes de préparation, leurs propriétés thermophysiques et leur domaine d'utilisation.
- La technique de nanofluide a été proposée récemment, elle consiste à mettre des nanoparticules en suspension dans un liquide de base pour améliorer la conductivité thermique.
- Les nanofluides permettent l'amélioration du transfert thermique, qui est liée directement au type, à la taille et à la concentration volumique des nanoparticules.
- Les nanoparticules permettent d'absorber et de transférer la chaleur efficacement.
- Il existe deux méthodes fondamentales pour préparer des nanofluides qui sont : physique en une étape ou deux étapes et le processus chimique, la méthode en deux étapes est la plus économique, la plupart des chercheurs préfèrent cette méthode dans la préparation du nanofluide pour la recherche.
- La conductivité thermique est la propriété la plus importante pour l'amélioration des performances thermiques d'un fluide caloporteur, elle dépend de la température du milieu, la conductivité du fluide de base, les propriétés thermophysiques des nanoparticules, la taille et la forme des particules.

Chapitre 03

*Description du problème
physique étudié*

3.1. Introduction

Le comportement dynamique et thermique de l'écoulement de nanofluide à travers un canal ondulé a besoin d'un logiciel de simulation numérique *CFD* Fluent qui nous permet d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et de transfert de chaleur. Ce logiciel résout des équations de conservation basées sur la méthode des volumes finies et ce processus constituée essentiellement 3 étapes fondamentales. Premièrement divisez le champ d'étude en volumes de contrôle (discrets) appelés cellules afin d'obtenir le maillage du domaine. La deuxième étape c'est l'intégration des équations de conservation PDE (équations aux dérivées partielles). La troisième étape et la dernière consiste à résoudre le système d'équations à l'aide d'un algorithme approprié. Nous maintenons des tracés d'estimation par défaut pour la pression et la vitesse ainsi que les facteurs de relaxation et l'algorithme simple pour le couplage vitesse-pression.

Un module spécifique User DefinedFunction (*UDF*) a été développé et intégré dans le code Fluent pour calculer la conductivité thermique des nanofluides.

3.2. Description du problème étudié

Dans notre problème ont étudié numériquement les performances thermique et dynamique des canaux de différentes formes par l'utilisation des nanofluides.

Notre travail se divise en deux étapes. La première étape consiste à comparer entre les deux canaux en utilisant l'eau simple. Dans la deuxième étape on a choisi seulement le canal trapézoïdale remplie d'un nanofluide Al_2O_3 -eau en convection forcée pour analyser les solutions numériques. Les propriétés thermophysiques des nanoparticules et le fluide de base sont résumés dans le tableau.

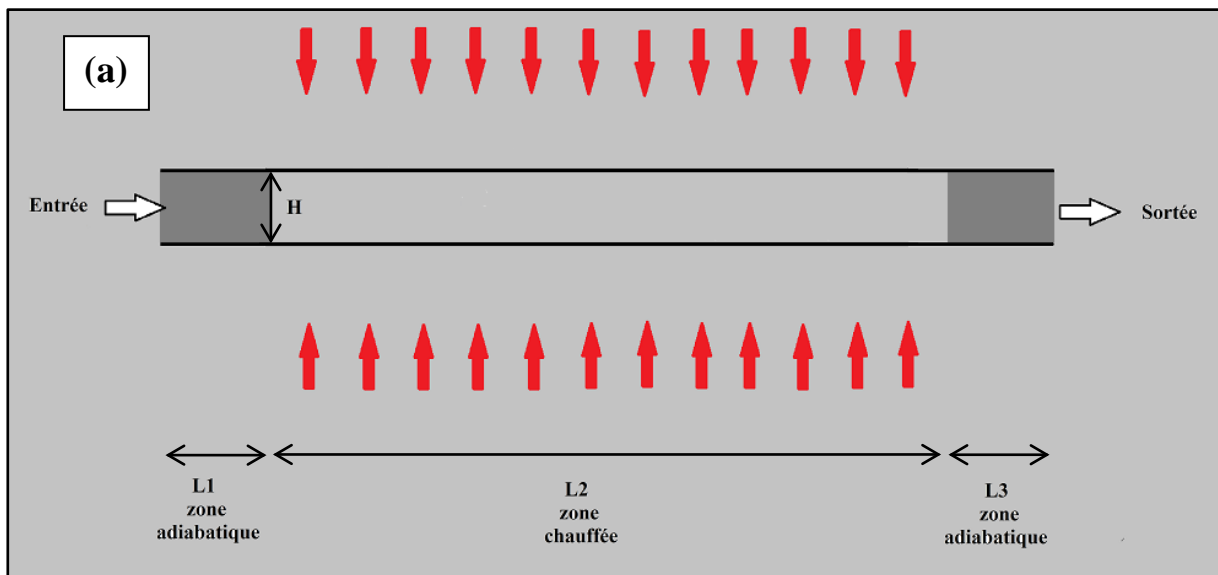
Chapitre 03 Description du problème physique étudié

Tableau 3.1. Propriétés thermophysiques de l'eau et des nanoparticules à 20 °C.

Propriétés physique	Fluide de base (eau)	Al_2O_3
C_p (J / Kg.K)	4182	765
ρ (Kg / m ³)	998.2	3600
λ (w / m ² .K)	0.6	36
μ (Kg / m.s)	0.001003	-

3.2.1. Description de la section d'essai

Les deux canaux utilisés sont d'une longueur de $L=0.2m$ et de hauteur $H=0.01m$. A l'entrée du canal est imposée une vitesse uniforme U_0 et une température $T_0 = 293k$. Les deux canaux ont une zone chauffée de température $T_c = 400k$ et deux zones adiabatiques comme indiquées sur la figure.



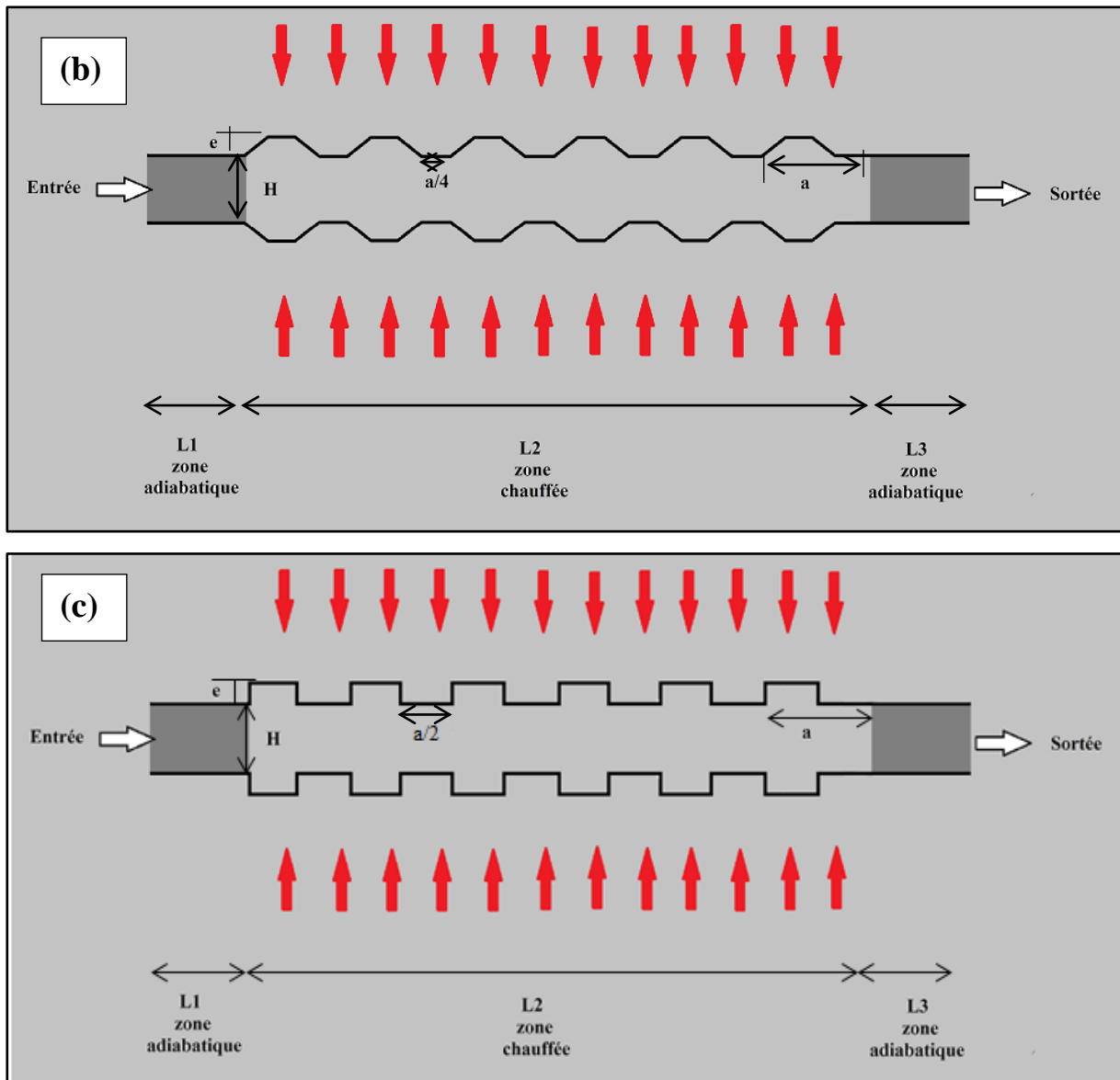


Figure 3.1. Canal (a)Simple, (b)Trapézoïdal, (c) Rectangulaire.

Tableau 3.2. Dimensions de canal ondulé.

Dimension	a (m)	e (m)	H (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	L_3 (m)
Valeur	0.02	0.002	0.01	0.04	0.12	0.04

3.3. Formulation mathématique

3.3.1. Hypothèses simplificatrices

Dans notre étude les différentes hypothèses simplificatrices sont les suivantes :

Chapitre 03 Description du problème physique étudié

- L'écoulement est supposé laminaire et permanent.
- L'écoulement est bidimensionnel et incompressible.
- Le régime d'écoulement est identifié sur la base du nombre de Reynolds qui est fonction de la vitesse d'entrée du fluide et du diamètre hydraulique du canal défini par la relation :

$$Re = \frac{\rho U_{in} D_h}{\mu}$$

Avec :

- U_{in} est la vitesse d'entrée
- D_h est le diamètre hydraulique du canal est définie par :

$$D_h = \frac{4A}{p}$$

Où A est la surface traversée par le fluide et p c'est le périmètre mouillé.

3.3.2. Équations Gouvernantes

La formulation mathématique des phénomènes de convection forcée laminaire sont pris en compte par les équations de continuité, de quantité de mouvement (Navier-Stokes) et d'énergie.

3.3.2.1. Équation de continuité

Cette équation est traduit la conservation de la masse au cours du temps dans un volume de contrôle élémentaire. Cette équation est également appelée : équation de conservation de masse.

Elle s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

3.3.2.2. Équation de quantité de mouvement

L'équation de quantité de mouvement où l'équation de *Navier-Stokes* découle du principe fondamental de la dynamique appliqué à un élément de fluide. Dans le cas bidimensionnel, elle s'écrit:

Suivant l'axe x :

$$\rho_{eff} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{eff} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

Suivant l'axe y :

$$\rho_{eff} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{eff} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3.3)$$

3.3.2.3. Équation de conservation de l'énergie

L'équation de l'énergie c'est une expression local du premier principe de la thermodynamique Elle s'écrit :

$$\rho_{eff} C_{p_{eff}} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

3.3.3. Propriétés thermo-physiques

L'ajout de nanoparticules au fluide de base entraîne une modification importante des propriétés physiques de ce dernier telles que la densité, la chaleur spécifique, le coefficient de dilatation thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique, et donc de nouvelles propriétés doivent être calculées à l'aide des relations suivantes

3.3.3.1. Masse volumique

Pour un nanofluide homogène en choisies de calculer sa masse volumique en fonction de la fraction volumique φ à partir de l'équation suivante :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (3.5)$$

Où ρ_f et ρ_p représente respectivement la masse volumique de fluide de base et de nanoparticule.

3.3.3.2. Chaleur spécifique

On a choisies l'équation président de **Pak** et **Cho** :

$$Cp_{nf} = (1-\varphi)Cp_f + \varphi Cp_p \quad (3.6)$$

Où Cp_f et Cp_p représente la chaleur spécifique de fluide de base e de nanoparticule.

3.3.3.3. Conductivité thermique

On a choisi trois modèles de conductivité thermique d'après plusieurs modèles dans littérature pour faire la comparaison, (figure 3.24).

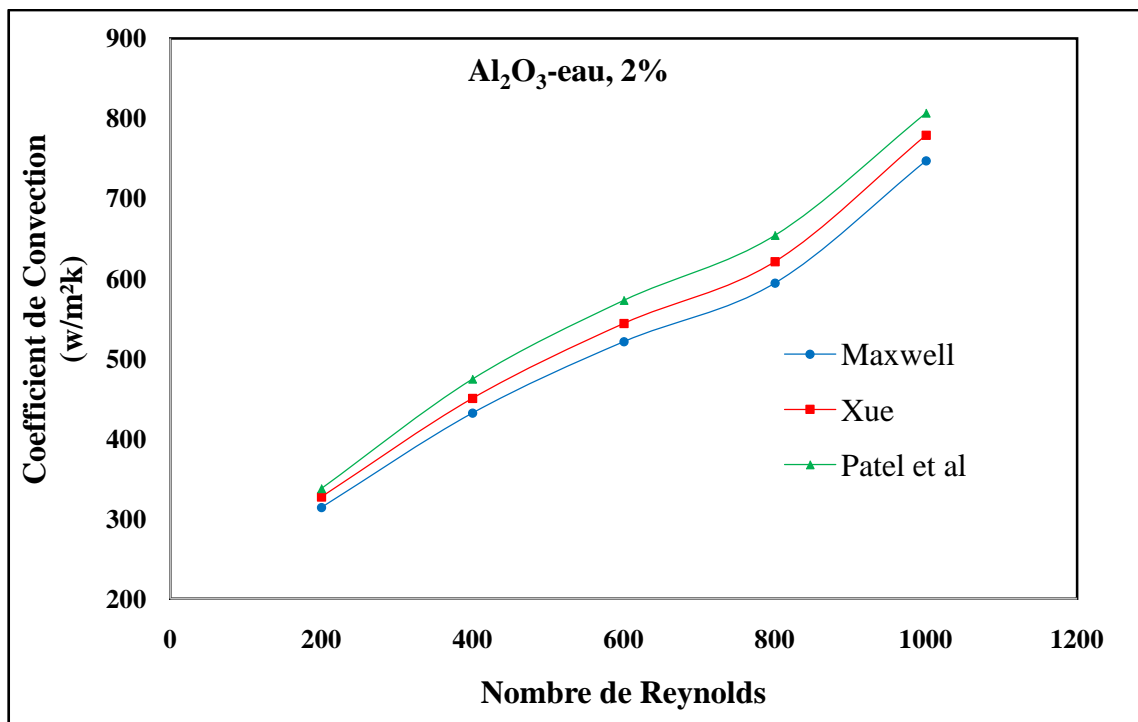


Figure 3.2. Comparaison entre plusieurs modèles de conductivité thermique avec une fraction volumique de 2%.

D'après la comparaison ci-dessus nous avons retenu le modèle proposer par Patel et al qui présenté par la formule suivante:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} = 1 + \frac{\lambda_p A_p}{\lambda_f A_f} + c \lambda_p Pe \frac{A_p}{\lambda_f A_f} \quad (3.7)$$

Où λ_p et λ_f sont respectivement la conductivité thermique de nanoparticule et le fluide de base.

Avec:

$$\frac{A_p}{A_f} = \frac{d_f}{d_p} \frac{\phi}{(1-\phi)}$$

$$Pe = \frac{u_p d_p}{\alpha_f}$$

α_f : la diffusivité thermique du fluide de base.

u_p : Est la vitesse brownienne de particule donné par la relation.

$$u_p = \frac{2k_B T}{\pi \mu d_p^2}$$

3.3.3.4. Viscosité dynamique

On choisies le modèle de **Corcione** ci-dessous :

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_f}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (3.8)$$

Où : d_f est le diamètre moléculaire du fluide de base donné par la relation.

$$d_f = 0.1 + \left(\frac{6M}{N\pi\rho_f} \right)^{1/3}$$

Chapitre 03 Description du problème physique étudié

3.3.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites de notre problème sont définies comme suit :

- Entrée du canal: La vitesse et la température sont supposées uniformes.

Avec la vitesse est calculé par la relation de Reynolds

$$Re = \frac{\rho U_{in} D_h}{\mu}$$

Donc la vitesse devenir :

$$U_{in} = \frac{Re \mu}{\rho D_h}$$

Et la température $T_{in} = 293 K$

- Zone 1 (non chauffée):

$$q = 0 \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq L_1 \\ y = \frac{H}{2} \end{array} \right\}$$

- Zone chauffée : $T_{wall} = 400k$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1 \leq x \leq L_1 + L_2 \\ y = \frac{H}{2} + a \end{array} \right\}$$

- Zone 2 (non chauffée) :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_2 \leq x \leq L_1 + L_2 + L_3 \\ y = \frac{H}{2} \end{array} \right\}$$

- Sortie du canal :

$$P = P_{am}$$

- Interface paroi-fluide:

$$U = V = 0$$

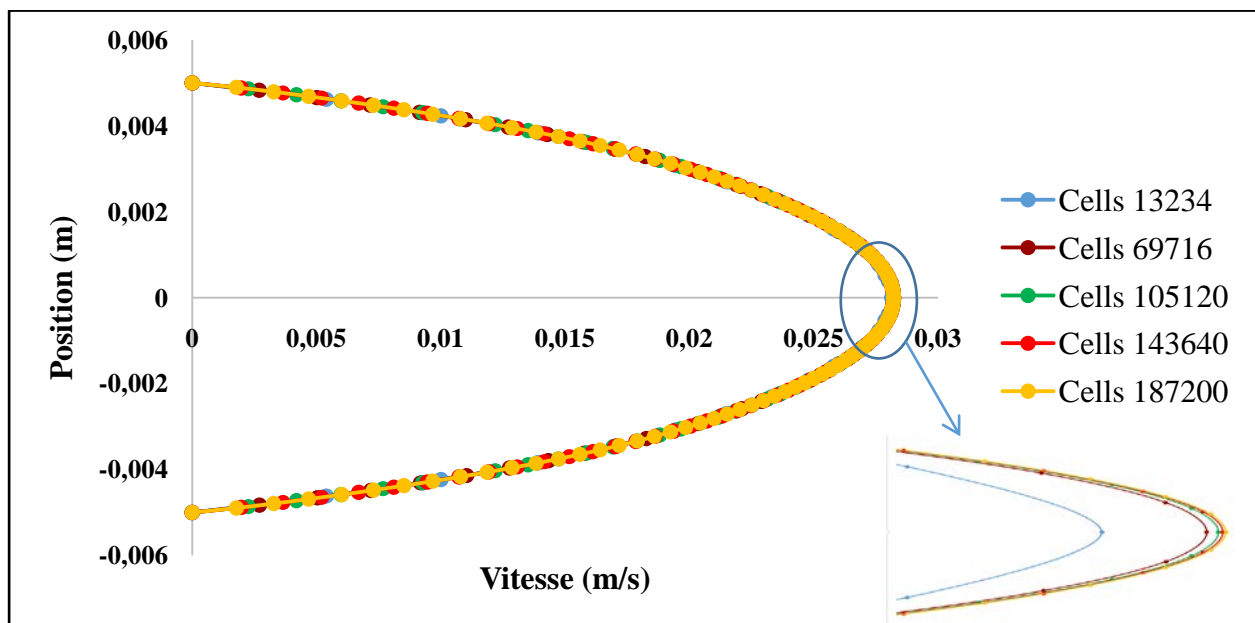
- Les parois du micro-canal sont en aluminium.

3.3.5. Étude du maillage

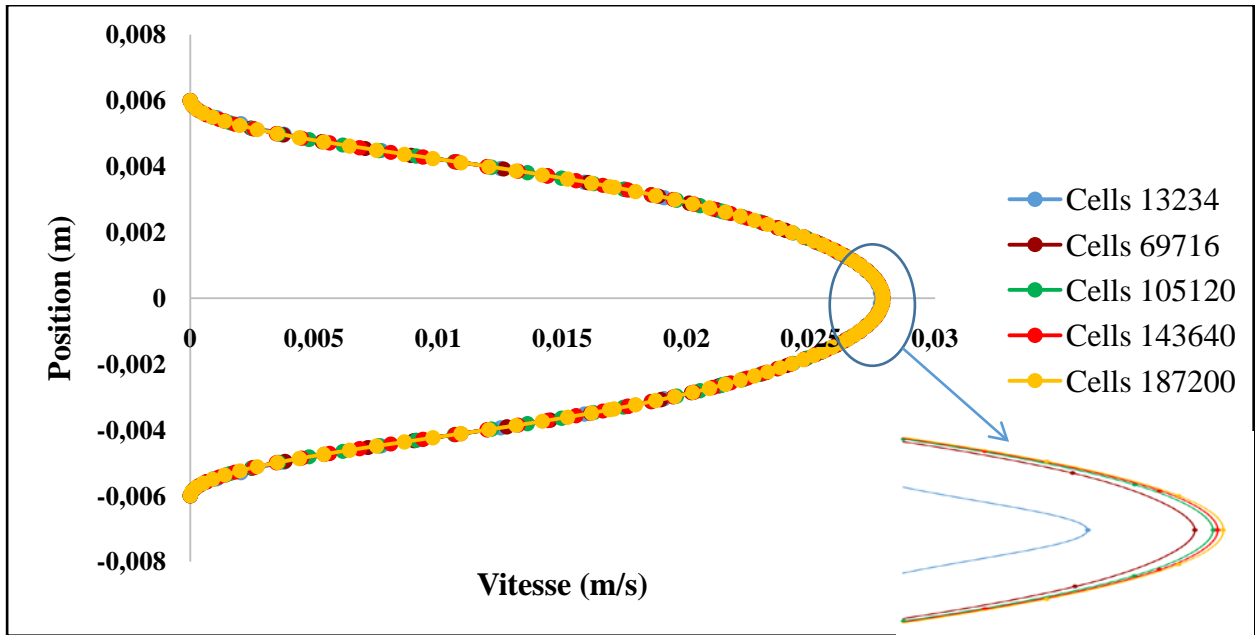
On a choisi un seul maillage pour analyser les solutions dans les deux géométries et on a étudiée plusieurs grilles. Pour le canal trapézoïdal on a choisi cinq grilles :

13234, 69716, 105120, 143640, 187200. Les résultats présentées dans la figure 3.25 montrent le profil radiale de vitesse pour les trois positions axiale du canal ($x=0.1\text{m}$, $x=0.1025\text{m}$, $x=0.1050\text{m}$). On a conclu que la grille de 143640 cellules permet d'obtenir la solution la plus efficace dans les trois positions du canal.

- **Position 1: $x = 0.1 \text{ m}$**



- **Position 2: $x = 0.1025 \text{ m}$**



▪ Position 3: $x = 0.1050$ m

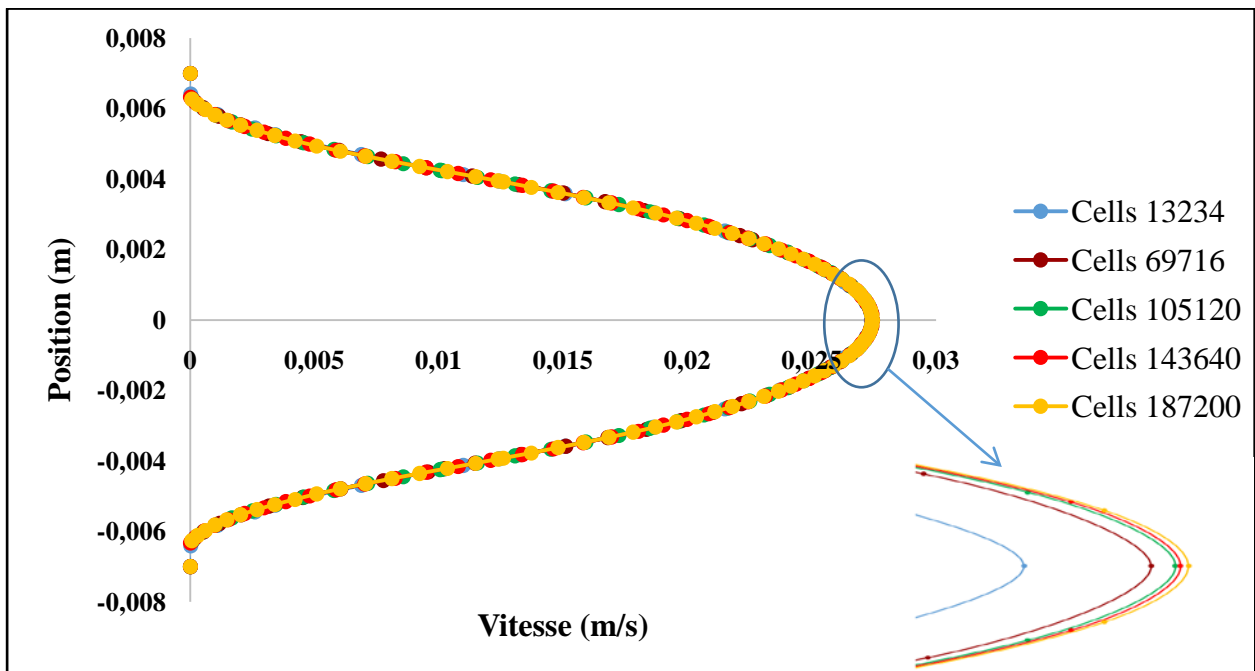


Figure 3.3. Influence du maillage sur la vitesse axiale, pour trois positions du canal trapézoïdal ($x = 0.1$, $x=0.1025$, $x= 0.1050$ m).

La même étude du maillage a été réalisée avec les autres géométries (rectangulaire et simple).

3.3.6. Grandeurs caractéristiques du système

On a des paramètres à déterminer pour obtenir les caractéristiques du transfert de chaleur et de l'écoulement de fluide au niveau de canal.

3.3.6.1. Coefficient de transfert de chaleur par convection

Lorsque le mode de transfert thermique est convectif, le flux de chaleur échangé entre la paroi et le fluide est donné par la loi de refroidissement de Newton :

$$\phi = h.S.(T_p - T_\infty) \quad (3.9)$$

Dans notre cas on a $S = 1$ donc Le coefficient de transfert de chaleur devient :

$$h = \frac{\phi}{T_p - T_\infty} \quad (3.10)$$

3.3.6.2. Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi. Il est donné par la relation suivant :

$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda} \quad (3.11)$$

3.3.6.3. Facteur de frottement

Il est défini par la relation suivant :

$$f = \frac{\rho \Delta p D_h}{L \mu U_{in}^2} \quad (3.12)$$

Où Δp est la chute de pression du canal.

3.3.6.4. Indice de performance thermo-hydraulique

Il est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{Nu / Nu_0}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (3.13)$$

Où Nu_0 et f_0 sont des grandeurs à déterminer de l'écoulement dans un canal simple.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle étudié et les équations utilisées dans notre étude pour résoudre le problème dynamique et thermique d'un canal à différentes géométries traversées par un écoulement de nanofluide Al_2O_3 -eau. L'écoulement est décrit par les équations de Navier–Stokes associées aux conditions classiques de continuité de quantité de mouvement et d'énergie. Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement telles que le coefficient de transfert de chaleur par convection, le facteur de frottement, ont été présentés afin d'évaluer les performances thermiques et hydrauliques du système. Dans une seconde phase, nous avons décrit les détails du problème physique étudié, les conditions aux limites spécifiées et présenté enfin les premiers résultats permettant de valider le maillage adopté.

Chapitre 04

Résultats et discussions

4.1. Introduction

Les progrès de la nanotechnologie ont permis de trouver un moyen d'améliorer le transfert de chaleur et les performances thermiques et dynamiques par l'ajout des nanoparticules. Le problème étudié est lié à la convection forcée d'un écoulement laminaire du nanofluide traversant différentes formes de canaux. Dans ce chapitre, nous avons rassemblé tous les résultats numériques obtenus. Nous avons utilisé le logiciel Gambit pour développer la géométrie du domaine de calcul et son maillage. La résolution numérique des équations de transfert est réalisée à l'aide d'un logiciel de CFD Fluent.

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'effet de la concentration volumique et du diamètre des nanoparticules sur les performances thermiques et dynamiques et la perte de charge dans un canal trapézoïdal. Nous avons interprété et discuté les résultats obtenus dans cette étude en observant l'évolution du nombre de Nusselt, du coefficient de perte de charge, du facteur de friction et de l'indice de performance thermo-hydraulique.

4.2. Domaine de calcul

La figure 4.26 montre les domaines de calcul correspondant aux trois profils géométriques des canaux étudiés: simple, trapézoïdal et rectangulaire.

L'écoulement du fluide est supposé laminaire, bidimensionnel et circule dans un canal composé de trois sections, la première et la dernière sont supposées adiabatiques, la seconde section, munie de 6 ondulations est soumise à une température de 400K.

On a choisi le modèle axisymétrique pour faire notre simulation comme indique sur la figure ci-dessous.

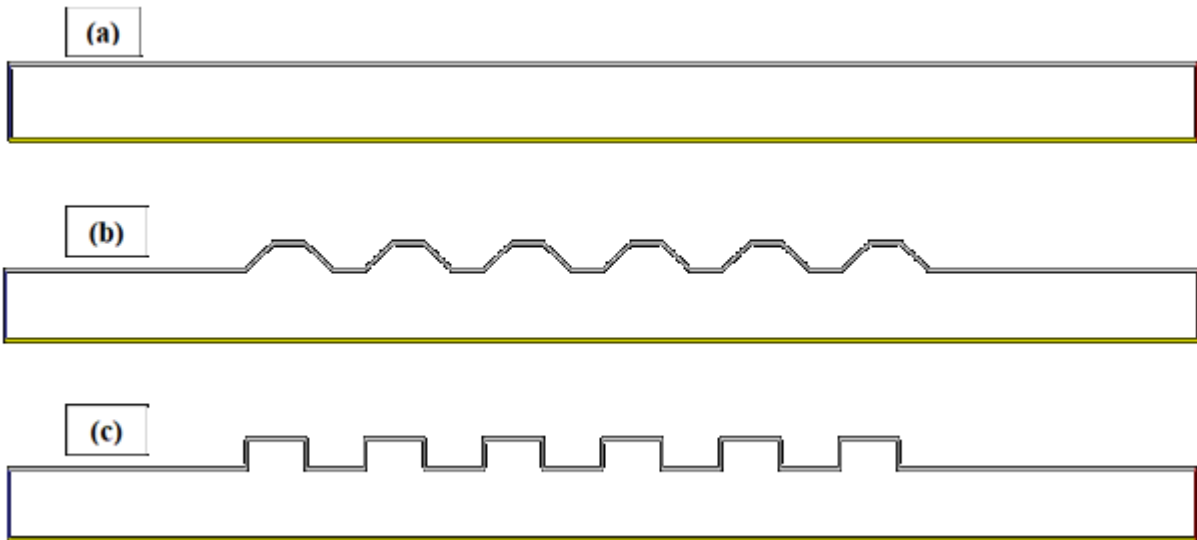


Figure 4.1. Géométrie axisymétrique des canaux étudiés : (a) simple, (b) Trapézoïdal et (c) Rectangulaire.

4.3. Validation du code de calcul

Une validation importante a été choisie pour la vérification des résultats obtenus. On a choisi l'étude numérique d'Ahmed et al pour un écoulement de fluide de base (eau pure) et de nanofluide $Al_2O_3 - eau$ à travers un canal trapézoïdale. Les résultats sont présentés sur la figure 4.27.

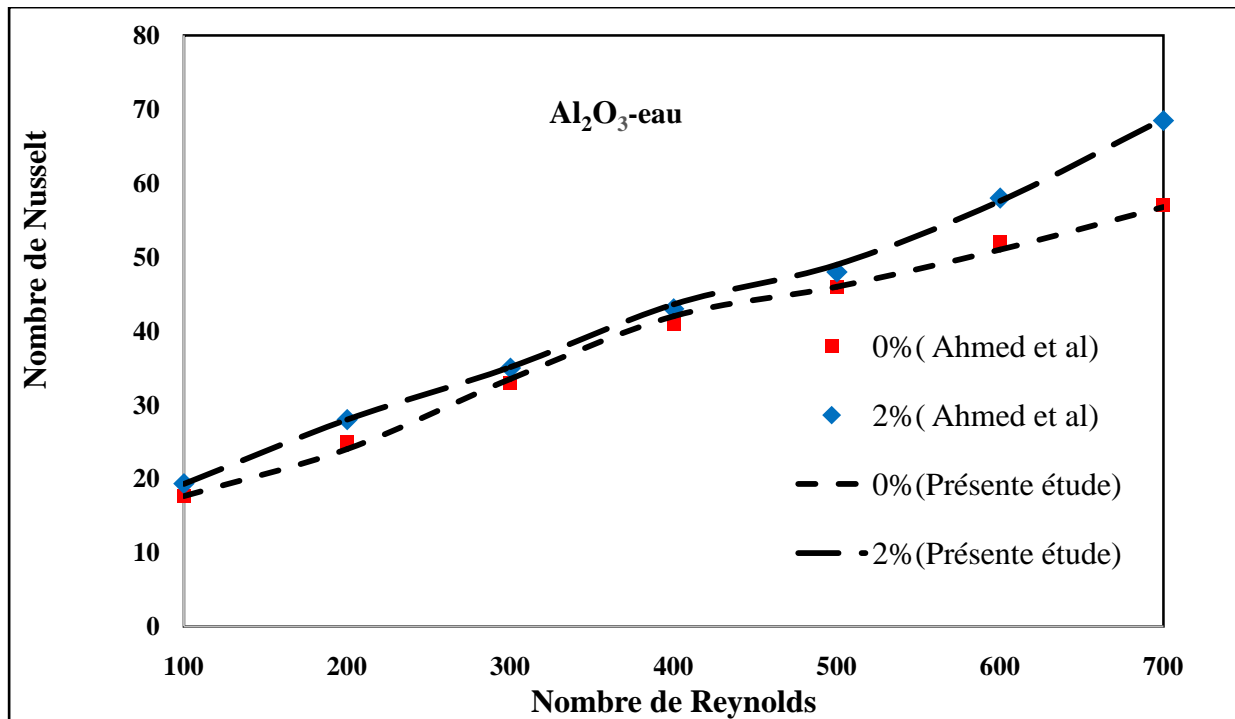


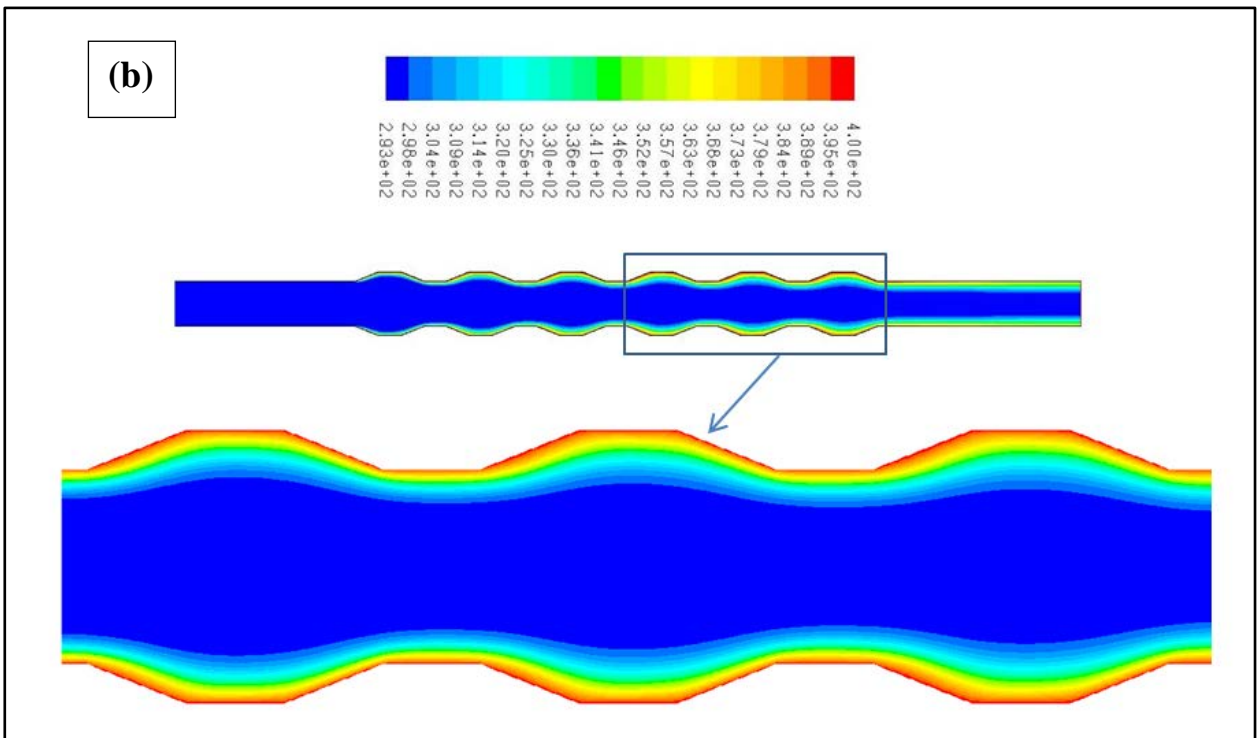
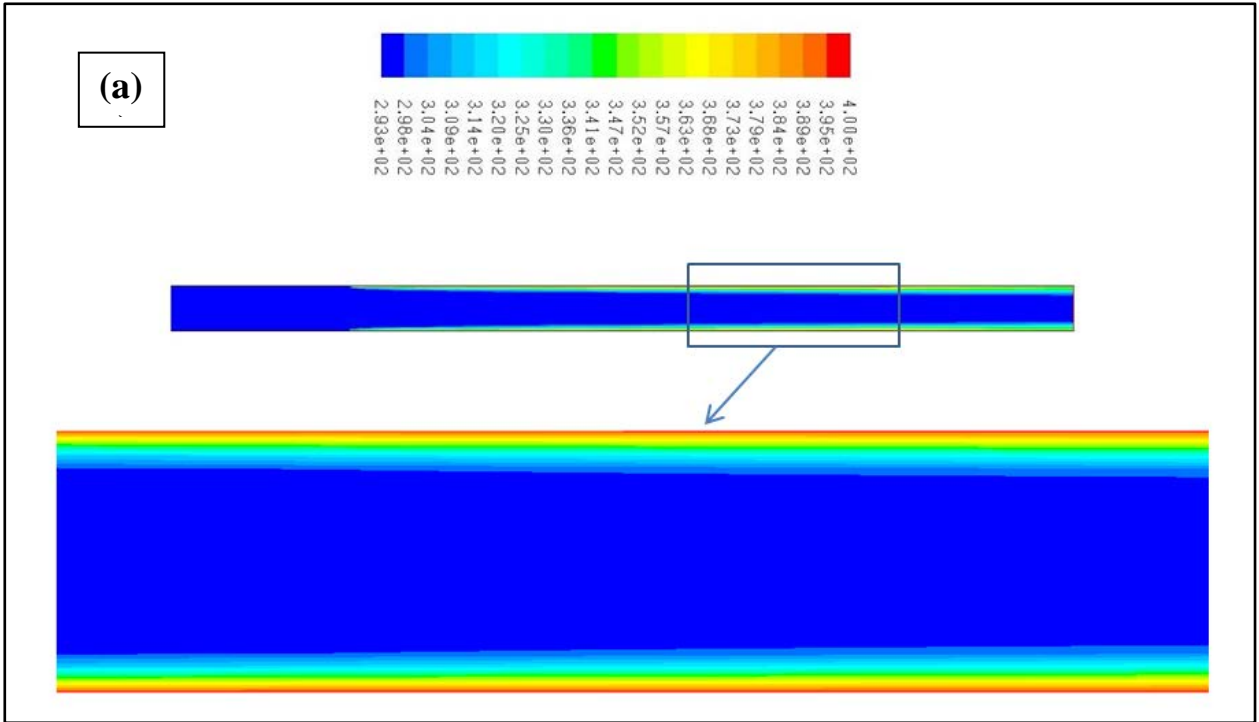
Figure 4.18. Comparaison des nombres de Nusselt moyens avec ceux d’Ahmed et al [21] en fonction du nombre de Reynolds.

4.4. Résultats et discussions

Nous avons proposé d’analyser les influences des ondulations du canal, de la fraction volumique des nanoparticules dans l’écoulement et le diamètre de nanoparticules.

4.4.1. L’effet de la géométrie du canal

Les contours de vitesse et de température pour un écoulement d’eau pure à travers des canaux de configuration simple, trapézoïdale et rectangulaire sont présentés sur les figures 4.28 et 4.29. On peut voir à partir des contours de température que l’épaisseur de la couche limite thermique diminue et que le gradient de température aux parois des canaux augmente. En effet, les régions de recirculation générées dans de tels canaux peuvent améliorer le mélange du fluide froid dans le cœur avec le fluide chaud à proximité des parois des canaux ondulés. De plus, le canal ondulé trapézoïdal a les plus grandes régions de recirculation par rapport aux canaux ondulés simple ou rectangulaire.



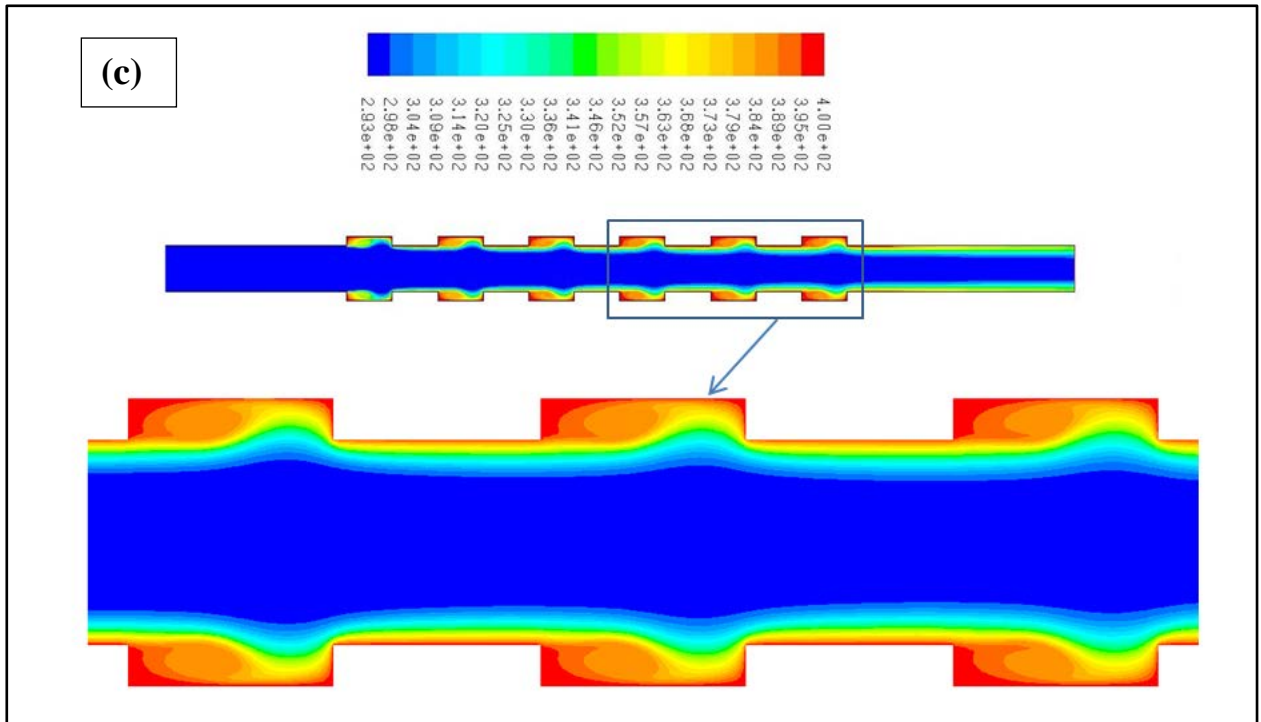
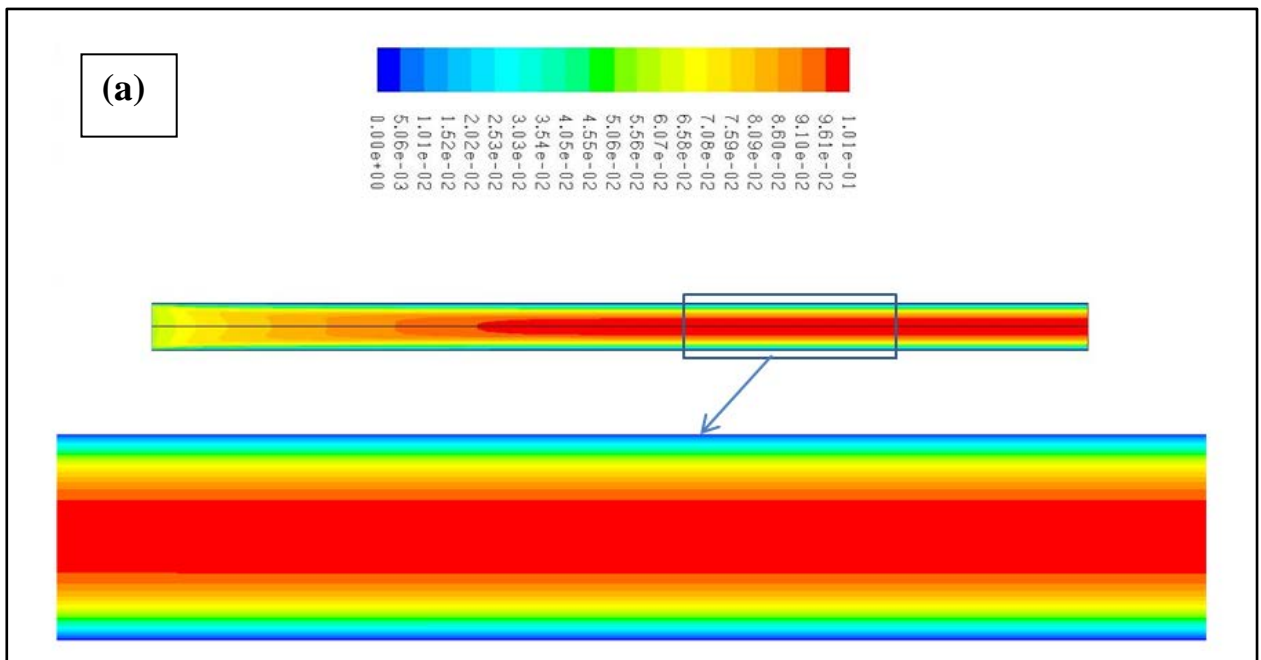


Figure 4.3. Contours des températures pour trois canaux:(a) simple (b) trapézoïdale, (c) rectangulaire pour un nombre de Reynolds 400.



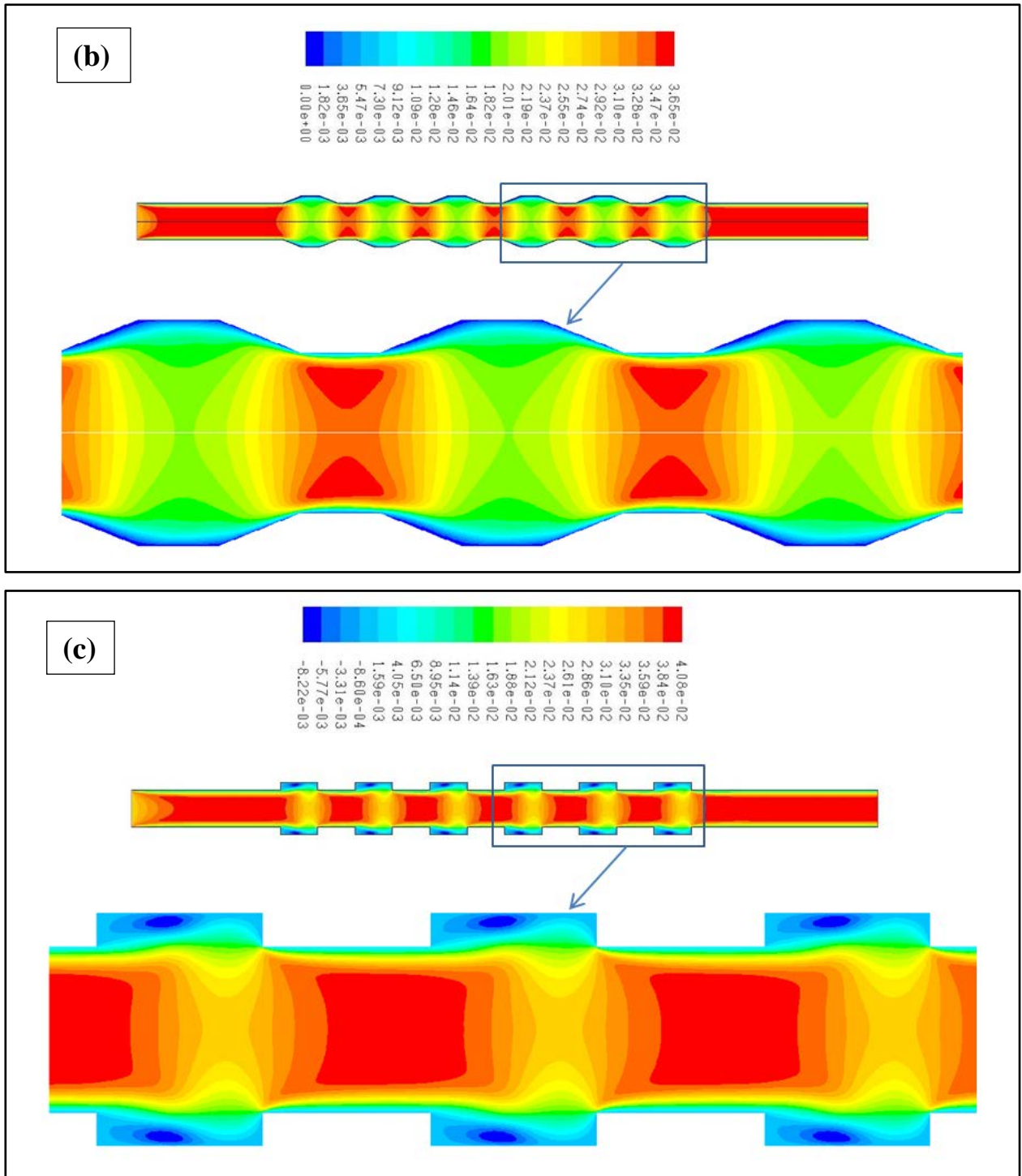


Figure 4.4. Contours des vitesses pour trois canaux : (a) simple, (b) trapézoïdale, (c) rectangulaire, pour un nombre de Reynolds 400.

La figure 4.30 (a) et (b) montre la variation du nombre de Nusselt et de la chute de pression en fonction du nombre de Reynolds pour trois types de canaux (trapézoïdale, rectangulaire et un canal simple) pour un écoulement d'eau pure. Les résultats obtenus dans la courbe montrent que l'utilisation d'un canal avec une configuration trapézoïdale permet d'augmenter le nombre de

Nusselt et donc les performances thermiques et dynamiques. Les résultats montrent également une perte de charge importante par rapport aux autres géométries.

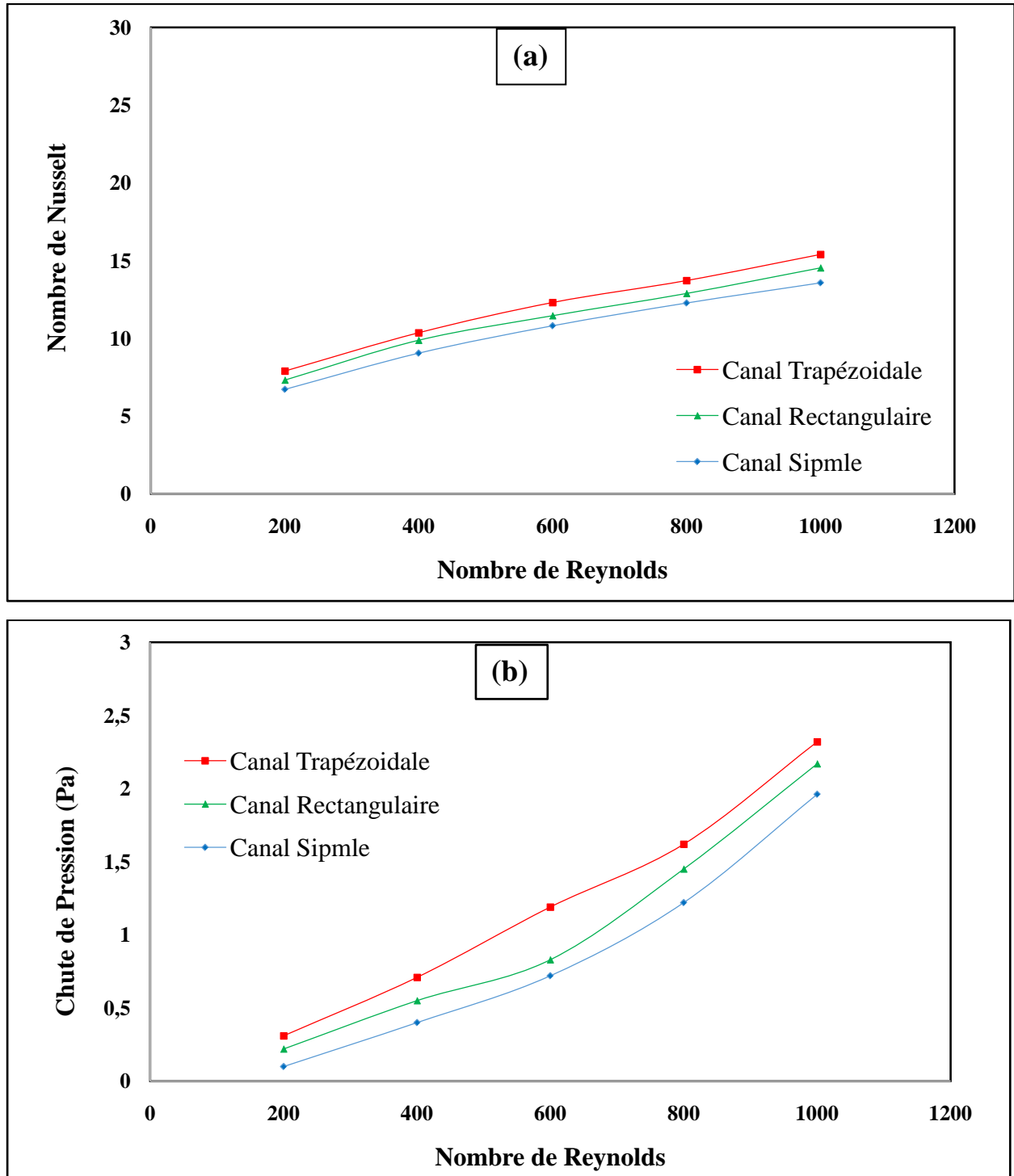
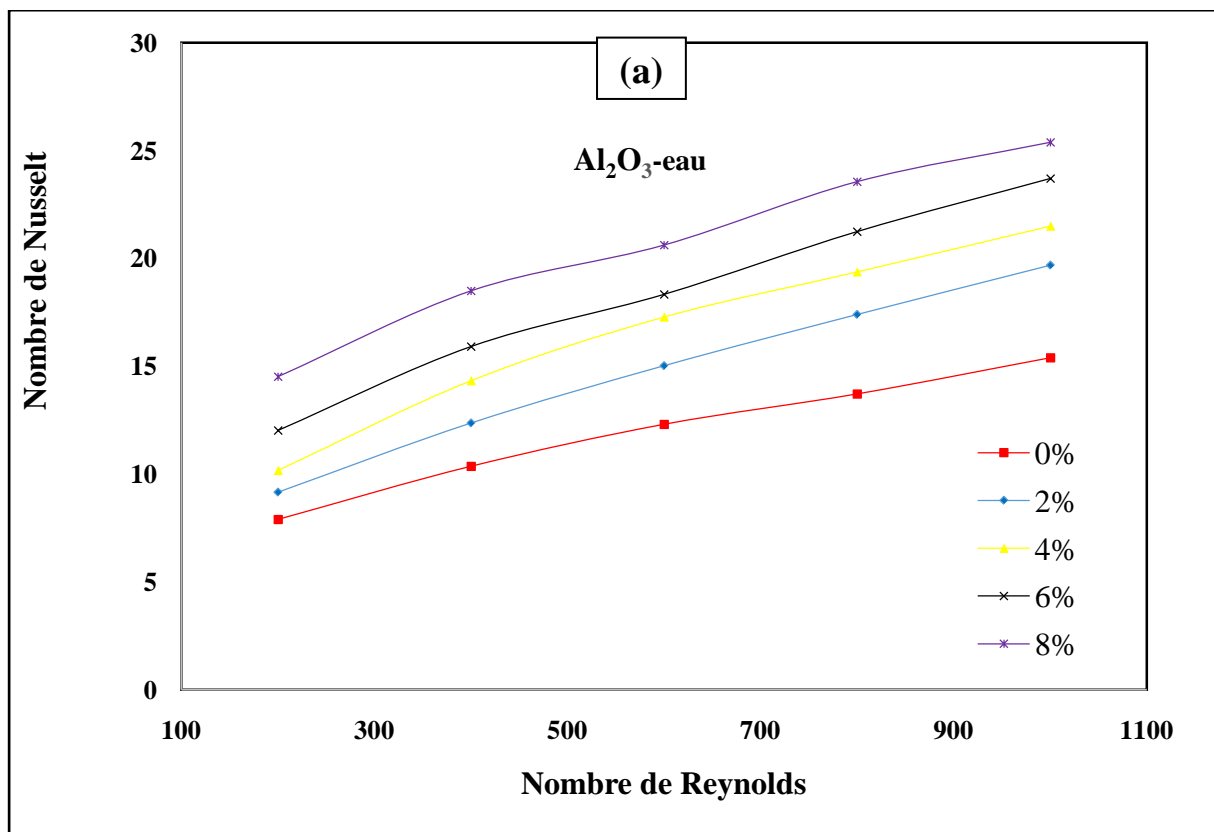


Figure 4.519. Variation du: (a) nombre de Nusselt, (b) chute de pression en fonction du nombre de Reynolds pour différentes formes des canaux pour un écoulement d'eau pure.

4.4.2. L'effet de la fraction volumique des nanoparticules

Dans la figure 4.31 (a) nous avons représenté la variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds à différentes fractions volumiques des nanoparticules avec un diamètre de 10 nm. Il ressort que l'utilisation de nanoparticules avec une fraction volumique plus élevée et un nombre de Reynolds plus grand permet d'augmenter le nombre de Nusselt à cause de l'amélioration de la conductivité thermique.

La figure 4.31 (b) montre que la chute de pression augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et le nombre de Reynolds, d'autre part l'élévation de cette chute de pression est causée par l'élévation de la viscosité dynamique et la densité des nanofluides. La figure 4.31 (c) montre la diminution du facteur de frottement avec l'augmentation du nombre de Reynolds dans le canal trapézoïdale pour différentes fractions volumiques des nanoparticules.



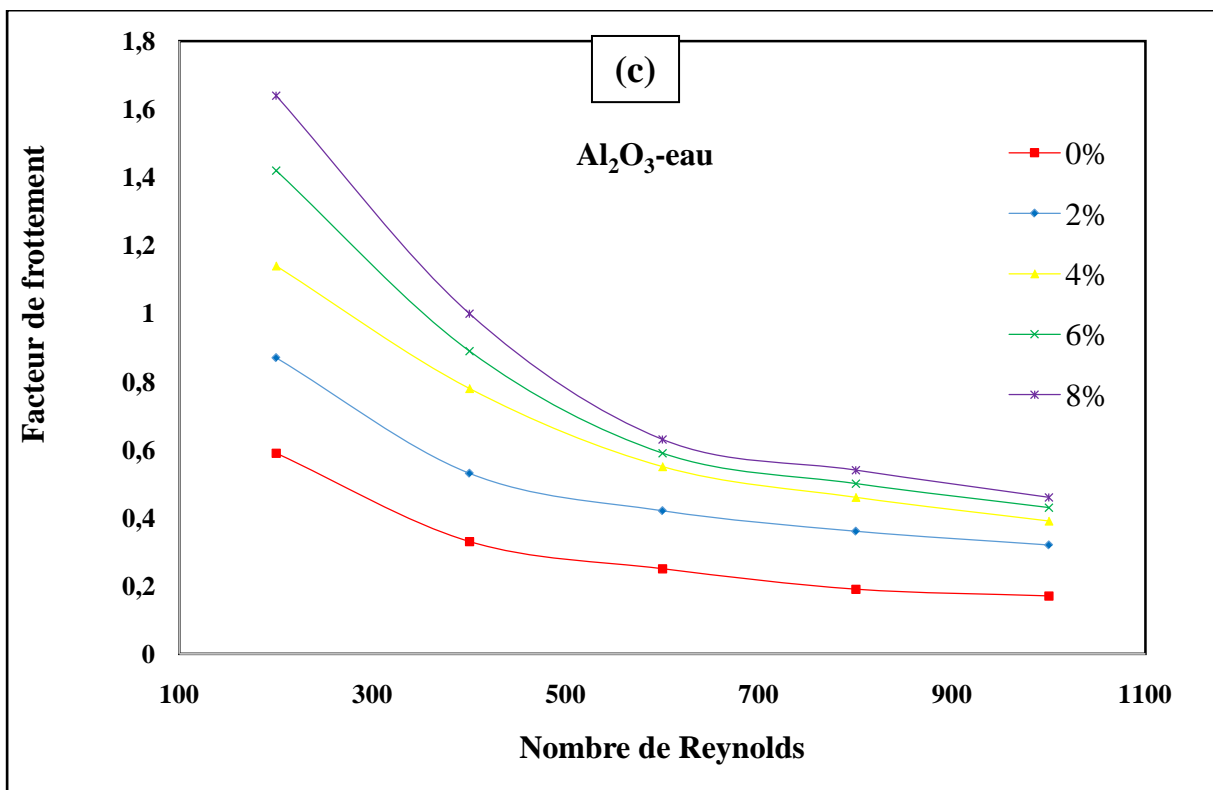
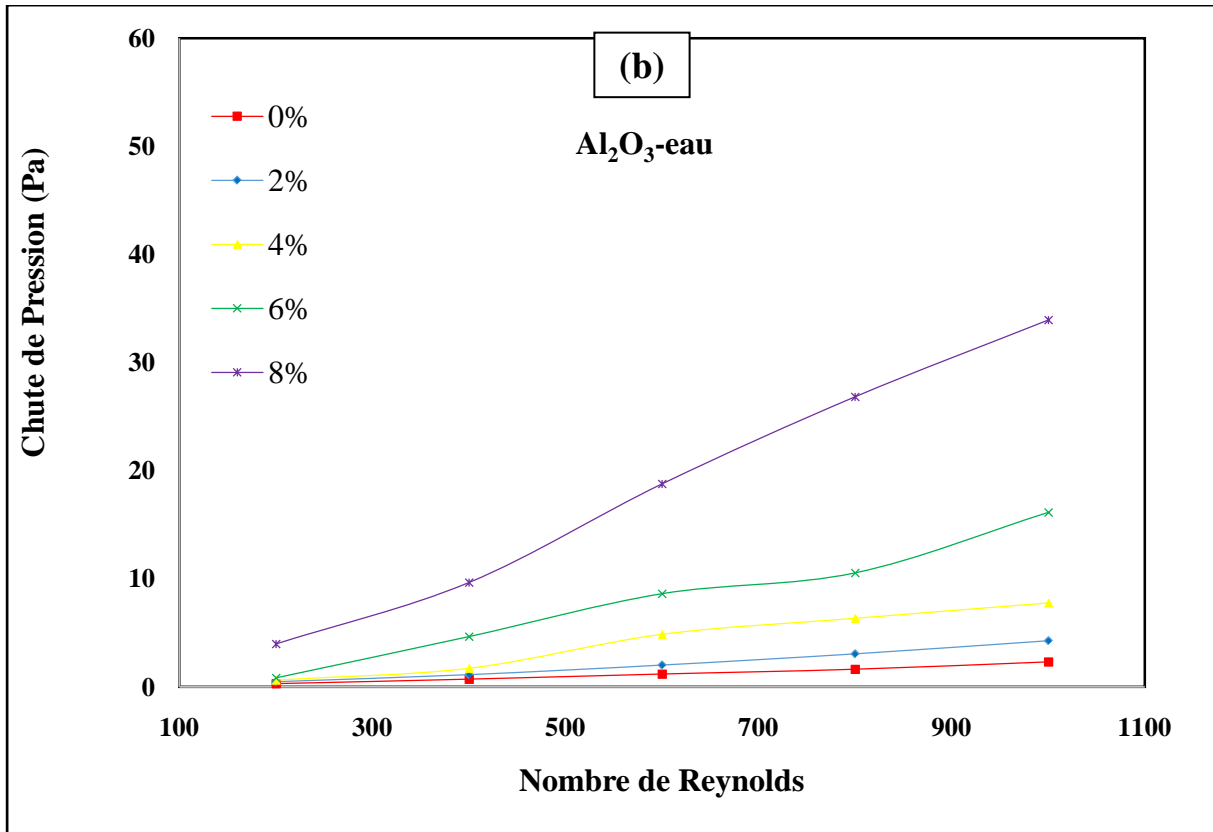


Figure 4.6. Variations du: (a) Nombre de Nusselt, (b) Chute de pression, (c) Facteur de frottement en fonction du nombre de Reynolds pour différentes fractions volumique des nanoparticules et $dp=10\text{ nm}$

La figure 4.32 montre l'évolution de l'indice de performance thermo-hydraulique pour différentes fractions volumiques et nombre de Reynolds. On voit que plus la fraction volumique des nanoparticules augmente plus l'indice de performance thermo-hydraulique du transfert de chaleur est amélioré.

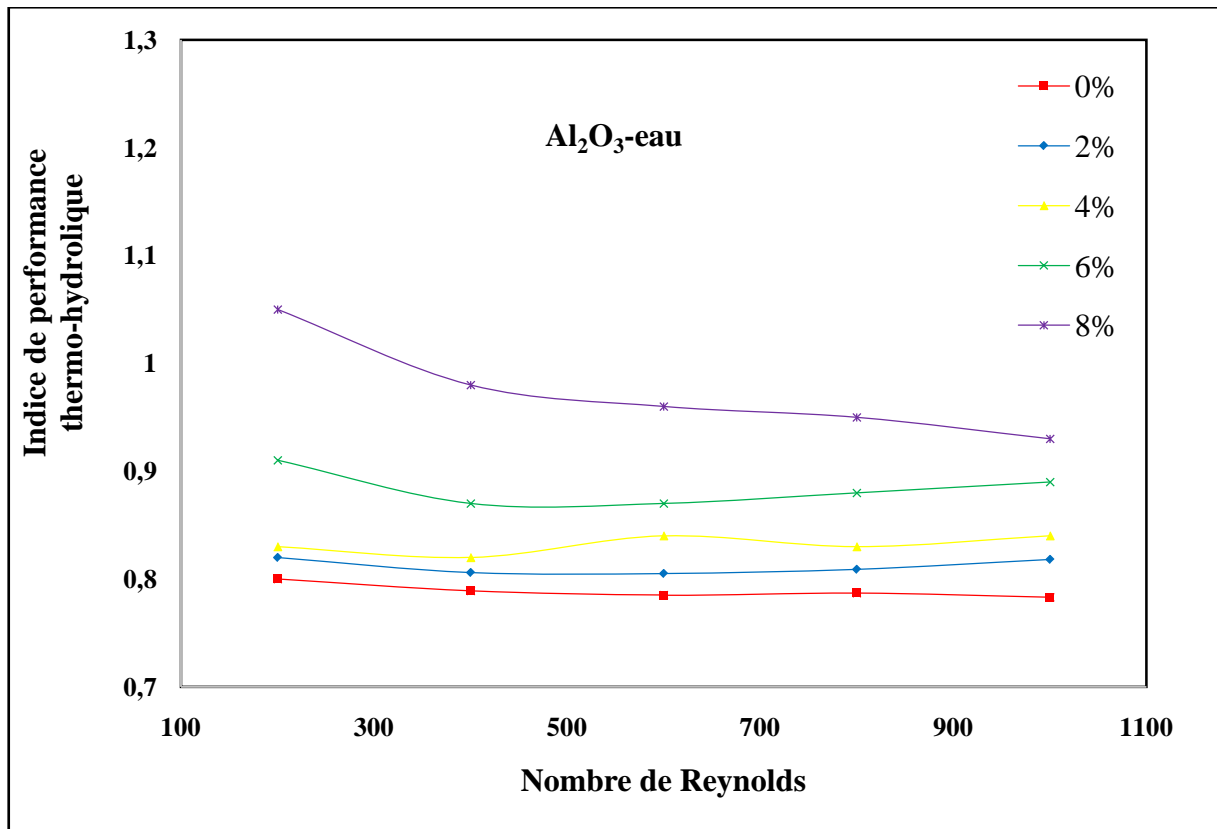


Figure 4.7. Variations de l'indice de performance thermo-hydraulique, en fonction du nombre de Reynolds pour différentes fractions volumiques des nanoparticules avec $dp=10\text{ nm}$.

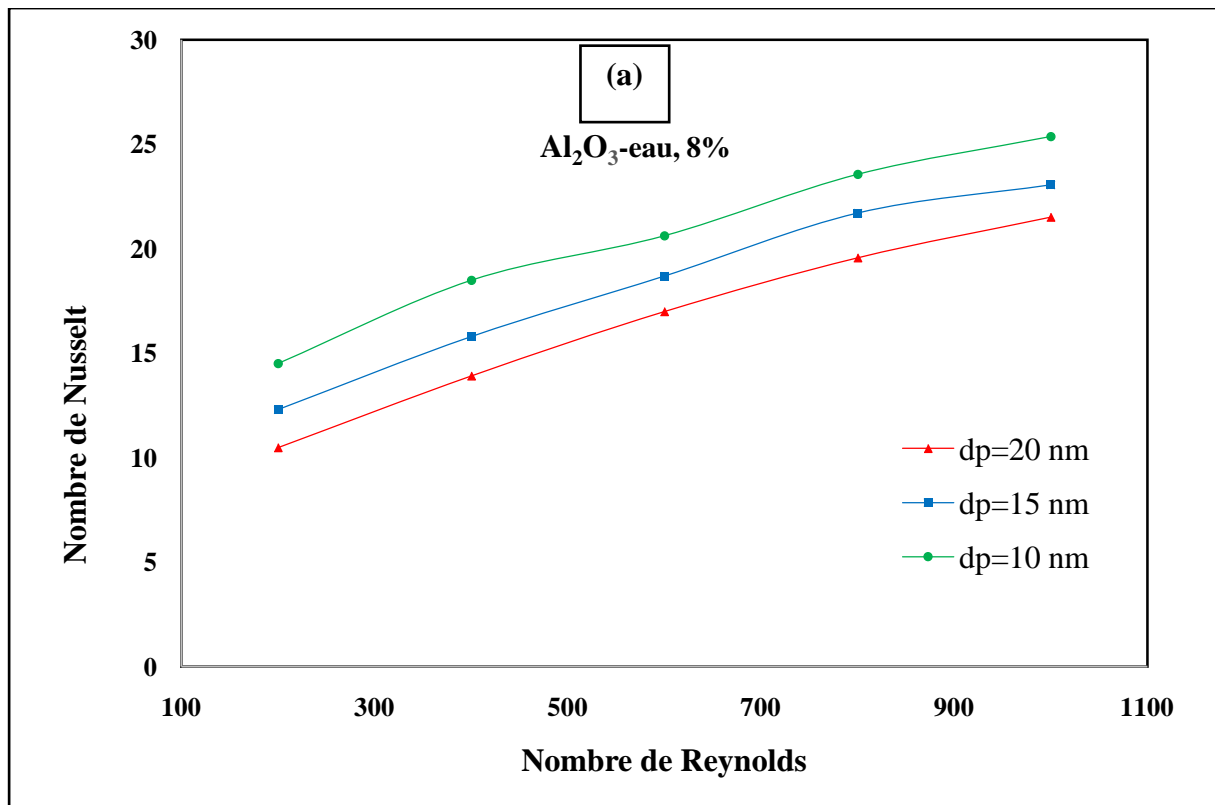
4.4.3. L'effet du diamètre des nanoparticules

On a étudié l'effet du diamètre des nanoparticules sur le nombre de Nusselt, la chute de pression et le facteur de frottement. On a choisi trois valeurs de diamètre des nanoparticules: 10 nm, 15 nm et 20 nm avec une fraction volumique de 8%.

La figure 4.33 (a) présente la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Reynolds pour différents diamètres de nanoparticules. La diminution du diamètre des nanoparticules Al_2O_3 conduit à un meilleur coefficient d'échange et un meilleur nombre de

Chapitre 04 Résultats et discussions

Nusselt en fonction de l'augmentation du nombre de Reynolds et donc une meilleure performance thermique et dynamique. La figure 4.33(b) montre la variation de la chute de pression en fonction du nombre de Reynolds et du diamètre des nanoparticules. La diminution du diamètre des nanoparticules et l'augmentation du nombre de Reynolds permet d'augmenter la chute de pression. La figure 4.33 (c) montre la variation du facteur de frottement en fonction du nombre de Reynolds pour différents diamètres des nanoparticules. Le facteur de frottement le plus grand correspond au diamètre des nanoparticules le plus petit et le nombre de Reynolds le plus petit.



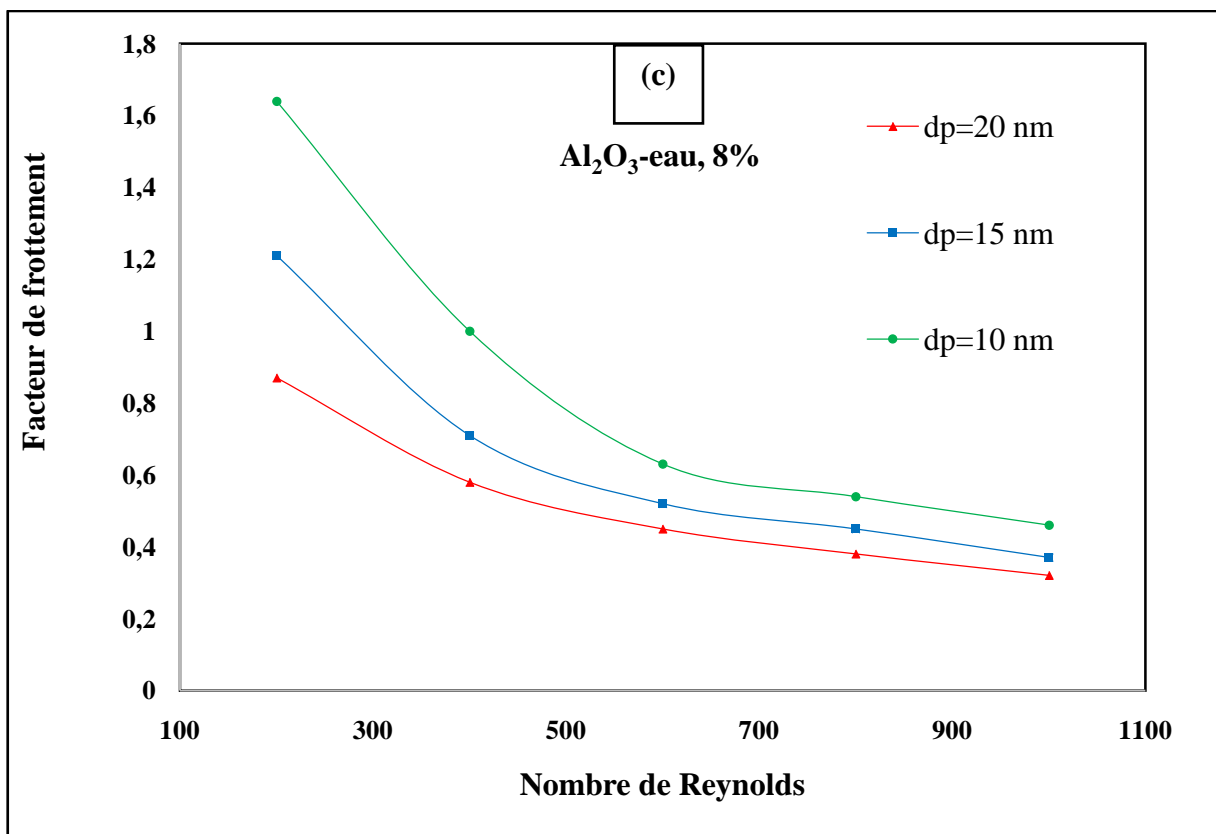
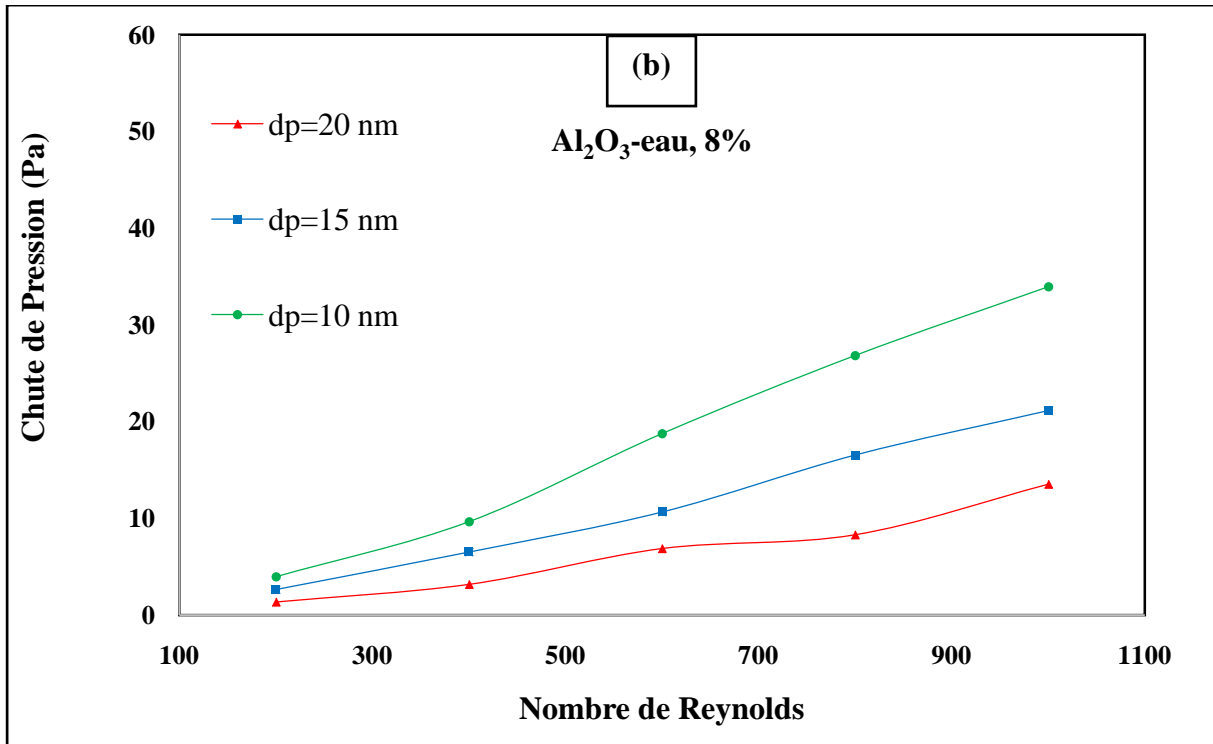


Figure 4.8. Variation du :(a) Nombre de Nusselt moyen, (b) Chute de Pression, (c) Facteur de frottement, en fonction du nombre de Reynolds et différents diamètres des nanoparticules.

La figure 4.34 présente l'évolution de l'indice de performance thermo-hydraulique pour différent diamètre des nanoparticules et différent nombre de Reynolds. On voit que plus le diamètre des nanoparticules diminue plus l'indice de performance thermo-hydraulique du transfert de chaleur est amélioré pour des faible nombre de Reynolds.

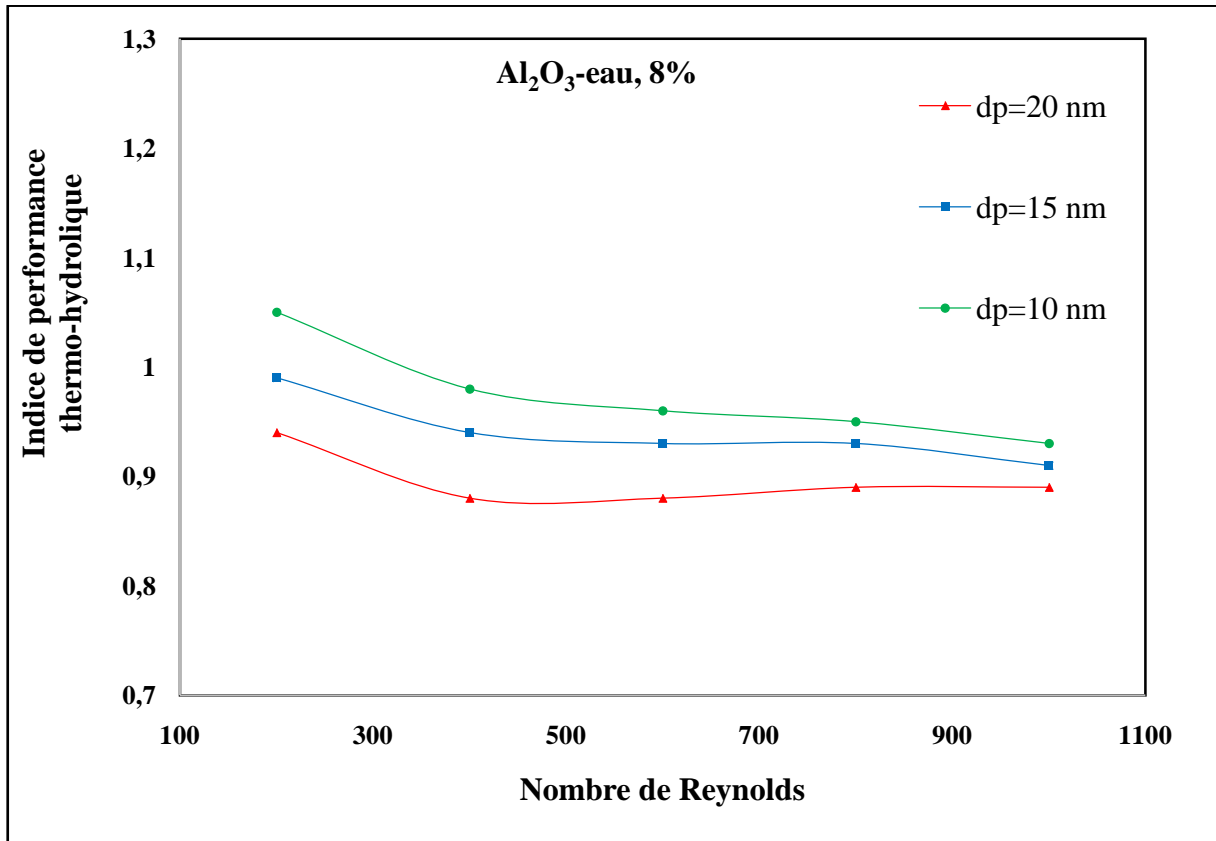


Figure 4.9. Indice de performance thermo-hydraulique du transfert de chaleur en fonction du nombre de Reynolds et différents diamètres des nanoparticules.

Conclusion et perspectives

Dans ce travail une investigation numérique a été menée pour étudier la dynamique de l'écoulement laminaire axisymétrique bidimensionnel de nanofluide et le transfert de chaleur à travers différentes configurations géométriques des canaux (trapézoïdale, rectangulaire et simple), sous l'action d'une température constante.

La géométrie du modèle utilisé a été dessinée et maillée à partir d'un logiciel GAMBIT et la résolution et l'exploitation des résultats obtenus à partir du solveur Fluent (CFD). Les effets de la forme du canal, du nombre de Reynolds, de la fraction volumique et du diamètre des nanoparticules sur les performances thermiques et dynamiques du canal ont été présentés et discutés. Les résultats sont présentés en termes du nombre de Nusselt, de la chute de pression, du facteur de frottement et de performance thermo-hydraulique.

A la lumière des résultats obtenus dans cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ❖ L'utilisation d'un canal à ondulation trapézoïdale permet d'augmenter le nombre de Nusselt et donc d'améliorer le transfert thermique par rapport à un canal simple.
- ❖ L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et la diminution du diamètre des nanoparticules est très favorable à l'amélioration du nombre de Nusselt.
- ❖ Le meilleur indice de performance thermo-hydraulique est donné à partir de L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et la diminution du diamètre des nanoparticules pour des faibles nombre de Reynolds.
- ❖ L'étude conclue que l'utilisation de l'écoulement de nanofluide $Al_2O_3 - eau$ dans un canal muni d'ondulations trapézoïdales avec un diamètre de nanoparticules de 10 nm et une fraction volumique de 8% donne la meilleure performance thermo-hydraulique pour des faibles nombre de Reynolds.

- ❖ Analyser d'autres types de nanofluides,
- ❖ Etude des nouvelles corrélations pour calculer le coefficient d'échange et le nombre de Nusselt,
- ❖ Etude détaillée d'une application: dissipateur, échangeur, micro-capteur thermique....,
- ❖ Etude en régime turbulent,
- ❖ Comparaison de modèles existants de la conduction thermique et de la viscosité de nanofluide,
- ❖ Passer à d'autres configurations de faible dimension micro.
- ❖ Extension de ce travail à des configurations géométriques tridimensionnelles.

Références bibliographiques

- [1] L. Monteith, H. Unsworth, Principles of environmental physics. 4th ed, (2013): 151-178.
- [2] S. Mergui, module 2A101. cours de transferts thermiques, Licence de Mécanique 2eme année, université Sorbonne UPMC.
- [3] M. Zeng, Techniques of Heat Transfer Enhancements and their Applications. Department of Thermo-Fluid Science and Engineering, School of Energy and Power Engineering.
- [4] O. Reynolds, An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous and of the Law of Resistance in Parallel Channels. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, (1883): 935-982.
- [5] H. Hamdaoui, Simulation du transfert de chaleur par convection forcée pour les applications photovoltaïques. thèse de doctorat, Université Tahri Mohammed Béchar, (2019): 9-10.
- [6] A. Mostefaoui, R. Saim, S. Abboudi, Analyse thermo énergétique de la convection thermique d'un écoulement de nanofluide dans des micro-canaux ondulés. thèse de doctorat, université Bourgogne Franche-Comté et université Abou Bekr-Belkaid-Tlemcen, (2021): 26-28.
- [7] F.M. White, Viscous Fluid Flow, fourth Edition, McGraw Hill, Turbulent heat transfer characteristics and pressure drop in swirling flow at upstream and downstream of an abrupt expansion. Heat and Mass Transfer 48.3 (2012): 529-539.
- [8] T.J. Young, K. Vafai, Convective flow and heat transfer in a channel containing multiple heated obstacles. International Journal of Heat and Mass Transfer, 41, (1998): 3279-3298.
- [9] Y. Xuan, Q. Li, Investigation of convective heat transfer and flow features of nanofluids. Journal of Heat Transfer, 125(1), (2003): 151-5.
- [10] G. Roy, C.T. Nguyen et P.R. Lajoie, Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids. Superlattices Microstruct., (2004): 497-511.

- [11]YZ. Yang, G. Zhang, EA. Grulke, WB.Anderson, G.Wu, Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,48(6), (2005):1107-16.
- [12]S.Maiga, SJ.Palm, CT.Nguyen, G.Roy, N.Galanis, Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26, (2005):530-46.
- [13] S.Z. Heris, S.G. Etemad, M.N. Esfahany,Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*,33, (2006): 529-535.
- [14] C.J. Ho, M.W. Chen, and Z.W. Li, Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. *International Journal of heat and Mass Transfer*, 51, (2008): 4506-4516.
- [15] K B.Anoop, T.Sundararajan and S K. Das, Effect of Particle Size on the Convective Heat Transfer in Nanofluid in Developing Region. *Int. J.Heat Mass Transfer*, 52 (2009): 2189-2195.
- [16]M. Izadi, A. Behzadmehr, D. Jalali-Vahida, Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus. *International Journal of Thermal Sciences*, (2009): 2119-2129.
- [17] H. Heidary, M.J. Kermani, Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel. *International Communication in Heat Mass Transfer* 37, (2010): 1520-1527.
- [18] M. Ahmed, N. Shuaib, M. Yusoff, A. Al-Falahi, Numerical investigations of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 38, (2011): 1368-1375.
- [19]AR.Sajadi, MH.Kazemi, Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (2011):1474-8.
- [20] T. Sharjil, M. Manu, Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel. *Applied Thermal Engineering* 39,(2012): 8-14.

- [21] M. A. Ahmed, N.H. Shuaib, M. Z. Yusoff, Effects of geometrical parameters on the flow and heat transfer characteristics in trapezoidal-corrugated channel using nanofluid. *International Communication in Heat and Mass Transfer* 42, (2013): 69-74.
- [22] M. Khoshvaght-Aliabadi, F. Hormozi, A. Zamzamian, Experimental analysis of thermohydraulic performance of copper-water nanofluid flow in different plate-fin channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 52, (2014): 248-258.
- [23] M. A. Ahmed, M. Z. Yusoff, K. C. Shuaib, Numerical and experimental investigations on the heat transfer enhancement in corrugated channels using SiO₂-water nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*, (2015): 77-92.
- [24] B. Ravi, P. Singh, V. Ekkad, Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in two-pass ribbed channels. *International Journal of Thermal Sciences*, (2017): 31-43.
- [25] A. Behnampour, O. A. Akbari, M. R. Safaei, M. Ghavami, A. Marzban, G. A. S. Shabani, M. Zarringhalam, R. Mashayekhi, Analysis of heat transfer and nanofluid flow in microchannels with trapezoidal, rectangular and triangular shaped ribs. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, (2017): 15-31.
- [26] M. A. Ahmed, M. M. Yaseen, M. Z. Yusoff, Numerical Study of Convective Heat Transfer from Tube Bank in Cross Flow Using Nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*, (2017).
- [27] L. Tahsin Aroni, J. M. Siddiqui, Kunja, A. K. M. Sadrul Islam, Study of laminar convective heat transfer through a sinusoidal corrugated channel with a zero-degree phase shift using different nanofluids. *Materials Today Proceedings*, 44(19), (2021).
- [28] R. Mabrouk, Etude paramétrique des échanges convectifs turbulents dans les configurations d'intérêt pratique. Thèse de doctorat, université Mentouri Constantine 1, (2017): 31-33.
- [29] Z. A. Lamri, Contribution à l'Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nanofluid Monophasique et Diphasique. Mémoire de Magister, université Mentouri Constantine, (2014).

- [30] M. Khentoul, Étude Numérique de la Convection Mixte dans un Canal Horizontal Contenant des Ailettes. thèse de doctorats, université des frères Mentour constantine, (2016): 5-6
- [31] S. Fohanno, C. T. Nguyen, G. Polidori, Newtonian Nanofluids in Convection. handbook of nanophysics, Nanoparticles and Quantum Dots. Edited by Klaus D. Sattler. CRC Press. Taylor and Francis Group.
- [32] I. Abu Raihan, S. Bodius, A review on nanofluid: preparation, stability, thermophysical properties. heat transfer characteristics and application, (2020): 3-4.
- [33] S. A. Angayarkanni, J. Philip, Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. Advances in Colloid and Interface Science 225, (2015): 146-176.
- [34] D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, K. Zhang, Review of nanofluides for heat transfer applications. Particuology 7, (2009): 141-150.
- [35] A. Mostefaoui, Analyse thermo énergétique de la convection thermique d'un écoulement de nanofluides dans des micro-canaux ondulés. thèse de doctorat, université Bourgogne Franche-Comte et université Abou-Bekr-Belkaid-Tlemcen, (2021): 58-59.
- [36] Y. Xuan and W. Roetzel, Conception for heat transfer correlation of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43 (2000): 3701-3707.
- [37] B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, 11 (1998): 151.
- [38] J. C. A. Maxwell, Treatise on electricity and magnetism. Oxford, UK: Clarendon Press; (1881).
- [39] D. A. G. Bruggeman, Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen, I—Dielektrizitätskonstanten und leitfähigkeiten der mischkörper aus isotropen substanzen. Annalen der Physik, Leipzig, 24 (1935): 636-79.
- [40] R. L. Hamilton, O. K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. I&EC Fundamentals, 1(3) (1962): 187-91.

- [41]F. J.Wasp, Solid–liquid slurry pipe line transportation. Transactions on Techniques.Berlin (1977).
- [42]S. Lu,H. Lin, Effective conductivity of composites containing aligned spherical inclusions of finite conductivity. Journal of Applied Physics, 79 (1996): 6761-9.
- [43]W. Yu, SUS. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. J. nanoparticle Res5 (2003): 167-71.
- [44]P. Bhattacharya, SK. Saha, A. Yadav, PE. Phelan, RS.Prasher, Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. Journal Applied Physics,95(11),(2004):6492-4.
- [45]P.Keblinski, J.A. Eastman and D. G. Cahill,Nanofluids for thermal transport.Materials today, 8(2005): 36.
- [46]J.Koo, C.Kleinstreuer,A new thermal conductivity model for nanofluids. Journal of Nanoparticle Research,6(6) (2004):577-88.
- [47] QZ.Xue, Model for thermal conductivity of carbon nano tube-based composites. Physica Condensed Matter,368(4) (2005):302-7.
- [48] CH.Li, GP.Peterson, Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). Journal of Applied Physics, 99(8): 084314. (2006).
- [49]EV.Timofeeva, AN.Gavrilov, JM. McCloskey, YV. Tolmachev, Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. Physical Review 76:061203, (2007).
- [50]J.Avsec, M.Oblak, The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for nanofluids on the basis of statistical nano- mechanics.International Journal of Heat and Mass Transfer, 50(19) (2007): 4331-41.

- [51]W.Duangthongsuk, S. Wongwises, Measurement of temperature dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂–water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science* , 33(4) (2009):706-14.
- [52]HE. Patel,T.Sundararajan, SK. Das. An experimental investigation into the thermalconductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids. *Journal of NanoparticleResearch*, 12 (2010):1015-31.
- [53]L. Godson Raja, B. Mohan Lal,D.S.Wongwises, Experimental investigation on the thermal conductivity and viscosity of silver-deionized water nanofluid. *Experimental HeatTransfer*, 23 (2010):317-32.
- [54]M. Corcione, Rayleigh–Benard convection heat transfer in nanoparticle suspensions. *International Journal of Heat and Fluid Flow*; 32 (2011): 65-77.
- [55]Azmi, D. K. Das, PK.Namburu, Numerical study of fluid dynamic and heat transferperformance of Al₂O₃ and CuOnanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal ofHeatand Fluid Flow*, 31, (2010): 613-21.
- [56]A. Einstein,Eineneuebestimmung der molekuldimensionen. *Annalen der Physik*, Leipzig, 19 (1906): 289-306.
- [57]HC. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solution. *Journal of Chemical Physics*,20 (1952): 571-81.
- [58]GK. Batchelor, The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*,83(1) (1977): 97-117.
- [59]X. Wang, X.Xu, SUS. Choi,Thermal conductivity of nanoparticles–fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*,;13(4) (1999):474-80.
- [60]W. Tseng, KC. Lin, Rheology and colloidal structure of aqueous TiO₂ nanoparticle suspensions. *Material Science Engineering*, 355 (2003):186-92.

[61] S. Maiga, S.J. Palm, C.T. Nguyen, G. Roy, N. Galanis, Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26(2005):530-46.

[62] S. Song, C. Peng, A. M. Gonzalez-Olivares, A. Lopez-Valdivieso, Study on hydration layers near nanoscale silica dispersed in aqueous solutions through viscosity measurement. *Journal of Colloid and Interface Science*, 287 (2005): 114-20.

[63] D.P. Kulkarni, D. K. Das, G. Chukwu, Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension Nanofluid. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* (2006):1150-4.

[64] J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 128 (2006): 240-50.

[65] C. T. Nguyen, F. Desgranges, G. Roy, N. Galanis, T. Mare, S. Boucher, Temperature and particle-size dependent viscosity data for water based nanofluids—hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28 (2007): 1492-506.

[66] N. Masoumi, N. Sohrabi, A. Behzadmehr, A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42:055501 (2009).

[67] M. Chandrasekar, S. Suresh, B. Chandra, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3 / water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34 (2010):210-6.

[68] M. Corcione, convection heat transfer in nanoparticle suspensions. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32 (2011): 65-77.

[69] D. David, Nanofluides l'efficacité à la hausse, (2008). <http://www.cooling-masters.com> consulté le : 15/06/2021.