REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MÉDÉA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Projet fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master

En Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

Convection forcée avec les nanofluides en régime laminaire et turbulent dans un tube circulaire.

Proposé et dirigé par :

- **Pr. ANNOUN Mohamed.**
- **KRIBY Saliha.**

Présente par :

- **KALEM Zahra.**
- **HAMIDI Nadia.**

2017-2018



Dédicaces

Dieu me suffit, quel excellent protecteur

Je dédie ce modeste travail à :

A ma formidable mère qui m'a toujours soutenu, qui m'a toujours encouragé et qui n'a jamais cessé de croire en moi.

A 2éme mère « F »

A mon père « Ayache » qui a toujours su me donné les meilleurs conseils pour ma réussite.

A 2éme père « Abd el Aziz »

Mes frères Youcef, Adel, Hamid, Sahrawi, Ayoub et Oussama Daoud.

A toute mes sœurs, et toute ma famille sans exception.

Toute mes amis, tous mes collègues de la spécialité énergétique et toute personne qui mon aidée de loin ou de prés.

NADIA

Remerciement

Avant tout chose, nous remercions « Dieu », le tout puissant, pour la santé, la patience et le courage qu'il nous a donné, pour la réalisation de ce modeste travail.

*A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur : Dr. « **ANNOUN Mohamed**» Pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, Pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet. Aussi nous remercions notre copromotrice **« KRIBY»** pour son aide et sa patience.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs « **ZIRARI Mounir** ».*
Nous remercions tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs
et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de ce cycle universitaire.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A les prunelles de mes yeux mes très cher parents Bouzid et Fatiha que je remercie Allah de les avoir protégé pour être témoin de ma réussite

Et a tous mes frères Hakim et Nadji

Et mes sœurs Rachida, Noura et Daouia

Et a mon amis d'enfance Massouda et mes chers amies Nadia, Hadda, Amel, Zahia, Fouzia, Rim et Hassina

A toute la famille KALEM et BOULIK en particulier mes oncles et tantes ainsi que leurs petite familles

A touts les professeurs et enseignants qui ont pour ma réussite

A toute mes amis et collègues dans la spécialité Energétique

Toutes ces personnes que j'ai senties redoutable de leur dédier ce modeste travail en termes d'amour et de profonde gratitude.

ZAHRA

Sommaire

Résumé

La liste des figures

La liste des tableaux

Introduction Générale……1

Chapitre *I* : Généralités sur Les nanofluides

I.1 Introduction…… ……..4

I.2 Définition……..4

I.3 Historique…….. ……...4

I.4 Les nanoparticules et fluide de bas……. …..5

I.5 Les types des nanoparticules……6

I.6 Les nanoparticules les plus utilisé ……6

I.7 Le choix de liquide de base……...7

I.8 Préparation de nanofluides ……...8

I.9 Les propriétés thermophysiques des nanofluides ……8

I.9.1 La masse volumique ……..8

I.9.2 La chaleur spécifique……..9

I.9.3 Coefficient d'expansion volumique (β)……..9

I.9.4 Conductivité thermique……10

I.9.4.1 Les effets influents sur les propriétés thermophysiques des nanofluides……..11

I.9.5 Viscosité dynamique ……13

I.10 Les avantages de nanofluides……14

I.11 Les inconvénients du nanofluides……..14

I.12 Domaine d'application des nanofluides ……14

I.12.1 refroidissement des systèmes thermiques ……..14

I.12.2 Refroidissement des systèmes électroniques……..15

I.12.3 Refroidissement des systèmes militaires ……15

I.12.4 la biomédecine ……15

I.12.5 Refroidissement des systèmes spatiaux ……15

I.12.6 Refroidissement des systèmes nucléaires……...15

I.12.7 D'autres applications ……15

Chapitre *II* : Transfert de chaleur par convection forcée des nanofluides

II.1 Introduction ……18

II.2 Transfert de chaleur par convection……18

II.3 Les types de convection……..18

II.4 Coefficient d'échange de chaleur par convection……19

II.5 Notion de Couche limite……20

II.5.1 Couche limite dynamique……20

II.5.2 Couche limite thermique……..20

II.6 Régime d'écoulement……21

II.6.1 En régime laminaire……21

II.6.2 En régime turbulent……..22

II.7 Grandeurs sans dimension……..22

II.7.1 Le Nombre de Reynolds……..23

II.7.2 Le Nombre de Prandtl……..23

II.7.3 Le Nombre de Nusselt……23

II.8 Equation de la convection ……24

II.8.1 En régime laminaire ……24

II.8.2 En régime turbulent……25

II.9 Convection dans les nanofluides……26

II.10 Convection forcée dans des conduites……..26

II.10.1 Spécificité des écoulements Internes…….27

II.10.2 Aspects hydrodynamique et thermique en régime laminaire……..27

II.10.3 Aspects hydrodynamique et thermique en régime turbulent…….29

II.11 Travaux ……30

Chapitre III : résultats et interprétations

III.1 Introduction……...33

III.2 Corrélations des Propriétés du nanofluide……..33

III.3 Le code de calcule COMSOL Multiphysiques ……..33

III.4 Les étapes démarchent de COMSOL ……34

III.5 Résultats et interprétations ……39

III.5.1 Écoulement laminaire ……39

III.5.2 Écoulement turbulent ……41

Conclusion Générale ……46

Référence

La Liste des figures

Figure I.1 : Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone (Bang et Chang, 2005……6

Figure I.2 : Effet de la concentration volumique sur la conductivité thermique du nanofluide (Al2O3/eau) pour différents chercheurs……11

Figure I.3 : Effet des types de particules sur la conductivité thermique des Nanofluides…….12

Figure I.4 : effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides à base d'eau : (a) pour Al2O3, (b) pour CuO……12

Figure II.1 : Schéma de la convection forcée……..…19

Figure II.2 : Schématisation du développement d'une couche limite dynamique sur une plaque plane……..…20

Figure II.3 : Schématisation du développement d'une couche limite thermique sur une plaque Plane……..…21

Figure II.4 : Ecoulement laminaire……21

Figure II.5 : Sous-couche laminaire d'un écoulement turbulent……....22

Figure II.6 : Profil de vitesse d'un fluide en écoulement dans un tube…….27

Figure III.1 : Geomitré de conduite surculaire……...37

Figure III.2: Maillage triangulaire fin……39

Figure III.3 : variation de nombre de Nusselt en fonction de Nombre de Reynolds pour différentes concentrations en nanoparticules pour un écoulement laminaire…….40

Figure III.4: variation de perte de charge en fonction de Nombre de Reynolds pour différentes concentrations en nanoparticules pour un écoulement laminaire……...41

Figure III.5 : variation de nombre de Nusselt en fonction de Nombre de Reynolds pour différentes concentrations en nanoparticules pour un écoulement turbulent……..42

Figure III.6 : Comparaison du coefficient de transfert thermique de l'aluminium et de l'oxyde de cuivre Nanofluide par rapport aux différentes concentrations massiques en nanoparticule (Re=4000)…….43

Figure III.7 : variation de perte de charge en fonction de Nombre de Reynolds pour différentes concentrations en nanoparticules pour un écoulement turbulent……44

La liste des Tableaux

Tableau I.1 : les nanofluides plus utilisé……..6

Tableau I.2 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base (Ribeiro et Gruss 2009). ……7

Tableau I.3 : Equation de la conductivité thermique des nanofluides…….10

Nomenclature

Symboles latines :

a, b et c :	Des constantes.	
c_p :	La chaleur spécifique	[J.kg^{-1}. k^{-1}].
h :	Coefficient de Transfer thermique par convection	[W/m^2. k].
L :	La longueur caractéristique	[m].
Nu :	Nombre de Nusselt.	
Re :	Nombre de Reynolds.	
Pr :	Nombre de Prandlt.	
U_0:	La vitesse caractéristique du fluide	[m/s].
$\bar{u}$, $\bar{v}$ et $\bar{T}$:	Les quantités moyennes.	
u', v'et T':	Les fluctuations dues à la turbulence.	
k :	Le coefficient de perte de charge.	
C_f :	Facteur de frottement.	
q :	Le flux de chaleur	[W].

Abréviations :

ρ:	La masse volumique	[kg/m^3].
μ :	La viscosité dynamique	[kg/ (m.s)].
$\boldsymbol{v}$:	La viscosité cinématique	[m^2/s].

φ :	Fraction volumique	[%].
α :	Diffusivité thermique	$[m^2.s^{-1}]$.
β:	Coefficient d'expansion volumique.	[%].
λ :	Conductivité thermique	$[W.m^{-1}.k^{-1}]$.

Indice

f :	Fluide de bas.
n_f :	Nanofluides.
n_p :	Nanoparticules.

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'étudie la convection forcée de deux nanofluides (Eau-CuO) et (Eau-$Al2O3$) en écoulement dans une conduite circulaire en régime laminaire et turbulent par le code de calcule COMSOL .nous avons étudié la variation de nombre de Nusselt on fonction de Reynolds et la variation de perte de charge en fonction de Nombre de Reynolds pour différent concentration en nanoparticule pour les deux régimes d'écoulement établés. Les résultats obtenus montrent que quelque soit le régime d'écoulement établit, et pour les deux types des nanoparticules utilisée, l'ajout des nanoparticules dans un fluide de base améliore leur rendement thermique surtout pour un régime turbulent, le cas ou la perte de charge s'augmente considérablement ce qu'il nécessite de fixer un seuil lors de l'ajout des nanoparticules pour éviter ensuite le phénomène de regroupement des particules..

Mots clés : nanofluides, nanoparticules, convection forcée dans un tube circulaire, écoulement laminaire, écoulement turbulent.

Abstract :

The aim of this work is to study the forced convection of two nanofluids (Water-CuO) and (Water- Al2 O3) flowing in a circular pipe in a laminar and turbulent regime by the COMSOL computation code. We have studied the variation of Nusselt number on Reynolds function and the variation of pressure loss as a function of Reynolds number for different nanoparticle concentration for the two established flow regimes. The results obtained show that whatever the flow regime establishes, and for both types of nanoparticles used, the addition of the nanoparticles in a base fluid improves their thermal efficiency especially for a turbulent regime, the case or the pressure loss. is considerably increased what it requires to set a threshold when adding the nanoparticles to then avoid the phenomenon of grouping particles.

Key words: nanofluids, nanoparticles, forced convection in a circular tube, laminar flow, turbulent flow**.**

الملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة الحمل الحراري القسري لنانو فلويد المكون من (الماء-CuO) و(الماء -Al_2O_3) في قناة دائرية في نظام رقائقي ومضطرب بواسطة رمز حساب COMSOL .درسنا تباين العدد Nusseltبدلالة العدد Rynolds و كذلك تغير فقدان الضغط بالنسبة للعدد Rynolds من أجل تراكيز مختلفة من النانوية في كلا النظامين. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها انه بغض النظر عن نظام التدفق بالنسبة لكلا الجسيمين النانويين

المستعملين وإضافة النانوية في السوائل يحسن الكفاءة الحرارية وخصوصا في ظروف مضطربة، أو إذا كان انخفاض الضغط بزيادة

كبيرة .ما يتطلب الأمر لوضع عتبة عند إضافة الجسيمات النانوية لتتجنب ظاهرة تجميع الجسيمات.

الكلمات المفتاحية :نانو السوائل، الجسيمات النانوية، والحمل الحراري القسري في أنبوب دائري، تدفق صفحي، تدفق مضطرب.

Introduction Générale :

Très souvent, plusieurs techniques sont utilisées pour refroidir les équipements domestiques ou industriels en évitant alors qu'ils soient endommagés sous l'effet de l'excès de la chaleur à maintenir leur fonctionnement dans de bonnes conditions et augmenter alors leur durée de vie. Parmi les systèmes de refroidissement on cite le procédé de refroidissement par échangeur de chaleur dont le principe consiste à absorber l'excès de chaleur à partir de la surface du matériau par contact avec un fluide en écoulement.

Pour améliorer l'efficacité de ces échangeurs de chaleur il est suggéré d'augmenter leurs surfaces d'échange. Cette technique, par manque d'espace va encombrer l'installation et économiquement va se répercuter sur le coût de ses équipement. Alors une nouvelle technologie a été préconiser dans ces dernière années et qui s'avère très intéressante et efficace pour booster l'échange thermique sans changé les dimensions et les accessoires de l'équipement de refroidissement (pompes et échangeurs). Cette technologie consiste à charger le fluide caloporteur de base par des nanoparticules ; l'ensemble est appelé nanofluide. C'est dans ce contexte que s'articule notre projet.

Le transfert de chaleur par convection est un phénomène très important dans les applications industrielles. Les applications par technique classique utilisée le fluide caloporteur pour le transport de chaleur comme échangeur.

L'intensité du transfert de chaleur dépond principalement de la conductivité thermique de fluide caloporteur mais les chercheurs indiquent que leur conductivité est faible. Pour cela depuis quelques années les chercheures ont trouvé une nouvelle technologie (les nanofluides) pour Fluide caloporteur plus performants.

Les nanofluides qui consistent des particules de taille nanométriqueappelées nanoparticules métallique et non métallique disperséesdans le fluide pur.

Notre but est une étude comparatif entre deux nanofluides constituent respectivement par les nanoparticules d'Al_2O_3 et de nanoparticules de CuO a base d'eau .le'etude est basée sur l'aspect thermique et hydrodynamique des deux fluides pour les deux régimes d'ecoulement laminaire et turbulent au cour de leur circulation dans un tube circulaire.. A travers cette étude on va indiquer l'avantage des nanofluides dans les applications industrielles.

Pour réaliser ce travail, on a articulé sur les étapes suivantes :

Un mémoire est composée de trois chapitre dont :

Dans le premier chapitre on va expliquer l'historique sur les nanofluides, les notions et les types le plus utilise des nanoparticules et de fluide caloporteur. Aussi la préparation, les propriétés et le domaine d'application des nanofluides.

Dans le deuxième chapitre nous présentons le transfert de chaleur par convection forcé et l'équation utilise dans le régime laminaire et turbulent.

Dans le dernier chapitre on présente les étapes de démarche de simulation par le code de calcule de COMSOL et les résultats obtenus finalement la conclusion générale.

I.1 Introduction :

Les fluides caloporteur (eau, huile,…) utilisé généralement pour le refroidissement dans le domaine industriel ne sont pas efficaces par ce que leur conductivité thermique est très faible, l'idée d'amélioration les propriétés thermophysique est produit des particules de taille nanométrique comme une nouvelle technologie appelé les nanofluides.

I.2 Définition :

Les nanofluides sont des solutions qui contient des particules de taille nanométrique, appelées nanoparticules, dans un fluide de base pour améliorer certaines propriétés.

Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Or les fluides les plus employés tels que l'eau, l'huile ou l'èthyléneglycol (EG) ne disposent que d'une Conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins. **[1]**

I.3 Historique :

Nous présentons dans cette partie l'historique des études théoriques et expérimentales portant Sur Les nanofluides depuis leur découverte jusqu'à nos jours.

Le terme "nanofluide" est proposé premièrement par Choi pour désigner la suspension des

Nanoparticules solides dans un liquide de base. Choi a trouvé que la conductivité thermique

Effective du mélange eau-Al2O3 augmente de 20% pour une concentration en volume entre 1% et 5% d'Al2O3.

De plus l'adjonction dans un liquide de certains types de nanoparticules, même en très faible Concentration (1% en volume), permet d'augmenter la conductivité thermique de ce dernier de 150% dans le cas de nanotubes de carbone Choi et al. Et de 40% pour des nanoparticules D'oxyde de cuivre Eastman et al. Et plus de 20% pour des oxydes d'aluminium.

De nombreuses recherches ont été menées depuis 2001 sur cette nouvelle classe de nanofluides Afin de permettre une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu, et mettre ainsi au Point des fluides caloporteurs plus performants. La forte conductivité thermique des nanofluides Les désigne en effet comme des candidats potentiels pour le remplacement des fluides porteurs Utilisés dans les échangeurs thermiques en vue d'améliorer

leurs performances Keblinski. Certaines limitations susceptibles de réduire les performances des nanofluides utilisées à la place Des fluides caloporteurs purs, ont été étudiées.

L'utilisation des nanofluides comme fluide caloporteur dans les échangeurs a montré que

L'addition de nanoparticules dans un liquide augmente sa viscosité et de ce fait les pertes de

Charge Yang. De plus, le manque de stabilité dans le temps de certains nanofluides peut

Entraîner l'agglomération des nanoparticules et une modification de leur propriété de conduction Thermique.

Néanmoins, en l'état actuel des recherches, ces deux effets restent moins importants

Lors de l'utilisation de nanofluides que dans le cas de suspension de microparticules classiques En dehors des applications industrielles possibles, l'étude des nanofluides présente un intérêt Scientifique pour la compréhension des phénomènes mis en jeu aux échelles nanométriques.

Les Propriétés thermiques des nanofluides ne concordent pas avec les prévisions fournies par les Théories classiques décrivant les suspensions de particules solides dans un liquide. Malgré le Nombre élevé d'études publiées sur le sujet ces dernières années, aucune théorie ne parvient à Décrire convenablement les résultats expérimentaux obtenus sur les nanofluides d'après Vadasz Il est à noter, que les résultats expérimentaux obtenus varient énormément d'une publication. À l'autre ce qui ne facilite pas la comparaison entre ces derniers et les théories proposées. Des Recherches complémentaires sont nécessaires pour valider ou infirmer les différentes théories Proposées pour décrire les propriétés thermiques des nanofluides. Différents types de nanoparticules ont été utilisés pour fabriquer les nanofluides. Nous pouvons De manière générale les classer en deux catégories de nanofluides : ceux contenant des Nanoparticules métalliques et ceux contenant des nanotubes de carbone **[2]**

I.4 Les nanoparticules et fluide de base :

Les nanoparticules sont des molécules de la taille varie entre 1et 100 manométries, elles sont plus grandes que des atomes et plus petites qu'une cellule, elles se présent sous la forme de poudres. **[3]**

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… ; Les nanoparticules peuvent être à base de métaux, d'oxydes, de carbures, de nitrures ou de carbone**. [4]**

I.5 Les types des nanoparticules :

Les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories

- Les nanoparticules sphériques :(l'aluminium Al, cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag…) ou d'oxydes (oxyde d'aluminium Al2O3, oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO2…).

- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO2, Nanotube de silicium…) **[4]**.

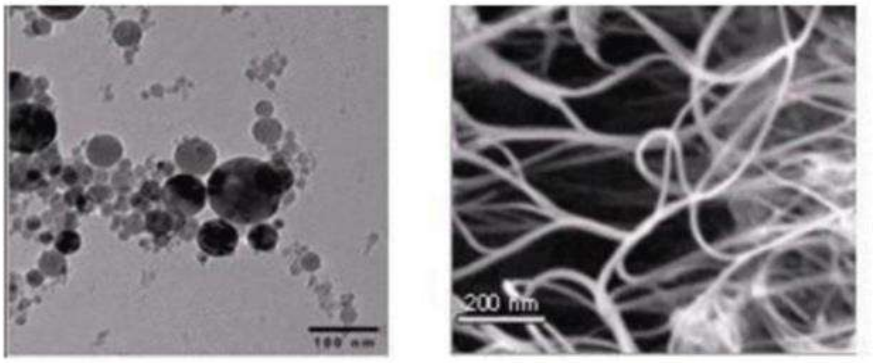


Figure I.1 : Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone (Bang et Chang, 2005) **[4]**.

I.6 Les nanoparticules les plus utilisé :

Tableau I.1 : les nanofluides plus utilisé **[5]**.

• **Les nanoparticules des oxydes métalliques**	• **Les nanoparticules métalliques**	• **Les nanoparticules non métalliques**
L'oxyde de l'aluminium (Al2O3). L'oxyde de cuivre (CuO). L'oxyde de silicium (SiO2). L'oxyde de Titanium (TiO2)	L'aluminium (Al) Le cuivre (Cu) L'or (Ag)	Le nanotube de carbone (CNT) Le diamante(C) Les fluides de réfrigérations (R12, R22)

I.7 Le choix de liquide de base :

Le choix de liquide de base permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule **[6]**.

Tableau I.*2* : Combinaisons nanoparticules/fluides de base (Ribeiro et Gruss 2009) **[4].**

	Acétone	Eau	Ethylène glycol	Huile	Toluène	Décène	éthanol
Ag		×		×			
AlN							×
Au		×			×		
$AL_{70}Cu_{30}$			×				
Al_2O_3		×	×	×			
Bi_2Te_3							
C (diamant)		×					
C (graphite)		×		×			
C (NTC)		×		×		×	
C (fulleréne)				×	×		
Cu	×	×	×	×			
CuO		×	×				
Fe			×				
SiC		×					
SiO_2		×	×				
TiO_2		×	×				
WO_3			×				
ZrO_2		×					

I.8 Préparation de nanofluides :

Il y a plusieurs des procédés pour la fabrication des nanoparticules. Ils peuvent

Être classés en Deux catégories :

-Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.

- Les procédés chimiques, comme la pyrolyse ou la précipitation chimique.

Mais les nanofluides il existe deux procèdes distinct **[6]** :

- **Premier Procédé :**

Dans cette étape premièrement consiste à fabriquer les nanoparticules, par suite disperser le liquide de base .pour une bonne dispersion, une forte action mécanique D'une agitation rotatif au d'ultrason afin de briser agglomérant. Et pour évite l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion.

- **Deuxième Procédé :**

Les nanoparticules produire dans le liquide de base .elle n'est utilisable que pour certains nanofluide mais permet d'éviter l'agglomération et la conductivité thermique est améliorée.

I.9 Les propriétés thermophysiques des nanofluides :

I.9.1 La masse volumique :

La relation de la masse volumique dans le cas d'un mélange est donnée Par **[5]** :

$$\rho = (\frac{m}{v})_n = \frac{m_f+m_p}{v_f+v_p} = \frac{\rho_f v_f+\rho_p v_p}{v_f+v_p} \quad \dots\dots\dots \textbf{I.1}$$

ρ: La masse volumique du nanofluide.

ρ_f: La masse volumique du fluide de base.

ρ_p : La masse volumique des nanoparticules solides.

La fraction volumique des nanoparticules notée φ c'est le rapport de volume des nanoparticules sur le volume total :

$$\varphi = \frac{Volume\ nanoparticule}{Volume\ totale\ du\ nanofluide} = \frac{v_p}{v_p + v_f} \dots\dots\dots\dots\dots \textbf{I.2}$$

Alors la masse volumique du nanofluide est :

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \textbf{I. 3}$$

I.9.2 La chaleur spécifique :

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

La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Il y a deux modèles pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide **[7]** :

Xuan and Roetzel ont utilisé :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{I.4}$$

Pak and Cho ont utilisé :

$$(C_p)_{nf} = (1-\varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{I.5}$$

Avec :

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

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

$(C_p)_p$: Chaleurs spécifique des nanoparticules solides.

I.9.3 Coefficient d'expansion volumique (β) :

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteur Ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation ***(I.6)*** on déduit l'expression suivante **[8]** :

$$\beta_{nf} = (1-\varphi)\ \beta_f + \varphi\beta_p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \textbf{I.6}$$

Où : β_{nf} : Le coefficient de dilatabilité du nanofluide.

β_f: Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_p: Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

I.9.4 Conductivité thermique :

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du Transfer par conduction notée (λ) cette grandeur définie par la loi de fourir**[9]**

Il existe des nombreux modèles expriment la conductivité pour un fluide contenant des particules solides est cette modèle représenté dans le tableau suivant **[10]** :

Tableau I.*3* : Equation de la conductivité thermique des nanofluides **[10]**.

Modèles	**Expressions**	**Remarque**
Maxwell	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = 1 + \frac{3(\frac{\lambda_p}{\lambda_f} - 1)\varphi}{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f} + 2\right) - (\frac{\lambda_p}{\lambda_f} - 1)\varphi}$ *I.7*	Les particules sphériques
Hamilton-crosser	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = 1 + \frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_f} + (n-1) - (n-1)(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_f})\varphi}{\frac{\lambda_p}{\lambda_f} + (n-1) + (1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_f})\varphi}$ *I.8*	n=3 pour les particules sphériques et n=6 pour les particules cylindrique
Bruggemen	$\varphi\left(\frac{\lambda_p - \lambda_{nf}}{\lambda_p + 2\lambda_{nf}}\right) + (1-\varphi)\left(\frac{\lambda_f - \lambda_{nf}}{\lambda_f + 2\lambda_{nf}}\right) = 0$ *I.9*	Les particules se forme sphériques
Jeffery	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = 1 + \left(3\left(\frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_f} - 1}{\frac{\lambda_p}{\lambda_f} + 2}\right)\varphi + 3\left(\frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_f} - 1}{\frac{\lambda_p}{\lambda_f} + 2}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_f} - 1}{\frac{\lambda_p}{\lambda_f} + 2}\right)^2 \ldots\right)\varphi^2$ **I.10**	Particules sphériques
Chon	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = 1 + 64.7\varphi^{0.74}\left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369}\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f}\right)^{0.747} {P_r}^{0.9955} {R_e}^{1.2321}$ *I.11*	Le numéro de Reynolds est basé sur la vitesse de movement brownienne

I.9.4.1 Les effets influents sur les propriétés thermophysiques des nanofluides :

Les paramètres principaux influant sur la conductivité thermique du nanofluide sont **[11]** :

- La concentration volumique des particules
- Le type de la particule
- La température

✓ **Effet de la concentration volumique de particules :**

L'effet de la concentration volumique des particules sur l'amélioration de la conductivité thermique du nanofluide est montré dans les figures (I.2.a) et (I.2.b), où les travaux de sept groupes de chercheurs sont présentés pour les particules de l'Al2O3 suspendus dans l'eau. La dimension de la particule et la température du nanofluide varient ces groupes, mais la tendance générale est claire. Nous constatons que l'amélioration de la conductivité thermique augmente en fonction de la fraction volumique des particules et que les concentrations de particules d'oxyde Métallique donnent une amélioration allant jusqu'à 30%.Métallique donnent une amélioration allant jusqu'à 30%.

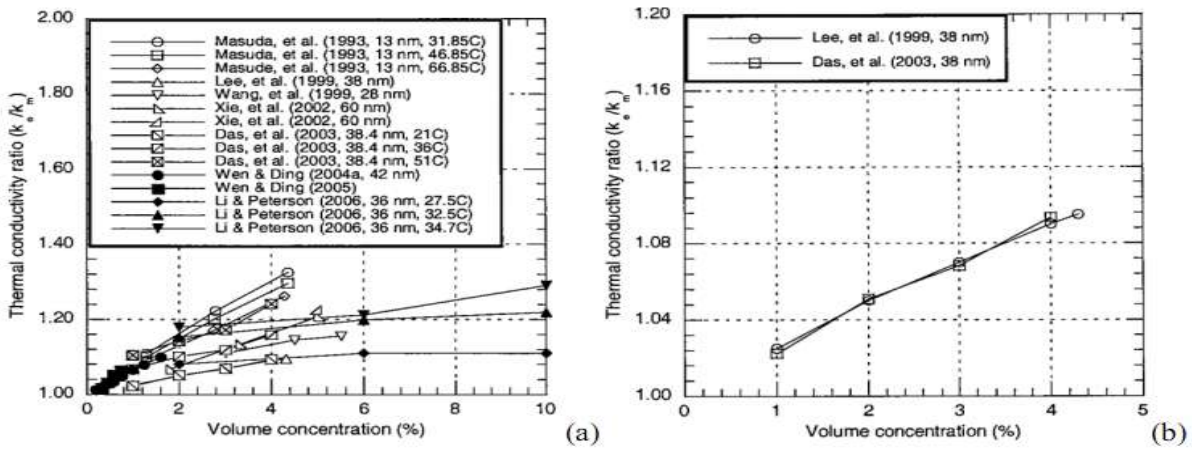


Figure I.2 : Effet de la concentration volumique sur la conductivité thermique du Nanofluide (Al2O3/eau) pour différents chercheurs **[11]**.

✓ **Effet du type de la nanoparticule :**

La figure (I.3.a) et (I.3.b) regroupent les études expérimentales de plusieurs chercheurs. Elles illustrent l'effet du type des nanoparticules sur la conductivité thermique pour deux nanofluides, l'un est un oxyde métallique et le second est un métal, tous deux sont dilués dans l'eau. Tous les paramètres (température et la forme de la particule) sont supposés constants.

Ils ont constaté que les particules métalliques produisent la même amélioration que les oxydes métallique mais à faible concentration volumique. On observe aussi que le rapport de la conductivité thermique de métal a augmenté plus rapidement par rapport à l'oxyde métallique.

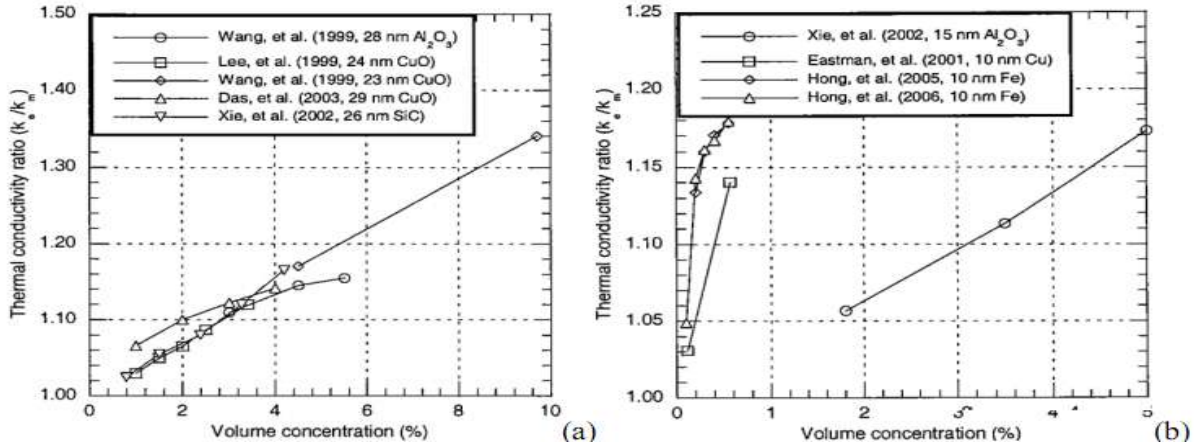


Figure I.3 : Effet des types de particules sur la conductivité thermique des Nanofluides **[11]**.

- ✓ **Effet de la température :**

En général que les données indiquent clairement que l'amélioration de la conductivité thermique augmente lorsque la température augmente. Mais elle est plus élevée pour l'oxyde de cuivre CuO par rapport à l'oxyde d'aluminium Al2O3, ou le taux de la conductivité pour une concentration volumique de φ=4% et température de T=51°C.

Ils atteignent 1,24 pour Al2O3 et une valeur de 1,36 pour CuO

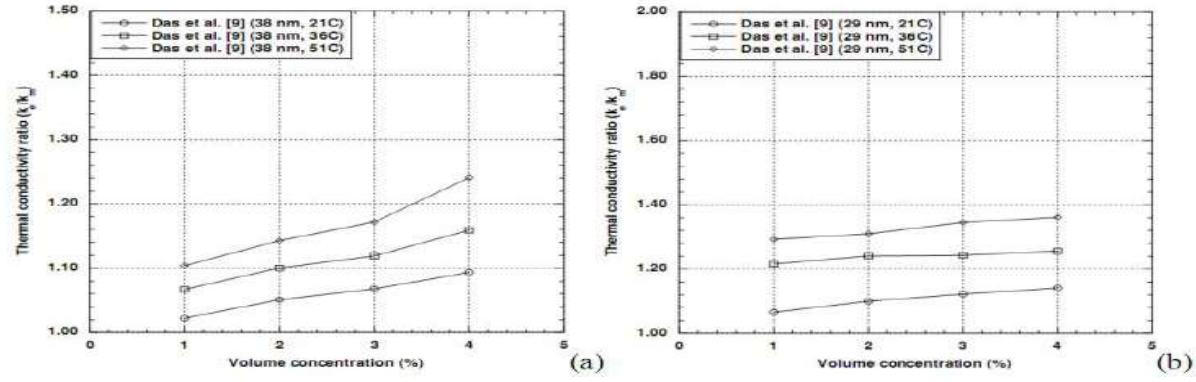


Figure I.4 : effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides a base D'eau : (a) pour Al2O3, (b) pour CuO **[11]**.

I.9.5 Viscosité dynamique :

La viscosité est une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. On peut donc parler de la viscosité comme étant une mesure du frottement interne d'un fluide. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé**.**

Les différents modèles de viscosités **[12]** :

- Modèle d'Einstein :

La viscosité dynamique d'un nanofluide dans le Modèle d'Einstein est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}=1+2.5\ \varphi \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \textbf{I.12}$$

Cette relation est valable pour le cas de particules sphériques et pour de très faible fraction volumique $\varphi \leq 0.03$.

-Modèle de BrinKman :

Généralement cette formule utilisée dans une large plage de concentration de fraction volumique.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}=\frac{1}{(1-\varphi)^{2.5}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \textbf{I.13}$$

-Modèle de batchelor :

Batchelor a montré que la viscosité est une fonction 69non linéaire de χ avec la présence d'un terme en φ^2:

$$\mu_{nf} = \mu_f(1+2.5\ \varphi+6.2\varphi^2) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \textbf{I.14}$$

D'autres relations issues des mesures expérimentales sont citées dans la littérature, exemples :

- Modèle de Maiga et al :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 7.3\varphi + 123\varphi^2\ ) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \textbf{I.15}$$

-Modèle de pak et cho :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 39.11\ \varphi + 533.9\varphi^2) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{I.16}$$

I.10 Les avantages de nanofluides :

-pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur on Réduit par rapport au liquide pur.

- La surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides est grande.

- La précision de stabilité et dispersion très haut avec prédominante mouvement brownien des particules.

- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système **[13]**.

I.11 Les inconvénients du nanofluides :

- caractérisation des suspensions est mauvaise.

- la puissance de pompage et chute de pression accrue.

- Difficultés dans le processus de production.

- Le prix des nanofluides élevé.

- le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.

- la dispersion des nanoparticules et stabile **[13]**.

I.12 Domaine d'application des nanofluides :

Domaine d'application des nanofluides pour améliorer le Transfer thermique on a quelque exemple **[11]**.

I.12.1 refroidissement des systèmes thermiques :

- Dans les moteurs des véhicules mélangés l'éthylène-glycol avec des nanoparticules est utilisé comme de refroidissement pour améliorer taux de refroidissement.

- La dispensation des nanoparticules de CuO et Al_2O_3 dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission.

I.12.2 Refroidissement des systèmes électroniques :

- Les fluides on été considérés comme fluide de refroidissement.

- Refroidir une unité centrale de traitement dans un micro-ordinateur.

I.12.3 Refroidissement des systèmes militaires :

- Le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée.

- Les autres systèmes comme les véhicules militaires les sous-marins et les diodes lasers a haut puissance.

I.12.4 la biomédecine :

- Éviter quelques effets secondaires de méthodes tradionnelles du cancer.

- Les nanoparticules employées comme transporteur des drogues.

- Une chirurgie plus sure rn produisant le refroidissement efficace auteur de la chirurgical.

- produit une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules les cellules saines voisines.

I.12.5 Refroidissement des systèmes spatiaux :

La présence des nanoparticules dans le fluide de refroidissement joué un rôle très important dans les applications de l'espace.

I.12.6 Refroidissement des systèmes nucléaires :

Les nanofluides c'est la nouvelle technologie dans l'industrie de l'énergie nucléaire ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûr été neutronique et de la performance économique des systèmes nucléaires.

***I*.12.7 D'autres applications :**

Il Ya a des situations nombreuses ou l'augmentation de l'efficacité du Transfer thermique peut être liée à la qualité et au cout d'un produit d'un processus. Par exemple, dans le domaine de énergie renouvelables les nanofluides sont utilisés pour augmenter le Transfer de chaleur a partit des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité d'énergie. Les liquides réfrigérant de nanofluide ont une application potentielle dans

la majorité des industries de transformation, telle que les matériaux, la production chimique, la nourriture, la besoisson, le pétrole et le gaz.

II.1 Introduction :

Le transfert de chaleur par convection est classé selon le mode d'écoulement du fluide, par convection forcée et par convection libre.la convection forcée est un processus d'une grande importance dans le domaine l'industrie et des technologies .le principe du transport de chaleur est dépond par le mouvement de fluide. Cette partie estparlée sur quelque notion de base de la convection dans les nanofluides.

II.2 Transfert de chaleur par convection :

La convection est le mécanisme le plus important de transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide, Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes **[14].**

Le flux de chaleur par convection s'exprime par loi de newton **[15]** :

$$q = h(T_p - T_\infty) \quad \text{.....II.1}$$

Avec :

q : la densité du flux.

h : le coefficient d'échange par convection.

T_P: La température de la paroi.

T_∞ : La température du fluide loin de paroi.

II.3 Les types de convection :

Le transfert thermique par convection est divisé en deux types suivant la nature de l'écoulement **[16]** :

a) La convection forcée : Apparait lorsque l'écoulement est engendré par des moyens externes comme un ventilateur ou les vents atmosphériques.
b) b- La convection naturelle : Se produit lorsque l'écoulement est induit par une différence de masse volumique qui varie en fonction de la température au sein du fluide.

La convection forcée est un phénomène de Transfer thermique associé aux écoulements de fluide.

La convection forcée intervient dans plusieurs applications pratiques telles que les capteurs solaires les échangeurs de chaleur, le refroidissement des composantes électroniques et les procédés chimiques et nucléaires **[1]**.

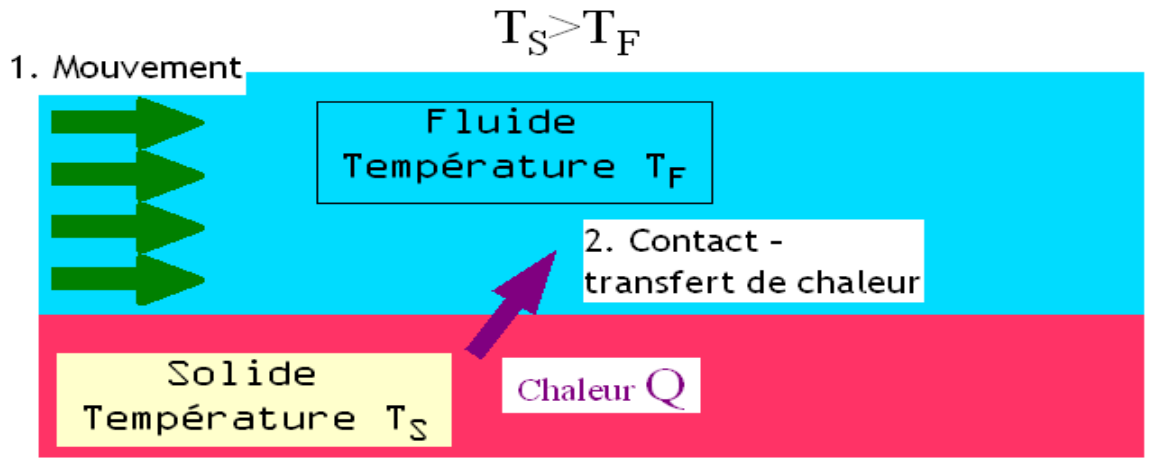


Figure II.1 : Schéma de la convection forcée **[18].**

II.4 Coefficient d'échange de chaleur par convection :

Les coefficients d'échange de chaleur par convection sont généralement calculés à partir deséquations empiriques obtenues en établissant une corrélation entre les données expérimentales aumoyen de l'analyse dimensionnelle. Mais ceci n'est possible que si on est en mesure de connaître auPréalable les variables qui influencent le phénomène.

Le coefficient h dépend d'un certain nombre de grandeurs :

- ✓ Dans le cas de l'écoulement dans une tuyauterie, le flux dépend du diamètre. Dans tous les cas, Une grandeur dimensionnelle de longueur intervient.
- ✓ Le flux dépend des caractéristiques thermiques du fluide, c'est-à-dire sa chaleur massique, Cp et sa conductivité thermique λ.
- ✓ Enfin la viscosité, μ, la densité ρ et la vitesse (vitesse moyenne dans le tube, U∞…) jouent aussi des rôles importants.

Dans ces conditions : h= f (d, Cp, u, λ, ρ, μ) **[19]**.

II.5 Notion de Couche limite :

Comme on s'intéresse au transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide en Mouvement qui ont des températures différentes. Une conséquence de l'interaction fluide-surface est Le développement d'une région dans le fluide dans laquelle la vitesse varie de sa valeur nulle à lasurface à la valeur finie de l'écoulement extérieur : C'est la couche limite dynamique De plus, si les températures de la surface et du fluide sont différentes, il y aura aussi une Région dans le fluide à travers laquelle la température du fluide variera entre sa valeur à la paroi etcelle de l'écoulement externe. Cette région correspond à la couche limite thermique **[19]**.

II.5.1 Couche limite dynamique :

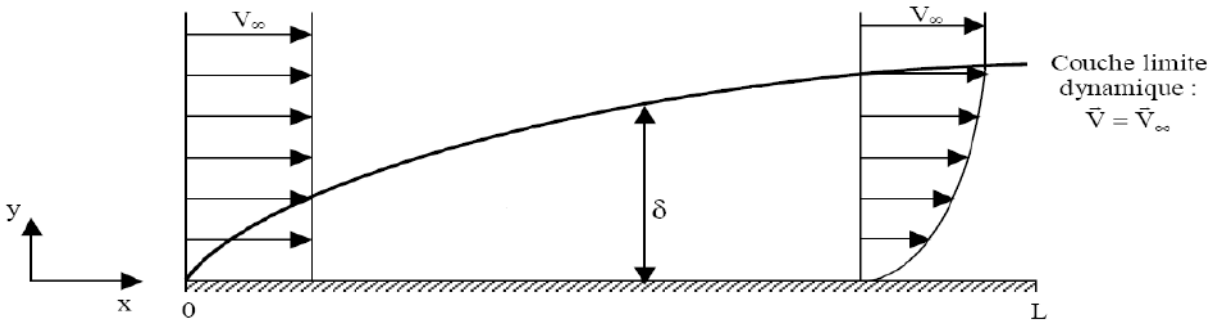


Figure II.2 : Schématisation du développement d'une couche limite dynamique sur une plaque plane **[19]**.

L'épaisseur de cette couche est définie comme étant la distance comptée à partir de la paroi oùla vitesse locale atteint 99 % de la vitesse V_∞du fluide loin de la paroi. Le profil des vitesses àl'intérieur de la couche limite dépend de la nature de l'écoulement. Comme le fluide poursuit sonécoulement le long de la plaque, les forces de cisaillement ralentissent de plus en plus son mouvementet l'épaisseur de la couche limite augmente. La figure précédente montre l'accroissement de lacouche limite et les profils des vitesses en différents points de la plaque.

II.5.2 Couche limite thermique :

De la même manière qu'au niveau dynamique, la température du fluide évolue de la valeur T_p à la paroi à une valeur proche de T_0dans une zone d'épaisseur $\delta_t(x)$appelée couche limite thermique **[19]**.

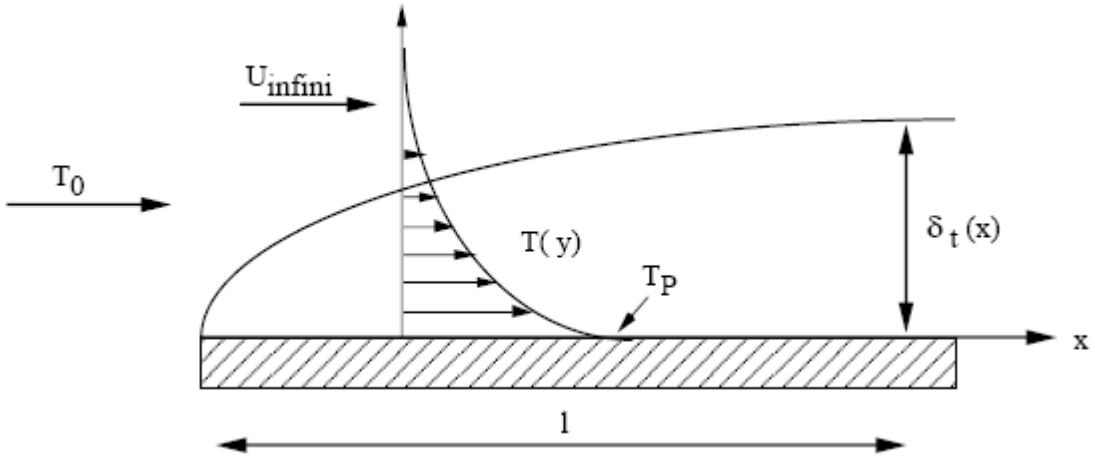


Figure II.3 : Schématisation du développement d'une couche limite thermique sur une plaque Plane**[19]**.

Le gradient de température dans le fluide selon y est très important comparé à celui selon x, Dans cette zone :

$$\frac{\partial T}{\partial y} >> \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{.....II.2.}$$

II.6 Régime d'écoulement :

Compte-tenu du lien entre le transfert de quantité de mouvement et le transfert de chaleur, on doit considérer le régime d'écoulement. Considérons l'exemple d'écoulement d'un fluide dans une conduite **[20]** :

II.6.1 En régime laminaire :

l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes.

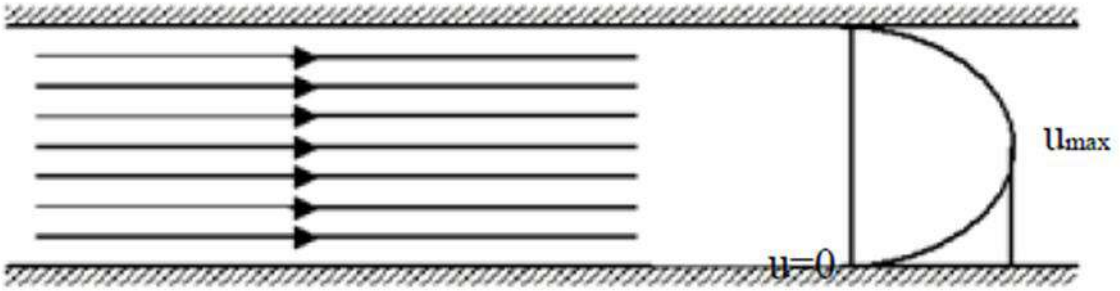


Figure II.4 : Ecoulement laminaire **[20]**.

Entre deux filets fluides adjacents les échanges de chaleur s'effectuent donc : Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides. Par Convection et conduction (négligeable) si l'on considère une direction non normale aux filets fluides.

II.6.2 En régime turbulent :

L'écoulement n'est pas unidirectionnel

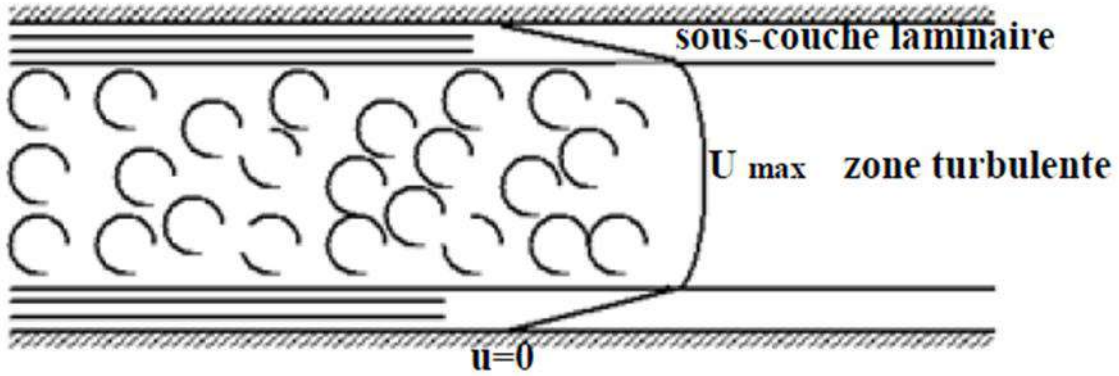


Figure II.5 : Sous-couche laminaire d'un écoulement turbulent **[20]**.

L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans Toutes les directions. On vérifie que la conduction est généralement négligeable. Par rapport à la convection.

II.7 Grandeurs sans dimension

Une grandeur sans dimension (ou grandeur adimensionnelle) est une quantité

Permettant de décrire une caractéristique physique sans dimension ni unité explicite

D'expression. Elle est constituée du produit ou rapport de grandeurs à dimensions, de telle

Façon que le rapport des unités équivaut à un. Ces grandeurs sans dimension interviennent

Particulièrement en mécanique des fluides et pour la description de phénomène de transfert

Lorsqu'on utilise la similitude de modèles réduits ou théorie des maquettes et construit

L'interprétation des résultats d'essais. Elles portent le nom de nombres sans dimension,

Nombres adimensionnels, ou encore de nombres caractéristiques. Les nombres adimensionnels les plus utilisé dans le domaine de la convection sont **[7]** :

II.7.1 Le Nombre de Reynolds :

Représente le rapport entre les forces d'inertie et les forcesvisqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant leséquations de Navier-Stokes. On le définit de la manière suivante **[7]** :

$$Re = \frac{U_0 L}{v} \text{ .....II.3}$$

Avec :

U_0: vitesse caractéristique du fluide [m/s]

L : dimension caractéristique [m]

$\boldsymbol{v}$: viscosité cinématique du fluide [m^2/s]

$$v = \frac{\mu}{\rho} \text{..... II.4}$$

ρ : Masse volumique du fluide [kg/m^3]

μ : viscosité dynamique du fluide [kg/ (m.s)]

II.7.2 Le Nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl qui est le rapport de la viscosité cinématique $\boldsymbol{v}$et la diffusivité thermique, il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux, Ce nombre porte le nom de Ludwig Prandtl, physicien allemand :

$$Pr = \frac{v}{\alpha} \text{.....} \mathbf{II.5}$$

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un nombre de Prandtl faible indique que la conduction thermique est tellement rapide que le Profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température **[7]**.

II.7.3 Le Nombre de Nusselt :

Le Nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert thermique convectif et le

transfert thermique Conductif à travers une interface (souvent fluide/solide). Si la conduction est le principal mode de transfert, alors le nombre de Nusselt sera de l'ordre de l'unité. En cas de présence de convection (Due par exemple au déplacement d'un fluide en régime turbulent), le transfert thermique s'effectuera principalement par déplacement du fluide et aura pour conséquence de faire tendre le nombre de Nusselt vers l'infini.

On le définit de la manière suivante **[7]** :

$$Nu = \frac{\mathrm{hL}}{\lambda} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{II.6}$$

h : Coefficient de transfert thermique.

L : Longueur caractéristique.

λ: Conductivité thermique du fluide

La relation du nombre de Nusselt dans le cas d'un écoulement externe des fluides incompressible sur une plaque plane est **[21]** :

$$Nu = CRe^{a}Pr^{b} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{II.7}$$

Avec : C, a et b sont des constantes dépendant du régime d'écoulement et de la géométrie de l'obstacle et qui sont déterminées expérimentalement.

Exemples :

- **Régime laminaire :**

  Nu=0.66 $Re^{1/2}Pr^{1/3}$

- **Régime Turbulent :**

  Nu = $0.036Pr^{1/3}[Re^{0.8} - 23200]$

II.8 Equation de la convection :

II.8.1 En régime laminaire :

Dans les écoulements en régime laminaire fluide incompressible et newtonienne les équations s'expriment par **[22]**:

- **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \quad \text{..... II. 8}$$

- **Equations de Navier Stokes en 2D :**

$$\rho\left[u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right]=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \text{... ... . II. 9}$$

$$\rho\left[u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right]=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \text{... ... ...II.10}$$

- **Equation de l'énergie :**

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{\lambda}{\rho cp}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \text{... ... ...II.11}$$

II.8.2 En régime turbulent :

Écoulement turbulent est un phénomène les plus complexes dans la mécanique liquide quand les forces à inertie sont beaucoup plus hautes que les forces visqueuses, écoulement ne reste pas sous forme de couches calmes ce qui provoque l'apparition des fluctuations de vitesse et de température à partir d'une valeur moyenne comme **[22]** :

$$u=\bar{u}+u',\ v=\bar{v}+v',\ T=\bar{T}+T'$$

Avec :

$\bar{u}$, $\bar{v}$ et $\bar{T}$: Désignent les quantités moyennes.

u', v'et T': Désignent les fluctuations dues à la turbulence

Les équations de la convection en cordonnées cartésiennes, fluide incompressible et newtonienne s'expriment par :

a) Equation de continuité :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}=0 \quad \text{... ... ...II.12}$$

b) Equations de Navier Stokes en 2D :

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right)=-\frac{\partial\bar{p}}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}-\rho\overline{v'u'}\right)\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \mathbf{II.13}$$

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right)=-\frac{\partial\bar{p}}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}-\rho\overline{v'u'}\right)\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\mathbf{II.14}$$

c) Equation de l'énergie :

$$\rho C_p\left(\bar{u}\frac{\partial\bar{T}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial\bar{T}}{\partial y}\right)=-\frac{\partial}{\partial y}\left(-\lambda\frac{\partial\bar{T}}{\partial y}+\rho C_p\overline{v'T'}\right)+\mu\left(\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial y^2}\right)\ldots\ldots \quad \mathbf{II.15}$$

II.9 Convection dans les nanofluides :

Les nanofluides joué un rôle important pour améliorer les performances des échangeurs de chaleur dans des applications industrielles comme nous l'avons vu dans le premier chapitre.

La modélisation da la convection dans les nanofluides est extrêmes complexe et des investigations intensives ont été lancées ces dernières années pour déterminer le phénomène hydrodynamique et thermique de la suspension. Plusieurs méthodes Mathématiques ont été proposées pour décrire le comportement hydrodynamique et thermique des nanofluides les plus populaires l'approche Eulérienne consistant à considérer toute suspension comme un fluide unique possède les propriétés de propriétés thermique et rhéologiques enter le fluide de base et la particule. C'est pourquoi maintenir les équations de la convection, que ce soit dans un système laminaire ou turbulent. Pour évaluer la masse volumique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique des nanofluides sont utilisées à cet effet. Une analyse complète des équations de la convection est proposée dans le cas des nanofluides.**[22]**

II.10 Convection forcée dans des conduites :

La majorité des procédés industriels est utilisés la convection à l'intérieur des tubes pour la Transfert de chaleur par exemple dans les chaudières, les échangeurs de chaleur et la réfrigération.

II.10.1 Spécificité des écoulements Internes :

Pour un fluide initialement à la vitesse uniforme entre dans une conduite il apparait deux zones d'écoulements comme le montre la figure suivant :

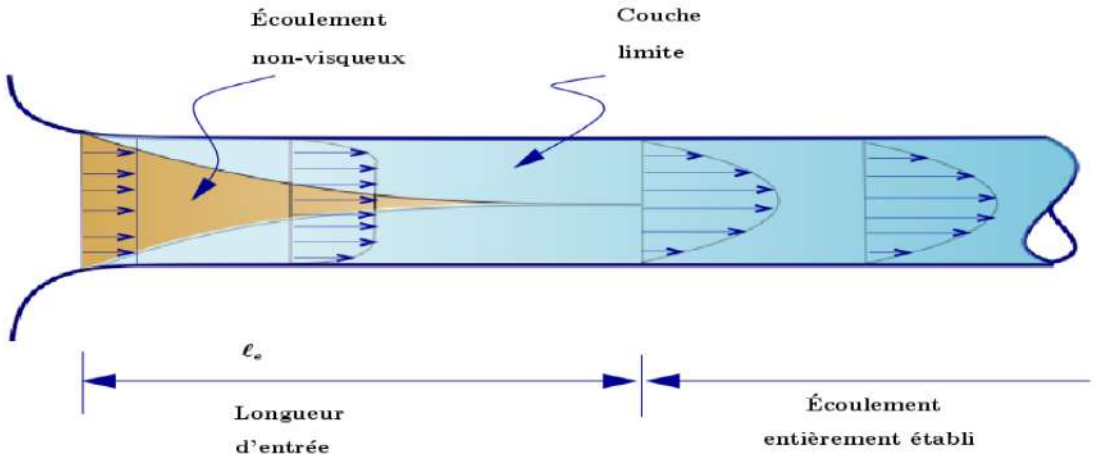


Figure II.6 : Profil de vitesse d'un fluide en écoulement dans un tube **[23]**.

❖ le phénomène de la couche limite à l'entrée et au voisinage de la paroi de la conduite par une longueur ($0< x< l_e$) Ce domaine est appelé zone d'écoulement non établit. Dans cette zone les profils de vitesse et de la température du fluide ne sont pas homogènes.

❖Dans cette zone on a une nouvelle structure d'écoulement a la distance $x = l_e$ la couche limite interfère sur elle-même Ce domaine est appelé zone d'écoulement établit.

❖Les profils de vitesse et de température dans la zone dépendent du régime d'écoulement.

II.10.2 Aspects hydrodynamique et thermique en régime laminaire :

Il existe une relation entre les équations de la convection dans une conduite (cordonné cylindrique) et entre plaque (cordonné cartésien)

Les équations pour un écoulement dans une conduite sont sous forme :

a) Equation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rV) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \mathbf{II.16}$$

b) Equations de Navier Stokes en 2D :

$$U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial r}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P^*}{\partial x}\frac{V}{r}\frac{\partial}{\partial r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.17}$$

$$\frac{\partial P^*}{\partial r}=0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.18}$$

c) Equation de l'énergie :

$$U\frac{\partial T}{\partial x}+V\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{a}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.19}$$

Dans une conduite de rayon R la résolution de ces équations nous permet d'évaluer les profils de vitesse et de température, le coefficient de frottement, la perte de charge et le nombre de Nusselt.

- **Profil de vitesse :**

Dans le cas de la région développée en régime laminaire est parabolique, l'expression de profil de vitesse radiale du fluide est comme la suite **[21-24]** :

$$U=\bar{U}\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.20}$$

Avec $\bar{U}$: Désigne la vitesse moyenne du fluide.

- **Profil de température :**

La distribution radiale de la température dans la région développée est obtenue Après intégration de l'équation de l'énergie et substitution du profil de vitesse par son expression et elle exprimée par la relation suivante **[24]** :

$$T=\bar{T}+\frac{qR}{\lambda}\left[\left(\frac{r}{R}\right)^2-\frac{1}{4}\left(\frac{r}{R}\right)^4-\frac{7}{24}\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.21}$$

Avec :

q : Désigne le flux de chaleur qui traverse la paroi du tube.

λ : Désigne la conductivité thermique du fluide.

- **Le coefficient de frottement C_f** :

Le coefficient de frottement s'exprime par :

$$C_f = \frac{16}{Re} \text{ … … … … … … … … … …..II.22}$$

- **Perte de charge dans la conduite :**

Dans une conduite de longueur L, La perte de charge s'exprime par la relation suivante **[24]**:

$$\Delta P = \frac{1}{2} k \rho \overline{U}^2 \frac{L}{2R} \text{ … … … … … … …II.23}$$

Avec :

k : le coefficient de perte de charge.

- **Le nombre de Nusselt :**

Le nombre de Nusselt est évalué selon les conditions aux limites Température imposée à la paroi (T_p connue)**[21]**

$$Nu = 3.66$$

Flux imposé à la paroi

$$Nu = 4.36$$

Dans la littérature, les auteurs proposent des corrélations similaires corrigées du nombre de Nusselt ou interviennent des rapports diamètre et longueur de la conduite $\left(\frac{d}{L}\right)^m$ et de viscosité dynamique $\left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^n$. Les exposants m et n dépendent respectivement.

II.10.3 Aspects hydrodynamique et thermique en régime turbulent :

La couche limite turbulente est composé d'une sous couche limite laminaire une couche tampon et une couche turbulente, pour simplifier le calcul de Reynolds le Transfer de chaleur est dominant dans la couche turbulent pour cela le Transfer de chaleur est négligeable dans la sous couche limite laminaire et la couche tampon **[24]**.

- **profil de vitesse :**

Dans le cas de la région développée en régime turbulent,l'expression de profil de vitesse radiale du fluide est comme la suite **[24]**:

$$U = \overline{U} \left[1 - \frac{r}{R}\right]^{\frac{1}{7}} \text{……..II.24}$$

Avec :$\overline{U}$: Désigne la vitesse moyenne du fluide.

- **Le coefficient de frottement C_f :**

Le coefficient de frottement s'exprime par **[24]**:

$$C_f = \frac{0.079}{Re^{1/4}} \text{ … … … … … … … … ….II.25}$$

- **Perte de charge dans la conduite :**

Dans une conduite de longueur L, La perte de charge s'exprime par la relation suivante **[24]** :

$$\Delta P = 4C_f \rho \overline{U}^2 \frac{L}{2R} \text{ … … … … … … … … … II. 26}$$

- **Le nombre de Nusselt :**

La relation de nombre de Nusselt la plus utilisé pour l'écoulement dans des tubes dans le cas de refroidissement est suivante **[24]** :

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^{1/3} \text{ … … … … II. 27}$$

Cette corrélation est valable dans le cas des liquides en écoulement turbulent pour Re>6000 et 0.7 < Pr < 700

Pour un écoulement turbulent, on trouve dans la littérature une variété de corrélations qui aboutissent à la même équation dans laquelle des facteurs de type $\left(\frac{d}{L}\right)^m$ et $\left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^n$ sont introduits**[21-22]**.

II.11 Travaux antérieurs :

M.IZADI et al ont étudié numériquement la convection forcée en régime laminaire en introduisant un nanofluide constitué d'Al_2O_3et d'eau. A travers un anneau. L'approche monophasée est utilisée pour la modélisation du nanofluide. Ils ont étudié l'évolution axiale de frottement au niveau de la région des parois interne et externe. Les résultats obtenus montrent que le profile de vitesse axiale ne change pas de matière significative avec la fraction volumique des nanoparticules, mais les profils de température sont affectés par la concentration des nanoparticules. D'autre part, le coefficient de Transfer augmente avec la concentration des nanoparticules.

A.M.HUSSEIN et al ont étudié expérimentalement et numériquement la convection forcée d'un nanofluide (SiO_2-eau) en régime laminaire dans un radiateur de voiture quatre

concentrations différentes de nanofluide dans la gamme de 1% à 2.5% en volume ont été utilisées. Le nombre de Reynolds est de l'ordre de 500 à 1750.les résultats montrent que le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation du débit et de la concentration en volume. Le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du début, de la concentration en volume de nanofluide et de la température d'entrée. L'application de SiO_2 avec de faible concentration peut accroitre le taux de transfert de chaleur jusqu'à 50% en comparaison avec celui de l'eau pure.

Y.T. Yang et F.H. Lai : ont étudié la convection forcée d'un nanofluide ($Al_2\,O_3$ -eau) dans un système de refroidissement à écoulement radial et ils ont réalisé une modélisation mathématique afin de simuler le flux de chaleur. Les simulations numériques sont effectuées sur la base de travaux expérimentaux dans les conditions : concentration en volume de47nm – Al_2O_3 nanoparticule le flux de chaleur q=2438 et 3900w/ et le nombre de Reynolds Re=300-900.les résultats obtenus, pour les performances globales de transfert de chaleur de nanofluide, indiquent que le coefficient de transfert de chaleur augment avec l'augmentation du nombre de Reynolds et de fraction volumique des nanoparticules **[14]**.

Mursed et al :ont étudié en convection forcé l'écoulement d'un nano-fluide dans une conduite cylindrique. Ce dernier contenant des nanoparticules de TiO2 de forme nanotube de diamètre 10nm et 40nm de longueur, et sphérique de 15nm de diamètre ou l'eau déminéralisée comme fluide de base. Ils ont montré que la conductivité thermique Augmente avec l'augmentation de la concentration volumiqueφ, et ils ont trouvé également que pour une concentration volumiqueφ=5%,l'amélioration de la conductivité thermique effective est environ 33% pour les nanotubes et de 30% pour les nanoparticules sphériques. Ils ont alors constaté que la dimension et la forme de la particule ont une influence importante sur la conductivité thermique des nanofluides **[5]**.

Herisetcoll:ont examiné des nanoparticules d'oxyde de cuivre (Cu) et de trioxyde d'aluminium (Al2O3), dispersés à différentes concentrations dans l'eau .L'ensemble constituant un nanofluide est testé en écoulement convectif laminaire dans un tube circulaire horizontal maintenu à température constante, Les résultats expérimentaux ont montré que l'augmentation du coefficient de transfert convectif est plus important pour le mélange (eau/ Al2O3) que celui du mélange (eau/ Cu) et ceci est plus significatif pour les grandes concentrations volumiques en nanoparticules, et pour un optimum compris entre 2.5 et 3%.[25].

III.1 Introduction :

Nous allons présenter dans ce chapitre les étapes d'utilisation de code de calcule COMSOL pour la simulation d'un écoulement d'un nanofluide dans une conduite.Et étudié la variation de nombre de Nusselt on fonction de Reynoldset la variation de perte de charge en fonction de Nombre de Reynoldspour différentes concentrations en nanoparticulesen les deux régimes (laminaire et turbulent).

III.2 Corrélations des Propriétés du nanofluide :

D'après le premier chapitre on a plusieurs corrélations des propriétés de fluide pour cela la détermination des propriétés en fonction de la fraction des nanoparticules. Les corrélations fixées sont :

Masse volumique : $\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p$ **I.3**

Conductivité thermique : $\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = 1 + \frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_f}+(n-1)-(n-1)(1-\frac{\lambda_p}{\lambda_f})\varphi}{\frac{\lambda_p}{\lambda_f}+(n-1)+(1-\frac{\lambda_p}{\lambda_f})\varphi}$ **I.8**

Viscosité : $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}$=1+2.5 φ **I.12**

III.3 Le code de calcule COMSOL Multiphysiques :

Le code de calcule COMSOL Multiphysiques est un logiciel de simulation numérique Par éléments finis permettant de résoudre tout type de problème pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles. Dans ces logiciels les équations différentielles sont exprimées dans des petits volumes permettant leur expression sous forme de différences simples et transformant le problème continu en un problème comportant un nombre fini d'équations et d'inconnues pouvant se résoudre avec des techniques d'algèbre linéaire. On comprend intuitivement que plus le volume de discrétisation sera petit plus le modèle discret approchera le modèle continu.

Le logiciel COSOML et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de Germund Dahlquist dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique au institut Royal de technologie (KTH) à stockholm en suède.la première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998.

III.4 Les étapes démarchent de COMSOL :

Cette partie présentée toutes les étapes nécessaire pour l'étude d'un écoulement dans un conduit compose des nanoparticules dispersé (Al_2O_3, CuO) dans l'eau (H_2O).

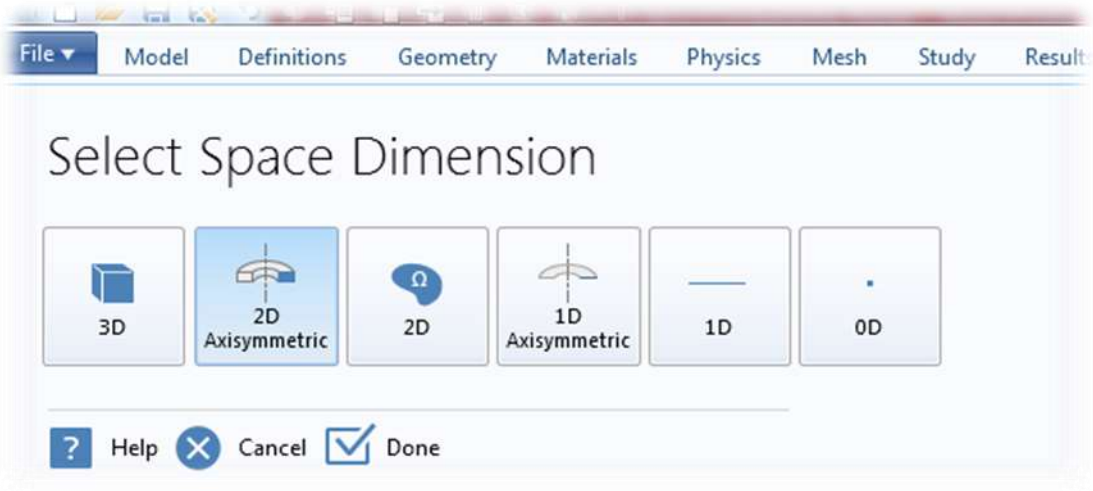
Etape 1 :

Cliqué sur l'icône COMSOL sur le bureau Pour ouvrir le logiciel COMSOL, après lancement de logiciel le menu suivant apparait on sélectionne Nouveau dans le Fichier de menu, puis cliquez sur Model Wizard .



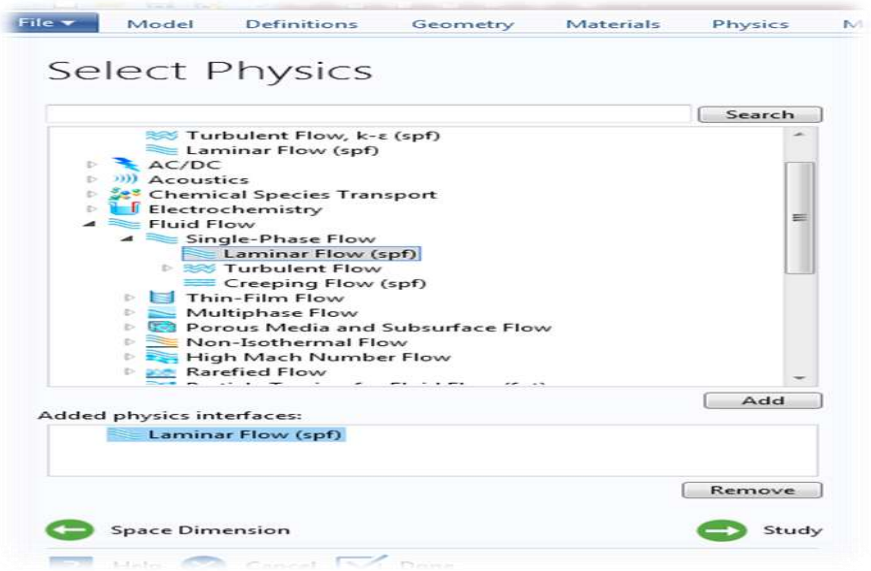
Etape 2 :

Après l'étape 1 un menu s'affiche et on clique sur l'icône 2D Axisymmetric Comme la montre la figure ci-dessous :



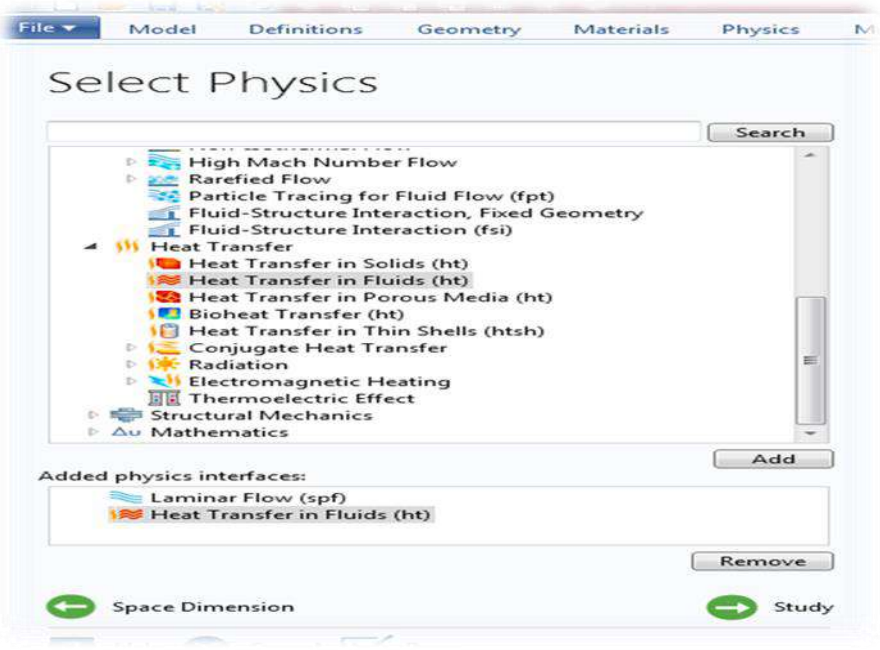
Etape 3 :

Après cliqué sur l'icône 2D Axisymmetric le menu suivant apparait, on ajoute une ou plusieurs interfaces physiques.on clique sur fluide flow ⟶ single phase ⟶ laminar Flow ⟶ Heat transfert Heat transfert in fluid.



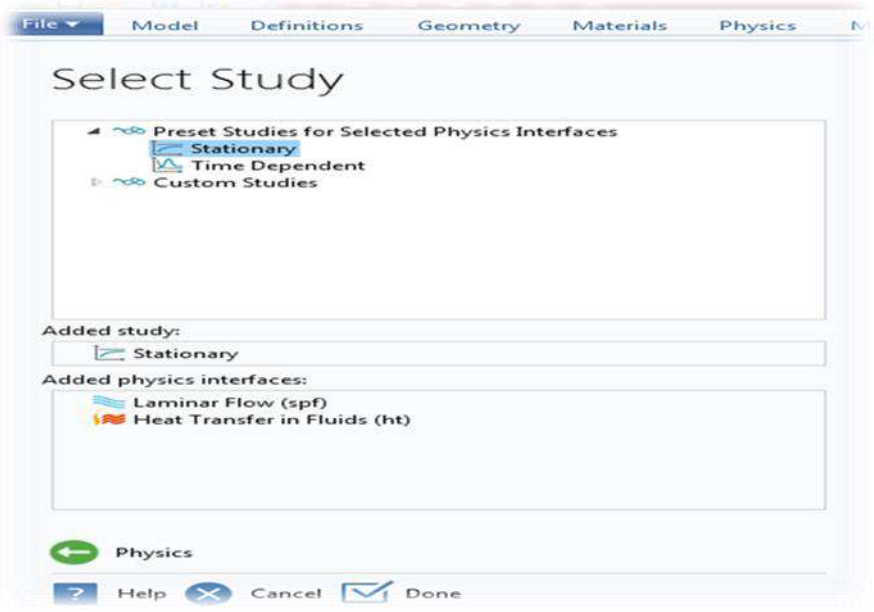
La même chose pour l'écoulement turbulent (turbulent flow).

Maintenant pour le Transfer de chaleur : heattransfer⟶ heattransfer in fluids ⟶ Add.



Etape 4 :

Sélectionnez le type d'étude qui représente le solveur ou ensemble de solveurs qui sera utilisé pour le calcul. Le type d'étude dans notre projet est stationnaire donc on clique sur stationnary après on clique sur Done comme l'indique la figure suivante :

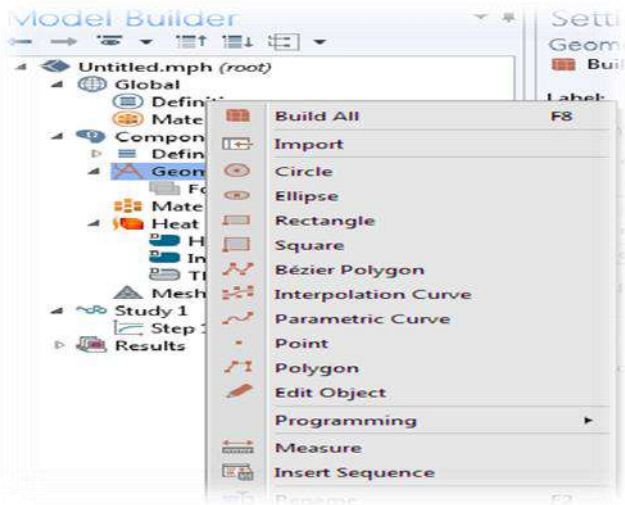


Etape 5 :

Dans l'étape 5 en fait le choix de la géométrie, les matériaux utilisés dans cette étude et la déclaration des conditions aux limites après en fait le maillage et à la fin les résultats obtenus.

A) Géométrie :

Pour choisir la géométrie on clique droite sur géométrie, plusieurs choix sont apparait Dans notre travaille on a choisie rectangle comme géométrie et en fait la déclaration de la taille de notre géométrie.



Dans notre travail on a choisi un Conduite circulaire en acier de 1m de longueur et 0.1m de diamètre.

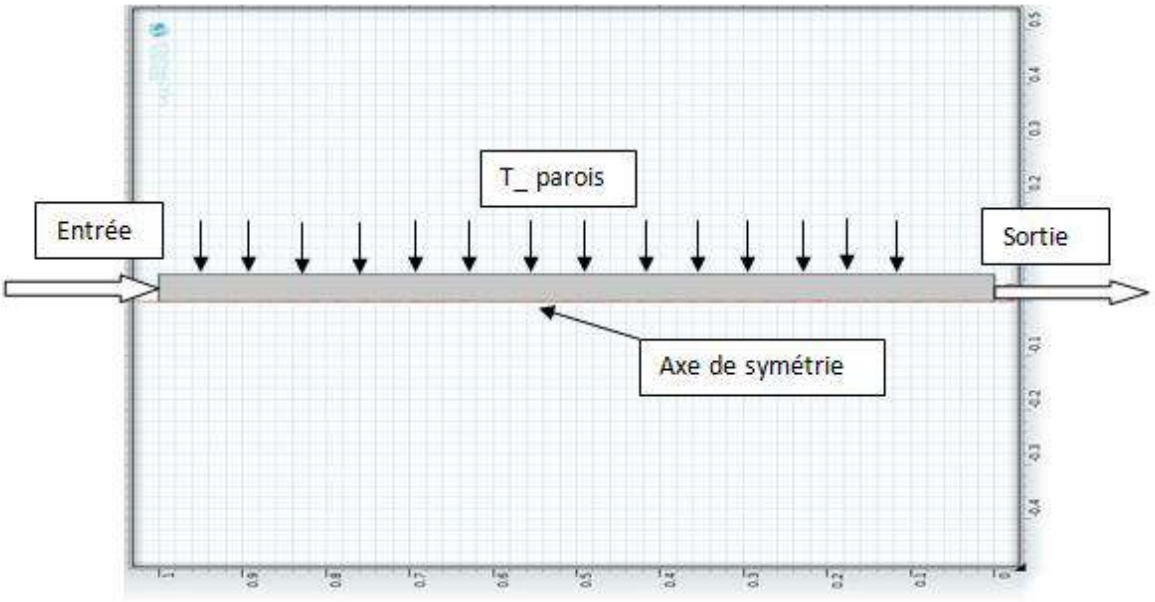
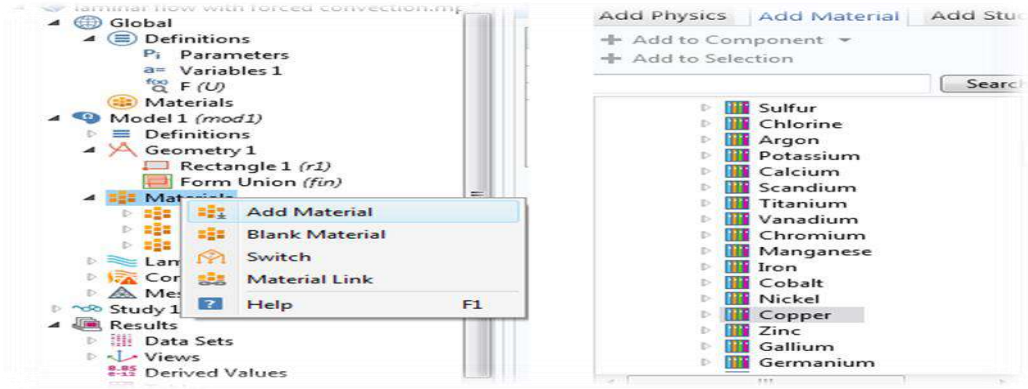


Figure III.1 : Geomitré de conduite surculaire.

B) **Matériel** Dans cette étape en fait la déclaration des matériaux nécessaires pour notre étude on a choisie l'eau comme fluide et acier et pour le nanofluide choisi c'est l'eau-Al_2O_3 en fait le choix d'après la liste des matériaux existant sur COMSOLen clique par la droite sur matériels après « add Material » et fait le choix d'après la liste comme le montre la figure.



La même chose pour le nanofluide (eau-CuO).

C) Conditions aux limites :

Dans cette étape en fait la déclaration des conditions aux limites dans notre étude les conditions aux limites est les suivantes :

Propriété de fluide :

- La vitesse d'entré V=Ux= imposé, y=V=0 m/s.
- Symétrie $\partial u/\partial y$=0, V=0 m/s.
- Pression de sortie $\partial u/\partial x$= 0, V=0 m/s.

Transfert de chaleur :

- Entrée : T =$Tint$=35℃= 308.15K.
- Parois : T = Tp=60℃= 333.15K.
- Symétrie : $\partial\theta/\partial y$=0 avec θ= ($T-T\infty$)/ ($Tp-T\infty$).

D) Maillage :

Dans notre étude nous avons choisi un maillage triangulaire fin (nombre des éléments 53074) comme le montre la figure suivant :

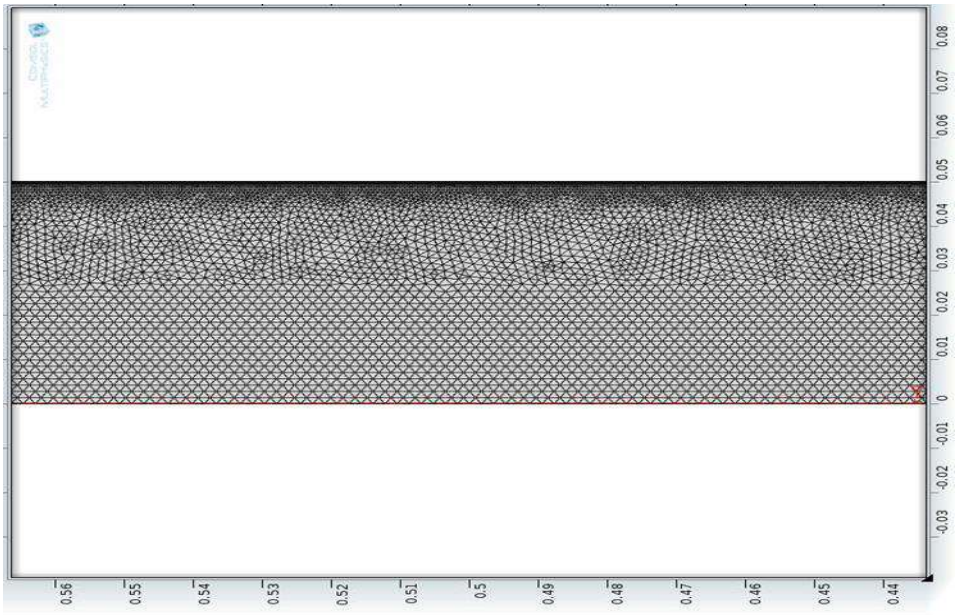


Figure III.2 : Maillage triangulaire fin.

E) Study : A la fin on clique sur « study » pour obtenir les résultats d'étude.

III.5 Résultats et interprétations :

III.5.1 Écoulement laminaire :

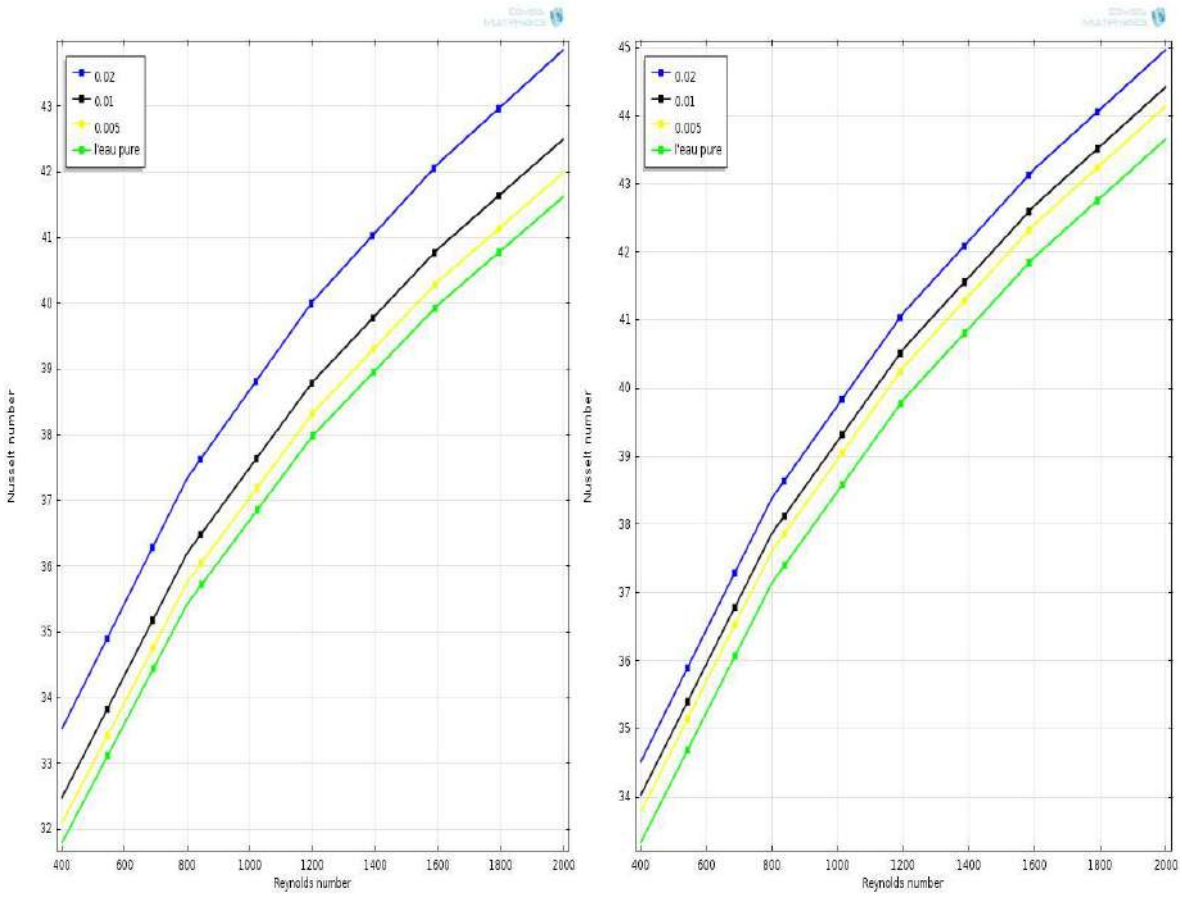
a) Nombre de Nu :

La figure III.3 illustre la variation du nombre de Nusselt en fonction Reynolds en régime laminaire et pour déférentes concentrations en nanoparticules dans le nanofluide. Deux nanofluides à base d'eau sont testés avec des fractions volumiques du CuO et Al_2O_3 (de 0 à 0.02). L'analyse de cette figure montre que le nombre de Nusselt est plus en plus augmente avec le nombre de Reynolds, l'augmentation de la vitesse d'écoulement favorise L'échange thermique particule-particule, particule-fluide et par conséquent nanofluide-parois, ce qui s'améliore le taux d'échange thermique

D'autre part, l'ajout des nanoparticules entraine l'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide d'où l'augmentation du transfert thermique entre paroi et nanofluide.

Cette addition sera défavorable lorsqu'on arrive à certain seuil. En effet, l'augmentation de la concentration cause l'agglomération des particules à l'intérieur du tube ce qui entraine

une diminution a la conductivité thermique. Comme les nanoparticules de CuO induisent un Phénomène d'agglomération plus importante que l'Al_2O_3, le taux d'augmentation de la conductivité thermique est plus élevé, mais a certain seuil fixée de sa concentration dans le fluide de base.



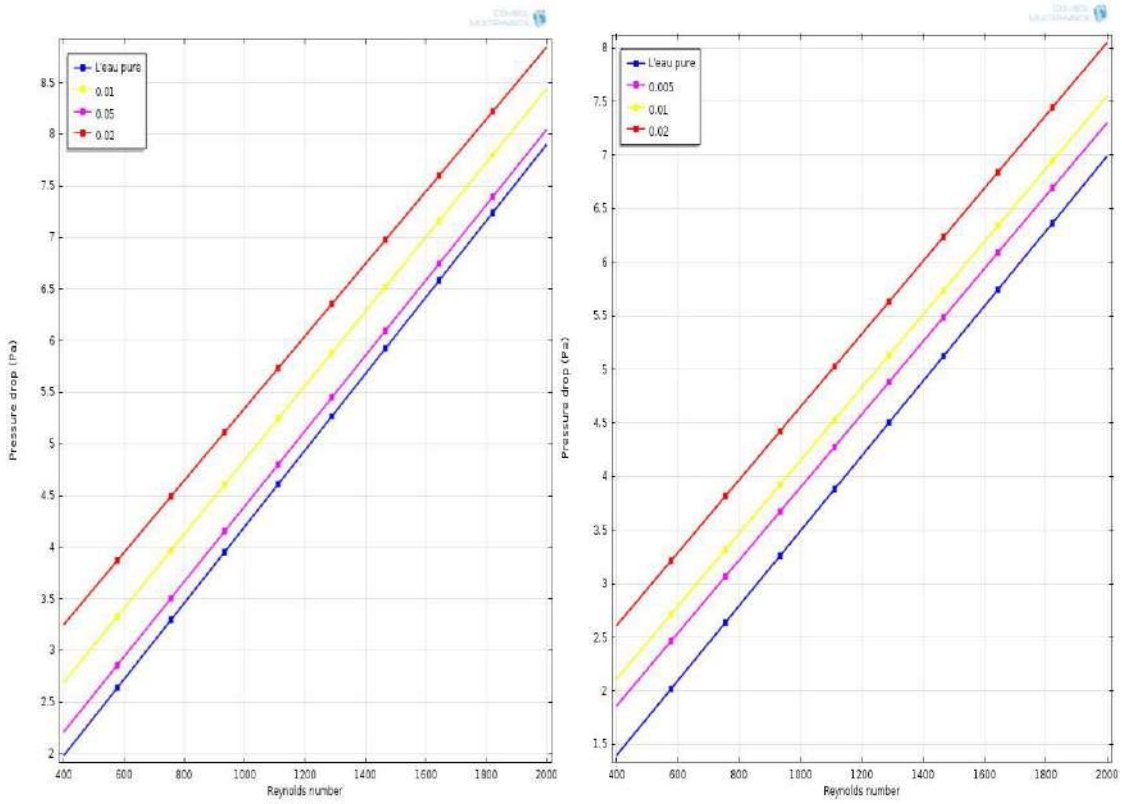
a) Eau $-Al_2O_3$b) Eau-CuO

Figure III.3 : variation de nombre de Nusselt en fonction de Nombre de Reynolds pour différentes concentrations en nanoparticules pour un écoulement laminaire.

b) Perte de charge :

La perte de charge est un paramètre très important qu'il faut le contrôler surtout pour l'écoulement interneou sa valeur fixera la nature des pompes utilisée et ses caractéristiques. La figure III.4 représente la variation de chute pression des nanofluides à base d'eau en

fonction du nombre de Reynolds pour déférentes valeurs de fractions d'Al_2O_3 et du CuO respectivement. Pour les deux nanofluides étudies, On remarque que la perte de charge est proportionnelle au nombre de Reynolds pour un écoulement laminaire. Plus la fraction volumique est importante plus la perte de charge devient grande. En effet, et avec une vitesse d'écoulement relativement faible, les nanoparticules se regroupent ce qui augmente la viscosité des nanofluide dans les conduite ce qui sertà l'augmentation de la valeur de la perte de charge. Cette augmentation peut être considérée comme négligeable si on compare l'écart de la perte de charge de nanofluide par rapport au fluide de base.



a) eau-Al_2O_3 b) eau-CuO

Figure III.4 : variation de perte de charge en fonction de Nombre de Reynolds pour différentes concentrations en nanoparticules pour un écoulement laminaire.

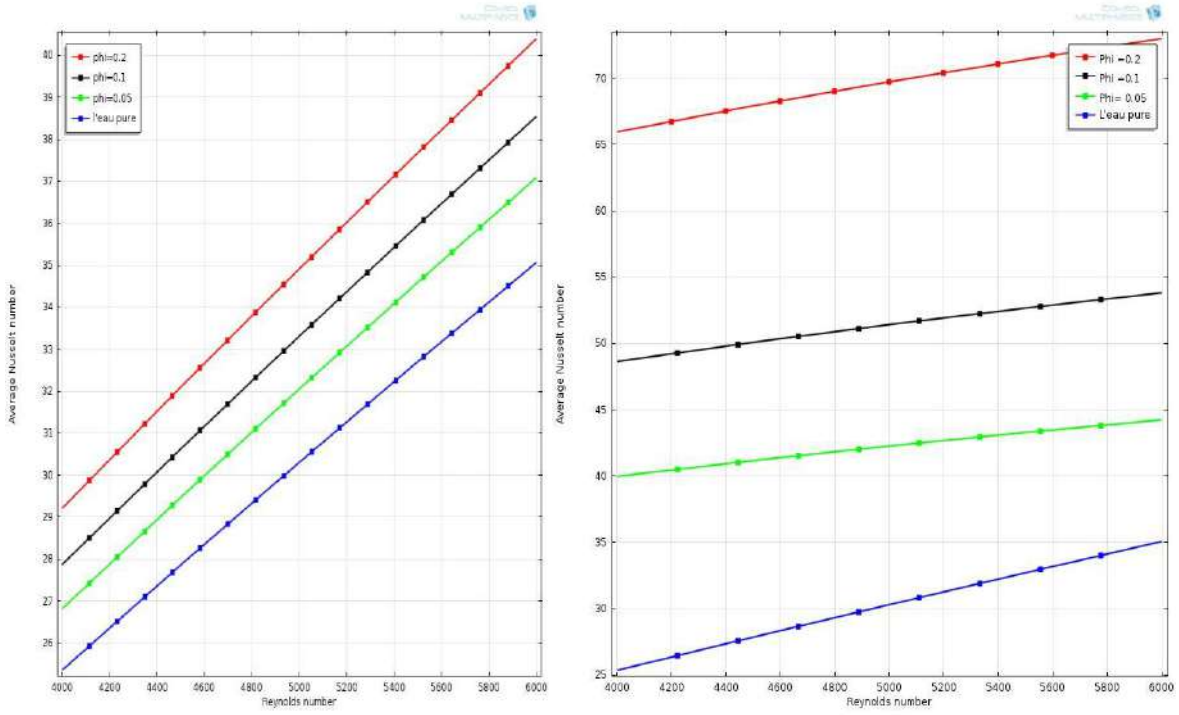
III.5.2Écoulement turbulent :

a) Nombre de Nusselt :

La Figure III.5 présente la variation du nombre de Nusselt en fonction Reynolds pour les deux nanofluides indiqués précédemment et cela pour plusieurs concentrations en nanoparticules (de CuO ou d'Al_2O_3, des fractions volumiques varient de 0 à 0.2). Pour les

deux nanofluides, le nombre de Nusselt est proportionnel au nombre de Reynolds et ce pour toutes valeurs de la fraction volumique testée. L'ajout des nanoparticules dans une solution dite de base favorise leur conductivité thermique ce qui traduit directement sur l'échange thermique fluide-parois, c'est à dire le taux de transfert par convection.

Comparant entre les deux nanofluides et si on parle à l'influence des concentrations en nanoparticules sur l'amélioration du nombre de Nusselt, le nanofluide eau-CuO et beaucoup plus rapide à augmenter et avec un taux plus grand que celle du nanofluide contenant l'Al_2O_3. Cela est traduit à la grande conductivité thermique du CuO par rapport à Al_2O_3.



a) eau-AL_2O_3 b) eau –CuO

Figure III.5 : variation de nombre de Nusselt en fonction de Nombre de Reynolds pour différentes concentrations en nanoparticules pour un écoulement turbulent.

b) coefficient de transfert par convection :

La figure III.6 représente l'évolution du coefficient de transfert thermique par convection de deux nanofluides en fonction de différentes concentrations en nanoparticules. Comparant le taux de transfert thermique convectif entre les deux nanofluides en fonction des

concentrations des nanoparticules (fractions volumiques) dans le fluide de base (l'eau), le coefficient de transfert thermique du nanofluide à CuO s'améliore rapidement et de taux d'augmentation plus grand par rapport au l'eau-Al_2O_3

Cela est expliqué par la conductivité thermique élevée de l'oxyde de cuivre par rapport l'oxyde d'aluminium. Ce qui justifie les résultats obtenus sur le nombre de Nusselt

(Figure III.5).

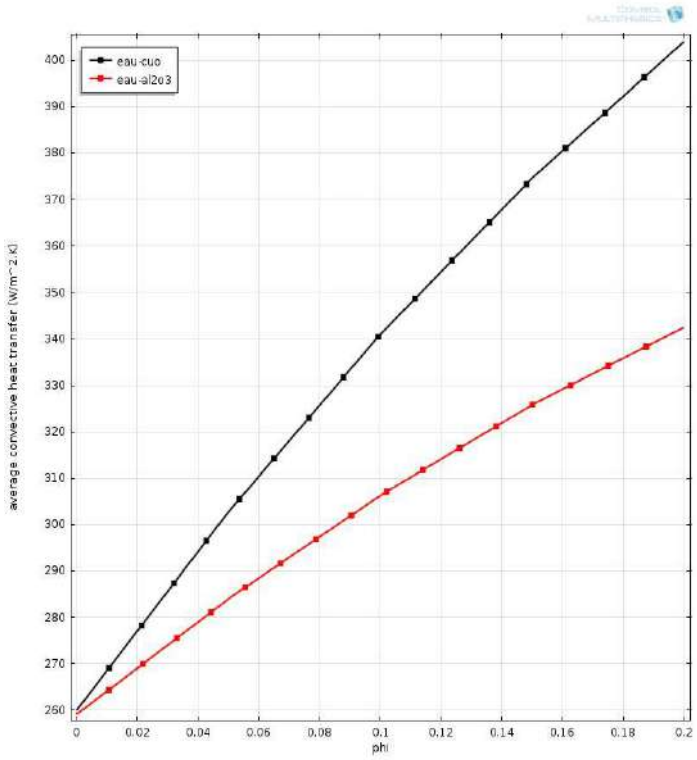


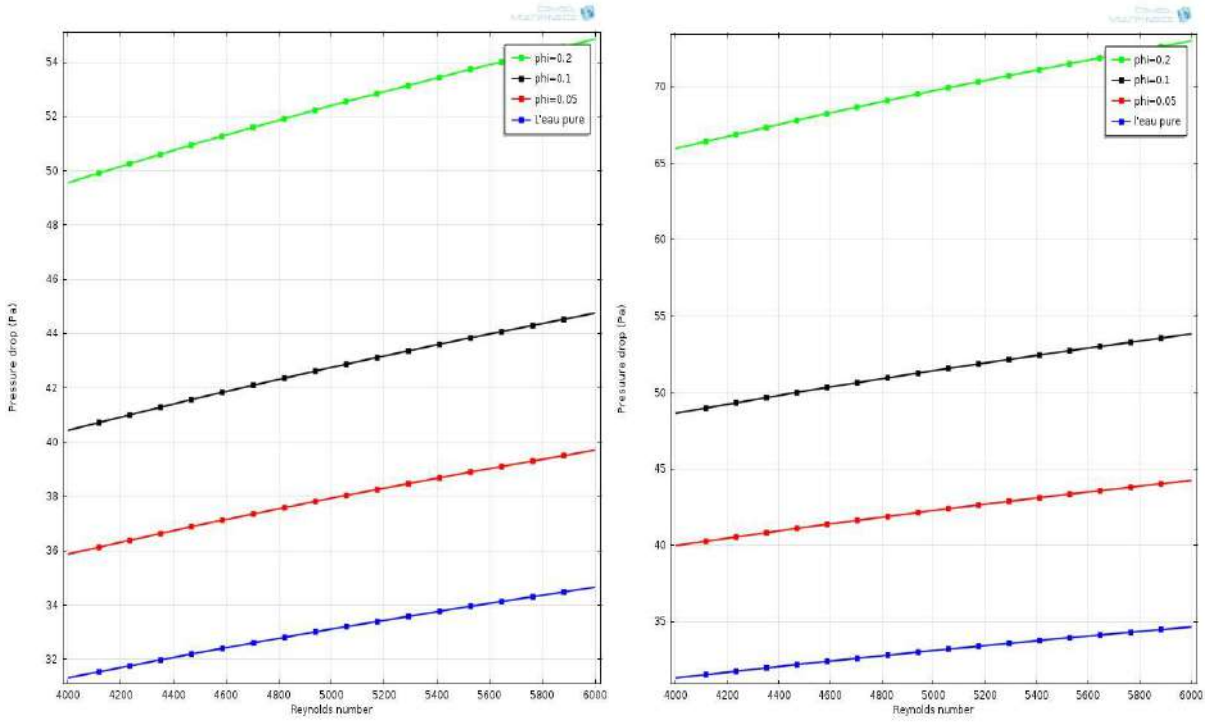
Figure III.6: Comparaison du coefficient de transfert thermique de l'aluminium et de l'oxyde de cuivre Nanofluide par rapport aux différentes concentrations massiques en nanoparticule (Re=4000).

c) Perte de charge :

Comme on a fait dans la partie précédente (écoulement laminaire), on veut visualiser l'influence du type de nanoparticule et sa concentration dans le fluide de base sur la perte de charge mais pour un régime d'écoulement turbulent.

La figure III.7 illustre la variation de chute de pression du nanofluide en fonction du nombre de Reynolds pour une variété de valeur de fractions volumiques de nanoparticules dans le fluide de base. Les résultats obtenus pour les deux nanofluides indiquent que la perte de charge s'augmente proportionnellement avec l'augmentation du nombre de Reynolds et la

fraction volumique des nanoparticules. En effet l'ajout des nanoparticules entraine l'augmentation de la viscosité du nanofluide qui se traduit par la chute de pression le long du tube. Cette évolution présente un inconvénient dans le système de pompage car pour compenser les pertes de charges il faut augmenter la puissance de la pompe. Cet inconvient qui se marqué en ajoutant des nanoparticules au fluide de base, peut-être l'ignorer devant l'amélioration enregistrée sur le transfert thermique avec ses différents type (convection, conduction).



a) Eau-AL_2O_3 b) Eau-CuO

Figure III.7 : variation de perte de charge en fonction de Nombre de Reynolds pour différentes concentrations en nanoparticules pour un écoulement turbulent.

Conclusion générale :

Dans ce mémoire nous avons étudié le transfert thermique convectif de deux nanofluides CuO-eau etAl_2O_3-eau qui s'écoulant le longd'un tube circulaire pour un régime d'écoulement laminaire puis pour un régime turbulent. L'étude est réalisée en étudiant l'influence de régime d'écoulement, l'ajout des nanoparticules et ces natures sur le transfert thermique global et sur les paramètres hydrodynamiques du nanofluide en écoulement. L'étude se fait en réalisant une simulation numérique par le code de calcul numérique COMSOL Multiphysics qui nous a permit de combiner les deux phénomènes, transfert de chaleur et écoulement.

Les résultats obtenus indiquent que quelque soit le régime d'écoulement établé, et pour les deux types des nanoparticules utilisées, le nombre de Nusselt et la perte de charge augmentent avec le nombre de Reynolds. Les deux nanofluides d'oxyde de cuivre et d'oxyde d'aluminium ont montré des performances thermiques supérieures au fluide de base. Le nombre de Reynolds a conduit à une augmentation du coefficient de transfert thermique et de la perte de charge.

Cependant, l'ajout des nanoparticules a un seuil fixé qu'il doit de ne pas le dépasser. En effet, l'agglomération des nanoparticules dans le système peut diminuer le transfert thermique, augmente la viscosité du nanofluide et par conséquent augmente la perte de charge. Ce problème est paru surtout pour un régime laminaire ou la vitesse d'écoulement est relativement faible.

Pour un régime laminaire et en fonction de la fraction volumique et le nombre de Reynolds, les taux d'augmentation du transfert thermique des deux nanofluides restent plus proches. A un nombre de Reynolds Re=1200, et avec une fraction volumique $\varphi = 0.02$ pour les deux nanofluides, Le coefficient de transfert thermique maximal pour l'oxyde de cuivre a été enregistré indique une augmentation de 25% du coefficient de transfert thermique. Cette valeur était de 22.58% pour l'alumine. Avec même fraction et a un nombre de Reynolds Re=1600, le taux d'amélioration de Nombre de Nusselt a été 31.25% pour l'eau-CuO .cette valeur était 29.03% pour eau-Al_2O_3.Pour la perte de charge en fonction de la fraction volumique et du nombre de Reynolds, le l'écart d'augmentation en fonction de ces paramètres ne dépasse pas 0.5Pa pour les deux nanofluides.

Conclusion Générale

Pour un régime turbluent, aun nombre de Reynolds Re=4800, et avec une fraction volumique $\varphi = 0.02$ pour les deux nanofluides, Le coefficient de transfert thermique maximal pour l'oxyde de cuivre a été enregistré indique une augmentation de 133.3% du coefficient de transfert thermique. Cette valeur énorme de taux de transfert du CuO-eau va tendre a diminué avec une fraction volumique supérieur a φ =0.02 a cause au phénomène de regroupement et formation des agrégats. Aussi, on a marqué une augmentation considérable de perte de charge en fonction des deux paramètres indiqués précédemment ce qui nous exige de limite un seuil maximum de fraction volumique pendant l'ajout des nanoparticules.

[1]:https://www.technique-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/nanotechnologies-pour-l-energie-l-environnement-et-la-sante-42514210/nanofluides-pour-les-application-thermique-nm5115/introduction-sur-les-nanofluides-nm5115niv100001.html

[2] : Bachir.G, «Contribution à l'étude de la convection naturelle dans lesnanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard», thèse : En vue de l'obtention du doctorat de l'université de toulouse (2010).

[3] : www.novethic.fr/lexique/detail/nanoparticules.html

[4] : KHENTOUL.M , «Étude Numérique de la Convection Mixte dans un Canal Horizontal Contenant des Ailettes» , université des frères mentouri – constantine (2016).

[5] : HAMRAOUI.N, «Etude numérique du transfert de chaleur dans les na-nofluides en configuration de Rayleigh-Bénard» , faculte des sciences de tunis (2013).

[6]: SALMI.D, CHEIKH .F , «Etude thermique de l'utilisation des nanofluides dans les bassins solaires» , universite medea (2015-2016).

[7] : SALHI.H , « etude numerique de la convection naturelle dans les enceintes : nanofluide» , universite de batna. (2009).

[8] : LEBBIHIl.S, «refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur loclisee au fond d'une enceinte remplie de nanofluide» , universite mohamed khider biskra (2014).

[9]:https://googleweblight.com/?u=https://fr.m.wikipidia.org/wiki/conductivit%25C3%25A9 thermiqe&hl=fr-DZ

[10] : ABDELLAH.H , «Effets de taille et de concentration sur les propriétés thermiques et rhéologiques des nanofluides» , ecole doctorale sciences et technologie (2013).

[11] : LAMRI ZEGGAR.A, «Contribution à l'Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nanofluide. Application aux Modèles Monophasique et Diphasique», universite de freres mentouri (2014).

[12] : S. LAHLOU, M. ZAYDANet R.SEHAQUI , «Détermination des propriétésthermophysiques et la comparaison entre les résultats expérimentaux et les modèles théoriques pour différents nanofluides» , universite hassan ii de casablanca (2017).

[13] : soufi el habib, «Application des nanofluides pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple», universite kasdi merbah d'ouargla (2013).

[14] : KEDJAR., ZITOUNE.M , « étude numérique de la convection forcée dans un canal en utilisant un nanofluide» , univ abderrahmane mira-bejaia (2014).

[15] : REMEL.M, « la convecection forcée avec les nanofluides en régime turbulent dans un tube circulaire» , universite de médéa (2017).

[16] :http://googleweblight.com/i?u=http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiep/content/g21/i-²&phenomene-convection&hl=fr-Dz

[17] : BOUMAZA.M , «convection à l'étude de la convection forcée à l'entrée des canalisations. Aspects thermiques conjugues et transitoires» , universite medea (2013-2014).

[18] :KHAFRABBI.I , « Modélisation et simulation de la convection thermo-capillaire dans des cavités» , universite badji mokhtar annaba (2016-2017).

[19] :BOUGUERRA .N , « Intensification des échanges thermiques convectifs par micro-structuration de l'interface» , ecole centrale de lyon.universite claude bernard – lyon 1 (2009).

[20] : SOUIADI.L,«la convection mixte dans un canal horizontal muni de blocs chauffes» , universite kassdi merbah - ouargla (2012- 2013).

[21] : HolMAN.J.P, « Heat transfer», ninth edition,McGraw-hill (2002).

[22] : Sarit K. Das, Stephen U.S.Choi, Wenhua Yu, T. Pradeep, «SCIENCE AND TCHECHNOLOGY», United States of America :wiley-interscienc (2008).

[23] : ADIL .R , «Transfer de chaleur et de Masse» , Université de Caen (2008-2009).

[24] :JOHN.H, lienhard IV, john H .lienhard V,a «heat transfer» textbook,third edition,ohlogiston press cambridge Massachusetts (2003).

[25] :.Si-AMEUR.M, Hicham.S, « convection naturelle dans une enceinte remplie de nanofluide : etude numerique», Département de Génie Mécanique, universite de batna (2014).

[26] : MELOUKA.M , Simulation de l'effet d'insertion de turbulateurs au sein d'un écoulement de fluide dans une conduite, du point vu transfert de chaleur et perte de charge , universite kasdi merbah – ouargla (2013-2014).

[27] : https://fr.wikipidia.org/wiki/COMSOL-Multiphysics