RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DR YAHIA FARES – MÉDÉA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE LA MATIÈRE

MÉMOIRE MASTER

FILIÈRE : GÉNIE CLIMATIQUE

OPTION : ÉNERGIE ET FROID INDUSTRIEL

THÈME

ÉTUDE DE LA CONVECTION FORCÉE D'UN NANOFLUIDE EN ÉCOULEMENT DANS UNE CONDUITE CIRCULAIRE

Réalisé par :

-OULD-KHAOUA MAHMOUD

-MAKHLOUFI FETHI

dirigé par :

DR:ANNOUN MOHAMED

ANNÉE : JUIN 2016

Dédicace

JE DEDIE CE TRAVAIL

A CELUI QUI M'A INDIQUE LA BONNE VOIE EN ME RAPPELANT QUE LA VOLONTE FAIT TOUJOURS LES GRANDS HOMMES...

À mon Père.



A CELLE QUI A ATTENDU AVEC PATIENCE LES FRUITS DE SA BONNE EDUCATION...

À ma Mère.

A TOUT MA FAMILLE, TOUS MES PROCHE ET MES AMIS…

OULDKHAOUA.Mahmoud

Dédicace

JE DEDIE CE TRAVAIL

À mon père et ma mère…

À mon frère et mes sœurs…

À tous mes proches et mes amis…



Merci à tous…

MAKHLOUFI.Fethi

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail

Nous remercions en premier Lieu, notre dieu le tout puissant de nous avoir illuminé et ouvertes les portes des savoirs et de nous avoirs donner le courage et la volonté pour bien mener ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos vifs remerciements à notre

*Promoteur : **Dr- ANNOUN Mohamed** pour son aide sa patience ainsi que sa gentillesse aussi Nous remercions **Mlle- KRIBY** pour son aide notre remerciement a tous nos enseignants de l'université qui ont contribué à notre formation durant les cinq années et sans oublier bien sûr les membres du jury qui ont examiné ce travail*

En fin nous remercions tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Merci à tous

Sommaire

Nomenclature i
Liste des Tableaux iii
Liste des figures iv
Résumé v
Introduction générale 1
Chapitre I Généralités sur les nanofluides 3
I.1 Introduction 3
I.2 nanofluides 3
I.2.1 Définition 3
I.3 Types de nanoparticules et les fluides porteurs 4
I.4 Caractéristiques des nanoparticules 5
I.5 Les avantage de nanofluides 5
I.6 Les inconvénients du nanofluides 6
I.7 Propriétés thermophysiques des nanofluides 6
I.7.1 La Masse volumique 6
I.7.2 La fraction volumique 6
I.7.3 La Chaleur spécifique 7
A. Model de Xuan et Roetzel 7
B. Model Pak et Cho 8
I.7.4 Coefficient d'expansion thermique 8
I.7.5 La viscosité dynamique 10
A. Modèle d'Einstein(1906) 10
C. Modèle de Batchelor 10
I.7.6 Conductivité thermique 11
A. Modèle de Maxwell (1873) 11
B. Modèle de Hamilton et Crosser (1962) 11
C. Modèle de Yu et Choi 12
I.8 Les domaines applications de nanofluides 12
I.8.1 Refroidissement des systèmes thermiques 13
I.8.2 Refroidissement des systèmes électroniques 13

Sommaire

I.8.3 Refroidissement des systèmes militaire 13
I.8.4 Refroidissement des systèmes spatiaux 13
I.8.5 Refroidissement des systèmes nucléaires 13
I.8.6 La biomédecine 14
Chapitre II Transfert de chaleur par convection forcée dans les nanofluides 15
II.1 Introduction 15
II.2 Transfert de chaleur par convection 15
II.3 Coefficient de transfert thermique par convection (h) 16
II.4 Régimes d'écoulement 16
II.5 Mise en évidence des écoulements laminaire et turbulent 17
II.6 Caractéristique de régime laminaire et turbulent 18
II.6.1 Régime laminaire 18
II.6.2 Régime turbulent 18
II.7 Equations de la convection forcée 19
II.7.1 Equation de la convection en régime d'écoulement laminaire 19
A) Equation de continuité 19
B) Equations de Navier Stokes en 2D 19
C) Equation de l'énergie 19
II.7.2 Equation de la convection en régime d'écoulement turbulent 19
A) Equation de continuité 19
B) Equations de Navier Stokes en 2D 20
C) Equation de l'énergie 20
II.8 Corrélations empiriques de transfert thermique en convection forcée 20
A) Régime Laminaire 21
B) Régime Turbulent 21
II.9 Convection dans les nanofluides 22
II.10 Convection forcée dans des conduites 23
II.10.1 Spécificité des écoulements Internes 23
II.10.2 Aspects hydrodynamique et thermique en régime laminaire 24
A) Equation de continuité 24
B) Equations de Navier Stokes en 2D 24

Sommaire

C) Equation de l'énergie 24
II.10.3 Aspects hydrodynamique et thermique en régime turbulent 26
II.11 Travaux antérieurs 27
Chapitre III Simulation par COMSOL 30
III.1 Introduction 30
III.2 Propriétés du nanofluide 30
III.3 Code de calcul COMSOL 30
III.4 Ecoulement dans la conduite 31
III.5 Résultats et interprétations 38
III.5.1 Profil de vitesse 38
III.5.2 Profil de température 40
III.5.3 Perte de charge 41
III.5.4 Nombre de Nu 42
Conclusion générale 44
Bibliographie 45

Nomenclature

Symboles latins :

A, a et b : sont des constantes dépendant du régime d'écoulement et de la géométrie de l'obstacle.

C_p **:** La chaleur spécifique$(J.Kg^{-1}.K^{-1})$.

$(C_p)_{nf}$ **:** Chaleurs spécifique du nanofluide $(J.Kg^{-1}.K^{-1})$.

$(C_p)_f$ **:** Chaleurs spécifique du fluide de base$(J.Kg^{-1}.K^{-1})$.

$(C_p)_p$ **:** Chaleurs spécifique des nanoparticules$(J.Kg^{-1}.K^{-1})$.

C_f **:** Le coefficient de frottement

D **:** Diamètre de conduite.

h **:** Coefficient de transfert thermique par convection.

k **:** Conductivité thermique$(W.m^{-1}.K^{-1})$.

k_{nf} **:** La conductivité thermique du nanofluide$(W.m^{-1}.K^{-1})$.

k_f **:** La conductivité thermique du fluide de base$(W.m^{-1}.K^{-1})$.

k_p **:** La conductivité thermique de la particule solide$(W.m^{-1}.K^{-1})$.

L **:** La longueur caractéristique (m).

Nu_L **:** Le nombre adimensionnel de Nusselt global

n **:** Facteur de forme empirique.

Pr **:** Nombre de prandlt.

q **:** Le flux de chaleur qui traverse la paroi du tube.

Re **:** Nombre de Reynolds.

Re_c **:** Nombre de Reynolds critique

S **:** La surface d'échange (m^2).

T_p **:** Les températures de la paroi (k).

Nomenclature

T_∞ **:** La température du fluide loin de la paroi (k).

U **:** La vitesse moyenne (m/s).

$\overline{U}$ **:** La vitesse moyenne du fluide.

$\overline{u}$**,** $\overline{v}$ **et** $\overline{T}$**:** Les quantités moyennes.

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

V_T **:** Volume totale (m^3).

V_p **:** Volume de nanoparticules(m^3).

Lettre grecs :

β_T **:** Le coefficient d'expansion thermique appelé également coefficient de dilatabilité. (K^{-1}).

β_f **:** Coefficient de dilatabilité du fluide.

β_p **:** Coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

λ **:** Le coefficient de perte de charge

ρ **:** La Masse volumique $(Kg.m^3)$.

ρ_{nf} **:** La masse volumique du nanofluide $(Kg.m^3)$.

ρ_f **:** La masse volumique du fluide de base$(Kg.m^3)$.

ρ_p **:** La masse volumique des nanoparticules solides $(Kg.m^3)$.

μ **:** La viscosité dynamique $(Kg.m^{-1}.s^{-1})$.

μ_{nf} **:** La viscosité dynamique du nanofluide $(Kg.m^{-1}.s^{-1})$.

μ_f **:** La viscosité dynamique du fluide de base $(Kg.m^{-1}.s^{-1})$.

v **:** La Viscosité cinématique$(m^2.s^{-1})$.

φ **:** La fraction volumique.

ΔP **:** La perte de charge.

Liste des Tableaux

Tableau I. 1: Conductivité thermique de divers fluides de base et matériaux à 20°C. [1] 3
Tableau I. 2 : Les propriétés thermophysiques de différents matériaux [2] 5
Tableau I. 3: Rapport des masses volumiques des différentes nano fluides en fonction de la fraction volumique [5] 7
Tableau I. 4: Valeurs de $\frac{(c_p)_{nf}}{(c_p)_f}$ pour (φ) =10% obtenues à partir des deux relations donnant la chaleur spécifique. [5] 8
Tableau I. 5: Valeurs de βnfβf pour (φ) =10% obtenues à partir des deux relations Donnant le coefficient d'expansion thermique [5] 9

Tableau II. 1 : Les nombres adimensionnels utilisés dans la convection forcée et leurs significations [8] 22

Liste des figures

Figure II.1: les régimes d'écoulement en fonction de la vitesse [6].....17
Figure II.2: Profil de vitesse d'un fluide en écoulement dans un tube [15] 23
Figure II.3: évolution du coefficient h du nanofluide (1% Al2O3) et de l'eau en fonction du nombre de Reynolds [13] 28
Figure II.4: évolution du coefficient h local le long de tube pour Re =472±10 [13] 29
Figure II.5 : Améliorations du coefficient convectif local le long du tube pour Re1 = 603, Re2 = 554 et Re3 = 472[13].....29

Figure III. 1 : physique du problème de logiciel COMSOL……31
Figure III. 2 : L'Assistant Modèle de logiciel COMSOL……..32
Figure III. 3: dimension de l'espace de modèle……32
Figure III. 4 : Les interfaces physiques de logiciel COMSOL……33
Figure III. 5 : Les types d'études……..34
Figure III. 6 : Choix de la géométrie et la dimentionnement de la conduite…… 35
Figure III. 7 : La forme de la géométrie en 2D……35
Figure III. 8: la déclaration des matériaux nécessaires pour l'étude……36
Figure III. 9 : Conduite circulaire avec Conditions aux limites……36
Figure III. 10 : Maillage triangulaire très fin……37
Figure III. 11 : Champ de vitesse du nanofluide en écoulement le long de la conduite……...38
Figure III. 12: Profile radiale de vitesse de fluide (fluide de base) à l'entrée et sortie de la conduite……39
Figure III. 13: Profile radiale de température du fluide de base à la sortie de la conduite…...40
Figure III. 14: Perte de charge en fonction du Reynolds……..41
Figure III. 15:Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Reynolds pour différente valeurs de fraction volumique……...42

Résumé

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'étudier le transfert convectif d'un nanofluide chargé par des nanoparticules d'Al_2O_3 en écoulement laminaire dans une conduite circulaire. Par le code de calcul Comsol Multiphysics nous avons pu évaluer la perte de charge et le nombre de Nusselt en fonction de la fraction massique des nanoparticules et le nombre de Reynolds. Les résultats obtenus montrent que le transfert thermique est amélioré d'une façon remarquable en fonction de la fraction massique des nanoparticules.

Mots clés: écoulement laminaire, Transfert convectif dans des conduites, nanofluides, nanoparticules.

Abstract:

The aim of this work is to study the convective heat transfer of nanofluid loaded by nanoparticles of Al_2O_3 in laminar flow through a circular pipe. Using COMSOL software code the pressure drop and the Nusselt number versus mass fraction of nanoparticles and Reynolds number were evaluated. The results obtained show that the efficiency of heat transfer was remarkably improved

Keywords: laminar flow, convective transfer in pipes, nanofluids, nanoparticles.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة النقل الحراري القسري و المستمر الخاص بالنانوفلويد المحمل بجزيئات نانومترية Al_2O_3 عبر قناة اسطوانية .

من خلال برنامج كومصول استطعنا ان نقوم بتقييم هبوط الضغط وعدد نسلت بدلالة العدد الكتلي الخاص بالجزيئات النانومترية و العدد رينولدس, تظهر النتائج أن الانتقال الحراري تحسن بشكل ملحوظ بدلالة العدد الكتلي الخاص بالجسيمات النانومترية.

كلمات البحث: التدفق المستمر , النقل الحراري القسري و المستمر عبر قناة,نانوفلويدس , الجسيمات النانومترية

Introduction générale

Très souvent dans la pratique on est amené à faire évacuer la chaleur à partir des équipements domestiques ou industriels et ce pour éviter qu'ils soient endommagés sous l'effet de l'excès de la chaleur et veiller à maintenir leur fonctionnement dans de bonnes conditions et pour longtemps. 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.

L'objectif de notre travail est d'étudié la convection forcée en régime laminaire d'un nanofluide en écoulement dans une conduite circulaire simple. A travers cette étude on va apporter des éléments de réponses sur l'effet des nanoparticules sur l'hydrodynamique et la thermique du système.

Notre projet est composé de trois chapitres :

Dans le premier chapitre une étude bibliographique sur les nanofluides est présentée dans laquelle on va exposer les différents types de nanoparticules utilisées dans la préparation des nanofluides. Dans cette partie on va aussi présenter les propriétés thermiques (chaleur massique et conductivité thermique) et rhéologiques (masse volumique et viscosité dynamique) dès ses solutions et comment ils varient en fonctions de la fraction massique des nanoparticules et quelles sont les corrélations utilisées dans la littérature pour l'évaluation de ces paramètres.

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à l'étude thermique des nanofluides afin de déterminer toutes les équations gouvernantes le transfert thermique convectif interne en régime laminaire. Dans cette partie on présente aussi les travaux ultérieurs similaires réalisés par différents chercheurs.

Introduction générale

Dans le dernier chapitre on présente en premier lieu la démarche de résolutions du problème par Comsol Multiphysics et les étapes suivies. Dans la seconde partie nous présentons les résultats obtenus et en fin nous terminons par une conclusion générale avec les perspectives.

Chapitre I
Généralités sur les nanofluides

I.1 Introduction :

Dans les applications de refroidissement ou de chauffage on utilise des fluides caloporteurs conventionnels (eau, éthylène glycol et l'huile) mais ces fluides ne sont pas efficaces à cause de leur conductivité thermique qui est très faible et leur capacité de transfert de chaleur qui est aussi limiter. À cause de ce problème l'utilisation d'une nouvelle génération de fluides qui porte le nom nanofluide en suspension dans un fluide caloporteur peut apporter un gain thermique important dans ces applications. **[1.2]**

I.2 nanofluides :

I.2.1 Définition :

Les nanofluides sont des solutions colloïdales qui se composent de particules de taille nanométrique (1-100 nm) en suspension dans un liquide porteur. Ce type de fluide à un grand intérêt à cause de ces propriétés thermiques particulières qui peut améliorer la performance thermique par rapport au fluide conventionnelle utilisé dans les applications de refroidissement ou de chauffage qui ont des conductivités thermiques très faibles et qui limitent leur capacité de transfert de chaleur le tableau **(**I.1**)** représente la Conductivité thermique de divers fluides de base et matériaux.

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. **[1]**

Élément	Conductivité thermique λ (W/m.K)
Eau	0.599
50% eau + 50% éthylène glycol	0.25
Huile de moteur	0.14
Nanotube de carbone	3000-6000
Diamant	1000-2600
Cuivre (métal pur)	401
Nickel (métal pur)	237
Silicone (non métallique)	148
Alumine (Al_2O_3)	40

Tableau I. 1: Conductivité thermique de divers fluides de base et matériaux à 20°C. [1]

I.3 Types de nanoparticules et les fluides porteurs:

Une nanoparticule est un assemblage d'un grand nombre d'atomes, ces nanoparticules sont de taille nanométrique environ (1-100 nm), les nanoparticules se situent entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Les nanoparticules ont une importance à primordiale, et sont très étudiées de nos jours **[2]**.

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont :

- Les nanoparticules des oxydes métalliques:
  1- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).
  2- L'oxyde de cuivre (CuO).
  3- L'oxyde de silicium (SiO2).
  4- L'oxyde de Titanium (TiO2)
- Les nanoparticules métalliques:
  1- L'aluminium (Al).
  2- Le cuivre (Cu).
  3- L'or (Au).
  4- L'argent (Ag).
- Les nanoparticules non métalliques:
  1- Les nanotubes de carbone (CNT).
  2- Le diamant (C).

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permit d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégations, le choix d'un fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule. **[4]**

- Les liquides de base les plus utilisés sont :
  1- L'eau.
  2- L'éthylène glycol (EG).
  3- Les huiles.
  4- Les fluides de réfrigération (R12, R22).

Le mélange de nanoparticules avec un fluide de base est souvent appelées nanofluides, elle a des caractéristiques thermiques intéressantes comparées par les fluides de base traditionnels le tableau I-2 représente Les propriétés thermophysiques de différents matériaux**. [2]**

	Nanoparticule et fluide de base	K (W/m K)	ρ (kg/m^3)	Cp (J/kg K)	μ (Pa.s)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80,2	7870	447	
	Ni	90,7	8900	444	
	Au	317	19,300	129	
	Ag	429	10,500	235	
	C (diamant)	2300	3500	509	
Oxyde métallique (solides)	SiO_2	1,38	2220	745	
	TiO_2	8,4	4157	710	
	Al_2O_3	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
liquide non métallique	L'eau	0,613	1000	4183	0,0008513
	éthylène-glycol (EG)	0,258	1132	2349	0,0157

Tableau I. 2 : Les propriétés thermophysiques de différents matériaux [2]

I.4 Caractéristiques des nanoparticules :

- Une dimension < 100nm

-Formes : Sphériques, cylindriques **… [3]**

I.5 Les avantage de nanofluides:

- La surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides est grande.
- Haut dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications. **[4]**

I.6 Les inconvénients du nanofluides :

- mauvaise caractérisation des suspensions.
- stabilité des nanoparticules dans la suspension.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production. **[4]**

I.7 Propriétés thermophysiques des nanofluides :

Les propriétés thermophysiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, la dilatation thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions se modifient quand on ajoute des nanoparticules au fluide de base. Plusieurs paramètres se caractérise ces nanoparticules qui peuvent avoir un effet sur les valeurs des paramètres thermophysiques du nanofluide obtenus (la nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique φ, la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu .... etc). **[5]**

I.7.1 La Masse volumique :

La masse volumique d'un nanofluide que nous supposerons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide de base) peut être calculée en fonction de la fraction volumique (φ) a une température T donnée comme suite :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_p + V_f} = \frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_p + V_f} \qquad \textbf{\textit{I.1}}$$

I.7.2 La fraction volumique :

La fraction volumique (φ) est définie comme le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide). Cette propriété est la plus important pour le nanofluide puisque les calculs des tous les autres propriétés se basés sur la fraction volumique du nanofluide.

$$\varphi = \frac{Volume\ solide}{Volume\ totale\ du\ nanofluide} = \frac{V_p}{V_p + V_f} \qquad \textbf{\textit{I.2}}$$

V_p: Volume de nanoparticules

V_T: Volume totale

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide :

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

Avec :

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_p : La masse volumique des nanoparticules solides.

Le tableau I.3 représente les valeurs des rapports de la masse volumique des nanofluides sur la masse volumique du fluide de base pour les nano fluides suivante (eau+ Al_2O_3), (Eau+TiO_2), (eau+Cu), (eau+Ag) et (eau+Au) en fonction de la fraction volumique (φ) qui varie entre 0% et 10%.

	$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}$				
φ %	Eau + Al_2O_3	Eau + TiO_2	Eau + Cu	Eau + Ag	Eau + Au
0%	1	1	1	1	1
1%	1.0231	1.0296	1.0767	1.0921	1.1801
2%	1.0492	1.0622	1.1562	1.1872	1.3632
3%	1.0752	1.0947	1.2358	1.2823	1.5462
4%	1.1012	1.1272	1.3150	1.3772	1.7292
5%	1.1273	1.1598	1.3949	1.4723	1.9123
6%	1.1533	1.1923	1.4745	1.5673	2.0953
7%	1.1793	1.2248	1.5541	1.6623	2.2783
8%	1.2053	1.2573	1.6336	1.7573	2.4613
9%	1.2314	1.2899	1.7132	1.8524	2.6444
10%	1.2574	1.3224	1.7927	1.9474	2.8274

Tableau I. 3: Rapport des masses volumiques des différentes nano fluides en fonction de la fraction volumique [5]

I.7.3 La Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est définie comme 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 1K lors de la transformation considérée. Pour déterminé la chaleur spécifique d'un nanofluide, on a les deux relations suivantes :

A. Model de Xuan et Roetzel:

Xuan et Roetzel ont utilisé :

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

B. Model Pak et Cho:

Pak et Cho ont utilisé**:**

$$(C_p)_{nf} = (1-\varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_p \qquad \textit{I.5}$$

Avec :

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

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

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

				$\frac{(C_p)_{nf}}{(c_p)_f}$	
φ %	$(C_p)_p$	$(C_p)_f$	0%	10% relation (I.5)	10% relation (I.4)
Eau		4179			
Al_2O_3	765		1	0.9183	0.7683
TiO_2	686.2		1	0.9164	0.7335
Cu	383		1	0.9092	0.5479
Ag	230		1	0.9055	0.4919
Au	129		1	0.9030	0.3394

Tableau I. 4: Valeurs de $\frac{(c_p)_{nf}}{(c_p)_f}$ **pour (φ) =10%** ***obtenues à partir des deux relations donnant la chaleur spécifique. [5]***

Le tableau I.4 présente les valeurs calculées à partir des deux relations (I.4) et (I.5) de $\frac{(c_p)_{nf}}{(c_p)_f}$ (pour (φ) =10% pour le nanofluide (eau avec les différentes nanoparticules Al_2O_3, TiO_2, Cu, Ag et Au).

Des nombreux auteurs préfèrent utiliser l'expression de Xuan and Roetzel pour calculer la chaleur spécifique d'un nanofluide.

I.7.4 Coefficient d'expansion thermique :

La variation de la masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique ou également appelé coefficient de dilatabilité qui est définit comme $\beta_T = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$. Pour calculer la valeur de ce coefficient pour les nanofluides plusieurs auteurs ont utilisé par analogie avec la relation (I.3)

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

On déduit l'expression suivante :

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

Avec :

β_f : Coefficient de dilatabilité du fluide.

β_p : Coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

Kim et al ont supposé que le coefficient d'expansion thermique du fluide (β_f) est largement plus grand que celui des nanoparticules solides (β_f) Il ramène l'équation (I.6) à la forme simplifiée suivante : $\beta_{nf} = (1-\varphi)\beta_f$

$$\rho_{nf} = \rho_{0nf}\left(1-\beta_{nf}(T-T_0)\right)$$

$$\rho_f = \rho_{0f}\left(1-\beta_f(T-T_0)\right)$$

$$\rho_p = \rho_{0p}\left(1-\beta_s(T-T_0)\right)$$

En remplaçant (ρ_{nf} , ρ_f) par leur valeur tirée de l'équation (I.3) on en déduit :

$$\beta_{nf}\rho_{0nf} = (1-\varphi)\beta_f\rho_{0f} \qquad \textbf{I.7}$$

Le tableau I.5 représente les valeurs calculées du rapport $\frac{\beta_{nf}}{\beta_f}$ obtenues à partir des deux relations(I.6) et (I.7) et on obtient le coefficient d'expansion thermique pour les différents nanofluides (eau, Al2O3, TiO2, Cu, Ag et Au).

			$\frac{\beta_{nf}}{\beta_f}$		
φ %	$\beta_s \times 10^{-7}$	$\beta_f \times 10^{-7}$	0%	10% relation (I.6)	10% relation (I.7)
Eau		210			
Al_2O_3	7.5		1	0.9036	0.7158
TiO_2	9		1	0.9043	0.6806
Cu	16.7		1	0.9079	0.5020
Ag	19.7		1	0.9094	0.4622
Au	14.2		1	0.9068	0.3183

Tableau I. 5: Valeurs de $\frac{\beta_{nf}}{\beta_f}$ pour (φ) =10% obtenues à partir des deux relations Donnant le coefficient d'expansion thermique [5]

I.7.5 La viscosité dynamique :

La viscosité est une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement .On peut dire alors que la viscosité est une mesure du frottement interne d'un fluide .un liquide qui présente un frottement interne élevé est un liquide très visqueux.

La viscosité relative est définie comme le rapport de la viscosité du nanofluide sur la viscosité du fluide de base $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}$. **[4]**

Il existe plusieurs modèles de la viscosité dynamique d'un nanofluide on note quelque model parmi les model existant :

A. Modèle d'Einstein(1906) :

Einstein a donné la relation de La viscosité dynamique d'un nanofluide. Pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides la relation d'Einstein et comme suite **: [4]**

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \qquad \textbf{\textit{I.8}}$$

Avec :

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nanofluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

φ : La fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable juste pour φ =0,03.

B. Modèle de Brinkman :

Ce modèle a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques. [4]

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \qquad \textbf{\textit{I.9}}$$

C. Modèle de Batchelor :

Ce modèle a montré que La viscosité n'est pas seulement une fonction linéaire de φ comme l'indique la relation d'Einstein mais une fonction non linéaire de φ.

$$\mu_{nf} = \mu_f(2.6\varphi^2 + 2.5\varphi + 1) \qquad \textbf{\textit{I.10}}$$

D'autres relations ont été proposées comme Maiga et al, limitées à des applications bien précises à partir de résultats de mesures ils ont proposé la corrélation suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \qquad \textbf{\textit{I.11}}$$

Pack and Cho ont proposé, quant à eux une corrélation pour les nanoparticules Al_2O_3 dispersés dans l'eau donnée comme :

$$\mu_{nf} = \mu_f(533.9\varphi^2 + 39.11\varphi + 1) \qquad \textbf{I.12}$$

Le modèle de Brinkman est le plus utilisé par les chercheurs. **[4]**

I.7.6 Conductivité thermique :

Généralement la conductivité thermique est une propriété importante, parce qu'elle a un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur elle peut clairement indiquer l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide et elle varie en fonction de la température, aussi la conductivité thermique du nanofluide varie en fonction de la fraction volumique, alors la conductivité thermique d'un nanofluide est calculé par les modèle suivant : **[4]**

A. Modèle de Maxwell (1873):

Maxwell à calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique de nanofluide, mais il est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, cette condition est considérer comme un point négative pour Maxwell, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules du forme sphériques.

Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivant :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p+2k_f-2\varphi(k_f-k_p)}{k_p+2k_f+\varphi(k_f-k_p)} \qquad \textbf{I.13}$$

Avec :

k_{nf} : La conductivité thermique du nanofluide.

k_f : La conductivité thermique du fluide de base.

k_p : La conductivité thermique de la particule solide. **[4]**

B. Modèle de Hamilton et Crosser (1962):

Le Modèle de Hamilton et Crosser est une extension du modèle de Maxwell. Le modèle est pour résoudre la limite de modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'a valable que dans le cas des particules sphériques. Le Modèle de Hamilton et Crosser concerne les particules quel que soit sa forme et ils ont développé pour devenir plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nanofluide et et cela en employant la notion du facteur géométrique appelée la sphéricité (ψ). Ce facteur est définit comme le rapport de la surface de la sphère ayant le

même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. Alors La conductivité thermique est donnée comme suit:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p+(n-1)k_f-(n-1)(k_f-k_p)\varphi}{k_p+(n-1)k_f+\varphi(k_f-k_p)} \qquad \textbf{\textit{I.14}}$$

Avec :

$n = \frac{3}{\psi}$: Facteur de forme empirique (n=3 pour les particules sphériques et n=6 pour les particules cylindriques). **[4]**

C. Modèle de Yu et Choi :

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

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p+2k_f-2(1+\beta)^3(k_f-k_p)\varphi}{k_p+2k_f+(1+\beta)^3(k_f-k_p)\varphi} \qquad \textbf{\textit{I.15}}$$

Avec :

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

Donc les modèles utilisés pour chaque propriété thermophysique dans notre travail sont :

La masse volumique du nanofluide : $\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p$

La capacité calorifique du nanofluide : $(\rho C_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p$

Le coefficient d'expansion thermique : $\beta_{nf} = (1-\varphi)\beta_f + \varphi\beta_p$

La viscosité dynamique du nano fluide : $\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}}$

La conductivité thermique du nanofluide : $\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p+2k_f-2\varphi(k_f-k_p)}{k_p+2k_f+\varphi(k_f-k_p)}$

I.8 Les domaines applications de nanofluides :

On utilise les nanofluide pour l'amélioration de transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques on note quelque domaine d'applications de nanofluide :

• Refroidissement des systèmes thermiques.

• Refroidissement des systèmes électroniques.

• Refroidissement des systèmes militaire.

• Refroidissement des systèmes spatiaux

• Refroidissement des systèmes nucléaires

• La biomédecine **[2]**

I.8.1 Refroidissement des systèmes thermiques :

L'amélioration de taux de refroidissement dans les moteurs de véhicules qui utilise le mélange d'éthylène –glycol et l'eau comme fluide de refroidissement par l'ajout de nanoparticule au mélange aussi la réduction de l'usure (la lubrification) à l'aide des nanoparticules et améliorer les propriétés tribologique et la résistance à la lubrification avec la réduction du frottement entre les éléments mécaniques mobiles. **[2]**

I.8.2 Refroidissement des systèmes électroniques :

Dans les circuits intégré les nanofluide et considéré comme un fluide de refroidissement par exemple l'utilisation de nanofluide à base d'eau pour le refroidissement d'une unité centrale dans un PC. **[2]**

I.8.3 Refroidissement des systèmes militaire :

Les nanofluides ont montrés leur efficacité pour refroidir les systèmes militaires comme l'électronique de puissance et les armes dirigée aussi les sous-marins et les diodes lasers a haute puissance. **[2]**

I.8.4 Refroidissement des systèmes spatiaux :

Dans les applications de l'espace ou la densité de puissance est très élevée la présence des nanoparticules dans le fluide de refroidissement à un rôle très important. **[2]**

I.8.5 Refroidissement des systèmes nucléaires :

Une évaluation de l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique et de la performance économique des systèmes nucléaires par l'institut de technologie de Massachusetts qui a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nanotechnologie. **[2]**

I.8.6 La biomédecine :

Il existe plusieurs applications de nanofluide et de nanoparticule dans le domaine biomédicale par exemple les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues pour le traitement de cancer et aussi pour une chirurgie plus sûr en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgical. **[2]**

- Il y a d'autres applications par exemple dans l'industrie de l'énergie renouvelable les nanofluid sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur a partir des capteurs solaire aux réservoirs de stockage Aussi dans l'industrie de transformation comme la production chimique la boisson le pétrole et le gaz **[2]**

Chapitre II
Transfert de chaleur par convection forcée dans les nanofluides

II.1 Introduction :

L'étude de la convection forcée dans le cas des écoulements des fluides externes ou internes sont extrêmement nombreuses du fait des applications pratiques relevant de ces configurations. Mais l'étude prenant en compte les nanofluides sont moins courantes. Dans cette deuxième partie nous rappelons quelques notions de base de la convection et nous présentons une bibliographie relative aux écoulements internes fluides et nanofluides.

II.2 Transfert de chaleur par convection :

Le transfert de chaleur par convection entre paroi et un fluide est un mécanisme très complexe qui fait intervenir la conduction, l'accumulation de la chaleur et le mouvement de fluide. Tout d'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules fluide adjacente à la paroi. Cette chaleur sert à augmenter l'énergie interne des particules. Cette énergie, emmagasinée, est transportée sous l'effet de mouvement de fluide vers les régions plus froides. Lorsque les particules chaudes atteignent les régions à basse température la chaleur est à nouveau transmise par conduction du fluide chaud vers fluide froid. Le transfert de chaleur convectif s'exprime par la relation de Newton :

$$q = hS(T_p - T_\infty) \qquad \textbf{II.1}$$

Avec :

h : Désigne le coefficient de transfert thermique par convection.

S : Désigne la surface d'échange.

T_p : Désigne les températures de la paroi.

T_∞ : Désignent la température du fluide loin de la paroi.

L'équation de Newton parait très simple alors ce n'est pas le cas car la difficulté réside quant à la détermination du coefficient convectif (h) qui est un paramètre complexe dépend des propriétés thermique du milieu et de la nature et la géométrie de l'écoulement.

II.3 Coefficient de transfert thermique par convection (h) :

Pour quantifier le flux de chaleur échangé entre la paroi du tube et le fluide en écoulement il est très important de connaître préalablement le coefficient d'échange de chaleur par convection h. Ce coefficient s'exprime par la relation ci-après **[9]**:

$$h = \frac{-k\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_p}{(T_p - T_\infty)} \qquad \textbf{II.2}$$

Avec :

k : Désigne la conductivité thermique du fluide.

L'équation II.2 peut être réécrite sous la forme suivante **[10]** :

$$\frac{hL}{k} = \frac{\partial\left(\frac{T_p - T}{T_p - T_\infty}\right)_p}{\partial\left(\frac{y}{L}\right)} = Nu_L \qquad \textbf{II.3}$$

Avec :

Nu_L : Désignent le nombre adimensionnel de Nusselt global

L : la longueur caractéristique.

Comme le montre l'équation II.1, le calcul du coefficient convectif (h) nécessite la détermination du profile de la température du fluide dans la couche limite. Ce profil de température dépend du régime d'écoulement, laminaire ou turbulent, et il est établi par la résolution des équations de la convection qui sont un groupement d'équations où apparait l'équation de la continuité, les équations de Navier Stokes et l'équation de l'énergie.

II.4 Régimes d'écoulement :

Lorsqu'un fluide s'écoule dans une conduite il s'exerce une résistance visqueuse qui crée une perte d'énergie. Pour des conditions aux limites constantes imposées à l'écoulement, Osborne Reynolds a montré en 1883 qu'il existe deux sortes d'écoulements suivant la valeur d'un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds et noté (*Re*) **[6]** et qui s'exprime par :

$$Re = \frac{UD}{v} \qquad \text{II.4}$$

Avec :

U : Désigne la vitesse moyenne.

D : Diamètre de la conduite.

v : Désigne la viscosité cinématique du fluide.

A faible nombre de Reynolds inférieur au nombre de Reynolds critique noté (Re_c) l'écoulement est dit laminaire. Au contraire lorsque le nombre de Reynolds est grand supérieur au nombre de Reynolds critique l'écoulement est dit turbulent.

A ces deux types d'écoulement fondamentalement différents correspondent des coefficients de transfert convectifs différents.

Le nombre de Reynolds critique dépend de type d'écoulement **[9]** :

- Ecoulement interne : Re_c= 2300

  Re < Re_c l'écoulement est laminaire

  Re > Re_c l'écoulement est turbulent

- Ecoulement externe : Re_c= 510^5

  Re < Re_cl'écoulement est laminaire

  Re > Re_c l'écoulement est turbulent

II.5 Mise en évidence des écoulements laminaire et turbulent :

Pour mettre en évidence les régimes d'écoulement un filet de colorant est introduit dans l'axe d'une conduite circulaire en verre à l'intérieur de laquelle circule un courant d'eau comme le montre la figure II.1. Les phénomènes suivant sont observés en fonction de la vitesse d'écoulement d'eau **[6]**:

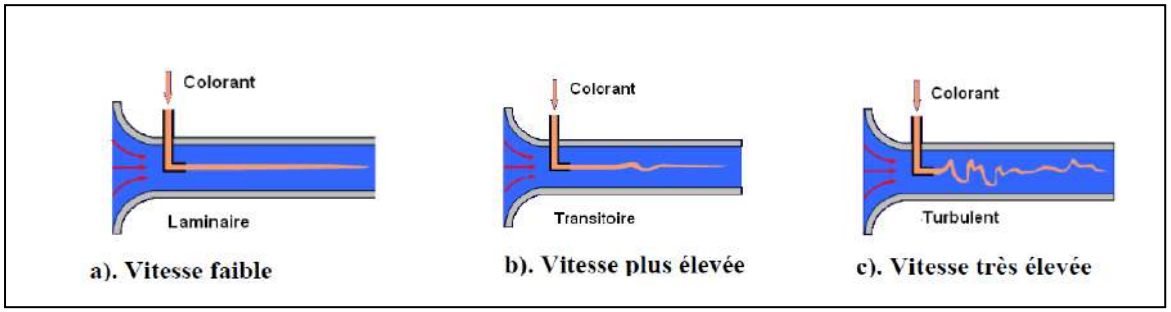


Figure II.1: les régimes d'écoulement en fonction de la vitesse [6]

- Cas a : Régime laminaire le fluide s'écoule en couches et les couchent glissent les unes par rapport aux autres sans se mélangées en suivant une ligne uni et contenue le long de la conduite comme le montre le filet du colorant
- Cas b : Régime transitoire c'est une transition entre le régime laminaire et ce lui turbulent.
- Cas c : Régime turbulent le mouvement des particules fluide est désordonné et aléatoire et les particules du colorants s'éloignent très rapidement et de manière irrégulière comme le montre le parcours du traceur dans la veine du fluide.

II.6 Caractéristique de régime laminaire et turbulent :

II.6.1 Régime laminaire :

En régime laminaire correspondant aux faibles valeurs de Reynolds, l'écoulement est caractérisé par **[7]**:

- Une distribution de vitesse parabolique
- Les couches glissent les unes par rapport aux autres
- Les couches du fluide ne se mélangent pas

Dans l'écoulement laminaire les forces de frottement dû à la viscosité sont dominantes.

II.6.2 Régime turbulent :

A partir de certaines valeurs correspondant aux valeurs de Reynolds critique, les phénomènes suivants sont observés **[7]** :

- Apparition de tourbillons
- La vitesse des particules fluides ne sont pas uniforme
- Les particules se déplacent dans toutes les directions
- La diffusion transversale est importante

Dans ce type d'écoulement c'est les tourbillons qui transportent la masse et la chaleur à travers les couches du fluide.

II.7 Equations de la convection forcée :

Les équations de la convection ont était établit en faisant des bilans de conservation, de masse, de quantité de mouvement et de la conservation de l'énergie sur un élément de volume du fluide en écoulement et ce pour chaque régime d'écoulement.

II.7.1 Equation de la convection en régime d'écoulement laminaire :

Dans le cas d'un écoulement bidimensionnel et permanent les équations de la convection en régime laminaire s'expriment par **[11]**:

A) Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad \textbf{II.5}$$

B) Equations de Navier Stokes en 2D :

$$\rho\left[u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right]=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad \textbf{II.6}$$

$$\rho\left[u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right]=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \qquad \textbf{II.7}$$

C) Equation de l'énergie :

$$\rho c_p\left[u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right]=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad \textbf{II.8}$$

II.7.2 Equation de la convection en régime d'écoulement turbulent :

Dans le cas d'un écoulement bidimensionnel et permanent les équations de la convection en régime turbulent s'expriment par **[11]** :

A) Equation de continuité :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}=0 \qquad \textbf{II.9}$$

B) Equations de Navier Stokes en 2D :

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right)=-\frac{\partial\bar{p}}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}-\rho\overline{v'u'}\right) \qquad \textbf{II.10}$$

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right)=-\frac{\partial\bar{p}}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}-\rho\overline{v'u'}\right) \qquad \textbf{II.11}$$

C) Equation de l'énergie :

$$\rho C_p\left(\bar{u}\frac{\partial\bar{T}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial\bar{T}}{\partial y}\right)=-\frac{\partial}{\partial y}\left(-k\frac{\partial\bar{T}}{\partial y}+\rho C_p\overline{v'T'}\right)+\mu\left(\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial y^2}\right) \qquad \textbf{II.12}$$

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

Où :

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

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

La résolution de ces équations (équations de la convection) par les méthodes numériquement, éléments finis ou volume finis par exemple, permet la détermination du profil de vitesse et de température du fluide dans les couches limites. Une fois la distribution de la température est obtenue on peut calculer le coefficient d'échange (h) et par conséquent le flux de chaleur échangée entre paroi et le fluide est évalué. Il existe des codes de calculs très puissant et efficaces destinés à cet effet. Parmi ces codes on peut citer par exemple Ansys ou Comsol multiphysics récemment acquis par l'université de Médéa.

II.8 Corrélations empiriques de transfert thermique en convection forcée :

Il a été montré par une analyse adimensionnelle et prouvé expérimentalement que le coefficient d'échange par convection forcée (h) représenté par le nombre de Nusselt, Nu, dépend du nombre de Reynolds et Prandlt. Les corrélations proposées dans la littérature pour des écoulements externes des fluides incompressible sur une plaque plane constituent généralement des variantes de la formule semi empirique suivante : **[9]**

$$Nu=AR_e^aP_r^b \qquad \textbf{II.13}$$

Avec :

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

Par exemple dans le cas d'un fluide s'écoulant le long d'une plaque plane Nu s'exprime par les relations suivantes :

A) Régime Laminaire :

$$Nu = 0.66Re^{1/2}Pr^{1/3} \qquad \textbf{II.14}$$

B) Régime Turbulent :

$$Nu = 0.036Pr^{1/3}[Re^{0.8} - 23200] \qquad \textbf{II.15}$$

Dans le tableau II-1 sont regroupés les nombres adimensionnels utilisés dans la convection forcée ainsi que leurs significations

Nombre de Nusselt	$Nu = \frac{hl}{\lambda}$	$\boldsymbol{h}$ **:** coefficient de convection $\boldsymbol{l}$ **:** longueur caractéristique $\boldsymbol{\lambda}$ **:** conductivité thermique du fluide	**(Nu)** traduit la quantité de l'échange thermique : une augmentation de ce nombre traduit une contribution importante de l'écoulement sur l'échange de chaleur avec la paroi
Nombre de Prandlt	$Pr = \frac{v}{a}$	$\boldsymbol{v}$ **:** viscosité cinématique $\boldsymbol{a}$: diffusivité thermique du fluide	**(Pr)** compare l'aptitude du fluide à diffuser la quantité de mouvement par la biaise de sa viscosité a son aptitude à diffuser la chaleur par la biaise de sa diffusivité thermique

Nombre de Reynolds	$Re = \frac{UD}{v}$	$\boldsymbol{U}$ **:** la vitesse moyenne de l'écoulement $\boldsymbol{D}$ **:** Diamètre de la conduite $\boldsymbol{v}$ **:** la viscosité cinématique du fluide	Le nombre de Reynolds **(Re)** représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, Ce nombre sans dimension.

Tableau II. 1 : Les nombres adimensionnels utilisés dans la convection forcée et leurs significations [8]

II.9 Convection dans les nanofluides :

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, les nanofluides sont des particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide. Il a été montré que ce type de fluide est très efficace dans le transfert thermique permettant ainsi d'améliorer les performances des échangeurs de chaleurs dans des applications industrielles **[11].** En effet les particules en suspension ont une capacité d'absorber la chaleur et par conséquent améliore l'échange thermique de façon considérable et efficace. A cet effet ce type de fluide a attiré l'intention de plusieurs chercheurs dans le domaine d'engineering pour les applications thermiques thermique.

La modélisation de la convection dans les nanofluides est très complexe et d'intenses investigations dans ces dernières années ont été lancées pour l'identification la compréhension des phénomènes hydrodynamique et thermique de la suspension. Plusieurs approches mathématiques ont été proposées pour décrire le comportement hydrodynamique et thermique des nanofluides la plus populaire est l'approche Eulérienne qui consiste à considérer toute la suspension comme étant un seul fluide ayant des propriétés thermiques et rhéologiques comprise entre les propriétés du fluide de base et les particules **[11].** C'est pourquoi, les équations de la convection que ce soit en régime laminaire ou en régime turbulent sont maintenues. Pour l'évaluation de la masse volumique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique des nanofluides des corrélations sont utilisés à cet effet. Une analyse complète des équations de la convection dans le cas de nanofluide sont proposées en détail dans la référence **[11]**

II.10 Convection forcée dans des conduites :

La convection à l'intérieur des tubes intervient dans la plus part des procédés industriel où intervient le transfert de chaleur et le transfert de masse on cite par exemples dans les chaudières, les échangeurs de chaleurs, la réfrigération et le conditionnement d'air.

II.10.1 Spécificité des écoulements Internes :

Quand un fluide initialement à la vitesse uniforme entre dans une conduite il apparait deux zones d'écoulements comme le montre la figure II.2:

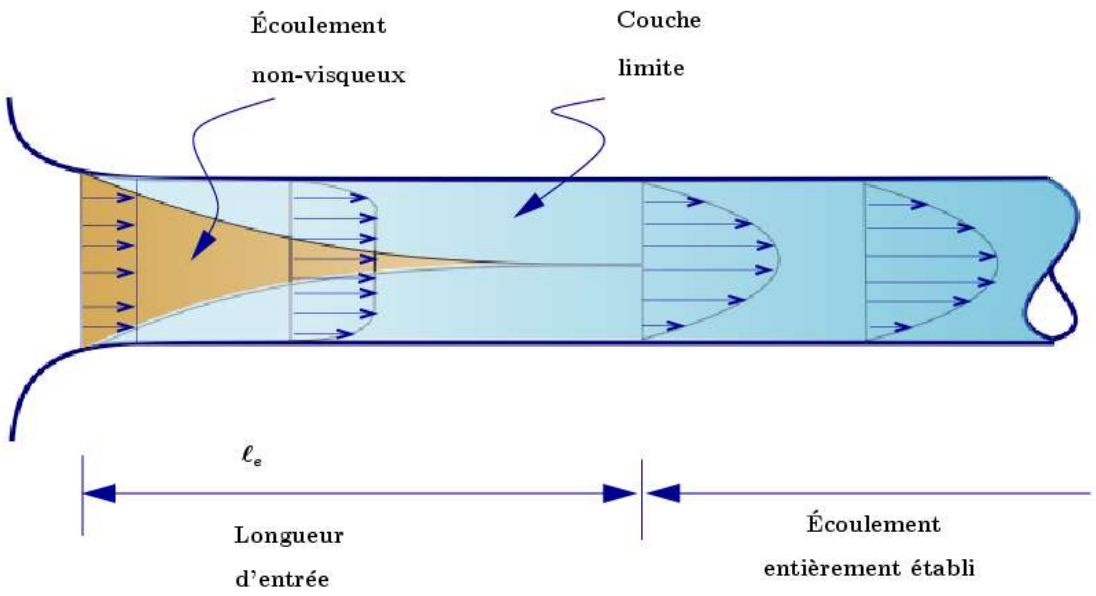


Figure II.2: Profil de vitesse d'un fluide en écoulement dans un tube [15]

- À l'entrée et au voisinage de la paroi de la conduite le phénomène de la couche limite se manifeste jusqu'à certain point caractérisé par une longueur ℓ_e. Ce domaine est appelé zone d'écoulement non établit caractérisé par une longueur ℓ_e ($0<x<\ell_e$). Dans cette zone les profils de vitesse et de la température du fluide ne sont pas homogène et varie en fonction de x (longueurs de la conduite).
- A la distance $x = \ell_e$ la couche limite interfère sur elle-même et donne naissance à une nouvelle structure d'écoulement. Ce domaine est appelé zone d'écoulement établit. Dans cette zone les profils de vitesse et de température sont invariables.
- 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 :

La formulation mathématique des équations de la convection dans une conduite (coordonné cylindrique) est similaire à celle de l'écoulement en coordonné cartésien (écoulement entre deux plaque). Pour un écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique les équations sont sous forme :

A) Equation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rV) \qquad \textbf{II.16}$$

B) Equations de Navier Stokes en 2D :

$$U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P^*}{\partial x}\frac{V}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right) \qquad \textbf{II.17}$$

$$\frac{\partial P^*}{\partial r} = 0 \qquad \textbf{II.18}$$

C) Equation de l'énergie :

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

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 dans la conduite de rayon R.

- **Profil de vitesse :**

Le profil de vitesse radiale du fluide dans la région développée en régime laminaire est parabolique et s'exprime par la relation suivante **[9-10]:**

$$U = \overline{U}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \qquad \textbf{II.20}$$

Où $\overline{U}$ désigne la vitesse moyenne du fluide.

- **Profil de température :**

Après intégration de l'équation de l'énergie et substitution du profil de vitesse par son expression on obtient la distribution radiale de la température dans la région développée qui s'exprime par la relation suivante **[10]**:

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

Avec :

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

k : Désigne la conductivité thermique du fluide

- **Le coefficient de frottement C_f :**

Le coefficient de frottement C_f s'exprime par :

$$C_f = \frac{16}{Re} \qquad \textbf{II.22}$$

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

La perte de charge dans une conduite de longueur L s'exprime par la relation suivante **[10]** :

$$\Delta P = \frac{1}{2}\lambda\rho\bar{U}^2\frac{L}{2R} \qquad \textbf{II.23}$$

Avec :

λ : le coefficient de perte de charge

- **Le nombre de Nusselt :**

Après la détermination du profil de la température dans la région développée par résolution des équations de la convection le nombre de Nusselt est évalué selon les conditions aux limites **[9]:**

Température imposée à la paroi (T_p connue)

$$Nu = 3.66$$

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 de la dimension des conduites et de la nature de fluide. La référence **[9]** propose une analyse détaillée des différentes corrélations présentées par les chercheurs.

II.10.3 Aspects hydrodynamique et thermique en régime turbulent :

La résolution des équations de la convection en régime turbulent dans une conduite est très complexe vu la spécificité de l'écoulement où il a été montré que dans la couche limite turbulente le champ de vitesse de fluide est composé de trois zones. En effet, la couche limite turbulente est composé d'une sous couche limite laminaire une couche tampon et une couche turbulente. Pour simplifier le calcul l'analogie de Reynolds a été employé qui stipule que le transfert de chaleur est dominant dans la couche turbulente, c'est-à-dire le transfert de chaleur est négligeable dans la sous couche limite laminaire et la couche tampon. En combinant le profil de vitesse du fluide déterminé expérimentalement et l'équation de la conservation de l'énergie le profil radiale de vitesse, le coefficient de frottement, la perte de charge et le nombre de Nusselt ont été établit **[10].**

- **Profil de vitesse :**

Le profil de vitesse radiale du fluide dans la région développée en régime turbulent s'exprime par la relation suivante :

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

Avec :

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

- **Le coefficient de frottement C_f :**

Le coefficient de frottement C_f s'exprime par :

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

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

La perte de charge dans une conduite de longueur L s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta P = 4C_f \rho \bar{U}^2 \frac{L}{2R} \qquad \textbf{II.26}$$

- **Le nombre de Nusselt :**

Plusieurs corrélations du nombre de Nusselt sont proposées dans la littérature concernant les écoulements des liquides dans des tubes. Pour le calcul de transfert thermique la corrélation la plus utilisé dans le cas de refroidissement est la suivante :

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

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 **[9-11]**.

II.11 Travaux antérieurs :

Les propriétés de transports et le coefficient de transfert convectif des nanofluides ont fait l'objet d'investigation par de nombreux auteurs.

J. Garg et coll. **[12]** Ont étudié l'effet de nanoparticules de l'oxyde cuivre (CuO) dans l'éthylène glycol sur le transfert chaleur dans un écoulement interne. Le fluide s'écoule à l'intérieur d'un tube dont la paroi est maintenue à flux constant. En premier lieu, Ils ont mesuré expérimentalement la conductivité thermique et la viscosité dynamique de nanofluide

en fonction de la concentration volumique des nanoparticules. Les résultats obtenues montrent que la conductivité thermique et la viscosité dynamique de nanofluide sont améliorés mais le taux d'amélioration de la viscosité et plus grand à celui de la conductivité thermique. Cette tendance influe sur l'efficacité thermique du nanofluide. En effet, les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la conductivité thermique de nanofuide ne se traduit pas sur l'efficacité thermique de refroidissement et cela en raison de l'augmentation importante de la viscosité. Pour tirer profil de l'augmentation de la conductivité thermique il faut augmenter le diamètre de la conduite et ce pour réduire l'effet opposant de la viscosité dynamique

Thierry Mara et coll. **[13]** ont étudié le transfert thermique d'un nano fluide composé d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 dispersé dans l'eau s'écoulant dans un échangeur de chaleur en régime laminaire. Un dispositif expérimental a été employé pour la détermination du coefficient d'échange convectif du nanofluide (1% Al_2O_3) et de l'eau en fonction du nombre de Reynolds. La viscosité et la conductivité thermique des solutions ont été déterminées expérimentalement. Le résultat obtenu est reporté sur la figure II-3. Une amélioration de l'échange thermique de l'ordre de quatre pour une concentration de 1% de nanofluide par rapport à celui de l'eau pour un même nombre de Reynolds.

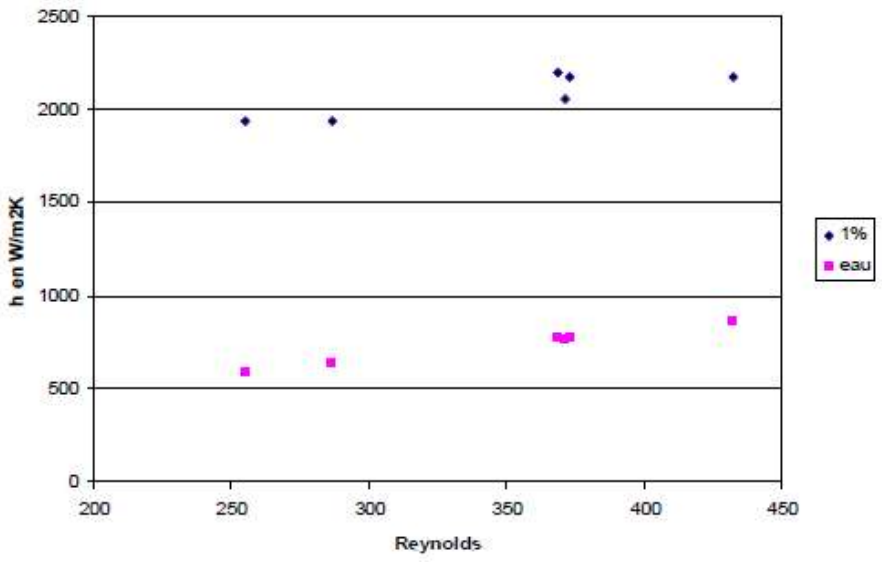


Figure II.3: évolution du coefficient h du nanofluide (1% Al2O3) et de l'eau en fonction du nombre de Reynolds [13]

F.Rashidi et coll, **[14]** ont étudié la convection forcée en régime laminaire de nanofluide composé de nanotubes de carbone en suspension dans de l'eau. A partir des mesures de température du fluide en écoulement ils ont pu évaluer le coefficient d'échange local le long

de la conduite pour plusieurs nombre de Reynolds et différentes taux de concentration volumique des nanotubes. Les figures II mettent en évidence l'efficacité de nanofluide et sa concentration sur le transfert thermique comparant à l'eau. En effet, cette amélioration est due à l'augmentation de la conductivité thermique et aussi au mouvement brownien des nanoparticules près de la surface qui contribua à l'amélioration de l'échange thermique entre paroi et fluide.

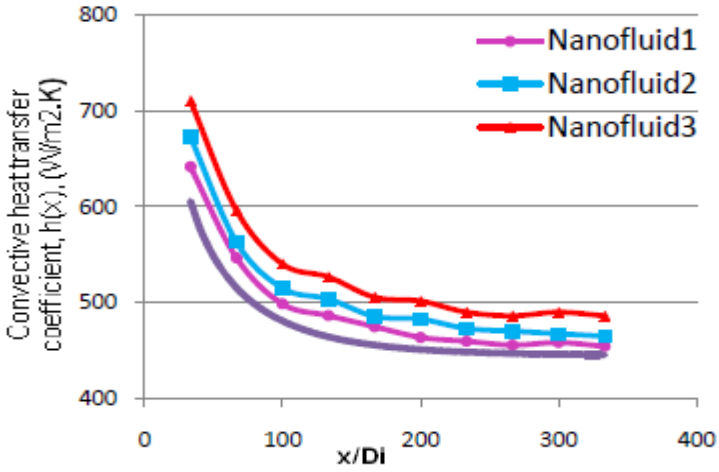


Figure II.4: évolution du coefficient h local le long de tube pour Re =472±10 [13]

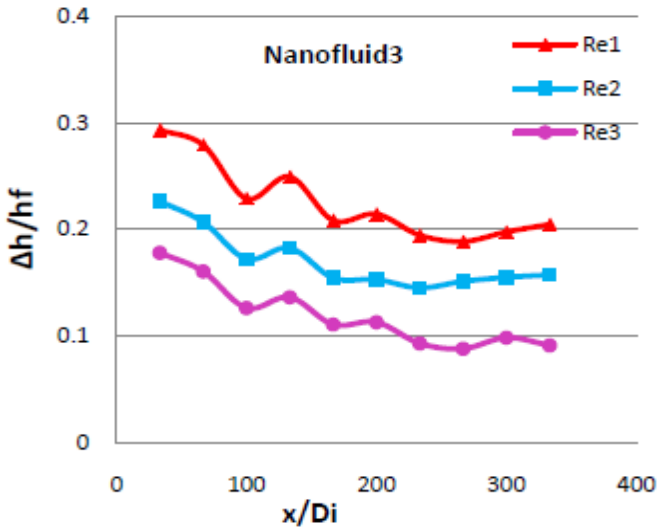


Figure II.5 : Améliorations du coefficient convectif local le long du tube pour Re1 = 603, Re2 = 554 et Re3 = 472[13]

Chapitre III
Simulation par COMSOL

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons la démarche utilisée pour la simulation d'un écoulement d'un nano fluide dans une conduite par le code de calcul COMSOL. La résolution des équations de la convection interne par COMSOL nécessite en premier lieu de définir toutes les équations relatives aux paramètres physiques caractérisant le fluide chargé en nano particules à savoir ; la viscosité dynamique, la masse volumique et la conductivité thermique. Ensuite on présente les étapes suivies avec COMSOL pour la résolution du problème et les résultats obtenus

III.2 Propriétés du nanofluide :

Comme nous l'avons déjà présenté dans la premier chapitre il existe plusieurs corrélations pour la caractérisation des propriétés du fluide chargé par des nanoparticules la plus part sont en fonction des propriétés du fluide, des particules et la charge (pourcentage en nano).

Viscosité : $\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}}$ **III.1**

Masse volumique : $\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p$ **III.2**

Conductivité thermique : $\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p+2k_f-2\varphi(k_f-k_p)}{k_p+2k_f+\varphi(k_f-k_p)}$ **III.3**

III.3 Code de calcul COMSOL :

Le code de calcul COMSOL comporte plusieurs modules appelé physique du problème comme la montre la figure ci-dessous

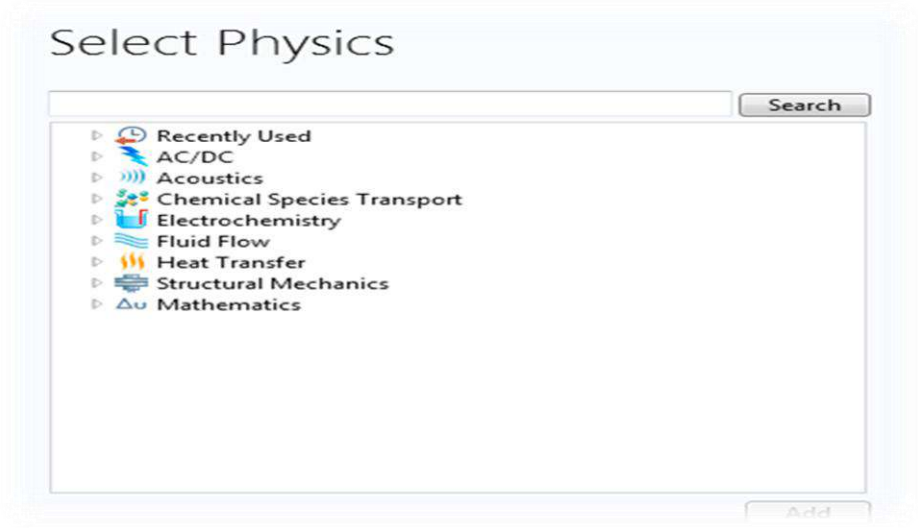


Figure III. 1 : physique du problème de logiciel COMSOL

III.4 Ecoulement dans la conduite :

Le but de cette partie est une illustration de toutes les étapes nécessaires pour la résolution d'un écoulement de nanofluide composé d'eau chargé avec les nanoparticules de Al_2O_3 .

Etape 1 :

Pour lancer le logiciel COMSOL, en cliques sur l'icône COMSOL sur le bureau. Lorsque le logiciel ouvre, on peut choisir d'utiliser l'Assistant Modèle pour créer un nouveau modèle de COMSOL ou modèle vierge pour créer un modèle manuellement. On clique sur le bouton modèle Assistant. Si COMSOL est déjà ouvert, on peut commencer l'Assistant Modèle en sélectionnant Nouveau dans le Fichier de menu, puis cliquez sur Model Wizard .

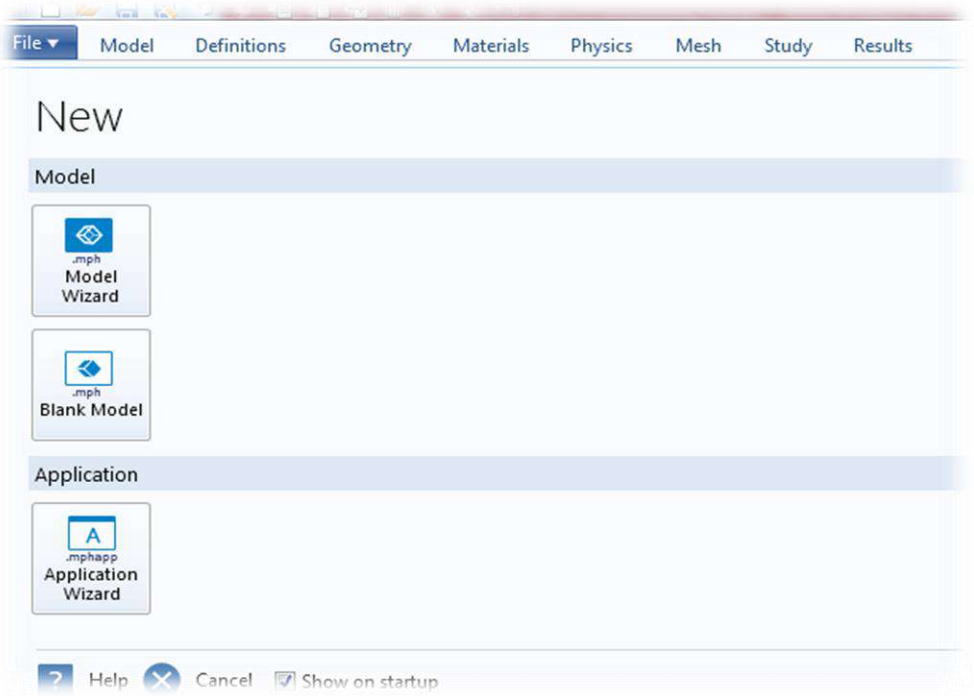


Figure III. 2 : L'Assistant Modèle de logiciel COMSOL

L'Assistant Modèle guide nous à travers les premières étapes de la mise en place d'un modèle. La fenêtre suivante permettre de sélectionner la dimension de l'espace de modélisation.

Etape 2 :

Dans cette fenêtre on commence par la sélectionner de dimension de l'espace pour notre composant de modèle : 3D, 2D Axisymmetric, 2D, 1D Axisymmetric, or 0D. Après on clique l'icône 2D Axisymmetric. Comme la montre la figure ci-dessous.

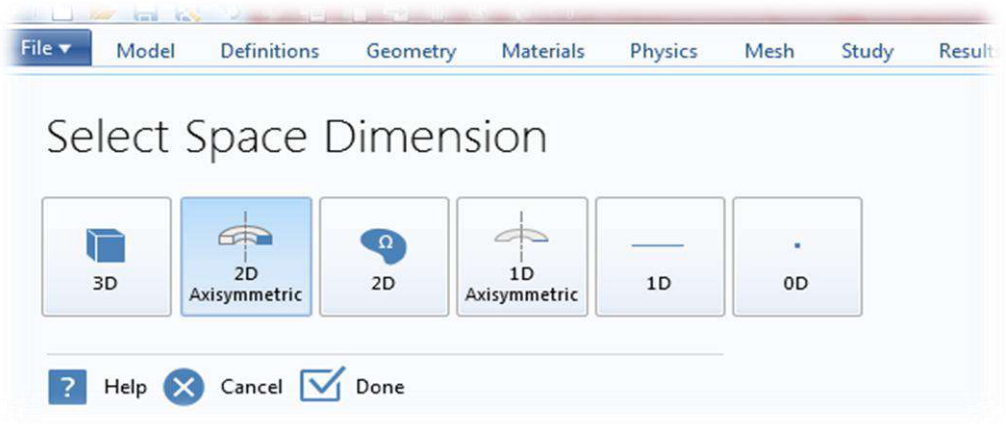


Figure III. 3: dimension de l'espace de modèle

Etape 3 :

Dans cette étape on ajoute une ou plusieurs interfaces physiques. Ceux-ci sont organisés dans un certain nombre de branches de physique afin de les rendre faciles à localiser. Ces branches ne correspondent pas directement aux produits. Lorsque les produits sont ajoutés à l'installation de COMSOL Multiphysics, une ou plusieurs branches seront remplies avec interfaces physiques supplémentaires. Dans notre mémoire on a choisie :

Fluide flow ⟶ single phase ⟶ laminar flow

Heat transfert ⟶ Heat transfert in fluid

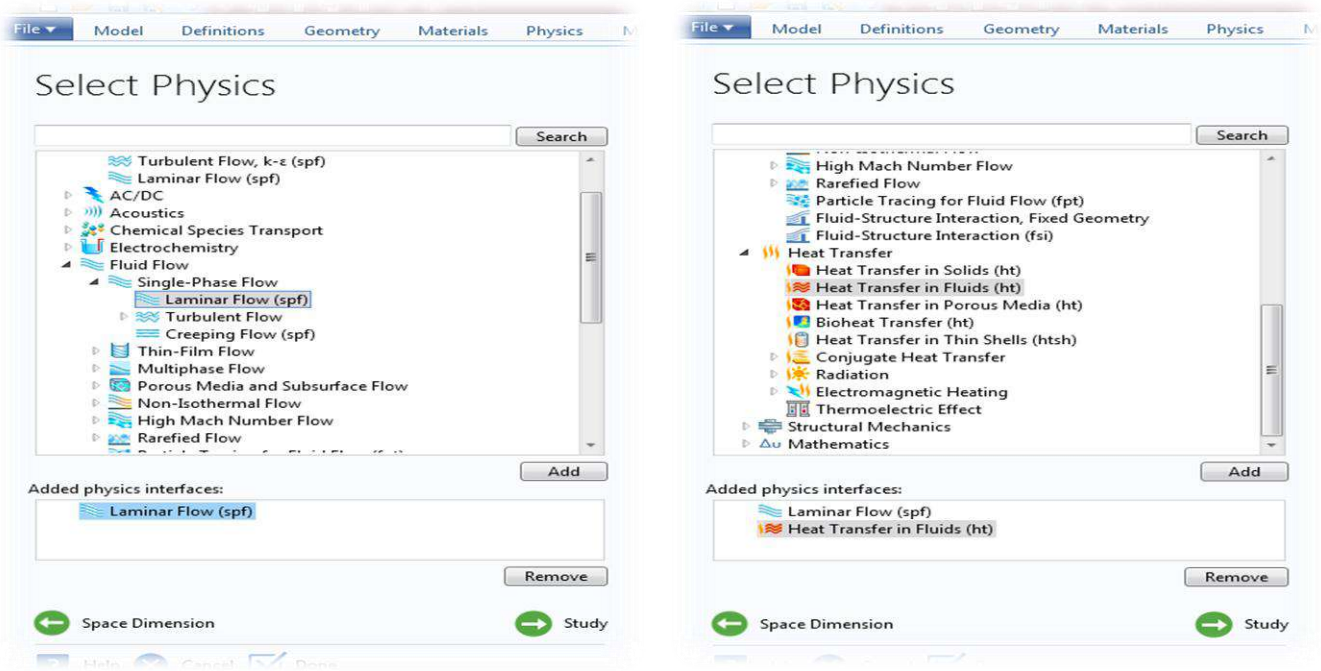


Figure III. 4 : Les interfaces physiques de logiciel COMSOL

A la fin en clique sur study pour passer à l'étape suivant.

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 stationnary

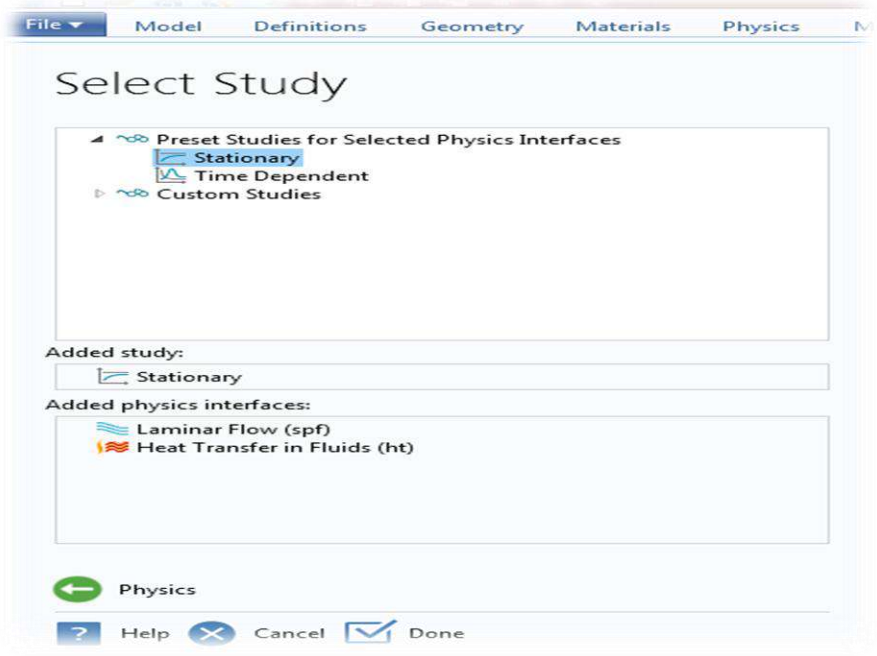


Figure III. 5 : Les types d'études

En fin cliquez sur Done. Le bureau maintenant est affiché avec l'arbre du modèle configuré en fonction des choix qu'on a faits dans l'Assistant Modèle.

Etape 5 :

Dans cette étape 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:

Une clique droite sur géométrie et on fait le choix de la géométrie parmi les choix données. 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 tube en cuivre de diamètre de 0.05(m) et de longueur de 1(m) comme la montre la figure ci-dessous

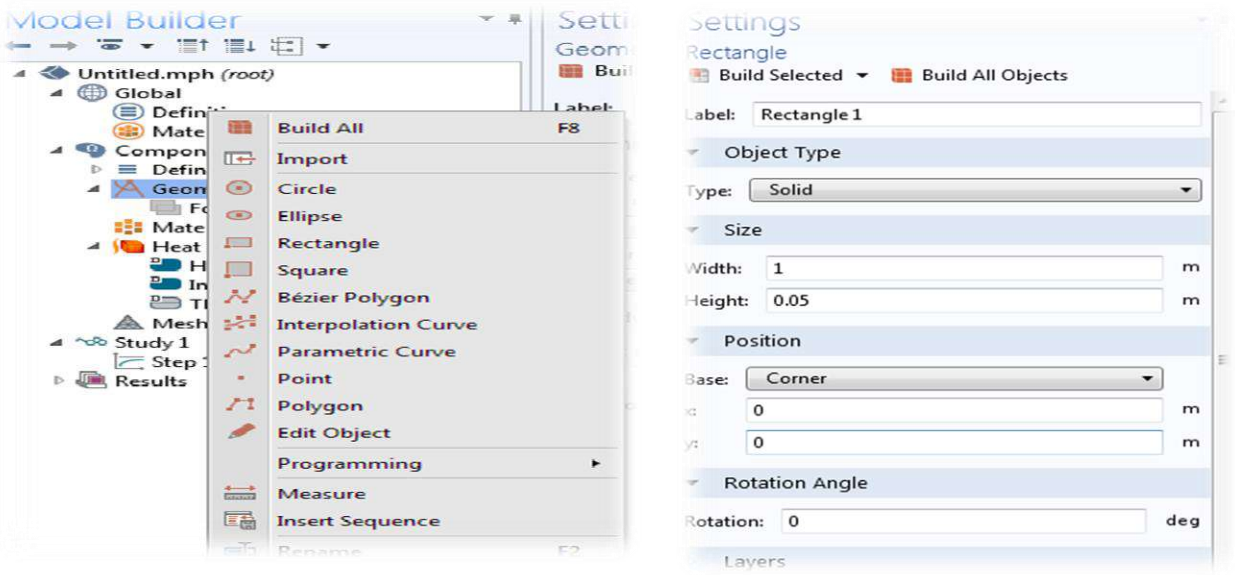


Figure III. 6 : Choix de la géométrie et la dimentionnement de la conduite

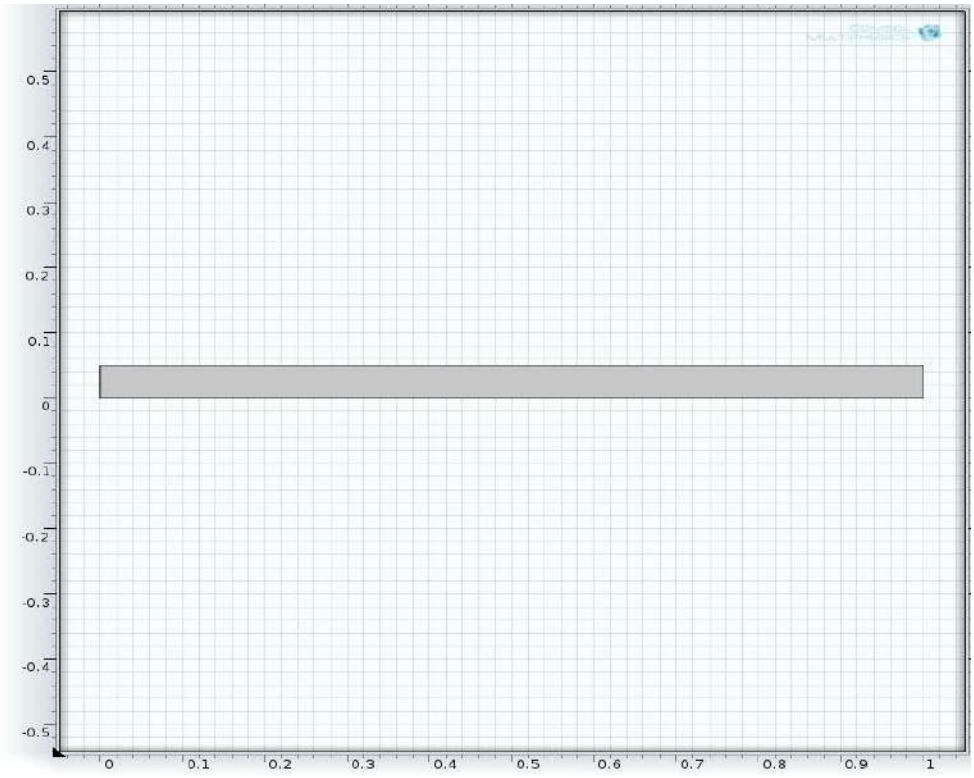


Figure III. 7 : La forme de la géométrie en 2D

B) Matériau :

Dans cette étape en fait la déclaration des matériaux nécessaires pour notre étude on a choisie l'eau comme fluide et cuivre 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.

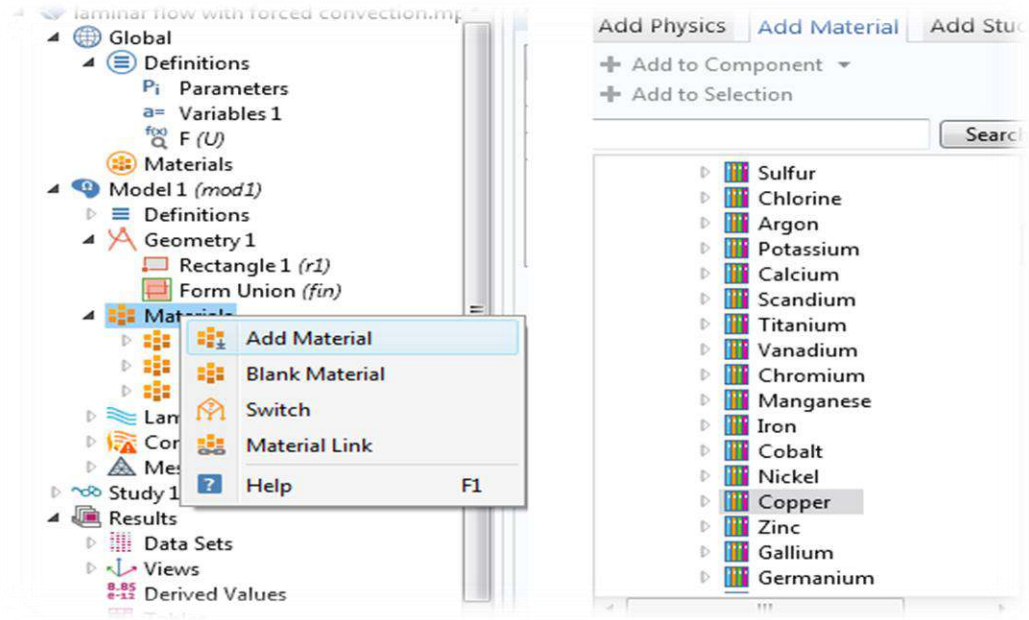


Figure III. 8: la déclaration des matériaux nécessaires pour l'étude

C) conditions aux limite (boundary conditions) :

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

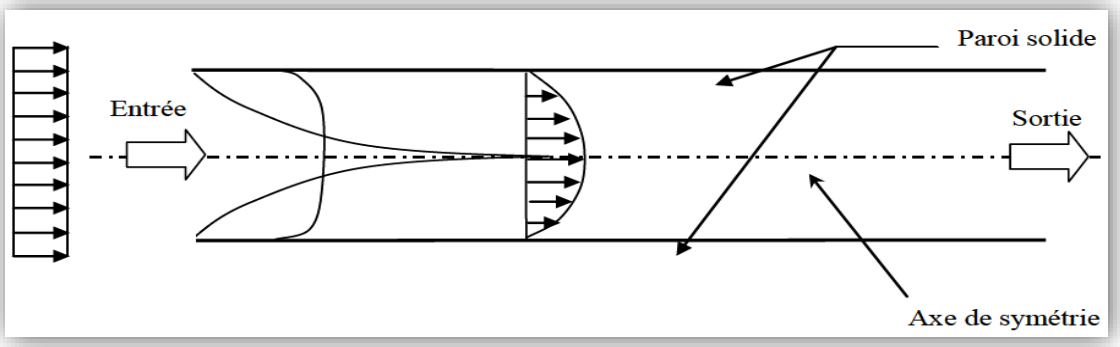


Figure III. 9 : Conduite circulaire avec Conditions aux limites [2]

Propriété de fluide :

- Ecoulement laminaire
- La vitesse d'entré $V = U_x =$ imposé,$U_y = V = 0\ m/s$.
- Symétrie $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$, V=0 m/s.
- Pression de sortie $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$, V=0 m/s.

Transfert de chaleur :

- Entrée : T =$T_{int} = 20^{\circ}C$ = 293.15K.
- Parois : T = $T_p = 50^{\circ}C$ = 323.15K.
- Symétrie : $\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$ avec $\theta = \frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty}$.

D) Mesh (maillage) :

Le maillage est une tâche très importante dans la modélisation numérique. Il s'agit de découpé l'espace en petites mailles. Il existe plusieurs formes de maillage tell que maillage carrée et triangulaire. Il est très important de savoir que plus le maillage est petit plus la solution obtenus est proche du résultat réel et ce quel que soit la forme du maillage. Dans notre étude nous avons choisi un maillage triangulaire tés fin comme le montre la figure III.10

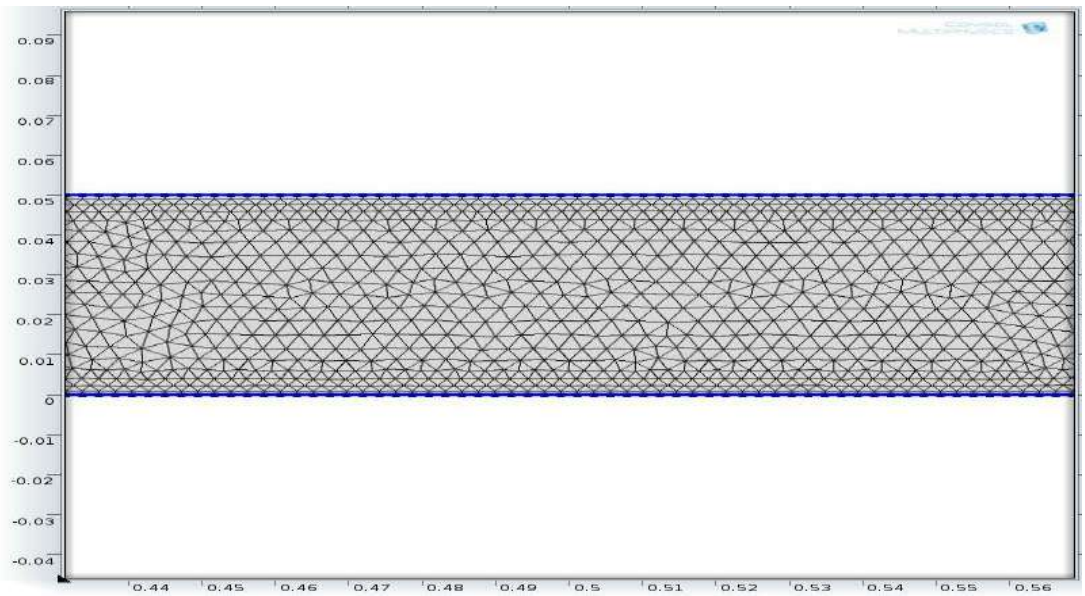


Figure III. 10 : Maillage triangulaire très fin

E) Study :

A la fin on clique sur study pour obtenir les résultats d'étude.

III.5 Résultats et interprétations :

III.5.1 Profil de vitesse :

La figure III.11 représente champs de vitesse de nanofluide (chargé de 2% de nanoparticule Al_2O_3) en écoulement le long de la conduite.

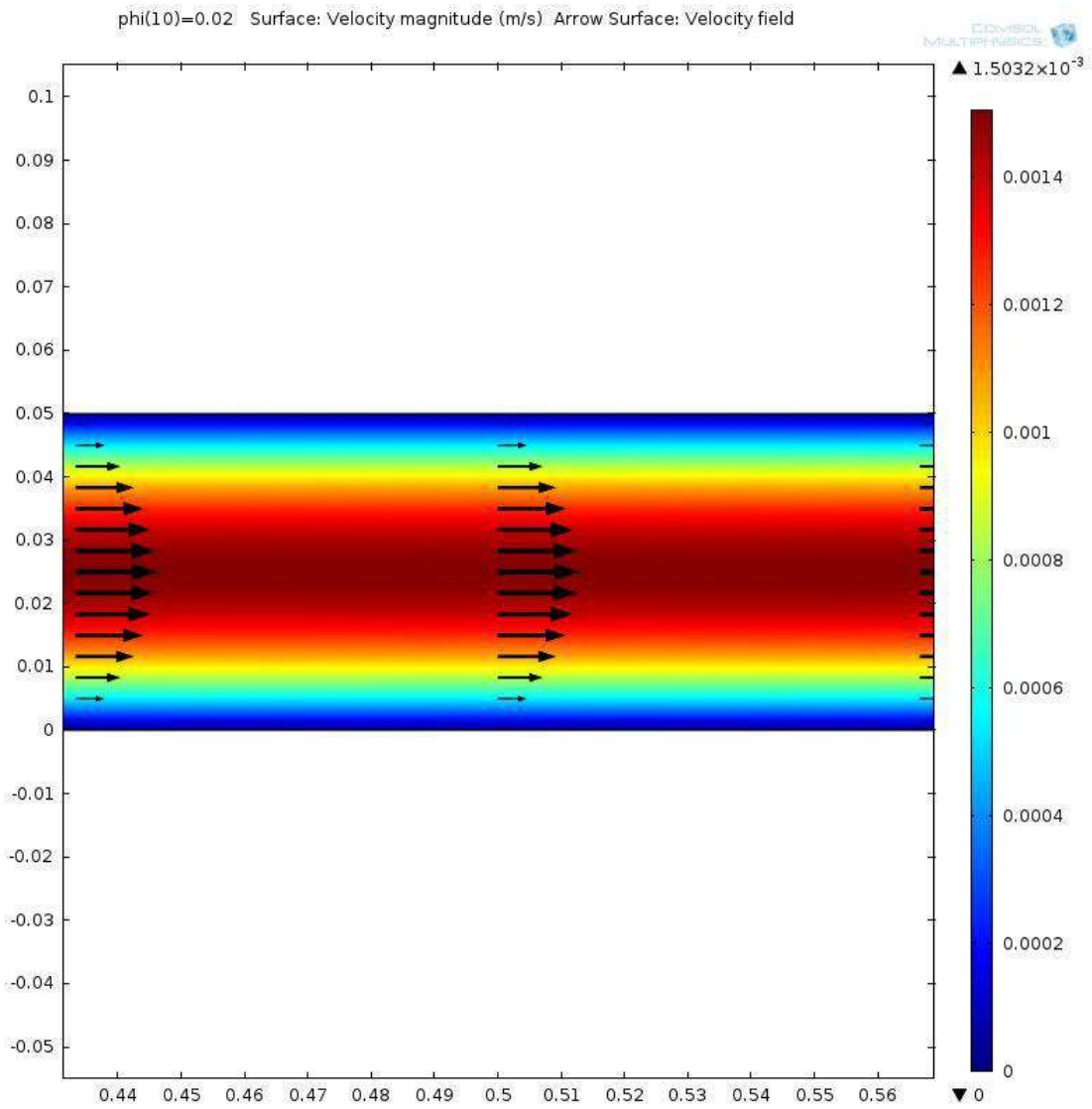


Figure III. 11 : Champ de vitesse du nanofluide en écoulement le long de la conduite

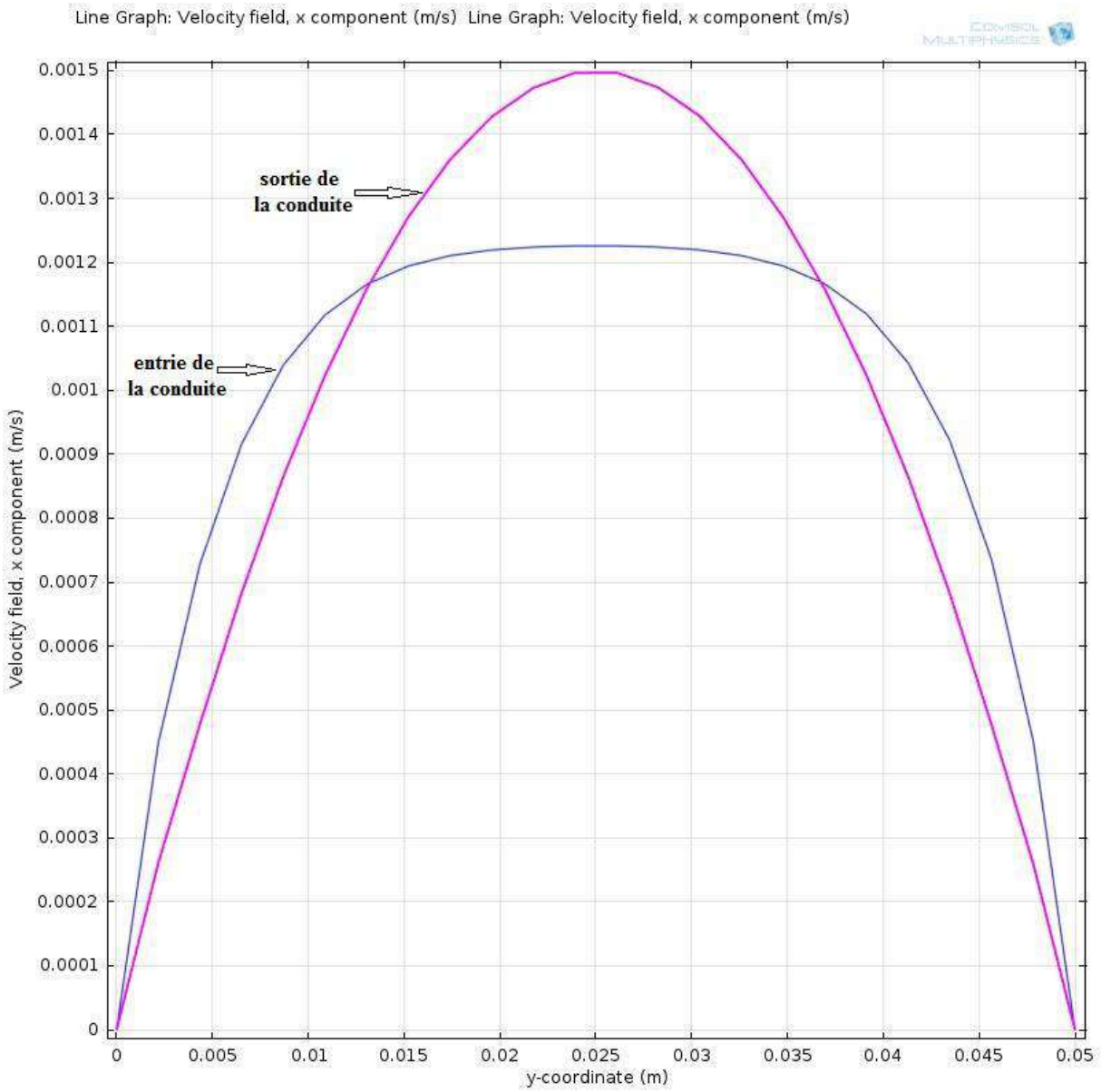


Figure III. 12: Profile radiale de vitesse de fluide (fluide de base) à l'entrée et sortie de la conduite

La figure III.12 représente l'évolution de la vitesse en fonction de diamètre de tube. Sur cette figure on aperçoit deux courbes qui mesurent la variation de la vitesse radiale du fluide de base respectivement à l'entrée et à la sortie de la conduite. A la sortie l'allure de la vitesse est parabolique. Ce résultat est en bon accord avec la théorie car l'écoulement est dans la région établit dans laquelle les couche limite formés à la paroi de la conduite sont interférées entre elles et forment un gradient de vitesse le long du diamètre de la conduite. En revanche à l'entrée de la paroi on enregistre un palier de vitesse dans la région centrale de la conduite où le gradient de vitesse est nul. Au niveau de la paroi l'adhérence du fluide à la paroi provoque

l'apparition d'une couche limite dynamique, qui tend à se développer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée de tube.

III.5.2 Profil de température :

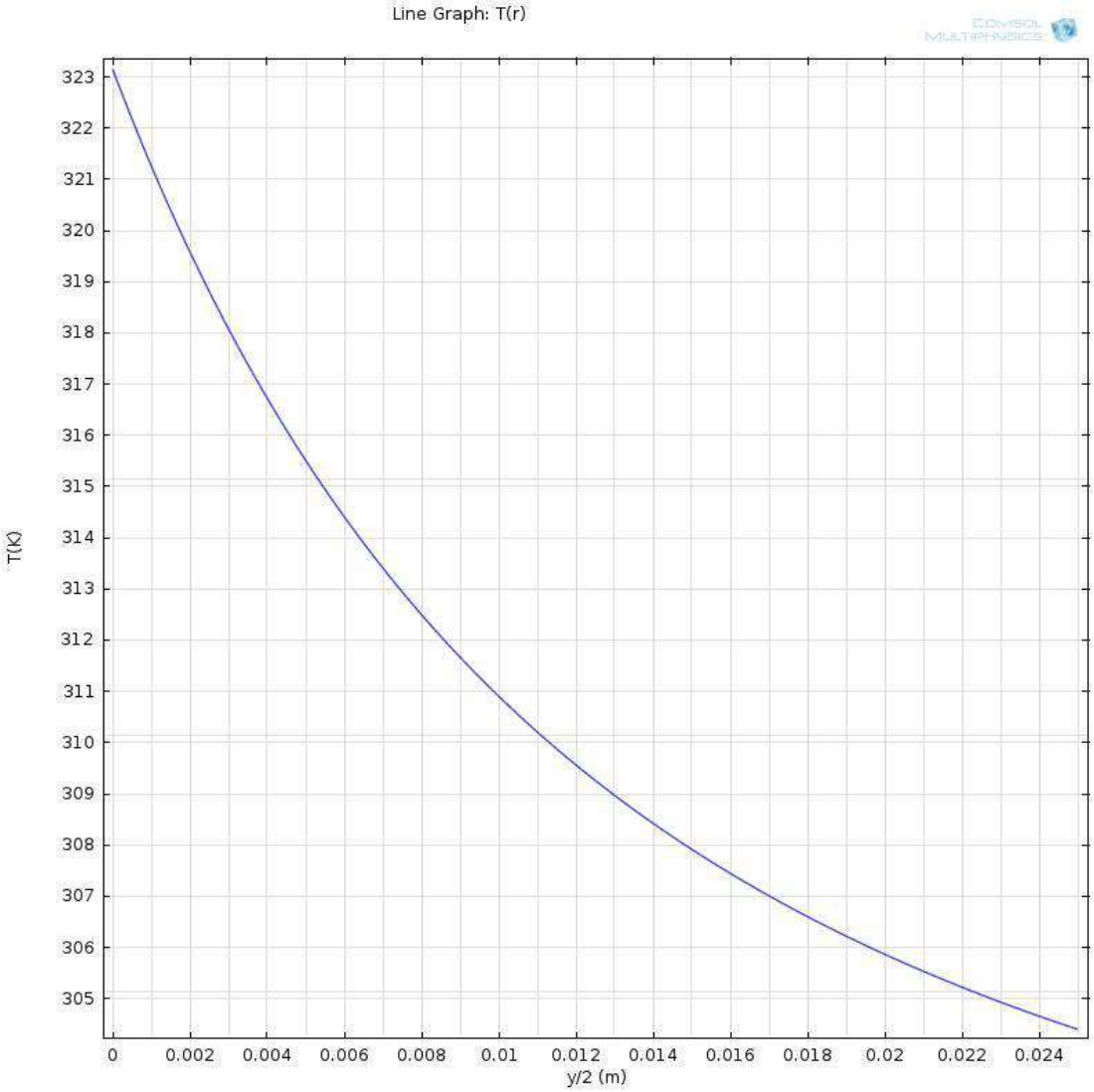


Figure III. 13: Profile radiale de température du fluide de base à la sortie de la conduite

La figure III.13 représente le profil de température qui varie en fonction de diamètre de tube d'après la figure nous trouvons que la température du nanofluide est proche de la température de la paroi qui a tendance de diminuer le long du rayon pour atteindre la valeur minimal correspondant à la température axiale du nanofluide.

III.5.3 Perte de charge :

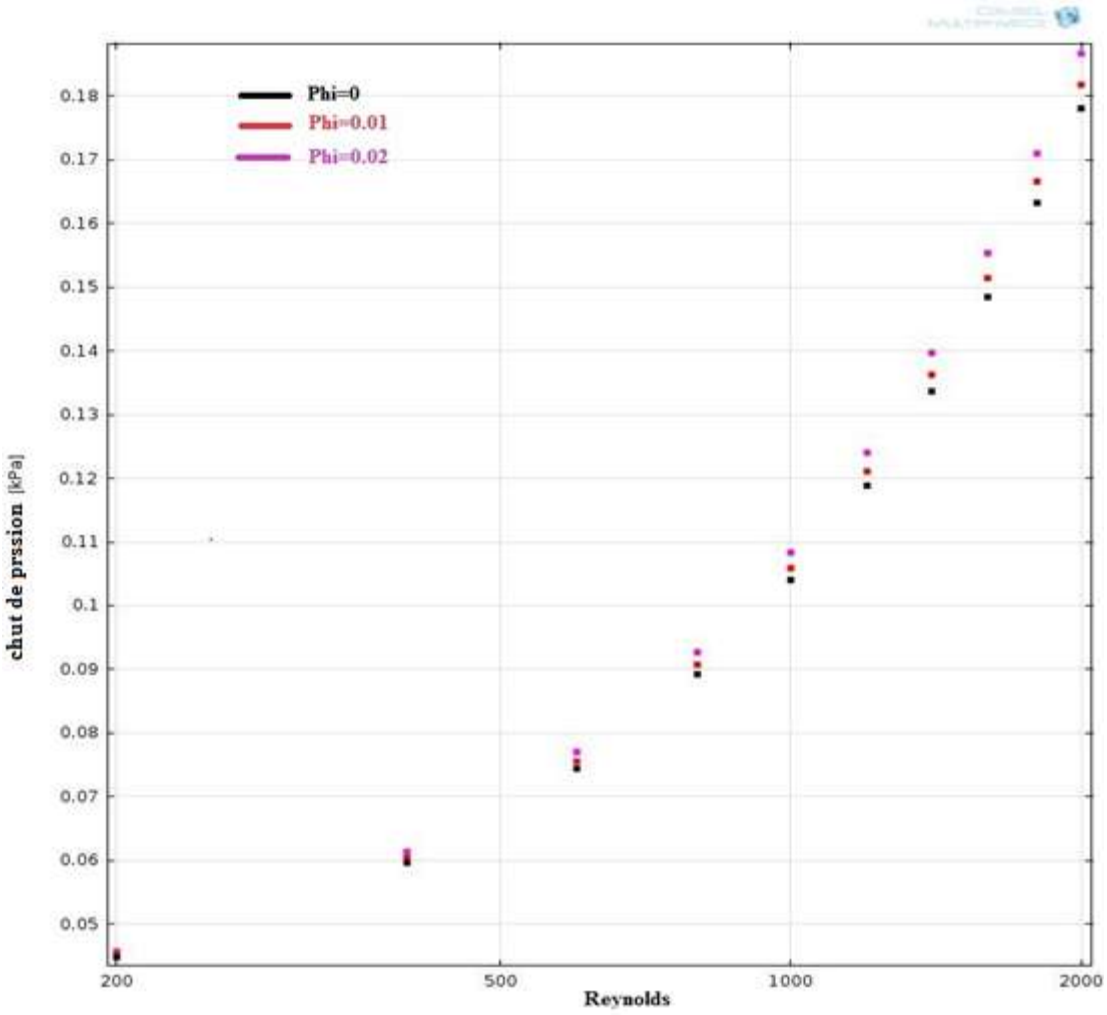


Figure III. 14: Perte de charge en fonction du Reynolds

La chute perte de charge est un paramètre très important dans les écoulements internes pour le calcul des caractéristiques des pompes pour le maintien de l'écoulement des fluides dans des conduites. La figure III.14 représente la variation de la pression du nanofluide en fonction du nombre de Reynolds pour déférentes valeurs de fractions volumiques de nanofluide (0, 0.01 et 0.02). On remarque que la perte de charge est proportionnelle au de nombre de Reynolds pour un écoulement laminaire. Plus la fraction volumique est importante plus la perte de charge devient grande. En effet l'ajout des nanoparticules entraine l'augmentation de la viscosité de nanofluide qui se traduit par l'augmentation de la valeur de la perte de charge. L'examen de la figure 14 montre que l'écart de la perte de charge de nanofluide par rapport au fluide de base (fraction =0) est négligeable à faible valeur de Reynolds. Cet écart évolue pour des Réynolds élevé. Il est à signaler que

cette évolution n'est pas assez conséquente ce qui veut dire on n'est pas obligé de changé les caractéristique de la pompe si on utilise un fluide chargé par des nanoparticules.

III.5.4 Nombre de Nu :

Le nombre Nusselt est un paramètre clé caractérisant le transfert thermique entre paroi et fluide. La figure III.15 illustre la variation du nombre de Nusselt en fonction Reynolds pour déférentes valeurs de fractions volumiques de nanofluide (0, 0.01 et 0.02). L'analyse de cette figure montre que le nombre de Nusselt est indépendant du nombre de Reynolds et ce pour différentes valeurs de la fraction volumique de nanofluide. Ce résultat est en accord avec les résultats de la littérature. En effet, concernant les écoulements internes, les mesures expérimentales conduisent à Nusselt égale à 3.66 dans le cas d'un écoulement d'un fluide classique dans une conduite maintenue à une température constante en régime laminaire.

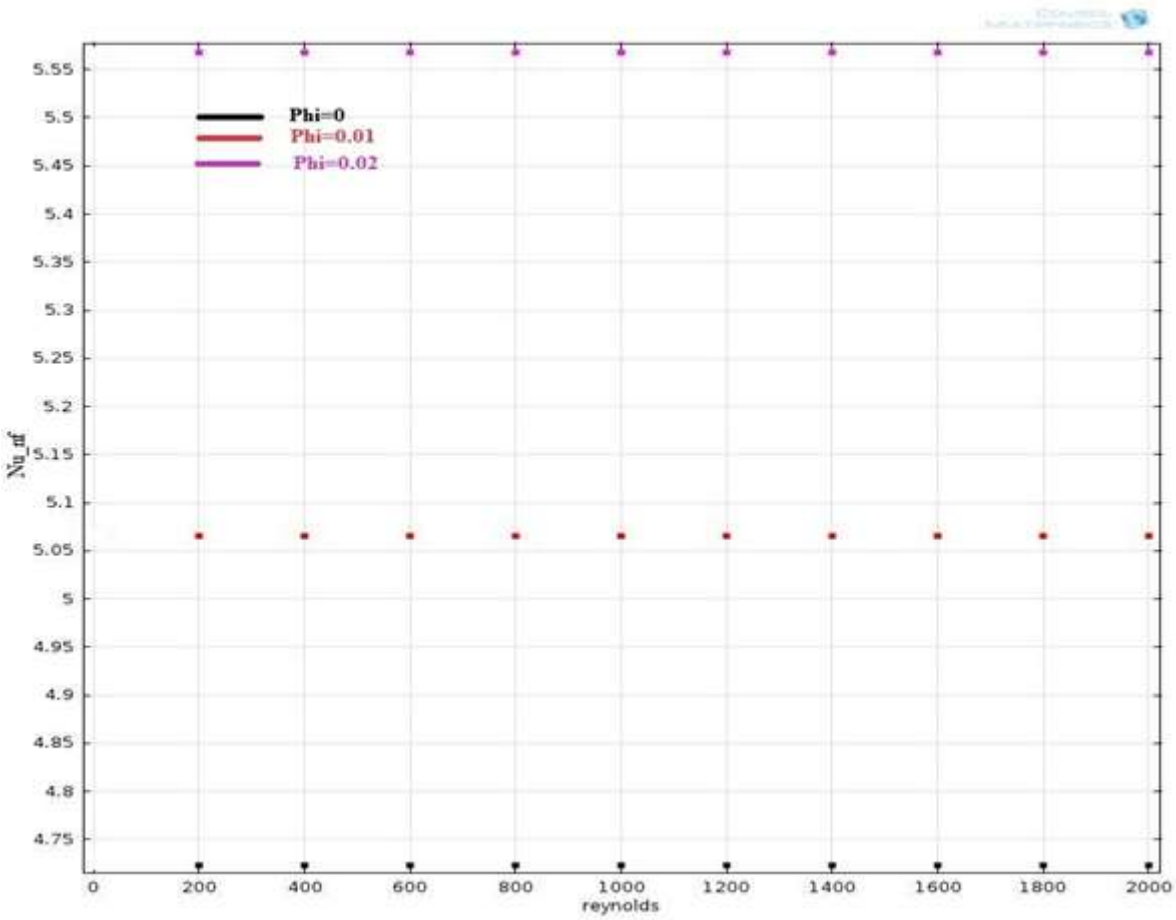


Figure III. 15:Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Reynolds pour différente valeurs de fraction volumique

En revanche, le nombre de Nusselt évolue en fonction de la fraction volumique du nanofluide et ce quel que soit la valeur du nombre Reynolds comme le montre la figure III.15 car l'ajout des nanoparticules entraine l'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide d'où l'augmentation du transfert thermique entre paroi et nanofluide. Par exemple l'échange thermique entre paroi et nanofluide chargé à 2% est de 60% plus grand par rapport l'échange thermique entre paroi et fluide de base.

Conclusion générale

Nous avons étudié le transfert convectif en régime laminaire d'un nanofluide en écoulement forcé dans une conduite circulaire et en fonction de la fraction volumique des nanoparticules d'Al_2O_3 et le nombre de Reynolds.

Par le code de calcul Comsol Multiphysics, récemment acquis par l'université de Médéa, nous avons pu évaluer la perte de charge linaire et le coefficient de transfert de chaleur convectif

Les profils de vitesse et de la température du fluide de base à l'entrée et à la sortie de la conduite ont été présentés. Ces résultats montre une similitude avec le les résultats de la théorie concernant.

L'étude hydrodynamique a montré que de la perte de charge de nanofluide varie faiblement avec la fraction des nanoparticules. Ce résultat indique que les accessoires du système de refroidissement peuvent être maintenus dans le cas du chargement du fluide par des nano particules.

Les résultats de l'étude thermique ont montré l'intérêt quant à l'utilisation ce type de fluide pour l'amélioration des échanges thermiques. En effet le nombre de Nusselt caractérisant le transfert thermique par convection est proportionnel à la fraction des nanoparticules.

On conclue que l'augmentation de la fraction volumique de nanofluide et le nombre de Reynolds peuvent améliorer la performance du transfert de chaleur convective dans une conduite d'une façon remarquable.

Ce travail est loin d'être achevé est ce n'est qu'un début pour la compréhension des phénomènes très complexe. En perspective on suggère d'étudier d'autres types de nanoparticules connues aussi par leurs efficacités thermiques en régime turbulent et dans des configurations proches de la réalité.

Bibliographie

[1] HALELFADL Salma, «Caractérisation des propriétés thermo-physiques et d'échanges de chaleur des nanofluides à base de nanotubes de carbone», Thèse de Doctorat, Génie mécanique [physics.class-ph], INSA de Rennes, sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne,le 23.06.2014.

[2] MAOUASSI Amar, «intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nanofluides», mémoire de magistère, université M'HAMED BOUGARA Boumerdes, en 2012

[3] FOHANNO Stéphane, POLIDORI Guillaume, POPA Catalan, «Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle», Journée Thématique SFT – Paris Université de Reims Champagne-Ardenne, France, le 15 mars 2012

[4] SOUFI El Habib, «Application des Nanofluides pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple», Mémoire Master Académique, Science technique Filière. Génie Des Procédés Spécialité, Génie Chimique, Université KASDI Merbah d'Ouargla le 23/06/2013.

[5] SALHI Hicham, «étude numérique de la convection naturelle dans les enceintes : nanofluide», Thèse de Doctorat en science en mécanique, Option : Energétique, Université de Batna, en 2015

[6] MENECEUR.N, «généralité sur les écoulements des fluides»

[7] MANUEL Marcoux, « Ecoulement en conduites» université Paul Sabatier – FSI L2 mécanique et mathématiques

[8] Eckert and Drake, «Isothermes autour d'un cylindre chauffé», mémoire Master 2 Génie des procèdes, Université Joseph Fourier, Grenoble, le 09 Juillet 2012

[9] HOLMAN.J. P, «Heat transfert», ninth edition, McGraw-Hill,en 2002

[10] JOHN. H, Lienhard IV, John H. Lienhard V, a « heat transfer »textbook, third edition, Phlogiston Press Cambridge Massachusetts, en 2003

[11] Sarit K. Das, Stephen U. S. Choi, Wenhua Yu, T Pradeep, «Nanofluids Science and technology», 2008, John Wiley & Sons P 210-230

[12] GARG. J, POUDEL.B, CHIESA.M, GORDON.J. B, MA J. J, WANG.J. B, REN .Z. F, KANG.Y. T, OHTANI.H, NANDA. J, MCKINLEY.G. H, and CHEN.G, «Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid», Journal of appliedphysics 103, en 2008

[13] MARE Thierry, SOW Ousmane, BAZANTAY Frédéric, LE BOURLOUT Sylvain, ROY Gilles, «Etude expérimentale des performances thermique d'un nanofluide : eau/ Al_2O_3 cas d'un échangeur à plaque à basse température», 1er congré de l'association Marocaine de thermique, Sttat (Maroc), le 6-7 Mai 2010

[14] RASHIDI. F, MOSAVARI NIZAMABAD. N, «Experimental Investigation of Convectif Heat Transfer Coefficient of CNTs Nanofluid under Constant Heat Flux», Proceedings of the world Congress on Engineering Vol III, London, U.K, in July 6-8, 2011.

[15] ADIL Ridha, «Transfert de Chaleur et de Masse», Université de Caen 2008-2009