REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Farés de Médéa

Faculté de la Technologie



Département de Génie mécanique

Filière : Génie Climatique

Option : énergie et Froid Industriel

Projet fin étude pour l'obtention de diplôme de Master

Thème :

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

Préparé par :

M. REMEL Mustapha.

Dirigé par :

Pr: ANNOUN Mohamed.

Mlle: KRIBY Saliha.

(2016/2017)

REMERCIMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur M : ***ANNOUN Mohamed****, Professeur à l'université de Médéa pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.*

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury ***M. BACHENMourad*** *président jury,* ***M.AZIZOU Mohamed & M. ALLICHE Ridha*** *membre jury pour l'intérêt qu'ils ont porté et accepté à examinai mon travail*

Je remercie également Mlle : ***KRIBY Saliha*** *pour son aide précieuse.*

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLE DE MATIERE :

Résumé

INTRODUCTION GENERALE ……2

CHAPITRE l : GENERALITE SUR LES NANOFLUIDES……3

l.1) introduction……4

l.2) Définition……4

l.3) Les nanoparticules les plus utilisé……4

l.4) Les liquides les plus utilisé……5

l.5) Les développent de nano fluide……5

l.6) L'importance des nanoparticules……6

l.7) Procéder de fabrication des nanoparticules……7

l.8) La préparation des nanofluides……7

l.9) Les propriétés thermo-physiques des nanofluides……8

l.9.1)La fraction volumique ……8

l.9.2) La masse volumique……8

l.9.3) La capacité thermique……9

l.9.4) La viscosité dynamique……10

l.9.4.1) lois théoriques……10

l.9.4.2) Etude expérimentale……11

a) Effet de la température……11

b) Effet de fraction volumique……12

c) Effet de taux de cisaillement……13

l.9.5) La conductivité thermique……13

l.9.5.1) Modèle classique……15

l.9.5.2) Modèle dynamique……16

l.10) conclusion……17

CHAPITRE ll: LE TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION AVEC LES NANOFLUIDES……18

ll.1) introduction……19

ll.2)transfert de chaleur par convection ……..19

ll.3) Le coefficient d'échange convectif h……20

ll.4) Notion de La couche limite ……20

ll.4.1) La couche limite hydrodynamique……21

ll4.2) La couche limite thermique……21

ll.5) Le régime d'écoulement……22

ll.6) les équations de la convection……23

II.6.1) Equations de la convection en régime laminaire ……23

II.6.2) Equations de la convection en régime turbulent ……24

II.7) Analyse dimensionnelle de la convection forcée ……25

II.8) Convection forcée dans des conduites en régime turbulent ……26

II-8-1) Spécificité des écoulements Internes ……27

II-8-2) Convection interne en régime turbulent ……27

II-9) Convection dans une conduite avec nanofluide ……29

II.10) Travaux antérieurs……30

II-11) Conclusion……33

CHAPITER lll :SIMULATION ET RESULTATS……34

III.1) Introduction ……35

III.2) Conduite et conditions aux limites ……35

1)Vitesse……36

2) Température……36

III.3) corrélations des propriétés thermiques et de transport du nanofluide……36

III.4) Démarche de calcul par COMSOL……36

III.4.1) Présentation du code de calcul COMSOL Multiphysics (version 5) ……36

III.4.2) Démarche pour l'exécution du projet ……37

Etape 1 lancement COMSOL et choix de la dimension……37

Etape 2 sélection de la dimension……38

Etape 3 sélection de la physique du projet……38

Etape 4 sélection de l'étude ……38

Etape 5 sélection de la géométrie et types des matériaux……39

1) Géométrie ……39

2)Choix de Matériaux conduite et nanofluide ……40

3)Conditions aux limites ……40

4) Maillage……41

5) l'exécution le projet……41

III.5) Résultats ……41

III.5.1) Profil de vitesse ……41

III.5.2) Perte de charge ……43

III.5.3) Nombre de Nu ……44

Conclusion générale……46

Référence bibliographique……47

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau (I.1) : résumé la comparaison entre des suspensions micrométriques et nanoparticules [2]……7

Tableau (I.2) : résumé les modèles classiques que déterminé la conductivité thermique pour les nanofluides [8]……15

Tableau (I.3) résume les modèles dynamiques pour déterminé la conductivité thermique effective des nanofluides [7]……16

Tableau(III.1): Propriétés du nanoparticule et l'eau……35

LISTE DES FIGURES :

Figure (I.1) : images des nanofluides vus au microscope électronique : a) éthylène glycol + cuivre à 05% ; b) eau + alumine ; c) eau + nanotubes [17]……4

Figure (I.2) : la viscosité en fonction de la température [9]……12

Figure (I.3) : la viscosité en fonction de la fraction volumique……13

Figure (II.1) Couche limite hydrodynamique et thermique……21

Figure (II.2) : les déférant régime d'écoulement, **A** : écoulement laminaire **B** : écoulement transitoir **C** : écoulement turbulent [16]……22

Figure (II-3) Profil de vitesse d'un fluide en écoulement dans un tube [26]……27

Figure (II-4) : évolution du Nusselt fonction du nombre de Reynolds [14]……30

Figure (III.1) : Conduite circulaire D= 10 cm et L = 50 cm ……35

Figure (III.2) Champ de vitesse du nanofluide en écoulement le long de la conduite……42

Figure (III.3) Profile radiale de vitesse de nanofluide 1.5% de CuO à mi distance……43

Figure (III.4): Perte de charge en fonction du Reynolds……44

Figure (III.5) : Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Reynolds ……45

Nomenclature

Symboles latins :

A, B,a et b : des constantes

Cp : La chaleur spécifique [J.Kg−1.K−1].

Dh : Diamètre hydraulique. [m]

h : Coefficient de transfert thermique par convection.[W/m².K]

L : La longueur caractéristique [m].

Nu : Le nombre de Nusselt

Re : Nombre de Reynolds.

Pr : Nombre de prandlt.

n : Facteur de forme empirique.

U : La vitesse moyenne [m/s].

$\overline{u}, \overline{T}, \overline{p}, \overline{v}$ Les quantités moyennes.

u', v', p' T' les fluctuations dues à la turbulence.

V: Volume totale [m^3].

K : énergie cinétique turbulent [$m^2.s^{-2}$]

Cf facteur de frottement

L la langueur de mélange [m]

q : le flux de chaleur [w]

Symboles Grecs :

$\boldsymbol{\rho}$: La Masse volumique [$Kg.m^3$].

$\boldsymbol{\mu}$: La viscosité dynamique [$Kg.m^{-1}.s^{-1}$].

υ : la viscosité cinématique[$m^2.s^{-1}$]

φ: Fraction volumique (%)

ε : le taux de dissipation turbulent [$m^2.s^{-3}$]

τ : le contrainte de cisaillement [Pa]

αdiffusivité thermique[$m^2.s^{-1}$]

λ : Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$].

Φ : la densité de flux[w/m^2]

Indice :

np : Nanoparticule

fb : Fluide de base

m : mélange

t : turbulent

c : critique

ملخص :

سوف نقوم في هذا العمل بدراسة الحمل القيصري للسائل نانو فلويد المكون من اكسيد النحاس والماء في نظام تدفق مضطرب داخل انبوب بواسطة برنامج محاكاة كومسول وسوف ندرس الجوانب الهيدر وديناميكية والحرارية للنظام بدلالة عدد رينولدس و بدلالة اجزاء النانو نية الحجمية .النتائج اثبتت ان النقل الحراري و الهبوط في الضغط يزدادان بدلالة عدد رينولدس واجزاء النانونية الحجمية.

كلماتالبحث:

.النانو فلويد ,الاجزاء النانو نيق,الحمل القيصري داخل انبوب, التدفق المضطرب

Résumé :

Nous avons étudié la convection forcée d'un nanofluide composé de CuO-eau en écoulement dans une conduite circulaire en régime turbulent. Par le code de calcul COMSOL Multiphysics nous avons étudié l'aspect hydrodynamique et thermique du système en fonction du nombre de Reynolds et de la fraction volumique des nanoparticules. Les résultats obtenus ont révélé que le transfert thermique et les pertes de charges dans la conduite augmente avec la fractions volumique et le nombre de Reynolds.

Mots clés: nanofluides, nanoparticules, convection forcée dans des tubes, écoulement turbulent.

Abstract :

We have studied the forced convection of a nanofluid composed of flowing CuO-water in a circular pipe under turbulent conditions. By the COMSOL Multiphysics calculation code we studied the hydrodynamic and thermal aspects of the system as a function of the Reynolds number and the volume fraction of the nanoparticles. The results obtained showed that the heat transfer and the pressure losses in the pipe increases with the volume fraction and the Reynolds number.

Keywords: nanofluids, nanoparticles, forced convection in tubes, turbulent flow.

Introduction générale

Le refroidissement performant est un besoin plus importants dans de nombreuses applications technologiques et industrielles. Il bien connu que les fluides caloporteurs classiques comme (l'eau, l'huile, l'éthylène glycol ….) utilisés dans les systèmes de refroidissement sont moins efficaces car leurs capacités et conductivités thermiques sont faibles et par conséquent leurs aptitude d'absorber l'excès de la chaleur reste insuffisante.

C'est pourquoi les chercheurs et les ingénieures ont fournie beaucoup d'effort pour la proposition des techniques dans le but d'améliorer les performances thermiques des systèmes de refroidissement. Cela signifie de jouer sur les coefficients thermiques (λ, h).

La technique classique consiste à augmenter la surface d'échange mais s'est avérée qu'elle est encombrante et couteuse. Une autre technique plus au moins ancienne consistait à utiliser des suspensions contenant des particules de taille millimétriques mais cette dernière présentait un inconvénient technique relatif à la stabilité de la suspension à cause du poids particule et peut facilement endommager le système de pompage.

Durant ces dernières années avec le développement de la nanotechnologie un nouveau concept apparait qui consiste à préparer des particules métalliques ou non métalliques ayants des dimensions nanométriques entre 1 et 100nm (chose qui n'était pas possible antérieurement). Ces nanomatériaux peuvent être dispersés dans un liquide pour former un nanofluide stable ayant d'excellentes propriétés thermiques

C'est pourquoi dans ce projet on s'est intéressé à étudier le transfert convectif en régime turbulent d'un nanofluide s'écoulent dans une conduite. A travers cette étude on va montrer l'utilité des nanofluides dans le système de refroidissement.

Ce travail s'articule autour de trois chapitres

Dans le premier chapitre on va présenter des généralités sur les nanofluides: types de nanoparticules et types des solvants. Dans ce chapitre, nous exposons aussi les différentes corrélations les plus souvent utilisés dans la littérature pour la détermination des propriétés thermiques et de transport des nanofluides.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'aspect thermique et hydrodynamique de la convection forcée dans des tubes avec les nanofluides. Des travaux antérieurs qui nous ont paru très utiles pour notre étude seront présentés à la fin de ce chapitre.

Dans le dernier chapitre on présentera la méthodologie et toutes les étapes de la simulation par COMSOL et les résultats obtenus. On finira par une conclusion générale.

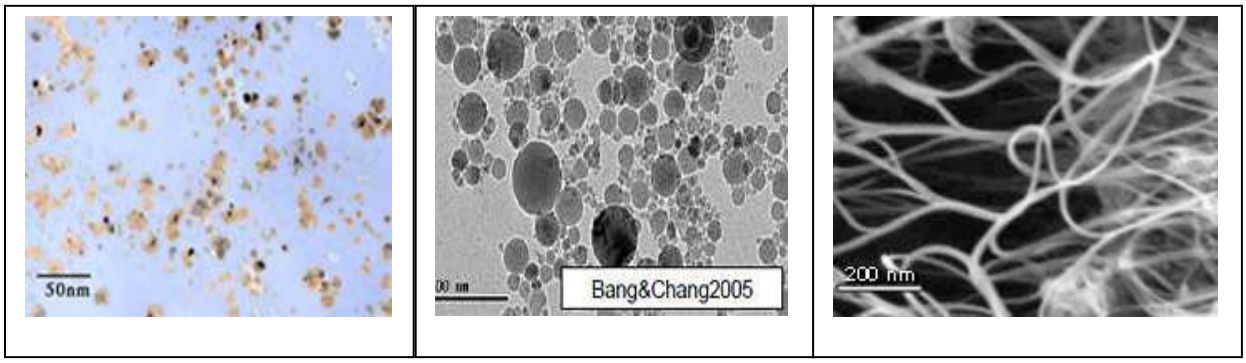
CHAPITRE l : GENERALITES SUR LES NANOFLUIDES

I.1Introduction :

Lesnanofluidessont considérés comme étant des nouvellesclasses des fluides caloporteurs connus par leurs aptitudes d'améliorer le transfert thermique entre paroi et fluide c'est pourquoi dans ce chapitre on va rapporter les éléments d'informations relativesà la définition et aux propriétés thermophysiques de ce type de fluide et leurs comportements vis avis les conditions thermiques imposées par les conditions opératoires. Ces informations sont très utiles pour la compréhension des phénomènes de transports et la modélisation de transfert thermique.

I.2 Définition :

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de nanoparticules,métalliques et non métalliques, en suspension dans unliquide pur telle que l'eau, les huiles, l'EthylèneGlycol…, etc. La présence des nanoparticules dans desfluides de base entraine l'augmentation deleur conductivité thermique [16].



ab c

Figure I.1 image des nanofluides vus au microscope électronique : a) éthylène glycol + cuivre à 0,5 % ; b) eau + alumine ; c) eau + nanotubes [20].

I.3 Les nanoparticules les plus utilisé :

Dans la pratique il existe plusieurs type de nanoparticules utilisées dans le domaine de l'industrie on site:

- Les nanomatériaux chimiques stables(l'or, cuivre…),
- Oxydes métalliques (Aluminium, silice, zirconium.),

- Oxydes céramiques (oxydeAluminium, oxyde cuivre),
- Les Carbures métalliques (Carbure de silicium),
- Des nitrures métalliques (par exemple, nitrure de Aluminium, nitrure silicium),
- Carbone dans différentes formes (Diamant, graphite, nanotubes de carbone, fullerène). [7]

I.4 Les liquide de base les plus utilises :

Parmi les liquides porteurs plus couramment utilisé pour la préparation des nanofluides on cite: L'eau, les liquides organiques tels qu'Éthylène, triéthylène-glycol, les huiles, les lubrifiants, les biofluides etles solutions polymères.Dansles systèmes de refroidissement le liquide le plus employé est l'eau à cause de son abondance, son prix et non polluant.[4]

I.5 Le développement desnanofluides :

Dans le XVIII siècle(1873) MAXWELL a montré l'intérêt des fin particules pour l'amélioration de la conductivité thermique des suspensions. Depuis cette date, des chercheurs et des ingénieurs ont fait des efforts considérables pour mener des études théoriques et expérimentalesà fin d'améliorer la conductivité thermiquepour les fluides classiques à l'aide des particules solides de taille millimétrique et micrométrique versés dans un liquide, cette technique provoque des problèmes technique telle que :

- La précipitation rapide dans le canal,
- Provocation d'érosion dans les pompes.
- La suspension ne fonctionne pas avec des dispositifsminiaturisés [5]

La nanotechnologie moderne peut produire des nanoparticules métalliques ou non métalliques avec des tailles inferieure à 100nm. Les propriétésmécaniques, optiques, électriques, magnétiques, thermiques des nanoparticules sont supérieure à celles des matériaux de taille millimétrique et micrométrique [5].

CHOI[5] est parmi le premier ingénieur qui a conçu le nouveau concept des nanofluides, en faisant des efforts pour démontrer les efficacités des nanoparticules suspendu dans un liquide, lors d'une réunion en 1995 aux USA (American Society of

MechanicalEngineers).Ila présenté une possibilité remarquable pour doubler le coefficient de transfert de chaleur par convection à l'aide des propriétés des nanofluides au lieud'augmenté le coefficient de pomper 10 fois [5]. Beaucoup de chercheurs se sont inspiré des travaux de CHOI et les travaux de recherche sont menés jusqu'à ce jour pour la compréhension des phénomènes physicochimiques des suspensions pour la préparation des nanofluides stables et efficace pour la dissipation de la chaleur.

1.6 L'importance des nanoparticules :

La taille des nanoparticules est une variable physique importante pour les nanofluides. L'utilisation desgrosses particules pour la préparation des suspensions fluides génères des problèmes très difficile à contourner et cause des problèmes indésirables pour le bon fonctionnement des équipements destinés à cet effet on cite par exemple: la précipitationrapide dans les canaux, l'abrasion et le colmatage desorganes, sont des problèmes hautement indésirables pour de nombreuses applications [5].

Les nanofluidesprésentent un avantagequant à l'éliminationdes problèmes précédemment cités. En effet, avec une bonne stabilité des particules dans unliquide, Nous allons faireune comparaison entre les nanoparticules et les microparticules. Cette comparaison fait ressortir l'importance des nanoparticules qui est illustré dans le tableau suivante [5].

Tableau (I.1) : résumé la comparaison entre des suspensions micrométriques et nanoparticules[5].

Propriétés	**Micro**	**Nano**
Stabilité	Précipité	Stable
Surf/volume	1	1000
La conductivité pour une même fraction volumique	petite	Elevé
Blocage des micros machine	oui	Non
Erosion	oui	Non
Puissance de pompage	beaucoup	Petite

I.7 Procédés de fabrication des nanoparticules :

Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories :

- les procédés physiques, comme le broyage mécanique, la condensation de gaz interne et développé (par GRANQVIST et BUHRMAN 1976)
- les procédés chimiques, comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique et le dépôt chimique en phase vapeur. [5][21]

I.8 Lapréparation des nanofluides :

Il existe principalementdeux méthodes couramment connues pour la préparation des nanofluides : La méthode qui consiste en étape et la méthode en deux étapes.

- La méthode en une seule étape consiste à vaporiser le matériau solide sous vide, puis procédé à sa condensation directe dans le liquide porteur.

- La méthode en deux étapes consiste d'abord à la fabrication d'une nanopoudre sèche et ensuite procédé au mélange et à sa dispersion dans le liquide porteur.[5][20]

I.9 Les propriétés thermo-physiques des nanofluides :

Les propriétés thermophysiques sont des propriétés matérielles affectant le transfert et le stockage de la chaleur [22]. Lesprincipales propriétés thermophysiques desnanofluides qui jouent un rôle important pour la dissipation de la chaleur sont les suivantes:

- La conductivité thermique,
- La masse volumique,
- La viscosité dynamique
- La chaleur spécifique …etc.

Ces principaux propriétés sont influencées par la fraction des nanoparticules et la nature du liquide.

I.9.1 La fraction volumique :

Dans unesuspension la fraction volumique notéeϕestdéfini comme étant le rapport de volume de nanoparticule sur le volume totale. C'est une grandeur sans dimension (%) ets'exprime par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{Vp}{Vf+Vp} \text{(I.1)}$$

I.9.2 La masse volumique :

La masse volumique d'un nanofluide s'exprime par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right) nf = \frac{m_f+m_p}{V_f+V_p} \text{(I.2)}$$

Aprèsréarrangement algébrique on obtient :

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

Avec :

$\rho_f$désigne la masse volumique de fluide de base et $\rho_p$représente la masse volumique de nanoparticules.

L'équation (1.3) présenté par PAK et CHO [3]

I.9.3 La capacité thermique :

La capacité thermique volumique ou chaleur volumique d'un matériau est sa capacité à emmagasiner la chaleur par rapport à son volume. C'est le produit thermique massique est noté directement (ρ C_p) en exprimé par [j. m^{-3} .K^{-1}][17].L'expression de la capacité thermique est déduite à partir de l'équation de l'énergie thermique ci-dessous:

$$Q = \rho Cp V \Delta T \text{(I.4)}$$

D'après l'équation (1.4) on obtient:

$$(\rho Cp)_{nf} = \frac{Q_{nf}}{V_{nf}\,\Delta T} = \frac{(\rho Cp)_p \times V_p \times \Delta T + (\rho Cp)_f \times V_f \times \Delta T}{(Vp+Vf)\Delta T} \text{(I.5)}$$

$$= \frac{(\rho Cp)_p \times Vp}{Vp+Vf} + \frac{(\rho Cp)_f \times Vf}{Vp+Vf} \text{(I.6)}$$

$$(\rho Cp)_{nf} = (\rho Cp)_p \varphi + (1-\varphi)(\rho Cp)_f \text{(I.7)}$$

En déterminé la chaleur spécifique Cp :

$$(Cp)_{nf} = \frac{(\rho Cp)_p \varphi + (1-\varphi)(\rho Cp)_f}{\rho_{nf}} \text{(I.8)}$$

Après remplacement et réarrangement on obtient

$$(Cp)_{nf} = (1-\varphi)(Cp)_f + \varphi(Cp)_p \text{(I.9)}$$

L'équation (1.8) voir le référence [10] et (1.9) représenté par PAK et CHO [3].

Les indices P et f désignent respectivement particules solides et le fluide de basse

I.9.4 La viscosité :

La viscosité **μ** est une propriété d'un fluide due à la cohésion et à l'interaction entre les molécules qui présentent une résistance aux déformations[20]. Les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. La viscosité est définie par la relation de Newton :

$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$(I.10)

Avec :

τ: Lacontrainte de cisaillement,

μ : La viscosité dynamique,

dv/dy: Le taux de cisaillement.

I.9.4.1 Lois théoriques :

La viscosité des nanofluides est une propriétéstrès sensible et difficile à déterminer car elle dépend de plusieurs paramètre tel que (: a température, la fraction volumique, la taille et la forme des particules, la méthode de dissipation et vitesse de cisaillementetc..),

C'est pourquoi dans la littérature on trouve plus de 22 expressions exprimant la viscosité en fonctions des paramètres opératoires(pour plus de détail voir la référence [12]). Malheureusement, aucune de ces expressions estcapable de prédire la valeur exacte de la viscosité dunanofluide. [12]

Toutefois, parmi ces expressions nous retiendrons trois expressions les plus utilisés dans la littérature il s'agit :

- ***Relations d'Einstein:***

EINSTEIN EN1906 a proposé une équation pour la détermination de la viscosité de suspension diluée contenant des particules solide sphérique à faible concentration volumique dans un fluide newtonienne:

$$\mu_{nf} = \mu_f(2.5\varphi + 1) \Rightarrow \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (2.5\varphi + 1) \text{(I.11)}$$

Cette loi est valable pour ϕ<0.02 [12]

- ***Relations de Brinkman:***

BRINKMAN en1952, proposa une équation empirique pour une concentration volumiqueinférieureà 4 % qui s'exprime [12] :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (1 - \varphi)^{2.5} \text{(I.12)}$$

- ***Relations de Batchlor:***

BATCHELOR en1972 a modifié l'équation d'Einstein en introduisant l'effet de mouvement brownien qui s'exprime par[12]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (6.5\varphi^2 + 2.5\varphi + 1) \text{(I.13)}$$

I.9.4.2 Etudes expérimentales :

L'étude expérimentale est très importante pour l'analyse et la validation des modèles théoriques proposés par les chercheurs, Plusieurs expériences montrent que la température, la fraction volumique et la contrainte de cisaillement sur la viscosité ont des impacts directs sur la viscosité des nanofluides [12]

a- Effet de la température :

L'équation de Andrade (Eq I.14), qui exprime la variation de la viscosité en fonction de la température, indique globalement que la viscosité a tendance de diminuer avec l'augmentation de la température [12]

$$\log \vartheta = A + \frac{B}{T} \text{(I.14)}$$

Avec : U la viscosité cinématique, T la température, A et B des constante.

en effet, Namburuet all. Ont rapporté que l'augmentation de la température diminue la viscosité des nanofluides sur une plage de température de -35 à 50 ° C .La même tendance a été observé par Ferrouillat et alllors d'une étude expérimentale sur des nanoparticules SiO_2 et ZnOdans l'eau dans une plage de température de 20 à80 ° C. Ils ont trouvé que la viscosité a diminué avec une augmentation de température comme montré la Figure I.1. Mais d'autre chercheure comme PRASHERet CHEN ont montré expérimentalement que dans le cas des nanofluides à base des nanoparticules de Al2O3 et TiO2 la viscosité est indépendante de la température entre 20°C et 60°C [12]

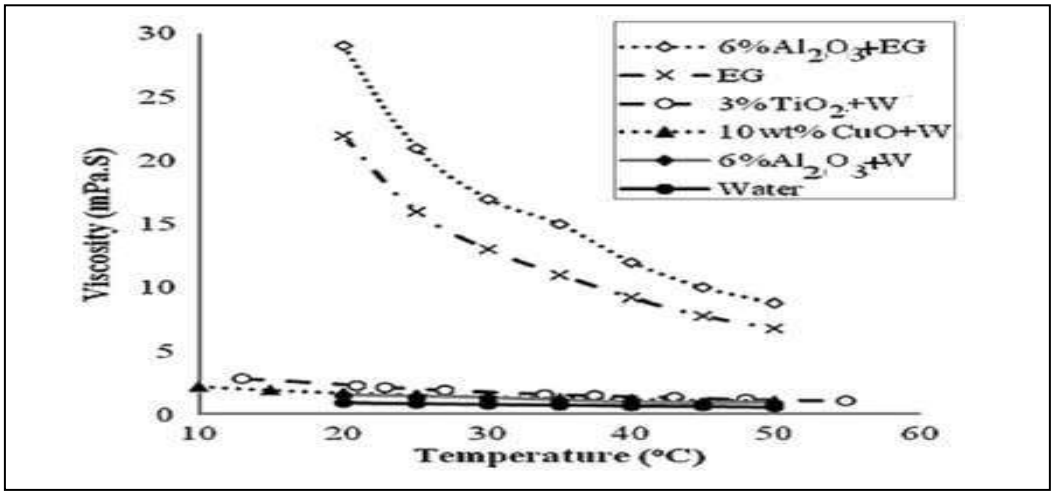


Figure I.2 : Variation de la viscosité en fonction de la température.[12]

b- Effet de la fraction volumique :

Plusieurs travaux citée dans la littérature traitent l'effet de la fraction volumique sur la viscosité par rapport au fluide de base. Parmi ces travaux on cite:

PRASHER et all ont observé que la viscosité des nanofluidesà base l'Alumine dans l'eau augmente avec la fraction volumique des nanoparticules.[12]

Le même résultat a été observé par DAS et all (voir Figure I.3) concernant leurs étude sur le comportement newtonien des nanofluides d'alumine-eau entre 1 et 4%. Les résultats obtenus confirment les résultats ultérieurement observés. [9]

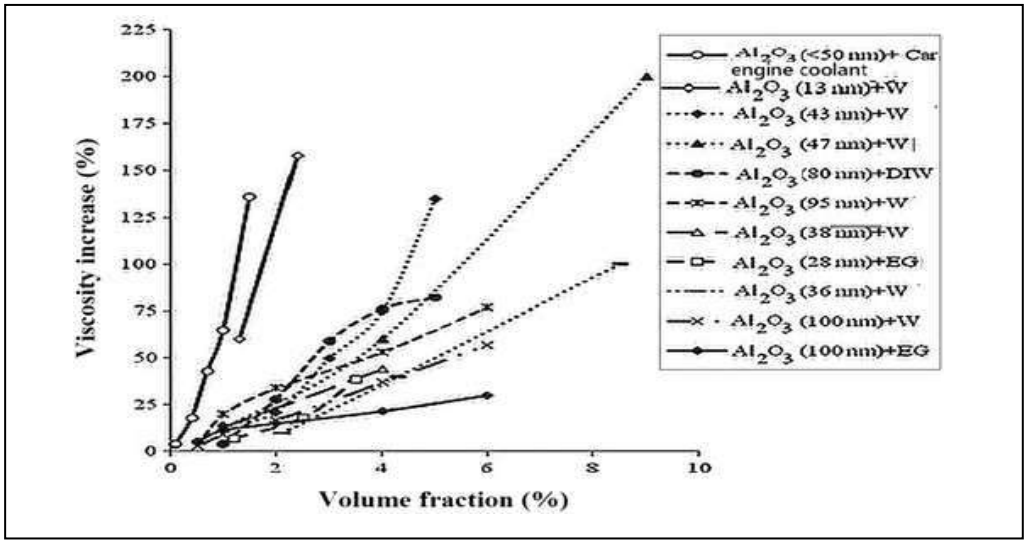


Figure I.3 : Effets de la fraction sur la viscosité [12]

C- Effets du taux de cisaillement :

La contrainte de cisaillement joue un rôle important pour distinguer les nanofluidesdes fluides newtoniens et non newtoniens. NAMBURU et AL ont montré que les nanoparticules de CuO dans l'eau et l'éthylène glycol se comportaient comme des fluides newtoniens.[12]

En revanche, Les nanoparticules de cobalt dans les mêmes fluides de base présentaient un comportement non newtonien [12]

ABARESHI et AL ont remarqué que le nanofluide de Fe_2O_3 -glycérol présentait un comportement rhéo-fluidification.[9]

I.9.5 Conductivité thermique :

La conductivité thermique et parfois nommé conductibilité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors de transfert thermique par conduction noté λ. Elle est définie par la loi de Fourier :

$$\Phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \text{(I.15)}$$

Avec :

Φ: La densité de flux,

λ : La conductivité thermique

dT/dx : Le gradient de température selon l'axe x

Les expériences sur les nanofluides ont indiqué que les ajouts de petite fraction volumique de nanoparticules dans le fluide de base ont un impact significatif sur la conductivité thermique du fluide. Il existe deux modèles pour déterminé la conductivité thermique des nanofluides. Le modèle classique qui suppose que les nanoparticules sont fixe dans le fluide c'est-à-dire le mouvement aléatoire de les nanoparticules au sein de liquide est négligeable et le modèle dynamique prenant en comptele mouvement brownien [11].

1.9.5.1 Modèles classiques

Dans le tableau I.2 nous avons présentés les expressions empiriques de la conductivité thermique des nanofluides basés sur le modèle classique et les conditions de leurs utilisations

Tableau I.2 : Equations de la conductivité thermique des nanofluide modèle classique [11]

modèles	expressions	remarque
maxwell	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = 1 + \frac{3(\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} - 1)\varphi}{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} + 2\right) - (\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} - 1)\varphi}$	Particules sphériques
Hamilton-Crosser	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = 1 + \frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} + (n-1) - (n-1)(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}})\varphi}{\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} + (n-1) + (1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}})\varphi}$	n= 3 pour les sphères *n*= 6 pour les cylindres
jeffery	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = 1 + (3\left(\frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} - 1}{\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} + 2}\right)\varphi + 3\left(\frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} - 1}{\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} + 2}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} - 1}{\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} + 2}\right)^2 \ldots)\varphi^2$	Particules sphériques
Davis	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = 1 + \frac{3\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} - 1\right)\varphi}{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} + 2\right) - \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}} - 1\right)\varphi}(\varphi + f\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}}\right)\varphi^2 + O\varphi^3$	Les termes d'ordre supérieur représentent l'interaction par paire de la sphère

		dispersée à l'aléatoire
Ln-lin	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = 1 + \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{fb}}\right)\varphi + b\varphi^2$	Particules sphériques et non sphériques

I. 5.2 Modèles dynamiques :

Les expressions empiriques de la conductivité thermique des nanofluides déduites du modèle dynamique sont représentées dans le tableau I.3

Tableau l.3 : Equations de la conductivité thermique des nanofluide modèle dynamique [10]

Modèle	expressions	remarque
Xuan et al.	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_f + 2\varphi_p(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \varphi_p(\lambda_f - \lambda_p)} + \frac{\rho_p \varphi_p c_p}{2\lambda_f}\sqrt{\frac{\lambda_b T}{3\pi r_c \mu}}$	Comprend l'effet du mouvement aléatoire, la taille des particules, la concentration et la température
Jang et Choi	$\lambda_{nf} = \lambda_f(1 - \varphi_p) - \lambda_p\varphi_p + 3c\frac{d_f}{d_p}\lambda_f Re_{dp}^2 pr\varphi_p$	La collision des nanoparticules due au

		mouvement brownien est négligée
Prasher Et al.	$\lambda_{nf} = \left(1 + ARe^{m} Pr^{0.333} \varphi_p\right) \times \left[\frac{\lambda_p + 2\lambda_f + 2\varphi\left(\lambda_p - \lambda_f\right)}{\lambda_p + 2\lambda_f - \varphi_p\left(\lambda_p - \lambda_f\right)}\right] \lambda_f$	Comptes de convection par le mouvement brownien à partir de multiples nanoparticules
Koo et Kleinstreuer	$\lambda_{nf} = \lambda_{static} + \lambda_{browinenne} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_f + 2\varphi_p\left(\lambda_p - \lambda_f\right)}{\lambda_p + 2\lambda_f - \varphi_p\left(\lambda_p - \lambda_f\right)} \lambda_f + 5 \times 10^4 \beta \varphi_p \rho_p c_p \sqrt{\frac{\lambda_b T}{\rho D}} f\left(T, \varphi_p\right)$	Considéré le liquide déplacé avec des nanoparticules en mouvement aléatoire
Chon Et al.	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = 1 + 64.7 \varphi_p^{0.74} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369} \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f}\right)^{0.747} \times Pr^{0.9955} Re^{1.2321}$	Le numéro de Reynolds est basé sur la vitesse de mouvement brownienne

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini les nanofluides et présenté les techniques couramment utiliséspour la préparation de ce type de fluide Nous avons aussi donné un aperçues détaillé sur les propriétés de transports des nanofluides. Ces propriétés sont trés importantes pour la modélisation de la convection pour appliquer à la dissipation de la chaleur.

CHPITER ll :

TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION AVEC LES NANOFLUIDES.

II.1 Introduction

La compréhension du mécanisme de la convection forcée entre paroi et fluide en écoulement est très importante pour la modélisation, simulation et conception des systèmes destinés à dissiper l'excès de la chaleur. C'est pourquoi nous avons juger utile en premier lieu de rappeler les notions de base de la convection. Ensuite, on présentera quelques travaux de la littérature qui sont signifiantes pour notre étude relatifs au transfert de chaleur par convection forcée des nanofluides dans des tubes.

II.2 Transfert de chaleur par convection

Il est généralement connu que le mécanisme de transfert de chaleur par convection est très complexe car il fait intervenir à la fois la conduction, l'accumulation de la chaleur et le mouvement de fluide. Le flux de chaleur par convection s'exprime par la loi de newton:

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

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 la paroi.

On distingue deux types de convection: Convection naturelle et forcée.

a) La convection naturelle (ou libre) : les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température et/ou par des gradients de composition.[25]

b) La convection forcée : le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur…). [25]

La convection forcée est rencontrée très souvent en pratique dans les échangeurs de chaleur de tous genres. La convection est utilisée aussi dans d'autre application par exemple pour le refroidissement des centrales nucléaires, la récupération de chaleur dans les collecteurs solaires, la circulation des liquides cryogéniques dans les systèmes de refroidissement de machines thermiques.[8]

II.3 Le Coefficient d'échange convectif h

Les deux type de transfert de chaleur par convection sont régies par la même loi (loi de newton) cependant la différence réside dans le coefficient d'échange qui est différent. Dans la convection forcée le coefficient d'échange h est très important, c'est pourquoi la convection forcée est très utilisée dans les systèmes d'absorption de la chaleur par les fluides en contact avec une paroi.

Pour calculer le flux de chaleur entre fluide et paroi il faut connaitre la valeur du coefficient d'échange. Cependant ce coefficient est très difficile à déterminer car il dépend de plusieurs paramètre on cite par exemple:

- Les propriétés thermodynamiques et de transports du fluide en écoulement
- La géométrie du système
- Le régime de l'écoulement
- La vitesse du fluide

Ce coefficient s'exprime par la relation ci-après [1]:

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

avec:

λ : La conductivité thermique du fluide

$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_p$: Le gradient de température dans la couche limite à la paroi

Connaissant la variation de la température dans la couche limite on parvient à évaluer le coefficient h et par conséquent de calculer le flux convectif.

II.4 Notion de la couche limite :

Quand un fluide à la température T_∞ s'écoule à la vitesse U_∞le long d'une paroi les phénomènes de la couche limite apparaissent au voisinage de la paroi comme le montre la figure II.1

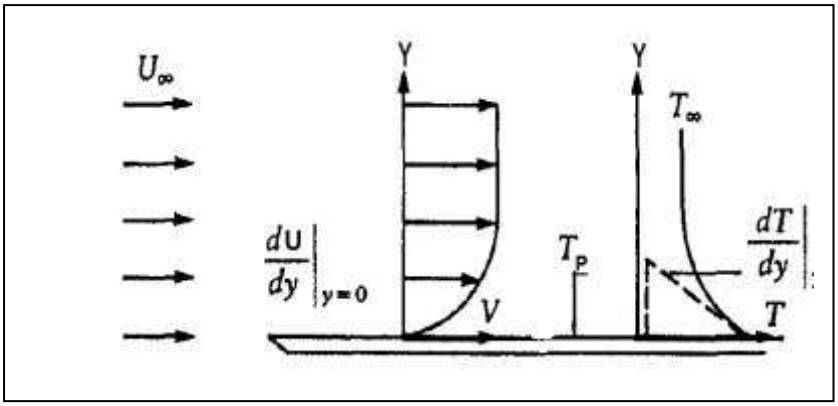


Figure II.1 Couche limite hydrodynamique et thermique

Le terme « couche limite » a été introduit en 1904 par Ludwig Prandtl [8]. On distingue deux types de couche limite : couche limite hydrodynamique et couche limite thermique.

II.4.1 Couche limite hydrodynamique :

La couche limite hydrodynamique est une couche de fluide dans laquelle apparait un gradient de vitesses et de contraintes de cisaillement. Le paramètre qui caractérise cette couche est le coefficient de frottement qui s'exprime par la relation suivante [8]:

$$C_f \equiv \frac{2\tau}{\rho\, u^2} \quad \text{(II.3)}$$

Avec :

C_f : Le coefficient de frottement

τ : Le contrainte de cisaillement

ρ : la masse volumique

U : la vitesse moyen de l'écoulement.

II.4.2 Couche limite thermique :

La couche limite thermique est une région de l'espace proche de la paroi au sien de laquelle sont observés les gradients de température. La couche limite thermique ne se développera que si la température du fluide et celle de la surface sont différentes. Le paramètre qui caractérise cette couche est le coefficient d'échange thermique par convection [8] (voir relation II.2).

II.5 Régime d'écoulement :

Le profil de température et de vitesse dans couche limite est très affecté par le régime d'écoulement. Trois grands régimes d'écoulement ont été définis par Reynolds (1883) voir figure (II.2) [19]:

- L'écoulement laminaire est un écoulement rectiligne, le fluide s'écoule en filets parallèles à l'axe de la conduite, sans mélange.
- L'écoulement transitoire est un écoulement est plus ou moins rectiligne, avec un peu de mélange (petits tourbillons).
- L'écoulement turbulent est écoulement caractérisé par de grands tourbillons, avec un mélange important.

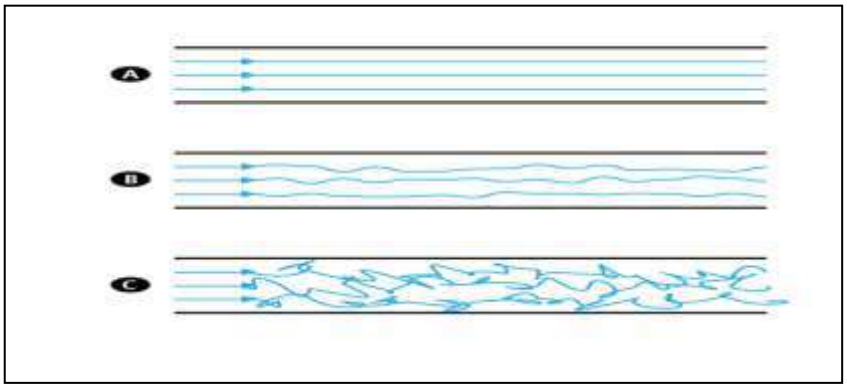


Figure II.2 : Régime d'écoulement, **A** : écoulement laminaire **B** : écoulement transitoire **C** : écoulement turbulent [19]

Le régime d'écoulement dépend du nombre de Reynolds qui s'exprime par la relation suivante:

$$Re = \frac{UL}{\nu} \text{(II.4)}$$

Avec :

U : Vitesse moyenne de l'écoulement ; L: Longueur caractéristique dans le cas d'une conduite L = D ; $\boldsymbol{\nu}$: Viscosité cinématique.

Pour un écoulement interne (tube cylindrique) il y'a l'existence de trois régimes (figure II.2)

- Pour Re< 2 300 le régime est laminaire
- Pour Re> 3000 le régime est turbulent
- Pour 2300 <Re<3000 le régime transitoire

Pour un écoulement le long d'une plaque plane, il y'a deux régimes et une valeur critique de Reynolds notée Rec. La valeur critique $Re_c = 5 \times 10^5$. Pour Reynolds inférieur au nombre de Reynolds critique l'écoulement est laminaire. Au contraire lorsque le nombre de Reynolds est Reynolds critique l'écoulement est turbulent.

La détermination du coefficient convectif h nécessite donc la connaissance du profil de vitesse et de température dans les couches limites. Alors ces profils sont déterminés à partir des équations de la convection.

II.6 Les équations de la convection :

Les équations de la convection sont établies à partir des bilans de masse, de quantité de mouvement et de l'énergie sur un élément de volume dans la couche limite. Ces équations sont nommées comme suit:

- L'équation de conservation de la mase
- L'équation de conservation de la quantité de mouvement est connu populairement l'équation de Navier-Stokes
- L'équation de Conservation d'Energie

La formulation de ces équations dépende du type de régime d'écoulement

II.6.1 Equations de la convection en régime laminaire :

Dans le cas d'un écoulement bidimensionnel en régime laminaire, fluide incompressible et newtonienne les équations s'expriment par [5]:

L'équation de conservation de la mase :

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \text{(II.5)}$$

L'équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y})=-\frac{dp}{dx}+\mu\frac{\partial^2 x}{\partial y} \text{(II.6)}$$

L'équation Conservation de l'Energie :

$$\rho Cp\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\lambda\,(\frac{\partial^2 T}{\partial x}+\frac{\partial^2 T}{\partial y}) \qquad \text{(II.7)}$$

II.6.2 Equations de la convection en régime turbulent :

Le transfert thermique en régime turbulent est un phénomène très complexe à étudier. En effet, dans un écoulement turbulent les forces d'inertie l'emportent sur les forces de viscosité au niveau de la couche limite ce qui provoque l'apparition des fluctuations de vitesse, de température et de pression autour d'une valeur moyenne qui s'expriment par [5]:

$$\left.\begin{array}{l} u=u'+\bar{u} \quad , \quad v=v'+\bar{v} \\ \text{(II.8)} \\ P=P'+\bar{P} \quad , \quad T=T'+\bar{T} \end{array}\right\}$$

Dans ces conditions les équation de la convection en coordonnées cartésiennes, fluide incompressible et newtonienne s'expriment par [5]:

L'équation de conservation de la mase :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}=0 \text{(II.9)}$$

L'équation de conservation de la quantité de mouvement :

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

L'équation Conservation de l'Energie :

$$\rho C_p \left(\frac{\bar{u}(\partial \bar{T})}{\partial x} + \frac{\bar{v}(\partial \bar{T})}{\partial y}\right) = -\frac{\partial}{\partial y}\left(-\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + \rho C_p \overline{v' T'}\right) + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y}\right)^2 \text{(II.11)}$$

Il est à noter que les équations de la convection en régime laminaire sont similaires à celles du régime turbulent à l'exception de la contrainte de cisaillement turbulent $\tau_t$et du flux de chaleur turbulent q_t qui sont données par les relations ci-dessous.[5]

$$\tau t \ = -\rho \overline{v' u'} = \mu t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \text{(II.12)}$$

$$qt = \rho C_p \overline{v' T'} \text{(II.13)}$$

Malgré cette similarité il n'est pas facile de résoudre les équations de convection en régime turbulent. pour rendre cette équation soluble Prandtl propose une analogie entre la théorie cinétique des gaz et la turbulence. Par conséquent, il proposa une longueur de mélange qui est analogue au libre parcours moyen d'une particule dans de la théorie cinétique des gaz et a suggéré que[5] :

$$\mu_t = \rho l_m^2 \left|\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right| \qquad \text{(II.14)}$$

Avec : l_m la longueur de mélange, déduite expérimentalement.

L'analogie de Prandlt permet de traité Les équations de la convection par les méthodes numériques. A cet égard le modèle le plus connu est le modèle *k-ε* où k représenter l'énergie cinétique turbulent et ε signifia le taux de dissipation turbulent [5]. Par le code de calcul COMSOL on peut résoudre le problème de la convection en régime turbulent

II.7 Analyse dimensionnelle de la convection forcée :

Expérimentalement a été montré que le coefficient d'échange convectif dépends de plusieurs variables on cite:

U : Vitesse du fluide
ρ : Masse volumique du fluide
C_p : Chaleur spécifique du fluide
λ : Conductivité thermique du fluide
μ : Viscosité dynamique du fluide
L : Longueur caractéristique (représentant la géométrie de système)

Pour décrire le phénomène de la convection forcée il faut tenir en compte de toutes les variables ce qui présente un travail expérimental énorme. Dans le but de réduire le travail expérimental il a été proposé de regrouper toutes les variables en des groupements adimensionnels. L'application du théorème de Buckingham à permet de déduire trois groupement adimensionnelles il s'agit :

1. Nombre de Nusselt noté Nu qui représente le rapport du flux convectif sur le flux conductif il s'exprime par la relation suivante :

   $Nu = \frac{h\,L}{\lambda}$(II.15)

2. Nombre de Prandtl noté Pr qui compare la diffusion de masse devant la diffusion thermique il s'exprime par la loi suivante [8] :

   $$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha} \quad \text{(II.16)}$$

3. Nombre de Reynolds noté Re est déjà défini préalablement (voir le paragraphe II.5).

Le coefficient d'échange par convection forcée h est représenté par le nombre de Nusselt, Nu, qui lui-même 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 [1] :

$Nu = AR_e^a P_r^b$(II.17)

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 écoulement externe sur une plaque plane Nu s'exprime par les relations suivantes :

- ***Régime Laminaire :***

  $Nu = 0.66Re^{1/2}Pr^{1/3}$(II.18)

- ***Régime Turbulent :***

  $Nu = 0.036Pr^{1/3}[Re^{0.8} - 23200]$(II.19)

II.8 Convection forcée dans des conduites en régime turbulent :

La convection à l'intérieur des tubes trouve beaucoup d'application notamment dans le domaine 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. Pour maitriser le transfert de chaleur dans ces procédés il faut tout d'abord comprendre le mécanisme et la spécificité des écoulements internes.

II-8-1Spécificité des écoulements Internes :

Pour un fluide initialement à la vitesse uniforme U quand il entre dans une conduite il apparait deux zones d'écoulements comme le montre la Figure II-3:

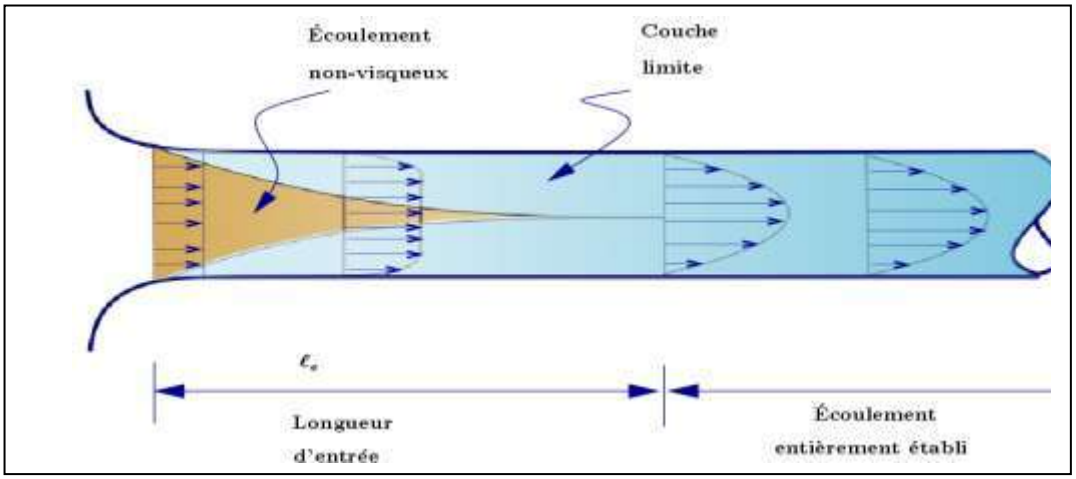


Figure II-3 Profil de vitesse d'un fluide en écoulement dans un tube[26]

- zone d'écoulement non établit :

Dans cette zone le phénomène de la couche limite se manifeste au niveau de la paroi jusqu'à certain point caractérisé par une longueur l_e. Les profils de vitesse du fluide n'est pas homogène et varie le long de la conduite. En effet, il apparait un profil de vitesse au voisinage de la paroi (dans la couche limite) et au voisinage du centre de la conduite la vitesse est constante.

- zone d'écoulement établit :

Dans cette zone la couche limite interfère sur elle-même et apparait une nouvelle structure d'écoulement.

Le profil de vitesse dans la zone établit dépendent du régime d'écoulement.

II-8-2 Convection interne en régime turbulent :

La résolution des équations de la convection en régime turbulent dans une conduite est très complexe vu la géométrie et la spécificité de l'écoulement. Il ya aussi à noter q' en régime turbulent la couche limite est composé de trois couches: une sous couche limite laminaire une couche tampon et une couche turbulente. Pour simplifier le calcul on applique l'analogie de Reynolds qui stipule que le transfert de chaleur est dominant dans la couche turbulente, c'est-à-dire le transfert de chaleur dans la sous couche limite laminaire et la couche tampon est négligeable. le profil de vitesse dans la couche turbulente a été établit expérimentalement. Ce profil est introduit dans l'équation de la conservation de l'énergie après résolution le profil radiale de vitesse, le coefficient de frottement, la perte de charge et le nombre de Nusselt sont établit [2].

- ***Profil de vitesse :***

Dans l'écoulement turbulent la couche limite se dilate pour remplir l'ensemble du tube et le profil de vitesse s'exprime par la relation suivante :

$$U = \overline{U}\left[1 - \frac{r}{R}\right]^{\frac{1}{7}} \text{(II.20)}$$

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

Le profil de température change continuellement en raison du transfert de chaleur.

- ***Le coefficient de frottement C_f :***

Le coefficient de frottement C_f est déterminé à partir des équations de Navier Stokes et s'exprime par :

$$f = \frac{0.316}{Re_D^{0.25}} \; Re < 2 \times 10^4 \text{(II.21)}$$

$$f = \frac{0.184}{Re} \; Re > 2 \times 10^4 \text{(II.22)}$$

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

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

$$\Delta P = 4C_f \rho \overline{U}^2 \frac{L}{2R} \qquad \text{(II.23)}$$

- ***Le nombre de Nusselt :***

Il existe dans la littérature une variété de corrélations permettant de calculer le coefficient convectif h dans les conduites. La corrélation fréquemment utilisée dans le cas des liquides est la suivante:

$$Nu = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^n \qquad \text{(II.24)}$$

Cette corrélation est valable dans le cas des liquides pour Re>6000 et 0.7 < Pr < 700. n = 0.3 pour le cas de refroidissement. Dans le cas de chauffage n = 0.4 [5]

II-9 Convection dans une conduite avec nanofluide :

Les nanofluides sont des particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide. Les particules en suspension ont une capacité d'absorber la chaleur et par conséquent améliore l'échange thermique de façon considérable et efficace. Les facteurs responsables à cette amélioration sont dus aussi :

- A l'augmentation de la concentration volumique des particules.
- La dispersion des nanoparticules.
- La réduction l'épaisseur de la couche limite thermique.
- Le mouvement browniennes et thermophorèse des particules [14]

La modélisation de la convection dans les nanofluides est très complexe plusieurs études 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 la convection avec des nanofluides. La plus populaire est l'approche Eulérienne qui consiste à considérer toute la suspension comme étant une masse de fluide ayant des propriétés thermiques et rhéologiques homogènes comprises entre les propriétés du fluide de base et les particules [5]. C'est pourquoi, les équations de la convection en régime turbulent est maintenue. Pour l'évaluation de la masse volumique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique des nanofluides des corrélations sont utilisés à cet effet (voir chapitre I). Dans notre étude nous avons adopté l'approche Eulérienne et nous avons utilisé le code de calcul COMSOL, récemment acquis par l'université, pour l'étude de transfert thermique en régime turbulent dans une conduite circulaire.

II.10 Travaux antérieurs :

La détermination des propriétés de transports et le coefficient de transfert convectif des nanofluides ont fait l'objet de recherche par plusieurs auteurs. Parmi ces travaux on cite les plus signifiantes pour notre étude.

J. Garg et coll. [6]ont étudié l'effet de la concentration volumique des nanoparticules de l'oxyde cuivre (CuO) dans l'éthylène glycol sur la conductivité thermique et la viscosité du nanofluide. Le nanofluide s'écoule à l'intérieur d'un tube dont la paroi est maintenue à flux constant. Ils ont montré que la conductivité thermique et la viscosité dynamique de nanofluide sont améliorés mais le taux d'amélioration de la viscosité et plus grand. Cette tendance influe sur l'échange thermique. En effet l'augmentation de la viscosité entraine le ralentissement du transfert thermique. Par conséquent l'amélioration de la conductivité thermique de nanofuide ne se traduit pas sur l'efficacité thermique cela en raison de l'augmentation importante de la viscosité. Pour éviter le ralentissement du transfert thermique du au phénomène de la viscosité il a été proposé d'augmenter le diamètre de la conduite et ce pour réduire l'effet opposant de la viscosité dynamique.

Sur la Figure II.3 nous avons reporté l'évolution du Nusselt en régime turbulent pour une variété de nanofluides. Les résultats illustrés sur cette figure montre que Nusselt augmente avec Reynolds. le type de nanoparticule n'a pas beaucoup d'influence sur Nusselt sauf pour le cas de Fe3O4 pour Re> 14000 ou Nusselt augmente considérablement.

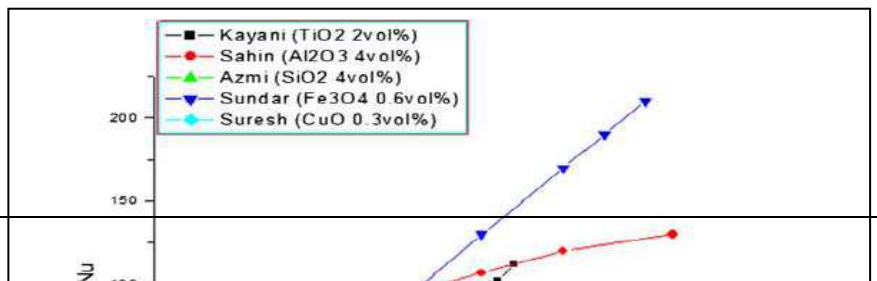


Figure (II-4) : évolution du Nusselt fonction du nombre de Reynolds [14]

KAYHANI et all[14]. ont étudié le transfert de chaleur par convection et les pertes des charges pour le nanofluide composé de TiO2 dispersés dans une solution aqueuse avec des tailles de (15nm) et fraction volumiques de 0,1 ; 0,5 ; 1,0 ; 1,5 et 2,0% . Le nanofluide s'écoule dans un tube horizontal chauffé en permanence. Les résultats indiquent que les coefficients de chaleur augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique. Pour une fraction volumique de 2%, l'amélioration du nombre de Nusselt était d'environ 8% pour Re = 11800

YU et all[14]. ont effectué les expériences sur le transfert de chaleur par convection avec des nanofluides à base de Cuivre dans Therminol 59 en régime d'écoulement turbulent, avec des fractions volumiques de 0,50% et 0,75%. Il ont constaté que le coefficient convectif augmente de 18% .

AZMI et all[14]. ont déterminé le transfert de chaleur par convection forcée et le coefficient de frottement avec le nanofluide composé de 3% de SiO_2 dispersés dans l'eau en régime d'écoulement turbulent. les résultats montrent une augmentation du Le nombre de Nusselt et du coefficient de frottement respectivement supérieurs aux valeurs de l'eau de 32,7% et de 17,1%. La perte charge augment avec le nombre de Reynolds alors que le coefficient de frottement diminue avec le nombre de Reynolds. La chute de pression augmente avec la concentration de particules jusqu'à. Le facteur de frottement diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds pour toutes les concentrations.

HEYAT et all [14]ont exploré les caractéristiques de transfert de chaleur par convection des Nanofluides Al_2O_3 / eau dans le régime de flux turbulent entièrement

développé. Les résultats ont montré que le coefficient de transfert de chaleur du nanofluide était plus élevé que celui du fluide de base et augmente avec la concentration de particules. De plus, le nombre de Reynolds a eu un petit effet sur l'amélioration du transfert de chaleur.

FOTUKIAN et ESFAHANY[14]. Ont étudié Le transfert de chaleur par convection de nanofluide composé de CuO- l'eau dans un régime turbulent à l'intérieur d'un tube avec des fractions volumique inférieures à 0,3%. Par rapport à l'eau pure, le coefficient de transfert de chaleur s'est amélioré de 25%. On a constaté que l'augmentation des fractions volumique amélioré le transfert de chaleur dans la gamme étudiées.

ARANI ET all[14]. ont étudié les caractéristiques de transfert de chaleur par convection de nanofluide TiO2 –l'eau dans un écoulement turbulent dans la zone développée. les résultats montrent que tous les nanofluides, avec un diamètre de particules (10, 20, 30 et 50 nm), présentaient un meilleur nombre de Nusselt que le liquide de base. On a également remarqué que des performances thermiques plus élevées ont été observées par le nanofluideavec un diamètre de particules de 20 nm. Le nombre moyen de Nusselt a augmenté avec l'augmentation du nombre de Reynolds et de la fraction volumique de particules.

II-11 Conclusion:

Dans cette partie nous avons présenté les équations de la convection pour les nanofluides et la spécificité des écoulements dans des tubes. Nous avons aussi présenté le modèle d'Euler que nous avons retenu pour la simulation de la convection dans un tube par l'utilisation du code de calcul COMSOL. Une étude bibliographique des travaux antérieurs sur les nanofluides qui nous parait très utile et signifiante pour notre étude a été présentée à la fin du chapitre.

CHPITER III : SIMULATION ET RESULTATS

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu notre étude avec les conditions opératoires et aux limités que nous avons imposées. Ensuite nous présentons les corrélations retenus pour la détermination des propriétés thermique et de transport du nanofluide nécessaires pour la simulation de la convection en régime turbulent. La démarche en détail suivi pour l'exécution du code de calcul COMSOL a été exposée. Les résultats obtenus sont présentés à la fin du chapitre.

III.2 Conduite et conditions aux limites :

Le nanofluide est constitué de nanoparticules à base de CuO dispersés dans une solution aqueuse s'écoulant dans une conduite circulaire de diamètre D et de longueur L dont la paroi est maintenue à une température constante Tp.

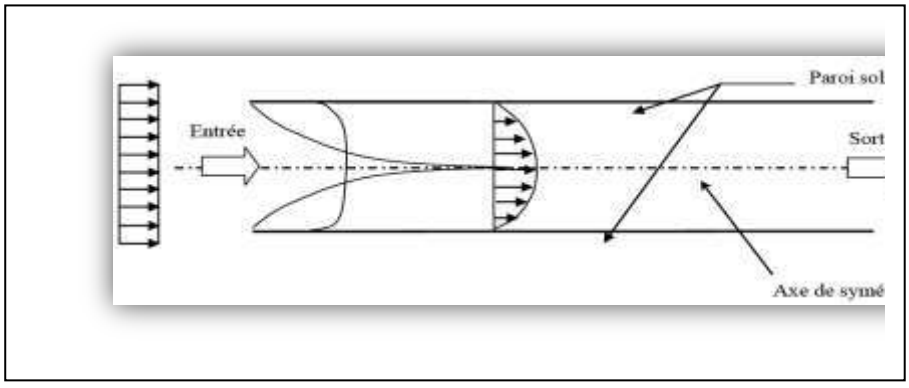


Figure III.1 : Conduite circulaire D= 10 cm et L = 50 cm

Les propriétés des nanoparticules et de la solution aqueuse sont présentée dans le tableau III.1

Tableau III.1: Propriétés du nanoparticule et l'eau

Propriétés	$\boldsymbol{CuO}$	$\boldsymbol{L'eaupure}$
C_p **(J.Kg^{-1}.K^{-1})**	540	4197
ρ **(kg.m^{-3})**	6510	971
λ **(w.m^{-1}.K^{-1})**	180	0.669
μ **(Pa.s)**		$1.002\ 10^{-3}$
$\boldsymbol{d_P}$ **(nm)**	20	

Les conditions aux limites de vitesse et température sont les suivantes :

1) **Vitesse:**

- Ecoulement Turbulent
- La vitesse d'entré$V = U_x = 0.03\ m/s$, $U_y = 0\ m/s$.
- Symétrie $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$
- Pression de sortie $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

2) **Température**

- Entrée : T=$T_{int} = 20^{\circ}C$ = 293.15K.
- Parois : T =$T_w = 80^{\circ}C$ = 353.15K.
- Symétrie : $\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$ avec$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty}$.

III.3 corrélations des propriétés thermiques et de transport du nanofluide.

Les propriétés du nanofluide (CuO-H_2O) thermiques et de transport sont en fonction des fractions des nanoparticules (CuO) et les propriétés des nanoparticules et de la solution aqueuse. Les corrélations retenues pour les déterminations de ces propriétés sont les suivantes:

Conductivité thermique :$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_f - 2\varphi(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \varphi(\lambda_f - \lambda_p)}$ (III-1)

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

Viscosité :$\mu_{nf} = \mu_p(1 + 2.5\varphi)$ (III-3)

III.4 Démarche de calcul par COMSOL.

III.4.1 Présentation du code de calcul COMSOL Multiphysics (version 5) :

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.[18]

Le logiciel COMSOL et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de GermundDahlquist, 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. La version initialede COMSOL Multiphysics s'appelait FEMLAB. [18]

III.4.2 Démarche pour l'exécution du projet :

L'objectif de cette partie est d'illustrer toutes les étapes nécessaires pour l'étude de la convection en régime turbulent d'un nanofluide (CuO-H_2O) s'écoulant dans une conduite circulaire dans des conditions opératoire imposées.

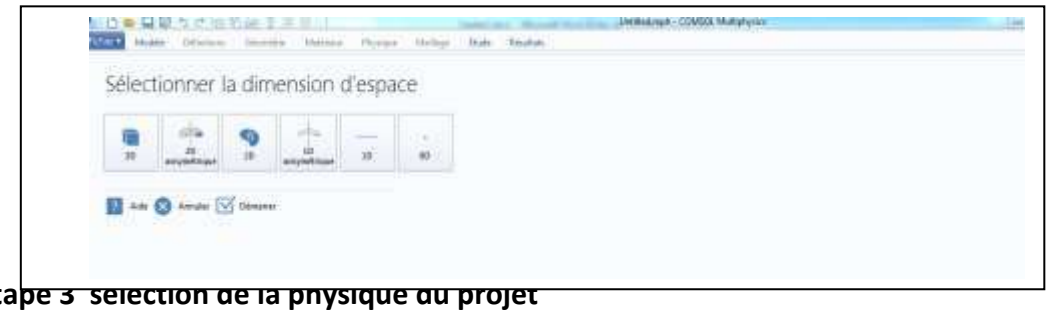
Etape 1 lancement COMSOL et choix de la dimension

Lancement de COMSOL et en sélection un nouveau projet en cliquant sur l'icone Assistant Model et on clic sur Assistant de Modélisation .mph comme le montre la figure ci-dessous:



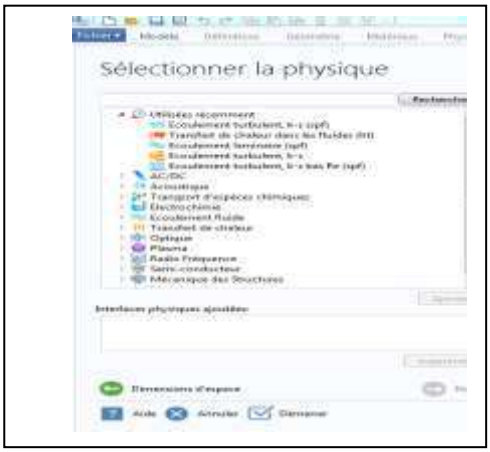
Etape 2 sélection de la dimension

Après avoir cliquer sur l'icône assistant de modélisation le menu suivant apparaît et On cliquez sur l'icône 2D axisymétrique



Etape 3 sélection de la physique du projet

Après l'étape 2 un menu s'affiche pour le choix de la physique du projet comme le montre la figure ci-dessous. Dans cette étape on ajoute une ou plusieurs interfaces physiques. On clique sur écoulement de fluide → écoulement monophasique → écoulement turbulent→ écoulement turbulent k-ε (spf). Et Cliquez sur l'icône ajouté.



Maintenant pour le transfert de chaleur : cliquez sur transfert de chaleur →transfert de chaleur dans les fluides→ ajouté

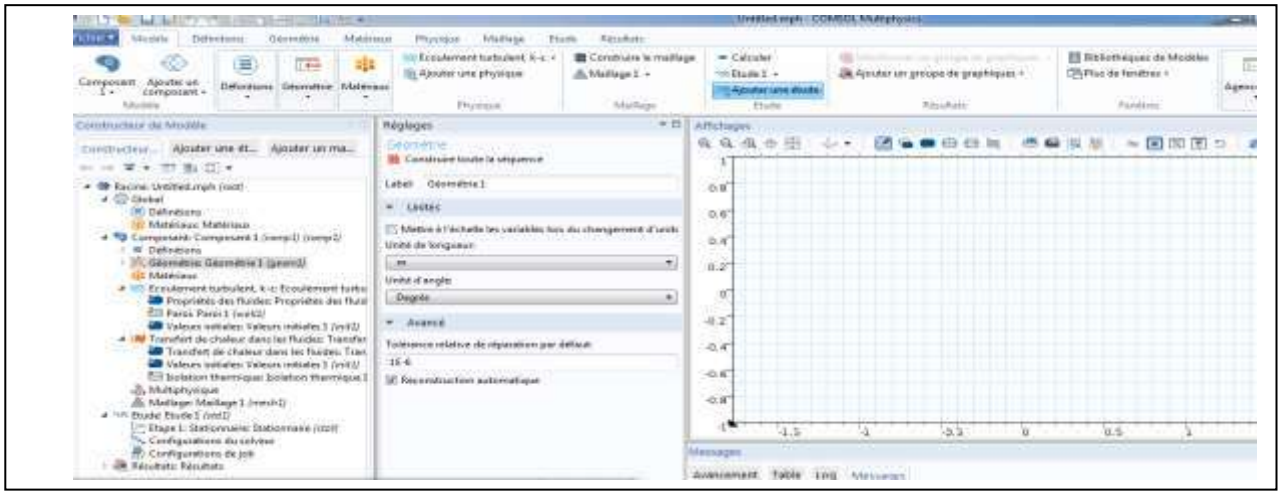
Etape 4 sélection de l'étude :

On selectione 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 et on clique sur démarrer comme l'indique la Figure suivante:



Etape 5 sélection de la géométrie et types des matériaux

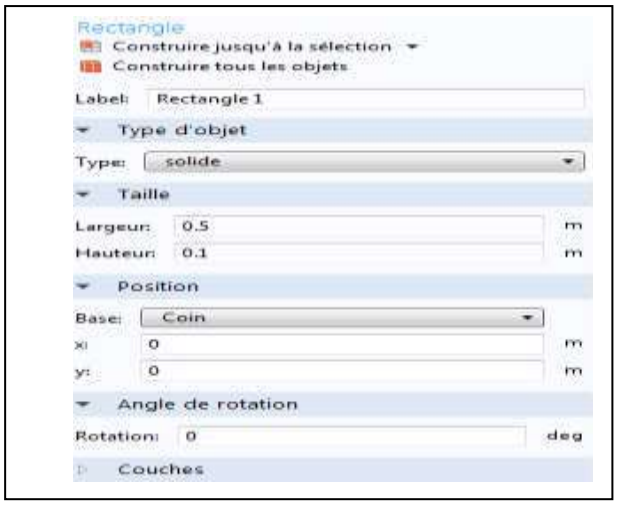
Après l'exécution de l'étape 4 le menu suivant s'affiche :



Dans l'étape 5 on sélectionne la géométrie, les matériaux utilisés et la déclaration des conditions aux limites ensuite on fait le maillage et à la fin les l'obtention et le traitement des résultats.

1) <u>Géométrie :</u>

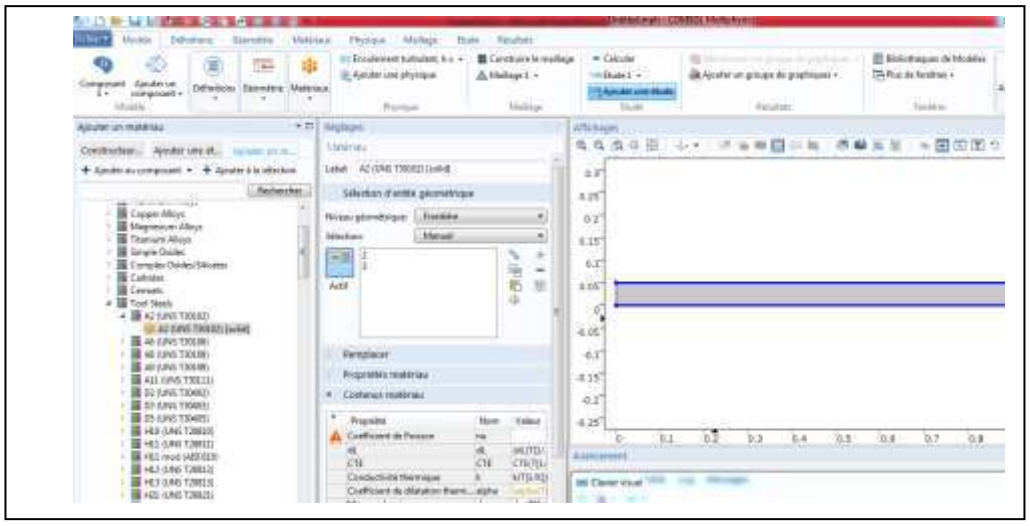
Une clique droite sur géométrie et on fait le choix de la géométrie parmi les choix données. Dans notre travaille on a choisie rectangle comme géométrie et en fait la déclaration de la taille de notre géométrie.

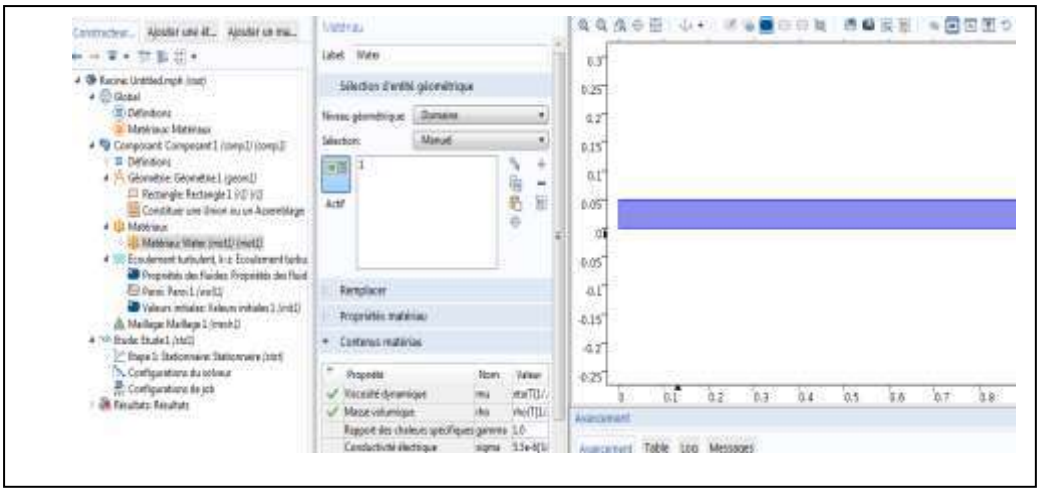


Après la détermination de la hauteur et de la largeur du tube on clic sur 

2) ***Choix de Matériaux conduite et nanofluide :***

A partir de la bibliothèque des matériaux existant sur la base de données de COMSOL nous avons fait la déclaration des matériaux du projet. Pour le tube nous avons sélectionné le cuivre (lignes en bleu) et pour nanofluide (domaine à l'intérieur du tube en bleu) nous avons choisi Eau-CuO (Voir Figure ci-dessous)



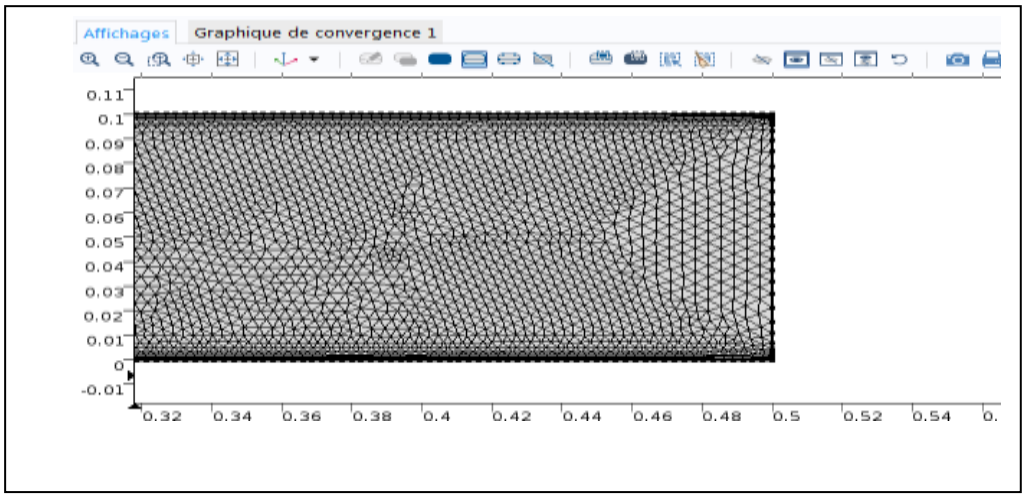


3) *Conditions aux limites*

Dans cette étape en fait la déclaration des conditions aux limites que nous avons signalées dans le paragraphe III.2

4) *Maillage*

Le maillage est une étape très importante pour la précision des résultats dans la modélisation numérique. Le maillage consiste à découper l'espace en petites mailles. Il existe plusieurs formes de maillage les plus connus sont maillages carrée et triangulaire. Plus le maillage est petit plus la solution obtenus est proche du résultat réel. Dans notre projet nous avons choisi un maillage triangulaire tés fin comme la montre la figure ci-dessous



5) l'exécution le projet

A la fin on clique sur étude pour l'exécution du projet.

III.5 Résultats

III.5.1 Profil de vitesse

La figure III.2 illustre le champ de vitesse de nanofluide (chargé de 1.5 % de nanoparticule CuO) en écoulement le long de la conduite. Sur cette Figure on voie l'apparition de la couche limite qui se manifeste le long de la conduite. Toutefois il est à signalé que le champ de vitesse est aplati dans la région centrale du tube. En effet, ce phénomène est dû à la spécificité des écoulements turbulents qui présente une couche limite turbulente très mince.

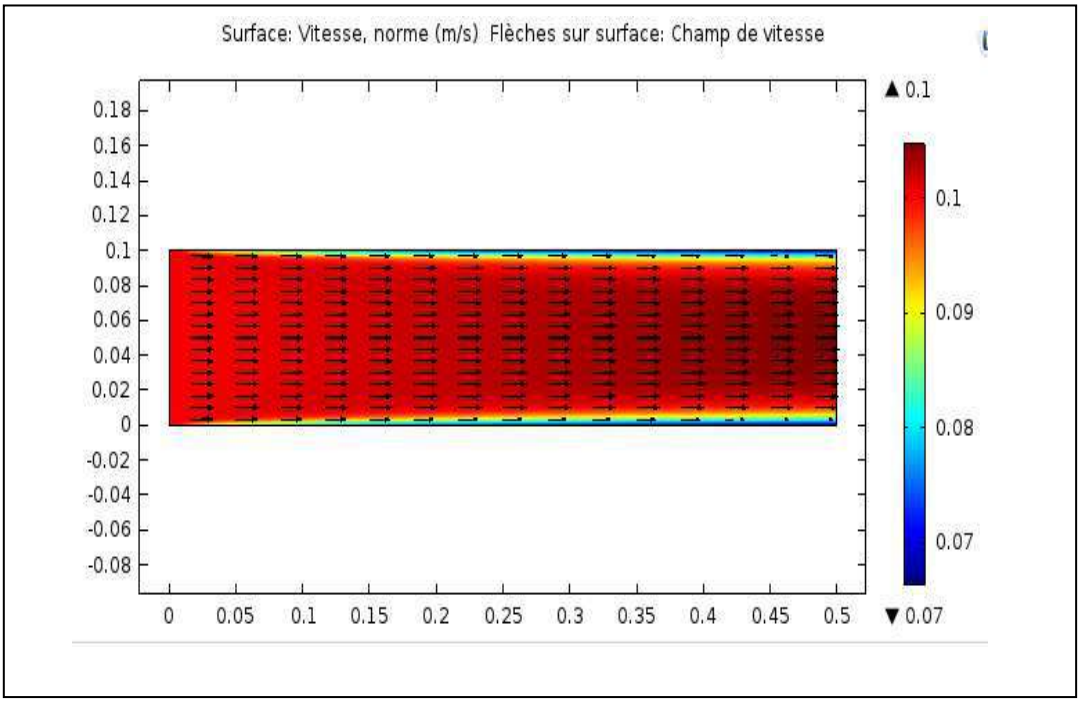


Figure III.2 Champ de vitesse du nanofluide en écoulement le long de la conduite

La figure III.4 représente le profil de vitesse dans le tube à mi-distance du nanofluide chargé de 1.5% de CuO. Sur cette figure on aperçoit que pour des régions proches de la proie

l'allure de la courbe de vitesse est très prononcé cela est du certainement au gradient de vitesse dans couche limite dans laquelle la vitesse est nulle à la paroi (à cause des frottements) et a tendance d'augmenter graduellement (à cause des glissements des couches de fluide les unes sur les autre) pour atteindre un palier dans les régions proches du centre de la conduite. Toutefois on remarque que le profil de vitesse dans la conduite est loin d'être parabolique comme dans les cas des situations enregistrées dans les écoulements laminaire. Cette tendance est en bonne accord avec la théorie de la couche limite turbulente

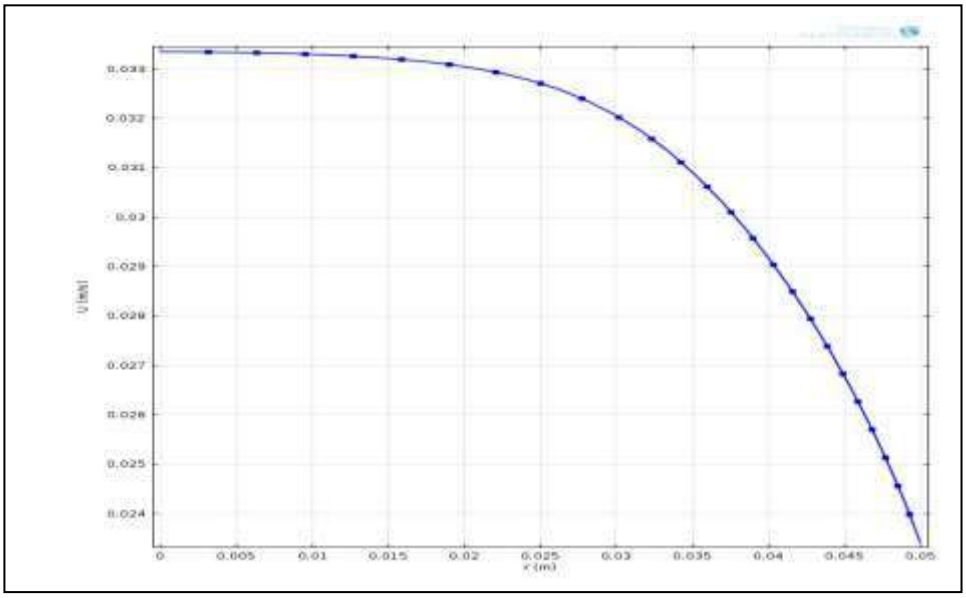


Figure III.3 Profile radiale de vitesse de nanofluide 1.5% de CuO à mi-distance

III.5.2 Perte de charge

La perte de charge est un paramètre très important dans la dynamique des fluides car il permet de choisir la puissance de fonctionnement du système de pompage pour le maintien du nanofluide en écoulements. La figure III.5 illustre la variation de la pression du

nanofluide en fonction du nombre de Reynolds pour une variétés de valeur de fractions volumiques de nanofluide (0%, 3%, 6%, 9% et 12%). les résultats obtenus montrent que la perte de charge est proportionnelle au de nombre de Reynolds pour l'écoulement turbulent. De plus la perte de charge croit avec la fraction volumique des nanoparticules. En effet l'ajout des nanoparticules entraine l'augmentation de la viscosité de 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. Dans le cas du régime laminaire au contraire l'étude faite M. Ouldkhaoua et F. Makhloufi[mémoire master] a montré que la fraction des nanoparticules (cas de Al2O3) n'a pas d'effet sur la perte de charge

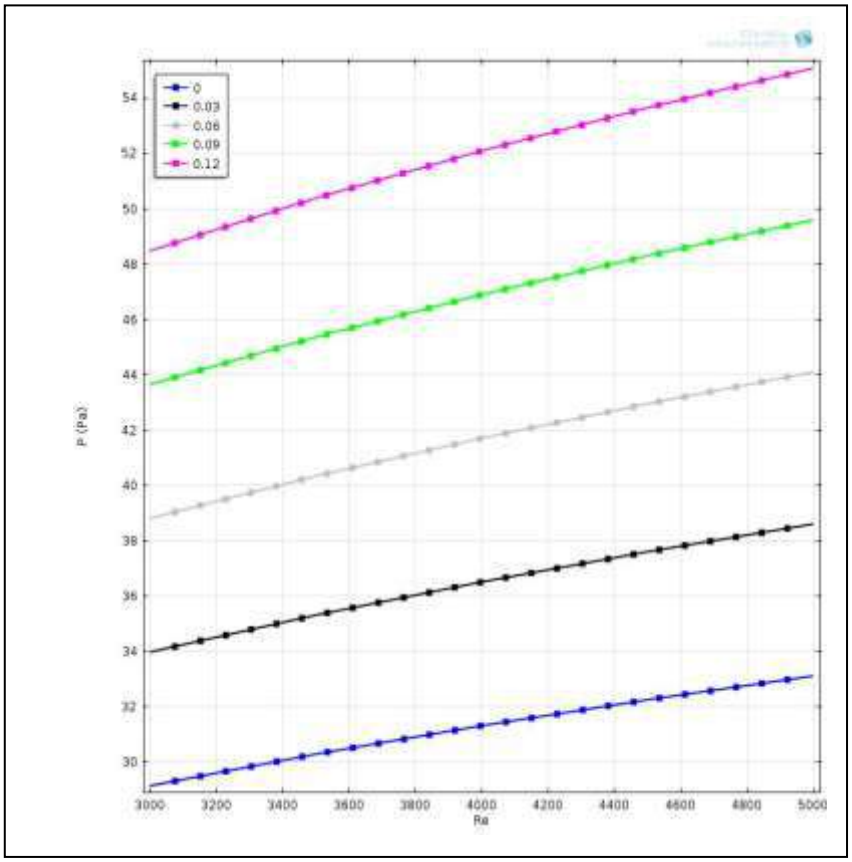


Figure III.4: Perte de charge en fonction du Reynolds

III.5.3 Nombre de Nu

Le nombre Nusselt est un paramètre essentiel dans le transfert thermique entre paroi et fluide. La Figure III.5 présente la variation du nombre de Nusselt en fonction Reynolds pour plusieurs valeurs de fractions volumiques de nanofluide (de 0% à 12%). L'examen de cette figure montre que le nombre de Nusselt est proportionnel au nombre de Reynolds et ce pour toutes valeurs de la fraction volumique de nanofluide. le taux des nanoparticule dans la solution aqueuse améliore le transfert convectif. Ce résultat est en accord avec les résultats de la littérature car les nanoparticules ont tendance d'améliorer la conductivité au du fluide se qui se traduit directement sur le flux de chaleur.

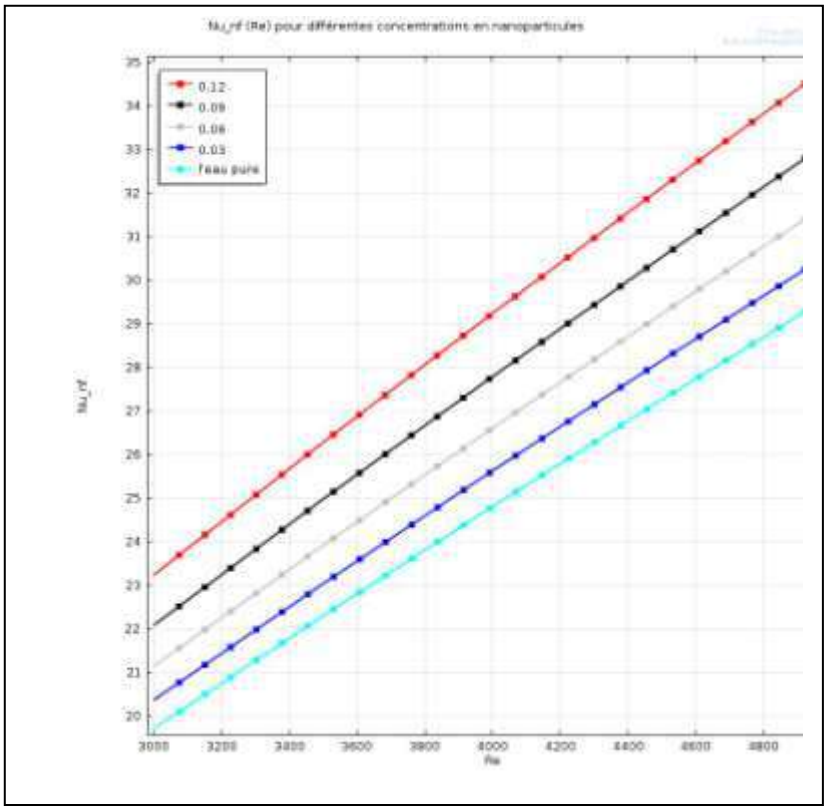


Figure III.5 : Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Reynolds

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons étudié le transfert thermique convectif en régime turbulent d'un nanofluide à base CuO-eau s'écoulant dans une conduite circulaire.

Dans la première partie de ce travail nous avons fait une étude bibliographique sur les nanofluide. Cette étude nous a permet de faire ressortir les corrélations nécessaires à la détermination des propriétés thermiques et de transport des nanofluides.

L'introduction de ces corrélations dans les équations de la convection nous a permet d'évaluer la distribution de la vitesse et de la température dans la conduite et par conséquent d'évaluer le coefficient d'échange convectif et les pertes de charge. La résolution des équations de la convection a été effectuée par le code de calcul COMSOL multiphysics.

Nous avons examiné l'effet du nombre de Reynolds et la fraction des nanoparticules sur le transfert thermiques paroi de la conduite-nanofluide et la perte de charge dans la conduite.

Les résultats obtenus montrent que le nombre de le nombre de Nusselt et la perte de charge augmentent avec le nombre de Reynolds. L'addition des nano particules dans la

solution aqueuse a pour effet d'améliorer le transfert thermique. En effet, le nombre de Nusselt croit avec la concentration volumique des nanoparticule. Ce résultat est très intéressant pour la partie thermique du système. Toute fois l'augmentation de la concentration des nanoparticule affect la perte de charge dans la conduite car cette dernière a tendance d'augmenter.

Comme perspective on suggère d'examiner la nature des nanoparticules sur le transfert thermique et aussi de voir d'autre modèles qui prennent en considération les interactions physiques particules fluide.

Références Bibliographiques

Les livres et les articles:

[1] J. P. Holman, Heat transfert, ninth edition,2002, McGraw-Hill ,758p

[2]bJohn H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, a heat transfer textbook, third edition, 2003, Phlogiston Press Cambridge Massachusetts

[3]Sidi El BécayeMaiga , Samy Joseph Palm , Cong Tam Nguyen ,,Gilles Roy a, Nicolas Galanis « Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows» International Journal of Heat and Fluid Flow 26 (2005) 530–546

[4] Olivier Doche, Jean-Antoine Gruss& Olivier Soriano, « Une nouvelle technologie pour les échangeurs thermiques : Le Nanofluide », Grenoble, 27-31 août 2007,6p.

[5] Sarit K. Das ,Stephen U. S. Choi ,Wenhua Yu ,T. Pradeep ,*NANOFLUIDESSCIENCE AND TECHNOLOGY* , .United States of America:wiley-interscienc , 2008 , 416p.

[6]J. Garg, B. Poudel, M. Chiesa, J. B. Gordon, J. J. Ma, J. B. Wang, Z. F. Ren,Y. T. Kang, H. Ohtani, J. Nanda, G. H. McKinley, and G. Chen, « Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid», Journal of appliedphysics 103, 2008

[7] Lixin Cheng,«Nanofluid Heat Transfer Technologies »,Recent Patents on Engineering 2009, 3, 1-7p.

[8] Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali, *INTRODUCTION AUX TRANSFERTS THERMIQUES*. Paris: Dunod, 2010, 236p.

[9] Le-Ping Zhou,1 Bu-XuanWang,2 Xiao-Feng Peng,2 Xiao-Ze Du,1 and Yong-Ping Yang1, «On the Specific Heat Capacity of CuONanofluid», Volume 2010, Article ID 172085, 4 pages.

[10]VincenzoBianco, OronzioManca, Sergio Nardini, KambizVafai, « A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids», International Journal of Heat and Mass Transfer, Received 18 March 2011, n° 4410–4428 ,20p.

[11] ClementKleinstreuer*, Yu Feng, «Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review » , Department of Mechanical and Aerospace Engineering, NC State University, Raleigh, NC 27695-7910, USA Kleinstreuer and FengNanoscale Research Letters 2011, 6:229 ,13p.

[12] Purna Chandra Mishra ,Sayantan Mukherjee ,Santosh Kumar Nayak , Arabind Panda , «A brief review on viscosity of nanofluids », Received: 6 March 2014 / Accepted: 5 September 2014 / Published online: 7 October 2014, Int Nano Lett (2014) 4:109–120.

[13] Vincenzo Bianco ,OronzioManca ,Sergio Nardini ,KambizVafai ,*HEAT TRANSFER ENHANCEMENT WITH NANOFLUIDS* . U.S., CRC press taylor&francis group, 2014 11 07,456p.

[14] Munish Gupta1, Neeti Arora1*, Rajesh Kumar2, Sandeep Kumar2 and Neeraj Dilbaghi2, «A c omprehensive review of experimental investigations of forced convective heat transfer characteristics for various nanofluids», Gupta et al. International Journal of Mechanical and Materials Engineering 2014, 9:11,21p.

[15] AlirezaAghaei ,Ganbar Ali Sheikhzadeh, MajidDastmalchi, HamedForozande, « Numerical investigation of turbulent forced-convective heat transfer of Al2O3–water nanofluid with variable

properties in tube»,Received 27 July 2014; revised 13 November 2014; accepted 23 November

2014,9p.

[16] LAHNA S., OULDHADDA D, « transfert de chaleur par convection forcee d'un nanofluide EAU-TIO2

dans un espace annulaire avec dissipation visqueuse »,21-24 Avril 2015,3p.

Les sites sur l'internet :

[17] https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_volumique

[18] https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics

[19] http://tech-alim.univ-lille1.fr/intro_gia/co/ch03_01.html.

[20] http://www.cooling-masters.com/articles-46-0.html

[21] http://www.techniques-ingenieur.fr/base documentaire/innovation-th10/nanotechnologies-pour-l-energie-l-environnement-et-la-sante42514210/nanofluides-pour-les-applications-thermiques-nm5115/preparation-des-nanofluides nm5115niv10002.html.

[22] http://www.npl.co.uk/reference/faqs/what-are-thermophysical-properties-(faq-thermal).

Les documents :

[23] Sellam Fouad « HYDRAULIQUE GENERALE (Mecanique des fluides) TRONC COMMUN 3ème

ANNEE »,INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE DEPARTEMENT DU GENIE RURAL SECTION

HYDRAULIQUE AGRICOLE, 31p

[24] Sébastien FERROUILLAT, Biran WANG, João-Paulo RIBEIRO, Olivier SORIANO, Olivier PONCELET,

Jean Antoine GRUSS, André BONTEMPS «Intensification des échanges thermiques parl'utilisation

denanofluides SiO2 / eau (partie 1) », Université Joseph Fourier, Laboratoire des Écoulements

Géophysiques et Industriels (LEGI) Domaine Universitaire BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9 ,6p.

[25] Sophie Mergui « LICENCE DE MECANIQUE 2EME ANNEE MODULE 2A101 » TRANSFERTS

THERMIQUES université de sorboon p52.

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