REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Analyse CFD de l'écoulement turbulent d'un nanofluide dans une section curviligne

---

Présenté par **Ben aziza Hamza**

Chair Talha

Proposé et Dirigé par **KRIBY Saliha**

Promotion 2020

REMERCIMENTS

Au terme de cette étude, nous exprimons notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont permis de mener à bien ce modeste travail.
Nous tennons à exprimer nos plus vifs remerciments *à notre encadreur* ***KRIBY Saliha***, de nous'avoir encadré et suivi notre travail de prés avec ses grandes qualités humaines, sa rigueur scientifique et ces précieux conseils, merci à vous pour la confiance que vous nous'avez accordé.

Nous adressons nos remerciements, également, à tous les membres du jury pour nous'avoir fait l'honneur de passer notre travail en revue et d'avoir pris le temps de lire ce mémoire, ainsi qu'à tous les enseignants du département de Génie Mécanique.
Tous nos remerciements à tous ceux qui ont contribués de prés ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous remercons tout nos amis et collègues pour leur amitié et pour l'ambiance qu'ils font régner au sein de l'université.

Dédicace

*A mon cher **Père** et ma chère **Mère** pour l'éducation et le grand*

Amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.

A mes chers frères.

A mes chères sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes profs qui nous a appris.

A mes chers amis ,

A toutes la promo Master génie mécanique2019/2020.

*A tous ceux que j'*aime *et qui m'*aiment.

Ben aziza Hamza

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon cher Père et ma chère Mère pour l'éducation et le grand Amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.

A mes chers frères et chères soeurs.

A toutes les familles , et ainsi que tous proches.

A tous mes amis de l'université de Médéa.

Surtouts spécialité "génie mécanique"

Chair Talha

TABLE DES MATIèRES

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES NANOFLUIDES 2

I .1. Introduction3

I .2. Nanoparticules et les fluides porteurs 3

I .3.Procédés de fabrication et préparation des nanoparticules :4

I .4. Avantages et inconvénients des nanofluides:6

I .5.propriétés de transport des nanofluides 6

I .5.1 La fraction volumique7

I .5.2 La masse volumique7

I .5.3 La capacité thermique10

I .5.4 La viscosité 11

I .5.5 Conductivité thermique 15

I .6.Conclusion 20

CHAPITRE II: CONVECTION FORCE NANOFLUIDES DANS UN CONDOITE CURVILIGNE

I .1. Introduction21

II .2.Transfert de chaleur par convection 21

II .2.1 La convection naturelle (ou libre) 21

II .2.2 La convection forcée 22

II .2.3 Coefficient d'échange convectif 22

II .3. Etablissement des écoulement dans les conduite dans un conduit curviligne 22

II. 3.1Régimes d'écoulement 22

II .3.2 Caractéristique de régime laminaire et turbulent

23

II .3.2.1 Régime laminaire
24

II. 3.2.2 Régime turbulent dans un conduit curviligne
24

II.3.3 Notion de la couche limite
24

II .3.3.1 Couche limite hydrodynamique
25

II .3.3.2 Couche limite thermique
25

II .4. modélisation mathématique d'un écoulement convectif
26

II .4.1 Equations de la convection en régime laminaire
26

II .4.2 Equations de la convection en régime turbulent dans un conduit curviligne
26

II .4.3 Corrélations empiriques de transfert thermique en convection forcée
27

II .5. Convection dans les nanofluides
29

II .5.1 Spécificité des écoulements Internes
29

II .5.1.1 Zone d'écoulement non établit
30

II.5.1.2Zone d'écoulement établit
30

II .5.2 Aspects hydrodynamique et thermique en régime turbulent
30

II .5.2.1 Profil de vitesse
31

II .5.2.2 Le coefficient de frottement 31

II .5.2.3Perte de charge dans la conduite
31

II .5.2.4 Le nombre de Nusselt
31

II .6. Travaux antérieurs
32

II .7. Conclusion
34

CHAPITER III: SIMULATION AVEC LOGICIEL COMSOL MULTIPHYSICS

III.1.INTRDUCTION…… 35

III .2. Énoncé du problème.…….. 36

III .3.Méthode numérique et validation ……36 III .4. Résultats et interprétation ……. .37

III.4.1. Nombre de Nusselt moyen …….. 38

III.4.2. Coefficient de frottement ……38

III.4.3. Perte de charge……39

III.4.4. Intensité turbulente ……40

III .5.Conclusion …… 41

CONCLUSION GENERALE42

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Rapport des masses volumiques des différentes nanfluides en fonction de la fraction volumique……09

Tableau I.2 : Rapport des chaleurs spécifiques des différentes nano fluides en fonction de la fraction volumique……11

Tableau I.3 : Rapport de viscosité dynamique de nanofluide (Eau+Al2O3) en fonction de la fraction volumique……14

Tableau I.4 : Rapport de viscosité dynamique de nanofluide (Eau+CuO) en fonction de la fraction volumique……15

Tableau I.5 : Rapport de conductivité thermique de nanofluide (Eau+CuO) en fonction de la fraction volumique……18

Tableau I. 6 : Rapport de la conductivité thermique de nanofluide (Eau+AL2O3) en fonction de la fraction volumique……19

Tableau II. 1 : nombres adimensionnels utilisés dans la convection forcée et leurs significations [19]……28

Tableau III.1:Les propriétés thermo physiques des nanoparticules de CuOet de l'eau à T=30°C

55

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape ……06

Figure I.2 : Variation de la masse volumique en fonction de la fraction volumique……08

Figure I.3 : Variation des chaleurs spécifiques des différentes nano fluides en fonction de la fraction volumique……10

Figure I. 4: Variation de la viscosité en fonction de la fraction volumique……13

Figure I.5 : Variation de la viscosité en fonction de la fraction volumique……..13

Figure I.6: Variation de la conductivité thermique de nanofluide à base CuO en fonction de la fraction volumique……..17

Figure I.7 : Variation de la conductivité thermique nano fluide à base de Al2O3en fonction de la fraction volumique……17

Figure II.1: Régime d'écoulement,……23

Figure II.2 : Couche limite hydrodynamique et thermique ……25

Figure II.3 :Profil de vitesse d'un fluide en écoulement dans un tube curviligne [20]……30

Figure II.4 :Évolution du coefficient h du nanofluide (1% Al2O3) et de l'eau en fonction du nombre de Reynolds [13]……33

Figure II. 5 :évolution du coefficient h local le long de tube ……33

Figure II. 6 :Amélioration du coefficient h local le long de tube ……34

Figure III.1 : Schéma de la géométrie étudiée……...35

Figure III.2 : Schéma de la géométrie maillée……36

Figure III.3 : Test de maillage et validation de code de calcul ……36

Figure III.4 : Validation de code de calcul ……37

Figure III.5 : Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Reynolds pour differentes concentrations en nanoparticues CuO……38

Figure III.6 : Coefficient de frottement en fonction de nombre de Reynolds pour differentes concentrations en nanoparticues CuO……38

Figure III.7 : Perte de charge en fonction de nombre de Reynolds pour differentes concentrations en nanoparticues CuO……38

Figure III.7 : Intensité turbulente en fonction de l/D pour differentes concentrations en nanoparticues CuO……39

NOMENCLATURE

a: acceleration [$m.s^{-2}$]
C_f:Coefficient defrottement moyen [1]
C_p:Chaleur spécifique a pressionconstante [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
$d_{p\ :\ Diametre\ de}$ nanoparticule [nm]
D: diameter du tube [m]
l: Longueur du tube [m]
Rc: Rayon de courbure [m]
h :Cofficient mayen detransfert par convection [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
k: Energie cinétique turbulenteturbulent [$m^2.s^{-2}$]

It :Intensité turbulente [1]
p : Pression [Pa]
q :Quantité de chaleur a la paroi [$W.m^{-2}$]
r : Coordonnée radiale [m]
Z : coordonées axiale [m]
T :temperature [K]
V: Vitesse [$m.s^{-1}$]
t :fluctuation de temperature [K]
Re: Nombre de Reynolds [1]
Pr: Nombre de Prandts [1]

lettres Greek

α : Diffusivité thermique [$W.m^{-2}$]
β : Coefficient d'expansion volumetrique [K^{-1}]
ε :Dissipation de l'energie cinétique turbulente [$m^2.s^{-1}$]
θ : Coordonnée angulaire
ϕ :Concentration volumique de nanoparticules
λ : Conductivité thermique du fluid [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
μ : Viscosié dynamique du fluidfluid [$Kg.m^{-1}.s^{-1}$]
v :viscosité cinématique [$m^2.s^{-1}$]
ρ :Densitédu fluid [Kgm^{-3}]
τ : Taux de cisaillement [Pa]

Abréviation

eff :Effective
nf :Nanofluid
p :Particule
t :Turbulent
w :Paroi

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la simulation de l'écoulement turbulent à travers un tube curviligne de section circulaire, qui est de nature incompressible et stationnaire. Pour caractériser l'écoulement des nanofluides à travers un tube curviligne, le transfert de chaleur transfert de chaleur par convection forcée d'un écoulement turbulent de nano fluide dans un coude à 90 ° a été simulé en utilisant Comsol multiphysics. Le modèle monophasé a été adoptée pour étudier un tel champ d'écoulement en utilisant le modèle turbulent -w. Les nanofluides considérés sont des mélanges de nanoparticules de CuO et d'eau comme fluide de base. La paroi du tube est maintenue à une température constante uniforme pour 1000<Re<10000 et avec des concentrations en nanoparticules de 0%,2% et 4% . L'effet du nombre de Reynolds et de la concentration nano sur le nombre de Nusselt, la perte de charge, coefficient de frottement et l'intensité turbulente ont été présentés et discutés. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de Re et l'ajout des nanoparticules améliorent le transfert de chaleur mais en revanche intensifier la perte de charge. De plus, les résultats obtenus indiquent que l'intensité turbulente est considérablement amélioré par l'ajout de nanoparticules dans le coude et atteint sa valeur maximale à = 90◦. Aussi et contrairement au tube linéaire, il sert a diminue le frottement le long du coude.

Mots clés: Coude circulaire, écoulement turbulent, convection forcée, Nano-fluide, Comsol multipysics

Abstract :

The work presented in this dissertation focuses on the study and simulation of turbulent flow through a curvilinear tube of circular section, which is incompressible and stationary in nature. To characterize the flow of nanofluids through a curvilinear tube, the heat transfer heat transfer by forced convection of a turbulent flow of nanofluid in a 90 ° bend was simulated using Comsol multiphysics. The single-phase model was adopted to study such a flow field using the turbulent -w model. The nanofluids considered are mixtures of CuO nanoparticles and water as base fluid. The tube wall is maintained at a constant uniform temperature for 1000 <Re <10000 and with nanoparticle concentrations of 0%, 2% and 4%. The effect of Reynolds number and nano concentration on Nusselt number, pressure drop, coefficient of friction and turbulent intensity were presented and discussed. The results obtained show that the increase of Re and the addition of nanoparticles improve the heat transfer but on the other hand intensify the pressure drop. In addition, the results obtained indicate that the turbulent intensity is considerably improved by the addition of nanoparticles in the bend and reaches its maximum value at = 90◦. Also and unlike the linear tube, it serves to reduce friction along the elbow.

Keywords: Circular bend, turbulent flow, forced convection, Nano-fluid, Comsol multipysics

ملخص

يركز العمل المقدم في هذه الرسالة على دراسة ومحاكاة التدفق المضطرب من خلال أنبوب منحني من مقطع دائري ، وهو غير قابل للضغط وثابت بطبيعته. لتوصيف تدفق السوائل النانوية عبر أنبوب منحنى ، تمت محاكاة درجة 90نقل الحرارة عن طريق الحمل الحراري القسري لتدفق مضطرب من السوائل Comsol multiphysics باستخدام
المضطرب. الموائع النانوية w- تم اعتماد نموذج أحادي الطور لدراسة حقل التدفق هذا باستخدام نموذج المعتبرة عبارة عن خليط من جزيئات النحاس النانوية والماء كسائل أساسي. يتم الحفاظ على جدار الأنبوب عند ٪. تم 4٪ و 2٪ و 0وبتركيزات جسيمات متناهية الصغر تبلغ 1000 <Re < 10000درجة حرارة موحدة ثابتة عرض ومناقشة تأثير عدد رينولدز وتركيز النانو على عدد نسلت وهبوط الضغط ومعامل الاحتكاك وشدة الا وإضافة الجسيمات النانوية تعمل على تحسين نقل Re ضطراب. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن زيادة .الحرارة ولكن من ناحية أخرى تكثف انخفاض الضغط
بالإضافة إلى ذلك ، تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن شدة الاضطراب قد تحسنت بشكل كبير من خلال أيضًا ، وعلى عكس الأنبوب .90° = إضافة الجسيمات النانوية في المنعطف وتصل إلى قيمتها القصوى عند .الخطي ، فإنه يعمل على تقليل الاحتكاك على طول الانحناء

الكلمات المفتاحية: متعدد الفيزياء ، السائل النانوي ، الحمل الحراري القسري ، التدفق المضطرب ، الانحناء الدائري كومسول

INTRODUCTION GENERALE

Flux de fluide et transfert de chaleur dans les conduits courbes ont fait l'objet d'un intérêt considérable, en raison principalement à l'applicabilité de ces informations à la conception d'échangeurs de chaleur, d'équipements de réfrigération et turbomachines. Les performances de l'échangeur de chaleur sont améliorées en améliorant coefficient de transfert de chaleur et cette amélioration, en outre, réduit le la taille des échangeurs de chaleur qui est la condition cruciale pour répondre aux demande de refroidissement. En général, les techniques d'amélioration du transfert de chaleur peuvent être regroupés en techniques actives et passives. La technique active a besoin les forces externes et le groupe passif nécessitent une face géométrique de surface spéciale ou additifs fluides et divers insert de tube. La configuration du tube enroulé est largement utilisé dans les industries euch comme centrales électriques, réacteurs nucléaires, réfrigération et systèmes de climatisation, récupérateurs de chaleur, produits chimiques transformation, industries pharmaceutiques et ainsi de suite. Le tube enroulé est de deux types à savoir tube hélicoïdal enroulé et enroulé en spirale. Le modèle d'écoulement dans un conduit courbe diffère de cela dans un droit principalement par présentant un `` écoulement secondaire '' dans la section transversale plans du conduit, cette le flux secondaire est généré par la centrifugation forces agissant perpendiculairement au flux principal direction. la force centrifuge induit la génération d'un flux secondaire qui fait un bon mélange de particules de fluides dans un tube hélicoïdal qui améliore le contact physique entre la zone du tube et les fluides. Cette fournit également un meilleur mélange des fluides qui se traduit par une amélioration du gradient de température, les taux de chaleur, de masse et d'impulsion le transfert dans les conduits courbes sont significativement plus élevés que les valeurs correspondantes du tube droit.

le rendemement thermique d’un echangeur de chaleur est encore developé par l’utilisation des nanofluides comme fluides caloporteur

Un nanofluide est un mélange de nanoparticules et d'un fluide de base. Les

nanoparticules typiques sont constituées de métaux, d'oxydes ou de carbures, tandis que les fluides de base peuvent être de l'eau, de l'éthylène glycol ou de l'huile. Le nanofluide présente des propriétés thermophysiques différentes de celles du fluide de base. En général, la conductivité thermique des nanofluides est supérieure à celle du fluide de base, ce qui augmente le taux de transfert de chaleur. L'amélioration du transfert de chaleur à l'aide de nanofluides dépend principalement du type de nanoparticules, de la taille des nanoparticules et de la concentration de nanoparticules dans le fluide de base.

L'étude des écoulements turbulents des nanofluides dans les conduites curviligne de différentes sections et de formes diverses est un problème ouvert présentant des enjeux technologiques importants, des etude sont réalisées dont le but est décrire le comportement de l'ecoulement des nanofluides dans des tubes curviligne. cependant, la plupart de ces études sont basées sur les lignes de courant et les profils de vitesse.

Les objectifs du présent travail ont été l'étude numérique des écoulements turbulents en convection forcée dans des conduites curvilignes, de sections circulaires en utilisant le code de calcul Comsol Multiphysics. Une attention particulière a été accordée au comportement des thermiques et hydrodynamique à l'intérieur des conduites courbés.

Ce mémoire comprend trois chapitres répartis comme suit :

Aprés une introduction générale, un premier chapitre représente des généralités sur les nanofluides aves ses propriétés et ses modéles. un deuxième chapitre sur les ecoulements turbulents en convection forcée dans les tubes curviligne en decrivant la formulation mathématique adaptée aux équations régissant les champs dynamique et thermique de l'écoulement du fluide. Ensuite, un troisiéme chapitre qui decrit la simulation du probléme etudie sous Comsol Multiphysics. Enfin, on se termine avec une conclusion générale

CHAPITRE I : GNéRALITéS SUR LES NANOFLUIDES AVEC SES PROPRIéTIES ET SES MODéLES

I.1. Introduction

Les nanofluides, des suspensions de nanoparticules dans un fluide de base. Ce terme était introduit par Choi(En 1995, l'laboratoire d'Argonne (USA), répondait au besoin d'améliorer la diffusivité thermique des liquides de refroidissement. Les nanofluides ont une grande performance énergétique par rapport aux fluides classiques reconnus .Grace aux nanoparticules la conductivité thermique de fluide s'améliore de façon remarquable, Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, masse volumique, la chaleur spécifique, capacité thermique massique, etc.) Des fluides de base sont profondément modifiés par l'ajout des nanoparticules. Plusieurs modèles analytiques et corrélations expérimentales ont été proposés dans la littérature pour la modélisation des paramètres expliquant les propriétés termophysiques des nanofluides. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques modèles parmi les plus utilisés.

I.2. Nanoparticules et les fluides de base

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique (1-100 nm) –s'appel "nanoparticules" - en suspension dans un fluide conventionnel (dite : fluide de base ou fluide caloporteur). Le choix des liquides de base est essentiel pour un nanofluide, il permit d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégations, la sélection d'un telle fluide se ferra en

fonction de la nature de nanoparticule, généralement les solvants couramment utilisés sont : l'eau, les 'huiles, l'éthylène glycol (EG)ou le Toluène.

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 a 100 nm) et de forme géométrique précisée (Sphériques, cylindriques, ….). Les nanoparticules Elles ont un intérêt à la fois fondamental et applique et sont très étudiées de nos jours.

De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques .La liste des nanoparticules utilisées pour obtenir des nanofluides et très large on peut citer parmi eux :

- l'aluminium, Al et l'oxyde d'aluminium, Al_2O_3
- le cuivre, Cu et l'oxyde de cuivre, CuO.
- le dioxyde de titane, TiO_2
- l'or, Au et l'argent, Ag.
- les nanotubes de carbone NTC.
- la silicone, Si…etc.

Selon le type de nanoparticules introduites dans la formation des nanofluides, on peut classer ce dernier en trois catégories suivant ; nonofluide a base :

- Métalliques : Cu, Ag, Au, …
- Oxydes : Al_2O_3, CuO, SiO_2, TiO_2 …
- Non métalliques :Nanotubes de carbone (CNT)

I.3. Méthodes de production et préparation des nanofluides

I.3.1. Elaboration des nanomatériaux

Pour fabriquer des structures a tailles nanometriques il existe classiquement deux grandes approches dans l'élaboration des nanomatériaux : l'approche « *bottom-up* » et l'approche « *top-down* ».

- **L'approche « *bottom-up* »**

  D'un cote on diminue la taille des objets existants, c'est la démarche descendante ou **«top-down»**. Cette approche vise à produire des nanoparticules a partir de fractionnements successifs d'un matériau massif et on le réduit à l'échelle

nanométrique comme par exemple par CVD (Chemical Vapor Deposition) ou par laser pulsé. Les méthodes de cette approche sont essentiellement fondées sur 1'application des sollicitations mécaniques importantes (chocs violents, fortes déformations).

- **L'approche « *top-down* »:**

  Dans cette méthde, On peut également utiliser la démarche inverse la matière est assemblée atome par atome, en général par des méthodes chimiques, pour former des particules ou des molécules intégrables dans des systèmes plus importants. cette dernière approche est souvent utilisée en laboratoire pour la production des nanoparticules.

I-3.2. Méthode de fabrication des nanofluides

En générale, il existe deux méthodes pour la production des nanofluide, à savoir, la méthode en une seule étape et la méthode en deux étapes. Dans le procédé en deux étapes, d'abord la fabrication des nanopoudres sèches, puis les disperser et mélanger dans le fluide de base.

- Méthode en seule étape :

  La procédé en une étape combine la production et la dispersion de nanoparticules dans le fluide de base en une seule étape. C'est la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base (synthèse direct dans un fluide de base) et de prévenir l'oxydation des particules de métal pur. Cette procédé peut préparer des nanoparticules dispersées de manière uniforme et les particules de manière stable peuvent être mis en suspension dans le fluide de base.

- Méthode en deux étapes (tow-step-méthod) [8]:

  Cette méthode consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. C'est la méthode la plus largement utilisée car elle est la méthode la plus économique pour produire des nanofluides à grande échelle.

Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de

beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients et certaines ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules.

- Méthodes de nature physique :

  La méthode physique et la méthode la plus simple consiste à subdiviser un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Toutefois, cette méthode présente d'importantes limitations car elle ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille. En général, les méthodes physiques nécessitent un matériel coûteux pour un rendement en nanoparticules souvent très limité.

- Méthodes de nature chimiques :

  Aujourd'hui un grand nombre de méthodes de synthèse par voie chimique sont disponibles et présentent l'avantage d'être en général simples à mettre en œuvre et d'être souvent quantitatives et peu coûteuses .Ces méthodes permettent d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relativement étroite et de morphologies variées.

Généralement, les principaux moyens physiques ou chimiques pour la fabrication des nanofluides sont :

- la mécanosynthèse (broyage à haute énergie)
- la précipitation chimique (réduction de sels métalliques par exemple)
- les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur (CVD ou PVD)
- les dépôts chimiques en phase vapeur assistés par plasma (PECVD)
- la condensation de vapeurs par détente brutale dans des tuyères supersoniques
- la pulvérisation cathodique radiofréquence

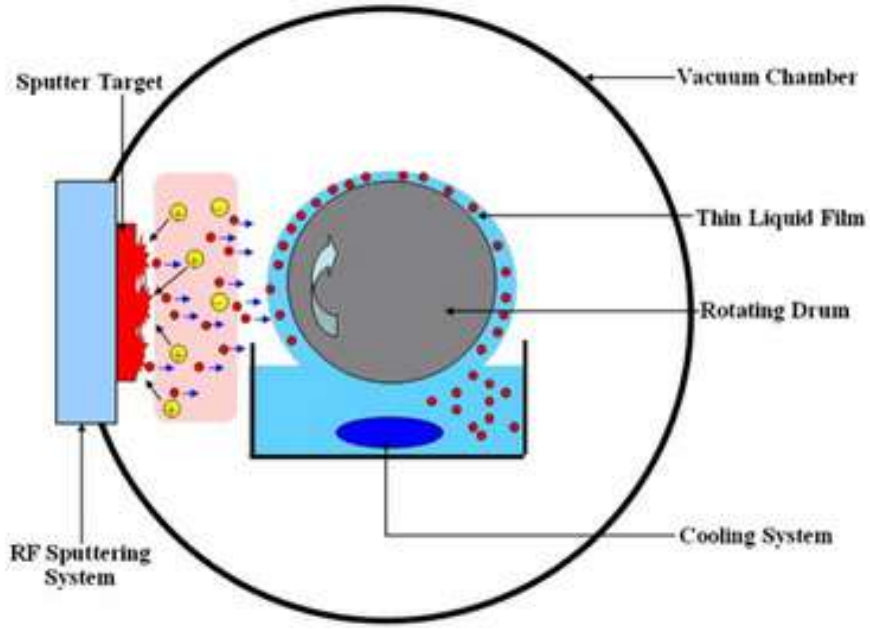


Fig. 12 : Pyrolyse laser donnant de la nanopoudre à mélanger au liquide et dépôt direct dans le liquide par pulvérisation cathodique sous vide

I-4. Mécanismes de stabilité de nanofluides

Particules en dispersion peuvent adhérer ensemble et former des agrégats de taille croissante qui peuvent se déposer en raison de la gravité. La stabilité signifie que les particules ne se agrègent à un taux significatif. Le taux d'agrégation est en général déterminée par la fréquence de collisions et la probabilité de la cohésion en cas de collision. Si le force d'attraction est supérieure à la force de répulsion, les deux particules entrent en collision, et le la suspension ne est pas stable. Si les particules ont une forte répulsion suffisante, les suspensions seront exister dans un état stable. Pour nanofluides stables, les forces répulsives entre les particules doit être dominante.

I-5. Domaines d'applications de nanofluides

À partir de ces applications dans le domaine du transfert de chaleur, les nanoparticules sont intéressantes pour des applications magnétiques, électriques, chimiques et biologiques. Grâce à leurs propriétés d'amélioration du transfert thermique, les nanofluides peuvent être utilisés dans une multitude d'applications d'ingénierie (dans l'industrie de transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique), dans le génie biomédical, le refroidissement des composantes microélectroniques, refroidissement des systèmes nucléaires etc.).

• Défense • Espace • L'échangeur de chaleur • biomédecine • Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire de l'eau, refroidisseurs,

réfrigérateurs domestiques, Diesel combustion, Forage, Lubrifiants, stockage thermique, ...).

I-6. Avantages et inconvénients des nanofluides

I-6.1. Avantages de nanofluides

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

I.6.2. Les inconvénients du nanofluides

- le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.
- mauvaise caractérisation des suspensions.
- stabilité des nanoparticules dispersion.
- chute de pression accrue et la puissance de pompage.
- viscosité supérieur, chaleur spécifique Basse.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.

I.7. propriétés thermo-physiques des nanofluides

I.7.1.La fraction volumique(Ø) :

La fraction volumique est définit comme elle le rapport ente le volume des nanoparticules sur le volume totale de nanofluide. Ce paramètre est très important pour un nanofluide car il rentre dans toutes les relations utilisées pour calculer les autres propriétés.

La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$\varnothing = \frac{V_s}{V_{Total}}$$

D'après la relation précédente, La valeur de la fraction volumique est varie entre 0 (fluide de base pure) et 1.C'est une grandeur sans dimension (%) et s'exprime par la relation suivante :

I.7.2. Conductivité thermique des nanofluides (k_{nf}):

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur au sein des échangeurs thermique, Il existe cependant plusieurs corrélations plus ou moins fondées sur des considérations physiques parmi les plus utilisées , citaon:

a. **modèle de Maxwell (1873) :**

Ce modèle de base suppose que les particules sont sphérique, il est donné par la formule suivant [7] :

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

k_{nf}, k_f et k_s designent respectivement les conductivites thermiques du nanofluide, du fluide de base et des particules solides; φ : la fraction volumique = $\frac{V_s}{V_{total}}$. Le modèle de maxwell est valable uniquement pour les nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques ce qui limite leur intervalle d'utilisation.

modèle de Hamilton-Crosser(1962) :

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante [7]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s+(n-1)k_f-(n-1)\left((k_f-k_s\right)\varphi}{k_s+(n-1)k_f+\left((k_f-k_s\right)\varphi} \ldots.3.14$$

Ou n est un facteur de forme empirique donne par :$n = \frac{3}{\psi}$

La notion du facteur géométrique appelé la sphéricité (ψ) faisant référence a la géométrie sphérique. Ce coefficient est définit comme étant le rapport de la surface de

la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

Quand *n* = 3 (Ψ =1) on retrouve le cas des particules sphériques) le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell. Le cas *n* = 6 correspond à des particules de forme cylindriques.

b. Modèles de Chon :

Le modèle de Chon incorpore l'effet de la température, de la taille des particules, de la fraction volumique, des propriétés physico-chimiques du fluide caloporteur et du mouvement brownien . il est donnée par la relation suivante

$$\frac{k_{nf}}{k_{fc}} = 1 + 64.7\phi^{a}\left(\frac{d_{fc}}{d_{np}}\right)^{b}\left(\frac{k_{np}}{k_{fc}}\right)^{c} Pr^{d}Re^{e}$$

Avec Pr le nombre de Prandtl du fluide caloporteur et Re le nombre de Reynolds, basé ici sur
la vitesse du mouvement brownien des nanoparticules dans le fluide. *a*, *b*, *c*, *d* et *e* sont des
nombres sans dimensions à déterminer pour chaque type de nanofluide.
Ce modèle a été utilisé par Chon pour modéliser la conductivité thermique du nanofluide eau/Al2O3. Les valeurs des paramètres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* trouvées par Chon dans ce cas particulier
sont : *a* =0,746 ; *b* =0,369 ; *c* =0,7476 ; *d* =0,9955 et *e* =1,2321

I.7.3. Viscosité dynamique(μ)

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement .On peut donc parler de la viscosité comme étant une mesure du frottement interne d'un fluide. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé. La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier.

Différents modèles de viscosités trouvés, citons par exemple :

a. Modèle d'Einstein (1906)

D'après **Einstein,** la viscosité dynamique d'un nanofluide pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines spheriques et rigides est donnée par la relation suivante:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi$$

μ_{nf},μ_f designent respectivement les viscosites dynamiques du nanofluide, du fluide de base et

φ la fraction volumique des nanoparticules. Cette relation n'est valable que pour $\varphi < 0.03$.

b. Modèle de Brinkman (1952) :

Par contre, Brinkman [46] a etendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\phi)^{\frac{5}{2}}}$$

Pour des faibles fractions volumiques, la relation de Brinkman conduit exactement à celle d'Einstein.

I.7.4. Masse volumique (ρ) :

La masse volumique d'un nanofluide ρ_{nf} supposée parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique Ø à une température T de référence donnée, se fait a partir de la définition de la masse volumique d'un mélange.

A partir de cette définition, ρ_{nf} est exprimée par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_{fb}+m_s}{V_{fb}+V_s} + \frac{\rho_{fb}V_{fb}+\rho_s V_s}{V_{fb}+V_s}$$

Rappelons que la fraction volumique des nanoparticules est donnée par :

$$\varphi = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume totale du nanofluide}} = \frac{V_S}{V_s+V_f}$$

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{fb} + \phi\rho_s$$

où ρ_{nf} , ρ_{fb} et ρ_s, désignent respectivement les masses volumiques du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules. Φdésigne la fraction volumique des nanoparticules.

I.7.5 Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique exprime la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène. Elle correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée.

$$C_P = dQmdt$$

D'après la majorité des auteurs dans littératures, la chaleur spécifique d'un nanofluide est exprimée par l'un des deux relations suivantes:

a. Modèle du Pak et Cho:
   Pak et Cho ont utilisé la formule suivante :

$$(C_P)_{nf} = (1-\varphi)(C_p)_f + \varphi(C_P)_s$$

b. **Modèlé de** Xuan et Roetzel :
   Le modèle du Xuan et Roetzel est donné par la relation suivante :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p$$

C'est cette derniere relation que nous conservons dans la suite de notre travail puisqu'elle est, contrairement a la premiere plus frequemment utilisee, mais a tort, dans de nombreux travaux, les formes aux lois de la thermodynamique. Ce dernier resultat peut-etre retrouve simplement en revenant a la definition de la chaleur specifique du nanofluide.

$$(\rho C_P)_{nf} = (\rho)_{nf}\ (C_P)_{nf} = \rho_{nf}\ \frac{Q_f+Q_s}{(m_f+m_s)\Delta T}$$

$$= \rho_{nf}\ \frac{(mC_P)_f\Delta T+(mC_P)_s\Delta T}{(m_f+m_s)\Delta T} = \rho_{nf}\ \frac{(\rho VC_P)_f+(\rho VC_P)_s}{(\rho_f V_f+\rho_s V_s)}$$

$$= \left(\frac{\rho_f V_f+\rho_s V_s}{V_f+V_s}\right)\left(\frac{(\rho VC_P)_f+(\rho VC_P)_s}{(\rho_f V_f+\rho_s V_s)}\right) = (\rho)_f\ (C_P)_f\frac{V_f}{V_f+V_s} + (\rho)_s\ (C_P)_s\frac{V_f}{V_f+V_s}$$

D'ou la relation precedente (3.4). $(C_P)_{nf}$,$(C_P)_f$ et$(C_P)_s$ designent respectivement les chaleurs specifiques du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules.

I-8.Conclusions

Dans les derniers décennies, les nanofluides prend la grande partie des études éffecties, ce chapitre introductif regroupe une revu bibliographique sur cette solution colloidale. La composition d'un nanofluide, ses méthodes de synthése avec les mécanismes de stabilité necessaires, ses applications potentielles dans l'intensification de transfert de chaleur, l'amélioration de transfert de masse, des champs d'énergie, domaines mécaniques et biomédicale champs, etc. Tout sont déscutés de facon bien détaillée dans ce chapitre. Aussi un présentation détaillée sur les propriétés de transports des nanofluides. Ces propriétés sont très importantes pour la modélisation de la convection appliquée à la dissipation de la chaleur.

CHAPITRE II: ECOULEMENT TURBULENT EN CONVECTION FORCéE DANS DES TUBES CURVILIGNES

II.1. INTRODUCTION

L'utilisation de géométries courbés est préférée à d'autres techniques d'agitation conventionnelles en raison à leurs performances similaires et parfois meilleures. Réduction de la consommation d'énergie et les coûts de maintenance les rendent encore plus attractifs. Augmentation du transfert de chaleur due au flux secondaire et offrant une plus grande surface de transfert de chaleur et de masse par unité de volume d'espace sont deux avantages principaux obtenus dans les applications de transfert de chaleur et de masse. Le transfert de chaleur dans les tuyaux courbes est considéré dans cette section, qui est souvent utilisée pour augmenter le taux de transfert de chaleur h (ou Nu). L'accent dans cette section est sur coudes de tuyaux dans un seul plan (et avec un rayon de courbure constant). Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu le transfert de chaleur par convection forcée, les ecoulements turbulents en convection forcée dans les coudes en terminant par une revie bibliogrphique sur les problèmes de convection forcée dans les tubes coudés.

II.2. phénomène de convection forcée

La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide entre des zones ayant des températures différentes. Dans ce type de convection le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques (compresseur, pompe, ventilateur, etc…) ; c'est un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides. Généralement, le refroidissement se fait par convection forcée et par changement de phase, cependant, la convection naturelle est une partie intégrante de la dissipation de chaleur surtout dans le cas des ordinateurs portables et les appareils électroniques de petite dimension.

II.3. Grandeurs fondamentales liées à la convection :

II.3. 1. Coefficient de transfert thermique par convection

Selon la loi de Newton sur le refroidissement, le taux de transfert thermique entre

une surface à une température et un fluide environnant à une température est représenté par l'équation :

$= h \quad (\quad - \quad).$

L'unité du coefficient de transfert thermique h est W/m2.K. Le coefficient h n'est pas une
propriété thermodynamique. Il représente une corrélation simplifiée à l'état de fluide et aux
conditions de flux et est, pour cette raison, souvent appelé une propriété de flux. La convection est liée au concept d'une couche limite constituant une couche mince de transition
entre une surface supposée adjacente aux molécules stationnaires et le flux de fluide environnant (voir Figure 1.6).

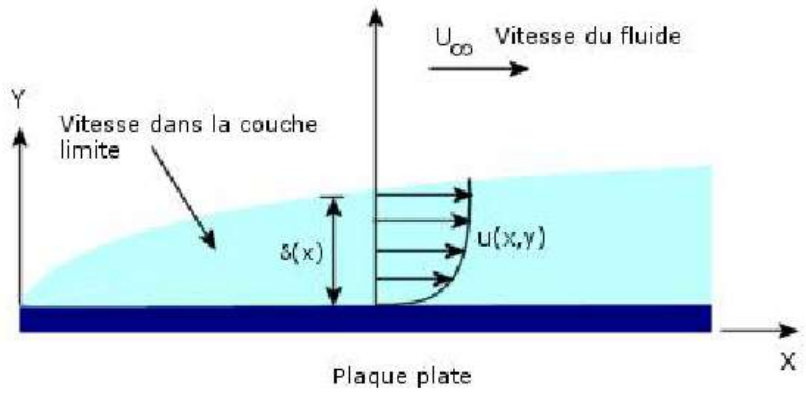


Figure 1.6 : gradient vitesse dans la couche limite

II. 3.2.Le nombre de Reynolds

Le **n**ombre de **Reynolds** est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent), Re < 2000 pour les écoulements laminaires et Re >3000 pour les écoulements turbulents.

$$Re = \rho VL/ \mu$$

Avec :

ρ μ La masse volumique du fluide (kg.m-3).

V : La vitesse du fluide en (m.s-1).

L : Une longueur caractéristique (m).

μ : La viscosité dynamique du fluide (kg.m-1 .s -1).

II.3.3.Le nombre de Prandtl Pr

Le nombre de **Prandlt** compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide.C'est le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et celle de la chaleur (diffusivité thermique)

Pr = / (1.6)

Avec et sont respectivement la viscosité cinématique et diffusivité thermique.

II.3.4.Le nombre de Nusselt Nu

Le nombre de **Nusselt** est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les transferts thermiques entre un fluide et une paroi, appelé transfert convectif

Nu = hL/λ (1.4)

Avec

h : Le coefficient de convection (W.K -1 .m-2).

L : Une longueur caractéristique (m).

La conductivité thermique (W.m-1 .K-1).

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

à la relation suivante :

= .

Avec : c , n et m sont des constantes dépendant des caractéristiques géométriques. [10].

II .3. Etablissement des écoulements turbulents dans les tubes

Cet écoulement est caractérise par un mouvement constate des tourbillons et des

turbulences.

Si on fait couler un filet de teinture et diffuse d'une façon très désordonné sur toute la veine fluide désordonné des particules à l'entrée de l'écoulement, il se déforme immédiatement fluide.[3] Sous l'effet de force de viscosité chaque molécule de fluide ne s'écoule On pas à la même vitesse.[4]

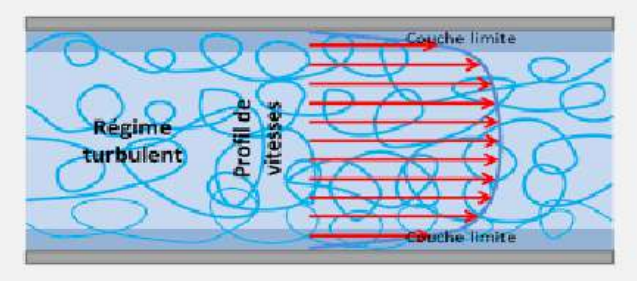


Figure I-4 : Ecoulement turbulent

En régime turbulent, l'écoulement n'est pas unidirectionnel L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction moléculaire est généralement négligeable par rapport à la convection et à la « diffusion turbulente » (mélange du fluide dû à l'agitation turbulente) en dehors de la sous-couche laminaire **Fig.I- 2** .

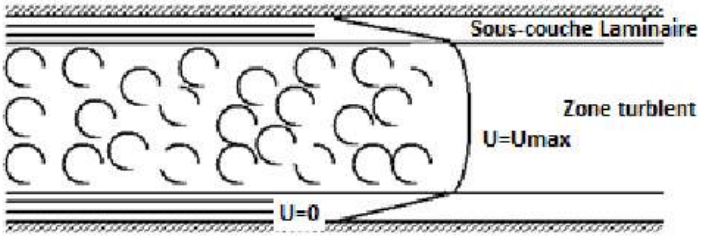


***Fig.I- 2**. Sous-couche laminaire d'un écoulement turbulent*

L'écoulement turbulent est caractérisé par un mélange aléatoire des couches de fluide. À cause de ce mélange, la distribution des vitesses est beaucoup plus uniforme le long de la section transversale du conduit. Le mélange a un effet positif sur le transfert de chaleur. Par contre, le mélange se traduit par la pulsation de la vitesse et de la pression. Ces pulsations peuvent être transférées à l'ensemble de la tuyauterie et à l'équipement, et provoquer des vibrations.

Le type d'écoulement (laminaire ou turbulent) dépend des propriétés du fluide

(viscosité et masse volumique), de sa vitesse et de la géométrie du conduit dans lequel il s'écoule. Voici les conditions qui favorisent l'écoulement laminaire :

- la viscosité dynamique est élevée (les forces de frottement s'opposent au mélange);
- la masse volumique est faible (un volume donné de fluide contient moins d'énergie cinétique pour vaincre le frottement);
- la vitesse est faible (il y a moins d'énergie cinétique pour vaincre le frottement);
- la largeur du conduit est faible (la proximité des parois rend plus difficile le mélange – c.-à-d. le déplacement transversal dans le conduit).

II.4. Ecoulement turbulent en convection forcée dans les coudes

L'écoulement dans les tuyaux courbes, dû aux forces centrifuges, donne lieu à des ecoulements secondaires . la structure des ecoulement se présente sous la forme de deux tourbillons axiaux contrarotatifs, appelé les vortex de Dean. De plus, la vitesse axiale maximale est décalée vers le côté extérieur du coude du tuyau, donnant lieu à une contrainte de cisaillement plus importante à le mur extérieur. Pour de petits rapports de courbure a egale R/Rc, où Rc est le rayon de courbure, le nombre de Dean est un paramètre de similarité. Le mouvement secondaire bien sûr non seulement a effets (important des quantités telles que) la perte de charge, mais aussi les caractéristiques de transfert de chaleur.

Dans un coude de 90◦, les parties centrales du flux qui vont sont plus rapidement poussés vers l'extérieur par les actions centrifuges, tandis que les parties les plus lentes près de l'extrados sont forcées vers l'intérieur à l'intrados le long de la paroi périphérique par la pression différence entre extrados et intrados. Puis le soi-disant l'écoulement secondaire a lieu dans le sens des aiguilles d'une montre ou sens anti-horaire autour de l'axe [10, 11]. Ces comportements induire un effet de compression sur l'extrados et un effet d'aspiration pour l'intrados. Parallèlement à la séparation de flux se produisant sur le intrados, le champ de vitesse instantanée et le champ de pression le coude s'est avéré très compliqué.

[11] H. Ito, "Flow in curved pipes," *JSME International Journal*, vol. 30, no. 262, pp. 543–552, 1987.
[12] R. J. S. Pigott, "Pressure losses in tubing, pipe and fittings," *Transactions of the ASME*, vol. 72, pp. 679–688, 1950.

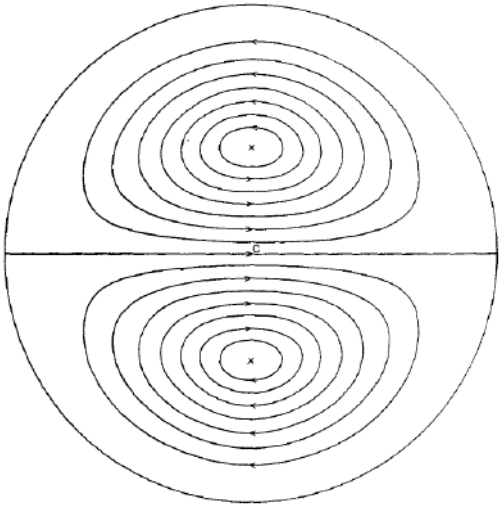


Figure 2.2 - Lignes de courant des tourbillons de Dean sur la section transversale en aval du coude (tiré de Dean).

II.4.1. Pertes de charge

Les pertes lors des changements de direction peut être minimisée en rendant le virage "facile" sur le fluide en en utilisant des arcs de cercle (comme le coude à 90 °) au lieu de virages serrés (comme un onglet plis) (Fig. 8–38). Mais l'utilisation de virages serrés (et donc de subir une pénalité en coefficient de perte) peut être nécessaire lorsque l'espace de braquage est limité. Dans dans de tels cas, les pertes peuvent être minimisées en utilisant un guide correctement placé aubes pour aider le flux à tourner de manière ordonnée sans être projeté le cours. Les coefficients de perte pour certains coudes et coudes d'onglet ainsi que les tés sont indiqués dans le tableau 8–4. Ces coefficients n'incluent pas le frottement pertes le long du coude du tuyau. Ces pertes doivent être calculées comme en ligne droite tuyaux (en utilisant la longueur de la ligne centrale comme longueur de tuyau) et ajouté à autres pertes.

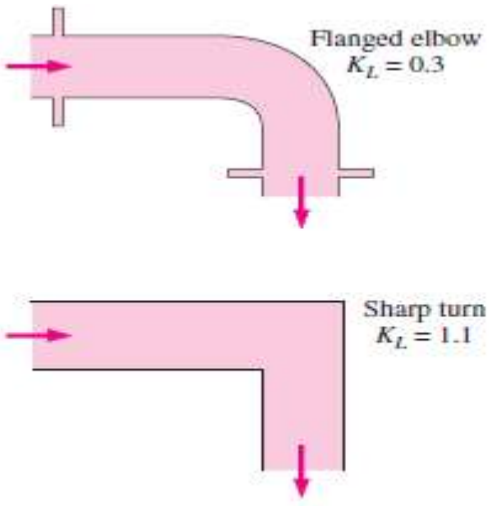


FIGURE –2.3 Les pertes lors des changements de direction

L'écoulement turbulent des fluides dans un système de tuyauterie s'accompagne à la fois de frottements cutanés et de forme, entraînant perte de pression ou d'énergie.Un frottement cutané se produit entre la paroi du tuyau / raccord de tuyau et le fluide qui

s'écoule à l'intérieur. En revanche à cela, un frottement de forme se produit dans les tuyaux / raccords de tuyauterie lorsque le fluide est soumis à des changements soudains de vitesse et de direction.

Une estimation précise de ces forces de frottement est nécessaire pour sélectionner les systèmes de pompage optimaux**5**. la perte de charge par frottement est représentée par l'équation (1)

$$\Delta P = 4C_f \rho U^2 \frac{L}{D}$$

IciC_f, le facteur de frottement (f) est lié à la contrainte de cisaillement de la paroi, qui dépend à son tour du degré de turbulence dans le système.

En général, le débit de liquide le long d'un tuyau peut être déterminé approximativement en utilisant l'équation de Bernoulli ou avec précision résoudre l'équation du mouvement. Le premier représente la conservation de l'énergie mécanique, qui est soit la pression, énergie potentielle ou cinétique; et ce dernier rend compte de l'échange d'impulsion entre les éléments fluides. cependant,les pertes dues au frottement entre le liquide en mouvement et les parois du tuyau entraînent une réduction de la pression à l'intérieur du tuyau avec distance. Cette réduction de pression due au frottement entre le fluide en circulation et la paroi solide est communément appelée tête perte. Les conceptions techniques de ces réseaux de canalisations sont principalement réalisées en utilisant le coefficient de perte de charge (K) également appelé Facteur K. Le coefficient de perte de charge (K) dans divers raccords de tuyauterie est prédit à l'aide de l'équation (2).

$$K = \Delta \quad / \quad V2$$

II.5 Revues Bibliographiques

Les écoulement en conduites (droites, coudées) interviennent dansde nombreux procédés industriels tel queles échangeurs de chaleur et systémes de refroidissement. Expérimentalement ce typed'écoulement a largement été étudie dans les années 1980 en conduites rectangulaires (mesures de pertes de charge, de champs de vitesse avec tube de Pitot…). **Dean (1927)** a montré théoriquement pour des petites courbures, dans un écoulement laminaire complètement développé, la dépendance des particules à un paramètre dynamique adimensionnel caractérisant le mouvement secondaire noté De = $(Dh/2Rc)^{1/2}$Re, (De:nombre de Dean, Dh: diamètre hydraulique, Rc: rayon de courbure, Re: nombre de Reynolds) Il a posé donc les fondements analytiques des écoulements secondaires. L'intensité du mouvement secondaire augmente avec Re et le rapport de la courbure (Dh/2Rc). **En 1928**, ses recherches sur l'instabilité des écoulements ont montré qu'une paire de cellules contrarotatives demeure dans les coudes et non pas dans les conduites droites. Il confirme et relie un tel phénomène à l'effet de la courbure. **Rowe (1970)** a présenté une étude expérimentale d'un écoulement turbulent à travers un coude de 180°. Il a rapporté que le retour du fluide

se génère localement près de l'angle 90° sous la condition d'un nombre de Reynolds égal à $2{,}36.10^3$. **Johnston (1978)** a conclu que les mouvements secondaires peuvent être expliqués, en termes de réponse à l'élément de fluide visqueux, à un déséquilibre entre l'accélération centripète et le gradient de pression radial de l'écoulement moyen induit par la courbure externe.

Mayle et al (1979) ont rapporté des mesures sur le taux de transfert de chaleur pour une couche limite située sur les parois concave et convexe. Ils ont trouvé que le transfert de chaleur sur la surface convexe était moindre que celui sur la surface plane ayant le même nombre de Reynolds et les mêmes caractéristiques de turbulence. Par contre, le transfert de chaleur de la surface concave augmentait par rapport à celui de la surface plane.

En utilisant la LDA(Laser – Doppler Velocimetry), la vitesse longitudinale moyenne change faiblement après l'angle 90°, par contre la vitesse circonférentielle n'atteint jamais le régime développé. Entre l'angle 90°et X/D=5. Le développement numérique est basé sur la troncation "semi elliptique" des équations de Reynolds avec le modèle k-ε utilisé pour quantifier le champ de contraintes turbulentes. En aval du coude, le taux de rétablissement de l'écoulement est très lent. **Winters (1987)** a constaté une paire de vortex additionnelle près de la paroi externe pour un écoulement développé dans un conduit courbe à section rectangulaire pour un nombre de Dean de 92. De plus, il a montré que si le nombre de Dean est compris entre 92 et 136 la solution demeure instable. **Arnal et al (1992)** ont fait l'étude d'un écoulement laminaire instationnaire se développant dans un conduit en U de section carrée en utilisant la LDA. Pour un nombre de Reynolds Re=1400, l'écoulement à l'entrée du coude est stationnaire, mais à l'angle 90° il développe une composante oscillatoire du mouvement le long de la paroi externe. Les vortex se développent comme résultat de l'instabilité centrifuge de l'écoulement sur la paroi externe. **Sotiropulos et Patel** (1992) ont développé les calculs de l'écoulement turbulent dans des coudes à 90° avec différentes formes de sections (circulaire, carré), par le modèle k-ε , en utilisant deux méthodes numériques différentes, l'une analytique et l'autre basée sur les différences finies. Dans les deux cas la structure complète de l'écoulement est bien prédite, mais l'effet du mouvement secondaire sur le développement de l'écoulement et les effets de la courbure de la paroi sur la turbulence à l'intérieur des couches limites sont sous estimés. Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement ont été résolues pour un écoulement stationnaire d'un fluide incompressible visqueux

dans un coude (angle à 90°), de parois lisses et rigides et de section droite uniforme et circulaire, par la méthode des volumes finis par **Thiriet et al (1993)**. Les conditions limites en entrée pour l'écoulement laminaire sont soit un profil parabolique, soit un profil uniforme de vitesse axiale, pour des valeurs du nombre de Dean compris entre 140 et 430. Un calcul numérique de l'écoulement turbulent a été effectué pour un nombre de Reynolds égal à 22 100 avec un profil de vitesse uniforme en entrée du modèle. La vitesse axiale dépend non seulement de la valeur du nombre de Dean, mais aussi du nombre de Reynolds et de la courbure du tube séparément. Le profil de vitesses est perturbé pour de très faibles courbures. L'écoulement secondaire se développe sur une région plus étendue du coude et le cisaillement pariétal est plus élevé quand le nombre de Reynolds augmente. Le coude affecte le cisaillement pariétal en amont et en aval. La présence d'un coude dans une conduite fait croître le temps de résidence des particules en suspension par rapport aux valeurs prises dans un tube droit isolé uniquement dans l'élément de conduite droit situé en aval du coude Cheah et al (1994) ont mené une étude expérimentale basée sur la LDA d'un écoulement turbulent à travers une conduite courbe à 180°, de section carrée (5x5cm) et de rayon de courbure égal à 3.25cm. Ils ont effectué des mesures de vitesses tangentielles en plusieurs stations du plan médian du coude. **Kim et Patel (1994)** : ont procédé à une expérience de l'écoulement de fluide à travers un canal haut et étroit coudé à 90°. Le virage à gauche génère un gradient de pression qui s'exerce de façon quasi uniforme sur toute la hauteur. Le fluide à basse vitesse prés du fond, ayant moins d'inertie, est dévié plus rapidement que le reste de l'écoulement. Cela génère un mouvement secondaire complexe (dans le plan perpendiculaire à l'axe de la conduite) .Une étude numérique a été développée par **Li et al (1994)** concernant l'écoulement et le transfert de chaleur d'un fluide à travers un coude en U de section carrée et d'un rapport de courbure Rc / D = 0,65. Quatre approches différentes de modélisation de la turbulence ont été testées. Les comparaisons des profils de la vitesse indiquent que le modèle de turbulence est raffiné successivement, le début de la séparation de l'écoulement le long de la paroi interne du coude est mieux prévu. Dans les calculs numériques à travers les coudes en U de forte courbure, il est devenu nécessaire d'utiliser la fermeture du second ordre afin de pouvoir reproduire correctement la séparation de l'écoulement à l'intérieur de tels coudes. **Sata et al (1994)** ont développé le système PTV (Particle Tracking Velocimetry) pour mesurer l'écoulement d'air, et l'ont appliqué à l'écoulement turbulent dans des conduits courbes à section carrée. Ils ont ainsi pu obtenir les distributions instantanées des vecteurs de vitesses dans un

volume tridimensionnel. **Mees et al (1996)** ont observé le début de l'apparition des cellules de l'écoulement secondaire au dessus du nombre de Dean 350. Une paire additionnelle aussi apparaît le long du rayon externe de la courbure. **Tamamidis et al (1996)** ont rapporté une étude sur les écoulements tridimensionnels visqueux et incompressibles en utilisant deux méthodes de calcul numérique basées sur la compressibilité artificielle et la pression. Chaque méthode est appliquée à la prévision des écoulements laminaires dans des conduites fortement incurvées (coudes 90°) de sections carrées et circulaires. Les résultats numériques de chaque méthode sont comparés aux données expérimentales disponibles. La précision, l'indépendance du maillage, le comportement de convergence, et l'efficacité des calculs numériques de chaque méthode sont examinées. Des simulations numériques d'écoulement stationnaire laminaire de fluide caractérisé par un comportement rhéologique rhéofluidifiant, ont été effectuées par **Thieret et al (1996)** dans un coude (angle de courbure de 90°, rapport de courbure de 1/10) et une bifurcation plane symétrique (angle de bifurcation de 70°, rapport de sections de 0.8). La méthode des éléments finis a été employée. Le fluide est supposé suivre un comportement newtonien généralisé; représenté par la loi de Carreau, adaptée aux faits d'observation. Les champs de grandeurs hydrodynamiques sont comparés aux champs obtenus lorsque le comportement est newtonien. Tout modèle d'écoulement de sang doit, à priori, prendre en compte le comportement non- newtonien du fluide. **Mokrani et al (1998)** ont utilisé dans une étude expérimentale sur une série de conduits courbes dont les plans de courbure successifs sont alternés de 90°, pour mettre en relief l'influence des perturbations géométriques sur les cellules de Dean. Cette investigation montre que les cellules formées se détruisent et se reforment à chaque changement d'orientation de la force centrifuge. Les trajectoires des particules sont, par conséquent, régulièrement modifiées. **Silva et al (1998)** ont procédé à une analyse hydrodynamique et thermique, par une méthode numérique, d'un écoulement laminaire dans des canalisations courbes à section rectangulaire ou elliptique. Un rapport de courbure est maintenu constant. Le nombre de Dean est varié entre 30 et 400 et pour plusieurs nombres de Reynolds et différentes formes de sections ayant un rapport hauteur/largeur compris entre 0.7 et 1.4. Les équations de Navier-Stokes et de la conservation de l'énergie sont résolues en utilisant la méthode des volumes finis, avec un système de coordonnées généralisées, adaptées aux conditions limites géométriques. Les profils de températures et de vitesses axiales et normales sont analysés, ainsi que le transfert thermique et les pertes de pression. Les résultats sont

validés par comparaison avec les données issues de la littérature. **Sudo et al (1998**) ont élaboré une investigation expérimentale sur l'écoulement turbulent dans un coude à 90° de section circulaire. Les composantes longitudinales, radiales et circonférentielles de la vitesse moyenne, ainsi que les fluctuations turbulentes ont été obtenues en utilisant la technique de l'anémométrie à fil chaud, pour un nombre de Reynolds égal à $6.10^{4.}$ Le champ de vitesses de l'écoulement secondaire, et les distributions des contraintes de Reynolds dans différentes sections du coude ont été illustrés. Un code de calcul basé sur les volumes finis est élaboré par **Chakravarthy et al (2000)** pour étudier l'écoulement turbulent de l'air à travers un coude en U. Les résultats sont obtenus en considérant deux cas différents du coude : stationnaire et rotatif. Un transfert de chaleur est mis en évidence en imposant aux parois une température de 700 K. Les résultats du champ dynamique sont comparés avec ceux de l'étude expérimentale de Cheah et al [9]. **Kim et al (2002**) ont présenté une analyse de l'écoulement turbulent et le transfert de chaleur au niveau de la paroi de sortie d'un coude à 90° de section carrée. Ils ont étudié particulièrement l'influence de l'écoulement secondaire, la vorticité et les conditions aux limites sur le transfert de chaleur. Les cellules contrarotatives peuvent transporter la masse, la quantité de mouvement et l'énergie de la partie concave vers la partie convexe. La structure de l'écoulement secondaire dans un conduit hélicoïdal a été étudiée par **Yamamoto et al (2002)** en employant, d'une part, un calcul numérique d'une trajectoire de particules de fluide et, d'autre part, une expérience en utilisant une technique de visualisation par fumée. Une bonne concordance a été obtenue entre les résultats de l'expérience et le calcul numérique. Une analyse numérique a été développée par **Sugiyama et Hitomi (2005)** pour un écoulement turbulent tridimensionnel dans un coude à 180°, en utilisant le modèle algébrique des contraintes de Reynolds (ARSM). Les résultats sont comparés avec les données expérimentales pour confirmer la validité de cette méthode. Il a été mis en évidence que la méthode est capable de prédire quantitativement et qualitativement une caractéristique expérimentale. Yang et Kuan **(2006**) obtenus les vitesses d'écoulement moyenne et turbulente du gaz et phases particulaires à l'intérieur d'un coude courbé 90. Gaz-liquide simulation d'écoulement turbulent biphasé pour un coude 900 a été rapporté par Spedding et Benard**(2007**). Un étude expérimentale de l'écoulement de fluide turbulent à travers un coude rectangulaire avec estimation du coefficient de la friction a été faite par Mandal et al**(2010**) . Un comparatif étude numérique entre trois types de modèles turbulent modèles standard k-ε, k-ω et Reynolds Stress avec visualisation du flux uniquement

pour le flux d'air turbulent dans un coude rectangulaire a été par la suite faites par les mêmes auteurs**(2010**). **Röhrig et al (2015**) ont étudié l'écoulement turbulent à travers un tuyau de 90◦ coude dans une plage de nombres de Reynolds entre 14000 et 34000 par CFD en utilisant la simulation de grands tourbillons résolue par le mur (LES) ainsi que divers modèles de Xavier-Stokes (RANS) à moyenne de Reynolds visant à une évaluation comparative pour illustrer les avantages et les inconvénients des différentes approches informatiques. **Dutta et al (2016**) ont analysé l'écoulement turbulent monophasé à travers les coudes de tuyaux à l'aide du modèle de turbulence k- pour trouver les caractéristiques de séparation de l'écoulement et de réassemblage sous nombre de Reynolds élevé. Le compte rendu détaillé des études précédentes sur la prédiction des chutes de pression dans les réseaux de canalisations utilisant CFD a été présenté dans le tableau A1. Ces études indiquent le potentiel de la CFD en termes de quantification de chute de pression dans les raccords de tuyauterie.

.

II .6. Modélisation mathématique d'un écoulement convectif dans une conduite curviligne

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

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 [18]:

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

$$P=P'+\bar{P} \qquad , \qquad T=T'+\bar{T}$$

Dans ces conditions les équation de la convection en coordonnées cartésiennes, fluide incompressible et newtonienne s'expriment par [18]:

L'équation de conservation de la mase :

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}=0$$

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

L'équation de conservation de la quantité de mouvement :

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

L'équation Conservation de l'Energie :

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

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 τ_t et du flux de chaleur turbulent q_t qui sont données par les relations ci-dessous.[18]

$$\tau t=-\rho\overline{v'u'}=ut\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}$$

qt = $\rho Cp\,\overline{v'T'}$

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 **[18] :**

$$\mu_t=\rho l_m^2\left|\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right|$$

II .5. 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 **[18].** 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.

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 **[18].** 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 **[18]**

II .7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les équations de la convection pour les nanofluides et la spécificité des écoulements dans des tubes,. Une étude bibliographique des travaux antérieurs sur les nanofluides sur l'écoulement monophasé dans les tuyaux courbes a montré que le nombre de Dean était un définition du paramètre. des relations empiriques plus pratiques ont permis des prédiction de la perte de charge. Le fluide la dynamique des coudes s'est avérée

complexe, avec séparation et couche limite effets faisant que l'écoulement en aval présente des caractéristiques cycliques qui n'ont pas été se prêtant à un traitement théorique. Ces données seront essentielles très indicative pour notre étude

CHAPITER III : SIMULATION AVEC LOGICIEL COMSOL MULTIPHISIQUES

CHAPITER III : SIMULATION AVEC LOGICIEL COMSOL MULTIPHISIQUES

III .1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude numérique de la convection forcée turbulente de nanofluide *CuO-eau* dans dans un coude à 90 degrés avec une section transversale circulaire . L'étude est tridimensionnel et axisymétrique ,une température constante et uniformément imposée à la parois latérale du tube. La méthode des éléments finis est appliquée pour résoudre le problème et l'approche mono phasique a été adoptée pour analyser et évaluer le phènomène de transfert convectif des nanofluides en écoulement. Les résultats obtenus sont présentés en termes de variation du nombre de Nusselt moyen, de perte de charge et de coefficient de frottement en fonction de concentrations en nanoparticules, de nombre de Reynolds et en fonction de dimensions du tube.

III .2. Énoncé du problème

La figure III.1 montre le domaine de calcul comprenant un tube curviligne avec un angle axial est égale à 90 degrés dans la direction du flux thermique de paroi constant. L'angle de courbure du tuyau est d'un rayon de et sa section transversale circulaire est d'un diametre de d, un nanofluide composé de CuO et de l'eau qui s'écoule le long du tube avec une vitesse à l'entrée V , une température constante T_p = 338.15 K est imposée à la paroi latérale du tube. Dans cette figure l = 700 mm ,D = 40 mm et = 100 .

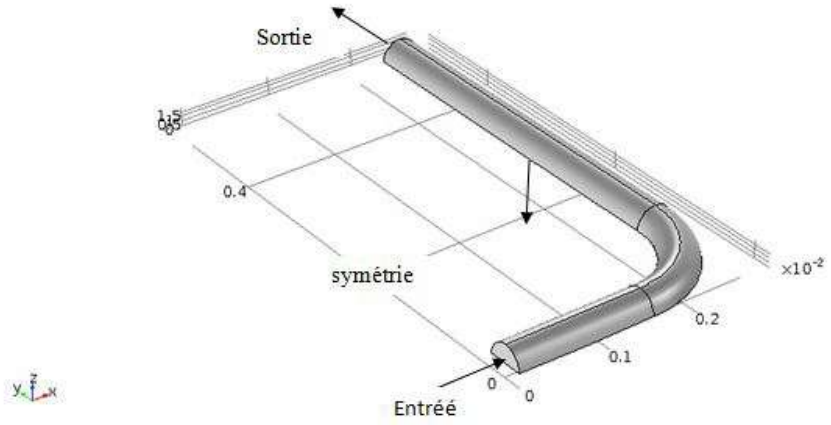


Figure III.1 : Schéma de la géométrie étudiée.

La maillage structurée non uniforme représentée sur la figure III.2 a été créée pour

discrétiser le domaine de calcul. le maillage est très séré près de la parois ou les gradient de la vitesse et celles de température sont élevés.

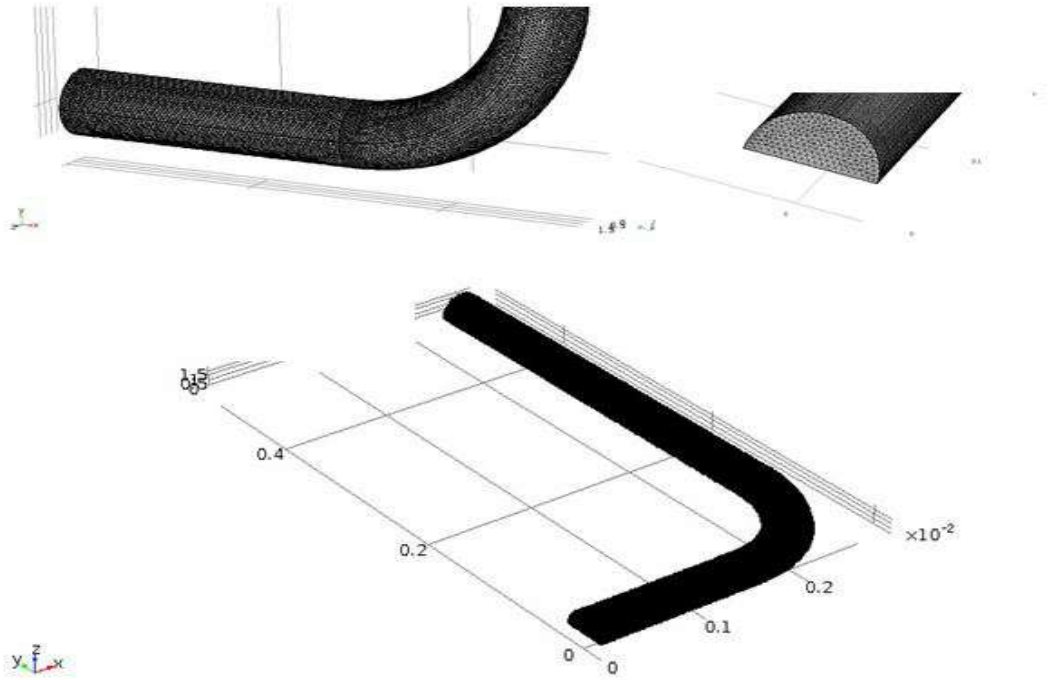


Figure III.2 : Schéma de la géométrie maillée.

Le modèle de mélange à une seule phase est utilisé pour analyser le comportement dynamique et thermique des nanofluides considérés. Dans cette approche, les nanoparticules sont supposée en équilibre thermique avec le fuide de base. De ce fait, ce modèle traite le nanofluide comme un fluide homogène sur lequel sont appliqués les principes de conservation connus sauf qu'à la place des propriétés physique du fluide il s'agira de considérer les propriétés thermo-physiques du nanofluide. Ces dernières tiennent compte des propriétés des deux phases fluides et solides. Une seule phase a vecteur de vitesse commun dans un volume de contrôle donné, il y a une certaine fraction de nanoparticules CuO dans le fluide de base (ici c'est de l'eau).

On suppose que le nanofluide est incompressible avec des propriétés physiques constantes, dont toutes les propriétés sont calculées en fonction de la température d'entrée du fluide comme référence. Le travail d'expansion et les pertes visqueuses dans l'équation énergétique sont ignorés. Les équations gouvernantes de l'écoulement turbulent à l'intérieur du tube sont déja decrit dans le chapitre précident

en supposant en suposant le nanofluide comme un fluide newtonien incompressible et en utilisant l'approximation de Boussinesq.

Les corrélations choisis exprimant ;la viscosité, la masse volumique et la conductivité thermique respectivement sont les suivantes :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}=1+2.5\,\varphi \quad \text{.....(III.1)}$$

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad \text{..... (III.2)}$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p+2k_f-2\varphi(k_f-k_p)}{k_p+2k_f+\varphi(k_f-k_p)} \text{.....(III.3)}$$

Dans cette étude, les propriétés thermo-physiques considérés pour le CuO**[26]** , l'Al_2O_3 et ceux de fluide de base sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau III.1: Les propriétés thermo physiques des nanoparticules de CuOet de l'eau à T=30°C

Proprietés	Cp [J/kg/K]	Densité [kg/m^3]	Conductivité thermique [W/m/K]	Viscosité dynamique [Pa*s]
CuO	385	3900	401	-
Eau	4179	997.1	0.613	$880.637*10^{-6}$

III .3.Méthode numérique et validation

Les équations de base régissant l'écoulement sont discrétisés et résolues par la méthode des éléments finis **[27]** adaptée par le code CFD (Comsol Multiphysics 5.4) **[28]** .Cette méthode est basée sur l'intégration spatiale des équations de conservation sur des éléments de contrôle finis, convertissant les équations différentielles régissant l'écoulement à un ensemble d'équations algébriques. Les équations algébriques "discrétisées" résultants de ce processus d'intégration spatiale ont été résolus séquentiellement dans tout le

domaine physique pris en considération. Comsol Multiphysics 5.4 résoud les systèmes résultant de schémas de discrétisation utilisant une méthode numérique. les résidus résultants de l'intégration des équations gouvernantes sont considérées comme des indicateurs de convergence.

De plus, les conditions limites d'entrée de l'eau ou des nanofluides ont été définies comme entrées de vitesse; de même, les sorties de pression ont été sélectionnées pour les conditions aux limites de la sortie. De plus, une température constante de 338.15 K a été appliquée sur les parois extérieures du tube. Le matériau du tube est en acier allié dont les propriétés physiques sont prises comme densité constante ρ = 7850 kg / m^3, chaleur spécifique Cp = 475 J / (kg K) et conductivité thermique k= 44.5 W / (m. K).

Trois maillages triangulaires de tailles différentes sont utilisés pour présenter la variation le rapport vitesse axiale sur la vitesse maximum u/V en fonction du raport r/D (R= D/2) , de but à tester l'indépendance de maillage aux calculs effectués. Toutes les tailles de maillage semblaient satisfaisant, mais dans cette étude, le maillage très fin qui est constitué de 47521 éléments a été adopté pour cette étude . comme indiqué dans la Figure III.3, le maillage choisi étaient le meilleure en terme de précision. La de Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds de présente simulation a été comparés avec celui déterminé par ***Marzieh et Afshin***[29] .Un très bon accord entre les deux résultats a été observé.

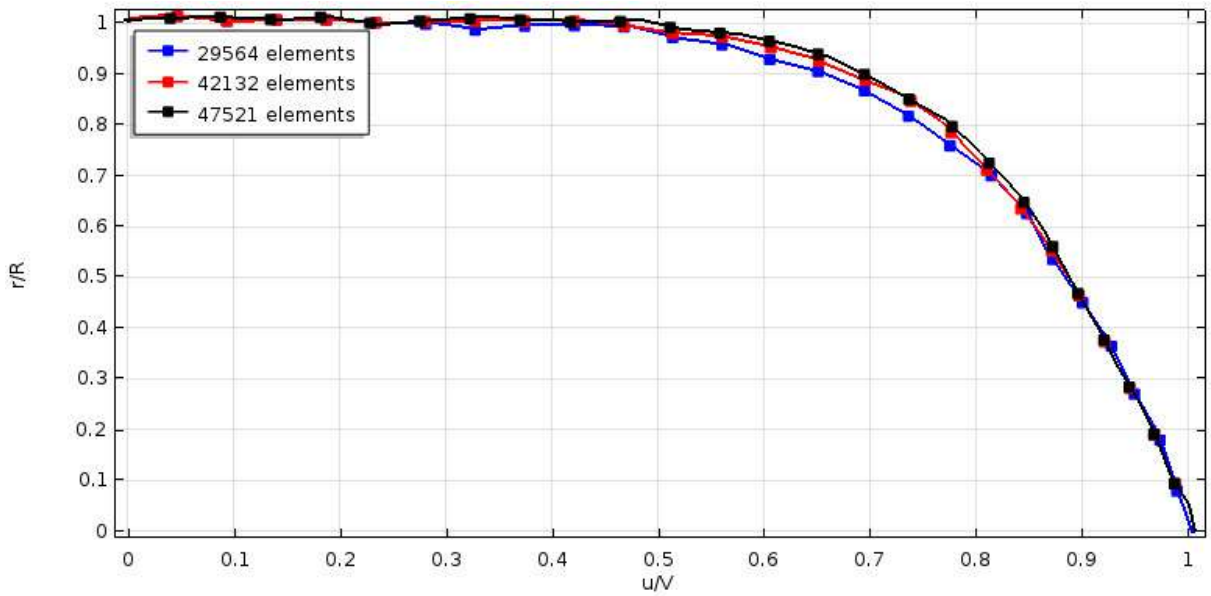


Figure III.3 : Test de maillage et validation de code de calcul

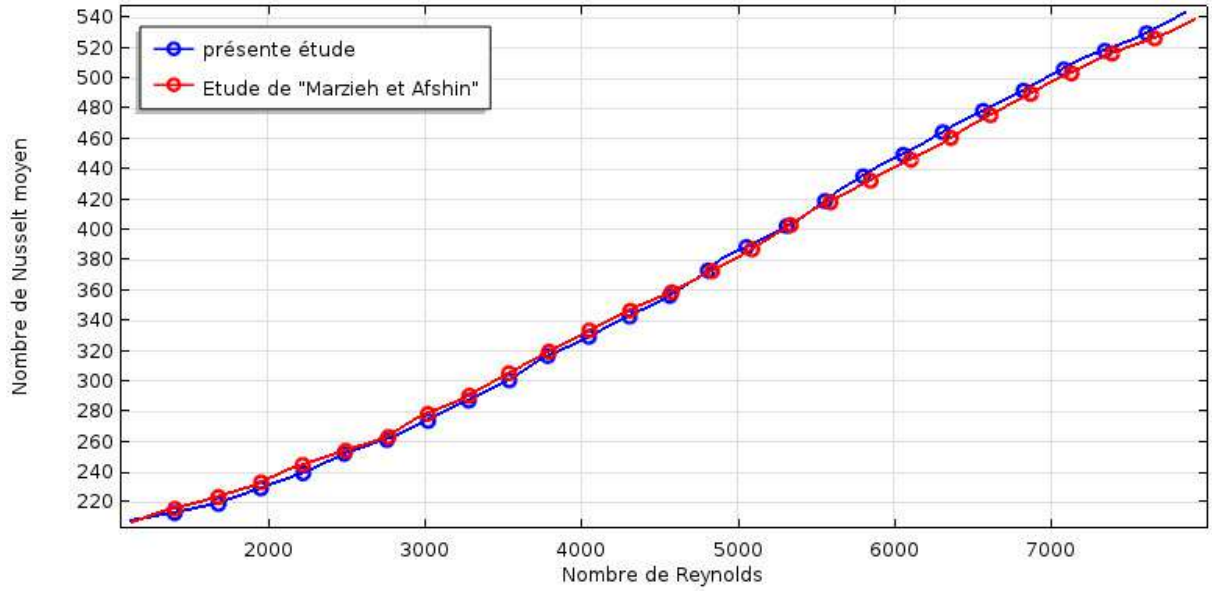


Figure III.4 : Validation de code de calcul

III .4. Résultats et interprétation

Après avoir sélectionné le maillage appropriée et assuré la validité du code de calcul, les équations gouvernantes ont été résolues avec les conditions aux limites. La vitesse, la température et la pression sont obtenues dans tout le champ d'écoulement; et en utilisant la définition du nombre de Nusselt, l'intensité turbulente, la chute de pression

et la vitesse coefficient de frotement sont étudiés pour le coude à différents nombres de Reynolds et différents rapports de volume.

III.4.1. Nombre de Nusselt moyen

une simultion a été fait pour un nombre de Reynolds varie de 1000 a 10000 avec un pas de 1000, et pour une concentration en nanoparticules de CuO de 0%, 2% et 4. La figures suivnte montrent l'effet de l'augmentation du nombre de Reynolds et de la concentration en CuO dans un Coude 90 ° et comme montré sur la figure, l'ajout de nanoparticules CuO à l'eau pure améliore efficacement le transfert de chaleur par convection. Le nombre de Nasselt augmente en raison de l'augmentation de la conductivité thermique. Le niveau de chaleur l'augmentation du transfert dépend de la concentration volumique de nanoparticules,dans le fluide de base, le nombre de Nusselt est minimum et à 4% le nomre de Nusselt est maximale.

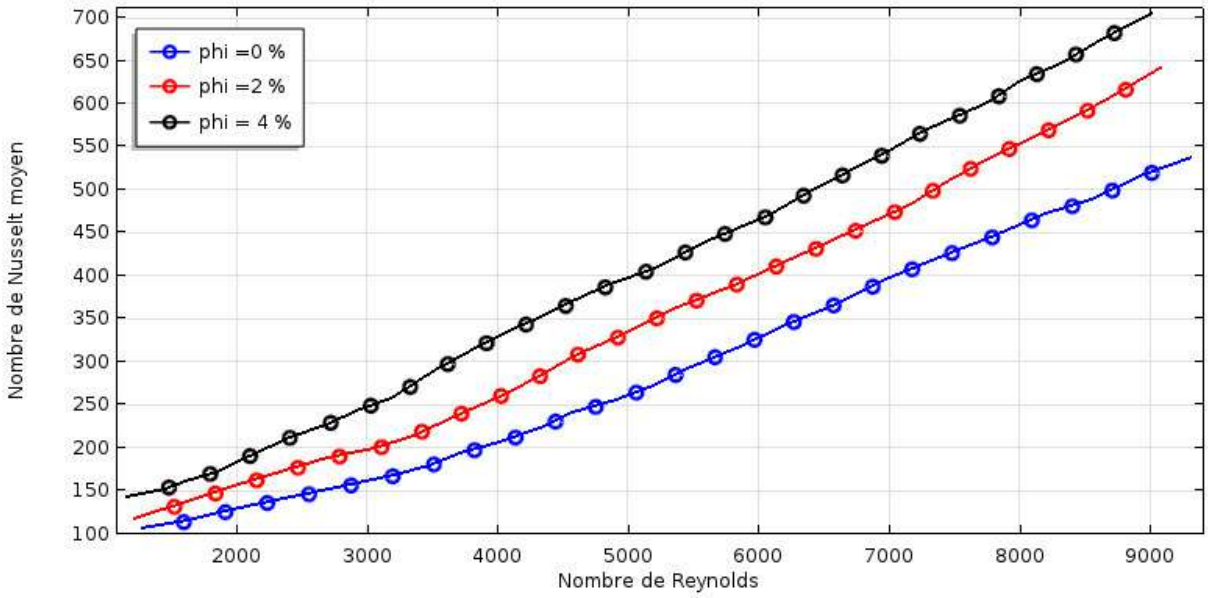


Figure III.5 : Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Reynolds pour differentes concentrations en nanoparticues CuO

III.4.2. Coefficient de frottement

Les figures suivante montre que le coefficient de frottement diminuer en augmentant la concentration en nanoparticues et le nombre de Reynolds. Comme le montrent la figure,le facteur de friction de fluide de base est maximum et il est munimun pour une concentration de 4% la concentration nano est minimum pour

différents valeurs du nombre de Reynolds différent.

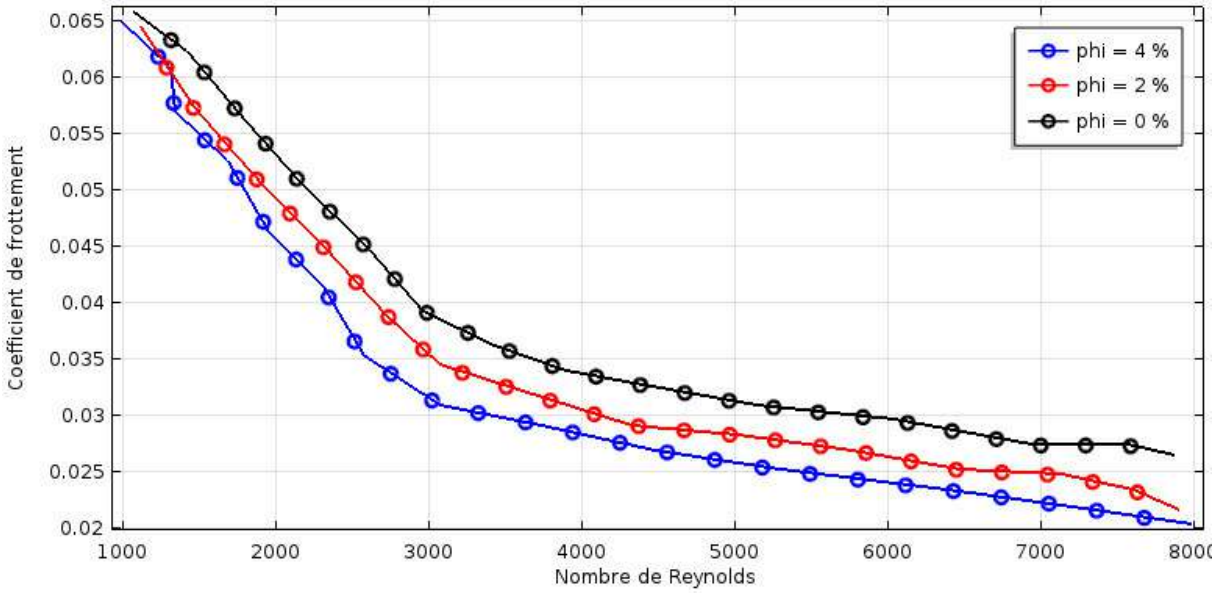


Figure III.6 : Coefficient de frottement en fonction de nombre de Reynolds pour differentes concentrations en nanoparticues CuO

III.4.3. Perte de charge

Pour poursuivre la chute de pression le long du tube pour l'écoulement de l'eau pure et de nanofluide à base d'eau avec différentes fractions en nanoparticules de CuO, la figure suivante 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%, 2%, 4%,). On observe que lorsque le nombre de Reynolds augmente, la perte de charge devient plus en raison de l'augmentation des flux secondaires; et également en augmentant la fraction volumique des nanoparticules, la densité augmente et ainsi la perte de charge devient également élevée.

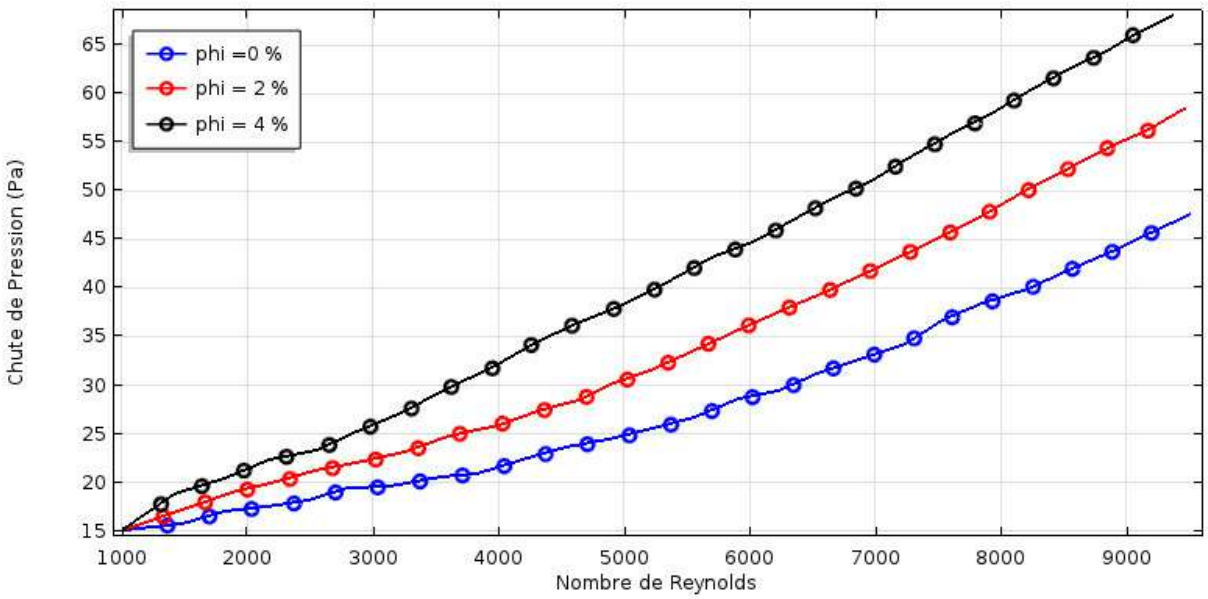


Figure III.7 : Perte de charge en fonction du Reynolds Nombre pour différentes concentrations en nanoparticues CuO

III.4.4. Intensité turbulente

La figure suivante illustre la variation de l'intensité turbulente en fonction de l/d pour différentes concentrations en nanoparticules. Comme montre la figure l'intensité turbulente augmente instablement en augmentant l/D. cette instabilité est rend à l'influence de la courbure ou les fluctuations sont importantes. cettes dernieres sont augmentés en augmentant les concentration en nanoparticule ce qui justifier l'augmentation de It par l'ajout des nanoparticules.

L'écoulement de turbulence et les intensités d'écoulement secondaire présentent des fluctuations relativement fortes à l'entrée et à la sortie du coude. les intensités de l'écoulement de turbulence et l'écoulement secondaire deviennent les le plus fort à = 90◦., la valeur de s'est considérablement amélioré dans le virage et atteint la valeur maximale à = 90◦.

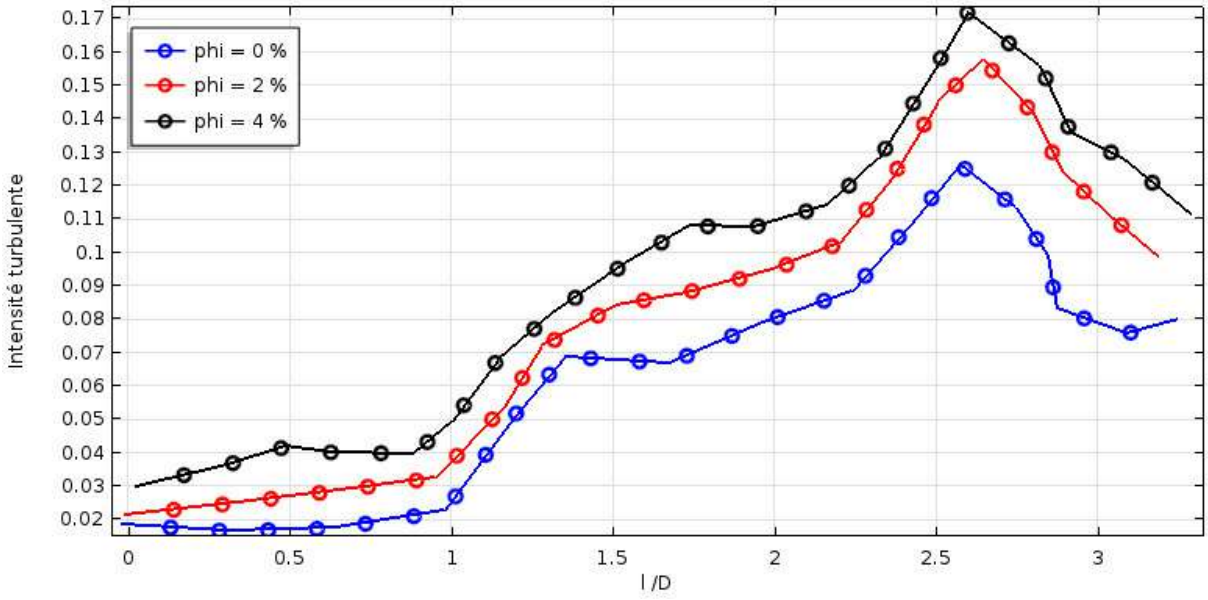


Figure III. 8 **:** Intensité turbulente en fonction de l/D pour differentes concentrations en nanoparticues CuO

III .5.Conclusion

Dans le présent chapitre, on s'est intéressé à la simulation numérique par Comsol Multiphysics du transfert thermique par convection forcée en écoulement turbulent d'un nanofluide d'oxyde métallique (CuO-Eau) à travers turbulent un tube circulaire à un coude 90 degrée. Le probléme est axisymétrique avec une temperature uniformiment imposée comme condition limite à la parois. Les propriétés thermiques et hydrodynamiques de deux différentes nanoparticules CuO (monoxide de Cuivre) dans l'eau comme fluide de base ont été étudiées. L'effet du nombre de Reynolds et la la concentration en volume de nanoparticules , sur le champs dynamique et le transfert de chaleur sont rapportées.

Après l'adoption d'un bon maillage suite à une étude de sensibilité de maillage par la comparaison de plusieurs profils de vitesses axiales, la validation et l'analyse des résultats pour un nanofluide Al2O3-eau avec φ=3%, pour en testant la variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds , on a réalisé des simulations numériques pour l'écoulement de nanofluide (CuO-eau) en variant le nombre de Reynolds et les fractions volumiques pour l'obtention des différentes valeurs de Nusselt, coefficient de frottement, perte de charge et de l'intensité turbulente.

Les résultats des simulations numériques obtenus sont conformes et les profils des vitesses des caloporteurs sont en bon accord avec les données théoriques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSIONS GéNéRALE

Dans cette étude numérique nous avons modélisé le transfert de chaleur en convection forcée turbulente dans une tube à coude 90 degrée pour montrer l'amélioration du transfert de chaleur par un nanofluide par rapport à un fluide pur. Les paramètres étudiés sont la fraction volumique de nanoparticule,les dimensions du tube (l,D) ainsi que le nombre de Reynolds.

Les résultats obtenus montrent clairement que l'utilisation des nanofluides peut influencer considérablement sur le champ dynamique et thermique dans ce type de géométrie.

Les principales conclusions tirées de cette étude sont les suivantes:

- Une augmentation du nombre de Reynolds donne lieu à une augmentation des vitesses d'écoulement parce que les forces de flottabilité sont augmentées, et par conséquent à une meilleure évacuation de la chaleur.
- Pour toutes les valeurs de Reynolds, le nombre du Nusselt moyen augmente d'une façon linéaire et monotone avec l'augmentation des nanoparticules.
- La perte de charge augmente en augmentant la concentration en nanoparticule, en revanche le coefficient de frottement est déminue par l'ajout des nanoparticule, un résultat semble contradictoire, ce qui appelle un travail approfondi.
- par l'effet de l' intensité de l'écoulement turbulent et de l'écoulement secondaire qui deviennent plus fort à = 90◦., la valeur de l'intensité turbulente s'est considérablement amélioré dans le virage et atteint sa valeur maximale à = 90◦. cette effet est justifier l'augmentation de It avec l'ajout des nanoparticules comme de particule à mouvement chaotique favorant les fluctuation turbulente.

Ce travail est une juste etude prémilinaire , beaucoup de travail reste a faire en prendra en compte plusieurs paramétre tels que défférent angles de courbure, différente géométrie de section transversale, différents types de nanoparticules..etc.

Les résultats disponibles dans la littérature indiquent que l'étude du transfert de chaleur

à l’aide de nanofluides est très complexe et qu’il y a bien d'autres facteurs qui peuvent agir sur leur performance thermique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RéFéRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

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

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

[4] KHENTOUL MOUSSA, étude numérique de la convection mixte dans un canal horizontalcontenant des ailettes, thèse de doctorat 3èmecycle (LMD)en génie mécanique, option : génie thermique et énergétique, université de Constantine 2016.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Sidi El Bécaye Maiga , 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

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

[9] Vincenzo Bianco, Oronzio Manca, Sergio Nardini, Kambiz Vafai, « A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids», International Journal of Heat and MassTransfer, Received 18 March 2011, n° 4410–4428 ,20p.

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

[11] 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.

[12] N. Hamraoui, Etude numérique du transfert de chaleur dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard. Diplôme de master En Physique des fluides et des transferts, université de tunes2013.

[13] Sophie Mergui « LICENCE DE MECANIQUE 2EME ANNEE MODULE 2A101 »TRANSFERTS THERMIQUES université de sorboon p52

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

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

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

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

[18] Sarit K. Das ,Stephen U. S. Choi ,Wenhua Yu ,T. Pradeep , *SCIENCE AND TECHNOLOGY* ,

.United States of America:wiley-interscienc , 2008 , 416p.

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

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

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

[22] 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

[23] MARE Thierry, SOW Ousmane, BAZANTAY Frédéric, LE BOURLOUT Sylvain, ROY Gilles, «Etude expérimentale des performances thermique d'un nanofluide : eau/ Al2O3 cas d'un échangeur à plaque à basse température», 1er congré de l'association Marocaine de thermique, Sttat (Maroc), le 6-7 Mai 2010

[24] 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.

[25] LAMRI ZEGGAR ASMA,Réussir mémoire et these : Contribution à l'Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nanofluide. Application aux Modèles Monophasique et Diphasique,2014.112p

[26] S. A. Fadhilah1, I. Hidayah2. S. Marhamah5, Thermophysical Properties of Copper/Water Nanofluid for AutomotiveCooling System – Mathematical Modeling Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Hang Tuah Jaya,76100 Durian Tunggal, Melaka, Malaysia

[27] Michel KERN1, Introduction à la méthode des éléments finis, ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS A.

[28] Dahmani Amélioration de Transfer convectif par nanofluides», Mémoire de Master.Université de médéa 2019

[29] M. J.Farsani et A.A.Nodooshan Numerical Simulation of Turbulent Nano-Fluid Flow in a Circular Elbow. Int J Advanced Design and Manufacturing Technology, Vol. 9/ No. 1/ March – 2016