

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Génie Mécanique  
Parcours : Master  
Spécialité : Énergétique

### Thème

Effet de la dimension d'un coude  
arrondi sur l'amélioration du transfert  
thermique : application pour les  
nanofluides

Préparé par :

- Noukas abdelhak
- Rebia djillali

Soutenu publiquement le : 01 / 10 / 2020, devant le jury composé de :

M. BOUZOUINI MOHAMMED	MAA (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. MEKROUSSI SAID	MCA (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BELMILOUD MOHAMED A	MAB (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. SAD CHEMLOUL N	MCA (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2019 – 2020

## *Dédicace*

*Toutes les lettres ne peuvent pas trouver les bons mots ...*

*Tous les mots ne peuvent pas exprimer la gratitude, l'amour, le  
respect, la gratitude ... aussi,*

*À Mes Chères parents; source de mon bonheur et de ma fierté,  
que Dieu me les garde..*

## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Clément et Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Les remerciements sont naturellement ensuite adressés en premier lieu à*

***M.SAD CHEMLOUL Nord-eddine (Encadreur),***

***M. BELMILOUD Mohamed Amine,***

*pour nous avoir guidés tout au long de ce travail et pour nous avoir fait profiter de leurs commentaires, toujours pertinents, qui ont grandement contribué à l'avancement de ces travaux.*

*Merci aussi:*

*A tous les professeurs dont j'ai reçu de l'aide et*

*Soutenez tout le temps sur*

*Département de technologie, Université Ibn Khaldoun.*

*Aux membres du jury pour leur honneur et leur intérêt pour moi*

*Mon travail et mon consentement à participer à son évaluation.*

# Table des matières

	<b>Page</b>
Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures .....	iv
Liste des tableaux.....	v
Nomenclature.....	vi
Introduction générale .....	1

## Chapitre I: Étude bibliographique

I.1 Généralités sur les nanofluides .....	2
I.1.1 Introduction .....	2
I.1.2 Définition .....	2
I.1.3 Nano-particules et les fluides porteurs.....	3
I.1.4 Les nanoparticules et liquides de baseles plus utilisés .....	3
I.1.5 Fabrication et préparation des nanofluides .....	4
I.1.6 Propriétés thermo physiques des nanofluides .....	5
I.1.6.1 La fraction volumique ( $\phi$ ).....	6
I.1.6.2 Conductivité thermique (K) .....	6
I.1.6.3 Viscosité dynamique ( $\mu$ ): .....	7
I.1.6.4 La masse volumique ( $\rho$ ) .....	8
I.1.6.5 La chaleur massique ( $C_p$ ).....	8
I.1.6.6 Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ).....	9
I.1.7 Domaine d'applications des nanofluides.....	9
I.1.7.1 L'industrie.....	9
I.1.7.2 Refroidissement des systèmes thermiques.....	9
I.1.7.3 Refroidissement des systèmes électroniques.....	9
I.1.7.4 Refroidissement des systèmes nucléaires.....	9
I.1.7.5 Refroidissement des systèmes militaires.....	9
I.1.7.6 La biomédecine.....	10
I.1.7.7 D'autres applications.....	10
I.1.8 Les avantages est les inconvénients des nanofluides.....	10

I.1.8.1 Les avantages de nanofluides.....	10
I.1.8.2 Les inconvénients du nanofluides.....	10
I.1.9 Les mécanismes de transferts thermiques dans les nanofluides.....	11
I.1.9.1 Type de convection.....	11
I.2 DESCRIPTION ET APPLICATIONS.....	14

## **Chapitre II : Formulation mathématique et numérique**

II.1 Introduction .....	19
II.2 Géométrie et conditions aux limites.....	19
II.3 Équations gouvernantes .....	20
II.3.1 Equation de continuité : .....	20
II.3.2 Equations de transport de quantité de mouvement .....	20
II.3.3 Équation de l'énergie .....	20
II.4 Régimes d'écoulement .....	20
II.4.1 Écoulement laminaire .....	20
II.7 Transfert de chaleur .....	21
II.7.1 Modes de transfert de chaleur .....	21
II.7.2 Nombres adimensionnels caractérisant le transfert de chaleur.....	22

## **Chapitre III : MÉTHODE NUMÉRIQUE**

III.1 Introduction .....	23
III.1.1 Méthodes des différences finies .....	23
III.1.2 Méthodes des éléments finis .....	23
III.1.3 Méthodes des volumes finis .....	23
III.2 Notion de maillage .....	24
III.2.1 Nœuds et éléments .....	24
III.2.2 Géométrie et topologie .....	24
III.2.3 Connectivité .....	25
III.3 Définition de la CFD « Computational Fluid Dynamics ».....	25

III.3.1 Présentation des logiciels Gambit et Fluent:.....	25
III.3.1.1 Préprocesseur Gambit .....	25
III.3.1.2 Code Fluent .....	26
III.3.2 Etapes principales de simulation.....	27
III.3.2.1 Construction de la géométrie .....	27
III.3.2.2 Principales étapes de simulation sous FLUENT .....	30

## **CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS**

IV.1 Introduction.....	35
IV.2 Les paramètres utilisés.....	35
IV.3 Maillage du domaine.....	36
IV.4 Validation.....	37
IV.5 Résultats et discussions.....	37
IV.5.1 Variation des contours de vitesse .....	37
IV.5.2 Variation des contours de température.....	50
IV.5.3 Variation du nombre de Nusselt.....	50
IV.5.4 Variation des contours et des profils des vitesses ( $Al_2O_3$ ).....	52
IV.5.5 Variation du nombre de Nusselt ( $Al_2O_3$ ) et (Cu).....	56
IV.5.6 Coefficient de pression.....	57
Conclusion Générale.....	58
Liste des références.....	59
Résumé.....	61

*Liste des figures  
et  
des tableaux*

---

# Liste des figures

	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b> Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre .....	3
Nano-fluides, vus au microscope électronique (de gauche à droite) : éthylène	
<b>Figure I.2</b> Glycol cuivre à 0,5 % ; eau +alumine ; eau + or à 2nm ; eau +nanotubes de carbon.....	3
<b>Figure I.3</b> Industrie du transport des fluides.....	14
<b>Figure I.4</b> Quelques applications des nanofluides.....	15
<b>Figure I.5</b> Quelques écoulement secondaires .....	16
<b>Figure I.6</b> Formes de coudes, pour différents $\delta_0=l_0/b_0$ et $R_0/D_H \geq 0.5$ .....	17
<b>Figure I.7</b> Etudes expérimentales et numériques sur les coudes. ....	18
<b>Figure II.1</b> la géométrie et les conditions aux limites. ....	19
<b>Figure II.2</b> La conduction .....	21
<b>Figure II.3</b> La convection .....	22
<b>Figure III.1</b> Illustration de la notion de maillage .....	25
<b>Figure III.2</b> Quelques types d'éléments.....	26
<b>Figure III.3</b> Exemples de maillages .....	26
<b>Figure III.4</b> Lancement du Gambit.....	28
<b>Figure III.5</b> Les opérations pour construire une géométrie.....	28
<b>Figure III.6</b> Création des points .....	29
<b>Figure III.7</b> Création d'une face.....	29
<b>Figure III.8</b> Maillage de volume.....	30
<b>Figure III.9</b> les Conditions aux limites .....	31
<b>Figure III.10</b> Importation de la géométrie .....	31
<b>Figure III.11</b> Choix de l'unité de longueur .....	31
<b>Figure III.12</b> Autorisation l'équation de l'énergie .....	32
<b>Figure III.13</b> Définir les propriétés physiques des matériaux.....	32
<b>Figure III.14</b> les conditions aux limites.....	33
<b>Figure III.15</b> vitesse à l'entrée.....	33
<b>Figure III.16</b> Choix des nombres des itérations.....	34
<b>Figure III.17</b> Allure de l'évolution des résidus de calcul.....	34

<b>Figure IV.1</b>	le maillage 30X70 utilisé dans cette simulation.....	36
<b>Figure IV.2</b>	Validation dynamique.....	37
<b>Figure IV.3</b>	la variation de profil de vitesse (lignes de courant) dans le canal pour les différences valeurs fractions volumique de nanoparticule Cu.....	40
<b>Figure IV.4</b>	Profile de la composante horizontale et verticale de la vitesse à l'entrée et la sortie du coude pour les différentes fractions volumique et pour D=0.2 m....	42
<b>Figure 0.5</b>	Variation du profile de la vitesse $V_y$ en fonction des différentes angles	
<b>Figure 0.5</b>	Profile de vitesse en fonction de la position horizontale (x) et la position verticale pour le nanofluide Cu+eau et pour D=0.3m.....	44
<b>Figure IV.6</b>	Profile de vitesse en fonction de la position horizontale (x) et la position verticale pour le nanofluide Cu+eau et pour D=0.4 .....	46
<b>Figure IV.7</b>	Profile de la composante horizontale et verticale de la vitesse pour ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), différentes fractions volumique et D=0.2 m .....	47
<b>Figure IV.8</b>	Profile de la composante horizontale et verticale de la vitesse pour ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), différentes fractions volumique et D=0.3 m.....	48
<b>Figure IV.9</b>	Profile de la composante horizontale et verticale de la vitesse pour ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), différentes fractions volumique et D=0.4 m.....	49
<b>Figure IV.10</b>	la variance du température a diamètre D=0.2 m.....	50
<b>Figure IV.11</b>	Variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique pour le nanofluide Cu + eau ; pour D=0.2 m ; D=0.3 m et D=0.4 m.....	51
<b>Figure IV.12</b>	la variation de profil de vitesse (lignes de courant) dans le canal pour les différences valeurs fractions volumique de nanoparticule $Al_2O_3$ .....	52
<b>Figure IV.13</b>	Profile de vitesse en fonction de la position horizontale (x) et la position verticale pour le nanofluide $Al_2O_3$ +eauet pour D=0.4.....	54
<b>Figure IV.14</b>	Profile de la composante horizontale et verticale de la vitesse pour ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), différentes fractions volumique et D=0.4 m.....	55
<b>Figure IV.15</b>	Variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique pour le nanofluide( Cu + eau) et ( $Al_2O_3$ +eau) ; pour D=0.4 m.....	56
<b>Figure IV.16</b>	Profile de la Coefficient de pression pour ( $\theta$ ),de nanoparticule (Cu+eau) et( $Al_2O_3$ +eau), D=0.4 m.....	57

## Liste des tableaux

	<b>Page</b>
<b>Tableaux I.1</b> les propriétés thermo physiques de différents matériaux.....	4
<b>Tableaux II.1</b> les constantes utilisées par le code Fluent.....	23
<b>Tableaux IV.1</b> Les propriétés physiques de nanofluide ( <b>Eau + Cuivre</b> ) et ( <b>Eau +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> ) avec différentes fractions volumiques.....	35
<b>Tableaux IV.2</b> Vitesse d'entrée (m/s) des nanofluides.....	35
<b>Tableaux VI.3</b> Effet de maillage sur les résultats obtenus pour nanofluide eau+ Cu, Re = 500,φ = 0.05, D = 0,3 m et pour paroi chaude (surface intérieur du coude).....	36
<b>Tableaux IV.4</b> le nombre moyen de Nusselt.....	50

# Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
$a_o, a_w, a_E, a_s, a_N$	Coefficients dans le système d'équations algébriques discrétisées	[-]
$C_p$	Capacité calorifique à pression constante	[J/Kg.k]
$De, Dw, Dn, Ds$	Flux diffusifs aux interfaces e, w, n, s de l'équation de transport discrétisée	[-]
$Fe, Fw, Fn, Fs$	Flux convectifs aux interfaces e, w, n, s de l'équation de transport discrétisée	[-]
$g$	Accélération de pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$m$	masse	[kg]
$Gr$	Nombre de Grashof	[-]
$H$	Hauteur de la coude	[m]
$D$	diamètre de la coude	[m]
$Nu$	Nombre de Nusselt	[-]
$P$	Pression	[N/m <sup>2</sup> ]
$Nu_{moy}$	Nombre de Nusselt moyenne	[-]
$Pr$	Nombre de Prandtl	[-]
$\varphi$	Fraction volumique des nanoparticules	[-]
$V$	volume	[m <sup>3</sup> ]
$Re$	Nombre de Reynolds	[-]
$L$	longueur	[m]
$T$	Température	[K]
$T_0$	Température de référence	[K]
$\Delta T$	Différence de température	[K]
$S_\varphi$	le terme source.	[-]
$u ; v$	Composante du vecteur de vitesse suivant x et y	[m/s]
$u_i$	Vitesse d'écoulement à l'entrée de la coude	[m/s]
$v_x$	Vitesse axial	[m/s]
$x ; y$	Coordonnées cartésiennes	[m]
$\Delta x ; \Delta y$	Dimension d'un volume de contrôle	[m]
<b>Symboles grecs</b>		
$\theta$	Angle de coude	[°]
$\Phi$	la propriété transportée	[-]
$\beta$	Coefficient de dilatation Thermique	[K <sup>-1</sup> ]

---

$\rho$	Masse volumique	[kg /m <sup>3</sup> ]
$\kappa$	Diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
$\mu$	viscosité dynamique	[kg/m.s]
$\nu$	viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> / s]
K	Conductivité thermique	[W/m.K]

### Indices et exposants

Nf	Nanofluides
S	nanoparticule
e ;w ;n ;s	évalué sur la face correspondante du volume de contrôle entourant le point O
E ;W ;N ;S	évalué sur le point correspondant entourant le point O
f	fluide
moy	la valeur moyenne
max	La valeur maximale

---

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

---

## INTRODUCTION

Le transfert de thermique joue un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermo physiques des fluides utilisés. La miniaturisation de nombreuses applications est tributaire de la possibilité d'évacuer de façon efficace les puissances thermiques dissipées au sein de ces appareillages.

Le développement considérable récent des recherches traitant des nanofluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroître de façon appréciable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pure une faible concentration de nanoparticules. Rappelons que les nanofluides sont des solutions colloïdales obtenues en dispersant dans un fluide de base des particules solides de taille nanométrique ( $10^{-9}$ m). A très faible concentrations, certaines de ces solutions se sont révélées très efficaces pour améliorer, sous certaines conditions les transferts de chaleur. Le transfert de chaleur dans un nanofluide dépend à la fois des propriétés thermo physiques de la phase solide et de la phase liquide.

Dans le présent travail, nous étudions l'effet de la dimension d'un coude arrondi sur l'amélioration du transfert thermique en utilisant un nanofluide .Le but essentiel de cette étude est de l'amélioration de transfert thermique en variant diamètre de coude arrondi et les concentrations des nanoparticules.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre, présente des généralités sur des notions sur les nanofluides leurs types et les modèles les plus utilisés pour le calcul de leurs propriétés thermophysiques et description et applications sur les coudes.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la forme géométrique choisi pour notre étude, ainsi que la formulation mathématique des équations régissant le phénomène étudié et les conditions aux limites.

Le troisième chapitre traite la méthode numérique avec les logiciels Fluent et le préprocesseur gambit.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations. Enfin, nous terminons par une conclusion générale qui synthétise les différents résultats obtenus.

---

# **CHAPITRE I :**

## **Étude bibliographique**

## **I.1 Généralités sur les nano-fluides :**

### **I.1.1 Introduction**

L'efficacité d'un processus de transfert thermique est généralement limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés. La miniaturisation de nombreuses applications est conditionnée par la possibilité d'évacuer de façon efficace les puissances thermiques dissipées au sein des appareillages. Le considérable récent développement des recherches traitant des nano-fluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroître de façon non négligeable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pure une faible concentration de nanoparticules. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de " Nano-fluides ".Ce terme a été introduit par Choi [1] au laboratoire d'Argonne en U.S American 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale. Dans cette étude on essayera de montrer la potentialité de remplacer les fluides avec des nano-fluides qui peuvent jouer le même rôle que ces fluides ordinaire mais avec une bonne efficacité du dégagement de la chaleur .L'adjonction des particules métalliques dans un fluide a mis en évidence une nette amélioration des capacités thermiques de celui-ci.

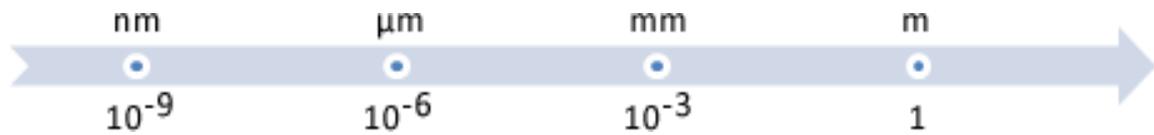
Les expériences effectuées sur les fluides caloporteurs avec des particules de taille micrométrique posent des problèmes de sédimentation des particules causant des chutes de pression lors de l'écoulement. Actuellement, il est possible de fabriquer des particules de l'ordre du nanomètre qui remédient à ces problèmes.

### **I.1.2 Définition :**

Les nano-fluides sont des dispersions des particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm) appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés. Ce type de solution suscite un grand intérêt depuis la découverte de leurs propriétés thermiques particulières. Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. En effet, les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent leur capacité de transfert de chaleur. L'idée est alors d'insérer au sein des liquides de base des nanoparticules de conductivité très élevée, afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer ces performances thermiques.

### I.1.3 Nano-particules et les fluides porteurs :[2]

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



**Figure I.1:** Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre

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

### I.1.4 Les nanoparticules et liquides de base les plus utilisés [3]

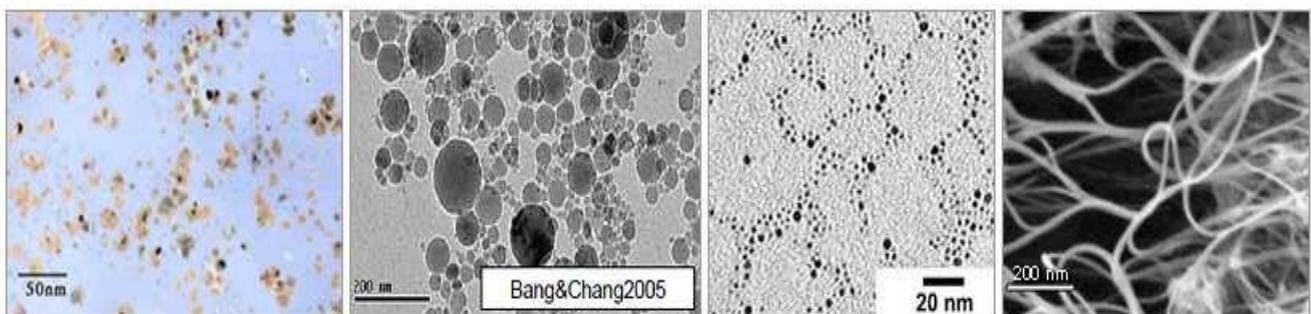
Pour l'obtention des nanofluides, les nanoparticules utilisées sont :

- l'oxyde d'aluminium,  $Al_2O_3$ .
- l'aluminium, Al.- le cuivre, Cu.
- l'oxyde de cuivre, CuO.- l'argent, Ag.
- les nanotubes de carbone.
- le silicone , Si.- le dioxyde de titane,  $TiO_2$ .

Les liquides de base les plus utilisés sont :

- l'eau.- l'éthylène-glycol, EG
- les huiles.- le Toluène

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tous phénomènes d'agréations, la sélection d'un telle fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule.



**Figure I.2 :** Nano-fluides, vus au microscope électronique (de gauche à droite) : éthylène Glycol+ cuivre à 0,5 % ; eau +alumine ; eau +or à 2nm ; eau +nanotubes de carbon .

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nanofluides, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels (voir tableau I.1) et des qualités indéniables d'amélioration du transfert thermique. La conductivité thermique des nanofluides peut être significativement plus élevée que celle des liquides purs.

	Nanoparticule et fluide de base	K (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kgK)	$\mu$ (Pa.s)
<b>Métallique (solides)</b>	Cu	400	8954	383	
	Fe	80,2	7870	447	
	Ni	90,7	8900	444	
	Au	317	19,300	129	
	Ag	429	10,500	235	
	C (diamant)	2300	3500	509	
<b>Oxyde Métallique (solides)</b>	SiO <sub>2</sub>	1,38	2220	745	
	TiO <sub>2</sub>	8,4	4157	710	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
<b>Liquides non métallique</b>	L'eau	0,613	1000	4183	0,0008
	Ethylène-glycol(EG)	0,258	1132	2349	513 0,0157

**Tableau I.1** : les propriétés thermophysiques de différents matériaux

### I.1.5 Fabrication et préparation des nanofluides :[4]

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

- Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- Les procédés chimiques, comme la pyrolyse ou la préparation chimique..

En général, les nanoparticules utilisées pour la synthèse de nanofluides sont à base d'oxydes, de nitrures, de carbures, de métaux purs ou d'alliages, de nanotubes de carbone désignés par (NTC). On trouve également des particules composites pouvant utiliser des polymères.

Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nanofluide :

- **Procédé en une étape (one-step method):**

Consiste à 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.

- **Procédé en deux étapes (two-step method):**

La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules et dans la seconde étape les nanoparticules sont dispersées dans un fluide de base. Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de travaux de recherche pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre 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 pour une production de masse vu les contraintes inhérentes au procédé, notamment les méthodes en une étape. Les principaux moyens de fabrications peuvent être:

- la mécano synthèse (broyage à haute énergie) ;
- la précipitation chimique (réduction de sels métalliques par exemple) ;
- les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur ;
- la condensation de vapeurs par détente brutale dans des tuyères supersoniques ;
- la sublimation par ablation laser (vaporisation d'un échantillon par impulsion laser) ;
- la pyrolyse laser (interaction entre un faisceau laser continu et un flux de réactifs).

La fabrication en deux étapes présente un peu plus de risques, car le collage se produit déjà dans la nanopoudre. Les nanoparticules à base d'oxydes métalliques seraient à priori moins sujettes aux regroupements que les nanoparticules à base de métaux purs dans les procédés en deux étapes. L'intégration en une seule étape directe minimise ces agglomérations, mais l'inconvénient de ces techniques de vaporisation sous atmosphère est de ne pouvoir utiliser que des liquides à faible pression de vapeur saturante (pour éviter qu'ils ne se vaporisent eux-mêmes trop vite dans l'enceinte) et le contrôle sur la taille des nanoparticules formées est limité. Cependant, elle est recommandée pour des métaux purs afin d'éviter l'oxydation rapide des nanoparticules par l'air ambiant.

### **I.1.6 Propriétés thermo physiques des nanofluides :**

Les propriétés physiques du nanofluide dépendent essentiellement de fluide de base (liquide) et de la phase dispersée(nanoparticules) sous forme solide, donc leur définition nécessite un retour aux propriétés de chacun de ses composants (fluide de base et nanoparticule): Néanmoins, l'ensemble des sources bibliographiques indiquent que les propriétés des nanofluides dépendent de la fraction volumique des particules aussi bien que celles des propriétés physiques de la base fluide et du solide [5].

### I.1.6.1 La fraction volumique ( $\phi$ ):

La fraction volumique est un rapport sans dimension entre deux volumes, le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). La valeur de la fraction volumique varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivant [5] :

$$\phi = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume total du nanofluide}} = \frac{v_s}{v_s + v_f} \quad (\text{I.1})$$

### I.1.6.2 Conductivité thermique ( $K$ ) :

La conductivité thermique est généralement une propriété importante, principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur, elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température. En plus de sa variation en fonction de la température, la conductivité thermique du nanofluide varie en fonction de la fraction volumique aussi, la conductivité thermique d'un nanofluide est calculée selon les deux modèles suivant [5]:

#### A-Modèle de Maxwell

Maxwell a présenté son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique de nanofluide, mais ce modèle est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, et que cette condition peut être considérée comme un point négatif pour le modèle, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules de forme sphériques. Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivante [6]:

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2\phi(K_s - K_f)}{(K_s + 2K_f) - \phi(K_s - K_f)} K_f \quad (\text{I.2})$$

Où  $K_{nf}$  : La conductivité thermique du nanofluide.

$K_f$  : La conductivité thermique du fluide de base.

$K_s$  : La conductivité thermique des particules solide

#### B-Modèle de Hamilton et Crosser :

Le modèle de Hamilton et Crosser [6] a été établi pour résoudre la limite de modèle de Maxwell.

Puisque ce dernier n'est valable que dans le cas des particules sphériques une chose qui rend le modèle moins efficace pour la description du phénomène étudié. Pour cela le modèle de Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nanofluide quel que soit la forme de la nanoparticule, et ça en introduisant la notion du facteur

géométrique appelé la sphéricité ( $\psi$ ). Ce facteur est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivant :

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_s)\varphi}{K_s + (n-1)K_f + (K_f - K_s)\varphi} K_f \quad (I.3)$$

Où ( $n$ ) est un facteur de forme empirique donné par :  $n = \frac{3}{\psi}$

$n=3$  pour les particules sphériques et  $n=6$  pour les particules cylindriques .Pour ( $\psi =1$ ) (particules sphériques) le modèle de Hamilton et Crosser est identique au modèle de Maxwell.

### C-Modèles corrélations semi-empirique :

Il existe plusieurs corrélations semi-empiriques basées sur des résultats expérimentaux utilisés pour calculer la conductivité thermique des différents nanofluides:

$$K_{nf} = (28.905 \varphi^2 + 2.8273 \varphi + 1) K_f \text{ Pour le nanofluide } (EG + Al_2O_3) \quad (I.4)$$

$$K_{nf} = (28.905 \varphi^2 + 2.8273 \varphi + 1) K_f \text{ Pour le nanofluide } (Al_2O_3 + eau) \quad (I.5)$$

$$K_{nf} = (28.905 \varphi^2 + 2.8273 \varphi + 1) K_f \text{ Pour le nanofluide } (Cu + eau) \quad (I.6)$$

$$K_{nf} = (28.9052 \varphi^2 + 2.8273 \varphi + 1) K_f \text{ Pour le nanofluide } (huile + ntc) \quad (I.7)$$

Les équations (I.4), (I.5), (I.6) et (I.7) sont des corrélations empiriques utilisées pour estimer la conductivité thermique des nanofluides (EG+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+eau), le nanofluide (Cu + eau) et le nanofluide (huile nanotube de carbone) respectivement.

### I.1.6.3 Viscosité dynamique ( $\mu$ ):

La viscosité peut être définie comme étant une propriété du 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. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nanofluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température. Cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide. Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes :

#### A-Modèle d'Einstein :

La viscosité dynamique d'un nanofluide est donnée par Einstein [8] pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2,5\varphi) \quad (I.8)$$

Cette relation est valable juste pour  $\varphi = 0,05$ .

### B-Modèle de Brinkman :

Par contre, Brinkman [9] a étudié la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2,5}} \quad (I.9)$$

**Remarque :** Pour les faibles fractions volumiques, la relation de Brinkman conduit exactement à celle d'Einstein. Ces relations n'intègrent pas les effets du mouvement Brownien ni ceux de la taille des particules

### I.1.6.4 La masse volumique ( $\rho$ ) :

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique à une température donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange.

Dans le cas d'un mélange, la masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho = \left[ \frac{m}{V} \right] = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (I.10)$$

A partir de la relation (I.10), on déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (I.11)$$

### I.1.6.5 La chaleur massique ( $C_p$ ) :

La chaleur massique ou la chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène ( $C_p = \frac{dQ}{mdT}$ ). La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance d'un degré kelvin (1°K) lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut citer les deux modèles suivants :

#### A-Modèle du Pak et Cho :

Pak et Cho [7] ont utilisé la formule suivante :

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_s \quad (I.12)$$

#### B-Modèle du Xuan et Roetzel :

Xuan et Roetzel ont utilisé la formule suivante :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (I.13)$$

### I.1.6.6 Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) :

La variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique appelé également coefficient de dilatation isobare. Pour le calcul de la valeur de ce coefficient dans le cas des nanofluides, suite aux premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation qui détermine la masse volumique de très nombreux auteurs ont utilisé l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = \frac{(1 - \varphi) \rho_f \beta_f + \rho_p \beta_p}{\rho_{nf}} \quad (I.14)$$

### I.1.7 Domaine d'applications des nanofluides :

Les nanofluides peuvent être employées pour améliorer le transport de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques. Dans cette section, quelques exemples d'application seront présentés tels que le transport, la micro - électronique, le nucléaire et la biomédicale.

#### I.1.7.1 L'industrie:

L'industrie au sens large (moteur thermique, climatisation, composant d, e puissance, installation nucléaire, accélérateur de particules, domaine aéronautique ou spatial, etc.), car ça permet de réduire la taille des équipements de refroidissement ou leur consommation électrique puisqu'on gagne en efficacité sans trop se fatiguer. On estime en effet que pour doubler le coefficient d'échange, il faut multiplier la puissance de pompage par 10, ce qui est énorme et non rentable. Un nanofluide permet de s'en affranchir partiellement en améliorant ce coefficient jusqu'à 80 % en régime turbulent sans modifier la puissance nécessaire au fonctionnement.

#### I.1.7.2 Refroidissement des systèmes thermiques :

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides améliore le taux de refroidissement.

#### I.1.7.3 Refroidissement des systèmes électroniques :

Dans les circuits intégrés, les nanofluides ont été considérés comme fluide de refroidissement. Un nanofluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur.

#### I.1.7.4 Refroidissement des systèmes nucléaires :

L'institut de technologie du Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour les nouvelles nanotechnologies (nanofluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique, et la performance économique des systèmes nucléaires.

### **I.1.7.5 Refroidissement des systèmes militaires :**

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermiques très élevés, où les nanofluides ont montrés leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires, y compris les véhicules militaires, les sous-marins, et les diodes lasers à haute puissance.

### **I.1.7.6 La biomédecine:**

Les nanofluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédicale. Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement de cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues .Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de région chirurgicale [10].

### **I.1.7.7 D'autres applications:**

Il y a des situations nombreuses où l'augmentation de l'efficacité du transfert thermique peut être liée à la qualité, la quantité, et au coût d'un produit d'un processus. Par exemple, dans l'industrie de l'énergie renouvelable, les nanofluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur à partir des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité d'énergie. Les liquides réfrigérants de nanofluide ont une application potentielle dans la majorité des industries de transformation, telles que les matériaux, la production chimique, la nourriture, la boisson, le pétrole et le gaz

## **I.1.8 Les avantages est les inconvénients des nanofluides :**

### **I.1.8.1 Les avantage de nanofluides:**

Il est indéniable qu'un bon nanofluide apporte un coup de pouce à l'efficacité d'un système de refroidissement liquide quelconque sans avoir plus de bruit et sans consommer plus. Au contraire, l'efficacité générale étant améliorée, on peut penser à réduire la ventilation ou à prendre une pompe moins puissante, tout en gardant un niveau de performance identique si le silence de fonctionnement est la priorité. Cependant les nanofluides offrent les avantages suivants:

- ✓ Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides ;
- ✓ Une haute dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules ;
- ✓ Les propriétés sont ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications

### **I.1.8.2 Les inconvénients du nanofluides :**

On a vu que l'érosion des surfaces et la sédimentation sont des effets que l'on peut négliger avec un nanofluide. La corrosion reste un point à vérifier, mais si on le choisit bien en prenant quelque chose d'inerte ou en l'adaptant à son circuit, alors il n'y aura aucun souci.

Mais il présente pas mal d'inconvénients tels que :

- ✓ Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs ;
- ✓ Le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés ;
- ✓ Une mauvaise caractérisation des suspensions ;
- ✓ Une viscosité supérieure, et une chaleur spécifique basse ;
- ✓ Un coût élevé des nanofluides ;
- ✓ Des difficultés dans le processus de production.

### **I.1.9 Les mécanismes de transfert thermiques dans les nanofluides**

#### **Définition :**

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz.

Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes .D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules fluides adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces particules .Ensuite ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie, celle-ci est à présent emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement

#### **I.1.9.1 Type de convection**

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants sont dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte.

##### **a) La convection naturelle**

A notre connaissance, on trouve très peu de travaux expérimentaux traitant de la convection naturelle dans les nanofluides. Le problème de la convection naturelle dans une cavité chauffée a été étudié numériquement par **Khanafar et al [12]** en considérant l'effet de la dispersion des particules.

Ils ont proposé une corrélation donnant l'importance des transferts de chaleur exprimée en termes de nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Grashof et pour différentes

concentrations volumiques des nanoparticules.

**Putra et al [13]** ont réalisé une étude expérimentale sur le transfert de chaleur en convection naturelle pour des nanofluides ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{eau}$ ) et ( $\text{CuO} + \text{eau}$ ) à l'intérieur d'un cylindre horizontal dont les deux faces verticales sont soumises à des températures constantes et différentes. Ils ont trouvé que pour un nombre de Rayleigh du nanofluide entre  $10^6$  et  $10^9$  le transfert de chaleur diminue au lieu d'augmenter lorsque l'on augmente la fraction volumique des nanoparticules. Donc ils observent une détérioration du transfert de chaleur.

**Roy et al [14]** ont étudié numériquement le transfert de chaleur pour un nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{eau}$ ) placé dans un système radial de refroidissement. Leurs résultats indiquent que l'addition de 10% en volume d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  peut conduire à un doublement des transferts de chaleur comparée à celui du liquide de base seul.

**Wenetal.[15]** ont rapporté que pour des Rayleigh inférieurs à  $10^6$  le transfert de chaleur diminue lorsque la fraction volumique  $\phi$  augmente. Il confirme l'existence d'une détérioration de transfert de chaleur en convection naturelle pour le nanofluide ( $\text{TiO}_2 + \text{eau}$ ) pour des faibles nombres de Rayleigh.

**Kim et al [16]** ont étudié analytiquement la naissance de la convection naturelle pour un nanofluide remplissant une couche infinie horizontale. Ils ont introduit un nouveau facteur noté  $f$  qui traduit le rapport du nombre de Rayleigh du nanofluide sur le nombre de Rayleigh du fluide de base. Le facteur  $f$  est une fonction complexe liant les variables thermophysiques du fluide de base et de ceux du nanofluide utilise ainsi que de la fraction volumique. Ils ont conclu à l'augmentation du transfert par convection naturelle quand  $\phi$  augmente. Nous allons dans la suite de ce travail montrer que ce résultat n'est valable que pour les grands nombres de Rayleigh.

L'étude numérique de la convection naturelle dans une cavité bidimensionnelle chauffée par le bas et pour différents nombres de Grashof et pour différentes valeurs de  $\phi$  a été effectuée par **Wang et al [17]**. Ces auteurs ont conclu que le coefficient de transfert de chaleur pour ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{eau}$ ) était de 30% pour  $\phi = 10\%$ . L'augmentation maximale du transfert de chaleur de 80% est obtenue pour  $\phi = 10\%$  avec des nanoparticules de cuivre, En plus le coefficient de transfert de chaleur est augmenté de 100% pour un nanofluide avec des nanotubes de carbone et de l'huile comme fluide porteur avec  $\phi = 1\%$ . En 2006 **Rong Yan Jou et al [18]** ont adopté le modèle utilisé par Khanafer pour simuler la convection naturelle d'un nanofluide dans une cavité différentiellement chauffée. Ils ont étudié l'influence du nombre de Rayleigh ( $10^3 \leq \text{Ra} \leq 10^6$ ) et le rapport d'aspect (1/2, 1 et 2) sur l'écoulement du nanofluide. Leurs résultats montrent une augmentation du coefficient de transfert de la chaleur avec la fraction volumique des nanoparticules.

Le comportement convectif dans une cavité rectangulaire différentiellement chauffée avec des

parois verticales mobiles et remplies de nanofluide (Cu + eau) a été étudié numériquement par **Tiwari et al [19]**. Ils ont assimilé le nanofluide à un fluide homogène Newtonien, doté de propriétés thermophysiques particulières. Ils ont montré que le nombre de Richardson et le sens du mouvement des deux parois verticales affectent l'écoulement du nanofluide et le transfert de chaleur au sein de la cavité.

**Hwang et al [20]** ont étudié la convection naturelle dans une cellule rectangulaire en configuration de Rayleigh Bénard. Ils ont utilisé le modèle de Globe et Dropkin pour calculer le coefficient du transfert de chaleur pour le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ +eau). Ils ont examiné l'influence de la fraction volumique  $\phi$ , la taille des nanoparticules et la température sur le transfert de chaleur au sein de la cellule. Pour cela deux modèles de viscosité celui d'Einstein et celui de Pack et Choi ont été utilisés. Ils ont observé une détérioration du transfert thermique en utilisant le modèle de Pack et Choi et une augmentation de ce transfert quand  $\phi$  augmente.

**Ho et al [21]** ont développé une étude numérique portant sur la convection dans une cavité chauffée remplie par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ +eau). Ils ont montré que les résultats obtenus à partir le modèle de Brinkman et la corrélation de **Maiga et al [22]** ont une forte influence sur le transfert de chaleur. Ils ont fait des simulations pour des nombres de Rayleigh variant de  $10^4$  à  $10^6$  et pour une fraction volumique  $\phi$  variant de 0 à 4%. Ils ont alors relevé que le recours à l'une ou l'autre des relations donnant les grandeurs thermo physiques du nanofluide conduit à des résultats différents pour le transfert de chaleur dans cette configuration.

#### b) La convection forcée

**Pak et al [23]** se sont intéressés au transfert de chaleur par convection avec un fluide contenant en suspension des particules d'oxydes métalliques  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13nm) et  $\text{TiO}_2$  (27nm). Les mesures sont effectuées dans une configuration de tube chauffé à flux constant en régime turbulent et les résultats les plus significatifs sont obtenus avec une fraction volumique de nanoparticules de 3% ,a nombre de Reynolds égal, ils ont montré que le coefficient de transfert de chaleur est accru de 75% par rapport à celui de l'eau pure.

Cependant, à vitesse débitante identique, le même paramètre devient inférieur de 12% à celui de l'eau pure.

Ce résultat est dû au fait que la viscosité du nanofluide est nettement supérieure a celle de l'eau pure.

**Xuan et Li [24]** ont utilisé le nanofluide (eau + Cu) pour mesurer le coefficient d'échange en convection forcée pour des nombres de Reynolds variant de  $10^4$  à  $2.5 \cdot 10^4$ .

Ils ont trouvé que l'ajout des nanoparticules améliore grandement le transfert convectif. Ainsi pour une fraction volumique des nanoparticules de 2% le nombre de Nusselt du nanofluide croit de 39% comparé à celui dans l'eau. Ce nombre de Nusselt augmente quand on augmente  $\phi$  ou quand on

augmente le nombre de Reynolds. L'inconvénient du recours aux nanofluides dans ce cas est lié à l'augmentation de la viscosité du nanofluide. Il faudrait alors rechercher un compromis pour augmenter le coefficient d'échange convectif en augmentant  $\varphi$  et ne pas trop augmenter la viscosité du nanofluide pour pouvoir le mettre plus facilement en mouvement.

**Qiang et Li [25]** ont procédé à une expérimentation similaire de celle réalisée **Xuan et Li [24]**. Ils ont également mesuré le facteur d'échange en convection forcée pour le même type de nanofluide (eau+Cu) pour différentes valeurs du nombre de Reynolds et pour  $\varphi$  variant de 0% à 1.2%. **Maiga et al. [22]** ont étudié numériquement l'hydrodynamique (convection forcée) et les caractéristiques thermiques des nanofluides dans un tube chauffé en utilisant un modèle à une seule phase pour les régimes laminaire et turbulent. Leurs résultats montrent que l'addition des nanoparticules conduit à une augmentation du transfert de chaleur comparé au fluide seul. Ils ont trouvé que le nanofluide obtenu avec (l'éthylène glycol +  $Al_2O_3$ ) assure un meilleur transfert de chaleur que le nanofluide (eau +  $Al_2O_3$ ). Ils ont rapporté que le coefficient de transfert de chaleur augmente de 80% pour l'éthylène glycol +  $Al_2O_3$  tandis qu'il augmente de 60% pour le nanofluide (eau +  $Al_2O_3$ ) pour une fraction volumique  $\varphi = 10\%$  de nanoparticule  $Al_2O_3$ .

## I.2 DESCRIPTION ET APPLICATIONS

Aujourd'hui, l'étude des écoulements laminaires et turbulents en mécanique des fluides, plus particulièrement dans les conduites courbes, offre une palette d'applications extrêmement diversifiée:

- L'industrie du transport des fluides ;
- Les systèmes de refroidissement aussi bien pour la puissance des véhicules que pour la miniaturisation des composants électroniques ;
- La mécanique de propulsion ;
- La biotechnologie ;

C'est une composante obligée d'un grand nombre de projets et de programmes pluridisciplinaires.

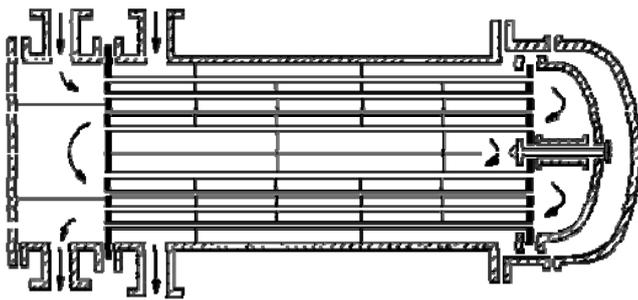


**Figure I.3 :** Industrie du transport des fluides

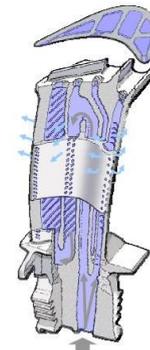
Dans le domaine expérimental, les difficultés rencontrées pour caractériser quantitativement ces écoulements à travers les conduites courbes, en particulier les écoulements secondaires, ont conduit les chercheurs en mécanique des fluides,

à développer des méthodes numériques de simulation des écoulements. On peut citer,

en plus, des applications dans les secteurs de l'aérodynamique, l'aéronautique, l'hydraulique, les échangeurs de chaleur, figure **I.4a**, les turbomachines, figure **I.4b**, les cimenteries, figure **I.4c**, la biotechnologie du secteur médical, la combustion, figure **I.4d**,



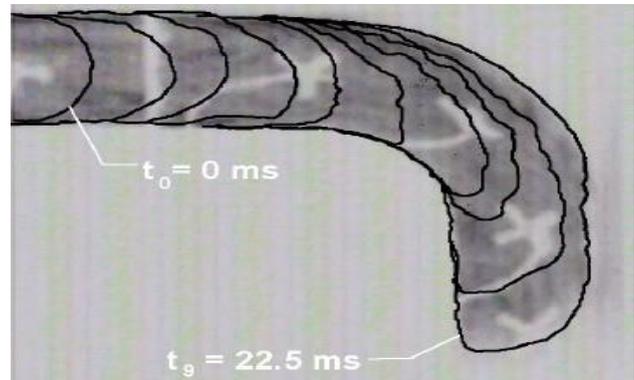
a) Echangeur de chaleur



b) Aube d'une turbomachine



c) Les cimenteries

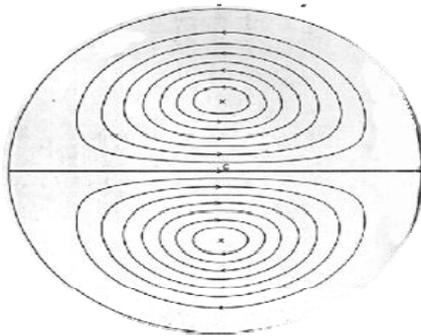


d) La combustion Propagation d'une flamme à travers un canal courbe

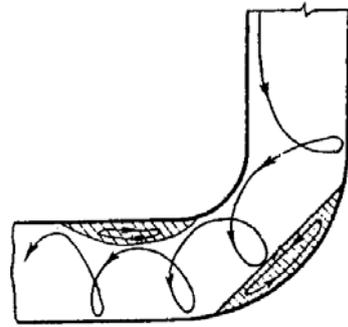
**Figure I.4** : Quelques applications des nanofluides

Recherches expérimentales et numériques ont été menées pour étudier les écoulements secondaires (cellules contrarotatives de Dean) et les phénomènes de recirculation dans différentes géométries, figures **I.5a** à **I.5c**. Les techniques de mesure utilisées sont en perpétuelle évolution.

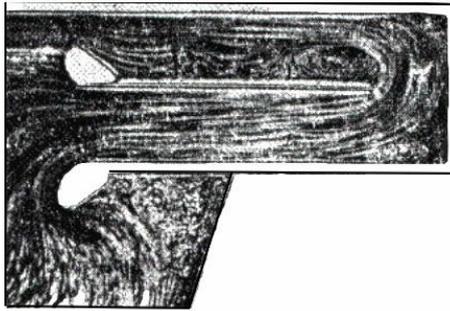
On citer entre autres quelques exemples d'application qui illustrent le recours à ces moyens.



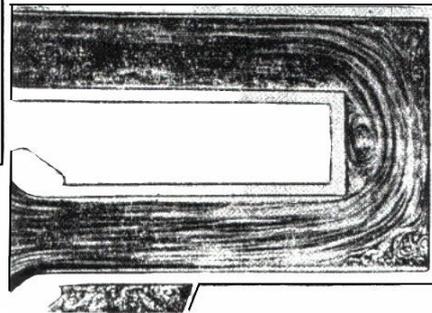
a) Formation des cellules de Dean (1927)



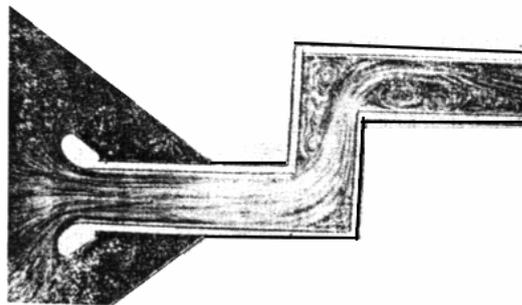
b) Zones de recirculation et écoulement secondaire



c)  $l_0/b_0=0$



d)  $l_0/b_0=1$



e) Spectres de l'écoulement dans des coude  $\pi$  et  $Z$ .

**Figure I.5 :** Quelques écoulements secondaires

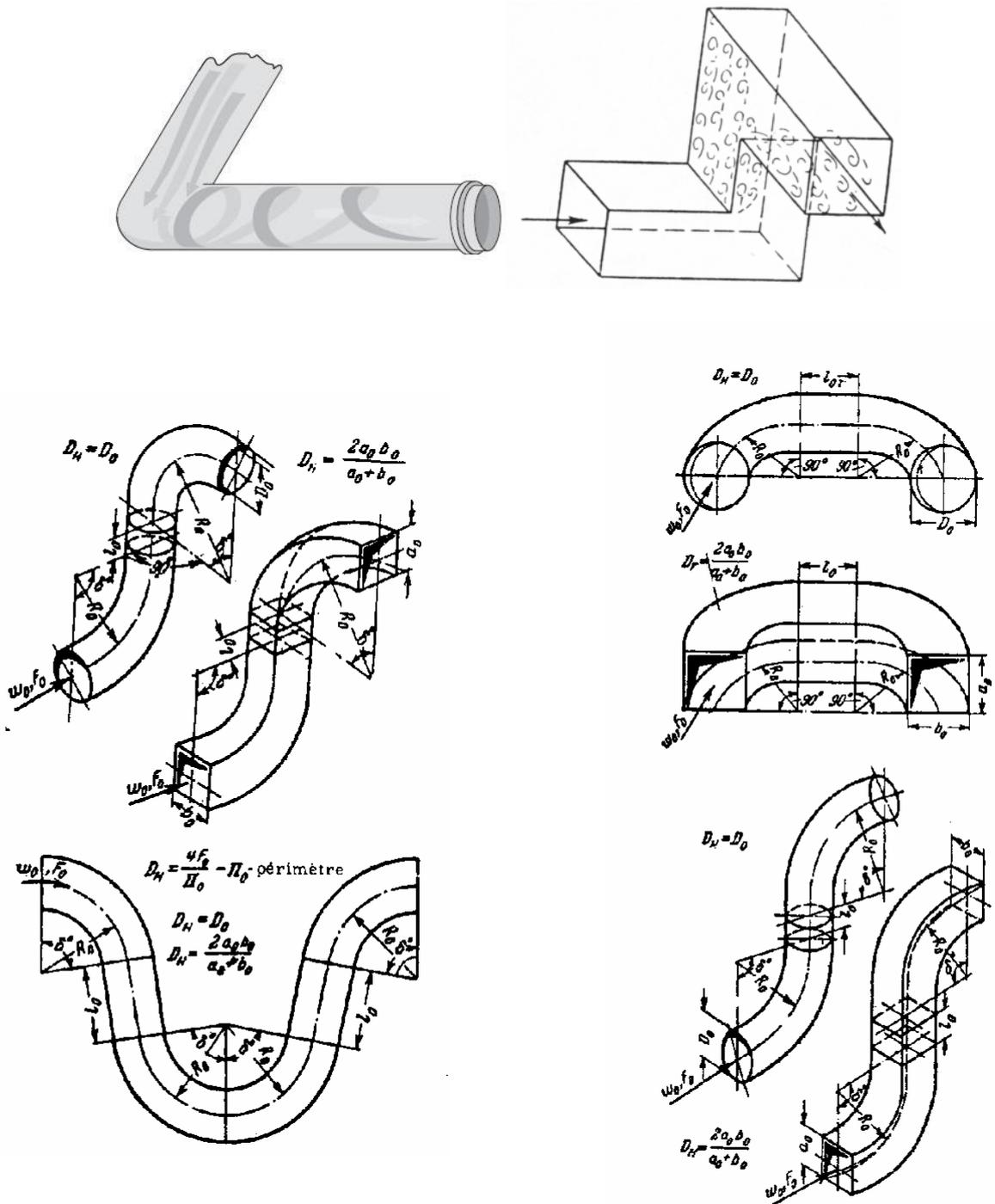
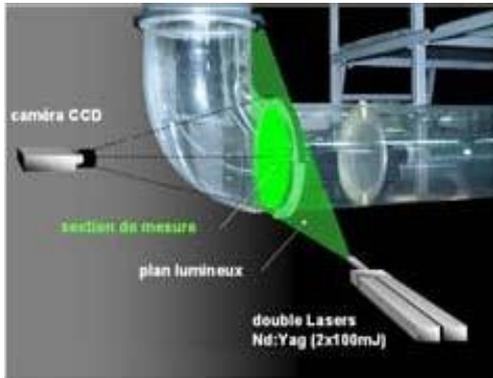


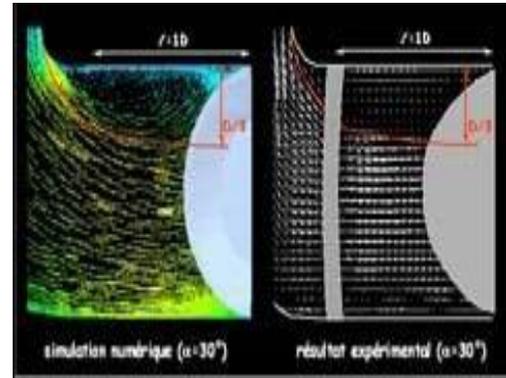
Figure I.6 : Formes de coudes

En industrie mécanique, sous certaines conditions d'écoulement, certains dispositifs peuvent être mis en vibrations fortement préjudiciables à leur résistance mécanique. Tel peut être le cas lorsqu'ils sont placés à l'aval immédiat d'un coude à 90°.

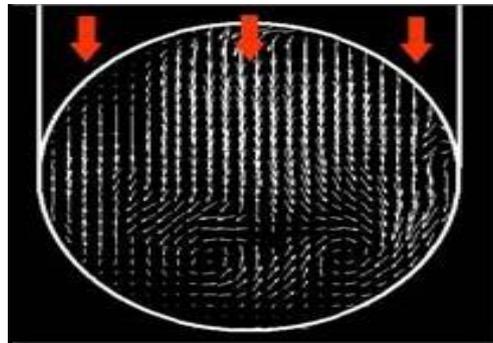
L'utilisation de la PIV ou d'autres techniques de mesure (figures I.7), ont permis de mettre en évidence la zone de décollement en aval du coude, figure I.7 b, et surtout la présence de tourbillons contrarotatifs similaires à des tourbillons de Dean, figure I.7 c, et responsables en grande partie de ces vibrations.



a) Mesure par PIV.



b) Comparaison des champs de vitesse obtenus en sortie du coude par modélisation statistique et PIV.



c) Visualisation des tourbillons de Dean en aval d'un coude à 90°

**Figure I.7 :** Etudes expérimentales et numériques sur les coudes.

**CHAPITRE II :**  
**MODÉLISATION**  
**MATHÉMATIQUE**

## II.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la mise en équations du problème considéré en utilisant les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie. Ces dernières expriment les principes fondamentaux de la physique. Ces équations de conservation associées aux lois constitutives contiennent l'ensemble des connaissances nécessaires pour reproduire intégralement le phénomène observé par la voie de la résolution ou de la simulation. Ces équations sont établies sur la base d'hypothèses et de postulats souvent anciens.

On commence par une description et présentation de la problématique de notre thème puis on passe à l'écriture des équations gouvernantes ainsi que les conditions aux limites.

## II.2 Géométrie et conditions aux limites :

La géométrie choisie est un coude arrondi de  $90^\circ$  à parois chaude, l'écoulement de fluide entre le coude par une vitesse et une température constante. La géométrie ainsi que les conditions aux limites sont montrées sur la figure II.1.

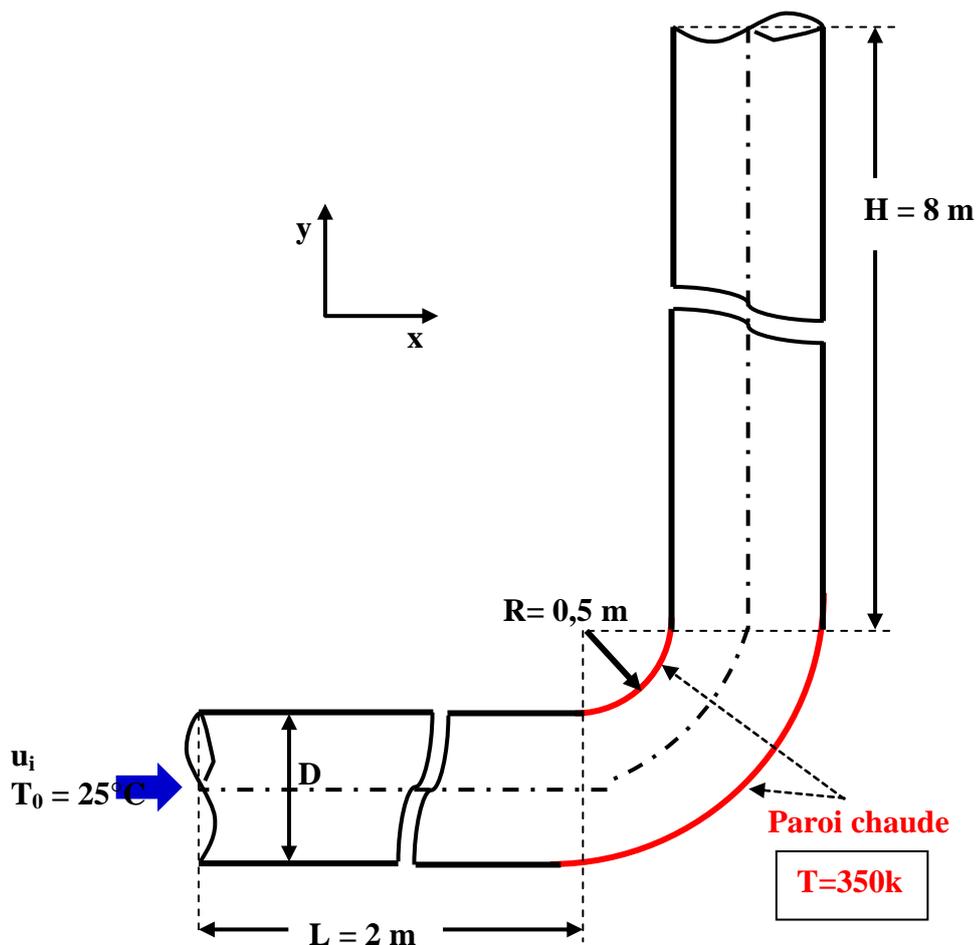


Figure II.1 : la géométrie et les conditions aux limites.

### II.3 Équations gouvernantes

La formulation mathématique des phénomènes de convection repose sur les équations liant les différents paramètres à savoir : la vitesse, la pression et la température. Ces équations sont obtenues à partir de :

- La loi de conservation de masse (équation de continuité).
- La loi de conservation de quantité de mouvement (équation de Navier-Stokes).
- La loi de conservation d'énergie (équation d'énergie).

#### II.3.1 Équation de continuité :

Elle exprime le principe de conservation de la masse.

$$\frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{II.1})$$

#### II.3.2 Equations de transport de quantité de mouvement:

Cette équation découle de l'application de la 2<sup>ème</sup> loi de Newton à un volume de contrôle élémentaire de fluide. Elle permet d'établir des relations entre les caractéristiques du fluide, celles de ses mouvements et les causes qui les produisent.

$$\underbrace{\frac{\partial V_i}{\partial t}}_1 + \underbrace{\rho V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j}}_2 = - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_3 + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_4 + \underbrace{\rho g_i}_5 \quad (\text{II.2})$$

- 1: Variation locale.
- 2 : Terme convectif
- 3 : Forces de pression
- 4 : Forces visqueux
- 5 : Effet de gravité

#### II.3.3 Équation de l'énergie:

Cette équation est du premier principe de la thermodynamique

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (V_j T)}{\partial x_j} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (\text{II.3})$$

## II.4 Transfert de chaleur:

Lorsqu'un corps plus chaud se trouve en présence d'un corps plus froid l'expérience nous montre qu'il y a transmission de chaleur, c'est à dire qu'une augmentation de température se produit dans le corps le plus froid et une diminution de température se produit dans le corps le plus chaud; la transmission de chaleur demeure jusqu'à ce que les températures des deux corps soient égales. Ainsi, dans le même corps il y a transmission de chaleur lorsque deux points présentent des températures différentes.

D'après ce que nous venons de dire la transmission de chaleur se produit en cas de différence de températures. En effet c'est l'unique condition car, comme nous le verrons par la suite, il n'est pas nécessaire que les corps soient en contact direct pour qu'il y ait transmission de chaleur.

### II.4.1 Modes de transfert de chaleur :

Il y a trois modes de transfert de chaleur :

- 1- Conduction
- 2- Convection
- 3- Rayonnement

La conduction (Figure II.1) est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux au repos, ou encore entre deux milieux en contact physique. (Les atomes se transmettent la chaleur de proche en proche). Le transfert de chaleur par conduction caractérise tous les transferts de chaleur qui s'effectuent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes. C'est le cas des surfaces d'échange des échangeurs de chaleur.

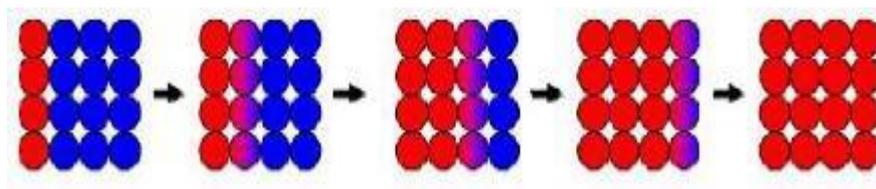


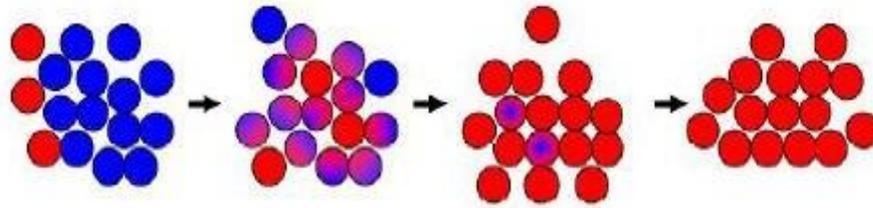
Figure II .2 :La conduction

Le flux de transfert de chaleur dépend de la conductivité thermique du produit .La loi fondamentale de la conduction est la loi de FOURIER s'écrit comme suit :

$$\phi = KS\Delta T \quad (\text{II.17})$$

La convection (Figure II .2):consiste en une transmission de chaleur par le mouvement réel des molécules en raison d'une différence de température. C'est un Processus caractéristique des liquides et des gaz les particules proches d'une source de chaleur présentent une température plus élevée et, par conséquent, une densité inférieure par rapport aux autres, ces particules s'élèvent à l'intérieur du fluide et sont remplacées par des particules plus froides. Ainsi,

une transmission de chaleur se produit par l'intermédiaire du mouvement des différentes particules .Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses . Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz. La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi ,ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques



**Figure II. 3:**La convection

Il y a deux types de transmission de chaleur par convection: la convection naturelle due à une différence de densité et la convection forcée due à l'action d'appareils mécaniques, tels que pompes ou compresseurs.

- Le flux du transfert de chaleur dépend de la nature chimique du produit.
- Plus la surface d'échange est importante, plus le transfert de chaleur est important.
- Plus l'écoulement est turbulent, plus le transfert de chaleur est rapide.

La loi fondamentale de la convection est la loi de NEWTON s'écrit comme suit :

$$\phi = K S \Delta T_{LM} \quad (\text{II.18})$$

Le rayonnement est l'écoulement de chaleur par ondes électromagnétique d'un corps haute température vers un corps à température plus basse. Il y a rayonnement lorsque les corps sont séparés par des molécules soit lorsqu'ils se trouvent dans le vide.

Le rayonnement permet le transfert de chaleur sans aucun intermédiaire matériel (comme le soleil qui transmet la chaleur vers les planètes)[26].

L'équation de base utilisée pour exprimer le rayonnement est la loi de STEFANBOLTZMANN

$$\phi = \sigma \epsilon T^4 \quad (\text{II.19})$$

#### II.4.2 Nombres adimensionnels caractérisant le transfert de chaleur:

Le nombre de Reynolds est donné par :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{II.20})$$

L'échangeur connective est donc décrit à l'aide des seuls nombres de Reynolds et de Prandtl.

On définit le nombre adimensionnel comme suit : le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement, dans le cas d'un écoulement à l'intérieur d'un conduit cylindrique de paroi lisse on a:

- $Re < 2300$  : Régime laminaire
- $Re > 2300$  : Régime turbulent

Le nombre de Prandtl est donné par :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} \quad (\text{II.21})$$

C'est un nombre adimensionnel lié la continuité du flux thermique en  $y = 0$ , la condition de non glissement du fluide sur la paroi (vitesse nulle) impose l'égalité [27]

$$Nu = \frac{hD}{K} = -\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.22})$$

Pour régime laminaire ( $Re < 2300$ ) :

$$Nu = 1.86 (Re \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{D}{x} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_f}{\mu_p} \right)^{0.14} \quad (\text{II.23})$$

Pour régime turbulent ( $Re > 2300$ ) :

$$Nu = 0.023 (Re^{0.8}) \left( Pr^{\frac{1}{3}} \right) \quad (\text{II.24})$$

# **CHAPITRE III :**

# **MÉTHODE NUMÉRIQUE**

### III.1 Introduction

Les équations du bilan régissant la convection sont des équations aux dérivées partielles non linéaires, de type elliptiques et couplés. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues par l'utilisation des méthodes numériques.

Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature, dont on peut citer à titre d'exemples :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode des volumes finis.

Pour résoudre le système d'équations présenté dans le chapitre précédent, nous avons choisi la méthode des volumes finis adoptée par le logiciel CFD Fluent 6.3.26. La création de la géométrie et le maillage ont été réalisés en utilisant le préprocesseur Gambit 2.2.30 pour les différentes configurations étudiées.

Dans ce chapitre, nous allons donner une idée sur les deux logiciels Fluent et Gambit, et présenter les phases de la conception des géométries étudiées et la génération du maillage utilisé pour la simulation numérique ainsi que les étapes de simulation sous Fluent.

#### III.1.1 Méthodes des différences finies

C'est la méthode la plus ancienne, le principe fondamental de cette méthode consiste au maillage du domaine d'étude en nœuds dont la finesse permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équation algébrique égale au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées.

#### III.1.2 Méthodes des éléments finis

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche des volumes de l'inconnue en supposant que dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié. Elle conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul longs qui nécessitent souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels.

#### III.1.3 Méthodes des volumes finis

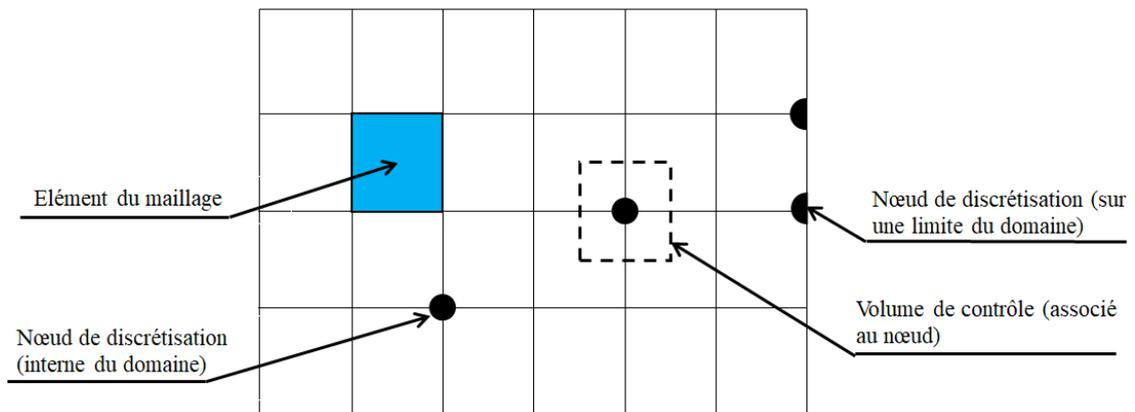
La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis ainsi que dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations

de conservation tels que le terme source par exemple. La méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud

### III.2 Notion de maillage

#### III.2.1 Nœuds et éléments

La modélisation numérique repose sur la reformulation des équations de conservation sur des volumes  $v_n$  élémentaires ou discrets, appelés éléments ou mailles. A ces éléments, sont associés les nœuds de discrétisation, c'est-à-dire les points de résolution des équations discrètes. Ceux-ci peuvent être aussi bien placés aux sommets des éléments qu'en leur centre ou encore sur les faces, selon la méthode de discrétisation utilisée.



**Figure III.1:** Illustration de la notion de maillage.

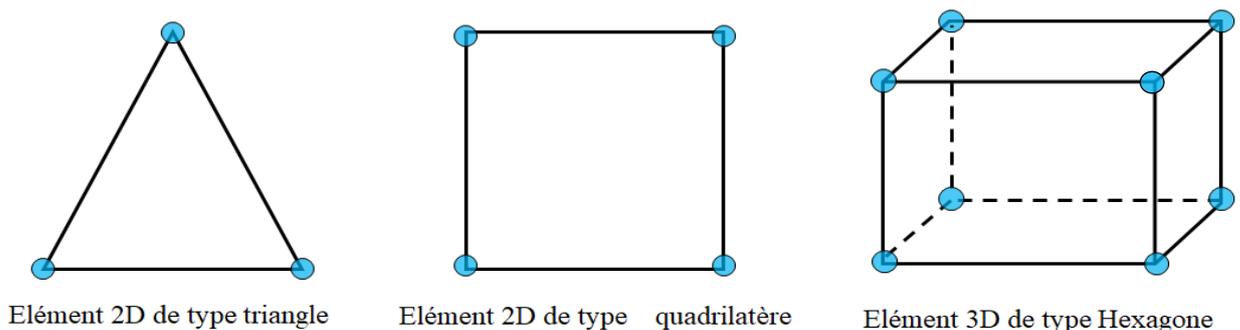
Les éléments et les nœuds associés composent le maillage, qui se fait par un découpage géométrique du domaine de calcul.

#### III.2.2 Géométrie et topologie

Nous faisons la différence entre la géométrie qui caractérise la forme du domaine et la topologie qui est le résultat du découpage spatial du domaine sur lequel s'appuie le maillage.

La topologie est donc une classification des objets de type segments, faces, etc.

Nous distinguons plusieurs types de maillages, définis par le nombre de nœuds associés à chaque élément (Figure III.2) et par le nombre de liaisons pour chaque nœud.

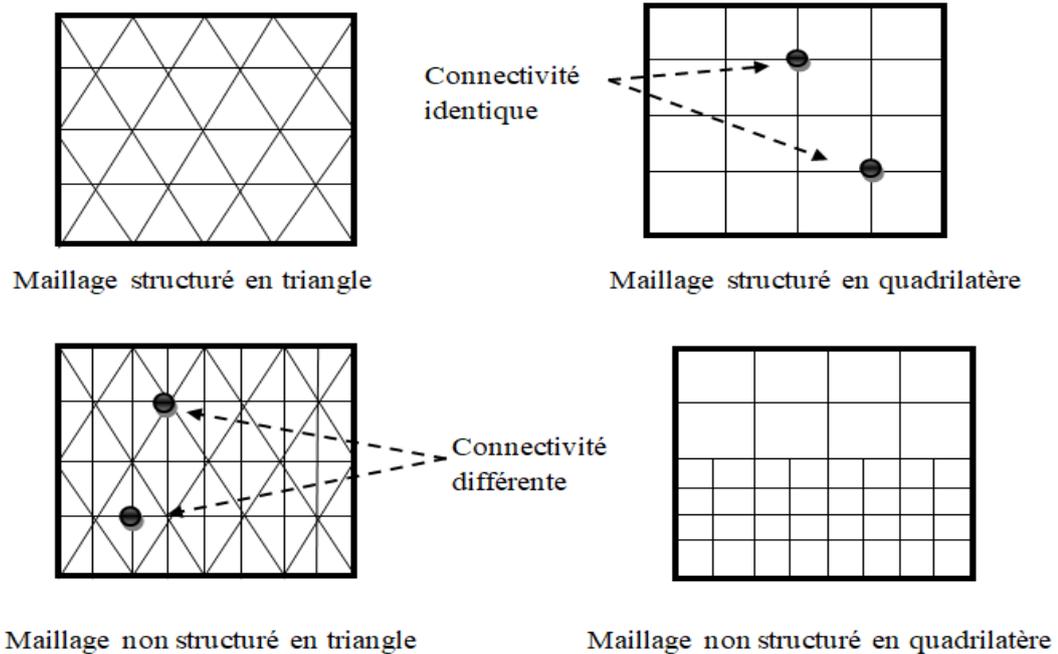


**Figure III.2:** Quelques types d'éléments.

### III.2.3 Connectivité

La connectivité décrit les liaisons entre les sommets des éléments. On parle de maillage structuré si les nœuds de même type (dans le domaine, sur une limite ou sur un coin) ont toujours le même nombre de nœuds voisins, ou sont associés au même nombre d'éléments.

La connectivité associée à ces nœuds est alors toujours de même type. Dans le cas d'un maillage non-structuré, la connectivité est de type quelconque, et le nombre de nœuds voisins de chaque nœud diffère localement (Figure III.3).



**Figure III.3:** Exemples de maillages.

### III.3 Définition de la CFD « Computational Fluid Dynamics » :

La CFD “Computational Fluid Dynamics” « Dynamique des Fluides Numérique », est un ensemble de méthodes numériques permettant d’obtenir une solution approximative d’un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique. Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides (les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes) que l’on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique., résolues par des méthodes numériques.

#### III.3.1 Présentation des logiciels Gambit et Fluent:

##### III.3.1.1 Préprocesseur Gambit:

C'est un préprocesseur intégré pour l'analyse en CFD (computational fluid Dynamics), il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques, Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

Les options de génération de maillage de Gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré. Sinon, Gambit génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite.

Le préprocesseur permet aussi de définir les conditions aux limites appropriées aux frontières du domaine de calcul.

Il existe deux méthodes possibles pour réaliser le maillage sur GAMBIT:

- Soit avoir un volume et le mailler régulièrement sans avoir maillé les arêtes,
- Soit mailler partie par partie, c'est-à-dire utiliser le maillage défini sur les lignes pour mailler les surfaces et par la suite les volumes.

### III.3.1.2 Code Fluent

Fluent est un logiciel de calculs numériques en dynamique des fluides CFD (Computational Fluid Dynamics) destiné à effectuer des simulations numériques des problèmes d'écoulements fluides. Le package Fluent s'appuie sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations régissant le mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents tels que :

- Ecoulements 2D ou 3D ;
- Ecoulement stationnaire ou in stationnaire ;
- Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) ;
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- Fluide Newtonien ou non ;
- Transfert de chaleur par conduction, par convection ou les deux (Conjugué) ou radiatif
- Ecoulement avec changements de phases ;
- Ecoulements au milieu poreux.

L'ensemble géométrie et génération de maillage se fait à l'aide du logiciel Gambit qui constitue un préprocesseur livré avec Fluent .

### III.3.2 Etapes principales de simulation:

GAMBIT possède une interface facile à manipuler et qui est constituée de plusieurs fenêtres d'outils d'opération destinées à construire le modèle, générer le maillage et incorporer les conditions aux limites.



Figure III.4: Lancement du Gambit

#### III.3.2.1 Construction de la géométrie :

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D .

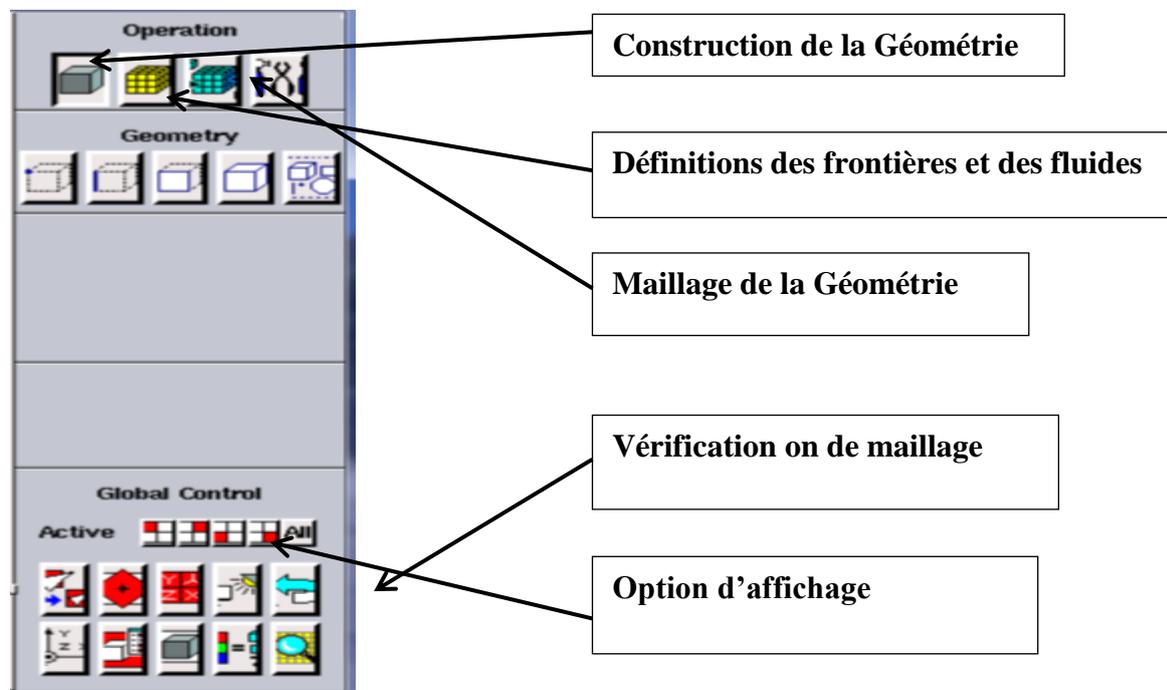


Figure III.5: Les opérations pour construire une géométrie

### a- Création des points :

Après avoir entré les suivrons dans l'ordre les étapes suivantes .

Les coordonnées des points concernant notre géométrie sont les suivantes :

Point 1 : [0.5;00] (m)

Point 2 : [0.7;00] (m)

Point 3 : [00;-0.5 ] (m)

Point 4 : [00;-0.7 ] (m)

Point 5 : [-2; -0.5 ] (m)

Point 6 : : [-2; -0.7] (m)

Point 7 : [0.5 ; 8] (m)

Point 8 : [0.7 ; 8] (m)

La figure suivante montre la position des différents points ainsi créés :

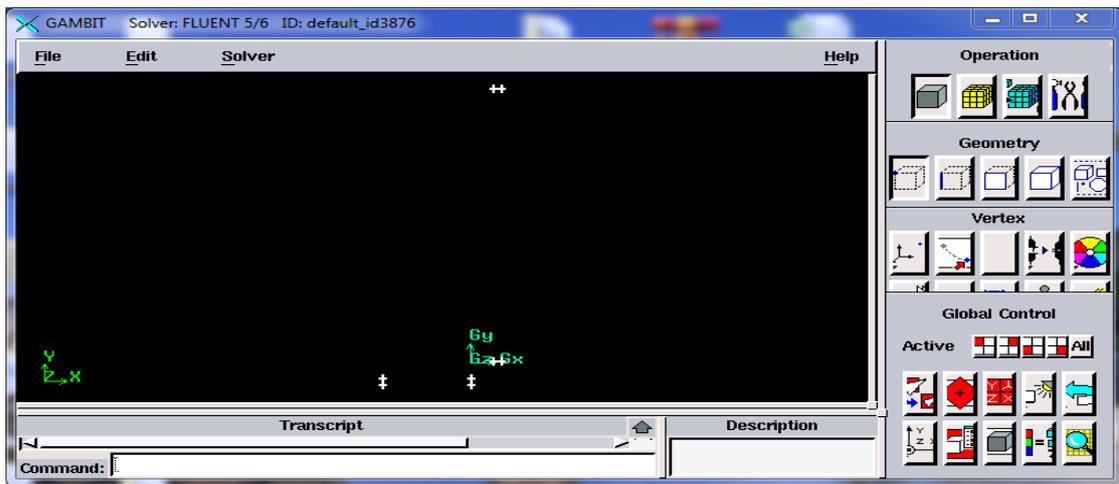


Figure III.6: Création des points

### b- Création d'une face:

Les étapes à suivre sur gambit sont dans l'ordre : **Opération**> **Geometry**>**Edge**> **Create Real Edge**.

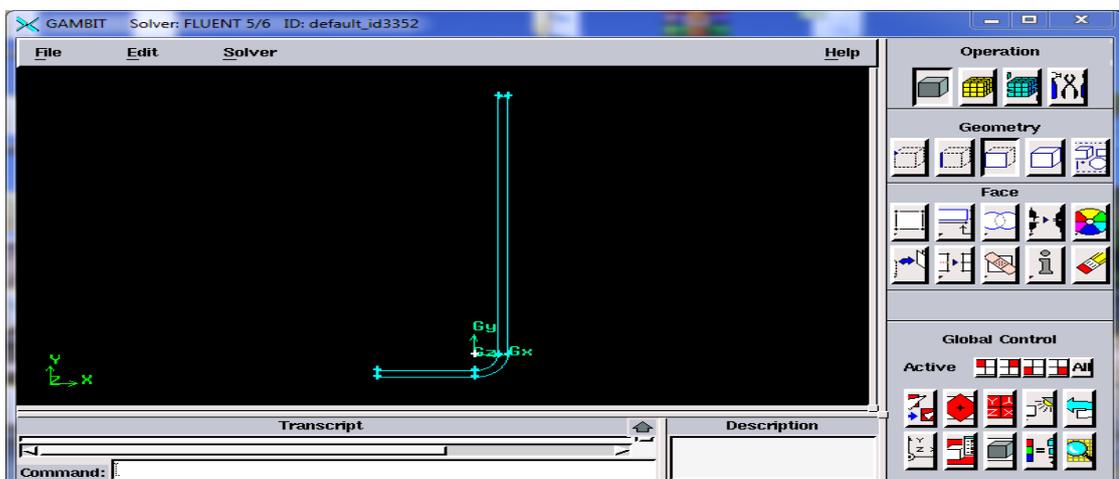


Figure III.7: Création d'une face

### C –Maillage:

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage).

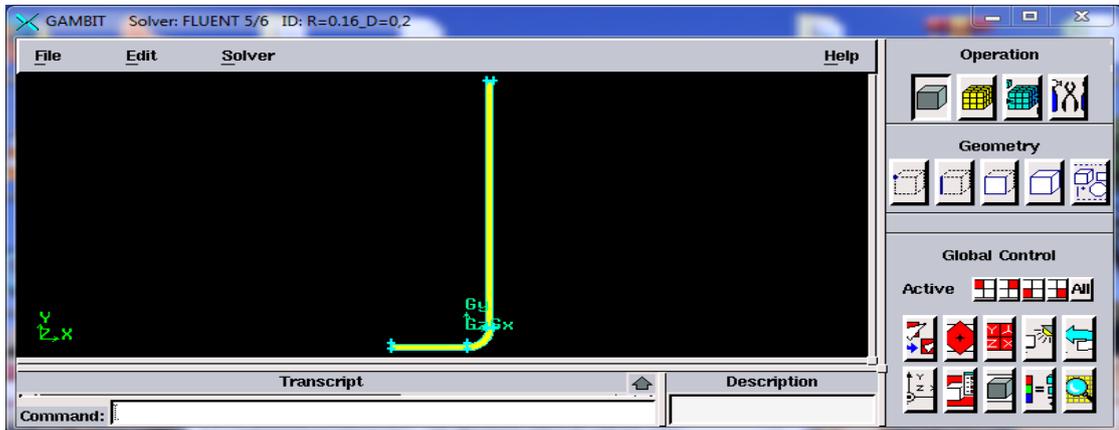


Figure III.8: Maillage de volume

### d-Les conditions aux limites:

Le mailleur Gambit peut générer des maillages que beaucoup de solveurs peuvent utiliser, ainsi nous devons spécifier le logiciel solveur avec lequel on veut traiter le fichier maillage.

Comme conditions aux limites, on peut imposer un débit massique à l'entrée de la machine, en utilisant la condition Mass flowInlet ou une Velocityinlet, la pression à la sortie en utilisant la condition Pressure Outlet.

Donc la spécification des conditions aux limites est effectuée selon le problème traité. A noter que l'espace maillé est pris par défaut comme fluide.

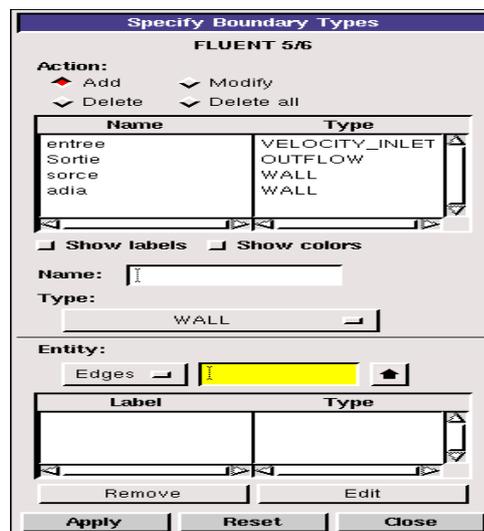


Figure III.9: les Conditions aux limites

### E -L'exportation du fichier .Msh:

Une fois que la géométrie a été créé, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, depuis le préprocesseur Gambit vers le solveur Fluent en format .Msh (Msh=maillage en anglais) pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser.

### III.3.2.2 Principales étapes de simulation sous FLUENT

- **Importation de la géométrie (\*.MSH)**

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit.

Les étapes sont les suivantes : **File>read>case...**

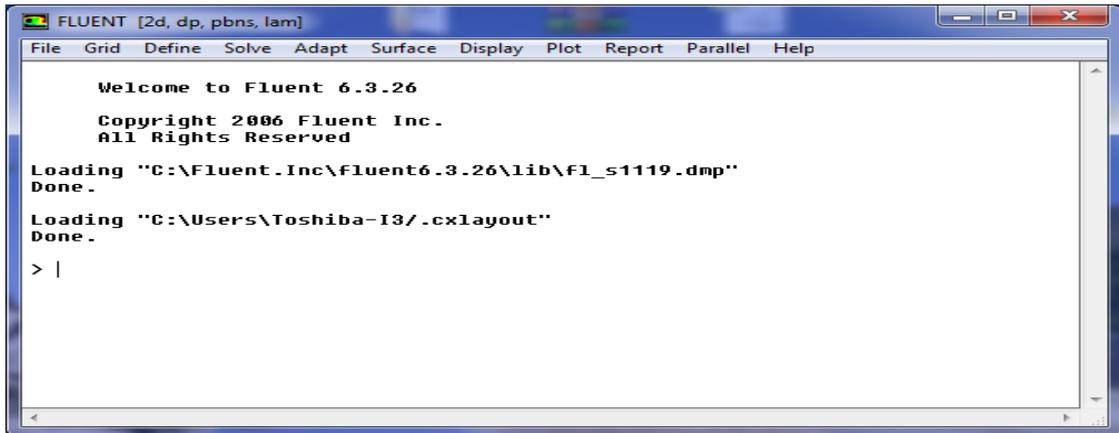


Figure 0.10 : Importation de la géométrie

- **Vérification du maillage importé de Gambit**

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs. Les étapes à suivre sont : **Grid >check**.

- **Vérification de l'unité de longueur**

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème. Les étapes à suivre sont : **Grid>Scale**

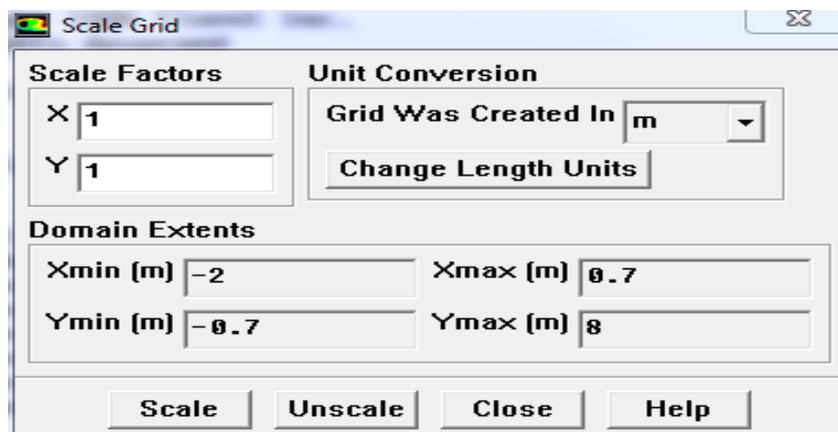


Figure 0.21 : Choix de l'unité de longueur

- **Choix du Solveur**

Les étapes à suivre sont : **Define>Models>Solver**. Donc nous avons choisis le premier solveur (pressure based), celui-ci nous permet aussi de définir la dimension de notre espace de travail (2D), la vitesse (absolu), la formulation ou bien la méthode (implicite) et un pas de temps régulier.

- **Autorisation du transfert de chaleur:**

### Define>Models>Energy

Formulation de l'équation d'énergie

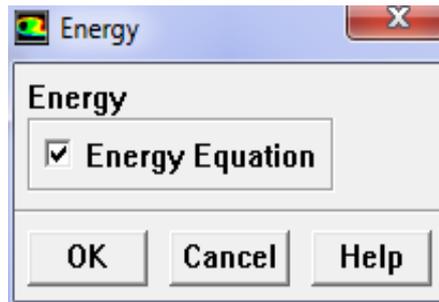


Figure 0.32 : Autorisation l'équation de l'énergie.

- **Choix du régime d'écoulement**

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement. Parmi eux les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents...etc. (écoulement laminaire pour notre cas), les étapes à suivre pour y parvenir sont : **Define \_Models\_ Viscous**

- **Définir les propriétés des matériaux:**

### Define>Materials...

C'est le choix du fluide ou solide utilisé avec l'introduction des données concernant les propriétés physiques..

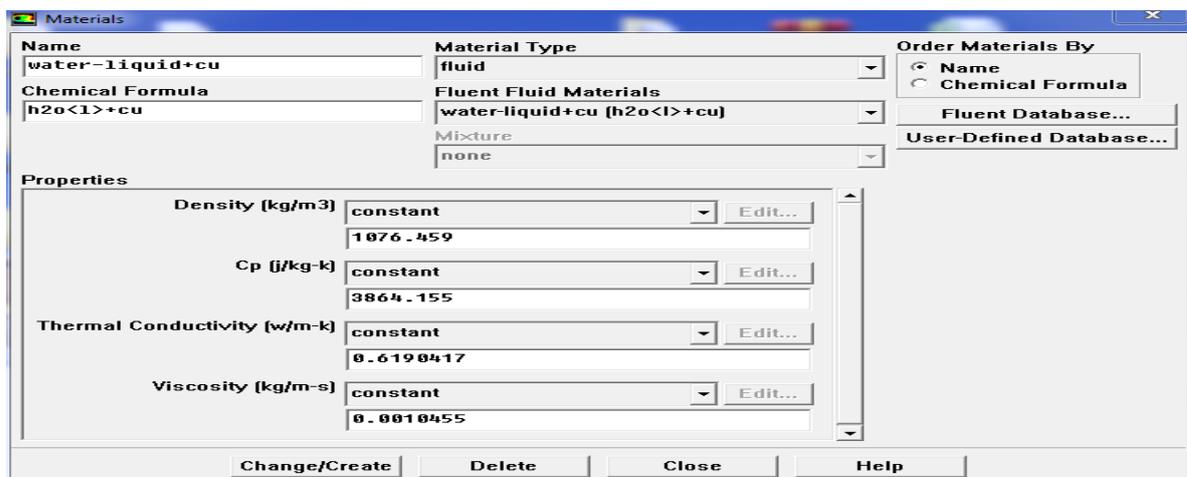


Figure III.13: Définir les propriétés physiques des matériaux.

Les matériaux et le fluide utilisés pour notre étude sont choisis à partir de la banque de données dans Fluent. Nous avons utilisé l'eau et les nanofluides ( eau+Cu) et( eau+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

- **Mise en place des conditions aux limites usuelles**

La procédure à suivre : **Define\_Boundary Conditions**

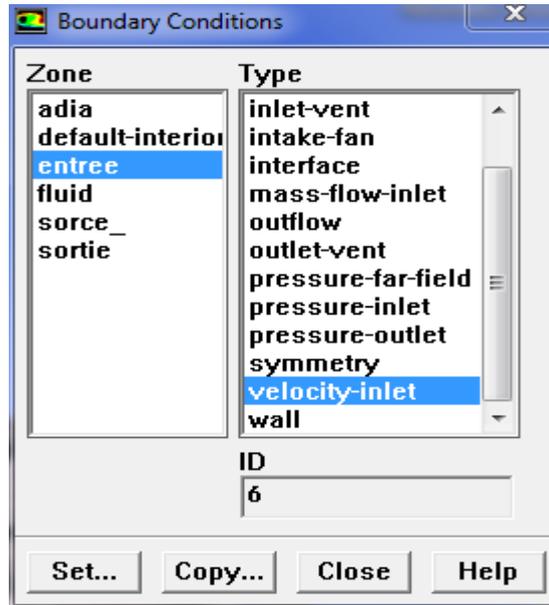


Figure III.14: les conditions aux limites

- **Mise en valeur de la vitesse à l'entrée de la conduite (géométrie considérée)**

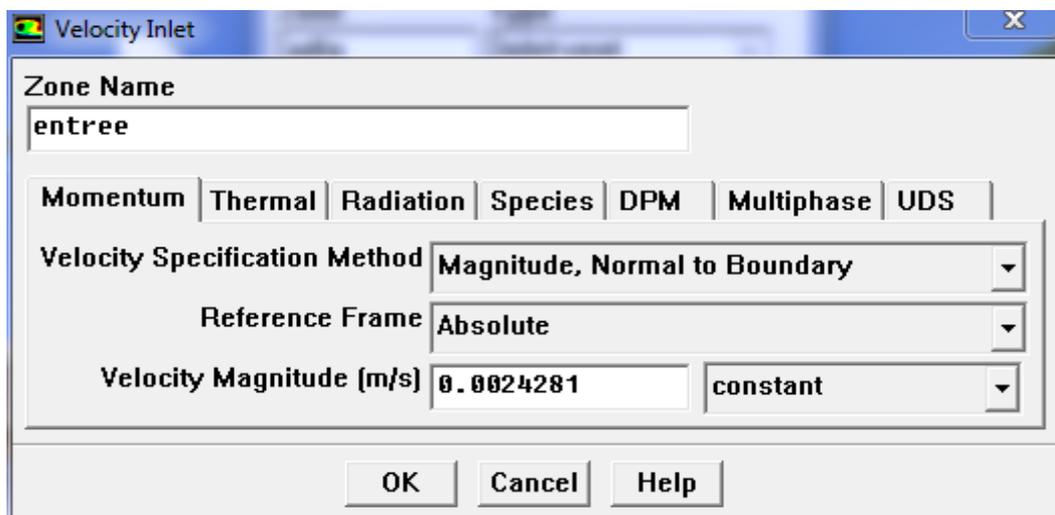


Figure III.15: vitesse à l'entrée

- **Choix du résidu**

**Solve> Monitors >Residual...**

Pour activer le tracé des résidus et observer la convergence de notre solution on sélectionne print et plot. En général une décroissance en magnitude des résidus indique une convergence au moins qualitative.

- **Calcul:**

Solve

>Iterate :

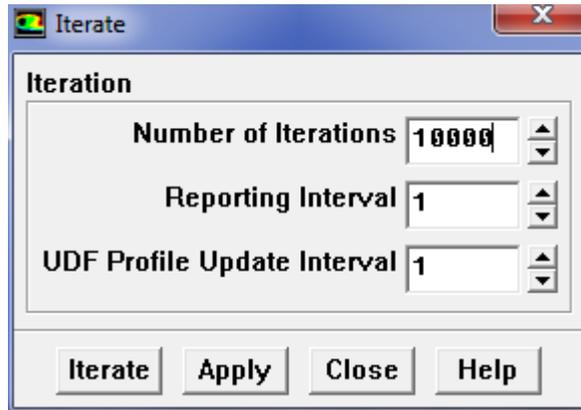


Figure III.16 : Choix des nombres des itérations

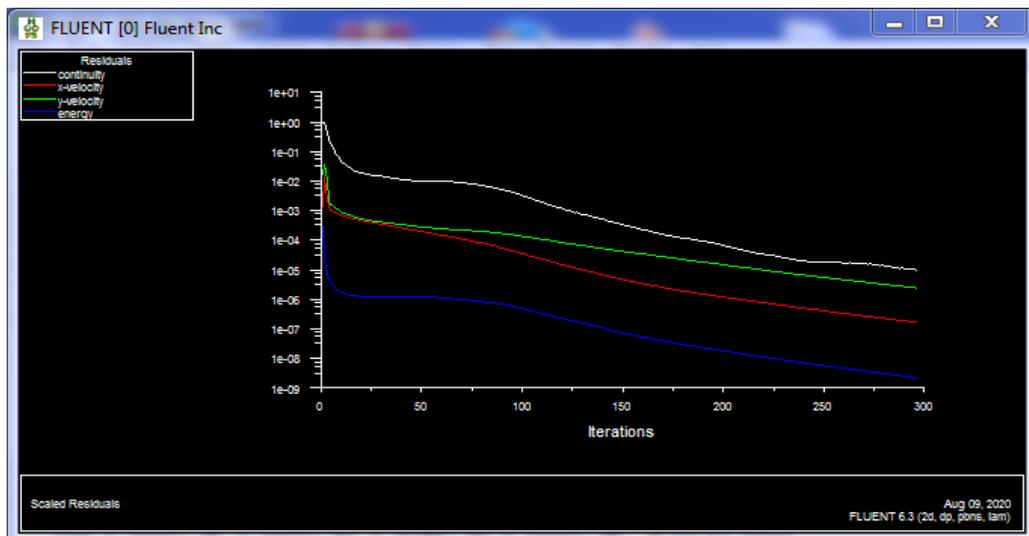


Figure III.17: Allure de l'évolution des résidus de calcul.

On choisit un nombre d'itération et clique sur « iterate ». Vous recliquez sur« iterate » tant que vous ne voyez pas de plateau sur le graphique des résidus affiché par Fluent.

- **Sauvegarde du fichier .CAS.DAT**

Une fois le paramétrage est effectué, on sauvegarde le fichier en format (\*.cas). S'il y a un bug durant les calculs, il suffit de charger le fichier (\*.msh), on n'aura pas à refaire le paramétrage. La sauvegarde de ces derniers ce fait comme suit : **File >Write>Case&Data...**

**CHAPITRE IV:**  
**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

**0IV.1 Introduction**

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus par la simulation numérique en utilisant le logiciel Fluent relatifs en régime laminaire dans configurations étudiée: coude arrondi pour les nanofluides (eau+Cu et eau +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Nous présentons pour chaque configuration, les contours de la vitesse et les vecteurs vitesses et les fractions volumiques dans le cas des nanofluides. Nous terminons par une étude relative au transfert thermique en considérant le nombre du Nusselt moyen

**IV.2 Les paramètres utilisés :**

**Tableaux IV.1** Les propriétés physiques de nanofluide (**Eau + Cuivre**) et (**Eau +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**) avec différentes fractions volumiques :

$\Phi$	$\rho(\text{kg} / \text{m}^3)$		$C_p (\text{J} / \text{kg.K})$	
	Eau + Cu	Eau +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau + Cu	Eau +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,01	1076,459	1026,829	3864,154734	4047,005481
0,02	1155,818	1056,558	3592,544312	3922,438978
0,03	1235,177	1086,287	3355,835336	3804,690632
0,04	1314,536	1116,016	3147,706768	3693,215567
0,05	1393,895	1145,745	2963,27708	3587,525457

$\Phi$	$K(\text{W} / \text{m.K})$		$\mu$	
	Eau + Cu	Eau +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau + Cu	Eau +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,01	0,61904176	0,61880113	0,0010455	0,0010455
0,02	0,62496559	0,62449349	0,001071	0,001071
0,03	0,63077491	0,63008012	0,0010965	0,0010965
0,04	0,636473	0,63556392	0,001122	0,001122
0,05	0,64206303	0,64094772	0,0011475	0,0011475

**Tableaux IV.1** Les propriétés physiques de nanofluide

$V (\text{m/s})$							
/		$D= 0.2$		$D= 0.3$		$D= 0.4$	
$\phi$	Re	Eau + Cu	Eau +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau + Cu	Eau +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau + Cu	Eau +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,01	500	0,0024281	0,002545458	0,00161873	0,001696972	0,00121405	0,001272729
0,02	500	0,00231654	0,002534172	0,00154436	0,001689448	0,00115827	0,001267086
0,03	500	0,00221932	0,002523504	0,00147955	0,001682336	0,00110966	0,001261752
0,04	500	0,00213383	0,002513405	0,00142256	0,001675603	0,00106692	0,001256702
0,05	500	0,00205808	0,002503829	0,00137205	0,00166922	0,00102904	0,001251915

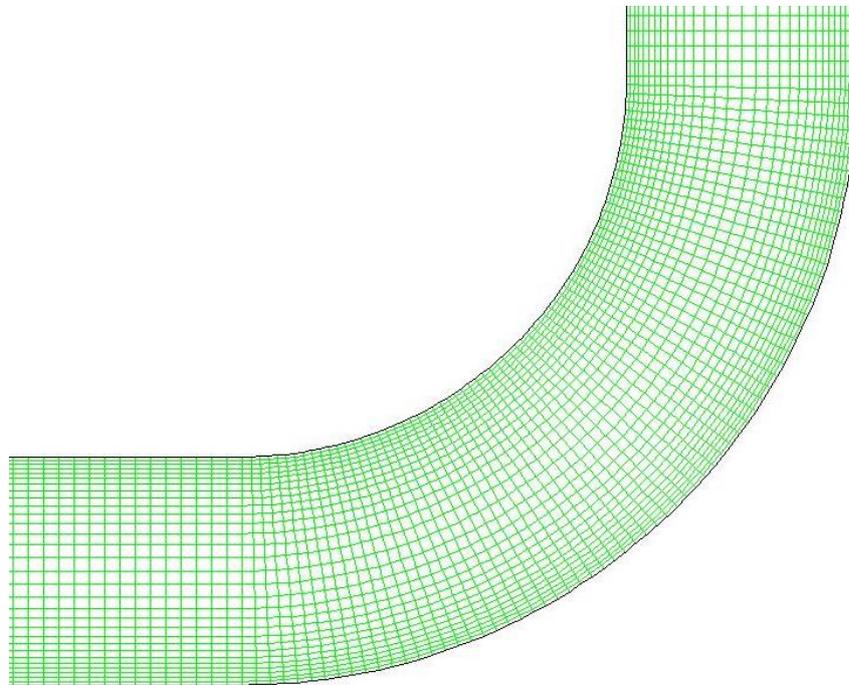
**0 IV.3 MAILLAGE DU DOMAINE**

Les résultats sont donnés sous forme de lignes de courant, de lignes isothermes, et de variation du nombre de Nusselt de paroi chaude (surface intérieur du coude). Le maillage est uniforme (30X70) pour le diamètre et rayon de la courbure, il donne des valeurs plus précises par

rapport aux autres maillages. Les résultats obtenus pour nanofluide eau + Cu,  $Re = 500$ ,  $\phi = 0,05$  et  $D = 0,3m$ , avec ce maillage (30X70) sont comparables à ceux obtenus pour le maillage de (20X50), (25X60) et (35X80). La finesse du maillage (20X50) génère des variations maximales inférieures à 0,969 % en termes de  $Nu_{moy}$  (tableau IV.3), on voit clairement qu'il existe une petite différence entre les résultats des trois maillages. Cette finesse est utilisée dans tous les calculs ultérieurs

Maillage	(20X50)	(25X60)	(30X70)	(35X80)	Erreur % (abs)			
					(20X50)	(25X60)	(30X70)	(35X80)
$Nu_{moy}$	33.4731	33.2440	33.1519	33.1549	0.969	0.278	-	0.009

**Tableau IV.3 :** Effet de maillage sur les résultats obtenus pour nanofluide eau+ Cu,  $Re = 500$ ,  $\phi = 0.05$ ,  $D = 0,3 m$  et pour paroi chaude (surface intérieur du coude)

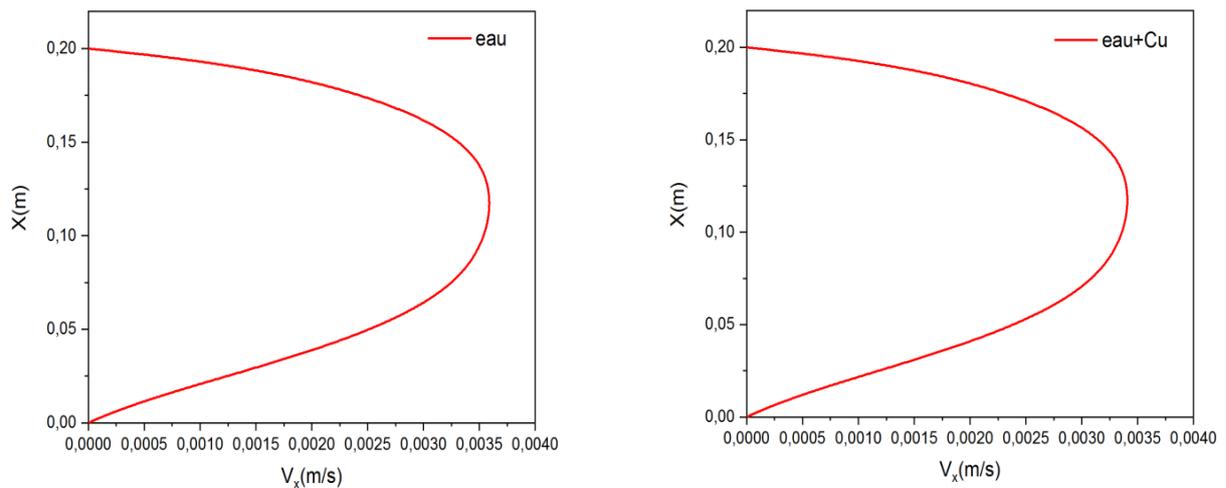


**Figure IV.1:** le maillage 30X70 utilisé dans cette simulation

#### IV.4 Validation :

Pour la validation dynamique, et comme la simulation traite un écoulement laminaire, on a simplement montré que le profil de vitesse à l'entrée du coude est bien parabolique.

La figure IV.2, montre que le profil de vitesses de l'eau seul et celui de du nanofluide sont parabolique.



**Figure 0IV.2:** Validation dynamique

## IV.5 Résultats et discussions :

### IV.5.1 Variation des contours et des profils de vitesse :

Les figures IV.3 (a ,b,c) présentent la variation des profil des vitesses (lignes de courant) dans le canal pour les différentes valeurs de la fraction volumique de nanoparticule Cu.

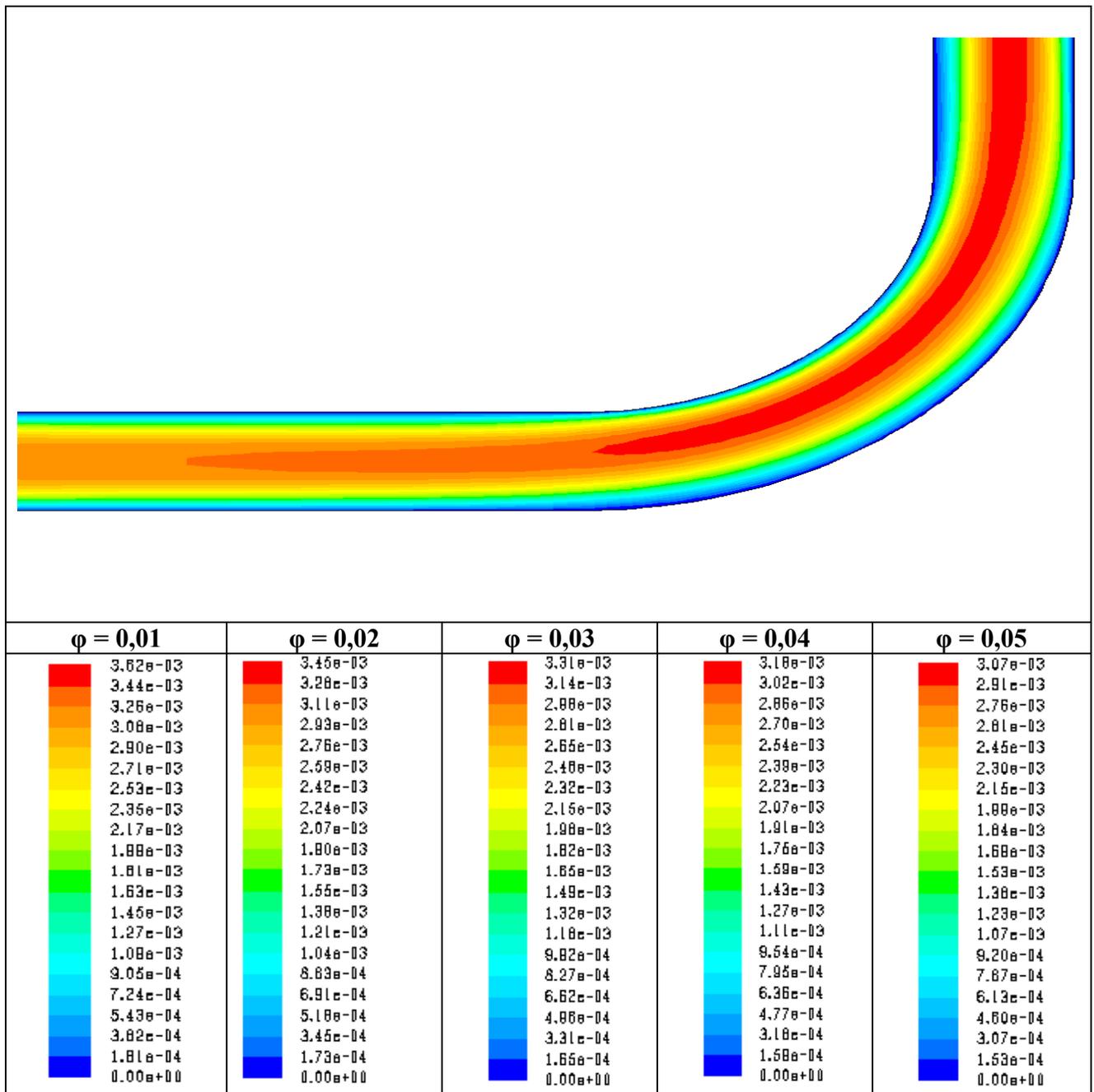
Dans la figure (IV.3.a) nous constatons que plus on se rapproche de l'entrée de coude ( $x=2m$ ), plus la vitesse augmente, au milieu coude la vitesse est maximale  $v_{max}=3.62.10^{-3}$  m/s ;elle est faible sur les bords d'un coude .

On remarque que plus la fraction volumique augmente, plus la vitesses diminue.

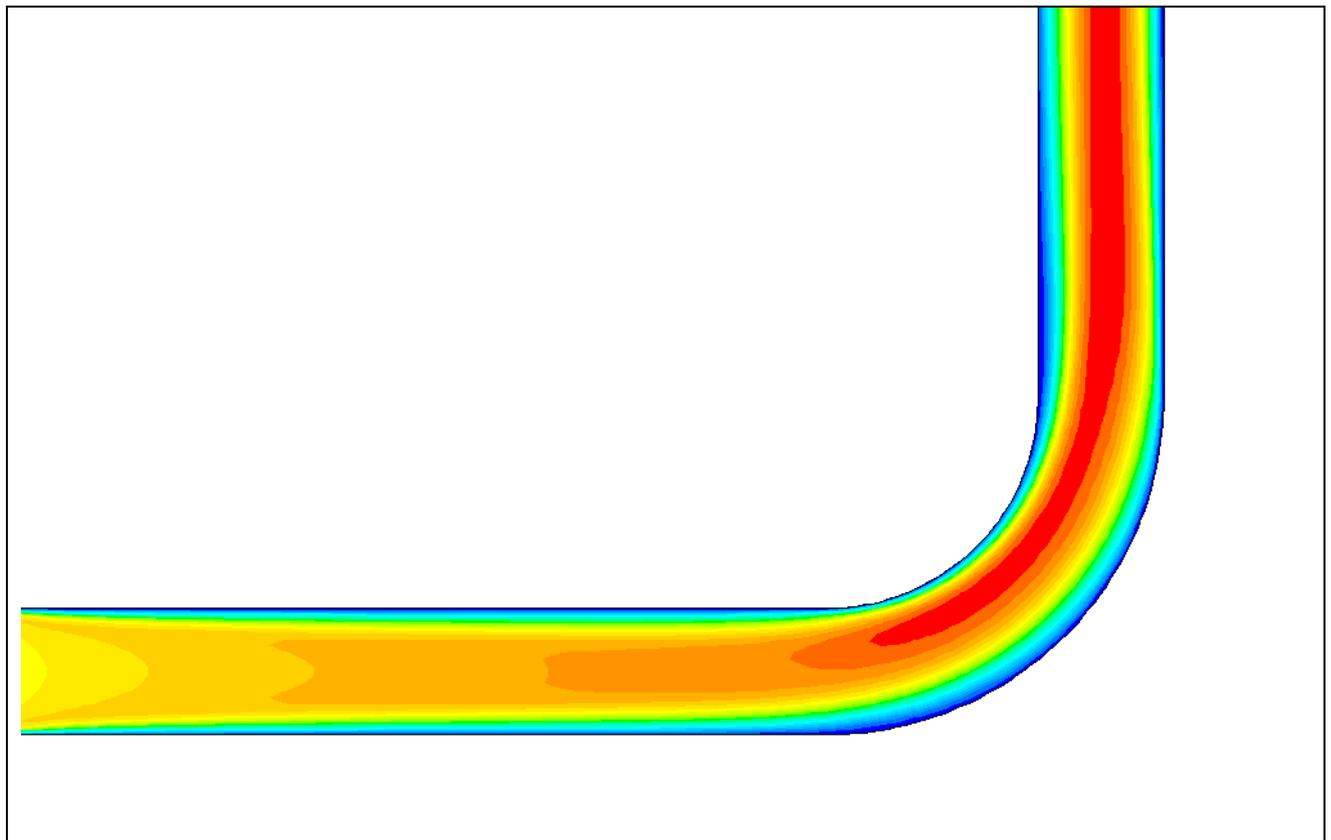
Pour les diamètres  $D=0,3$  et  $0,4m$ , les figures (IV.3.b) et (IV.3.c) montrent que l'allure des lignes de courant est similaire à celle du diamètre  $D=0,2$ . Cependant, on remarque que la vitesse diminue lorsque le diamètre augmente.

Pour les trois diamètres, la vitesse du fluide reste maximale à partir du milieu du coude jusqu'à la sortie ( $y=8m$ ).

La valeur de la vitesse maximale diminue lorsque la fraction volumique augment.

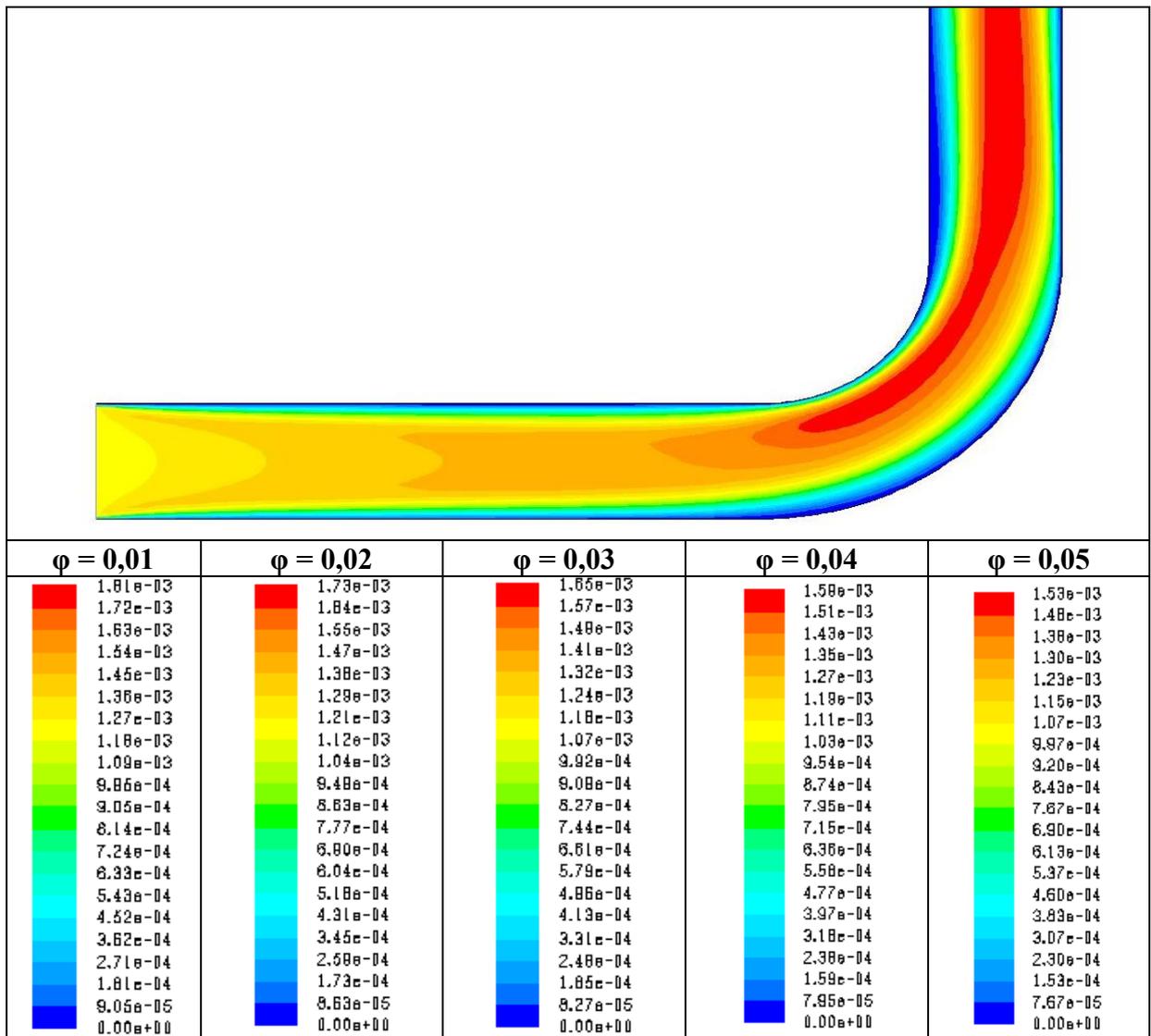


a) D=0.2m



$\varphi = 0,01$	$\varphi = 0,02$	$\varphi = 0,03$	$\varphi = 0,04$	$\varphi = 0,05$
2.41e-03	2.30e-03	2.20e-03	2.12e-03	2.04e-03
2.29e-03	2.18e-03	2.09e-03	2.01e-03	1.94e-03
2.17e-03	2.07e-03	1.98e-03	1.91e-03	1.84e-03
2.05e-03	1.95e-03	1.87e-03	1.80e-03	1.74e-03
1.93e-03	1.84e-03	1.76e-03	1.69e-03	1.63e-03
1.81e-03	1.72e-03	1.65e-03	1.59e-03	1.53e-03
1.69e-03	1.61e-03	1.54e-03	1.48e-03	1.43e-03
1.57e-03	1.48e-03	1.43e-03	1.38e-03	1.33e-03
1.45e-03	1.38e-03	1.32e-03	1.27e-03	1.23e-03
1.32e-03	1.26e-03	1.21e-03	1.16e-03	1.12e-03
1.20e-03	1.15e-03	1.10e-03	1.06e-03	1.02e-03
1.08e-03	1.03e-03	9.91e-04	9.53e-04	9.19e-04
9.64e-04	9.18e-04	8.81e-04	8.47e-04	8.17e-04
8.43e-04	8.04e-04	7.71e-04	7.41e-04	7.15e-04
7.23e-04	6.80e-04	6.61e-04	6.35e-04	6.13e-04
6.02e-04	5.75e-04	5.50e-04	5.29e-04	5.10e-04
4.82e-04	4.60e-04	4.40e-04	4.23e-04	4.08e-04
3.61e-04	3.45e-04	3.30e-04	3.18e-04	3.06e-04
2.41e-04	2.30e-04	2.20e-04	2.12e-04	2.04e-04
1.20e-04	1.15e-04	1.10e-04	1.06e-04	1.02e-04
0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00

b)  $D = 0.3 \text{ m}$



c) D = 0.4 m

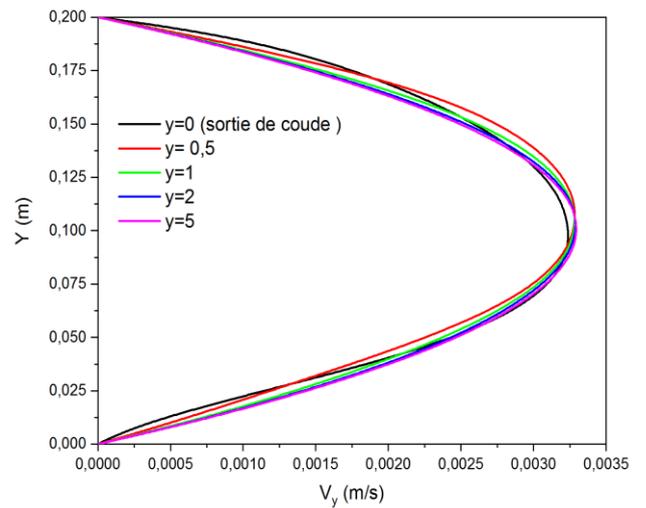
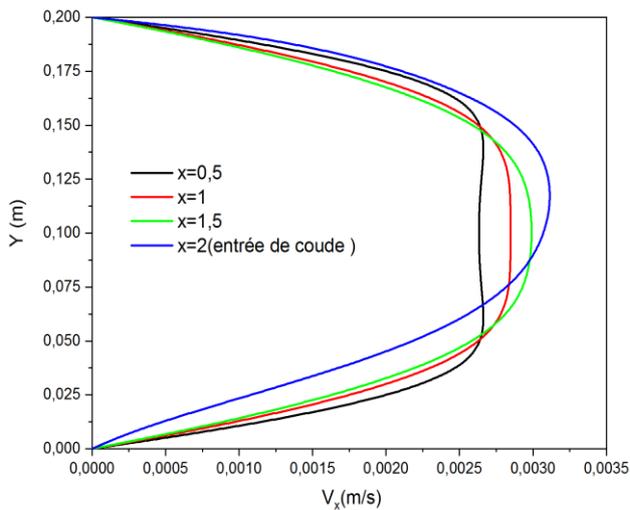
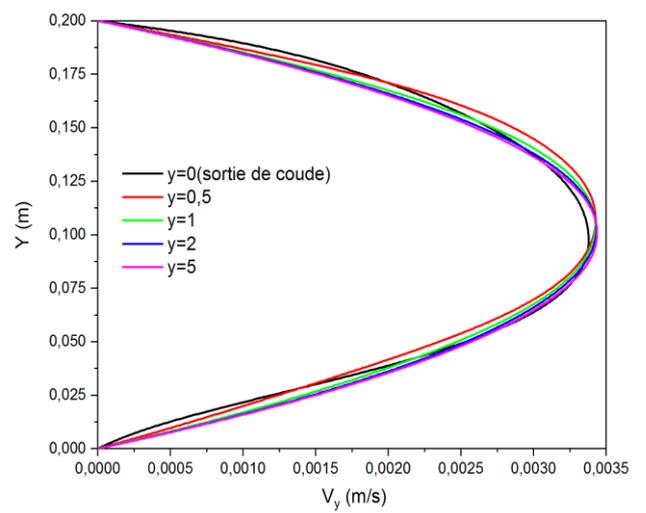
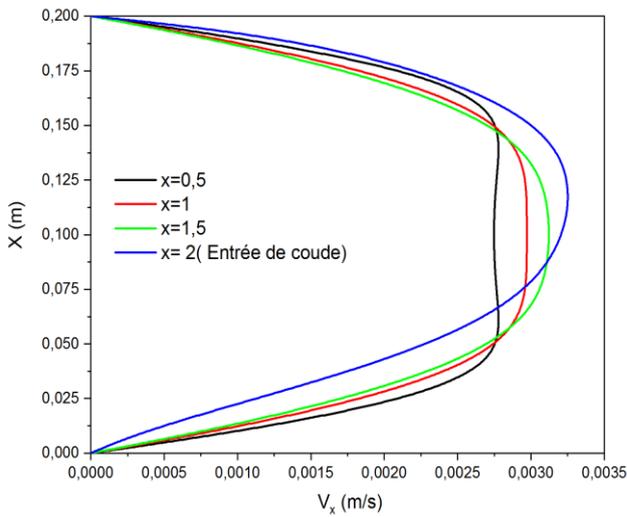
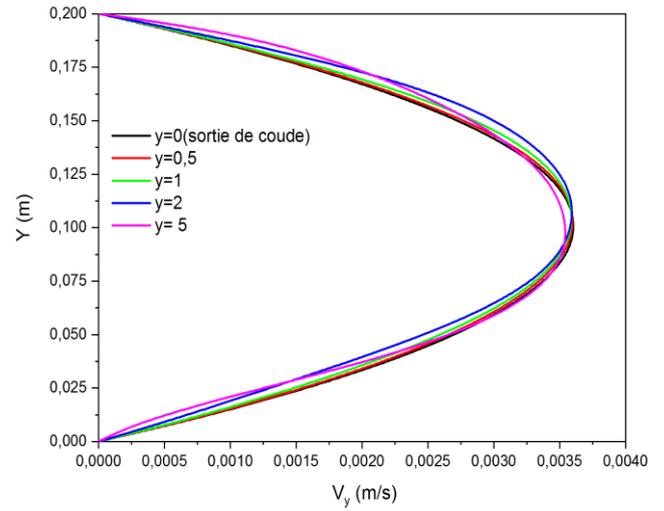
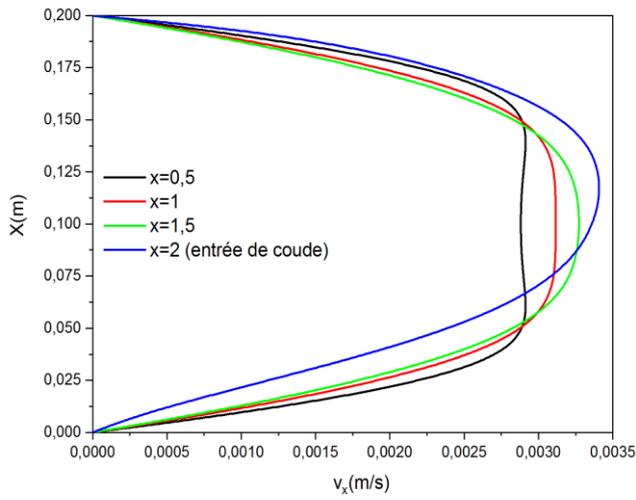
**Figure IV.3:** la variation de profil de vitesse (lignes de courant) dans le canal pour les différentes valeurs fractions volumique de nanoparticule Cu

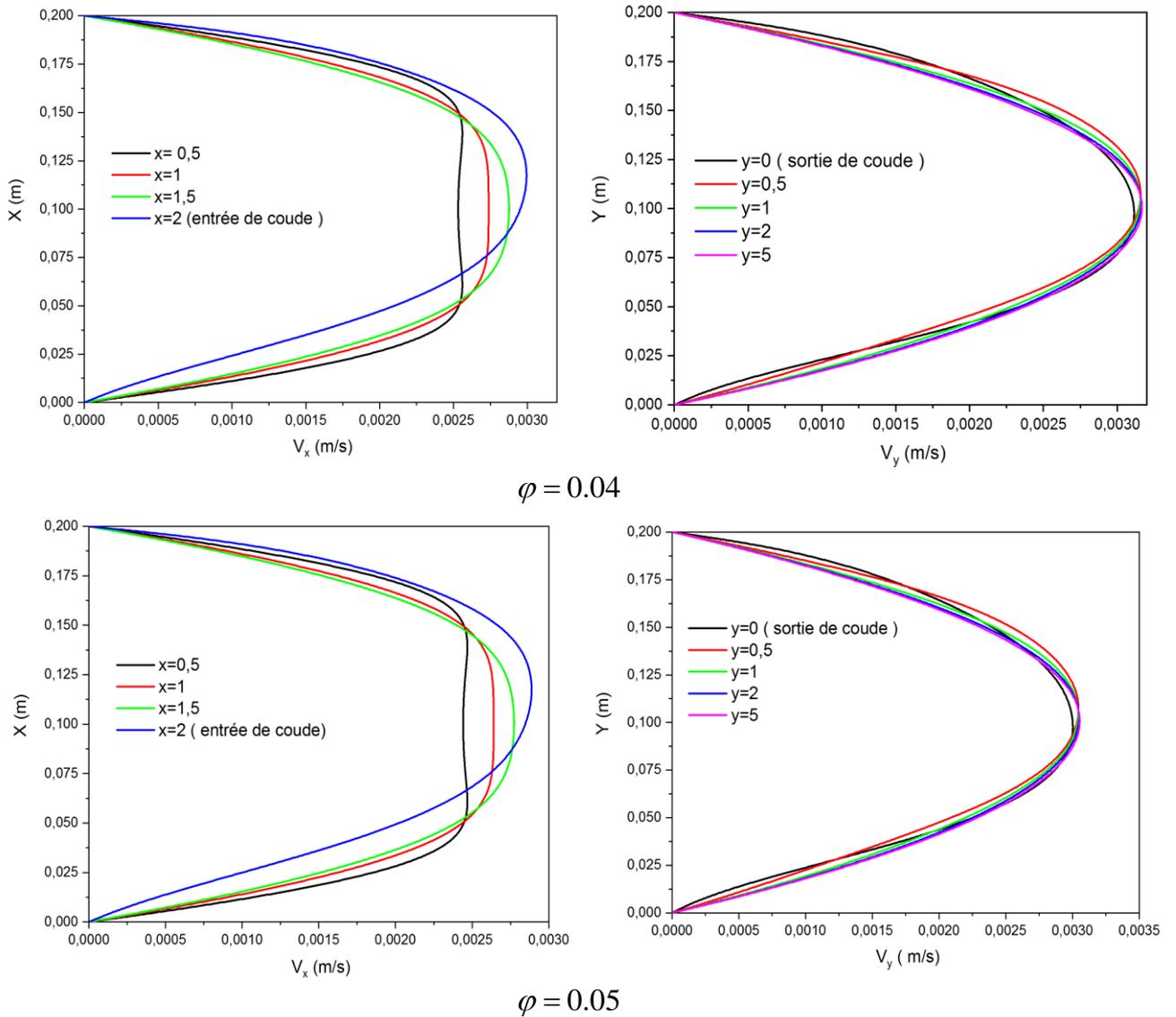
La figure IV.4 représente l’allure des profils de la vitesse axiale  $v_x$  et verticale  $v_y$  pour les différentes valeurs de la fraction volumique utilisées.

Pour la vitesse axiale, on remarque le profil des vitesses passe de celui du régime turbulent à  $x=0,5$  ;  $x=1$  ;  $x=1,5$  à celui du régime laminaire à l’entrée du coude ( $x=2$ ) où le profil des vitesses est parabolique.

Pour les cinq valeurs de la fraction volumique utilisées, les profils de vitesse ont la même allure. Cependant, la valeur de composante verticale de la vitesse diminue avec l’augmentation de la fraction volumique. Pour la composante verticale  $v_y$  de la vitesse, les profils sont identiques pour les différentes fractions volumiques utilisées. L’allure du profil de vitesse est parabolique, ce qui montre que le régime d’écoulement pour la composante verticale est toujours laminaire

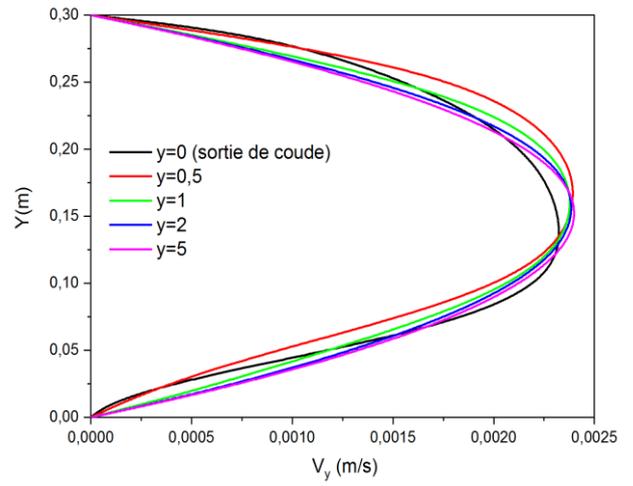
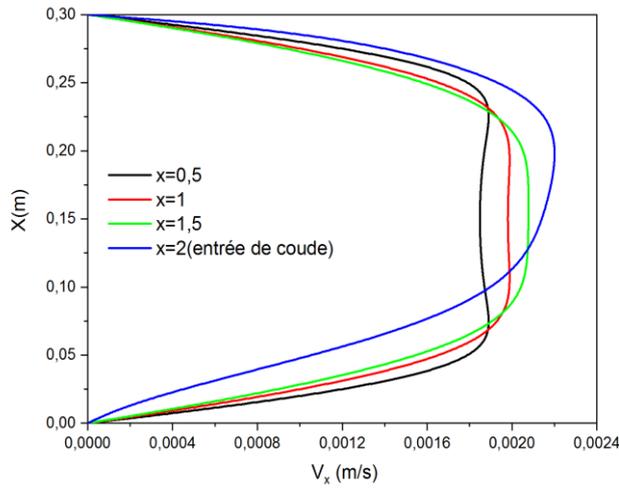
La composante verticale de la vitesse est donc constante quelle que soit la position prise verticalement sur le coude ( $y=0.5$  ;  $y=1$  ;  $y=2$  ;  $y=5$  ).



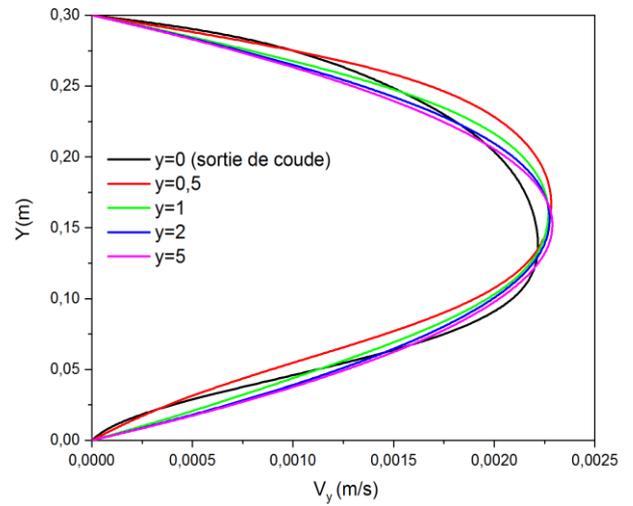
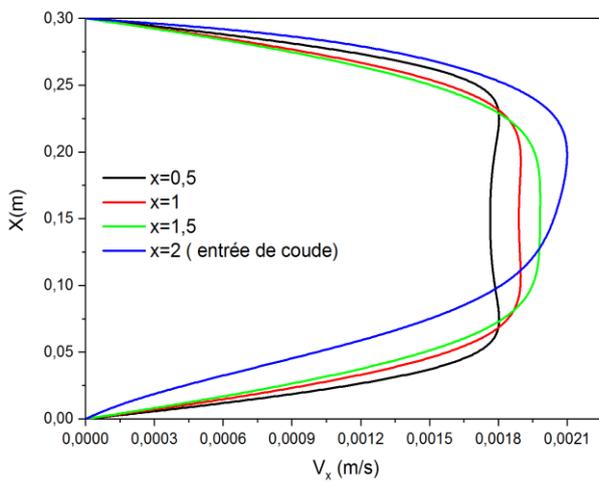


**Figure IV.4 :** Profil de la composante horizontale et verticale de la vitesse à l’entrée et la sortie du coude pour les différentes fractions volumique et pour  $D=0.2$  m

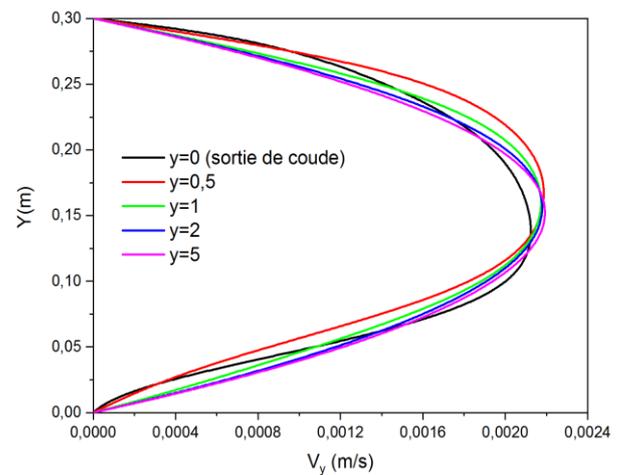
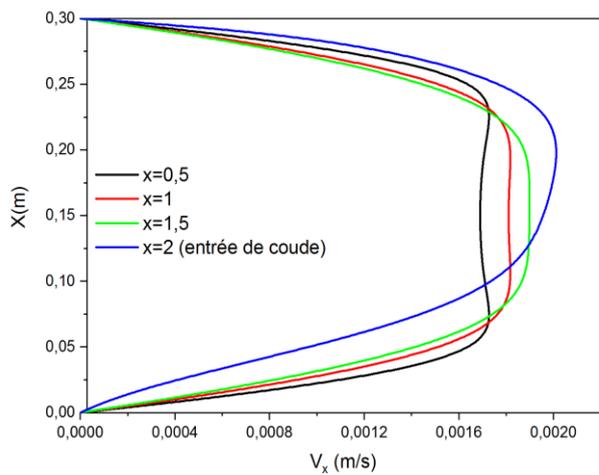
Pour les diamètres  $D = 0,3$  et  $0,4$  (figures IV.4 ;0IV.5 ,IV .6) , on peut faire les remarques que celle faites pour le diamètre  $D =0,2$ . Notons cependant que la vitesse maximale diminue avec l’augmentation du diamètre de la conduite.



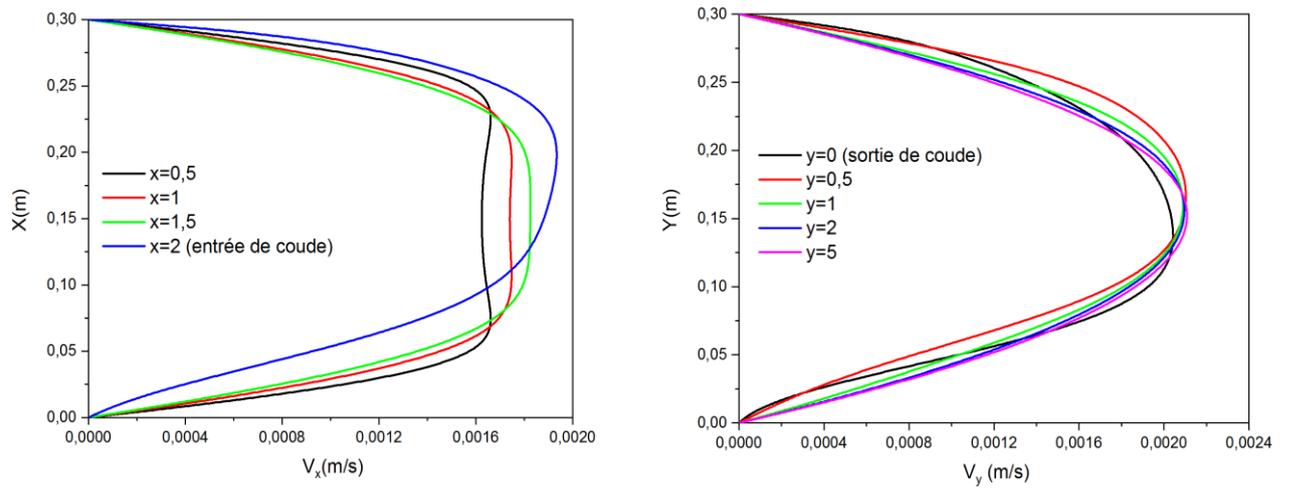
$\varphi = 0.01$



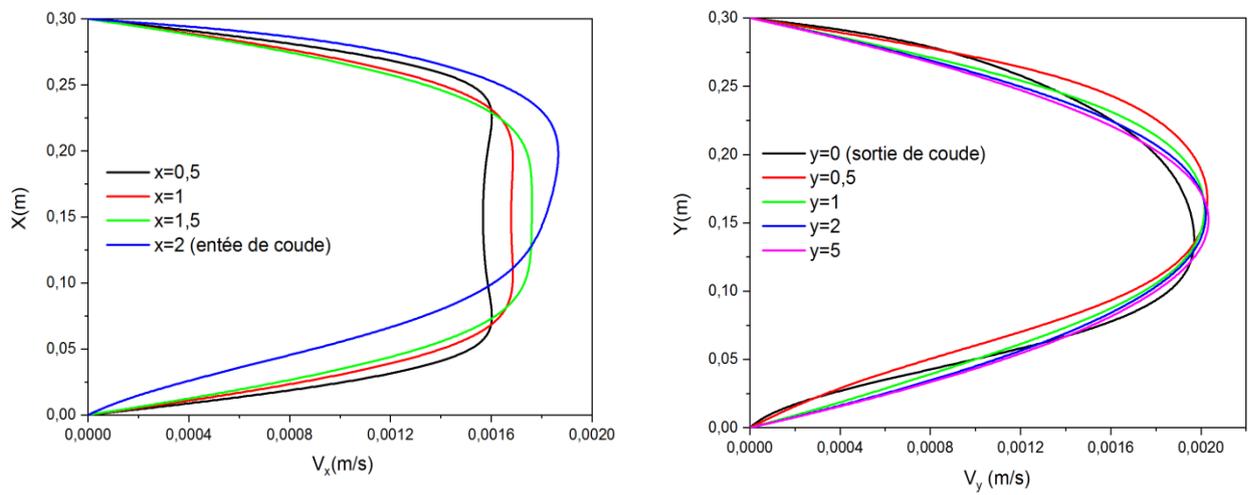
$\varphi = 0.02$



$\varphi = 0.03$

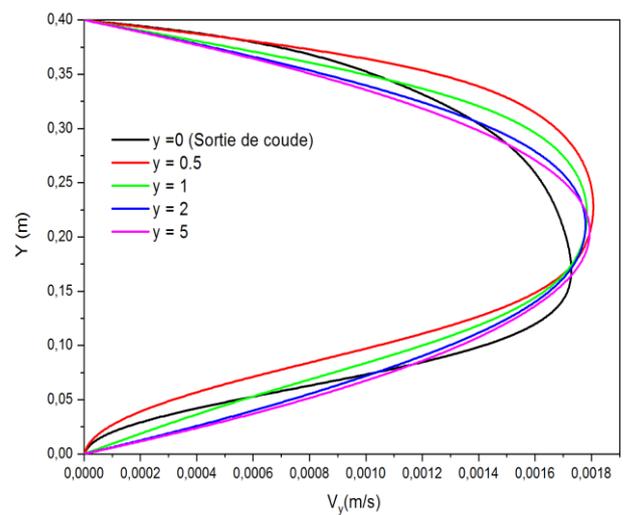
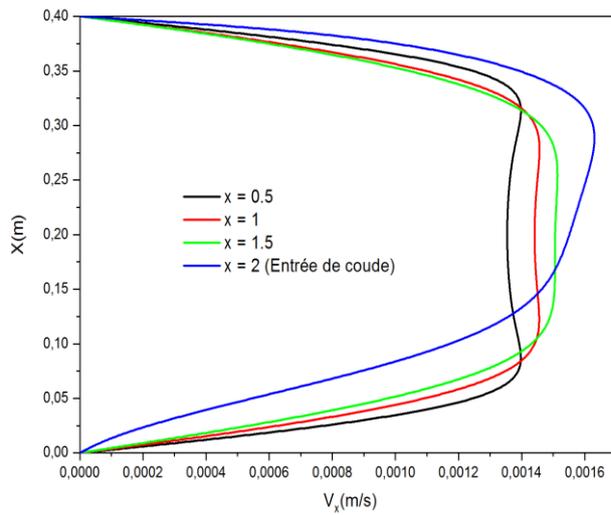


$\varphi = 0.04$

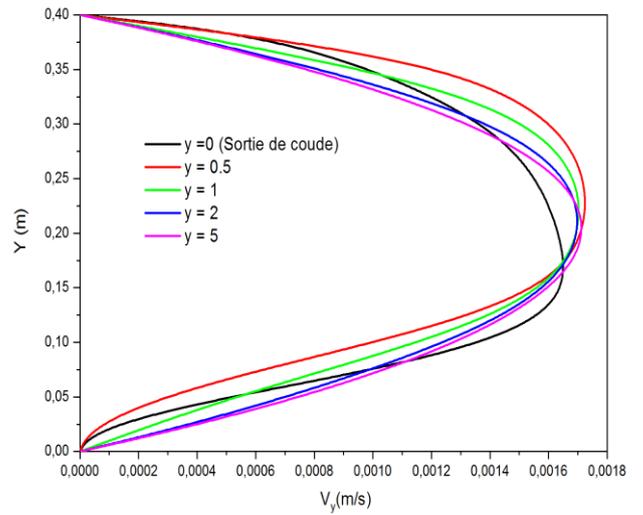
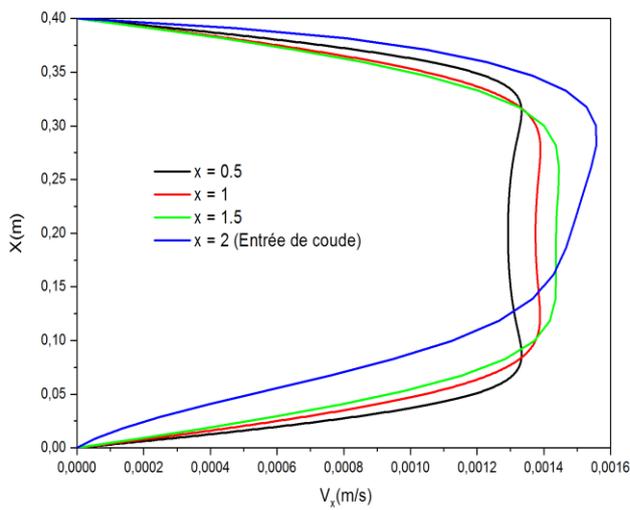


$\varphi = 0.05$

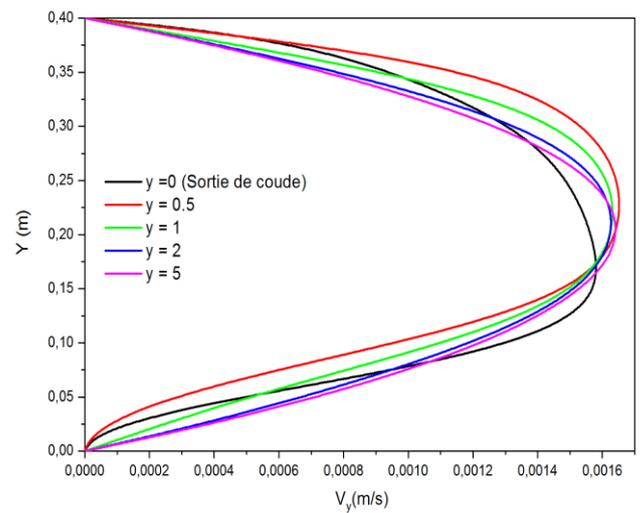
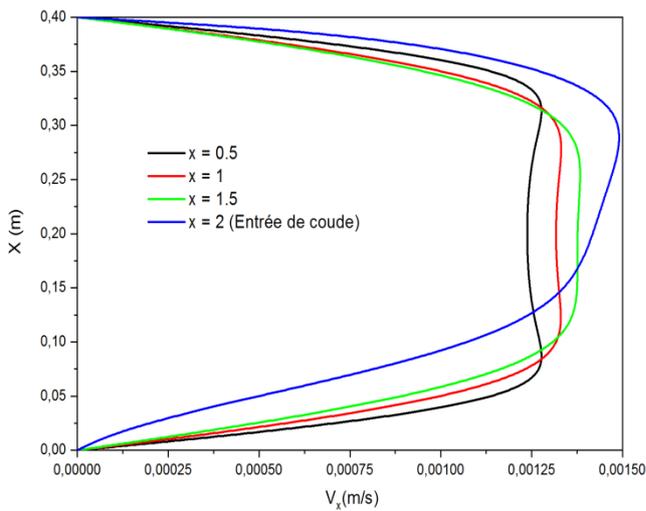
**Figure IV.5 :** Profil de vitesse en fonction de la position horizontale ( $x$ ) et la position verticale pour le nanofluid Cu+eau et pour  $D=0.3m$ .



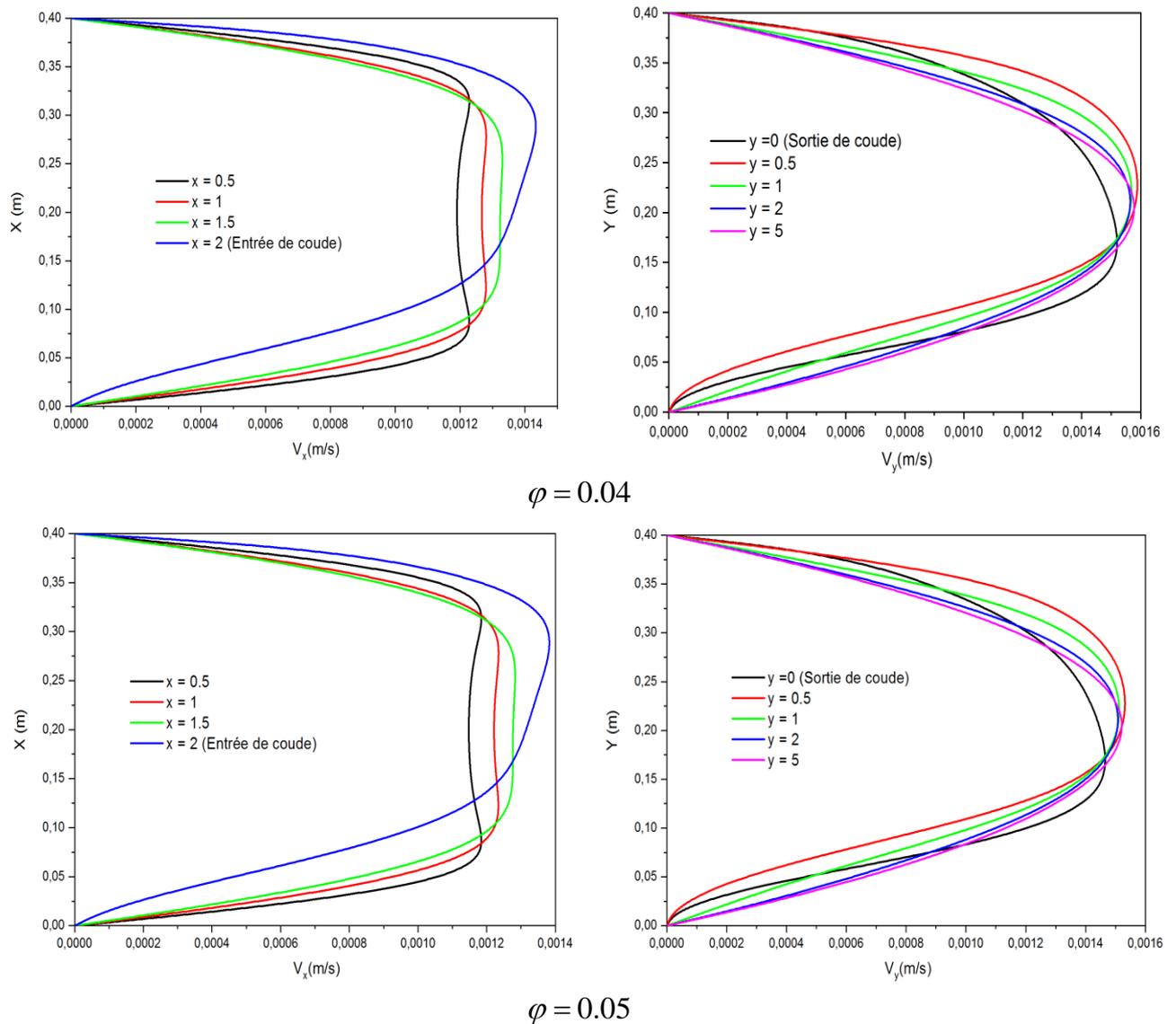
$\varphi = 0.01$



$\varphi = 0.02$



$\varphi = 0.03$



**Figure IV.6 :** Profile de vitesse en fonction de la position horizontale ( $x$ ) et la position verticale pour le nanofluide Cu+eau et pour  $D=0.4$

La figure IV.7 représente l'allure du profil de la vitesse pour les différentes valeurs de la fraction, les différents angles ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ) et un diamètre  $D=0.2$ .

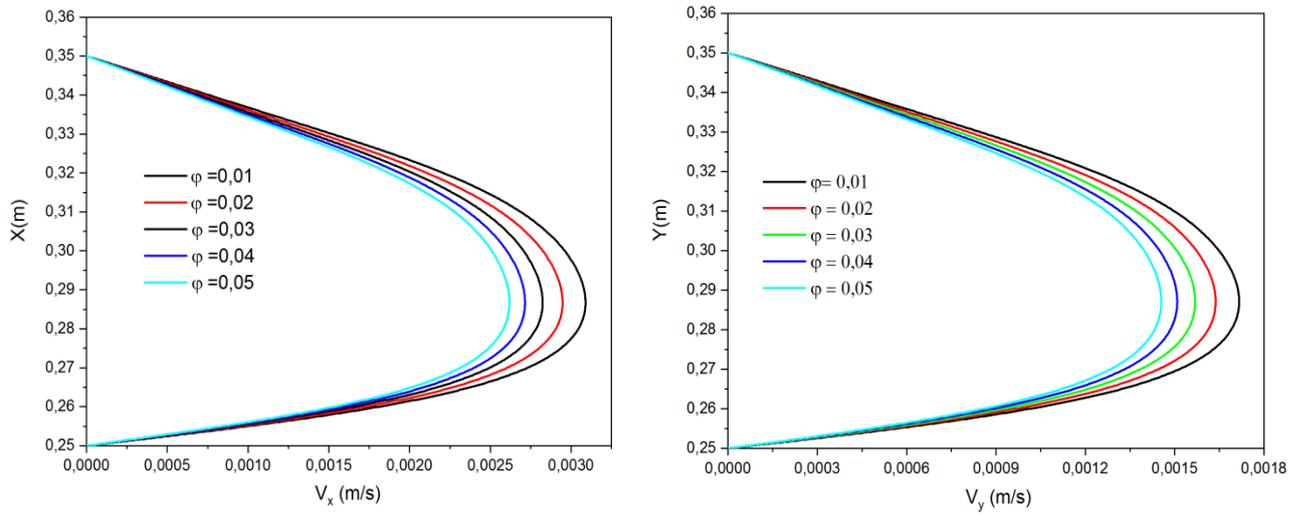
On remarque que le profil de vitesse est parabolique mais non symétrique par rapport à l'axe de coude et qu'il est décalé vers l'extérieur du coude. Nous pensons que ceci est dû aux forces centrifuges.

La vitesse maximale diminue avec l'augmentation de la fraction volumique, elle est de  $v_{\max} = 31\text{m/s}$  à  $0,07\text{m}$  de la paroi externe du coude.

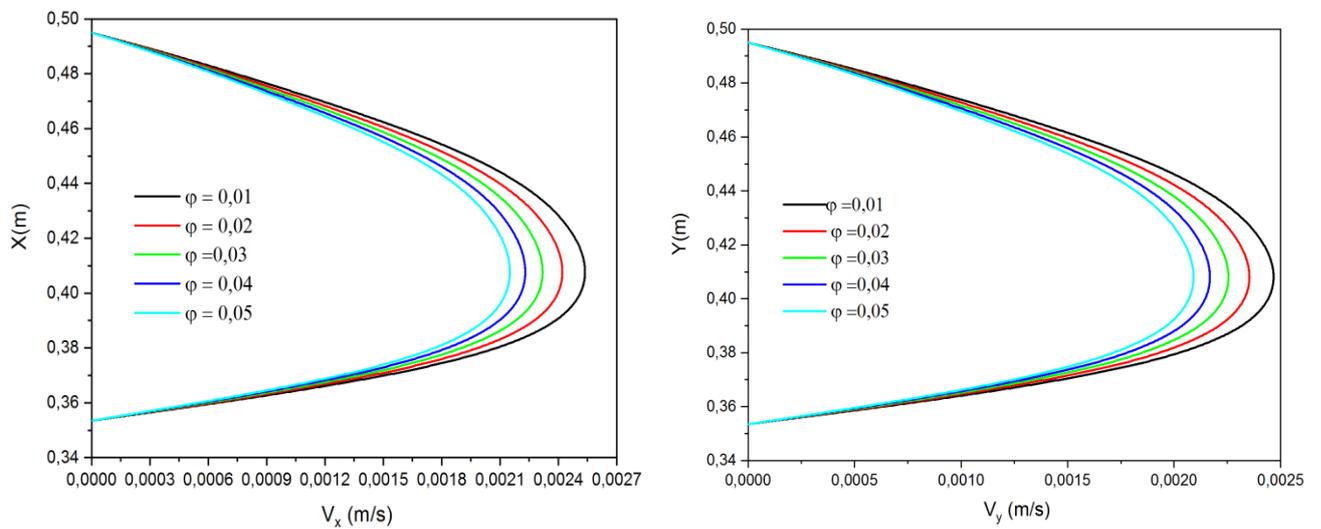
Pour les angles  $45^\circ$  et  $60^\circ$ , le profil des vitesses est similaire à celui de  $30^\circ$ , et position de la vitesse maximale tend vers l'axe de symétrie du coude.

Pour un même débit et un même diamètre, la vitesse maximale augmente avec l'angle  $\theta$ .

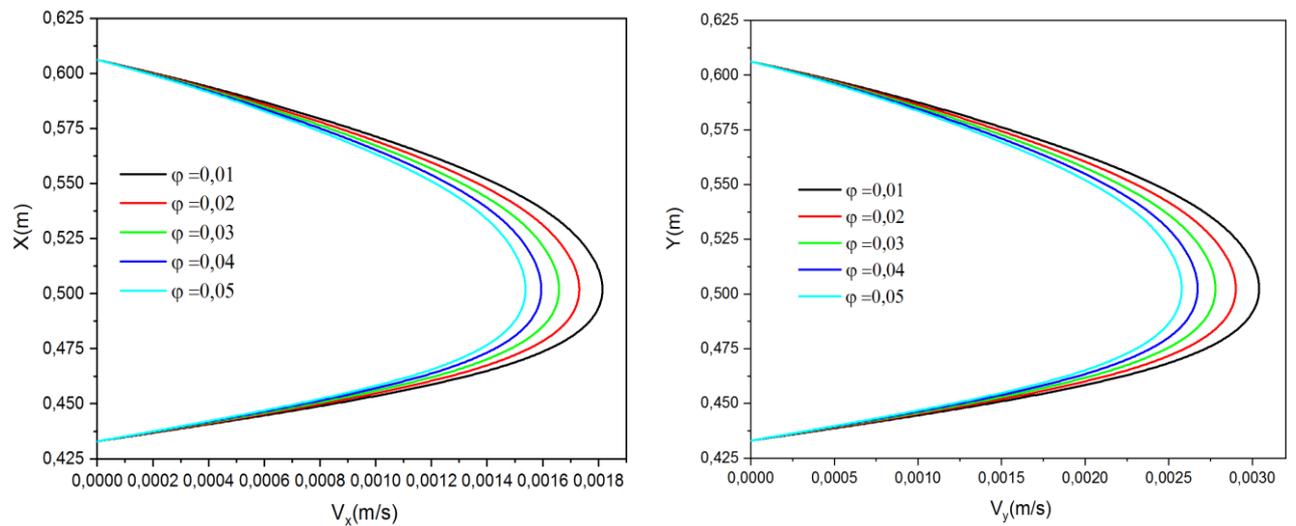
Pour les profils de la composante verticale de la vitesse, on peut faire les mêmes remarques que celles de la composante horizontale.



Position 30° au coude

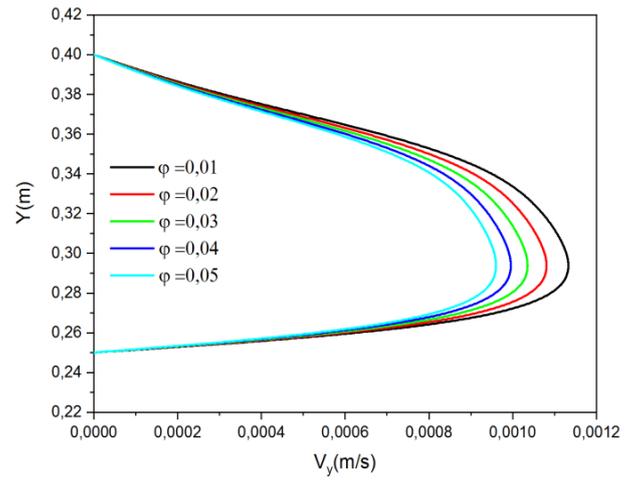
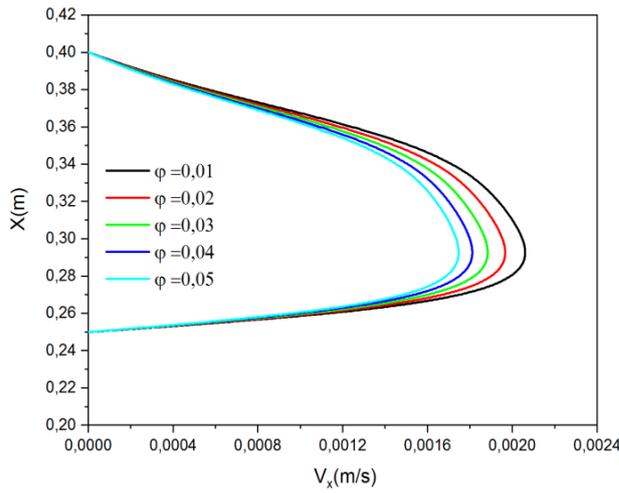


Position 45° au coude

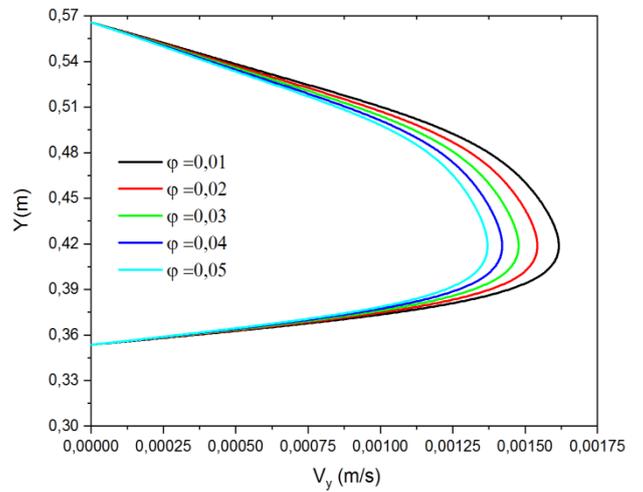
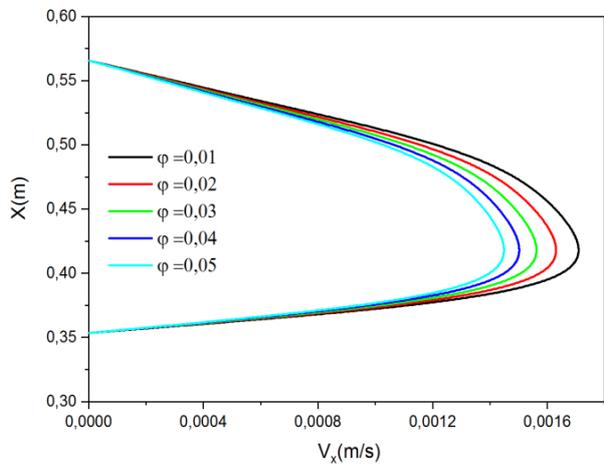


Position 60° au coude

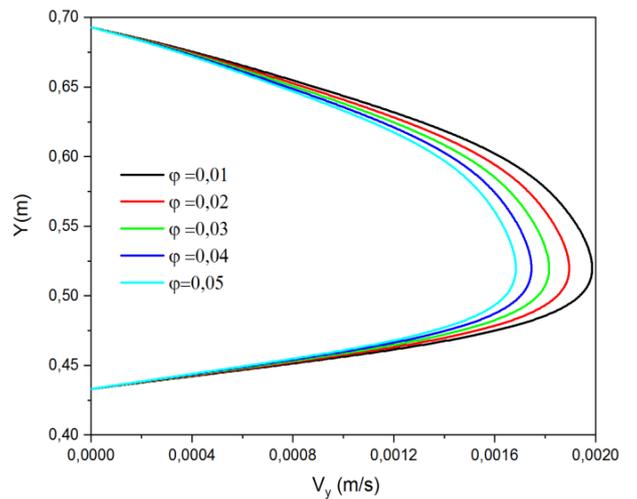
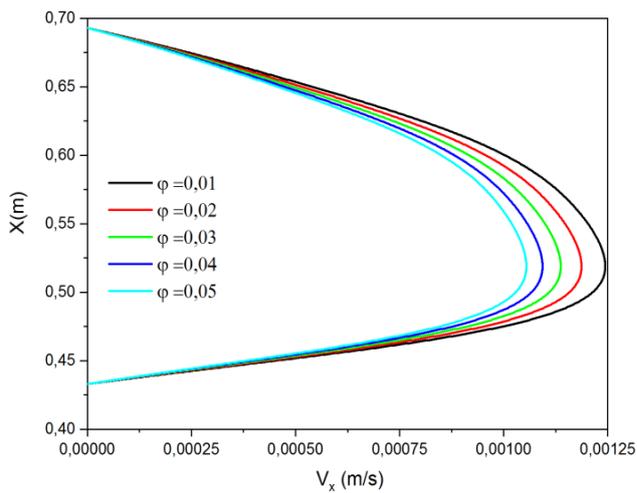
**Figure IV.7 :** Profil de la composante horizontale et verticale de la vitesse pour ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), différentes fractions volumique et  $D=0.2$  m



Position  $30^\circ$  au coude

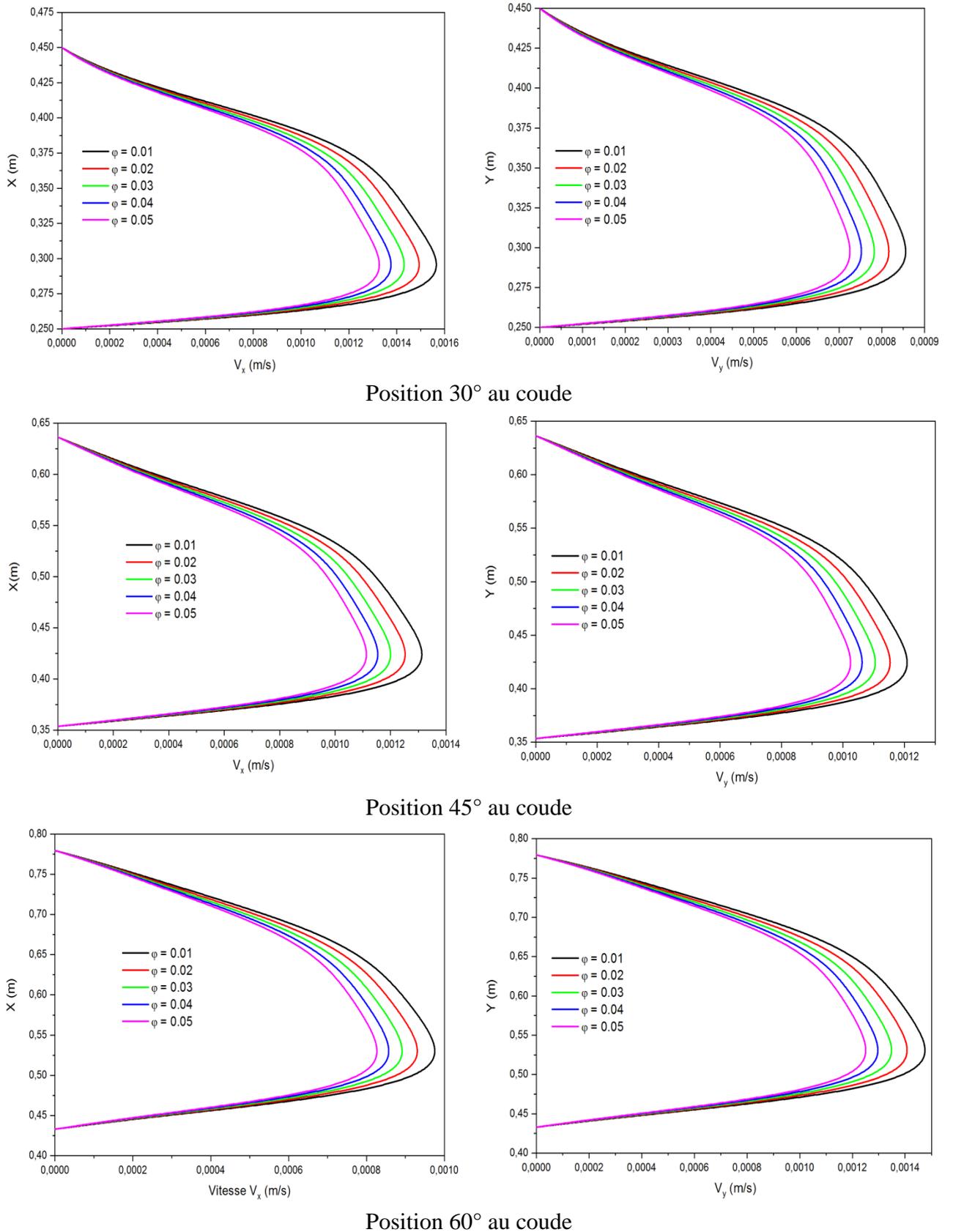


Position  $45^\circ$  au coude



Position  $60^\circ$  au coude

**Figure IV.8:** Profile de la composante horizontale et verticale de la vitesse pour ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), différentes fractions volumique et  $D=0.3$  m



**Figure IV.9:** Profile de la composante horizontale et verticale de la vitesse pour ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), différentes fractions volumique et  $D=0.4$  m

### IV.5.2 Variation des contours de température

La figure IV.10 représente la variance du température en fonction de la fraction volumique des nanoparticules. On observe l'élévation de température à la limite du coude

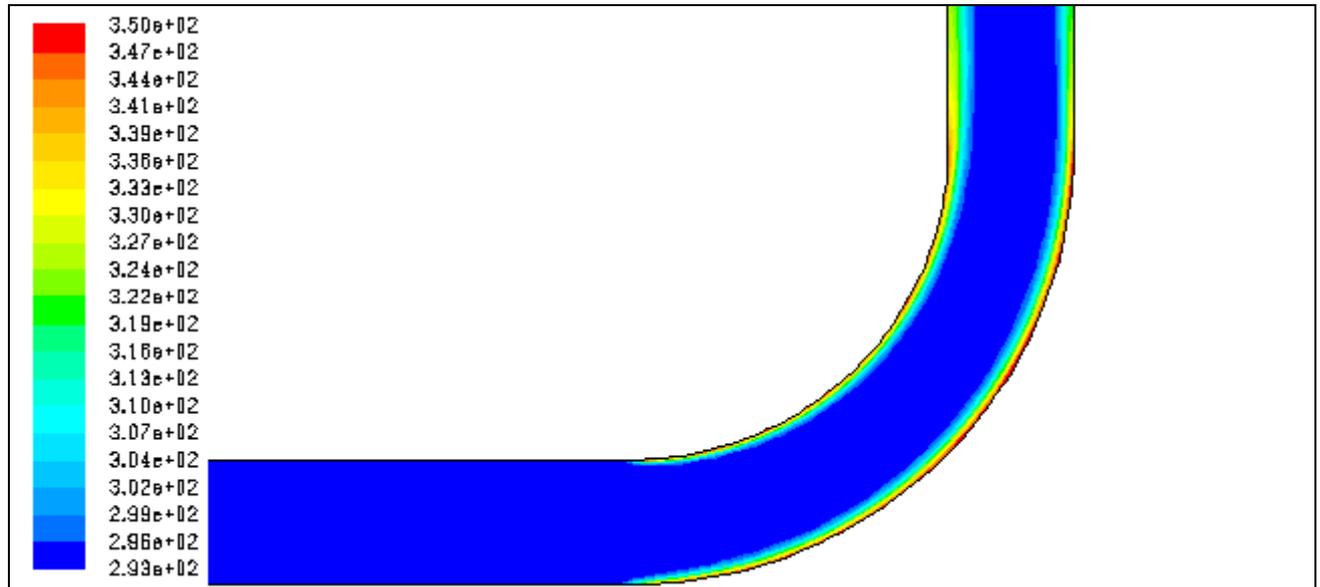


Figure IV.10 la variance du température a diamètre D=0.2 m.

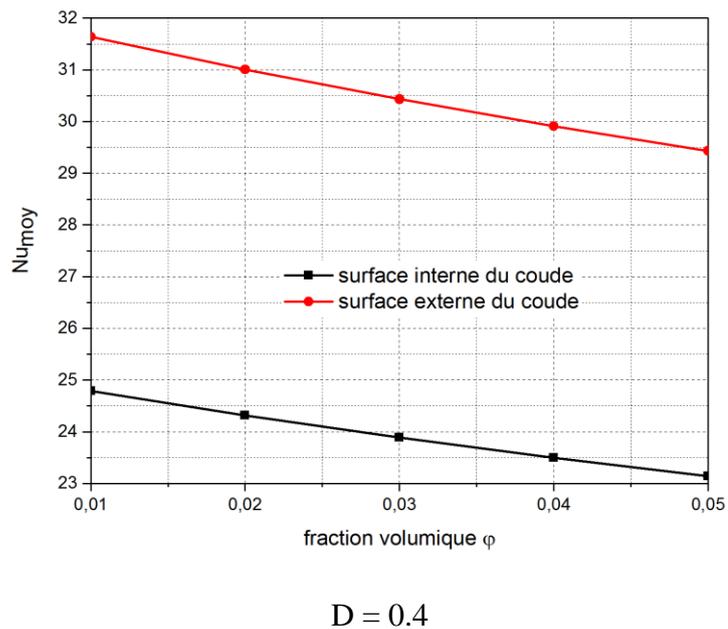
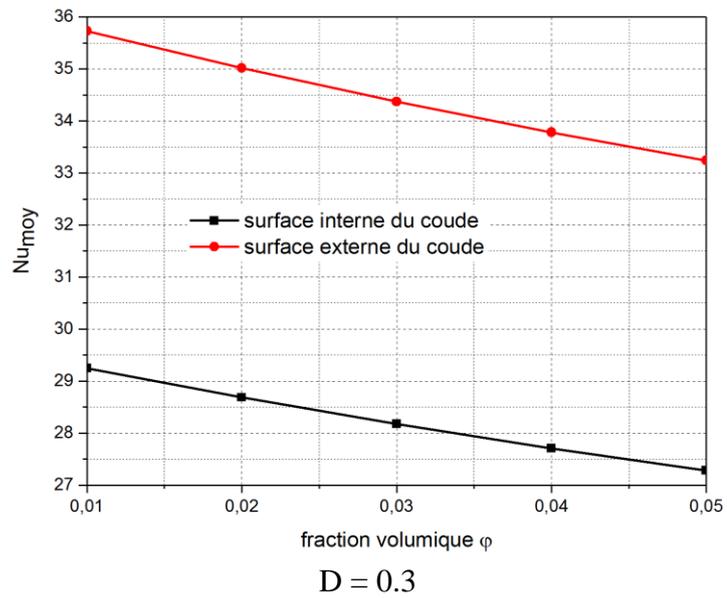
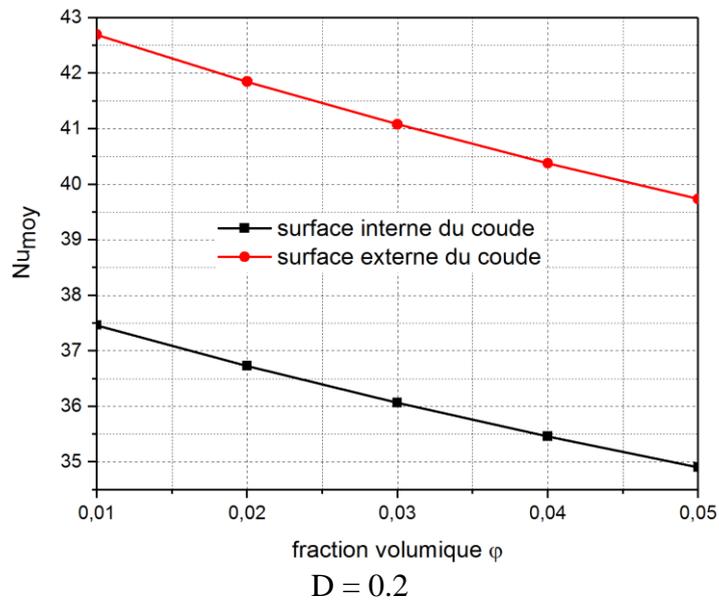
### IV.5.3 Variation du nombre de Nusselt

La figure IV.11 représente la variance du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique des nanoparticules. On observe que le nombre de Nusselt moyen près de la paroi externe du coude est supérieur à celui qui est près la paroi interne. Ce nombre de Nusselt diminue aussi avec l'augmentation de la fraction volumique.

Comme le montre le tableau (IV.4), on remarque que le nombre de Nusselt augmente avec la diminution du diamètre du coude. Ce résultat est logique car, pour un même, la diminution du diamètre du coude entraîne l'augmentation de la vitesse d'écoulement et donc l'augmentation du nombre de Reynolds. Cette explication est en parfaite accord avec les résultats de la figure VI.11.

$\phi$	Nu moy D = 0.2		Nu moy D = 0.3		Nu moy D = 0.4	
	Surface interne de coude	Surface externe de coude	Surface externe de coude	Surface interne de coude	Surface externe de coude	Surface interne de coude
0,01	37,46151	42,69409	29,2505	35,73017	24,79258	31,6366
0,02	36,72823	41,84693	28,68456	35,01792	24,31882	31,00597
0,03	36,06374	41,07923	28,17183	34,37248	23,88961	30,43417
0,04	35,45778	40,37903	27,70433	33,78383	23,49833	29,91249
0,05	34,90219	39,73704	27,27567	33,24396	23,13959	29,43386

Tableaux IV.4: le nombre de Nusslet moyen

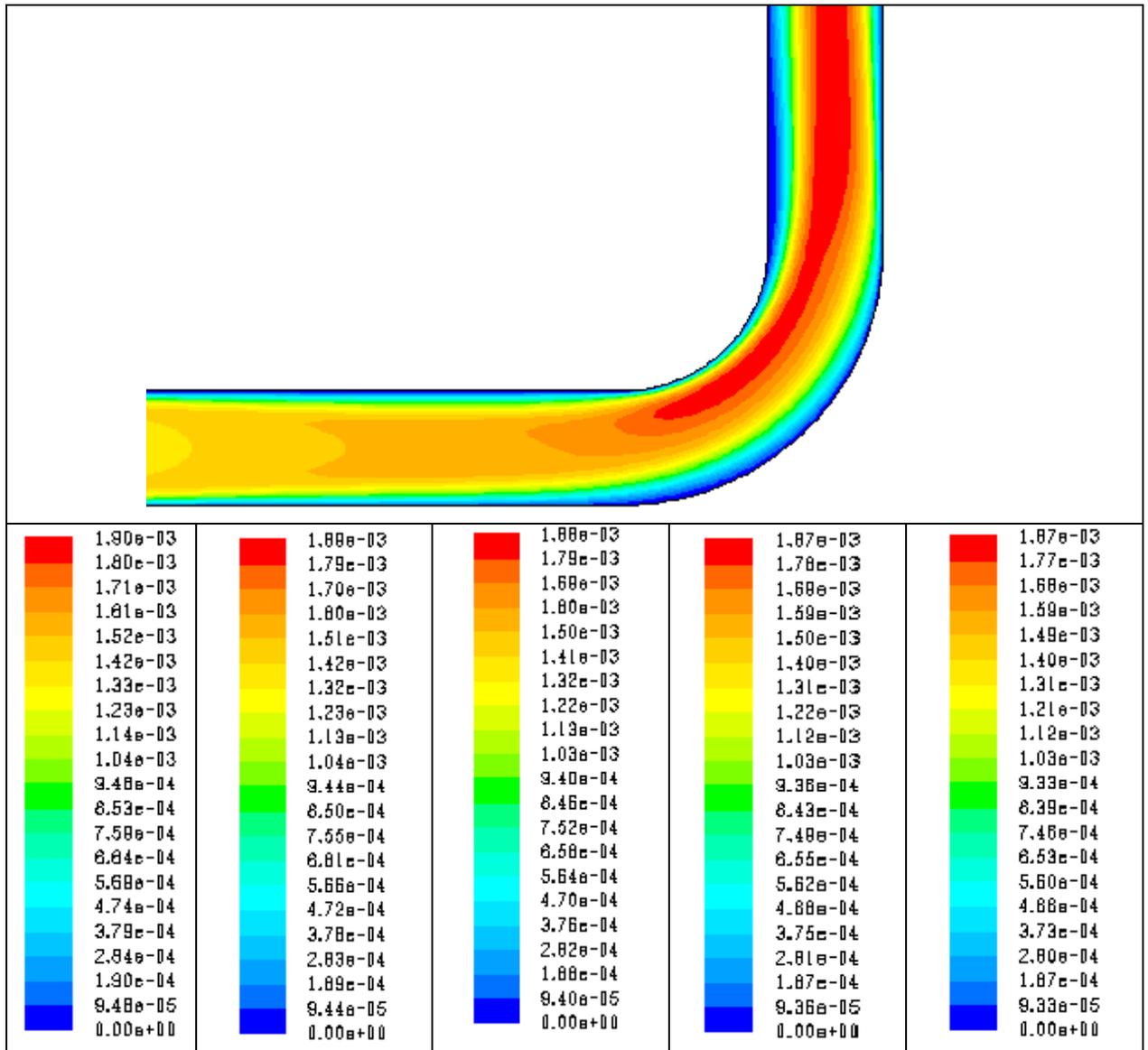


**Figure IV.11** : Variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique pour le nanofluide Cu + eau ; pour D=0.2 m ; D=0.3 m et D=0.4 m

**IV.5.4 Variation des contours et des profils des vitesses (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) :**

Les figures **IV.12** présentent la variation de profil de vitesse (lignes de courant) dans le canal pour les différentes valeurs de la fraction volumique de nanoparticule Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Dans la figure (**IV.12**) nous constatons que plus on se rapproche de l'entrée de coude (x=2m), plus la vitesse augmente, au milieu coude la vitesse est maximale  $V_{MAX} = 1.9 * 10^{-3} m / s$  elle est faible sur les bords d'un coude .



**Figure IV.12 :** la variation de profil de vitesse (lignes de courant) dans le canal pour les différences valeurs fractions volumique de nanoparticule Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

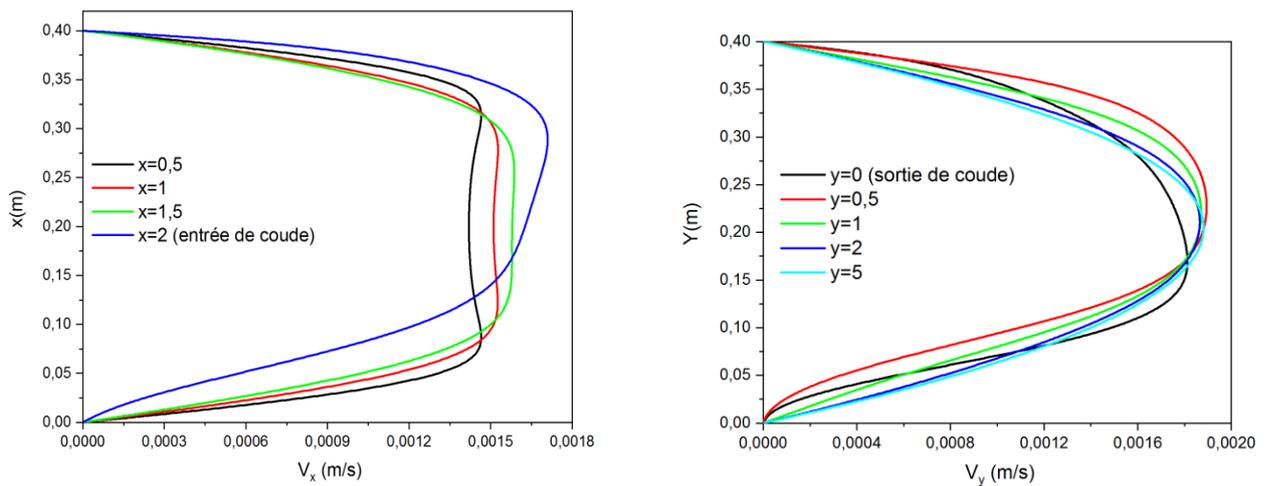
La figure **IV.13** représente l'allure des profils de la vitesse axiale  $v_x$  et verticale  $v_y$  pour les différentes valeurs de la fraction volumique utilisées.

Pour la vitesse axiale, on remarque le profil des vitesses passe de celui du régime turbulent à  $x=0,5$  ;  $x=1$  ;  $x=1,5$  à celui du régime laminaire à l'entrée du coude ( $x=2$ ) où le profil des vitesses est parabolique.

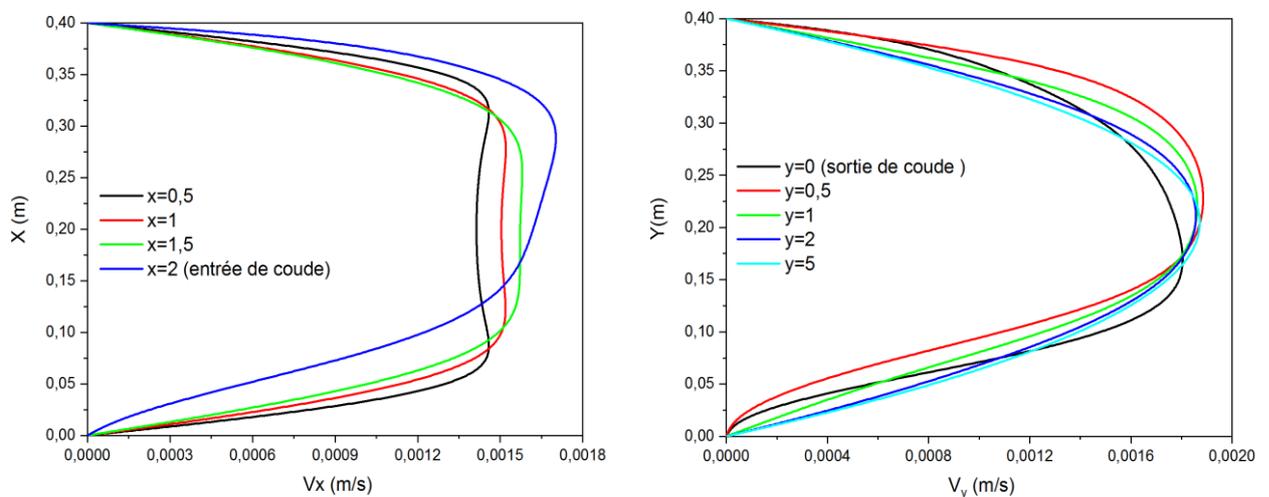
Pour les cinq valeurs de la fraction volumique utilisées, les profils de vitesse ont la même allure. Cependant, la valeur de composante verticale de la vitesse diminue avec l'augmentation de la fraction volumique.

Pour la composante verticale  $v_y$  de la vitesse, les profils sont identiques pour les différentes fractions volumiques utilisées. L'allure du profil de vitesse est parabolique, ce qui montre que le régime d'écoulement pour la composante verticale est toujours laminaire.

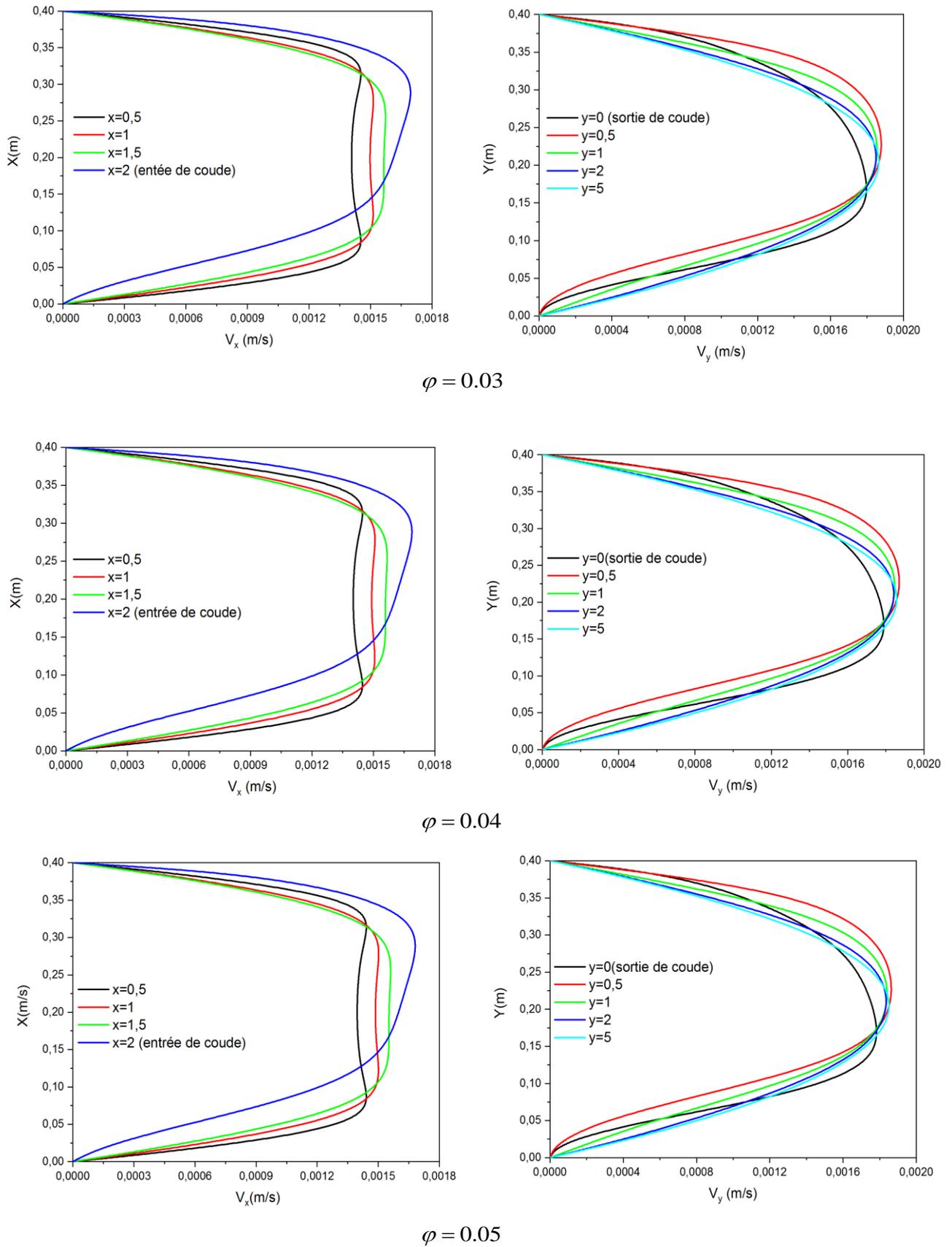
La composante verticale de la vitesse est donc constante quelle que soit la position prise verticalement sur le coude ( $y=0.5$  ;  $y=1$  ;  $y=2$  ;  $y=5$  ).



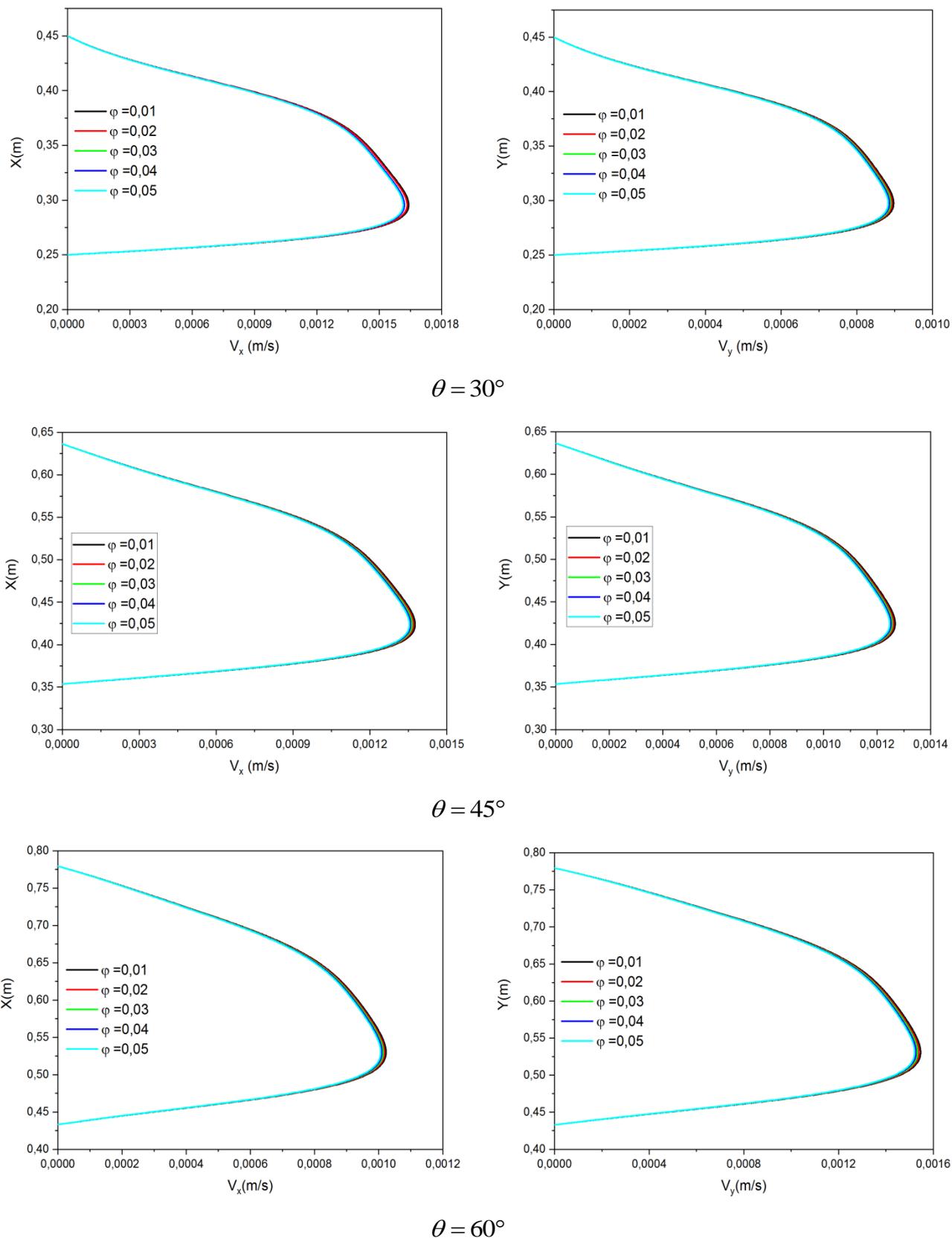
$\phi = 0.01$



$\phi = 0.02$



**Figure IV.13 :** Profile de vitesse en fonction de la position horizontale (x) et la position verticale pour le nanofluide  $AL_2O_3$ +eau et pour  $D=0.4$

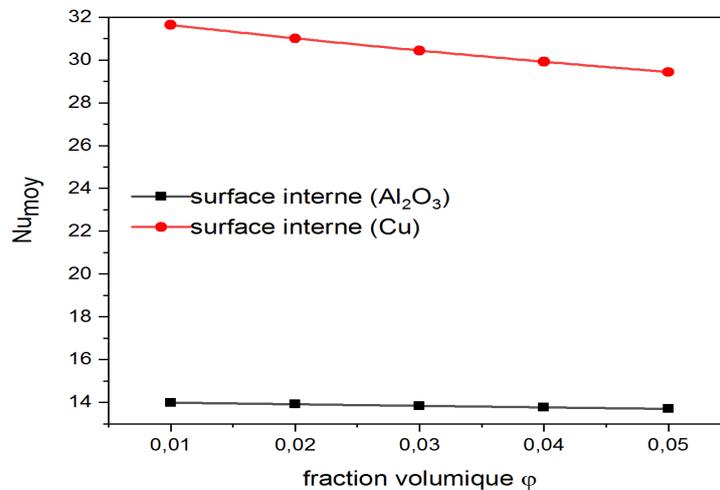


**Figure IV.14 :** Profile de la composante horizontale et verticale de la vitesse pour ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), différentes fractions volumique et  $D=0.4$  m

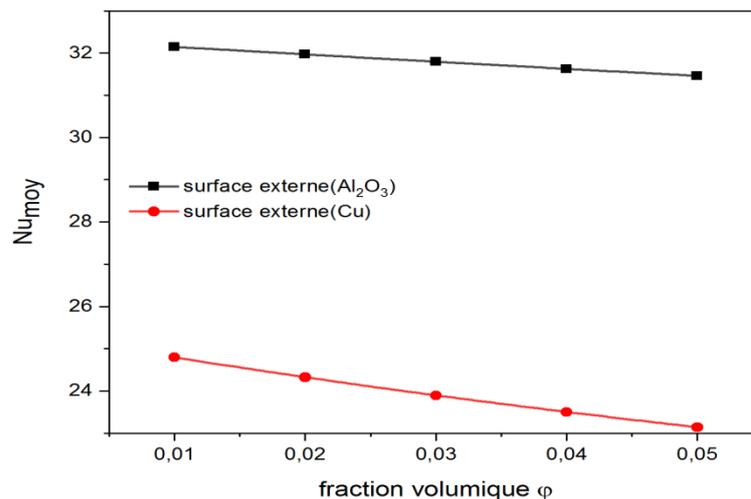
#### IV.5.5 Variation du nombre de Nusselt ( $Al_2O_3$ ) et (Cu)

La figure IV.15 représente une comparaison entre le nombre de Nusselt obtenu pour (Cu+eau) et ( $Al_2O_3$ +eau) en fonction de la fraction volumique des nano particules. On remarque que (IV.15.a) pour la surface interne, le nombre de Nusselt moyen obtenue avec (Cu + eau) est supérieur à celui obtenu pour( $Al_2O_3$ + eau). On remarque que c'est l'effet inverse qui se produit dans le cas de la paroi externe (IV.15.b), en effet le nombre de Nusselt moyen obtenue avec (Cu + eau) est inférieur à celui obtenu pour ( $Al_2O_3$ + eau).

On remarque aussi que le nombre de nombre de Nusselt moyen diminue avec l'augmentation de la fraction volumique.



a ) surface interne



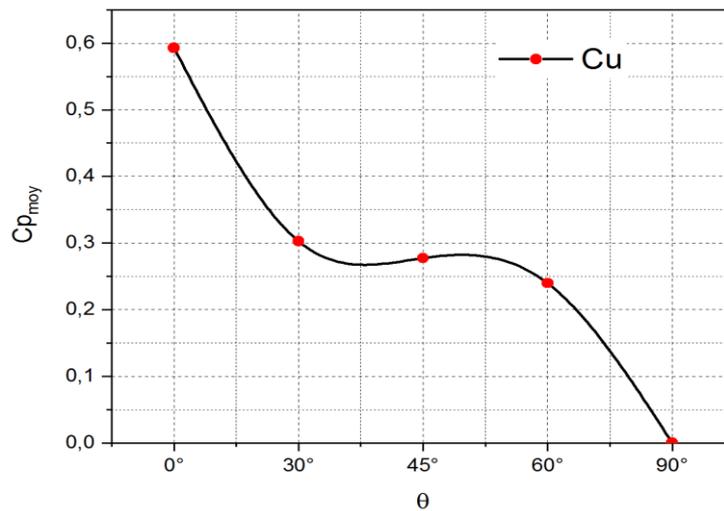
b ) surface externe

**Figure IV.15 :** Variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique pour le nanofluide( Cu + eau) et ( $Al_2O_3$  +eau) ; pour  $D=0.4$  m

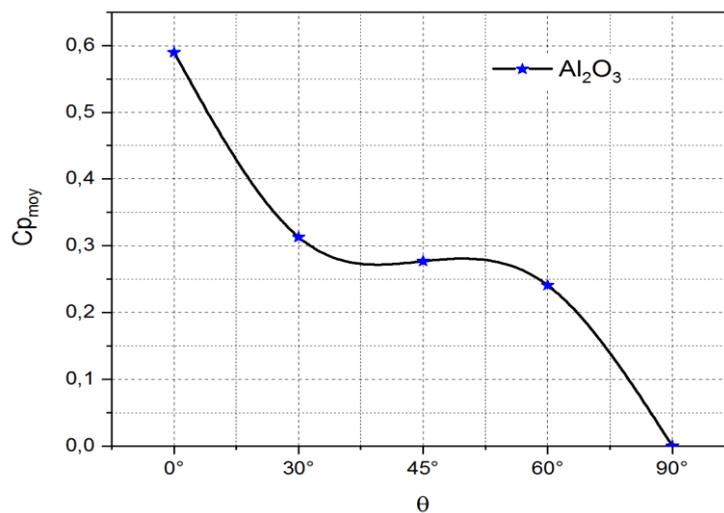
#### IV.5.6 Coefficient de pression :

La figure IV.16 représente la variation du coefficient de pression moyenne en fonction de l'angle de courbure ( $\theta$ ) du coude pour la fraction volumique ( $\varphi = 0.01$ ) de nanoparticule (Cu+eau) et ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ +eau), et un diamètre du coude  $D=0.4$ .

On remarque, le coefficient de pression moyenne diminue avec l'augmentation de l'angle de courbure du coude, et qu'il soit nul pour  $\theta = 90^\circ$ .



a) la coefficient de pression moyenne (Cu)



b) la coefficient de pression moyenne ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

**Figure IV.16 :** Profile de la Coefficient de pression pour( $\theta$ ), de nanoparticule (Cu+eau) et( $\text{Al}_2\text{O}_3$ +eau),  $D=0.4$  m.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons présenté une étude numérique d'un écoulement en régime laminaire des nanofluides dans un coude arrondi. Pour les nanofluides utilisés dans cette étude, nous avons considéré deux types nanoparticules le cuivre (Cu), et l'Oxyde d'aluminium( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dans un fluide de base qui dans ce cas est de l'eau.

Les équations qui régissent l'écoulement sont les équations de continuité, de quantité du mouvement, et l'équation d'énergie sont présentée sain si que la méthode des volumes finis qui est utilisée pour la discrétisation des équations, cette méthode est adopté par le code de calcul Fluent.

Après la conception de la géométrie en utilisant le logiciel Gambit, on a lancé les simulations numériques en régime stationnaire à l'aide du code commercialisé Fluent 6.3.26. Les résultats de la simulation sont présentés pour de nombre de Reynolds égal à 500 et pour des fractions volumiques  $\varphi = 1\%$ ,  $2\%$ ,  $3\%$ ,  $4\%$ ,  $5\%$  et des diamètre  $d=0.2\text{m}$ ,  $0.3\text{m}$ ,  $0.4\text{m}$ .

L'effet de certains paramètres tels que, le type des nanoparticules et la fraction volumique en nanoparticules, sur la vitesse et le transfert de thermique a été étudié.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules ( $\varphi$ ) décélère l'écoulement et favorise le transfert thermique entre le fluide et la paroi chaude du coude.
- Une comparaison du nombre de Nusselt pour les deux nanofluides étudiés a montré que l'eau+Cu favorise l'augmentation de nombre de Nusselt plus que eau+ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- Le transfert de chaleur en présence des nanoparticules de Cu est amélioré comparativement aux résultats obtenus avec des nanoparticules de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Comme perspectives, il serait intéressant de considérer un régime d'écoulement.

## Références bibliographies

- [1] Sarit K. Das, Stephen U.S. Choi, Wenhua Yu. *Nanofluids Science and Technology*. WILEY 2007.
- [2] E.E. (Stathis) Michaelides, *Nanofluidics: Thermodynamic and Transport Properties*, Springer International Publishing Switzerland. 2014.
- [3] Stéphane FOHANNON, Guillaume POLIDORI, Catalin POPA. *Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle* (journée thématique : SFT-Paris 2012). Université de Reims Champagne-Ardenne, France 2012.
- [4] Amin Behzadmehr, Hassan Azarkish An. *Introduction to the NanoFluid*: university of Sistan and Baluchestan, 2000.
- [5] LAMRI Zeggar Asma, *Contribution à l'Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nanofluide. Application aux Modèles Monophasique et Diphasique*, Thèse de Magister, Université de Frères Mentouri, 2014.
- [6] R.L. Hamilton and O.K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(3), pp.187-191, (1962).
- [7] B.C. Pak and Y.I. Choi. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151–170, (1998).
- [8] A. Einstein. *Investigations on the Theory of the Brownian movement*. Dover Publications, New York, (1956).
- [9] H.C. Brinkman. The viscosity of concentrated suspensions and solution. *J. Chem. Phys.*, 20, pp.571–581, (1952).
- [10] 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 tunes 2013.
- [11] KHENTOUL MOUSSA, *étude numérique de la convection mixte dans un canal horizontal contenant des ailettes*, thèse de doctorat 3èmcycle (LMD) en génie mécanique, option : génie thermique et énergétique, université de Constantine 2016.
- [12] K. Khanafer, K. Vafai, and M. Lightstone. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, pp.3639-3653,(2003).
- [13] N. Putra, W. Roetzel, and S. DAS. Natural convection of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(8-9), pp.775-784,(2003).
- [14] G. Roy, C.T. Nguyen, and P.R. Lajoie. Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids. *Superlattices and Microstructures*, 35, pp .497-511, (2004).

- [15] D. Wen and Y. Ding. Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26, pp .855-864,(2005).
- [16]J. Kim, Y.T. Kang, and C.K. Choi. Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids.*Physics of Fluids*, 16(7), pp.2395-2401,(2004).
- [17] B.X. Wang, L.P. Zhou, and X.F. Peng, A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14), pp.2665-2672,(2003).
- [18]J. Rong and T. Sheng-Chung. Numerical research of nature convective heat transfer Benhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, pp.727–736,(2006).
- [19]R.K. Tiwari and M.K. Das. Heat Transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, pp.2002-2018,(2007).
- [20]K.S. Hwang, J.H. lee, and S.P. Jang. Buoyancy-driven heat transfer of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in a rectangular cavity.*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, pp.4003-4010,(2007).
- [21]C.J. Ho, M.W. Chen, and Z.W. Li. Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. *Int. J. of heat and Mass Transfer*, 51, pp. 4506-4516,(2008).
- [23]B.C. Pak and Y.I. Choi. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles .*Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151–170, (1998).
- [24]Y. Xuan and Q. Li. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat fluid flow*, 21(1), pp.58–64,(2000)
- [25]Q. Li. and Y. Xuan. Convective heat transfer performances of fluids with nanoparticles .*Proc of twelfth International Heat Transfer*, pp.483-488,(2002).
- [26]A. Mekhnache, R. Cedrati ; Les échangeurs de chaleur ; séminaire ; centre des techniques appliquées de SKIKDA ; 2006 ; 86p.
- [27]H. Yamina ; Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur, mémoire de magister-univ-Boumerdas ; 2007 ; 119p.

## Résumé

Dans ce travail, on a étudié l'effet de la dimension d'un coude arrondi sur l'amélioration du transfert thermique qu'on a appliqué aux nanofluides. On a également étudié l'influence de l'augmentation de la fraction volumique  $\phi$ , du diamètre et de la nature de nanoparticules (Cu,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sur l'amélioration du transfert thermique et l'effet la vitesse maximale diminue avec l'augmentation du diamètre de la conduite. La conception de la géométrie a été faite en utilisant le logiciel Gambit, et les simulations numériques ont été faites en régime stationnaire à l'aide du code commercialisé Fluent 6.3.26. Les résultats montrent que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules ( $\phi$ ) et le nanofluide l'eau+Cu favorise le transfert thermique entre le fluide et la paroi chaude du coude.

**Mots clés:** Nanofluide; nanoparticule, fraction volumique, coude arrondi.

## Summary

In this work, we investigated the effect of the size of a rounded elbow on the improvement of heat transfer applied to nanofluids. We also studied the influence of the increase in the volume fraction  $\phi$ , the diameter and the nature of nanoparticles (Cu,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) on the improvement of heat transfer. The geometry design was done using Gambit software, and the numerical simulations were done in a steady state using the commercial code Fluent 6.3.26. The results show that the increase in the volume fraction of the nanoparticles ( $\phi$ ) and the water + Cu nanofluid promotes heat transfer between the fluid and the hot wall of the elbow.

**Keywords:** Nanofluid; Nanoparticule, volume fraction, rounded elbow.