

République algérienne Démocratique et Populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Option: Energétique

Modélisation et simulation du transport de nanoparticules dans un écoulement de fluide dans une conduite

Réalisé par:

M^{elle} CHAIB LILIA

M^{elle} CHEKINI Katia

Encadré par:

M. ZOUAOUI Salah

Promotion 2014/2015

Remerciement

Louange à ALLAH, que le salut et la bénédiction soient sur son prophète.

On tient d'abord à exprimer toute notre gratitude à nos promoteurs M. ZOUAOUI SALAH pour sa disponibilité, sa gentillesse et surtout pour la confiance qu'il a fait en nous pour donner le meilleur de nous même.

On souhaite témoigner toute notre reconnaissance aux enseignant ayant contribué et participé à notre formation.

Nous présentons nos respects et nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

A mes très chers parents auxquels je dois beaucoup.

A mes sœurs et mon frère

A toute ma famille

A mon mari et toute ma belle famille

A tous mes amis

Je dédie ce travail

LILIA

Dédicace

A mes très chers parents auxquels je dois beaucoup.

A mes sœurs et mon frère

A toute ma famille

A tous mes amis

Je dédie ce travail

KATIA

Résumé:

Au cours de ces dernières années les suspensions de nanoparticules dans les liquides, ont été développées et étudiées. Pour déterminer les propriétés physiques de ce type de fluide, une grande variété de nanofluides ont été réalisés et leurs propriétés ont été évaluées. Pour étudier les propriétés thermodynamiques de nanofluides, en particulier les mesures de leur conductivité thermique efficace et la viscosité, de nombreux travaux expérimentaux ont été réalisés. Avoir un transfert de chaleur efficace pour des systèmes d'ingénierie notamment les échangeurs de chaleur et au même temps réduire la sédimentation, l'encrassement et les problèmes d'érosion qui sont générés par des mélanges solides-liquide avec des particules plus grosses, est préoccupation actuelle de nombreux scientifiques et entreprises.

Dans ce projet de fin d'études on s'intéresse à des simulations numériques des écoulements diphasique (Fluide/nanoparticules) seront réalisés en utilisant la méthode des volumes finis. Pour étudier la nature de la phase fluide ainsi que cinématique et dynamique de nanoparticules, en écoulement laminaire et turbulent on utilise l'approche Eulérienne-Lagrangienne. Les effets de la taille et la fraction volumique des nanoparticules sur l'écoulement laminaire et turbulent seront étudiés.

Nomenclature

Symboles	Désignation	Unité
C	Fraction massique	Nombre Sans dimension(%)
C_C	Facteur de trainée de Stokes	Nombre Sans dimension
C_D	Coefficient de trainée	Nombre Sans dimension
C_μ	Constante	Nombre Sans dimension
D	Diamètre de la conduite	nm
D_p	Diamètre des particules	m
d	masse volumique du fluide	Kg/m ³
d_p	masse volumique de la particule	Kg/m ³
F	Vecteur de force	Sans dimension
F_x	L'accélération supplémentaire	m/s ²
I	Intensité de turbulence	
II	Matrice d'identité	Sans dimension
K	Energie cinétique moyenne	Kg.m ² /s ²
K_b	Constante de Boltzmann	J/K
K_f	Conductivité thermique du nanofluide	Watt/m.K
K_{nf}	Conductivité thermique du fluide de base	Watt/m.K
k	Energie cinétique instantané	Kg.m ² /s ²
l	Longueur d'écoulement typique	m

L_e	Echelle de largeur de foucault	m
m_p	Masse de nanoparticules	Kg
m_T	Masse totale du nanofluide	Kg
n	Facteur de forme empirique	Sans dimension
n	Indice des cellules voisines	Sans dimension
n_i	Composante de la vitesse	m/s
N	Nombre nominal total	Nombre sans dimension
p_f	Pression entre deux surfaces adjacentes	Pa
R_{ij}	Tenseur des contraintes de Reynolds	Sans dimension
s	Surface de la sphère ayant le même volume que les particules	m^2
S	Surface actuelle de la particule	m^2
T	Le temps d'intégration	s
T_L	Intégrale de temps du lagrangien	s
ΔT	La durée utilisée dans la simulation	s
U	Vitesse moyenne	m/s
U'	Vitesse de fluctuation	m/s
u_p	Vitesse de la particule	m/s
u_T	Facteur de vitesse de cisaillement	Sans dimension
$u'_i u'_j T$	Coefficient de diffusion des particules	Sans dimension
V	Vitesse de l'écoulement	m/s
V_n	Vitesse normale du coefficient de restitution	m/s

V_s	Volume des particules solides	m^3
V_t	Vitesse tangentielle du coefficient de restitution	m/s
V_T	Volume totale (fluide +nanoparticules)	m^3
V	Vitesse de turbulence	m/s
y	Distance du point considéré par rapport à la paroi	m
f	Masse volumique du fluide de base	kg/m ³
nf	Masse volumique du nanofluide	kg/m ³
s	Masse volumique des nanoparticules	kg/m ³

Les nombres adimensionnels

Nu_{nf} : Nombre de NUSELT pour le nanofluide.

Pr_{nf} : Nombre de PRANDETL pour le nanofluide.

Re_{nf} : Nombre de REYNOLDS pour un nanofluide.

Re_{sph} : Nombre de REYNOLDS calculée à partir du diamètre de la sphère ayant de même volume.

Re : Nombre de REYNOLDS.

Liste des figures

figure	désignation	page
Fig. (I.1)	Les nanoparticules d'argent	<u>3</u>
Fig. (I.2)	Les Nanoparticule de fer	<u>4</u>
Fig. (I.3)	Les nanotubes de carbone	<u>4</u>
Fig. (II.1)	Configuration d'un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique.	<u>21</u>
Fig. (III.1)	Echange Interphase de la masse, mouvement et de chaleur	<u>37</u>
Fig. (IV.1)	Géométrie de la conduite	<u>46</u>
Fig. (IV.2)	Maillage uniforme	<u>47</u>
Fig. (IV.3)	Vitesse à l'entrée dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase).	<u>48</u>
Fig. (IV.4)	Vitesse au milieu de la conduite ($x=0.4m$) dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)	<u>48</u>
Fig. (IV.5)	Vitesse à la sortie ($x=0.8$) dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)	<u>49</u>
Fig. (IV.6)	Champs de vitesse à l'entrée de la conduite dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)	<u>49</u>
Fig. (IV.7)	Champs de vitesse au milieu de la conduite dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)	<u>50</u>

Fig. (IV.8)	Champs des vitesses à la sortie dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase).	<u>50</u>
Fig. (IV.9)	Vitesse à l'entrée dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>51</u>
Fig. (IV.10)	Vitesse à la sortie dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>51</u>
Fig. (IV.11)	Champs des vitesses à l'entrée dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>52</u>
Fig. (IV.12)	Champs des vitesses au milieu dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>52</u>
Fig. (IV.13)	Champs des vitesses a la sortiedans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>53</u>
Fig. (IV.14)	Maillage non uniforme	<u>53</u>
Fig. (IV.15)	Vitesse à l'entrée dans l'écoulement laminaire avec deux phases	<u>55</u>
Fig. (IV.16)	Vitesse au milieu de la conduite (x=0.4m) dans l'écoulement laminaire avec nanoparticules	<u>55</u>
Fig. (IV.17)	Vitesse à la sortie dans l'écoulement laminaire avec nanoparticules	<u>56</u>
Fig. (IV.18)	Comparaison entre les vitesses a l'entrée dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>56</u>
Fig. (IV.19)	Comparaison entre les vitesses en x=0.2 dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>57</u>
Fig. (IV.20)	Comparaison entre les vitesses en x=0.4 dans le régime laminaire	<u>57</u>

	avec et sans nanoparticules	
Fig. (IV.21)	Comparaison entre les vitesses en $x=0.6$ dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>58</u>
Fig. (IV.22)	Comparaison entre les vitesses à la sortie dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>58</u>
Fig. (IV.23)	Agrandissement de l'interaction des courbes de comparaison entre les vitesses à la sortie dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>59</u>
Fig.(IV.24(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j))	Suivi des particules dans le régime laminaire	<u>59</u>
Fig.(IV.25(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l,m,n,o,p,q,r,s))	Suivi des particules dans le régime turbulent	<u>63</u>

Liste des tableaux

Tableau (IV.1) : propriétés de l'eau.

Tableau (IV.2) : propriétés de la paroi.

Tableau (IV.3) : caractéristiques du maillage non uniforme.

Tableau (IV.4) : Propriétés des nanoparticules (carbone).

INDICES

- α_1 : Constante des particules sphérique lisses
- α_2 : Constante des particules sphérique lisses
- α_3 : Constante des particules sphérique lisses
- n_r : Coefficient pour les cellules voisines
- β_p : Coefficient linéaire de n_i
- q : Charge des nanoparticules
- ρ_p : Rapport entre les densités matérielles
- λ : Parcours moyen libre de la particule
- ϵ : Le taux moyen de dissipation par unité de masse du fluide
- ϵ_s : Taux de dissipation spécifique
- μ : Viscosité dynamique

μ_T :	Viscosité de turbulence
τ :	Tenseur de déformation
τ_B :	Caractéristique de Foucault
δ_{ij} :	Symbole de Kronecker
φ :	Fraction volumique
ζ :	Nombre aléatoire répartie uniformément entre 0 et 1
ν :	Viscosité cinématique
\mathbf{u} :	Champs de vitesse instantanée
\bar{u} :	Composante moyenne
u' :	Composante de fluctuation

Tables des matières :

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités et revues bibliographiques sur les nano fluides

I. Introduction	2
II. Généralités sur les nano fluide	2
II.1. Définition des nanoparticules	2
II.2. Les nanofluides	4
II.2.1 Définition d'un nanofluide	4
II.2.2 Préparation des nanofluides.....	5
II.2.3. Nature du mélange obtenu	6
II.2.4. Domaines d'application des nano fluides	6
II.2.4.1. Refroidissement des systèmes électroniques	6
II.2.4.2. Refroidissement des systèmes thermiques	7
II.2.4.3. Refroidissement des systèmes spatiaux	7
II.2.4.4. Refroidissement des systèmes militaire	7
II.2.4.5. Refroidissement des systèmes nucléaires	7
II.2.4.6. La biomédecine	7
II.2.4.7. D'autres applications	8
III. Les différentes études effectuées sur les nanofluides	8
III.1. Les nanoparticules d'oxyde métallique.....	8
III. 1. 1. Les nanoparticules d'oxyde d'Aluminium	8
III. 1.1.1. Etudes expérimentales.....	9
III.1.1.2. Etudes numériques	10
III.1.2. Les nanoparticules d'oxyde de cuivre	10
III.1.3. les nanoparticules de dioxyde de Titane	12

II. Ecoulement de poiseuille	21
II.1.Définition	21
II.1.2 Écoulement de Poiseuille en régime laminaire	21
II.1.3 Ecoulement de poiseuille en régime turbulent	22
III. Equations régissant	22
III.1.Le nombre de Reynolds	22
III.2.Les équations de Navier-Stokes	22
III.3.Le débit massique	23
IV. La théorie de mouvement des particules	24
IV.1.Équilibre des forces de particules	24
IV.2.Inclusion du terme de la gravité	25
IV.3.Autres forces	25
V. Les lois pour le calcul des coefficients de glissement	26
VI. La Turbulence	27
VII. L'intensité de la turbulence	28
VIII. Mouvement brownien	29
IX. La force de portance de Saffman (Saffman lift force)	29
X.Le coefficient de restitution	30
IX. CONCLUSION	30

Chapitre III : modélisations du problème dans FLUENT

I. Introduction.....	31
----------------------	----

II. Modèle de phase discrète (Discret phase model)	31
II.1. Vue d'ensemble.....	32
II.1.1. L'approche Euler-Lagrange.....	32
II.1.2. L'approche Euler-Euler.....	32
II.1.2.1. Le model eulérien.....	33
II.1.2.1.1. Vue d'ensemble et limitations du model eulérien.....	33
II.1.2.2. Mixture model (Le modèle de mélange).....	34
II.1.2.3. the VOF model (volume of fluid).....	34
II.2. Limitation du modèle de la phase discrète.....	35
II.2.1. Limitations sur la fraction volumique de la particule.....	35
II.2.2. Limitations sur la modélisation de suspension de particules continues.....	35
II.2.3. Limitations sur l'utilisation du modèle de la phase discrète avec d'autres modèles de FLUENT.....	35
III. Couplage unidirectionnel et bidirectionnelle (one-way and two-way coupling).....	36
IV. Dispersion turbulente des particules.....	38
V. Suivi stochastique (StochasticTracking).....	38
VI. Le Temps intégral.....	39
VII. Modèle de marche aléatoire discrète (Discrete Random Walk Model).....	40
VIII. Modèles de turbulence.....	41
VIII.1 Le moyennage temporel des équations de Navier-Stokes pour toutes les échelles (RANS, <i>Reynolds averaged Navier-Stokes simulation</i>).....	41

VIII.1.1 Le modèle $k-\epsilon$	42
VIII.2 La simulation des grandes échelles (SGE, ou LES, <i>large eddy simulation</i>)....	44
VIII.3 La simulation directe (DNS, <i>direct numerical simulation</i>).....	44
IX. Les équations de quantité de mouvement	45
X. Conclusion.....	45

Chapitre IV : Résultats et discussions

I. Introduction.....	46
II. Présentation de la géométrie	46
III. Simulation en régime laminaire et turbulent en 2D avec fluent	46
III.1. Régime laminaire et turbulent avec une seule phase (Sans nanoparticules).....	46
III.1.1 Maillage de la géométrie	46
III.1.2.Les conditions aux limites	47
III.1.3.Propriétés des composants	47
III.1.4. Résultats de la simulation de l'écoulement de poiseuille en régime laminaire.....	48
III.1.4.1. Courbe de la vitesse à l'entrée	48
III.1.4.2 .Courbe de la vitesse au milieu de la conduite à $x=0.4m$	48
III.1.4.3.Courbe de la vitesse à la sortie $x=0.8m$	49
III.1.4.4. Champs de vitesse à l'entrée de la conduite	49
III.1.4.5. Champs de vitesse au milieu de la conduite	50
III.1.4.6. Champs des vitesses à la sortie	50

III.1.5.Résultats de la simulation de l'écoulement de poiseuille en régime turbulent	51
III.1.5.1.Courbe de la vitesse à l'entrée	51
III.1.5.2.Courbe de la vitesse à la sortie à $x=0.8m$	51
III.1.5.3.Champs des vitesses à l'entrée	52
III.1.5.4.Champs des vitesses au milieu à $x=0.4$	52
III.1.5.5.Champs des vitesses à la sortie	53
III.2. Régime laminaire et turbulent avec deux phases (injection des nanoparticules)	53
III.2.1. Maillage de la géométrie	53
III.2.2. Résultats de la simulation en régime laminaire avec deux phases	54
III.2.2.1.Configuration de la simulation	54
III.2.2.2.Conditions aux limites pour les particules dispersées dans le cas du régime laminaire	54
III.2.2.3.Courbe de la vitesse à l'entrée	55
III.2.2.4. Champs des vitesses au milieu à $x=0.4$	55
III.2.2.5.Courbe de la vitesse à la sortie : $x=0.8$	56
III.3. Comparaisons des résultats de simulation pour le régime laminaire avec et sans nanoparticules	56
III.3.1. Comparaison des résultats de la vitesse à l'entrée	56
III.3.2.Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.2$	57
III.3.4.Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.4$	57
III.3.5.Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.6$	58
III.3.6.Comparaison des résultats de la vitesse a la sortie	58

III.3.7.Agrandissement de la figure (sortie)	59
III.3.8. Les images suivantes représentent le suivi des particules en régime Laminaire	59
IV. Résultats de la simulation pour le régime turbulent avec nanoparticules	62
IV.1. Configuration de la simulation.....	62
IV.2.Les images suivantes représentent le suivi des particules en régime.....	
Turbulent	62
V. Conclusion	70
Conclusion générale	71

I. Introduction générale :

Un nanofluide est un fluide contenant des particules de taille nanométrique, appelées nanoparticule. Les nanoparticules utilisées sont généralement faites de métaux carbures, oxydes ou du carbone.

Actuellement, la demande pour l'élaboration de nanofluides est croissante dans de nombreux secteurs d'activités comme la santé, l'énergie, la micro-électronique ou encore la défense. La recherche s'oriente vers l'amélioration des propriétés des fluides et sur le développement de nouvelles propriétés. Un intérêt tout particulier est porté à l'utilisation des nanofluides puisqu'il est possible de moduler leurs propriétés thermophysiques. Les scientifiques et plusieurs compagnies s'intéressent à leur potentiel qui consiste à augmenter le transfert de chaleur et réduire les problèmes de sédimentation et d'érosion générés par les mélanges solides-liquides. Malgré l'existence de nombreux travaux de recherche dans la littérature sur l'influence des nanoparticules solides sur les propriétés thermo physiques des nanofluides, ce domaine attire encore de plus en plus les chercheurs.

Notre travail consiste à simuler la migration des nanoparticules dans une conduite sous le logiciel commercial Ansys FLUENT. Les particules choisies sont des particules de carbone avec un diamètre de 10 nm et une masse volumique de 2000 Kg/m^3 . Deux types d'injection de particules sont utilisés, uniforme et aléatoire, à l'entrée de la conduite. Les deux régimes d'écoulement laminaire et turbulent ont été considérés.

En plus de la résolution des équations de Navier-Stokes pour la phase continue, Fluent simule la seconde phase discrète par une approche Lagrangienne en utilisant le modèle de la phase discrète "DPM" (Discrete Phase Model).

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres, en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Après une introduction générale, nous avons présenté, dans le premier chapitre, les nanofluides et leurs domaines d'utilisation. Nous avons également cité brièvement quelques travaux réalisés dans ce domaine. Le deuxième chapitre est consacré aux différentes équations utilisées par le code de calcul Fluent afin de modéliser mathématiquement le problème posé. Les différents modèles existants dans le code Fluent et principalement le modèle de la phase discrète (discret phase model) sont présentés dans le troisième chapitre. Le dernier chapitre concerne la présentation et la discussion des résultats des différentes simulations. Finalement une conclusion générale termine notre travail.

Chapitre I

Généralités et revues bibliographiques sur les nanofluides

Dédicace

A mes très chers parents auxquels je dois beaucoup.

A mes sœurs et mon frère

A toute ma famille

A mon mari et toute ma belle famille

A tous mes amis

Je dédie ce travail

LILIA

Dédicace

A mes très chers parents auxquels je dois beaucoup.

A mes sœurs et mon frère

A toute ma famille

A tous mes amis

Je dédie ce travail

KATIA

Résumé:

Au cours de ces dernières années les suspensions de nanoparticules dans les liquides, ont été développées et étudiées. Pour déterminer les propriétés physiques de ce type de fluide, une grande variété de nanofluides ont été réalisés et leurs propriétés ont été évaluées. Pour étudier les propriétés thermodynamiques de nanofluides, en particulier les mesures de leur conductivité thermique efficace et la viscosité, de nombreux travaux expérimentaux ont été réalisés. Avoir un transfert de chaleur efficace pour des systèmes d'ingénierie notamment les échangeurs de chaleur et au même temps réduire la sédimentation, l'encrassement et les problèmes d'érosion qui sont générés par des mélanges solides-liquide avec des particules plus grosses, est préoccupation actuelle de nombreux scientifiques et entreprises.

Dans ce projet de fin d'études on s'intéresse à des simulations numériques des écoulements diphasique (Fluide/nanoparticules) seront réalisés en utilisant la méthode des volumes finis. Pour étudier la nature de la phase fluide ainsi que cinématique et dynamique de nanoparticules, en écoulement laminaire et turbulent on utilise l'approche Eulérienne-Lagrangienne. Les effets de la taille et la fraction volumique des nanoparticules sur l'écoulement laminaire et turbulent seront étudiés.

Nomenclature

Symboles	Désignation	Unité
C	Fraction massique	Nombre Sans dimension(%)
C_C	Facteur de trainée de Stokes	Nombre Sans dimension
C_D	Coefficient de trainée	Nombre Sans dimension
C_μ	Constante	Nombre Sans dimension
D	Diamètre de la conduite	nm
D_p	Diamètre des particules	m
d	masse volumique du fluide	Kg/m ³
d_p	masse volumique de la particule	Kg/m ³
F	Vecteur de force	Sans dimension
F_x	L'accélération supplémentaire	m/s ²
I	Intensité de turbulence	
II	Matrice d'identité	Sans dimension
K	Energie cinétique moyenne	Kg.m ² /s ²
K_b	Constante de Boltzmann	J/K
K_f	Conductivité thermique du nanofluide	Watt/m.K
K_{nf}	Conductivité thermique du fluide de base	Watt/m.K
k	Energie cinétique instantané	Kg.m ² /s ²
l	Longueur d'écoulement typique	m

L_e	Echelle de largeur de foucault	m
m_p	Masse de nanoparticules	Kg
m_T	Masse totale du nanofluide	Kg
n	Facteur de forme empirique	Sans dimension
n	Indice des cellules voisines	Sans dimension
n_i	Composante de la vitesse	m/s
N	Nombre nominal total	Nombre sans dimension
p_f	Pression entre deux surfaces adjacentes	Pa
R_{ij}	Tenseur des contraintes de Reynolds	Sans dimension
s	Surface de la sphère ayant le même volume que les particules	m^2
S	Surface actuelle de la particule	m^2
T	Le temps d'intégration	s
T_L	Intégrale de temps du lagrangien	s
ΔT	La durée utilisée dans la simulation	s
U	Vitesse moyenne	m/s
U'	Vitesse de fluctuation	m/s
u_p	Vitesse de la particule	m/s
u_T	Facteur de vitesse de cisaillement	Sans dimension
$u'_i u'_j T$	Coefficient de diffusion des particules	Sans dimension
V	Vitesse de l'écoulement	m/s
V_n	Vitesse normale du coefficient de restitution	m/s

V_s	Volume des particules solides	m^3
V_t	Vitesse tangentielle du coefficient de restitution	m/s
V_T	Volume totale (fluide +nanoparticules)	m^3
V	Vitesse de turbulence	m/s
y	Distance du point considéré par rapport à la paroi	m
f	Masse volumique du fluide de base	kg/m ³
nf	Masse volumique du nanofluide	kg/m ³
s	Masse volumique des nanoparticules	kg/m ³

Les nombres adimensionnels

Nu_{nf} : Nombre de NUSELT pour le nanofluide.

Pr_{nf} : Nombre de PRANDETL pour le nanofluide.

Re_{nf} : Nombre de REYNOLDS pour un nanofluide.

Re_{sph} : Nombre de REYNOLDS calculée à partir du diamètre de la sphère ayant de même volume.

Re : Nombre de REYNOLDS.

Liste des figures

figure	désignation	page
Fig. (I.1)	Les nanoparticules d'argent	<u>3</u>
Fig. (I.2)	Les Nanoparticule de fer	<u>4</u>
Fig. (I.3)	Les nanotubes de carbone	<u>4</u>
Fig. (II.1)	Configuration d'un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique.	<u>21</u>
Fig. (III.1)	Echange Interphase de la masse, mouvement et de chaleur	<u>37</u>
Fig. (IV.1)	Géométrie de la conduite	<u>46</u>
Fig. (IV.2)	Maillage uniforme	<u>47</u>
Fig. (IV.3)	Vitesse à l'entrée dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase).	<u>48</u>
Fig. (IV.4)	Vitesse au milieu de la conduite ($x=0.4m$) dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)	<u>48</u>
Fig. (IV.5)	Vitesse à la sortie ($x=0.8$) dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)	<u>49</u>
Fig. (IV.6)	Champs de vitesse à l'entrée de la conduite dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)	<u>49</u>
Fig. (IV.7)	Champs de vitesse au milieu de la conduite dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)	<u>50</u>

Fig. (IV.8)	Champs des vitesses à la sortie dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase).	<u>50</u>
Fig. (IV.9)	Vitesse à l'entrée dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>51</u>
Fig. (IV.10)	Vitesse à la sortie dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>51</u>
Fig. (IV.11)	Champs des vitesses à l'entrée dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>52</u>
Fig. (IV.12)	Champs des vitesses au milieu dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>52</u>
Fig. (IV.13)	Champs des vitesses a la sortiedans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)	<u>53</u>
Fig. (IV.14)	Maillage non uniforme	<u>53</u>
Fig. (IV.15)	Vitesse à l'entrée dans l'écoulement laminaire avec deux phases	<u>55</u>
Fig. (IV.16)	Vitesse au milieu de la conduite (x=0.4m) dans l'écoulement laminaire avec nanoparticules	<u>55</u>
Fig. (IV.17)	Vitesse à la sortie dans l'écoulement laminaire avec nanoparticules	<u>56</u>
Fig. (IV.18)	Comparaison entre les vitesses a l'entrée dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>56</u>
Fig. (IV.19)	Comparaison entre les vitesses en x=0.2 dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>57</u>
Fig. (IV.20)	Comparaison entre les vitesses en x=0.4 dans le régime laminaire	<u>57</u>

	avec et sans nanoparticules	
Fig. (IV.21)	Comparaison entre les vitesses en $x=0.6$ dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>58</u>
Fig. (IV.22)	Comparaison entre les vitesses à la sortie dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>58</u>
Fig. (IV.23)	Agrandissement de l'interaction des courbes de comparaison entre les vitesses à la sortie dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules	<u>59</u>
Fig.(IV.24(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j))	Suivi des particules dans le régime laminaire	<u>59</u>
Fig.(IV.25(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l,m,n,o,p,q,r,s))	Suivi des particules dans le régime turbulent	<u>63</u>

Liste des tableaux

Tableau (IV.1) : propriétés de l'eau.

Tableau (IV.2) : propriétés de la paroi.

Tableau (IV.3) : caractéristiques du maillage non uniforme.

Tableau (IV.4) : Propriétés des nanoparticules (carbone).

INDICES

- α_1 : Constante des particules sphérique lisses
- α_2 : Constante des particules sphérique lisses
- α_3 : Constante des particules sphérique lisses
- α_{nr} : Coefficient pour les cellules voisines
- β : Coefficient linéaire de n_i
- q : Charge des nanoparticules
- ρ : Rapport entre les densités matérielles
- λ : Parcours moyen libre de la particule
- ϵ : Le taux moyen de dissipation par unité de masse du fluide

- ϵ : Taux de dissipation spécifique
- μ : Viscosité dynamique
- μ_T : Viscosité de turbulence
- τ : Tenseur de déformation
- τ_B : Caractéristique de Foucault
- δ_{ij} : Symbole de Kronecker
- φ : Fraction volumique
- ζ : Nombre aléatoire répartie uniformément entre 0 et 1
- ν : Viscosité cinématique
- \mathbf{u} : Champs de vitesse instantanée
- $\bar{\mathbf{u}}$: Composante moyenne
- \mathbf{u}' : Composante de fluctuation

Tables des matières :

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités et revues bibliographiques sur les nano fluides

I. Introduction	2
II. Généralités sur les nano fluide	2
II.1. Définition des nanoparticules	2
II.2. Les nanofluides	4
II.2.1 Définition d'un nanofluide	4
II.2.2 Préparation des nanofluides.....	5
II.2.3. Nature du mélange obtenu	6
II.2.4. Domaines d'application des nano fluides	6
II.2.4.1. Refroidissement des systèmes électroniques	6
II.2.4.2. Refroidissement des systèmes thermiques	7
II.2.4.3. Refroidissement des systèmes spatiaux	7
II.2.4.4. Refroidissement des systèmes militaire	7
II.2.4.5. Refroidissement des systèmes nucléaires	7
II.2.4.6. La biomédecine	7
II.2.4.7. D'autres applications	8

III. Les différentes études effectuées sur les nanofluides	8
III.1. Les nanoparticules d'oxyde métallique.....	8
III. 1. 1. Les nanoparticules d'oxyde d'Aluminium	8
III. 1.1.1. Etudes expérimentales.....	9
III.1.1.2. Etudes numériques	10
III.1.2. Les nanoparticules d'oxyde de cuivre	10
III.1.3. les nanoparticules de dioxyde de Titane	12
III.1.4. Les nanoparticules métalliques	13
III.1.5. Les nanoparticules non métalliques.....	14
III.1.6. D'autres études	14
III.1.6.1. Étude expérimentale des performances thermiques d'un nano Fluide: eau-éthylène-glycol- Al_2O_3	15
III.1.6.2. Étude sur l'intensification des échanges thermiques par l'utilisation de nano fluides SiO_2 / eau	15
III.1.6.3. Etude du transfert de chaleur en convection naturelle dans les nanofluides	16
III.1.6.4. Etude de Mohamed EL HATTAB, Rachid MIR, Youness EL HAMMAMI, Touria MEDIOUNI (2013).....	16
IV Paramètres thermo physiques	17
IV.1. La masse volumique	17
IV.2. La conductivité thermique	18
IV.2.1. Modèles de type Maxwell	18
IV.2.2. Modèle de Maxwell	19
IV.2.3Modèle de Hamilton Crosser : [35].....	19

V. Conclusion	20
---------------------	----

Chapitre II modélisation mathématiques

I. Introduction	21
II. Ecoulement de poiseuille	21
II.1.Définition	21
II.1.2 Écoulement de Poiseuille en régime laminaire	21
II.1.3 Ecoulement de poiseuille en régime turbulent	22
III. Equations régissant	22
III.1.Le nombre de Reynolds	22
III.2.Les équations de Navier-Stokes	22
III.3.Le débit massique	23
IV. La théorie de mouvement des particules	24
IV.1.Équilibre des forces de particules	24
IV.2.Inclusion du terme de la gravité	25
IV.3.Autres forces	25
V. Les lois pour le calcul des coefficients de glissement	26
VI. La Turbulence	27
VII. L'intensité de la turbulence	28
VIII. Mouvement brownien	29
IX. La force de portance de Saffman (Saffman lift force)	29
X.Le coefficient de restitution	30

IX. CONCLUSION	30
----------------------	----

Chapitre III : modélisations du problème dans FLUENT

I. Introduction.....	31
II. Modèle de phase discrète (Discret phase model).	31
II.1. Vue d'ensemble.....	32
II.1.1. L'approche Euler-Lagrange.....	32
II.1.2. L'approche Euler-Euler.....	32
II.1.2.1. Le model eulérien.....	33
II.1.2.1.1. Vue d'ensemble et limitations du model eulérien.....	33
II.1.2.2. Mixture model (Le modèle de mélange).....	34
II.1.2.3. the VOF model (volume of fluid).....	34
II.2. Limitation du modèle de la phase discrète.....	35
II.2.1. Limitations sur la fraction volumique de la particule.....	35
II.2.2. Limitations sur la modélisation de suspension de particules continues.....	35
II.2.3. Limitations sur l'utilisation du modèle de la phase discrète avec d'autres modèles de FLUENT.....	35
III. Couplage unidirectionnel et bidirectionnelle (one-way and two-way coupling).....	36
IV. Dispersion turbulente des particules.....	38
V. Suivi stochastique (StochasticTracking).....	38
VI. Le Temps intégral.....	39
VII. Modèle de marche aléatoire discrète (Discrete Random Walk Model).....	40

VIII. Modèles de turbulence.....	41
VIII.1 Le moyennage temporel des équations de Navier-Stokes pour toutes les échelles (RANS, <i>Reynolds averaged Navier-Stokes simulation</i>).....	41
VIII.1.1 Le modèle $k-\epsilon$	42
VIII.2 La simulation des grandes échelles (SGE, ou LES, <i>large eddy simulation</i>)....	44
VIII.3 La simulation directe (DNS, <i>direct numerical simulation</i>).....	44
IX. Les équations de quantité de mouvement	45
X. Conclusion.....	45

Chapitre IV : Résultats et discussions

I. Introduction.....	46
II. Présentation de la géométrie	46
III. Simulation en régime laminaire et turbulent en 2D avec fluent	46
III.1. Régime laminaire et turbulent avec une seule phase (Sans nanoparticules).....	46
III.1.1 Maillage de la géométrie	46
III.1.2.Les conditions aux limites	47
III.1.3.Propriétés des composants	47
III.1.4. Résultats de la simulation de l'écoulement de poiseuille en régime laminaire.....	48
III.1.4.1. Courbe de la vitesse à l'entrée	48
III.1.4.2 .Courbe de la vitesse au milieu de la conduite à $x=0.4m$	48
III.1.4.3.Courbe de la vitesse à la sortie $x=0.8m$	49

III.1.4.4. Champs de vitesse à l'entrée de la conduite	49
III.1.4.5. Champs de vitesse au milieu de la conduite	50
III.1.4.6. Champs des vitesses à la sortie	50
III.1.5. Résultats de la simulation de l'écoulement de poiseuille en régime turbulent	51
III.1.5.1. Courbe de la vitesse à l'entrée	51
III.1.5.2. Courbe de la vitesse à la sortie à $x=0.8m$	51
III.1.5.3. Champs des vitesses à l'entrée	52
III.1.5.4. Champs des vitesses au milieu à $x=0.4$	52
III.1.5.5. Champs des vitesses à la sortie	53
III.2. Régime laminaire et turbulent avec deux phases (injection des nanoparticules)	53
III.2.1. Maillage de la géométrie	53
III.2.2. Résultats de la simulation en régime laminaire avec deux phases	54
III.2.2.1. Configuration de la simulation	54
III.2.2.2. Conditions aux limites pour les particules dispersées dans le cas du régime laminaire	54
III.2.2.3. Courbe de la vitesse à l'entrée	55
III.2.2.4. Champs des vitesses au milieu à $x=0.4$	55
III.2.2.5. Courbe de la vitesse à la sortie : $x=0.8$	56
III.3. Comparaisons des résultats de simulation pour le régime laminaire avec et sans nanoparticules	56
III.3.1. Comparaison des résultats de la vitesse à l'entrée	56
III.3.2. Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.2$	57

III.3.4.Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.4$	57
III.3.5.Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.6$	58
III.3.6.Comparaison des résultats de la vitesse a la sortie	58
III.3.7.Agrandissement de la figure (sortie)	59
III.3.8. Les images suivantes représentent le suivi des particules en régime	
Laminaire	59
IV. Résultats de la simulation pour le régime turbulent avec nanoparticules	62
IV.1. Configuration de la simulation.....	62
IV.2.Les images suivantes représentent le suivi des particules en régime.....	
Turbulent	62
V. Conclusion	70
Conclusion générale	71

I. Introduction générale :

Un nanofluide est un fluide contenant des particules de taille nanométrique, appelées nanoparticule. Les nanoparticules utilisées sont généralement faites de métaux carbures, oxydes ou du carbone.

Actuellement, la demande pour l'élaboration de nanofluides est croissante dans de nombreux secteurs d'activités comme la santé, l'énergie, la micro-électronique ou encore la défense. La recherche s'oriente vers l'amélioration des propriétés des fluides et sur le développement de nouvelles propriétés. Un intérêt tout particulier est porté à l'utilisation des nanofluides puisqu'il est possible de moduler leurs propriétés thermophysiques. Les scientifiques et plusieurs compagnies s'intéressent à leur potentiel qui consiste à augmenter le transfert de chaleur et réduire les problèmes de sédimentation et d'érosion générés par les mélanges solides-liquides. Malgré l'existence de nombreux travaux de recherche dans la littérature sur l'influence des nanoparticules solides sur les propriétés thermo physiques des nanofluides, ce domaine attire encore de plus en plus les chercheurs.

Notre travail consiste à simuler la migration des nanoparticules dans une conduite sous le logiciel commercial Ansys FLUENT. Les particules choisies sont des particules de carbone avec un diamètre de 10 nm et une masse volumique de 2000 Kg/m^3 . Deux types d'injection de particules sont utilisés, uniforme et aléatoire, à l'entrée de la conduite. Les deux régimes d'écoulement laminaire et turbulent ont été considérés.

En plus de la résolution des équations de Navier-Stokes pour la phase continue, Fluent simule la seconde phase discrète par une approche Lagrangienne en utilisant le modèle de la phase discrète "DPM" (Discrete Phase Model).

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres, en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Après une introduction générale, nous avons présenté, dans le premier chapitre, les nanofluides et leurs domaines d'utilisation. Nous avons également cité brièvement quelques travaux réalisés dans ce domaine. Le deuxième chapitre est consacré aux différentes équations utilisées par le code de calcul Fluent afin de modéliser mathématiquement le problème posé. Les différents modèles existants dans le code Fluent et principalement le modèle de la phase discrète (discrete phase model) sont présentés dans le troisième chapitre. Le dernier chapitre concerne la présentation et la discussion des résultats des différentes simulations. Finalement une conclusion générale termine notre travail.

Chapitre I

Généralités et revues bibliographiques sur les nanofluides

I. Introductions :

Les nanofluides sont une suspension de particules de taille nanométrique (nanoparticules) dispersées dans un liquide de base comme l'eau, l'éthylène-glycol ou des huiles. Développées depuis les années 90 ils permettent de diminuer les pertes de charges, l'érosion, la sédimentation ou les bouchons créés par des suspensions contenant des particules millimétriques ou microniques. Cette nouvelle classe de fluides apparue récemment possède une puissance d'échange thermique remarquable, comparée aux liquides conventionnels puisque la plupart des suspensions nanoparticulaires se sont montrées efficaces pour améliorer le transport de la chaleur de manière significative. L'intérêt a vite été remarqué quand les premières mesures de conductivité thermique ont montré une augmentation bien supérieure à ce que laissait espérer la théorie de Maxwell (suspensions très diluées). Bien que plusieurs mécanismes physiques aient été avancés pour expliquer ces observations, il n'y a pas de conclusion définitive à ce jour vu la complexité du transfert thermique dans un nanofluide. Il y a très régulièrement des contradictions entre les groupes de chercheurs sur l'importance de tel ou tel phénomène dans les analyses d'ordre de grandeur ou les simulations de dynamique moléculaire. Dans ce chapitre on va voir les généralités sur les nanofluides y compris les expériences effectuées pour leur préparations et les domaines d'application on va voir aussi les différentes études de plusieurs chercheurs, ainsi que l'effet notable sur les valeurs des paramètres thermophysiques du nanofluide obtenu.

II. Généralités sur les nanofluides :

II.1. Définition des nanoparticules :

Une nanoparticule est définie comme étant un nano-objet dont les trois dimensions sont à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire une particule dont le diamètre nominal est inférieur à 100 nm environ (1 nanomètre est 1000 millions de fois plus petit qu'un mètre, un diamètre suffisamment petit pour que les propriétés physique et chimique diffèrent de façon mesurable de celles des matériaux en vrac) Elles sont généralement de forme sphérique ou cylindrique. On en distingue plusieurs types:

- **Les nanoparticules des oxydes métalliques :**

1-L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).

2-L'oxyde de cuivre (CuO).

3-L'oxyde de silicium (SiO_2).

4-L'oxyde de Titanium (TiO_2).

• **Les nanoparticules métalliques :**

1-Le cuivre (Cu).

2-L'aluminium (Al)

3-L'or (Au).

4-L'argent (Ag).

• **Les nanoparticules non métalliques :**

1-Les nanotubes de carbone (CNT).

2-Le diamant (C).

On peut également classer les nanoparticules selon leur taille dans chacune des trois dimensions :

- Les fullerènes, particules, etc. ont leurs trois dimensions dans le domaine nanométrique (point).
- Les nanotubes, dendromètres, nanofils, fibres et fibrilles ont deux dimensions nanométriques (ligne).
- Les films minces n'ont qu'une dimension nanométrique (plan).

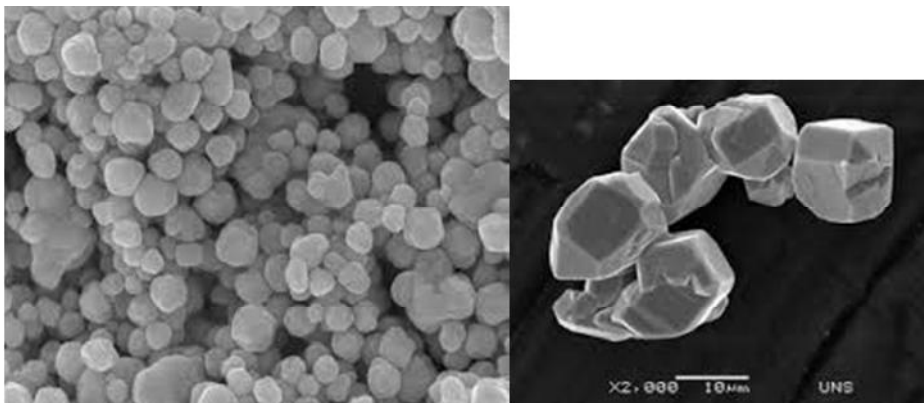


Figure (I.1) : Les nanoparticules d'argent

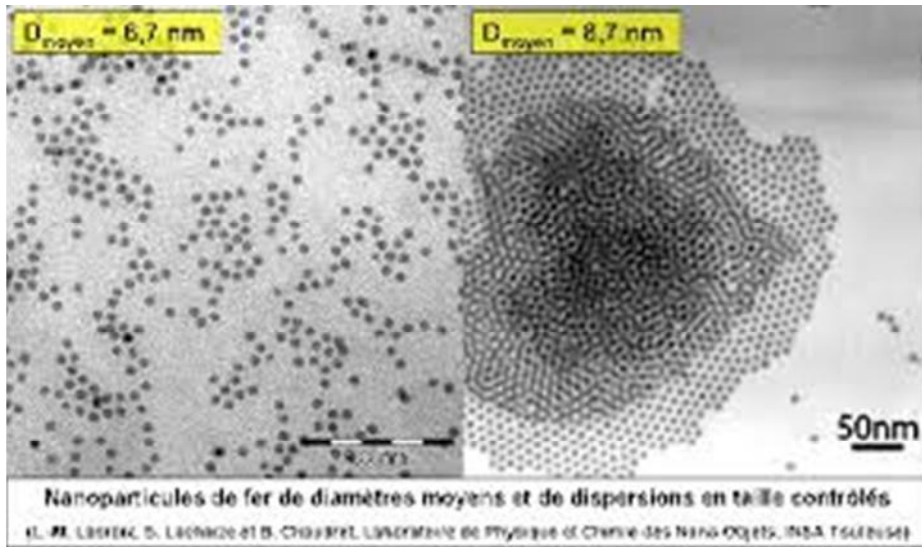


Figure (I.2) : Les Nanoparticule de fer

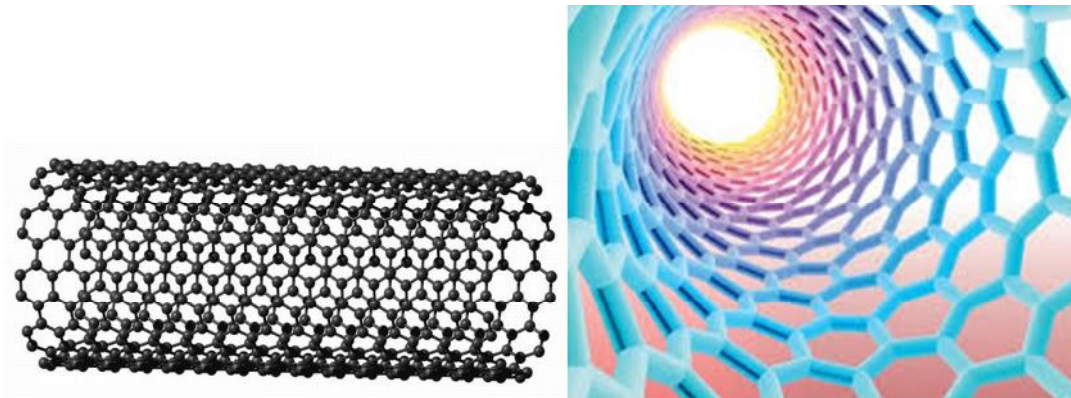


Figure (I.3) : Les nanotubes de carbone

II.2. Les nanofluides :

II.2.1 Définition d'un nanofluide :

C'est une suspension de particules de taille nanométrique (nanoparticules) dispersées dans un liquide de base, Cette nouvelle classe de fluides apparue récemment possède une puissance d'échange thermique remarquable, comparée aux liquides conventionnels qui présentent plusieurs inconvénients comme de fortes pertes de charges, l'érosion, la sédimentation et les bouchons dans les écoulements.

Les liquides de base les plus utilisés sont :

1-L'eau.

2-L'éthylène glycol (EG).

3-Les huiles.

Par ailleurs, l'agitation brownienne, liée à la taille nanométrique des particules, minimise les problèmes de sédimentation rencontrés avec des particules de plus grande dimension.

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nanofluides, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels Eastman et son groupe [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.

Les études correspondantes sont très prometteuses dans les capacités thermiques de la conductivité du nanofluides. Pour expliquer l'amélioration spectaculaire de la conductivité thermique de nanofluide par rapport au fluide de base, les scientifiques ont proposé plusieurs hypothèses:

- 1) des nanoparticules peuvent former des amas ou des agglomérats dans le nanofluide, donc plus de chaleur est transférée le long de ces grappes ou des agglomérats de percolation;
- 2) le mouvement brownien de nanoparticules agite le liquide, créant ainsi un effet qui augmente la micro convection
- 3) le fluide de base englobent les nanoparticules dispersées et forme une conductivité thermique élevée et hautement ordonnée, en augmentant ainsi l'efficacité et la fraction volumique des particules et augmente la conductivité thermique du nanofluides.

II.2.2 Préparation des nanofluides:

Les expériences effectuées sur les fluides caloporteurs avec des particules de taille micrométrique (10^{-6} m) ont montré que certaines problèmes pourraient être engendrés par l'utilisation de ces derniers tel que le problème de sédimentation des particules, l'augmentation de perte de charges etc. ...tandis que pour les particules de l'ordre du nanomètre (10^{-9} m), ces problèmes sont pratiquement insignifiants. Tout en supposant que la suspension est stable et durable, l'agglomération de particules est négligeable, aucun changement chimique du fluide, la préparation des nanofluides peut se faire par deux méthodes :

- **La méthode a une seule étape :**

Cette méthode est basée sur la vaporisation d'un matériau solide sous vide, puis condensation directe de sa vapeur dans le liquide.

- **La méthode a deux étapes :**

Cette méthode consiste d'abord à la fabrication d'une nanopoudre sèche, puis le mélange et la dispersion de celle-ci dans le liquide.

Ces procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste toutefois élevé.

II.2.3. Nature du mélange obtenu :

La concentration des nanoparticules dans le nanofluide est généralement assez faible et exprimée en pourcentage volume/volume. Cette fraction volumique varie environ de 0,1 à 10 % car l'augmentation rapide de la viscosité et la saturation du fluide due au nombre des particules ne nous permettent pas d'aller au-delà de 10% mais dans certains cas particuliers elle peut aller jusqu'à 20 % pour des nanofluides à base de liquide métallique.

II.2.4. Domaines d'application des nanofluides :

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

II.2.4.1. Refroidissement des systèmes électroniques :

Dans les circuits intégrés, les nanofluides ont été considérés comme fluides de refroidissement. Pour cela plusieurs études ont été effectuées. Tsai et col [2] ont employé un nanofluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur.

II.2.4.2. 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 ce dernier améliore le taux de refroidissement .ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, Tzeng et col [3] ont dispersé les nanoparticules de CuO et Al₂ O₃ dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission.

II.2.4.3. Refroidissement des systèmes spatiaux :

Pour les applications dans l'espace, You et col [4] et vassallo et col [5] ont effectué des études pour montrer que la présence des nanoparticules dans le fluide de refroidissement en électronique générale joue un rôle très important dans les applications de l'espace ou la densité de puissance est très élevée.

II.2.4.4. Refroidissement des systèmes militaire :

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermique très élevés ($q > 500$ à 1000 W/cm^2), ou 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 a haute puissance.

II.2.4.5. Refroidissement des systèmes nucléaires :

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

II.2.4.6. La biomédecine :

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

de la région chirurgicale, Jordan et col [6] ont effectué une étude où les nanofluides pourraient être employés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines.

II.2.4.7. 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.

III. Les différentes études effectuées sur les nanofluides :

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

Le terme "nanofluide" est proposé premièrement par Choi [7] pour désigner la suspension des nanoparticules solides dans un liquide de base.

Malgré le nombre élevé d'études publiées sur le sujet ces dernières années, aucune théorie ne parvient à décrire convenablement les résultats expérimentaux obtenus sur les nanofluides d'après Vadasz [8]. Il est à noter, que les résultats expérimentaux obtenus varient énormément d'une publication à une autre ce qui ne facilite pas la comparaison entre ces derniers et les théories proposées. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour valider les différentes théories proposées pour décrire les propriétés thermiques des nanofluides. D'après les études effectuées nous les avons classées en trois catégories :

III.1. Les nanoparticules d'oxyde métallique:

III. 1. 1. Les nanoparticules d'oxyde d'Aluminium :

L'essentiel des travaux sur ce type de nanofluides a porté sur la mesure de la conductivité thermique en fonction des différents paramètres caractérisant les nanoparticules (taille, fraction massique) et température de l'ensemble.

III. 1.1.1. Etudes expérimentales:

Le premier travail publié sur l'amélioration de la conductivité thermique utilisant l'oxyde d'aluminium a été mené par Massuda et al. en 1993 [9]. En dispersant des nanoparticules (Al_2O_3) dans l'eau dont la taille des nanoparticules est de diamètre 13nm. Ils ont obtenu une amélioration de la conductivité thermique de 30% pour une fraction volumique $\phi = 4.3\%$. Ce résultat a été suivi par une autre étude publiée par Eastman et al. [10] qui ont trouvé une amélioration de 30% de la conductivité thermique de nanoparticules (Al_2O_3) de taille 33nm en suspension dans l'eau pour une fraction volumique de 5%.

Wen et Ding [11] ont effectué une étude sur le transfert de chaleur en convection d'un nanofluide à base d'eau, les particules d' Al_2O_3 (27-56 nm de diamètre) à travers un tube en cuivre de diamètre de 4,5 mm et de longueur 970 mm en régime laminaire. Ils ont constaté que l'inclusion des nanoparticules d' Al_2O_3 peut augmenter de manière significative le coefficient du transfert de chaleur convectif, si on augmente la concentration des particules et le nombre de Reynolds. En outre, l'amélioration du coefficient du transfert de chaleur est particulièrement remarquable dans la région d'entrée, et diminue avec la distance axiale. De leur côté, Heris et col [12] ont étudié un écoulement laminaire de deux nanofluides (CuO/eau et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$) à travers un tube annulaire en cuivre de longueur 1m et de diamètre intérieur de 6 mm, et un tube externe d'acier inoxydable d'épaisseur 0.5 mm et de diamètre 32mm, où la vapeur saturée a été distribuée pour créer une condition aux limites à température constante à la paroi. La comparaison des résultats expérimentaux a montré que le coefficient du transfert de chaleur augmente en fonction de la fraction volumique de nanoparticules et de nombre de Peclet, ils ont montré également que le nanofluide ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$) a donné la meilleure augmentation du transfert thermique.

Wang et col [13] ont mesuré la viscosité relative des nanofluides ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{éthylène glycol}$) et ont montré une augmentation de la viscosité relative avec la fraction volumique pour les deux nanofluides. Ils constatent que pour un écoulement laminaire dans un tube cylindrique, le coefficient de transfert de chaleur est proportionnel à la conductivité thermique du nanofluide, et que la chute de pression est proportionnelle à la viscosité. Pour un

écoulement turbulent la chute de pression est proportionnelle à $\mu^{1/5}$, et le coefficient de transfert thermique est proportionnel à $(k_{nf}^{2/3}/\mu^{0.467})$.

On déduit donc que l'augmentation du transfert thermique conduit à une augmentation indésirable de la chute de pression.

III.1.1.2. Etudes numériques :

Pour l'étude des caractéristiques du transfert de chaleur des nanofluides par la simulation numérique, deux approches sont utilisées. La première considère que la condition de continuité est valide pour les nanofluides. La seconde utilise un modèle diphasique pour une meilleure description des phases liquides et solides.

Maïga et col [14] ont effectué des études numériques pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques du nanofluide traversant un tube chauffé uniformément de longueur «L= 1m » sous les deux régimes d'écoulement laminaire et turbulent, en utilisant le modèle monophasique. Les résultats ont prouvé que l'addition des nanoparticules peut augmenter le transfert thermique sensiblement comparé au liquide de base seul. Et que (Al₂O₃/EG) a fourni une meilleure amélioration que (Al₂O₃/eau)

Roy et col [15] ont effectué une autre étude numérique pour évaluer le transfert de chaleur et le taux de cisaillement à la paroi pour un écoulement laminaire radial dans un système de refroidissement. Ils ont utilisé un nanofluide (Al₂O₃/eau) et comparés son efficacité à ceux de l'eau, éthylène glycol et le pétrole. Toutes les conditions utilisées dans cette étude étaient semblables à ceux de Maïga et col [16] qui ont pris le nanofluide comme fluide incompressible. Les résultats montrent que le coefficient de transfert de chaleur et le taux de cisaillement à la paroi étaient importants si la concentration volumique ou le nombre de Reynolds augmentaient.

III.1.2. Les nanoparticules d'oxyde de cuivre :

De leur côté, Vajjha S et col [17] ont mené des études expérimentales pour déterminer la conductivité thermique de trois nanofluides contenant différentes nanoparticules (Al₂O₃, CuO et ZnO) dispersées dans un mélange de deux fluides de base, 60% d'éthylène glycol et 40%

d'eau. La concentration volumique des particules a été testée jusqu'à 10% et l'intervalle de température était de 298 à 363 K. ils ont montré que la conductivité thermique du nanofluide augmente en fonction de la concentration volumique et de la température. Par contre, l'augmentation du diamètre des nanoparticules fait diminuer la conductivité thermique et ils ont montré que la corrélation proposée par Hamilton-Crosser [18] n'est pas valable et ne peut présenter correctement la variation de la conductivité thermique en fonction de la température. Par l'utilisation de l'ensemble des données expérimentales, Vajjha et col ont amélioré le modèle de Koo et Kleinstreuer [19], en fournissant de nouvelles corrélations qui sont :

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{[K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)\phi]}{[K_s + 2K_f - (K_s - K_f)\phi]} + 5 \times 10^4 B \phi \rho_f C p_f \sqrt{\frac{K_B T}{\rho_p d_p}} F(\phi, T) \quad (I.1)$$

$$B = 0.0011(100\phi)^{-0.7272} \quad (I.1.a)$$

$$F = -134.63 + 1722.3\phi + (0.4705 - 6.04\phi)T \quad (I.1.b)$$

Ces corrélations donnent une prévision précise de la conductivité thermique des différents nanofluides.

Par contre Xie et Col [20-21], où ils ont mesuré les conductivités thermiques de SiC pour deux diamètres différents (26 nm et 0.6 μm) suspendu dans l'eau déminéralisée et dans EG. Ils ont remarqué que leurs résultats sont différents des résultats expérimentaux obtenus par Lee et col [22]. Ils ont constaté que les nanofluides avec les mêmes nanoparticules dans des différents fluides de base ont la même amélioration de la conductivité thermique effective. En outre, les résultats ont montré que le modèle de Hamilton- Crosser [18] est capable de prédire la conductivité thermique de suspensions SiC de 0.6 μm.

Wang et col [13] ont mesuré la conductivité thermique effective des nanofluides par une technique équilibrée de plat-parallèle. Dans les fluides de base (l'eau, éthylène-glycol (EG), l'huile de pompe à vide et l'huile de moteur), les nanoparticules d'Al₂O₃ et de CuO de diamètres moyens de 28 et 23 nm respectivement y sont suspendues. Les résultats expérimentaux ont montré que les conductivités thermiques de tous les nanofluides étaient plus élevées que celles des fluides de base. En outre, la comparaison avec diverses données a indiqué que la conductivité thermique des nanofluides augmente quand la dimension

particulière décroît. Les résultats ont montré également que l'amélioration n'est que de 12% pour la conductivité thermique et cela par une fraction volumique de 3% des nanoparticules par rapport à l'amélioration de 20% rapportée par Masuda et col [9] et de 8% rapportée par Lee et col[22] à la même fraction volumique.

III.1.3. les nanoparticules de dioxyde de Titane :

Murshed et al. [23] ont mesuré la conductivité thermique des nanoparticules (TiO_2) sphérique et cylindrique. Ils ont trouvé que le nanofluide contenant des nanoparticules sphériques de 15nm conduit à une faible amélioration de la conductivité thermique tandis que, pour des nanoparticules cylindriques de 40nm, ils obtiennent une amélioration allant jusqu'à 33% pour une fraction volumique de 5%.

Murshed et col [23] ont étudié en convection forcée l'écoulement d'un nanofluide dans une conduite cylindrique. Ce dernier contenant des nanoparticules de TiO_2 de formes nanotube de diamètre de 10 nm et 40 nm de longueur et sphériques de 15 nm de diamètre ou l'eau déminéralisée comme fluide de base. Ils ont montré que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la concentration volumique ϕ , et ils ont trouvé également que pour une concentration volumique $\phi=5\%$ l'amélioration de la conductivité thermique effective est d'environ de 33% pour les nanotubes et de 30% pour les nanoparticules sphériques. Ils ont alors constaté que la dimension et la forme de la particule ont une influence importante sur la conductivité thermique des nanofluides.

Wen et Ding [24] ont effectué une étude expérimentale d'un nanofluide dans un écoulement en convection naturelle, entre deux disques horizontaux dont l'un est chauffée uniformément. Les nanoparticules d'oxyde de titane (TiO_2) de 30 et 40 nm de diamètre sont dispersés dans de l'eau distillé à travers le mécanisme de stabilisation électrostatique et à l'aide d'un homogénéisateur. Ils ont montré qu'il y avait une diminution systématique du coefficient du transfert de chaleur avec l'augmentation de la concentration volumique ϕ .

Yurong et col [25] ont effectué des études expérimentales et numériques sur le transfert de chaleur en convection du nanofluide (TiO_2) à travers un tube droit en régime laminaire. Ils ont étudié l'effet de la concentration des nanoparticules, le nombre de Reynolds pour différentes

tailles des nanoparticules sur l'écoulement et le transfert de chaleur en convection. Les résultats ont montré que l'amélioration du transfert de chaleur a été significative dans la région d'entrée, et la température du nanofluide est beaucoup plus basse pour le nombre de Reynolds de 1500 que pour le nombre de Reynolds de 900 car le coefficient du transfert de chaleur est plus grand pour un nombre de Reynolds plus élevé.

Murshed et col [26] ont constaté que la conductivité thermique effective et la viscosité des nanofluides (eau/TiO₂, eau/Al₂O₃) augmente de façon significative avec la concentration volumique des particules. Par ailleurs, une augmentation linéaire de la conductivité thermique effective de nanofluides en fonction de la température a été observée.

III.1.4. Les nanoparticules métalliques :

Les nanoparticules métalliques ont des conductivités thermiques plus grandes que celles des oxydes métalliques correspondants. On devrait s'attendre à trouver des valeurs de conductivité thermique du même ordre que celle obtenues avec les oxydes métalliques correspondants mais avec des fractions volumiques en nanoparticules métalliques beaucoup plus faibles dans leurs premiers travaux Choi et col [27] ont constaté que l'addition d'une petite quantité de nanoparticule (concentration volumique $\phi < 1\%$) donnait une augmentation, presque le double pour le coefficient de transfert de chaleur. D'autres part, Das et col [28] ont déterminé que l'augmentation de la conductivité thermique est presque de 25% par rapport à celui du fluide de base pour les différentes nanoparticules et les différentes concentrations volumiques ($0.5 < \phi < 4\%$).

Xuan et Li [29-30] ont réalisé un système expérimental pour étudier le coefficient du transfert de chaleur convectif et le coefficient de frottement des nanofluides pour des écoulements laminaire et turbulent à travers un tube horizontal. ils ont utilisé l'eau déminéralisée comme fluide de base avec une dispersion de nanoparticules de cuivre(le diamètre de la nanoparticule $d_{np} \leq 100\text{nm}$) pour différentes fraction volumiques(0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.5 et 2%) en faisant varier le nombre de Reynolds entre 800 et 25000 et en opposant un flux thermique sur la paroi

Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient du transfert de chaleur convectif « h » de nanofluide varie en fonction de la vitesse d'écoulement et la fraction volumique. Le nombre de Nusselt augmente de 60% pour une concentration volumique $\phi = 2\%$, par rapport à

l'eau pure. D'autres part, ils ont trouvé que l'équation de Dittus-boelter [31] était non valide pour la prédiction du nombre de Nusselt pour les diverses fraction volumiques. À partir de leurs données expérimentales, ils ont proposé de nouvelles corrélations pour la prédiction du coefficient du transfert de chaleur convectif pour un écoulement d'un nanofluide à travers un tube. Ces corrélations sont établies sous la forme suivante:

Pour un écoulement laminaire:

$$\mathbf{Nu_{nf} = 0.4328(1 + 11.285\phi^{0.754}Pe_d^{0.218})Re_{nf}^{0.333}Pr_{nf}^{0.4} \quad (I.2)}$$

Pour un écoulement turbulent:

$$\mathbf{Nu_{nf} = 0.0059(1 + 7.6286\phi^{0.6886}Pe_d^{0.001})Re_{nf}^{0.9238}Pr_{nf}^{0.4} \quad (I.3)}$$

III.1.5. Les nanoparticules non métalliques:

Dans leurs articles, Wen et Ding [24] ont étudié l'effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides pour les nanotubes MWCNT (Multi-wallcarbon Nanotubes) de 20 à 60 nm de diamètre et quelques dizaines μm de longueur dispersée dans l'eau. Pour des températures inférieurs a 30°C , une dépendance approximativement linéaire de la conductivité thermique et la température. De leur côté, Ding et Col [32] ont montré que la conductivité thermique effective augmente avec la température. Ils ont constaté que l'amélioration de la conductivité thermique est légèrement plus grande que celle rapportée par Assael et col [33], Wen et Ding [24], mais beaucoup plus inférieure à celle citée par Choi et Col [7].

III.1.6. D'autres études :

D'autres études concernant les échangeurs de chaleur ont été effectuée. Parmi elles, on retrouve:

III.1.6.1. Étude expérimentale des performances thermiques d'un nanofluide: eau-éthylène-glycol- Al_2O_3 :

Effectué par RAZVVAN-SILVIU, THEODOR MATEESCU, VICTORIA COTOROBAI et THIERRY MARE en 2007. Cette étude montre par voie expérimentale les performances thermiques d'un nanofluide composé d'oxyde d'alumine dispersé dans de l'éthylène-glycol en différentes concentrations, allant de 0 à 2%. Le dispositif expérimental est un échangeur à tubes concentriques en inox, avec écoulement du fluide chaud dans le tube central et du fluide froid dans le tube annulaire. Les résultats obtenus montrent que

- 1) la présence des nanoparticules dans le fluide de base a pour effet une augmentation considérable du transfert thermique.
- 2) le coefficient du transfert convectif augmente avec:
 - a) la concentration volumique des particules dans le fluide de base;
 - b) l'intensification du régime d'écoulement turbulent

III.1.6.2. Étude sur l'intensification des échanges thermiques par l'utilisation de nanofluides SiO_2 / eau :

Effectuée par Sébastien FERROUILLAT, Biran WANG, João-Paulo RIBEIRO, Olivier SORIANO, Olivier PONCELET, Jean Antoine GRUSS, André BONTEMPS la première partie (à température imposée) a pour objectif de déterminer expérimentalement les performances thermo-hydrauliques du nanofluide SiO_2 /eau dans des conditions de température de paroi imposée dans un échangeur coaxial cylindrique (refroidissement ou chauffage du nanofluide) pour des régimes d'écoulement laminaire et turbulent.

Les résultats montrent que :

- Le rapport de la conductivité du nanofluide sur celle de l'eau en fonction de la concentration concorde avec le modèle de Maxwell à défaut d'une légère surestimation.
- En régime turbulent la perte de pression augmente et la loi de Blasius n'est plus valable et c'est dû au dépôt des particules sur la paroi. Des essais complémentaires seront nécessaires

afin de consolider ces premiers résultats et afin de comprendre ce probable du phénomène de dépôt qui conditionne les performances thermo hydrauliques du nanofluide.

- Il y'a une amélioration significative du coefficient d'échange thermique avec le nanofluide au fluide de base en régime turbulent et une forte influence de la concentration massique sur l'amélioration du coefficient d'échange.

- Le rapport h_{nf}/h_f augmente en condition de refroidissement par rapport au chauffage.

- Une augmentation du coefficient d'échange thermique avec le temps et une diminution après le nettoyage

III.1.6.3. Etude du transfert de chaleur en convection naturelle dans les nanofluides :

Effectuée par Glades BACHIR, Ragheb SAWLI, Chakib FAKIHet Abdelkader MOJTABI, ils proposent dans ce travail d'étudier l'intérêt de disperser des nanoparticules dans un fluide pour augmenter le transfert de chaleur en convection naturelle dans la configuration de Rayleigh-Bénard. Il ressort de cette étude que le flux thermique transféré, en convection naturelle laminaire, augmente lorsque la concentration en nanoparticules augmente. Cependant cette augmentation reste du même ordre de grandeur que la concentration en nanoparticules (< 8% à 10 %) dans le fluide porteur et sans commune mesure avec celle importante mentionnée en convection forcée.

III.1.6.4. Etude de Mohamed EL HATTAB, Rachid MIR, Youness EL HAMMAMI, Touria MEDIOUNI (2013):

Elle présente une étude numérique de la convection naturelle des nanofluides confinés dans une enceinte carrée chauffée par une source de chaleur isotherme montée sur sa paroi gauche. Les équations qui régissent l'écoulement hydrodynamique et le transfert de chaleur sont décrites par les équations de Navier Stockes et de l'énergie. Ces équations sont discrétisées par la méthode des volumes finis en utilisant un schéma en loi de puissance. La viscosité dynamique et la conductivité thermique effective du nanofluide sont approximées

respectivement par le modèle de Brinkman et de Maxwell-Garnetts. Les simulations numériques sont effectuées dans le cas de l'eau pure et des mélanges d'eau et des nanoparticules (Al_2O_3 , Cu et TiO_2) pour un nombre de Rayleigh variant de 10^3 à 10^6 et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre 0 et 0,1.

L'influence de certains paramètres tels que, la fraction volumique, le type des nanoparticules et le nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur a été étudié. Cette étude a permis de dégager les conclusions suivantes :

Le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique en nanoparticules et le nombre de Rayleigh.

L'effet des nanoparticules sur le transfert de chaleur est plus important à faible nombre de Rayleigh.

Le transfert de chaleur en présence des nanoparticules de cuivre est amélioré comparativement aux résultats obtenus avec des nanoparticules d' Al_2O_3 ou TiO_2 .

IV Paramètres thermophysiques :

IV.1. La masse volumique :

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que nous supposerons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique ϕ à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V} \right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (I.4)$$

La fraction volumique des nanoparticules, notée ϕ désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide).

$$\phi = \frac{\text{Volume Solide}}{\text{Volume totale du nanofluide}} = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (I.5)$$

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (I.6)$$

Où ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide

ρ_f : La masse volumique du fluide de base

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solide

Dans tous les travaux, sans exception, les nanofluides ont été caractérisés en fonction de la fraction volumique notée :

$$\varphi = \frac{V_s}{V_T} \quad (I.7)$$

Or ce paramètre dépend de la température T du nanofluide au moment du mélange, même si on suppose que le volume des particules solides varie peu pour de faibles variations de température, celui des fluides par contre varie et les expériences des uns et des autres pour réaliser le nanofluide avec un φ donné ont été conduites à des températures différentes. Il aurait mieux valu pour mener à bien ces études de prendre un autre paramètre indépendant de la température, c'est le cas de la fraction massique

$$c = \frac{m_s}{m_T} \quad (I.8)$$

Une fois ce rapport utilisé, C reste constante égale à C_0 dans un milieu homogène et ce pour toute valeur de T si l'on ne prend pas en compte la thermodiffusion. Une fois ce rapport utilisé, C reste constante égale à C_0 dans un milieu homogène et ce pour toute valeur de T si l'on ne prend pas en compte la thermodiffusion.

IV.2. La conductivité thermique :

IV.2.1. Modèles de type Maxwell :

Ces modèles concernent les milieux où l'empilement des particules est régulier. la phase solide est supposée discontinue, noyée dans une phase fluide continue. A partir de ce modèle, beaucoup de chercheurs ont développé plusieurs modèles qui s'appuient sur les mêmes principes que Maxwell [34].

IV.2.2. Modèle de Maxwell :

Maxwell fait partie des chercheurs qui se sont intéressés au calcul de la conductivité thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension. Pour aboutir à l'estimation de cette dernière, il a supposé que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre D_p . Les particules sont séparées d'une distance suffisante conduisant à l'absence d'interaction mutuelle entre elles, par conséquent le milieu est fortement dilaté (pas de contact entre les particules).

La formule de Maxwell est donnée par :

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{[K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)\phi]}{[K_s + 2K_f - (K_s - K_f)\phi]} \quad (I.9)$$

K_{nf} : Conductivité thermique du nanofluide.

K_f : Conductivité thermique du fluide de base.

K_s : Conductivité thermique des particules solides.

IV.2.3 Modèle de Hamilton–Crosser : [35]

Le modèle de Hamilton est une extension du modèle de Maxwell. Il concerne les particules de forme quelconque. Pour prendre en compte cette diversité de forme, Hamilton introduit un facteur géométrique appelé sphéricité (ψ) faisant référence à la géométrie sphérique.

Ce coefficient 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 suivante :

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{[K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_s)\phi]}{[K_s + (n-1)K_f + (K_f - K_s)\phi]} \quad (I.8)$$

Où n est le facteur de forme empirique donné par :

$$\mathbf{n} = \frac{3}{\psi} \quad (\text{I.9})$$

Pour les particules cylindriques $n=6$. Pour les particules sphériques $n=3$, donc $\psi=1$ dans ce cas Hamilton – crosser est identique au modèle de Maxwell.

V. Conclusion :

L'étude des nanofluides reste un sujet récent et les modèles proposés ne suffisent pas toujours pour déterminer les paramètres thermophysiques des fluides néanmoins, quelques études nous ont permis de comprendre leurs comportements parmi lesquels on distingue :

- L'augmentation du transfert thermique et de la conductivité thermique. Cette dernière augmente avec l'augmentation de la taille des particules Mais en ce qui concerne l'augmentation de transfert de chaleur d'autres expériences semblent nécessaires.
- L'augmentation du coefficient d'échange avec l'augmentation de la concentration volumique des particules et l'intensification du régime d'écoulement turbulent.
- Les pertes de pression suivent globalement les lois classiques (Blasius, poiseuille) si les propriétés thermophysiques réels du nanofluide sont prisent en compte.
- L'influence de la concentration massique sur l'amélioration du coefficient d'échange.

Par conséquent, la compréhension du comportement des particules près du mur, et leur migration dans le nanofluides est important pour l'utilisation future du nanofluides pour le grand potentiel de l'amélioration du transfert de chaleur. Des simulations en utilisant le Modèle Eulérien-lagrangien afin d'étudier le comportement de la migration des particules dans les régimes laminaire et turbulent. Les résultats et analyse du profil de vitesse et le comportement des particules seront présentées et discutés dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Modélisation mathématique

I. Introduction :

Lorsqu'un fluide s'écoule dans une conduite il exerce une résistance visqueuse qui crée une perte d'énergie. La chute de pression le long de la conduite s'appelle la perte de charge. Pour des conditions aux limites constantes imposées à l'écoulement, O. Reynolds a montré en 1883 qu'il existe deux sortes d'écoulements suivant la valeur d'un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds. Dans ce chapitre on va voir les équations régissant sur les régimes d'écoulement ainsi les forces s'exerçant sur le mouvement des particules tout le long de la conduite.

II. Ecoulement de poiseuille :

II.1.Définition :

Un écoulement de Poiseuille est un écoulement qui suit une loi de Poiseuille.

De manière générale la loi de Poiseuille énonce de façon théorique la relation entre le débit d'un écoulement et la viscosité du fluide, la différence de pression aux extrémités de la canalisation ainsi que sa longueur et son rayon. Cette relation est vérifiée expérimentalement dans les canalisations de rayons faibles et est souvent utilisée dans les viscosimètres car elle énonce notamment que le débit est inversement proportionnel à la viscosité.

II.1.2 Écoulement de Poiseuille en régime laminaire :

Considérons alors l'écoulement laminaire d'un fluide de viscosité μ et de masse volumique ρ , dans une conduite cylindrique de rayon R , posée horizontalement. Le schéma de la **figure (2.1)** explicite cette configuration et permet de définir un repère cylindrique dont l'axe de révolution est celui de la conduite et correspond à la direction de l'écoulement laminaire.

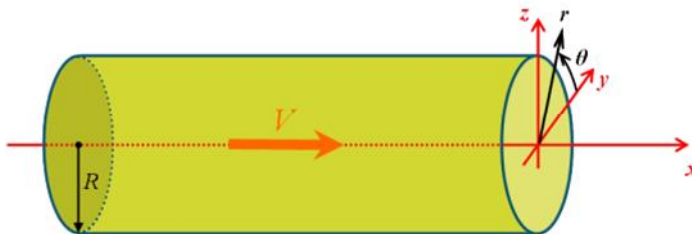


Figure (II.1) : configuration d'un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique.

II.1.3 Ecoulement de poiseuille en régime turbulent :

Un écoulement turbulent est un écoulement dans le quelle le fluide suit un chemin ou une trajectoire perturbée et dans laquelle il y a des vitesses et des pressions de perturbation. Le mouvement d'un écoulement turbulent est exprimé en fonction de deux vitesses, une vitesse moyenne et une vitesse de fluctuation.

Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. De tels écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer.

Le comportement complexe des écoulements turbulents est la plupart du temps abordé par la voie statistique. On peut ainsi considérer que l'étude de la turbulence fait partie de la physique statistique. Pour traduire le fait que, dans un écoulement, les forces d'inertie l'emportent sur les forces de viscosité, un nombre de Reynolds convenablement choisi doit être supérieur à un certain seuil.

III. Equations régissantes :

III.1. Le nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en adimensionnant les Navier-Stokes, On le définit de la manière suivante :

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{VD}}{\mathbf{v}} \quad \mathbf{(II.1)}$$

Où V est la vitesse de l'écoulement, D est le Diamètre de la conduite et v la viscosité cinématique du fluide

III.2. Les équations de Navier-Stokes :

Les équations régissant pour la phase fluide principale sont des équations de Navier-Stokes cependant, les particules dispersées sont suivies en utilisant la description de Lagrange. La vitesse u peut être exprimée en fonction du rayon et le gradient de pression, comme indiqué dans l'équation ou sur le plan de la ligne médiane (maximum) la vitesse U est représentée dans l'Eq (II.3) sous une forme sans dimension

$$\mathbf{u} = \frac{r^2 - R^2}{4\mu} \left(-\frac{\mathbf{p}}{\mathbf{x}} \right) \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{\mathbf{u}}{U} = \mathbf{1} - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (\text{II.3})$$

Où R est le rayon de la paroi interne, μ est la viscosité dynamique du fluide.

La conservation et la dynamique axiale radiale sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_x) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{2\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \\ & \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_r v_x) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{2\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] - 2\mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{(\nabla \cdot \vec{v})\mu}{r} + \frac{\rho v_\theta^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Où

$$(\nabla \cdot \vec{v}) = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} \quad (\text{II.5})$$

La pression statique est entraînée à 13,67 Pascal et la pression de sortie est de 0 Pascal. La Méthode des volumes finis est appliquée.

La continuité et la quantité de Mouvement (EqII.6) et (EqII.7) sous forme intégrale sont répertoriées ci-dessous :

$$\rho \vec{v} d\vec{A} = \mathbf{0} \quad (\text{II.6})$$

$$\rho \vec{v} \vec{v} d\vec{A} = - \rho I d\vec{A} + \overline{\tau} I d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad (\text{II.7})$$

Où

I est la matrice identité, τ est le tenseur de déformation, et F est le vecteur de force.

Ensuite, l'équation de continuité est intégrée sur un volume de contrôle Eq (II.8) :

$$\sum_f^N \rho \vec{v}_n \cdot \vec{A}_f = 0 \quad (\text{II.8})$$

Où :

N est le nombre nominal total, ρ est la densité du matériau et v_n est la composante vitesse, donc $\rho \vec{v}_n$ est le flux de masse à travers la face.

Le flux $\rho \vec{v}_n$ peut être exprimé comme suite :

$$\rho \vec{v}_n = \rho_f \left(\frac{a_{p,c0} v_{n,c0} + a_{p,c1} v_{n,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} \right) + d_f \left((p_{c0} + (\nabla p)_{c0} \cdot \vec{r}_0) - (p_{c1} + (\nabla p)_{c1} \cdot \vec{r}_1) \right) \quad (\text{II.9})$$

III.3. Le débit massique :

Le débit massique peut être calculé à l'aide de l'intégration numérique comme décrit l'Eq(II.10) :

$$\dot{m} = \iint_S \rho v dS \quad (\text{II.10})$$

IV. La théorie de mouvement des particules :

IV.1. Équilibre des forces de particules :

FLUENT prédit la trajectoire de la phase discrète de la particule (gouttelette ou bulle) en intégrant l'équilibre des forces des particules, qui est écrite dans un référentiel lagrangien. Cet équilibre des forces égalise l'inertie de la particule avec les forces agissant sur la particule, et peut être écrite (en suivant la direction de x en coordonnées cartésienne) comme :

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (\text{II.11})$$

Où : F_x est le terme désignant l'accélération supplémentaire (force / unité de masse de la particule), la force de trainée par unité de masse de la particule peut être écrite comme :

$$\mathbf{F}_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \quad (\text{II.12})$$

Et

$$\mathbf{F}_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} \quad (\text{II.13})$$

Ici, \mathbf{u} est la vitesse de la phase fluide, \mathbf{u}_p est la vitesse de la particule, μ est la viscosité moléculaire du fluide, d est la densité du fluide, d_p est la densité de la particule, et

$$\text{Re} = \frac{d d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu} \quad (\text{II.14})$$

IV.2. Inclusion du terme de la gravité :

Quand la première équation incluse la force de gravité sur la particule, il est important de noter que dans FLUENT la gravité est nulle par default. Si l'on veut l'inclure on doit définir sa magnitude et sa direction dans operating condition.

IV.3. Autres forces :

La première équation incorpore la somme des forces F_x dans l'équilibre des forces des particules qui peut être importante dans des circonstances spéciales. La première d'entre elle est la force de la masse virtuelle, une force requise pour accélérer le fluide entourant la particule. Cette force peut être écrite comme suit :

$$\mathbf{F}_x = \frac{1}{2} \frac{d}{d_p} \frac{d}{dt} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \quad (\text{II.15})$$

Et quand $\rho > \rho_p$. La somme des forces augmente grâce au gradient de pression dans le fluide :

$$\mathbf{F}_x = \left(\frac{d}{d_p} \right) \mathbf{u}_{pi} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x_i} \quad (\text{II.16})$$

V. Les lois pour le calcul des coefficients de glissement :

Le coefficient de trainée, C_D peut être prit :

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{Re} + \frac{\alpha_3}{Re^2} \quad (\text{II.17})$$

Ou, α_1, α_2 et α_3 sont des constantes applicables a des particules sphériques lisses pour de différents nombres de Reynolds (Re) donnés par Morsi and Alexander ou

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} \left(1 + b_1 Re_{sph}^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}} \quad (\text{II.18})$$

Ou,

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581 \cdot Re_{sph} + 2.4486 \cdot Re_{sph}^2)$$

$$b_2 = 0.09964 + 0.5565 \cdot Re_{sph}$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944 \cdot Re_{sph} + 18.4222 \cdot Re_{sph}^2 - 10.2599 \cdot Re_{sph}^3)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584 \cdot Re_{sph} - 20.7322 \cdot Re_{sph}^2 + 15.8855 \cdot Re_{sph}^3)$$

Le facteur de forme, C_D est défini comme :

$$C_D = \frac{s}{S} \quad (\text{II.19})$$

Ou s est surface de la sphère ayant le même volume que la particule et S la surface actuelle de la particule. Le nombre de Reynolds Re_{sph} est calculé à partir du diamètre de la sphère ayant le même volume.

Remarque : le facteur de forme C_D ne peut pas dépasser 1.

Pour des particules inférieures au micron (ce qui est notre cas) une forme de loi de trainée de Stocks est disponible. Dans ce cas, F_D est défini comme :

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 C_C} \quad (\text{II.20})$$

Le facteur C_C est la correction Cunningham de la loi de trainée de Stocks, qui peut être calculé comme suit :

$$C_C = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left(1.257 + 0.4 \cdot e^{-\left(\frac{1.1 d_p}{2\lambda} \right)} \right) \quad (\text{II.21})$$

Où λ est le parcours moyen libre de la particule

VI. La Turbulence :

Les liquides sont d'un régime laminaire ou turbulent, le régime laminaire se produit lorsqu'il n'y a pas d'interruption dans les couches de fluide et elles sont parallèles l'une à l'autre.

La turbulence n'est pas facile à décrire exactement mais il est plus facile de décrire un écoulement turbulent et son mouvement par ses caractéristiques ; en premier lieu un écoulement turbulent varie dans le temps et dans l'espace ce que l'on appelle irrégularités ; un écoulement turbulent est chaotique et à ses propriétés de sorte que la pression et la vitesse varient de façon stochastique.

Un écoulement turbulent comprend trois dimensions, même si le débit moyen est considéré comme à une ou deux dimensions. Dans tous les écoulements turbulents l'énergie cinétique se dissipe en chaleur qui est appelée dissipation causé par l'effet de la viscosité.

Dans la plupart des cas pour la simplification, les écoulements turbulents sont estimés par un débit moyen qui ne montrera pas exactement la solution à un débit réel de turbulence. Et une solution analytique pour les équations de Navier Stokes n'est pas possible (Karimipناه 1996). Ainsi, au lieu d'une solution analytique un modèle numérique peut être utilisé pour résoudre les équations de Navier Stokes. Et dans ces modèles de turbulence certaines

approximations sont appliquées et quelques équations seront ajoutées afin de résoudre toutes les variables nécessaires.

Le paramètre indiquant la turbulence est le nombre de Reynolds qui est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. La turbulence se produit pour un nombre de Reynolds élevés contrairement à l'écoulement laminaire qui se produit pour un faible nombre de Reynolds.

Les écoulements turbulents ont toujours certaines propriétés telles que l'irrégularité, le hasard et le mouvement chaotique. Donc, la vitesse est composée de deux parties; une partie ou la vitesse moyenne U est constante et l'autre partie est la partie de fluctuation, ce qui peut être expliqué par les équations de Navier-Stokes.

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = \mathbf{U} + \mathbf{u}'(\mathbf{t}) \quad (\text{II.22})$$

Étant donné que tous les écoulements turbulents sont beaucoup plus grands qu'à l'échelle moléculaire, ils peuvent être traités comme un continuum. Lorsque l'écoulement devient turbulent le transfert de chaleur et le transfert de masse augmentent. La transformation de l'énergie cinétique des plus petits tourbillons en énergie interne ou dissipative se produit dans tous les écoulements turbulents qui sont provoquées par le frottement ou des forces visqueuses.

VII. L'intensité de la turbulence :

L'intensité des turbulences est le rapport entre la racine carrée moyenne de la fluctuation de vitesse u' et la vitesse moyenne U .

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{u}'}{U} \quad (\text{II.23})$$

L'Intensité de turbulence est habituellement décrite en pourcentage et par conséquent la fraction sera multipliée par 100. L'intensité de turbulence peut être dérivée à partir de l'énergie cinétique turbulente ainsi d'après la formule ci-dessous :

$$\mathbf{u}' = \sqrt{\frac{1}{3} (\mathbf{u}'_x^2 + \mathbf{u}'_y^2 + \mathbf{u}'_z^2)} = \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (\text{II.24})$$

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (\text{II.25})$$

On suppose qu'il y a une seule composante moyenne de vitesse dans la direction de l'écoulement et les autres sont à nulle l'équation devient :

$$I = \frac{u'}{U} = \frac{\sqrt{\frac{2k}{3}}}{\sqrt{U_x^2}} = \frac{\sqrt{2k}}{U_x} \quad (\text{II.26})$$

VIII. Mouvement brownien :

Le mouvement brownien est un mouvement aléatoire des particules submicroscopiques dans un fluide, et c'est causé par la collision de la géométrie inégale des petites molécules du fluide sur la surface de la particule. Le mouvement brownien a été découvert par le botaniste Robert Brown en 1827. Le schéma de calcul incluant le mouvement brownien dans la simulation se calcule par l'équation suivante :

$$F_{Br} = m_p G_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (\text{II.27})$$

Où m_p est la masse de la particule, G_i moyenne nulle, unité variance des nombres aléatoire gaussien compris entre [0, 1]. Et Δt et la durée utilisée dans la simulation. S_0 se calcule par l'équation suivante :

$$S_0 = \frac{216\nu k_b T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{dp}{d}\right)^2 C_c} \quad (\text{II.28})$$

Où T est la température absolu du fluide, ν est la viscosité cinématique du fluide, et K_b est la constante de Boltzmann qui est égale a 1.38×10^{-23} J/K.

IX. La force de portance de Saffman (Saffman lift force) :

La force de portance de Saffman, ou hausse due au cisaillement, peuvent être incluse dans les termes de la somme des forces. Cette force de portance utilisée est la généralisation de l'expression donnée par Saffman :

$$\vec{F} = \frac{2Kv^{1/2}\rho\tau}{d_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{1/4}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (\text{II.29})$$

Ou : $K=2.594$ et τ est le tenseur de déformation. Cette forme de force de portance est utilisée pour des petits nombre de Reynolds de la particule. Aussi, le nombre de Reynolds de la particule basé sur la différence de la vitesse particule-fluide doit être plus petit que la racine carré du nombre de Reynolds de la particule basé sur le champ de cisaillement. Depuis que cette restriction est valide pour les particules submicroscopique, il est recommandé d'utiliser cette option que pour ce type de particules.

X. Le coefficient de restitution :

En dynamique, le coefficient de restitution (appelé aussi élasticité au rebondissement) est un coefficient physique qui intervient lors de l'étude d'une collision. Son introduction dans l'étude des chocs de solides réels dans l'air a été suggérée pour la première fois par Isaac Newton en 1687, et c'est pourquoi il est parfois appelé « coefficient de Newton ». Il dépend des caractéristiques physiques des matériaux dont sont faits les corps qui entrent en collision.

Le coefficient de restitution peut montrer que une grande partie d'énergie cinétique se dissipe par la collision. Ce coefficient s'exprime par la relation suivante :

$$e = \sqrt{\frac{W_{\text{Kin,R}}}{W_{\text{Kin}}}} = \sqrt{\frac{1-W_{\text{disp}}}{W_{\text{Kin}}}} = \frac{V_r}{V} \sqrt{\frac{h_R}{h}} \quad (\text{II.30})$$

Le coefficient de restitution est un nombre compris entre 0 et 1. Il peut être divisé en une normale et une tangentielle : par la manière suivante,

$$e_n = V_{n,R}/V_n, \quad e_t = V_{t,R}/V_t \quad (\text{II.31})$$

D'où, V_n et V_t sont les composantes des vitesses normale et tangentielle respectivement

IX. CONCLUSION:

On constate d'après ce chapitre que la valeur du nombre de Reynolds influe sur le régime d'écoulement.

On conclue que des équations interviennent pour décrire le mouvement des particules et définir leurs comportements. Le mouvement brownien et les coefficients de glissement et de restitution nous interprètent la migration de ces nanoparticules dans la conduite.

Chapitre III

Modélisation du problème dans FLUENT

I. Introduction :

ANSYS Fluent offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, des turbulences, des transferts de chaleur et des réactions chimiques. Le logiciel est utilisé pour des applications industrielles allant de l'écoulement d'air autour d'un ail d'avion, à la combustion à l'intérieur d'un four ; des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolière ; du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteurs ; de la conception de salles blanches aux usines de traitement des eaux usées.

Des modèles spécifiques sont proposés pour modéliser les phénomènes de combustion interne, d'aéroacoustique ainsi que les turbomachines, ce qui élargit encore son champ d'application. Dans notre mémoire nous allons nous intéresser au modèle de la phase discrète. (Discret phase model).

II. Modèle de phase discrète (Discret phase model) :

En plus de la résolution des équations de transport pour la phase continue, FLUENT permet de simuler une seconde phase discrète dans un cadre de référence lagrangien. Cette seconde phase se constitue de particules sphériques (qui peuvent représenter des gouttelettes ou des bulles) dispersée dans une phase continue.

FLUENT calcule les trajectoires de cette phase discrète aussi bien que le transfert de chaleur ou de masse de/vers ces particules. Le couplage entre ces phases et l'impact des trajectoires de la phase discrète et la phase continue l'une sur l'autre peut être incluse.

FLUENT fournit les options de modélisation de la phase discrète suivante :

- Le calcul de la trajectoire de la phase discrète en utilisant une formulation lagrangienne qui inclut l'inertie de la phase discrète, la traînée hydrodynamique, la force de gravité.
- La prédiction des effets de la turbulence sur la dispersion des particules dues aux tourbillons turbulents présents dans la phase continue.
- Chauffage/refroidissement de la phase discrète.
- Vaporisation et ébullition des gouttelettes de liquide.
- la combustion des particules, y compris l'évolution volatile et la combustion de charbon.

- couplage facultatif de la phase continue de prédiction de champ d'écoulement pour les calculs de phase discrets
- rupture des gouttelettes et la coalescence

Ces capacités de modélisation permettent a FLUENT de simuler un grand nombre de problèmes de phase discrète incluant la séparation des particules et la classification, bulles émouvant de liquides, combustion du fuel liquide, combustion de charbon.

II.1. Vue d'ensemble :

Les avancées du calcule en mécanique des fluides ont fourni les bases pour un aperçu supplémentaire dans la dynamique des écoulements multiphasique. Actuellement il y'a deux approches pour le calcul numérique des écoulements multiphasiques : l'approche Euler-Lagrange et l'approche Euler-Euler.

II.1.1. L'approche Euler-Lagrange :

L'approche est Eulérienne-Lagrangienne quand seulement la phase fluide est traitée comme continue, en utilisant la description eulérienne. Les équations gouvernantes pour la phase fluide sont les équations de Navier-Stocks, et elles sont résolues numériquement par la méthode des différences finis, des volumes finis ou des éléments finis. Cependant, les particules dispersées sont suivie en utilisant la description lagrangienne, et les particules peuvent échanger la quantité de mouvement, la masse et l'énergie avec la phase fluide.

La principale supposition dans ce modèle est que la seconde phase dispersée occupe moins de fraction de volume, même si le chargement élevée de la masse $\square_{particules}$ \square_{fluide} est acceptable. Les trajectoires des particules ou des gouttelettes sont calculées individuellement à des intervalles spécifiées durant le calcule de la phase fluide. Ceci fait que le modèle soit approprié pour la modélisation de la combustion du fuel liquide et du charbon, et quelques écoulements de particules-chargées mais inapproprié pour la modélisation des mélanges liquide-liquide, lit fluidisée, ou autres applications ou la fraction de volume de la seconde phase ne sera pas négligeable.

II.1.2. L'approche Euler-Euler :

Dans cette approche, chaque phase a son propre volume et ne peut pas être prise par l'autre phase ; de sorte que chaque phase a quelques fractions de volume dont la somme ne fait

qu'une au total. Et chaque fraction volumique est censée être une fonction continue de l'espace et du temps. Pour chaque phase, les équations de conservation sont appliquées et un ensemble d'équations seront obtenus. Plus d'équations devraient être ajoutés pour fermer et résoudre les variables inconnues ; ces équations supplémentaires peuvent être acquises ou pratiquement à partir de la théorie cinétique (uniquement en cas d'écoulements granulaires). Dans ANSYS FLUENT, l'approche Euler - Euler se compose de trois modèles : le modèle de mélange, VOF (volume de fluide) et le modèle eulérien.

II.1.2.1. Le model eulérien :

Dans ANSYS FLUENT le model eulérien est le model le plus complexe. Il peut résoudre un groupe d'équations de continuité et de quantité de mouvement pour chaque phase et les équations de couplage entre deux phases seront acquises par l'échange d'interphases et les coefficients de pression. De plus l'échange de la quantité de mouvement entre les phases dépend du type de la mixture. Le model eulérien multiphasique a de différentes applications comme pour les lits fluidisés, des colonnes à bulles et des suspensions de particules

II.1.2.1.1. Vue d'ensemble et limitations du model eulérien :

Le model eulérien peut être utilisé pour les écoulements multiphasiques fluide-fluide et solide-fluide ou granulaires.

ANSYS FLUENT résout le model eulérien basé sur des outils comme : une seule pression est considéré pour toutes les phases et les équations de quantité de mouvement et de continuité sont résolue.

Quelques paramètres comme la température granulaire (fluctuation d'énergie dans les solides) est disponible et peut être gagné pour chaque phase solide, la viscosité de friction, le cisaillement, la viscosité en block (pour la phase solide) sont aussi accessibles. En plus de toutes les fonctions du coefficient de traînée, tous les modèles K- sont disponibles et peuvent être appliquée à la mixture de toutes les phases.

II.1.2.2. Mixture model (Le modèle de mélange) :

Ce modèle est adapté pour deux ou plusieurs phases de fluide ou de particules. Dans ce modèle, l'équation de la dynamique de mélange est résolue et les vitesses relatives sont considérées pour les phases dispersées. Le modèle de mélange peut être utilisé pour les écoulements à bulles, la sédimentation ; écoulement chargés de particules avec une faible charge et les cyclones séparateurs.

Pour les écoulements avec la fraction volumique de la phase dispersée de plus de 10%, le modèle de mélange ainsi que celui d'Euler peuvent être utilisés et dans le cas d'une fraction volumique dispersée de moins de 10%, le modèle de phase discrète peut être utilisé.

Il y a quelques conseils pour choisir entre le modèle du mélange et le modèle eulérien :

- Si la concentration de la phase dispersée est élevée dans certaines parties du domaine, le modèle d'Euler peut être utilisé. Le modèle de mélange peut être utilisé dans les cas avec une large distribution de phases dispersées avec différentes tailles et même les plus grosses particules sont fixées au champ d'écoulement principal.

En général, le modèle de mélange est simple et a moins d'équations à résoudre. Le modèle eulérien est plus complexe mais plus précis que le modèle de mélange. Il est plus difficile d'obtenir la convergence avec le modèle eulérien, donc le modèle eulérien est plus complexe. Aussi, le modèle eulérien a besoin de plus d'effort pour le calcul et il n'est pas recommandé pour les calculs simples.

II.1.2.3. the VOF model (volume of fluid):

Ce modèle est adapté pour deux ou plus de deux fluides non miscibles dans lequel la position de l'interface est importante et le modèle est une technique de suivi de surface. Dans ce modèle, la fraction volumique de chaque cellule de chaque fluide est suivie dans le modèle. Et il y a tellement de nombreuses applications telles que la circulation libre de surface, le mouvement des bulles dans les micro-canaux et de canaux, le remplissage, le mouvement du liquide après une rupture de barrage, le suivi de l'interface liquide-gaz et etc.

II.2. Limitation du modèle de la phase discrète :

II.2.1. Limitations sur la fraction volumique de la particule :

La formulation de la phase discrète (discret phase model) utilisée par FLUENT suppose que la seconde phase est suffisamment diluée que l'interaction particule-particule et les effets de la fraction de volume de la particule sur la phase gazeuse est négligeable. En pratique, cela impose que la fraction volumique de la phase discrète soit raisonnablement basse, généralement moins de 10-12%. Notez que le chargement de masse de la phase discrète peut dépasser largement 10-12%. On peut résoudre des problèmes où le débit massique de la phase discrète est égal ou supérieur à celui de la phase continue.

II.2.2. Limitations sur la modélisation de suspension de particules continues :

Le modèle lagrangien de la phase discrète de particules stables est adapté pour les écoulements dans lesquels les particules sont injectées dans un écoulement de phase continue avec une entrée et une sortie bien définies. Le modèle de Lagrange ne modélise pas les écoulements où les particules sont définitivement suspendues dans le continuum, comme cela se produit dans les suspensions solides dans les systèmes fermés, tels que des cuves agitées, récipients de mélange, ou les lits fluidisés. Le modèle de phase discrète de particules instables, cependant, est capable de modéliser des suspensions de particules en continu.

II.2.3. Limitations sur l'utilisation du modèle de la phase discrète avec d'autres modèles de FLUENT :

Les restrictions suivantes existent sur l'utilisation d'autres modèles avec le modèle de la phase discrète :

- Quand la simulation des particules est en parallèle, le DPM model ne peut pas être utilisé avec n'importe quel modèle. Des modèles d'écoulements multiphasiques (VOF, mixture, eulérien) si l'option « shared memory » est cochée. (Noter que l'utilisation de l'option « message passing », quand la direction est en parallèle, permet la compatibilité de tous les modèles d'écoulements multiphasiques avec le DPM model).

- Les écoulements par fractions périodique (soit le débit de masse spécifiée ou chute de pression spécifiée) ne peuvent pas être modélisés lorsque le modèle de phase discrète est utilisé.
- Seules les particules non réactives peuvent être incluses lorsque le modèle de combustion prémélangée est utilisé.
- Les injections de surface seront déplacées avec la grille quand une maille de glissement ou d'un mobile ou maillage déformant est utilisée, cependant seules les surfaces associées à une frontière seront recalculés. Les injections de surfaces de plan de coupe ne seront pas déplacées avec le maillage et seront supprimés lorsque le remaillage se produit.
- Le modèle de Cloud n'est pas disponibles pour le suivi des particules instables, ou en parallèle, en utilisant le l'option « message passant » pour les particules
- Lorsque plusieurs images de référence sont utilisées en liaison avec le modèle de phase discrète, l'affichage des traces de particules n'aura pas de sens par default. De même, les calculs de la phase discrète couplée ne seront pas significatifs.

Une autre approche pour le suivi des particules et des calculs de la phase discret couplé avec de multiples trames de référence est de suivre les particules sur la base de la vitesse absolue à la place de la vitesse relative. Pour effectuer cette modification, utilisez la commande : **define/models/dpm/options/track-in-absolute-frame**. Notez que les résultats peuvent fortement dépendre de l'emplacement des parois à l'intérieur du cadre de référence multiples.

Les vitesses d'injection de particules (spécifiés dans set injection properties) sont définies par rapport au cadre de référence dans lequel les particules sont suivies. Par défaut, les vitesses d'injection sont spécifiées par rapport au cadre de référence local. Si vous activez l'option track-in-absolute-frame; les vitesses d'injection sont spécifiés par rapport au repère absolu.

- Le suivi de particules relatives ne peut pas être utilisé en association avec le déplacement de glissement et de déformation des mailles. Si mailles de glissement et / ou déformation sont utilisés avec le modèle de DPM, les particules vont toujours être suivis dans le repère absolu. Mise au cadre relatif est pas autorisée.

III. Couplage unidirectionnel et bidirectionnelle (one-way and two-way coupling):

Dans un couplage unidirectionnel la phase discret est simulée en fonction du champ d'écoulement de la phase continue. Un couplage unidirectionnel est aussi appelé approche découplée. Lorsque l'effet de la phase discrète sur la phase continue est également considéré, il est appelé couplage bidirectionnel ou approche couplée. Dans le couplage bidirectionnel, la phase discrète et le motif d'écoulement sont affectées l'un par l'autre. Le couplage bidirectionnel peut être acquis alternativement par la résolution des équations des deux phases continue et discrète, en attendant les solutions deviennent plus ou moins constante et ne change pas. Donc à partir des particules à la phase continue, il y a un échange interphase de la masse, du moment et de la chaleur (figure ci-dessous). Mais dans le cas d'un couplage unidirectionnel, il y a pas de modalités d'échange, y compris la masse, la quantité de mouvement et le transfert de chaleur à partir de la phase discrète au continuum car il n'y a pas d'effet de la phase discrète sur la phase continue (ANSYS Inc, 2009).

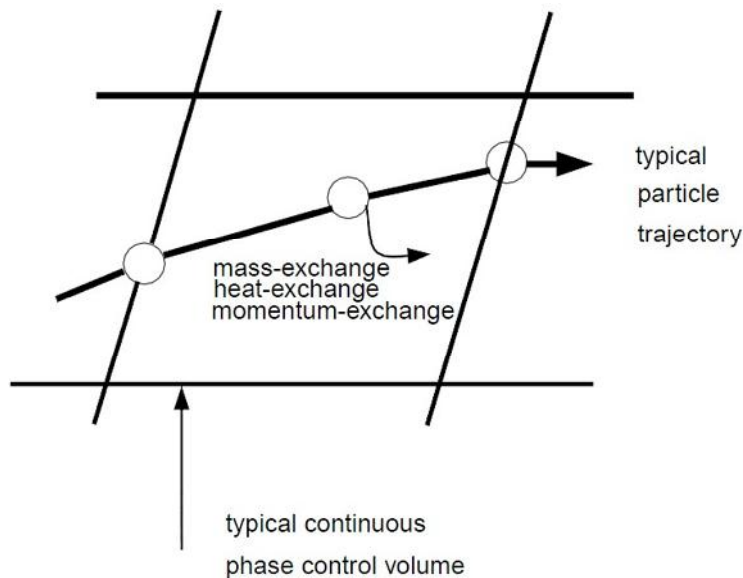


Figure (III-1) : échange Interphase de la masse, mouvement et de chaleur

Le degré d'interaction dépend de la charge de particules, qui est un paramètre pour choisir le bon modèle, et est également efficace sur les interactions de phase. Par définition, la charge de particules est le rapport entre les densités de masse de la phase dispersée et la phase porteuse, qui sont présentés avec les indices c et d respectivement.

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} \quad (\text{III.1})$$

Le rapport entre les densités matérielles est représenté par :

$$= \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad (\text{III.2})$$

Le rapport ci-dessus est inférieur à 0,001 pour les écoulements gaz-liquide, autour de 1 pour les écoulements solide-liquide et plus de 1 000 pour les écoulements gaz-solide. Selon la charge de particules, il existe différents types d'interactions entre les phases :

Si la charge de particules est très faible, le couplage entre les phases est unidirectionnel cela veut dire que les particules du fluide ont un impact sur les particules à travers la force de traînée et la turbulence, mais il n'y a aucune influence des particules sur le fluide. La phase discrète, le model de mélange et le modèle d'Euler peuvent simuler ce type de problèmes.

Si la charge de particules est dans le niveau intermédiaire le couplage est bidirectionnel cela veut dire que les particules ont également un impact sur le fluide à travers la réduction de la turbulence moyenne et de la quantité de mouvement. La phase discrète, le modèle de mélange et le modèle eulérien peuvent simuler ce type de problèmes et pour choisir le meilleur modèle, d'autres facteurs tels que le nombre de Stokes doivent être utilisés.

IV. Dispersion turbulente des particules :

La dispersion des particules due à la turbulence dans la phase fluide peut être prédite en utilisant le modèle de suivi stochastique (stochastic tracking model). The stochastic tracking (marche aléatoire) model inclut les effets des fluctuations de la vitesse instantanée en régime turbulent sur les trajectoires de la particule en utilisant des méthodes stochastiques. Le model de cloud pour les particules piste l'évolution statistique du nuage de particules à propos de la trajectoire moyenne. La concentration des particules dans le nuage est représentée par la fonction de densité de probabilité gaussienne (PDF) à propos de la trajectoire moyenne. Pour le suivi stochastique un modèle est disponible pour compter la génération ou la dissipation de la turbulence dans la phase continue.

Remarque : La dispersion turbulente des particules ne peut pas être incluse si le Splart-Allmars turbulence model est utilisé.

V. Suivi stochastique (StochasticTracking) :

Quand l'écoulement est en régime turbulent, FLUENT peut prédire les trajectoires des particules en utilisant la vitesse moyenne de la phase fluide, \vec{u} dans l'équation de la trajectoire.

Optionnellement, on peut inclure la valeur instantanée de la fluctuation de la vitesse d'un écoulement de gaz.

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad (\text{III.3})$$

Pour prédire la dispersion des particules due à la turbulence.

Dans l'approche du suivie stochastique, FLUENT prédit la dispersion turbulente des particules en intégrant les équations de la trajectoire pour une particule individuelle, en utilisant la vitesse instantanée du fluide, $\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'(t)$ le long du chemin de la particule durant l'intégration. En calculant la trajectoire de cette façon pour un nombre de particules représentative (nommés « nombre d'essais »), les effets aléatoires de la turbulence sur la dispersion de la particule pourrait être compté pour.

Et en ce qui concerne les injections de particules, elles peuvent être définies comme suit :

- seul: un flux de particules et injecté à partir d'un seul point.
- Cône : un flux de particules et injecté à partir d'un modèle conique.
- surface : un flux de particules et injecté à partir d'une surface (une de chue face).

VI. Le Temps intégral :

La prédiction de la dispersion de particules rend utile l'usage de la notion de l'échelle de temps intégral \mathbf{T} , qui décrit le temps passé en mouvement turbulent le long de la trajectoire des particules, \mathbf{ds} :

$$\mathbf{T} = \int_0^{\infty} \frac{\mathbf{u}'_p(t)\mathbf{u}'_p(t+s)}{\overline{\mathbf{u}'_p^2}} \mathbf{ds} \quad (\text{III.4})$$

Le temps d'intégration est proportionnel à la vitesse de dispersion des particules, des valeurs plus élevées indiquent plus de turbulences dans l'écoulement. On peut montrer que le coefficient de diffusion des particules est donnée par : $\overline{u'_i u'_j} T$

Pour les petits "traceur" "particules qui se déplacent avec le fluide (zéro de la vitesse de dérive), l'intégrale de temps du lagrangien devient fluide intégrale dans le temps, T_L . Cette échelle de temps peut être approchée tel que :

$$\mathbf{T}_L = C_L \frac{K}{\varepsilon} \quad (\text{III.5})$$

Où C_L doit être déterminé comme il n'est pas bien connu. En adaptant la diffusivité des particules de traceur, $\overline{u_i' u_j'} T_L$ à la vitesse de diffusion scalaire prédite par le modèle de turbulence, $\frac{v_t}{\sigma}$ on peut obtenir :

$$\mathbf{T}_L = 0.15 \frac{k}{\varepsilon} \quad (\text{III.6})$$

Pour le model $K - \varepsilon$ et ses variantes, et

$$\mathbf{T}_L = 0.30 \frac{k}{\varepsilon} \quad (\text{III.7})$$

VII. modèle de marche aléatoire discrète (Discrete Random Walk Model) :

Dans le modèle de marche aléatoire (DiscreteRandomWalk Model), les particules vont interagir avec une succession discrète de tourbillons stylisés, et ces tourbillons sont caractérisés par leur propre échelle de temps, τ_e et trois Conditions de fluctuation de vitesse u' , v' et W' :

Tout d'abord, afin de donner une description plus réaliste de la fonction de corrélation, la durée de la caractéristique de Foucault τ_e , est défini comme étant :

$$\tau_e = -T_L \ln(\xi) \quad (\text{III.8})$$

ξ Est un nombre aléatoire qui est répartie uniformément entre 0 et 1.

La particule va interagir avec un tourbillon jusqu'à ce que le tourbillon s'éteigne ou la particule voyagée hors du tourbillon. Avec le tourbillon τ_e de durée de vie est déjà connu, le «Foucault échapper temps» est nécessaire pour être déterminé pour une escapade de particules à partir d'un Foucault. Il peut être défini comme suit:

$$\tau_{escape} = -\tau \ln \left| 1 - \left(\frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right| \quad (\text{III.9})$$

Où τ est le temps de relaxation de particules et L_e est l'échelle de longueur de l'Foucault.

Deuxièmement, les termes de fluctuation de turbulences chaotiques devraient être modélisés.

Une façon de générer des conditions de fluctuation aléatoire u' , v' et w' , est en assumant les termes de fluctuation obéissent à la distribution de probabilité gaussienne.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{III.10})$$

VIII. Modèles de turbulence :

Il existe essentiellement trois manières de prendre en compte les turbulences en mécanique des fluides numérique :

VIII.1. Le moyennage temporel des équations de Navier-Stokes pour toutes les échelles (RANS, Reynolds averaged Navier-Stokes simulation).

La méthode RANS est la plus économe en ressources et elle est majoritairement utilisée pour les applications industrielles. Le moyennage temporel consiste à décomposer le champ de vitesse instantané v en une composante moyenne \bar{v} et une composante de fluctuation v'

$$\vec{v}(\vec{x}, t) = \bar{\vec{v}}(\vec{x}, t) + \vec{v}'(\vec{x}, t) \quad (\text{III.11})$$

Cela permet de définir l'énergie cinétique des turbulences k :

$$k = \frac{1}{2} \overline{v'^2} \quad (\text{III.12})$$

(v' est nul en moyenne, mais pas v'^2).

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_k \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{III.13})$$

Le terme R_{ij} est le tenseur des contraintes de Reynolds défini par :

$$R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (\text{III.14})$$

Comme tous les tenseurs de contraintes, il a six composantes indépendantes ce qui rajoute six équations au système pour chaque volume de contrôle (cellule du maillage).

En utilisant l'hypothèse de Boussinesq, on peut simplifier l'écriture du tenseur de Reynolds en faisant intervenir une viscosité de turbulence μ_T :

$$\mathbf{R}_{ij} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_T \frac{\partial \bar{v}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{III.15})$$

Où k est l'énergie cinétique de turbulence définie au-dessus, et δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

La viscosité de turbulence s'évalue habituellement dans les zones où le nombre de Reynolds est faible (typiquement à proximité des parois), à partir du taux de dissipation spécifique ϵ , dans le modèle $k-\epsilon$:

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \quad (\text{III.16})$$

Dans les zones où le nombre de Reynolds est plus important, à partir du taux de dissipation des fluctuations de vitesse par tourbillon ϵ , dans le modèle $k-\epsilon$:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{III.17})$$

La limite des modèles $k-\epsilon$ et $k-\omega$ s'évalue avec un nombre sans dimension y^+ :

$$y^+ = \frac{y u_T}{\nu} \quad (\text{III.18})$$

Avec y^+ : distance du point considéré par rapport à la paroi.

$u_T = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$: Facteur de vitesse de cisaillement.

ν : viscosité cinématique.

On utilise en général un modèle $k-\omega$ pour $y^+ < 10$, et un modèle $k-\epsilon$ pour $10 < y^+ < 100$. Si l'on veut décrire ce qui se passe à proximité de la paroi, on s'attache à ce que la première cellule ait une épaisseur vérifiant $y^+ < 1$

VIII.1.1 Le modèle $k-\epsilon$:

Le modèle $k-\epsilon$ est l'un des modèles de RANS et dans le modèle $k-\epsilon$, l'hypothèse de Boussinesq est utilisée pour résoudre les inconnues des équations de Reynolds.

Dans l'hypothèse de Boussinesq on suppose que les tensions de Reynolds sont liées aux taux moyen de déformation. Basé sur cette hypothèse, le taux moyen de déformation augmente avec l'augmentation des contraintes de Reynolds:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{U_j}{x_i} \right) \quad (\text{III.19})$$

Dans le modèle k - , le point principal est l'énergie cinétique, et dans un écoulement turbulent l'énergie cinétique instantanée $k(t)$ est la somme des énergies cinétiques moyennes K c'est-à-dire l'énergie cinétique turbulente k :

$$\mathbf{k}(t) = \mathbf{K} + \mathbf{k} \quad (\text{III.20})$$

Dans laquelle:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{2} (\mathbf{U}^2 + \mathbf{V}^2 + \mathbf{Z}^2) \quad (\text{III.21})$$

$$\mathbf{k} = \frac{1}{2} (\overline{\mathbf{u}'^2} + \overline{\mathbf{v}'^2} + \overline{\mathbf{z}'^2}) \quad (\text{III.22})$$

L'énergie cinétique de l'écoulement moyen est la suivante :

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \mathbf{div}(\rho K \vec{U}) = \mathbf{div}(-P \vec{U} + 2\mu \vec{U} E_{ij} - \rho \overline{U' u' u' u'}) - 2\mu E_{ij} E_{ij} + \rho \overline{u' u' u' u'} E_{ij} \quad (\text{III.23})$$

Dans laquelle E est le taux moyen de la déformation :

$$\mathbf{e}_{ij}(t) = \mathbf{E}_{ij} + \mathbf{e}_{ij}' \quad (\text{III.24})$$

Et l'énergie cinétique turbulente sera :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \mathbf{div}(\rho k \vec{U}) = \mathbf{div}(-\overline{p' u'} + 2\mu \overline{u' e'_{ij}} - \rho \frac{1}{2} \overline{u' u' u' u'}) - 2\mu \overline{e_{ij} e_{ij}} + \rho \overline{u' u' u' u'} E_{ij} \quad (\text{III.25})$$

Les équations utilisées par le modèle k - pour définir la longueur et la vitesse ϑ pour montrer la turbulence à grande échelle:

$$\vartheta = k^{\frac{1}{2}} l = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon} \quad (\text{III.26})$$

Et voici la viscosité turbulente :

$$\mu_t = C_\mu \rho \vartheta l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{III.27})$$

C_μ est une constante sans dimension.

Les équations de transport pour k et ϵ dans le modèle k - sont les suivantes:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \mathbf{div}(\rho k \vec{U}) = \mathbf{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \mathbf{grad}(k) \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (\text{III.28})$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \mathbf{div}(\rho \epsilon \vec{U}) = \mathbf{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \mathbf{grad}(\epsilon) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{2} \quad (\text{III.29})$$

VIII .2. La simulation des grandes échelles (SGE, ou LES, *large eddy simulation*) :

La Simulation des Grandes Échelles consiste à simuler un écoulement turbulent en définissant un nombre d'onde de coupure au-delà duquel l'énergie due aux mouvements tourbillonnaires est prise en compte par un modèle dit modèle sous-maille. En clair, les plus gros tourbillons sont calculés (ils sont physiquement visibles dans le domaine de calcul), les plus petits sont pris en compte en introduisant une viscosité supplémentaire.

VIII .3. La simulation directe (DNS, *direct numerical simulation*) :

La première méthode consiste à avoir un maillage plus fin que le plus petit tourbillon attendu. On parle de simulation directe (DNS, *direct numerical simulation*). Cette méthode est extrêmement gourmande en ressources et en temps, et est donc rarement utilisée dans un contexte industriel

La simulation numérique directe (SND, ou *DNS* acronyme anglais de *Direct Numerical Simulation*) est une méthode de simulation de la turbulence utilisée en mécanique des fluides numérique.

Elle permet une approche de la turbulence où toutes les structures tourbillonnaires potentiellement présentes, sont explicitement calculées. Toute l'énergie de la turbulence est donc représentée et on ne se sert pas d'un modèle de tout ou partie du spectre de la turbulence.

Elle est pour l'instant limitée à des domaines d'étude de taille modeste (d'autant plus modestes que le nombre de Reynolds du domaine est élevé). Elle est donc de fait cantonnée aux laboratoires de recherche, car trop gourmande en ressources de calcul pour pouvoir traiter des cas d'intérêt industriel. On l'utilise néanmoins de plus en plus dans le monde de la recherche afin d'élucider des mécanismes physiques au sein des écoulements étudiés.

IX. Les équations de quantité de mouvement :

Les équations de quantité de mouvement sont discrétisées comme ci-dessous:

$$\mathbf{a}_p \mathbf{u}_i = \sum_{nr} \mathbf{a}_{nr} \mathbf{u}_{inr} + \mathbf{p}_f \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{i}} + \mathbf{S} \quad (\text{II.30})$$

Où :

L'indice n représente les cellules voisines, u_i est l'une des composantes de la vitesse ($u_x u_y u_z$), a_p est le coefficient linéaire pour u_i , a_{nr} est un coefficient pour les cellules voisines, p_f est la pression à la surface entre les deux cellules adjacentes. Cette valeur de p_f peut être obtenu par un décentrement d'interpolation de second ordre la procédure est décrite ci-dessous dans l'Eq(II.31) :

$$\mathbf{p}_f = \mathbf{p} + \nabla \mathbf{p} \cdot \vec{\mathbf{r}} \quad (\text{II.31})$$

X. Conclusion :

Les différents modèles dont dispose fluent nous permettent de simuler les problèmes de mécanique des fluides. Le modèle de phase discrète est le modèle utilisé dans notre simulation pour étudier la phase principale (eau) la seconde phase (les nanoparticules de carbone) et le modèle k- est utilisé comme modèle de turbulence tout en tenant compte du modèle de marche discrète pour exprimer le suivie stochastique de la turbulence.

Chapitre IV

Résultats et discussions

I. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons effectué quatre simulations :

La première et la seconde simulation effectuée est celle de l'écoulement de poiseuille en régime laminaire et turbulent avec une seule phase (sans nanoparticules) la troisième et la dernière simulation est celle de l'écoulement de poiseuille avec l'injection de nanoparticules dans un régime laminaire et turbulent

II. Présentation de la géométrie :

Dans notre simulation nous allons utiliser une conduite de 80 cm de longueur et de 2 cm de diamètre comme le montre la figure (IV.1).

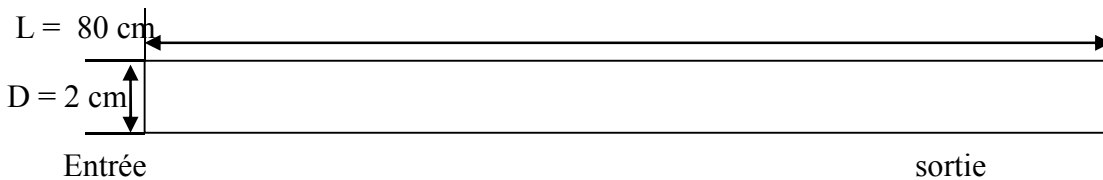


Figure (IV.1): géométrie de la conduite

III. Simulation en régime laminaire et turbulent en 2D avec fluent :

III.1. Régime laminaire et turbulent avec une seule phase (Sans nanoparticules):

III.1.1 Maillage de la géométrie :

- Puisque le problème est symétrique et que l'on essaye de comprendre ce qui se passe près des parois, on ne va mailler que la partie haute de la conduite ($D=1\text{cm}$) et on utilisera dans cette simulation un maillage uniforme de 200 divisions uniformes suivant la direction radiale (r) et 1000 divisions uniformes suivant de $800\ \mu\text{m}$ de longueur suivant l'axe.

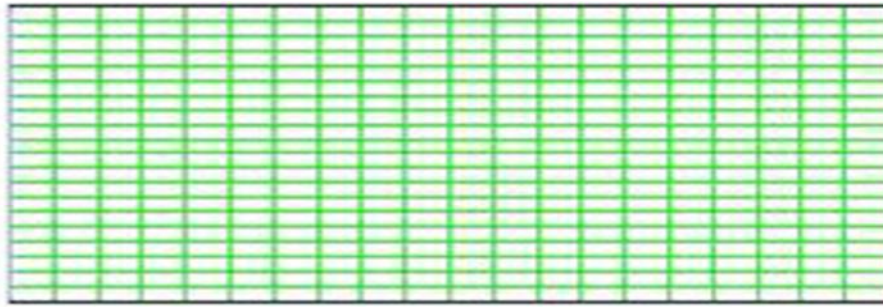


Figure (IV.2) : maillage uniforme

On considère un écoulement de poiseuille 2D. C'est un écoulement laminaire plan parallèle dans une conduite bidimensionnel fini, l'écoulement est stationnaire et uniforme suivant l'axe des x se trouvant dans le plan de symétrie de la conduite. La longueur de la conduite est $L=0.80$ m et son épaisseur $R=0.02$ m.

III.1.2.Les conditions aux limites :

Les conditions aux limites sont :

1. Entrée: la vitesse à l'entrée est de 0,00255 m /s et la masse volumique est 988 kg / m³.
2. Sortie: pression relative égale à 0 Pascal;
3. Mur: paroi fixe sans glissement;

Axe: axisymétrique avec une seule phase (sans nanoparticules)

III.1.3.Propriétés des composants :

Fluide de base	masse volumique (kg/m ³)	Viscosité (kg/ (m.s))	Chaleur Spécifique (J/ (kg.K))	Conductivité thermique (W/m.K)
Eau	998.2	0.001003	4182	0.6

Tableau (IV.1) : propriétés de l'eau

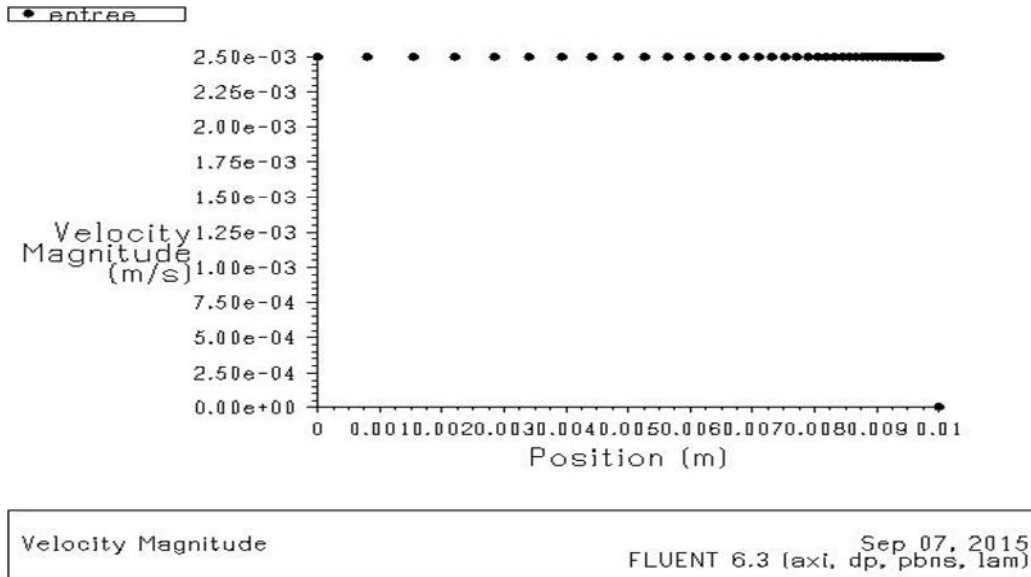
Matériau de la conduite	masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/ (kg.K))	Conductivité thermique (W/m.K)
Aluminium	2719	871	202.4

Tableau (IV.2) : propriétés de la paroi

III.1.4. Résultats de la simulation de l'écoulement de poiseuille en régime laminaire :

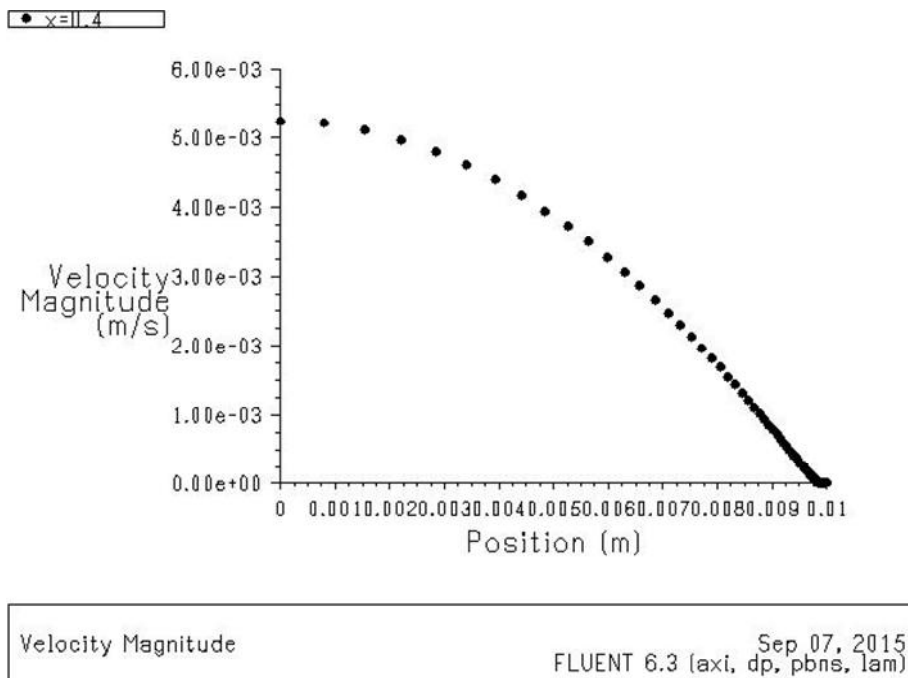
III.1.4.1. Courbe de la vitesse à l'entrée :

La vitesse d'entrée comme indiquée ci-dessous est égal à $M_{oyen} = 0.00251 \text{ m/s}$



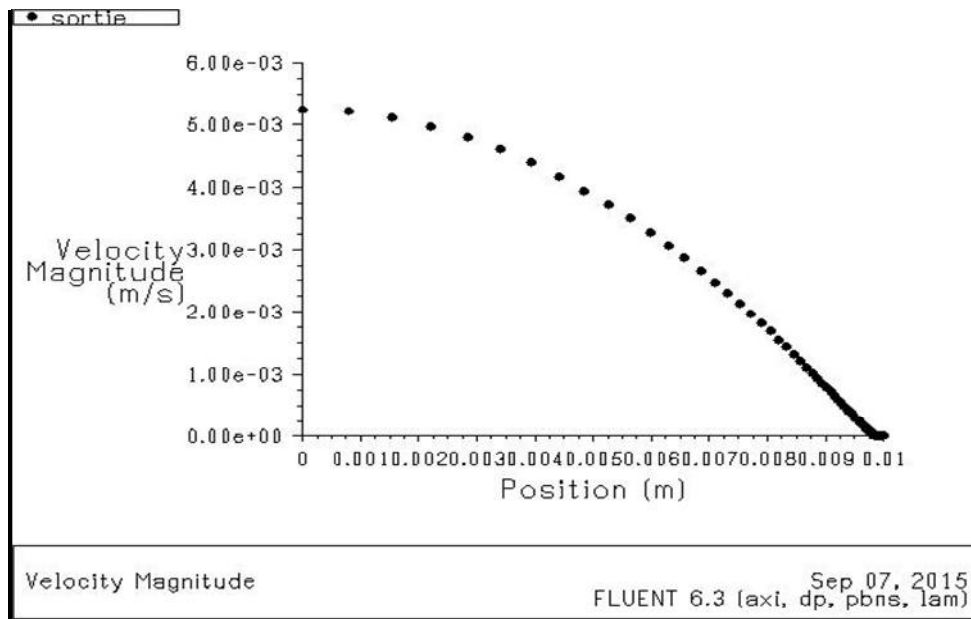
Figure(IV.3) : vitesse à l'entrée dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)

III.1.4.2. Courbe de la vitesse au milieu de la conduite à x=0.4m :



Figure(IV.4) : vitesse au milieu de la conduite (x=0.4m) dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)

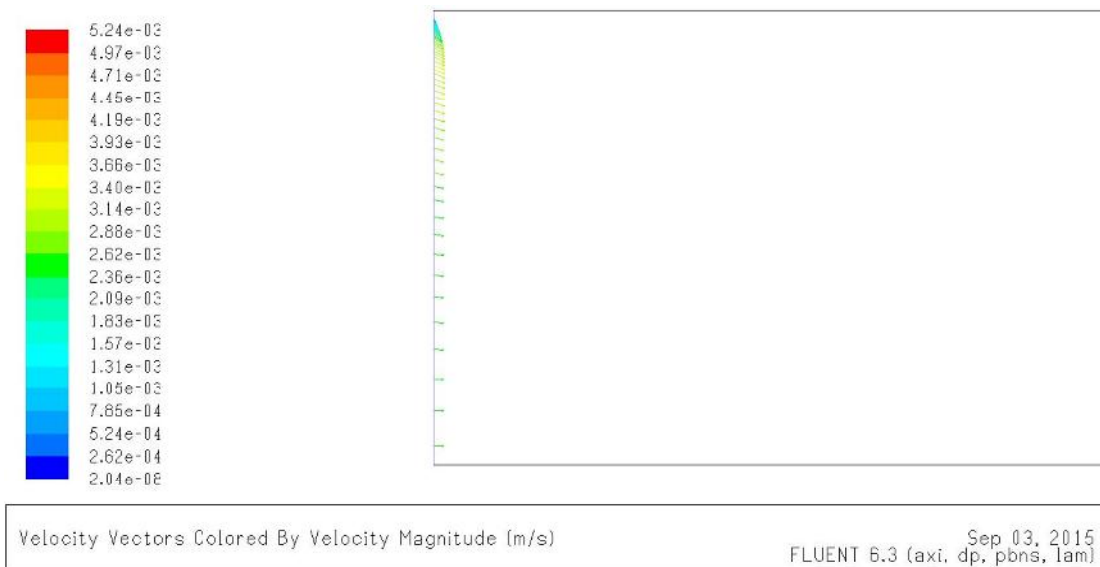
III.1.4.3. Courbe de la vitesse à la sortie x=0.8m :



Figure(IV.5) : vitesse à la sortie (x=0.8) dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)

La courbe présentée sur la figure (IV.4) et la figure (IV.5) dans le cas du régime laminaire conduit à une observation très importante sur le profil de vitesse dans la conduite. Il apparaît que le profil de vitesse prend une forme parabolique à la sortie de la conduite et à un régime établi tout le long de la conduite.

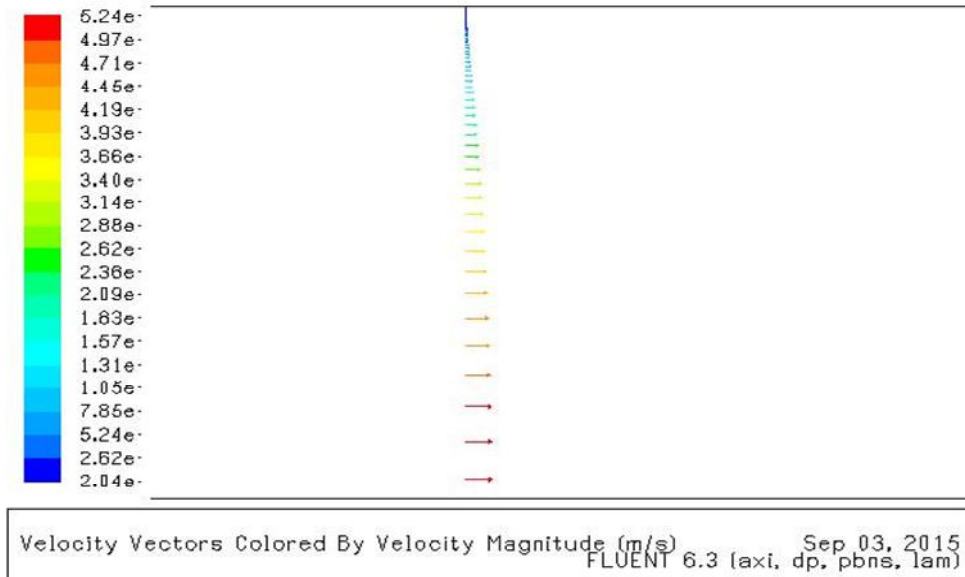
III.1.4.4. Champs de vitesse à l'entrée de la conduite :



Figure(IV.6) : Champs de vitesse à l'entrée de la conduite dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)

III.1.4.5. Champs de vitesse au milieu de la conduite :

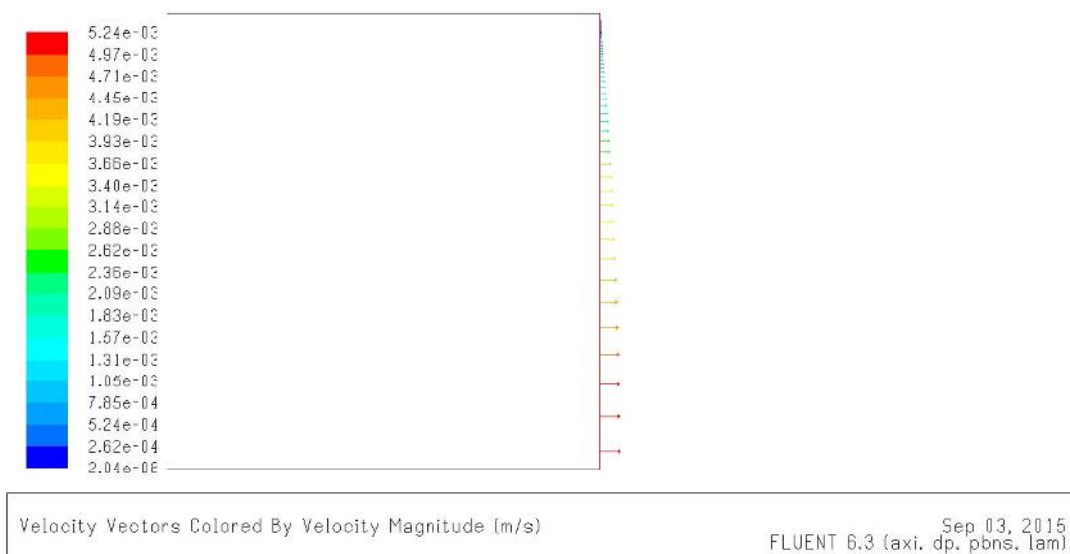
Le champ de vitesse est parabolique à l'intérieure de la conduite. Vitesse nulle a la paroi et maximale sur l'axe



Figure(IV.7): Champs de vitesse au milieu de la conduite dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)

III.1.4.6. Champs des vitesses à la sortie :

Le champ de vitesse est parabolique à la sortie de la conduite. Vitesse nulle à la paroi et maximale sur l'axe.



Figure(IV.8) : Champs des vitesses à la sortie dans l'écoulement laminaire sans nanoparticules (une seule phase)

III.1.5. Résultats de la simulation de l'écoulement de poiseuille en régime turbulent :

III.1.5.1. Courbe de la vitesse à l'entrée :

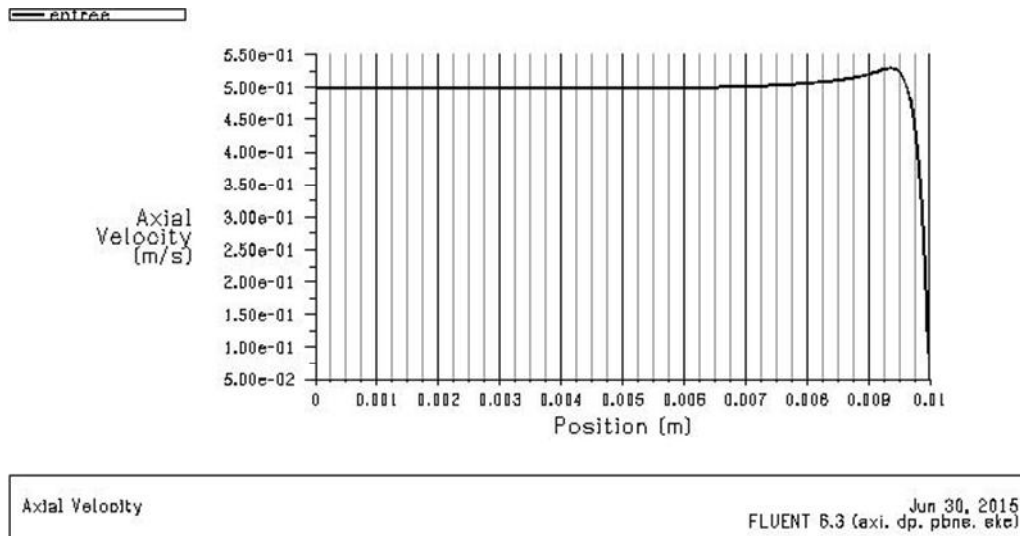


Figure (IV.9) : vitesse à l'entrée dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)

III.1.5.2. Courbe de la vitesse à la sortie à x=0.8m :

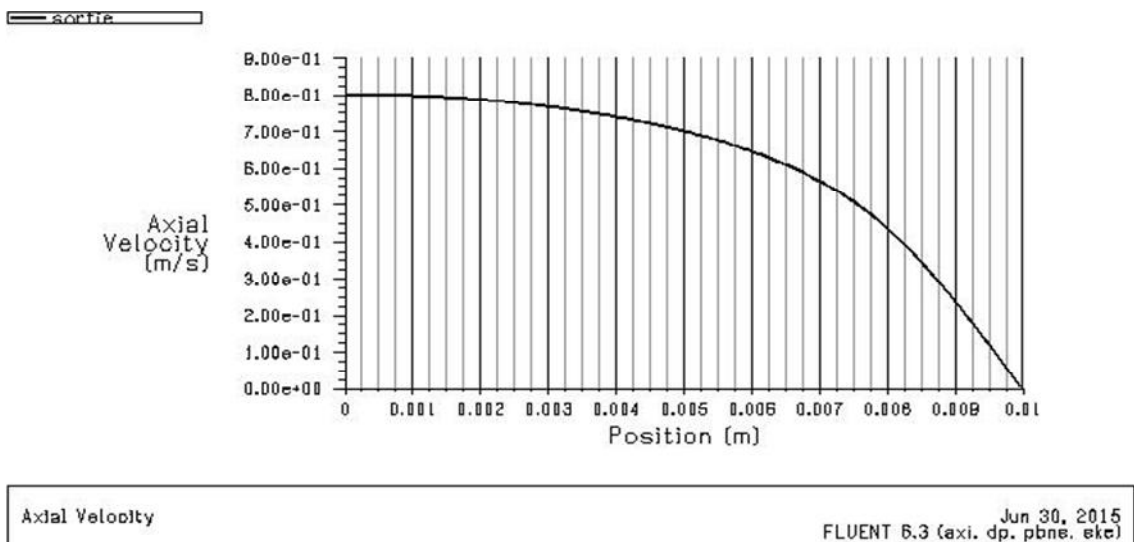


Figure (IV.10) : vitesse à la sortie dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)

Comme nous pouvons voir la courbe obtenu n'est pas parfaitement parabolique comme c'est le cas dans un régime laminaire

III.1.5.3.Champs des vitesses à l'entrée :

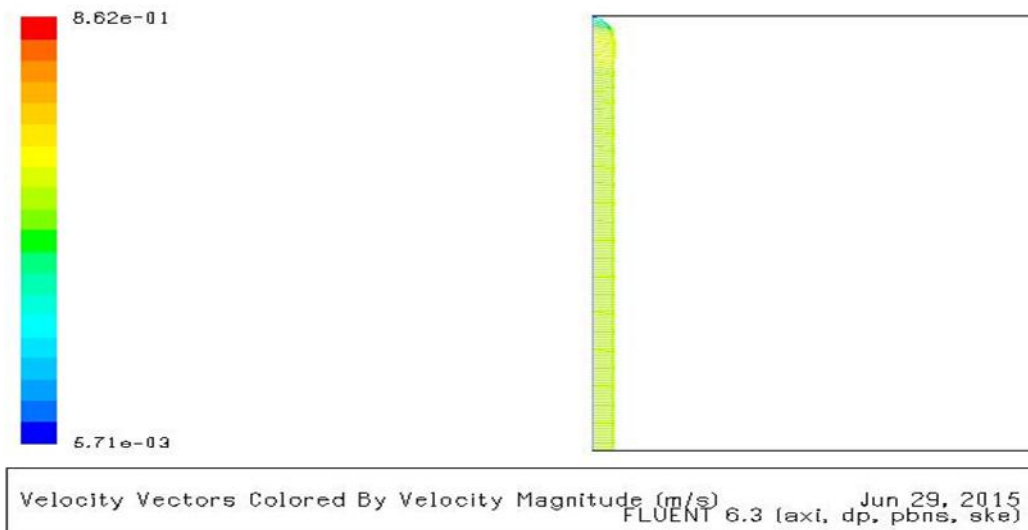


Figure (IV.11) : champs des vitesses à l'entrée dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)

Lorsqu'un écoulement en conduite est turbulent ($Re > 2000$), le profil de vitesse n'est plus parabolique comme c'est le cas en régime laminaire. Il s'uniformise sur un large domaine autour de l'axe et présente en conséquence une brusque variation au voisinage des parois voir **figure (IV.10)**. Il en résulte que les propriétés de la paroi jouent un rôle important et que notamment sa rugosité devient un paramètre non négligeable.

III.1.5.4.Champs des vitesses au milieu à $x=0.4$:

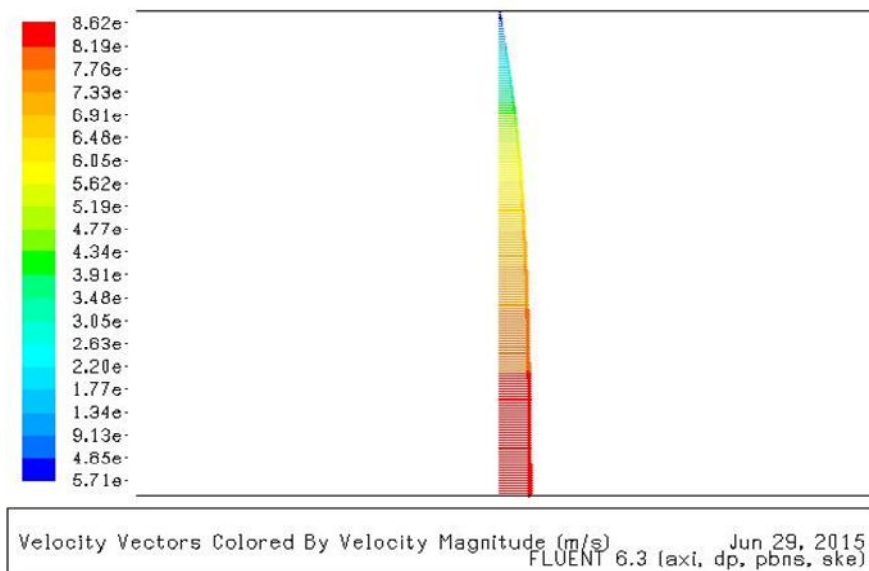


Figure (IV.12) : champs des vitesses au milieu dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)

III.1.5.5. Champs des vitesses à la sortie :

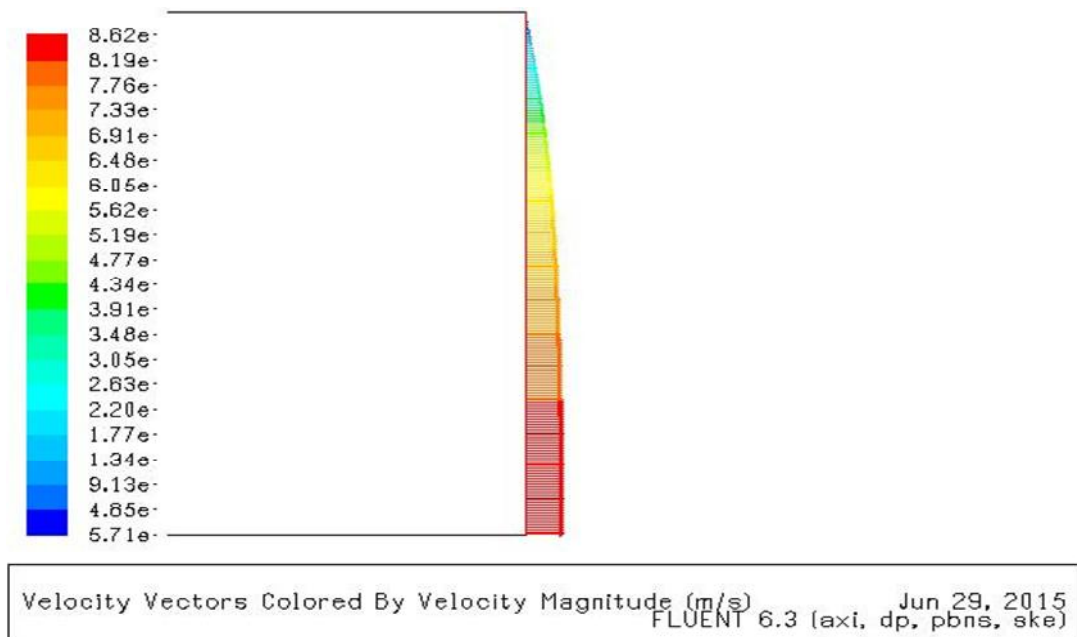
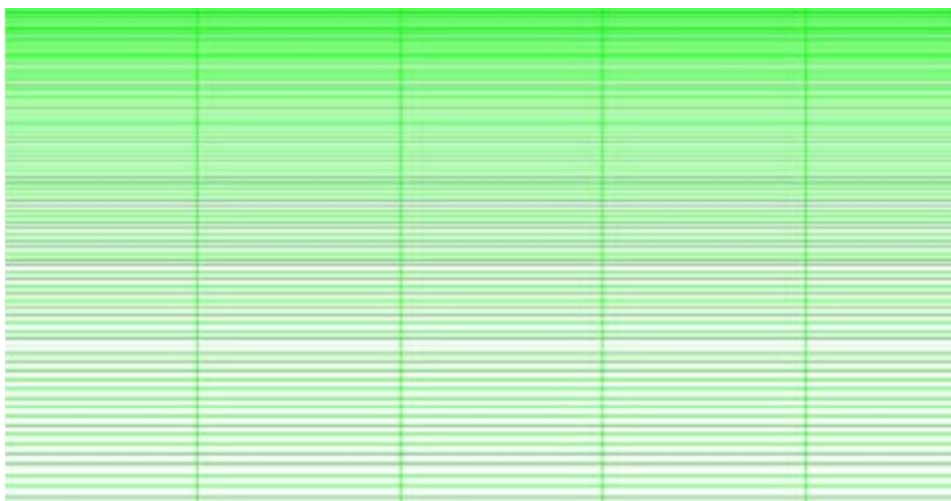


Figure (IV.13) : champs des vitesses a la sortie dans l'écoulement turbulent sans nanoparticules (une seule phase)

III.2. Régime laminaire et turbulent avec deux phases (injection des nanoparticules):

III.2.1. Maillage de la géométrie :

afin de mieux comprendre le comportement des nanoparticules, près de la paroi une meilleure résolution ou relativement à mailles fines dans la zone proche de la paroi est nécessaire. Un maillage non uniforme est utilisé la figure (IV.14) illustre une maille quadratique non uniforme.



figure(IV.14) : maillage non uniforme

Direction	Nombre de Divisions	Uniformes ou Non-uniformes	La plus petite division	La plus grande division
rayon (r)	200	Non-uniforme	4.707 μm	200 μm
Axe (x)	1000	Uniforme	800 μm	800 μm

Tableau (IV.3) : caractéristiques du maillage non uniforme

III.2.2. Résultats de la simulation en régime laminaire avec deux phases :

III.2.2.1. Configuration de la simulation :

Propriétés des nanoparticules :

Nanoparticules	masse volumique (kg/m ³)	Diamètre (nm)	Conductivité thermique (W/m·K)
Carbone	2000	10	0.33

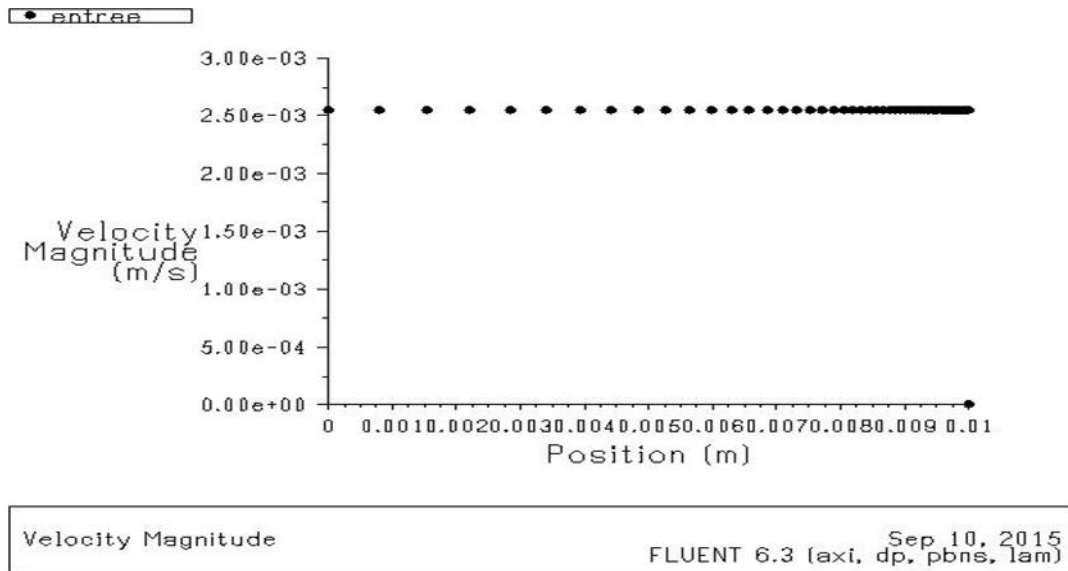
Tableau (IV.4) : Propriétés des nanoparticules (carbone)

III.2.2.2. Conditions aux limites pour les particules dispersées dans le cas du régime laminaire:

1. Entrée: 100 injections de particules uniformément réparties .
2. Sortie: pression relative égale à 0 Pascal.
3. mur: paroi fixe, le mur reflète les particules .
4. Axe: axisymétrie.

III.2.2.3. Courbe de la vitesse à l'entrée :

La vitesse d'entrée comme indiquée ci-dessous est égal à $M_{oyen} = 0.00251 \text{ m/s}$



Figure(IV.15): vitesse à l'entrée dans l'écoulement laminaire avec deux phases

III.2.2.4. Champs des vitesses au milieu à x=0.4 :

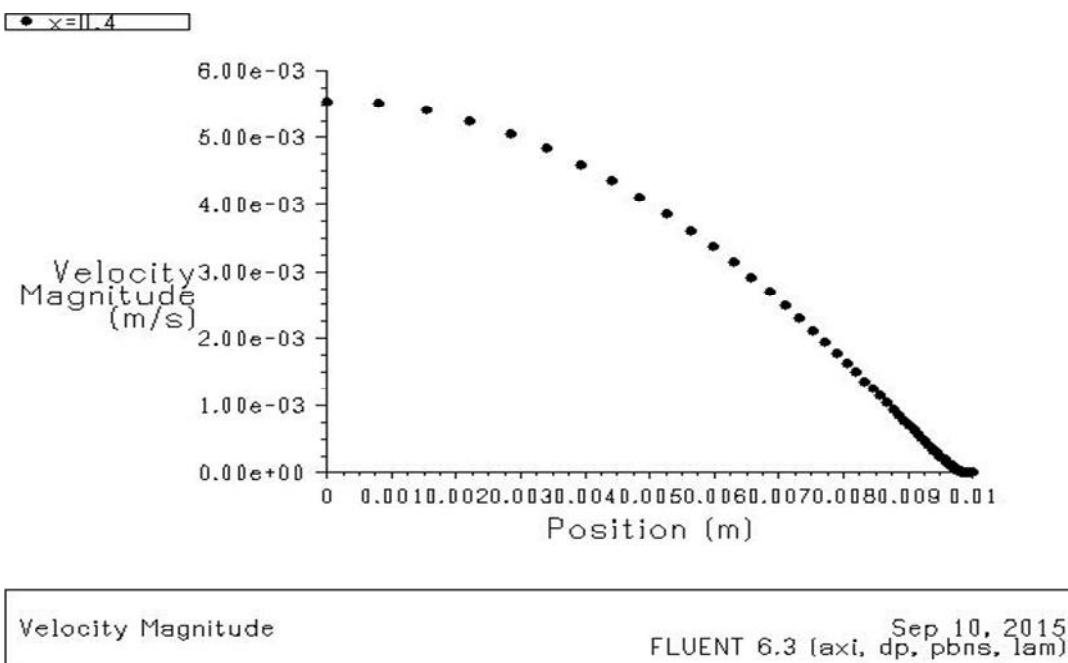


Figure (IV.16) : vitesse au milieu de la conduite (x=0.4m) dans l'écoulement laminaire avec nanoparticules

III.2.2.5. Courbe de la vitesse à la sortie : $x=0.8m$

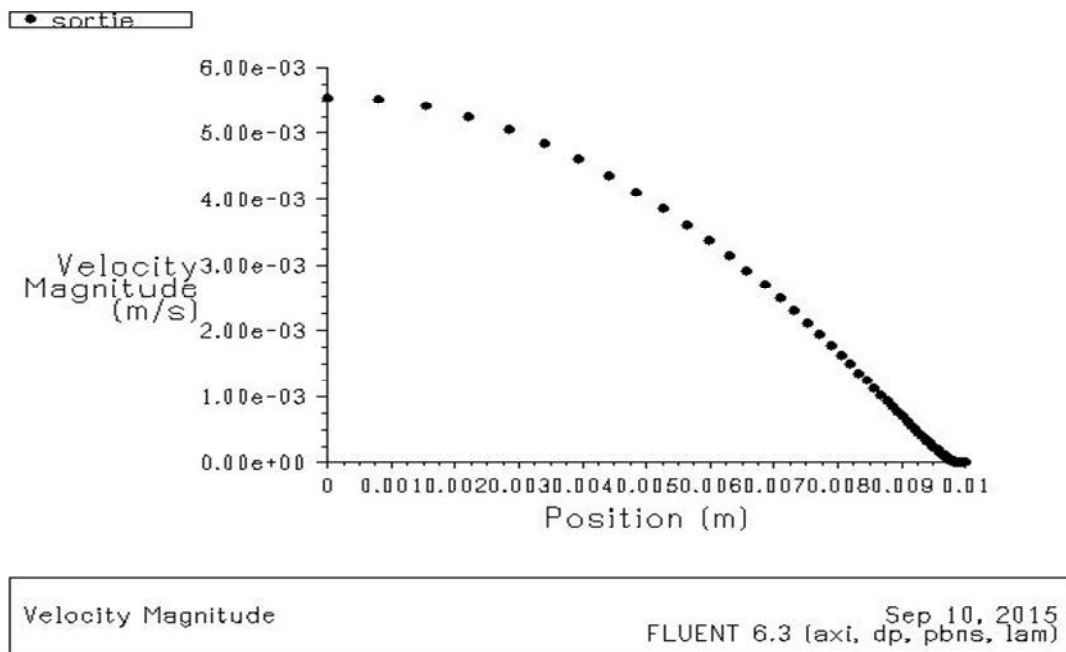


Figure (IV.17) : vitesse à la sortie dans l'écoulement laminaire avec nanoparticules

La courbe présentée sur la figure (IV.16) et la figure (IV.17) dans le cas du régime laminaire avec nanoparticules a une même allure avec la courbe présentée en régime laminaire sans nanoparticules.

III.3. Comparaisons des résultats de simulation pour le régime laminaire avec et sans nanoparticules :

III.3.1. Comparaison des résultats de la vitesse à l'entrée:

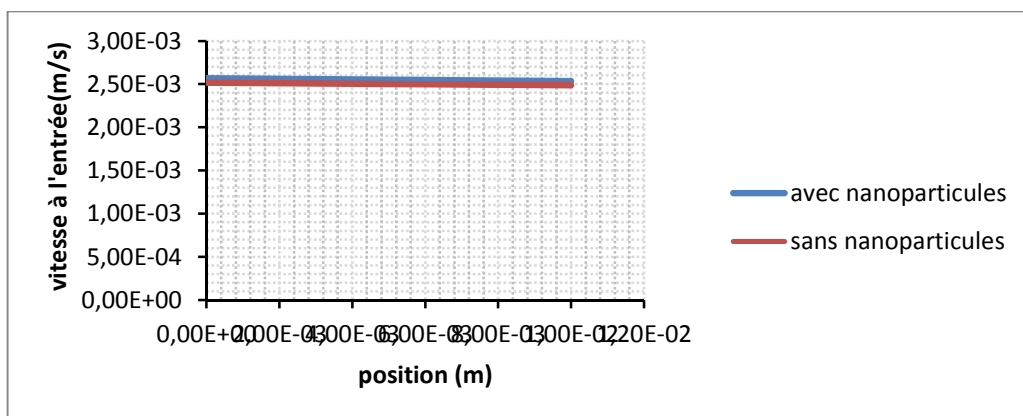


Figure (IV.18) : comparaison entre les vitesses a l'entrée dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules

Les vitesses d'entrées sont les mêmes.

III.3.2. Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.2$:

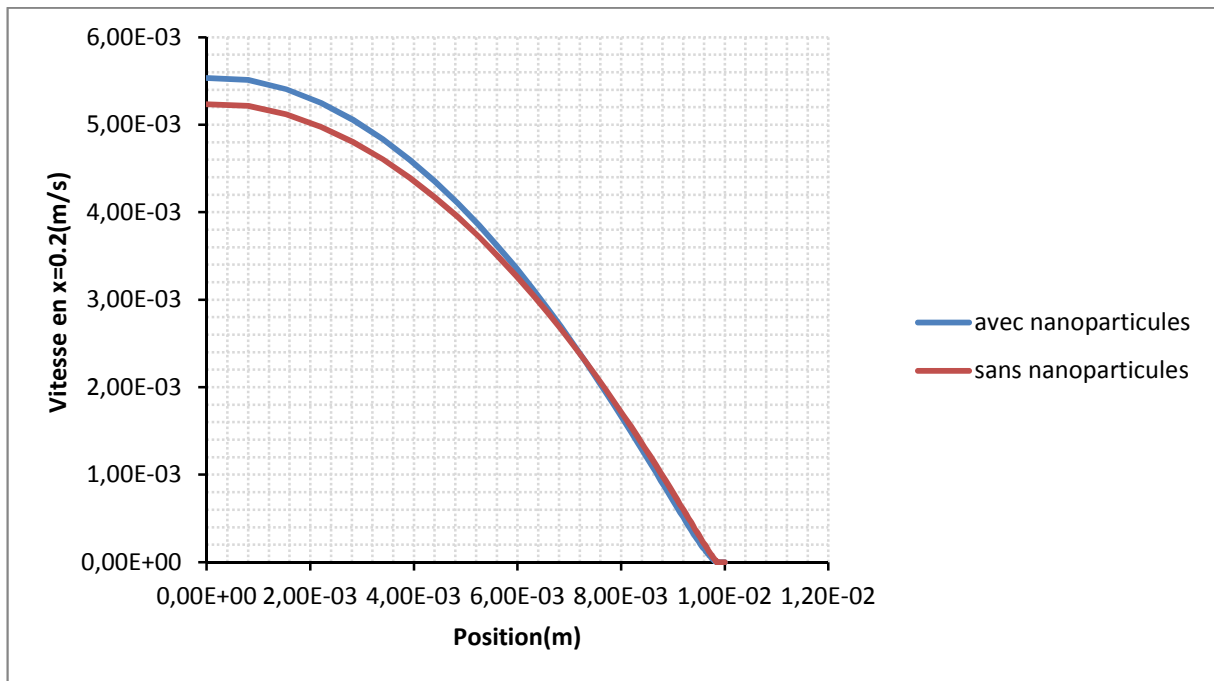


Figure (IV.19) : comparaison entre les vitesses en $x=0.2$ dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules

III.3.4. Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.4$:

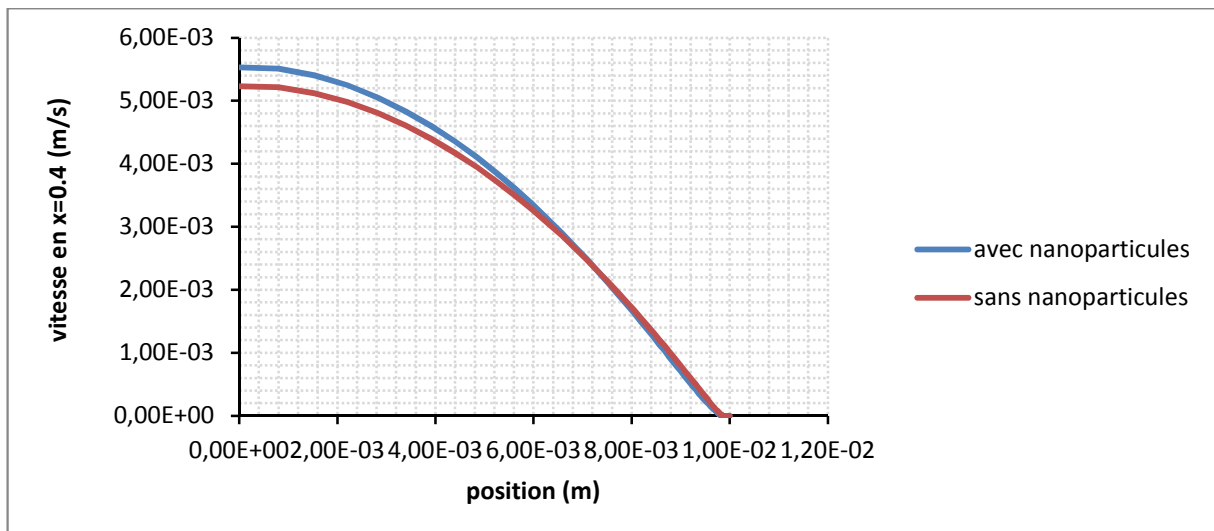


Figure (IV.20) : comparaison entre les vitesses en $x=0.4$ dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules

III.3.5. Comparaison des résultats de la vitesse en $x=0.6$:

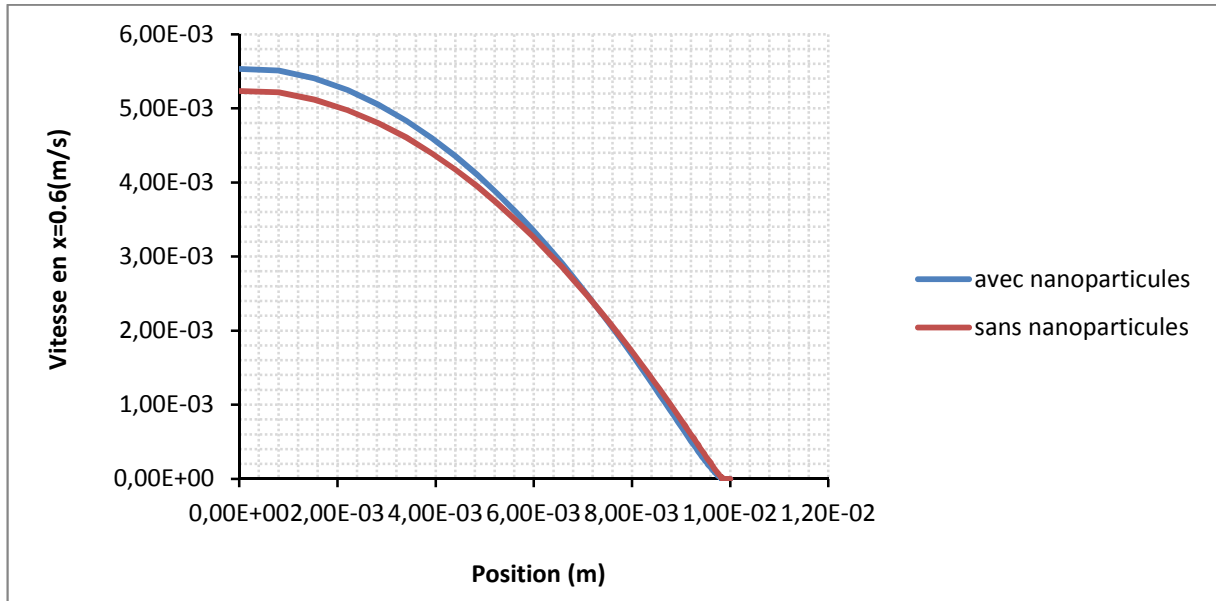


Figure (IV.21) : comparaison entre les vitesses en $x=0.6$ dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules

III.3.6. Comparaison des résultats de la vitesse a la sortie :

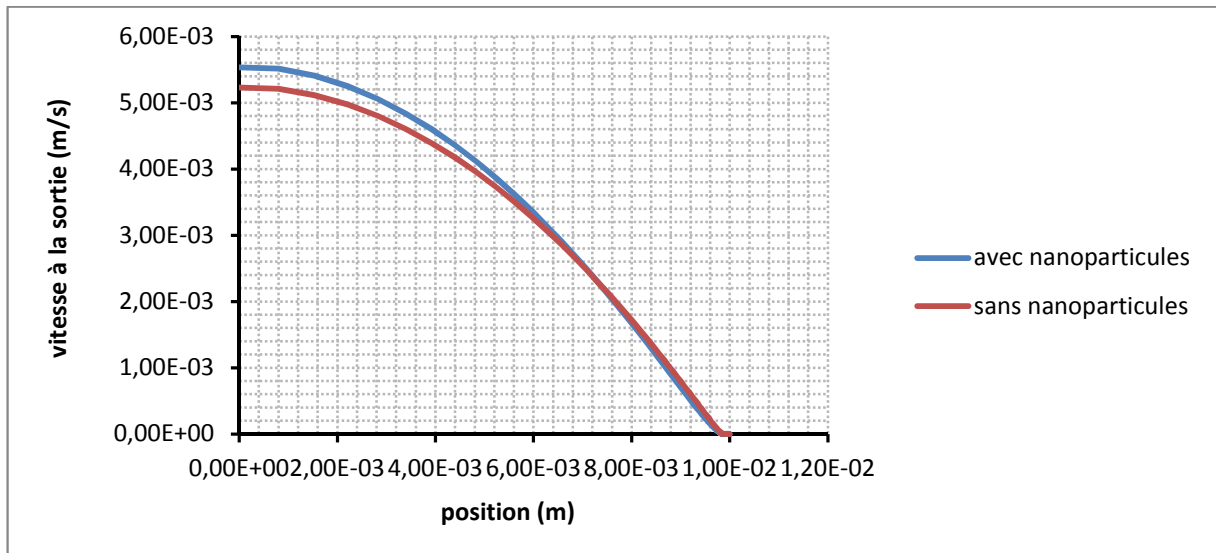


Figure (IV.22) : comparaison entre les vitesses à la sortie dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules

III.3.7. Agrandissement de la figure (sortie) :

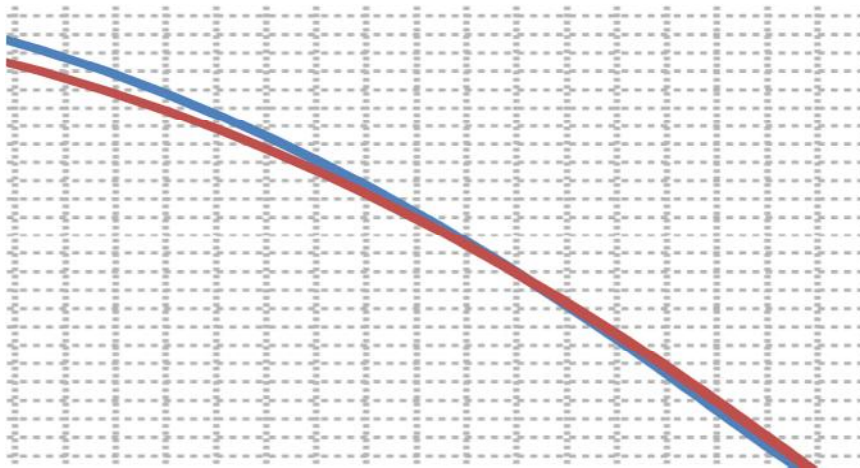
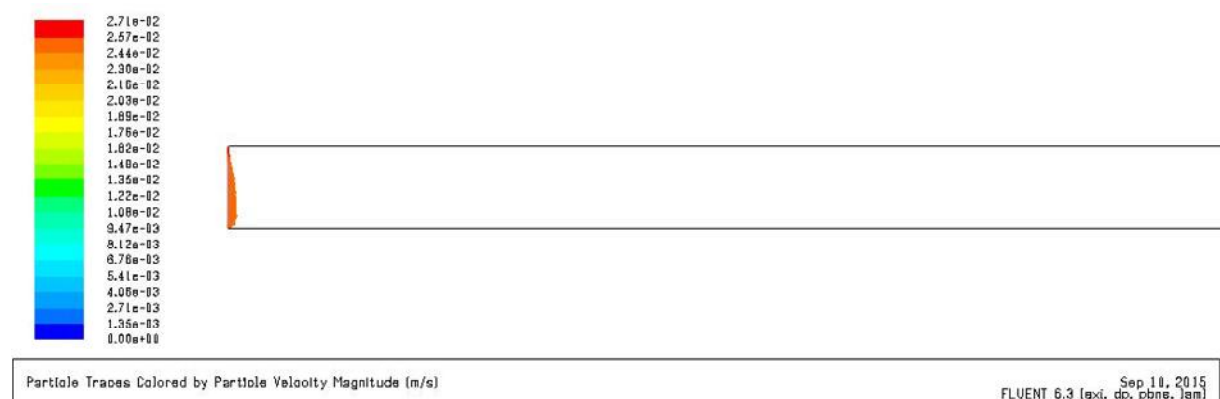


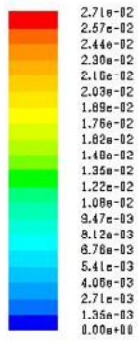
Figure (IV.23) : agrandissement de l’interaction des courbes de comparaison entre les vitesses à la sortie dans le régime laminaire avec et sans nanoparticules

On observe dans les figures (IV.19), (IV.20), (IV.21), (IV.22) et (IV.23) une légère différence entre les valeurs des vitesses des fluides avec et sans nanoparticules. Où, la vitesse du nanofluides est supérieure en région centrale de la conduite par rapport au fluide (eau). Cela peut nous mener à comprendre que les nanoparticules accélèrent le mouvement du fluide, d’ailleurs, la vitesse est maximale au centre ou l’on trouve une plus grande concentration de nanoparticules comme nous le montre la simulation.

III.3.8. Les images suivantes représentent le suivi des particules en régime laminaire :



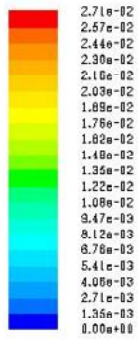
24(a)



Particle Tracks Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 [axi, dp, pbns, lam]

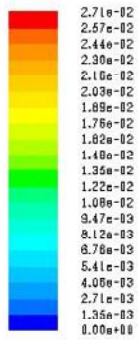
24(b)



Particle Tracks Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 [axi, dp, pbns, lam]

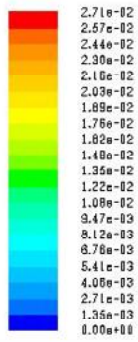
24(c)



Particle Tracks Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 [axi, dp, pbns, lam]

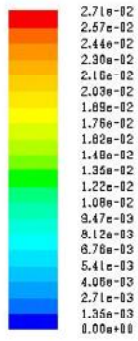
24(d)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 [axi, dp, pbns, lam]

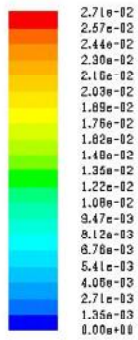
24(e)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 [axi, dp, pbns, lam]

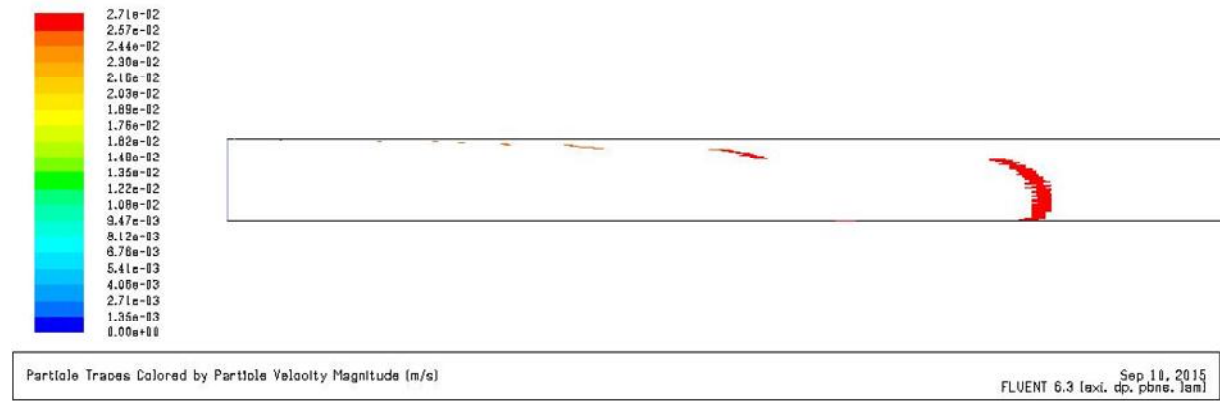
23(f)



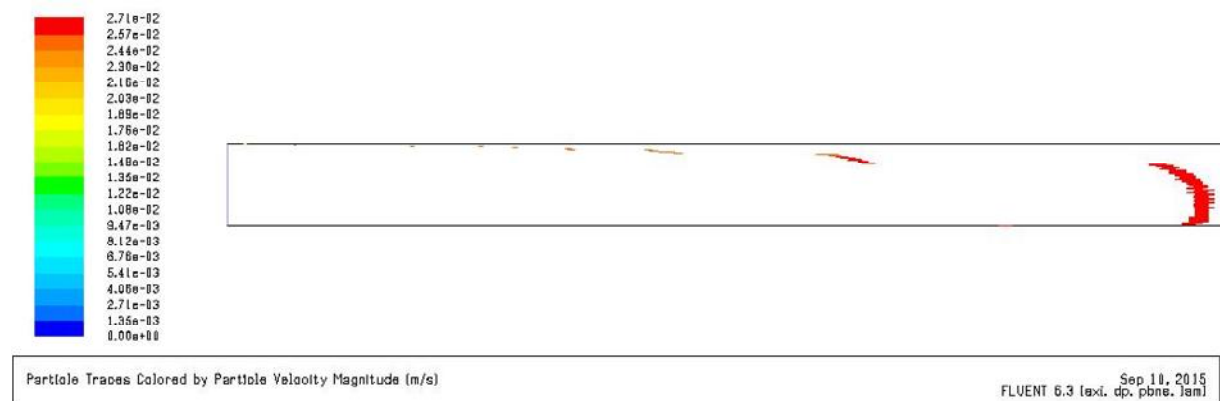
Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 [axi, dp, pbns, lam]

24(g)



24(h)



24(i)

Figures (IV.24 (a, b, c, d, e, f, g, h, i)) : suivi des particules dans le régime laminaire

Comme le montre la simulation les particules sont uniformément injectée à l'entrée mais ils vont en aval, les particules ont tendance à se déplacer l'égerment vers la ligne centrale (surface inférieure de la conduite) en prenant de la vitesse.

Le virement de la couleur orange au rouge signifie que les nanoparticules prennent de la vitesse au long de l'écoulement dans la conduite.

IV. Résultats de la simulation pour le régime turbulent avec nanoparticules :

IV.1. Configuration de la simulation :

Ce travail concerne la migration des particules dans un régime turbulent en utilisant le model K- . Les conditions aux limites pour l'eau sont :

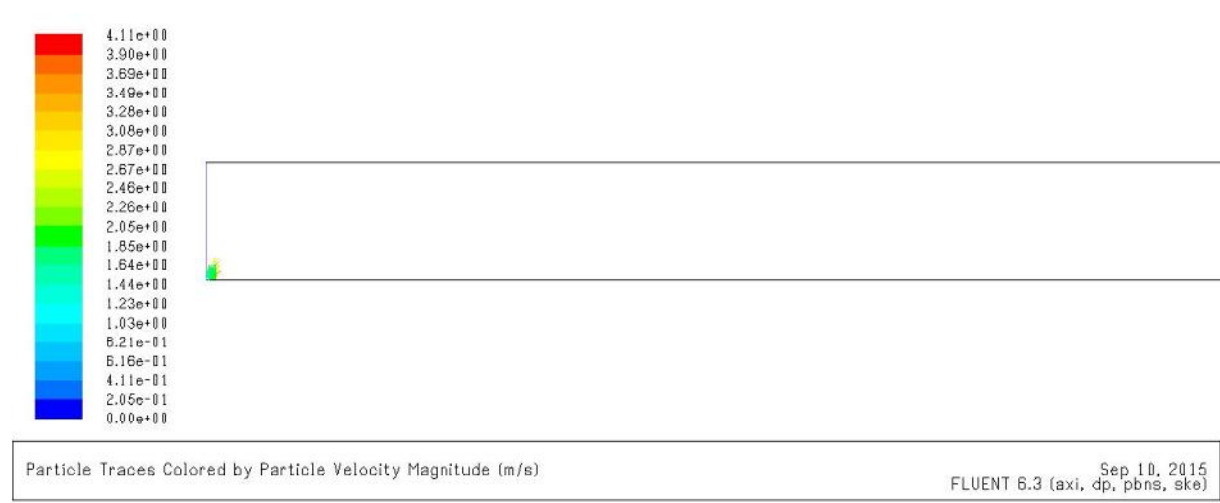
Entrée : la vitesse à l'entrée est de 1.19m/s

Sortie : pression de 0pa

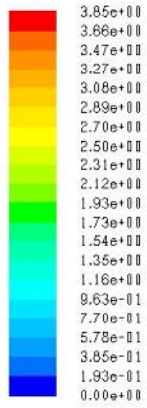
Paroi : paroi fixe sans glissement

Axe : axisymétrique

IV.2. Les images suivantes représentent le suivi des particules en régime turbulent :



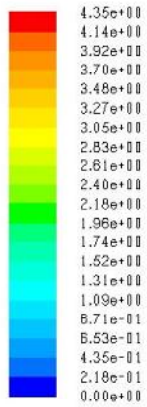
25(a)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

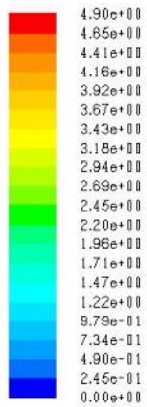
25(b)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

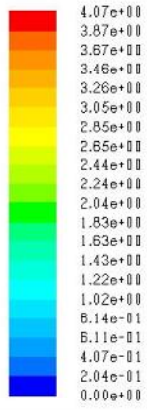
25(c)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

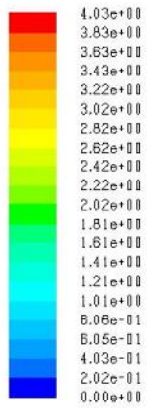
25(d)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

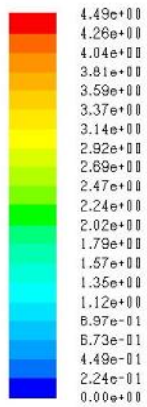
25(e)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

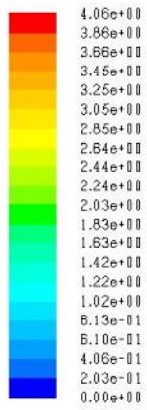
25(f)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

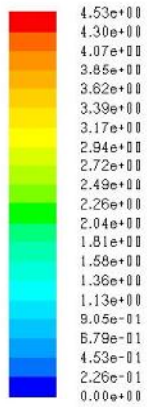
25(g)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

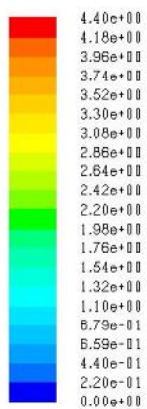
25(h)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

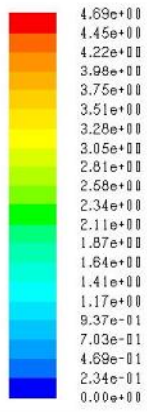
25(i)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

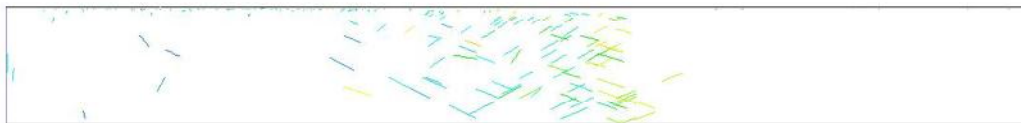
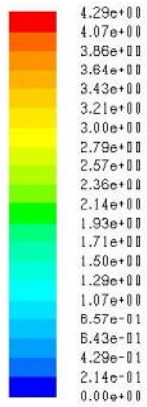
25(j)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

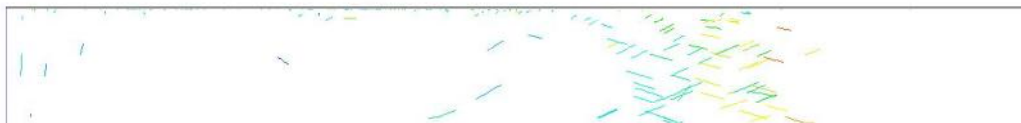
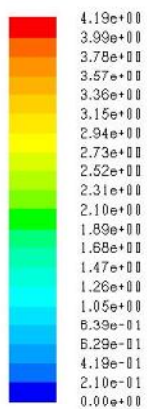
25(k)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

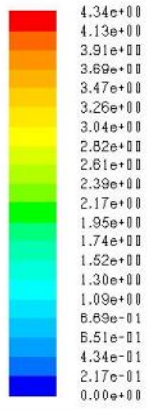
25(l)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

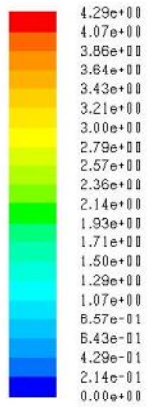
25(m)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

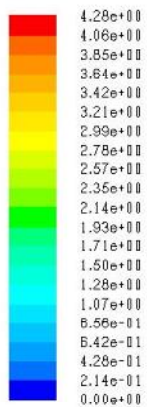
25(n)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

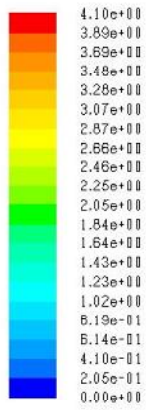
25(o)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

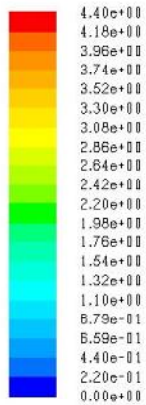
25(p)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

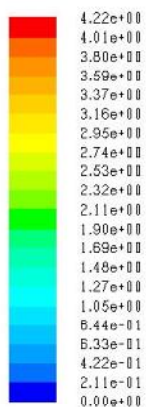
25(q)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

25(r)



Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Sep 10, 2015
FLUENT 6.3 (axi, dp, pbns, ske)

25(s)

Figures (IV.25 (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s)) : suivi des particules dans le régime turbulent

On remarque d'après les figures (IV.24 (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s)) que contrairement au régime laminaire, dans le régime turbulent il n'y a pas de concentration des particules au centre de la conduite par contre, un mouvement très agité conduit à un rebondissement des particules sur la paroi ce qui pourrait régler le problème de sédimentation des particules micrométrique constaté par plusieurs chercheurs.

V. Conclusion :

La simulation nous a montré que lors d'un écoulement en régime laminaire sans nanoparticules le profil des vitesses prend une forme parabolique à la sortie contrairement au régime turbulent où il s'uniformise sur un large domaine.

La simulation de l'écoulement du nanofluide en régime laminaire nous a montré que les nanoparticules accélèrent le mouvement du fluide et que ces dernières se concentrent au centre de la conduite contrairement au régime turbulent où leur mouvement est chaotique et suit le profil stochastique du régime en question.

CONCLUSION GENERALE :

Le transport des nanoparticules s'intègre essentiellement dans le domaine de la nanotechnologie qui est un domaine d'études récent et très délicat développé depuis les années 90 et qui connaît un grand essor ces dernières années.

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire porte sur la simulation numérique des écoulements de nanofluides dans une conduite horizontale de petites dimensions. A titre d'applications, un code CFD Fluent, basé sur la méthode des volumes finis, est utilisé pour visualiser la distribution de nanoparticules dans de l'eau en écoulement. Pour ce faire, deux types d'injection de nanoparticules de carbone (uniforme et aléatoire), pour deux régimes d'écoulement d'eau (laminaire et turbulent), ont été réalisés. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus en l'absence de nanoparticules. Les résultats qui se dégagent après cette étude sont :

- En régime laminaire, le profil de vitesse, à la sortie d'un écoulement de poiseuille, est de forme parabolique.
- En régime turbulent, la vitesse à la sortie d'un écoulement de poiseuille n'est pas parabolique mais elle s'uniformise sur un large domaine autour de l'axe.
- En régime laminaire, la comparaison des profils de vitesse correspondant aux écoulements avec et sans nanoparticules montre une légère différence. Par conséquent les nanoparticules accélèrent le mouvement du fluide ce qui peut engendrer l'augmentation du transfert thermique. En outre, une concentration importante des particules au centre de la conduite a été aperçue.
- En régime turbulent, nous avons remarqué que les nanoparticules suivent un mouvement chaotique. Toutes les particules sont complètement balayées, ce qui pourrait régler le problème de sédimentation créé par les particules micrométriques.
- Lors des simulations effectuées sur le code Fluent, nous avons constaté que :
 - Pour fraction volumique supérieur à 10%, un problème de divergence surgit.
 - pour pouvoir tracer les trajectoires des particules, la taille de ces dernières doit être supérieure à un micron.

D'autres études plus poussées s'avèrent nécessaires pour confirmer ou infirmer certains résultats. Il est recommandé de reprendre le travail avec d'autres types de nanoparticules avec différentes dimensions.

Références bibliographiques

- [1] J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu, and L.J. Thompson. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 78(6): 718-720, 2001.
- [2] Tsai C.Y, H, T Chien, P. P Ding, B Chan, T Y Luh, P. H Chen, Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, *Material Letters* 58(2004)1461-1465.
- [3] Tzeng S. C, C. W Lin and K.D Huang, Heat Transfer Enhancement of nanofluids in Rotary Blade Coupling of Four-Wheel Drive Vehicles. *Acta Mechanica* 179(2005):11-23.
- [4] You S. M, J. H Kim and K.H Kim, Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in pool Boiling Heat Transfer. *Applied Physics Letters* 83(2003):pp.3374-3376.
- [5] Vassallo P, R Kumar and S D'Amico, Pool Boiling Heat Transfer Experiments in Silica-Water Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47(2004):407-411.
- [6] Jordan A, R Scholz, P Wust H FaMng and R Felix, Magnetic Fluid Hypothermia (MFH): Cancer Treatment with AC Magnetic Field Induced Excitation of Biocompatible Super paramagnetic Nanoparticles. *Journal of Magnetic Materials* 201(1999):413-419.
- [7] S.U.S. Choi. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Developments and applications of Non-Newtonian Flows. D.A. Siginer and H.P. Wang (Eds.), FED-vol. 231/MD-vol. 66, ASME, New York, 99-105, 1995.*
- [8] P. Vadasz. Heat conduction in nanofluids suspension. *Journal of Heat Transfer*, 128, 465, 2006.
- [9] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma. Alteration of Thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing Ultra-fine Particles (dispersion of Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ Ultra-fine particles). *NetsuBussei(Japan)*, 7(4): 227-233, 1993.
- [10] J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, L.J. Thomson, and S. Lee. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 457, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, 3-11, 1997.

- [11] Wen D, Y. Ding, Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids), *Journal of Thermo-physics and Heat Transfer* 18 (4) (2004) 481-485.
- [12] Heris S.Z, S GhEtemad and M.N Esfahany, Experimental Investigation of Oxide Nanofluides Laminar Flow Convective Heat Transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33(2006):529-535.
- [13] Wang X.Q, X Xu, S.U.S Choi, (1999), Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13 (4) 474- 480.
- [14] Maïga S.E.B, C.T Nguyen, N. Galanis, and Roy, Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a Uniformly Heated Tube, *Superlattices and Microstructures* 35 (2004) : 543-557.
- [15] Roy G, C.T Nguyen, 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 (2004) 497-511.
- [16] Maïga S.E.B, S.J Palm, C.T Nguyen. Heat transfer Enhancement by using Nanofluids in Forced Convection Flows. I. *Journal of Heat and Fluids Flow* (2005).
- [17] Vajjha R.S D.K Das, Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *I.J. of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 4675-4682.
- [18] Hamilton R.L, and O.K Crasser, Thermal Conductivity of heterogeneous Two Component System. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 1 (1962): 187-191.
- [19] Koo J and C Kleinstreuer, a New Thermal Conductivity Model for Nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research* 6 (2004) 577-588.
- [20] Xie H, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu (2002), Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, *Journal of Applied Physics* 91 4568-4572.
- [21] Xie H, H. Lee, W. Youn, M. Choi (2003), Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their spherical and cylindrical nanoparticles, *Experimental Thermal and Fluid Science* 31 (2007) 593-599.
- [22] Lee S and S.U.S Choi, Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling systems, in (1996): *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Atlanta, USA.*

- [23] Masuda H, A Ebata, K Teramae and N Hishinuma, Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 , and TiO_2 -water based nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 44 (4) (2005) 367-373.
- [24] Wen D, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (24) (2004) 5181.
- [25] Yurong He, Y Men, Y Zhao, H Lu, Y Ding, Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO_2 nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1965- 1972.
- [26] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, and C. Yang. Thermal conductivity of nanoparticle suspensions. *International Journal of thermal science*, Singapore 2007.
- [27] Choi S.U.S Z.G Zhang W Yu; F.E loockwood, E.A Grulke (2001), Anoumalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions, *Applied physics letters* 79225- 2254.
- [28] Das S.K N Putta, P Thiesen, W Roezel (2003) Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *A SME Trans .J .Heat Transfer* 125 567-574.
- [29] Xuan Y, Q Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Transfer* 21 (2000) 58-64.
- [30] Xuan Y, Q Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat Transfer* (2003) 125 152-155.
- [31] Dittus, F.W. , and Boelter ,L.M.K. , Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type, *University of California Publications in Engineering*, vol2, pp. 443-461,1930.
- [32] Ding Y, H Alias, D Wen, R.A Williams (2005), Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes, *International Journal of heat and Mass Transfer* 49 240-250.
- [33] Assael M.J, C.F Chen, I.N Metaxa, W.A Wakeham, Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, in: 15th Symposium on Thermophysical Properties, National Institute of Standards (2003), University of colorado, Boulder, USA.
- [34] J.C. Maxwell. A Treatise on electricity and magnetism, *Clarendon Press*, U.K., 1891.
- [35] R.L. Hamilton and O.K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two Component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(3), 187191, 1962.