



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Techniques de production Industrielle

Présenté par :

BRIKI Saad Saoud & MEKEFES Abdelbasset

Thème

ETUDE NUMERIQUE DE L'EFFET DES NANOPARTICULES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR DANS UNE CAVITE REPLIE DE NANOFLUIDE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BAKHTI Fatima Zohra	MCA	Président
BENKHERBACHE Souad	MCA	Encadreur
LATRACHE Mohamed	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020

SOMMAIRE

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

I.1.1 Introduction 3

I.1.2. Transfert de chaleur par conduction 3

I.1.3. Transfert de chaleur par rayonnement 3

I.1.4. Transfert de chaleur par convection 4

I.2. les nanofluides 4

I.2.1 Définition 4

I.2.2. Types de nanoparticules 5

I.2.3. Fabrication et préparation des nanofluides 6

I.2.4. Les applications des nanofluides 8

I.2.4.1. Autres applications 8

I.2.5. Les avantages et les inconvénients 8

I.2.5.1. Les avantages des nanofluides 8

I.2.5.2. Les inconvénients des nanofluides 9

I.3. Agrégation des nanoparticules 9

I.4. Caractéristiques thermo-physiques des nanofluides 9

I.4.1. Fraction volumique (ϕ) 10

<i>I.4.2.Lamasse volumique</i>	11
<i>I.4.3.La conductivité thermique</i>	11
<i>I.4.3.1.Modèle de Maxwell</i>	11
<i>I.4.3.2.Modèle de Hamilton & Crosser</i>	12
<i>I.4.3.3.Modèle de Yu et Choi</i>	12
<i>I.4.4.Viscosité dynamique des nanofluides</i>	12
<i>I.4.4.1.Modèles d'Einstein</i>	13
<i>I.4.4.2.Modèles de Brinkman</i>	13
<i>I.4.4.3.modèle de Batchelor</i>	14
<i>I.4.5.Chaleur spécifique</i>	14
<i>I.4.5.1.Modèle du Pak and Cho (1998)</i>	14
<i>I.4.5.2.Modèle de Xuan (2000)</i>	14
<i>I.4.6.Coefficient d'expansion thermique</i>	15

CHAPITRE II : Formulation Mathématique

<i>II.1.Introduction</i>	16
<i>II.2.Modèle physique et formulation</i>	16
<i>II.2.1.Modèle physique</i>	16
<i>II.3.Conditions aux limites</i>	19
<i>II.4.Propriétés thermo physiques du nanofluide</i>	19
<i>II.5. Calcul du nombre de Nusselt</i>	20

CHAPITRE III : Procédure de résolution avec Fluent

<i>III.1 .Introduction</i>	21
<i>III.2. Présentation du code de calcul</i>	21
<i>III.2.1. GAMBIT</i>	22

III.2.2 .FLUENT	23
III.2.3. Solveur FLUENT	23
III.2.4. Post-processeur FLUENT	24
III.3. Etapes principales de simulation	24
III.3.1. Construction de la géométrie	24
III.3.2. Maillage	26
III.3.3 Les conditions aux limites	27
III.3.4. L'exportation du fichier .Msh	27
III.3.5 Simulation sous FLUENT	28
1- Lancement de Fluent	28
2- Importation de la géométrie (*.msh)	29
3-Vérification du maillage importé	29
4- Lissage du maillage (Smooth and swap the grid)	29
5-Vérification de l'échelle	30
6- Affichage de la grille	30
7- Choix du solveur	30
8- L'équation de l'énergie	31
9-Choix du modèle de turbulence	31
10-Définition des caractéristiques du fluide	32
11-Operating conditions	32
12- Conditions aux limites usuelles	33
13- Initialisation du calcul	33
14- Choix des critères de convergence	33
15- Lancement du calcul	34

<i>16- Allures de l'évolution des résidus de calcul</i>	34
<i>17- Visualisation des résultants</i>	35
<i>18- Sauvegarde de fichier</i>	36
III.4. Conclusion	36
CHAPITRE IV : Procédure de résolution avec Fluent	
<i>IV.1.Introduction</i>	37
<i>IV.2. Propriétés physiques</i>	37
<i>IV.3.Effet du maillage</i>	38
<i>IV.4.Champs de Température</i>	40
<i>IV.4.1. Effet du rapport d'aspect AR</i>	40
<i>IV.4.1.1.Le nanofluide (Al₂O₃)</i>	40
<i>IV.4.1.2.Le nanofluide TiO₂</i>	41
<i>IV.5. Variation des champs de vitesse</i>	44
<i>IV.5.1. Effet du rapport d'aspect AR</i>	44
<i>IV.5.1.1. Le nanofluide Al₂O₃</i>	44
<i>IV.5.1.2. Le nanofluide TiO₂</i>	44
<i>IV.6 Variation de la fonction de courant pour le nanofluide Al₂O₃</i>	45
<i>IV.7. Variation des champs de vitesse Le nanofluide(TiO₂)</i>	47
<i>IV.8.Variation de la fonction de courant Le nanofluide TiO₂</i>	48
<i>IV.9. Effet de la taille des nanoparticules</i>	49
Conclusion générale	55
<i>Références</i>	57

Liste des figures

<i>Figure I.1 : schéma présentatif du transfert de chaleur par conduction</i>	3
<i>Figure I.2 : schéma présentatif de transfert de chaleur par rayonnement</i>	4
<i>Figure I.3 : schéma présentatif de transfert de chaleur par convection</i>	4
<i>Figure I.4: Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone (Bang et Chang, 2005)</i>	6
<i>Figure I.5: Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape (Ribeiro et Gruss 2009)</i>	7
<i>Figure II.1 : Configuration de la cavité à ailettes</i>	17
<i>Figure II.2 : Configuration étudiée (Coupe transversale de l'échangeur de chaleur).</i>	17
<i>Figure III.1 : Interface du Gambit</i>	24
<i>Figure III.2 : Les opérations pour construire une géométrie</i>	25
<i>Figure III.3 : Création des points</i>	25
<i>Figure III.4 : Création des lignes</i>	25
<i>Figure III.5 : Création des faces</i>	26
<i>Figure III.6 : Maillage des faces</i>	26
<i>Figure III.7 : les Conditions aux limites.</i>	27
<i>Figure III.8 : L'exportation du fichier.Msh</i>	28
<i>Figure III.9 : Lancement de Fluent</i>	28

Figure III.10 : Importation de la géométrie	29
Figure III.11 : Vérification du maillage sous Fluent	29
Figure III.12 : lissage de maillage	29
Figure III.13 : Vérification des unités	30
Figure III.14 : Affichage de la grille et vérification des conditions	30
Figure III.15 : Choix du solveur sous Fluent	31
Figure III.16 : Equation de l'énergie	31
Figure III.17 : Choix du type d'écoulement	31
Figure III.18 : Définition des caractéristiques du fluide	32
Figure III.19 : Choix de la pression de référence	32
Figure III.20 : source de chaleur	33
Figure III.21 : Initialisation de la solution	33
Figure III.22 : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence.	34
Figure III.23 : Choix du nombre des itérations	34
Figure III.24 : Allures de l'évolution des résidus de calcul	34
Figure III.25 : Calcul de la température moyenne	35
Figure III.26 : Calcul de la densité du débit massique moyen	35
Figure III.27 : Calcul de la température de mélange	36
Figure III.28 : Obtention des graphes	36

Figure III.29 : Sauvegarde de fichier	36
Figure IV.1 : Variation des températures moyennes en fonction du nombre de nœuds de maillage pour AR=3	39
Figure IV.2 : Variation de nombre de Nusselt en fonction de nœuds	40
FigureIV.3 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Al ₂ O ₃ , dp=5nm, φ=0.03,(a) AR=3,(b) AR=2	41
FigureIV.4 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Al ₂ O ₃ dp=5nm, φ=0.09,(a) AR=3,(b) AR=2	41
Figure IV.5 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Al ₂ O ₃ dp=80nm, φ=0.03,(a) AR=3,(b) AR=2	42
Figure IV.6 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Al ₂ O ₃ dp=80nm,φ=0.09,(a) A=3,(b) A=2	42
Figure IV.7 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Tio ₂ dp=80nm, φ=0.03,(a) AR=3,(b) AR=2	42
Figure IV.8 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Tio ₂ dp=5nm, φ=0.09,(a)A=3,(b) A=2	43
Figure IV.9 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Tio ₂ dp=80nm, φ=0.03(a) AR=3,(b) AR=2	43
Figure IV.10 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Tio ₂ dp=80nm,φ=0.09,(a) AR=3, (b) AR=2	43
Figure IV.11 :Variation de vitesse le nanofluide Al ₂ O ₃ dp=5nm, φ=0.03,(a) A=3,(b) A=2	44
Figure IV.12 :Variation de vitesse le nanofluide Al ₂ O ₃ dp=5nm, φ=0.09,(a) A=3,(b) A=2	44
FigureIV.13 :Variation de vitesse le nanofluide Al ₂ O ₃ dp=80nm, φ=0.03,(a) A=3,(b) A=2	45
Figure IV.14 :Variation de vitesse le nanofluide Al ₂ O ₃ dp=80nm, φ=0.09,(a) A=3,(b) A=2	45
FigureIV.15 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide Al ₂ O ₃ ,dp=5nm, φ=0.03,(a) A=3,(b) A=2	45
FigureIV.16 :Variation de la fonction de courant pour Le nanofluide Al ₂ O ₃ , dp=5nm, φ=0.09,(a) A=3,(b) A=2	46
Figure IV.17 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide Al ₂ O ₃ ,dp=80nm, φ=0.03,(a) A=3,(b) A=2	46
Figure IV.18 :Variation de la fonction de courant pour le nanofluide Al ₂ O ₃ ,dp=80nm, φ=0.09,(a) A=3,(b) A=2	46

Figure IV.19 : Variation de vitesse le nanofluide TiO_2 $dp = 5nm$, $\phi = 0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$	47
Figure IV.20 : Variation de vitesse le nanofluide TiO_2 $dp = 5nm$, $\phi = 0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$	47
Figure IV.21: Variation de vitesse le nanofluide TiO_2 $dp = 80nm$, $\phi = 0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$	47
Figure IV.22: Variation de vitesse le nanofluide TiO_2 $dp = 80nm$, $\phi = 0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$	48
Figure IV.23 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide TiO_2 , $dp = 5nm$, $\phi = 0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$	48
Figure IV.24 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide TiO_2 , $dp = 5nm$, $\phi = 0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$	48
Figure IV.25 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide TiO_2 , $dp = 80nm$, $\phi = 0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$	49
Figure IV.26 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide TiO_2 , $dp = 80nm$, $\phi = 0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$	49
Figure IV.27 : Variation du nombre de Nusselt (eau/Al_2O_3) en fonction de la concentration	50
Figure IV.28 : Variation de nombre de Nusselt de (eau/TiO_2) en fonction de concentrations	50
Figure IV.29 : Evolution de profile de température sur une ligne radiale horizontale $X(0.12, 0)$ (TiO_2 et Al_2O_3) $\phi = 0.03$ et 0.09	51
Figure IV.30 : Evolution de profile de vitesse sur une ligne radiale horizontale $X(0.12, 0)$ (TiO_2 et Al_2O_3) $\phi = 0.03$ et 0.09	52
Figure IV.31 : Evolution de profile de température sur une ligne $y(0, 0.12)m$ (TiO_2 et Al_2O_3) $\phi = 0.03$ et 0.09	53
Figure IV.32 : Evolution de profile de vitesse sur une ligne $y(0, 0.12)m$ (TiO_2 et Al_2O_3) $\phi = 0.03$ et 0.09	54

Liste des tableaux

Tableau I.1 : les propriétés thermophysiques de différents matériaux	10
Tableau IV.1 : Propriétés thermo physiques du fluide de base (H_2O)	37
Tableau IV.2 : Propriétés thermophysiques de (Al_2O_3)	38
Tableau IV.3 : Propriétés thermo physiques de (TiO_2)	38
Tableau IV.4 : Variation de la température moyenne du fluide et le nombre de Nusselt moyen et l'écart en % pour chaque maillage pour $AR=3$	39

Nomenclature

Symboles Latins :

C_p : Chaleur spécifique [$J/kg.k$]

D_h : Diamètre hydraulique [m]

g : l'accélération de pesanteur [$m. s^{-2}$]

h_{moy} : Coefficient de transfert thermique par convection [$W.m^{-2}.k^{-1}$]

K : Conductivité thermique [$W/m.k$]

K_f : la conductivité thermique du fluide de base [$W.m^{-1}.k^{-1}$]

K_{nf} : la conductivité thermique du nanofluide [$W/m.k$]

K_s : la conductivité thermique des particules solides [$W/m.k$]

L : longueur de l'échangeur [m]

n : facteur de forme empirique.

Q_v : Génération de chaleur volumique [$W.m^{-3}$]

u : Vitesse de l'écoulement suivant x [$m.s^{-1}$]

v : Vitesse de l'écoulement suivant y [$m.s^{-1}$]

V : Vitesse de l'écoulement [$m.s^{-1}$]

V_s : volume des nanoparticules [m^3]

V_f : Volume du fluide de base [m^3]

W : Vitesse de l'écoulement suivant z [$m.s^{-1}$]

Symboles grecs :

α : Diffusivité thermique [$m^2.s^{-1}$]

\mathcal{B} : le rapport de de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

β : Coefficient de dilatation thermique [K^{-1}]

μ : Viscosité dynamique [$Pa.s$]

μ_{nf} : Viscosité dynamique du nanofluide [$Pa.s$]

μ_f : Viscosité dynamique du fluide de base [$Pa.s$]

ν : Viscosité cinématique [$m^2.s^{-1}$]

ρ : Masse volumique [$Kg.m^{-3}$]

ρ_{nf} : Masse volumique du nanofluide [$Kg.m^{-3}$]

φ : Fraction volumique volumique

ψ : sphéricité

Nombres adimensionnels :

Nu : Nombre de Nusselt Pr :

$$(Nu)_{nf} = \frac{q_m Dh}{(k_{nf} (T_p - T_m))}$$

Ra : Nombre de Rayleigh :

$$Ra = \frac{g\beta Q_v e^5}{\nu\alpha k_f}$$

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Le transfert de chaleur peut jouer un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermo physiques des fluides utilisés. La fiabilité et la performance d'un système dépendent fortement de la température de fonctionnement, en particulier dans les équipements électroniques et les applications industrielles similaires.

La conductivité thermique d'un liquide non métallique étant très faible, il faut trouver un moyen de l'augmenter artificiellement.

Or, quoi de plus simple que d'ajouter des particules d'un matériau, doté d'une bonne conductivité thermique, dans le liquide de base pour prévoir augmenter la valeur moyenne de la conductivité thermique du mélange (nanofluide: mélange colloïdal de nanoparticules de moins de 100 nm), un terme proposé par Choi et Eastman [1].

Les nanofluides ont des performances thermiques supérieures qui ne sont pas disponibles dans les fluides de transfert de chaleur traditionnels. Alors, l'objectif des nanofluides est d'obtenir des propriétés thermo physiques les plus élevées possibles aux plus petites concentrations possibles (de préférence <1% en volume) par dispersion uniforme et suspension stable de nanoparticules (de préférence <10 nm) dans les fluides hôtes. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel de comprendre comment les nanoparticules améliorent le transport d'énergie dans les liquides. Par rapport aux suspensions solides-liquides classiques pour améliorer le transfert de chaleur, les nanoparticules présentent un potentiel plus élevé pour augmenter les taux de transfert thermique dans les échangeurs de chaleur pour les raisons suivantes [2] :

- Surface de transfert de chaleur élevée entre les particules et les fluides et donc une conductivité thermique efficace.
- Haute stabilité de la dispersion avec un mouvement Brownien prédominant des particules.
- Puissance de pompage réduite par rapport au liquide pur pour obtenir une intensification équivalente du transfert de chaleur.
- Moins de colmatage des particules par rapport aux bouillies conventionnelles, aptes à être utilisées dans des microsystèmes.

- Propriétés réglables, y compris la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en variant les concentrations de particules en fonction des différentes applications.

Dans le présent mémoire, nous étudions numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle laminaire stationnaire de nanofluides remplies dans une enceinte circulaire et annulaire munie de deux ailettes et dont le diamètre interne de fine épaisseur soumis à une génération de chaleur volumique uniforme.

Cette configuration schématise une coupe transversale d'un échangeur de chaleur à ailettes. Les simulations numériques sont réalisées pour prédire l'effet de la fraction volumique, le diamètre des nanoparticules et le rapport d'aspect sur le transfert de chaleur.

Dans ce contexte, quatre chapitres ont été présentés dans ce mémoire.

Le premier chapitre représente les définitions, l'utilisation des nanofluides dans les échangeurs de chaleur et les connaissances fondamentales sur les nanofluides y compris les différents paramètres thermo physiques qui peuvent influencer sur le comportement d'un nanofluide. Cependant, une recherche bibliographique a été présentée dans ce chapitre.

Nous présentons ensuite au **deuxième** chapitre, la formulation mathématique conduisant à la mise en équation du problème de la convection naturelle de la configuration en question, dans le cas où le nanofluide est assimilé à un fluide incompressible de caractéristiques thermo physiques particulières, c'est-à-dire en tenant compte du mouvement Brownien des nanoparticules dans la base fluide.

Nous précisons à la suite dans le **troisième** chapitre, le logiciel Gambit pour tracer et mailler cette configuration ainsi que les conditions aux limites choisies et la procédure de résolution adoptée avec le logiciel Fluent.

Le quatrième chapitre traite les différents résultats obtenus par simulations numériques de la convection naturelle dans une cavité annulaire munie d'ailettes.

Enfin, nous terminons par une conclusion dans laquelle nous dégagerons les points forts et les résultats de notre étude.

CHAPITRE I

Généralité sur le transfert de chaleur

*Généralité sur le transfert de chaleur***I.1.1.Introduction**

Le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies. Bien qu'il manifeste sous diverses formes (rayonnement, conduction et convection), cette dernière est la plus visée dans certains domaines bien spécifiés tels que le refroidissement des processeurs et des composants électroniques, les radiateurs et les échangeurs de chaleur, ... etc. [3].

I.1.2.Transfert de chaleur par conduction

La conduction thermique est la propagation de chaleur de molécule à molécule, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission.

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides ou entre corps solides contigus. La conduction intervient également dans les liquides et les gaz mais sauf dans le cas des liquides très visqueux ou des gaz emprisonnés dans des matériaux poreux, son effet est marginal par rapport à celui de la convection.

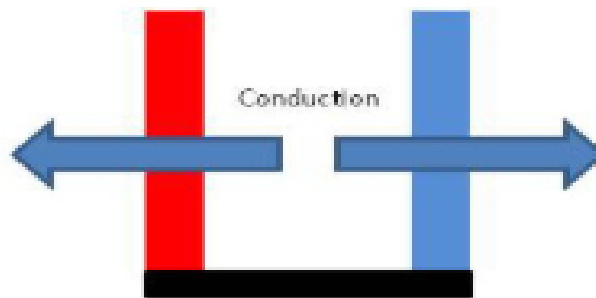


Figure I.1. Schéma présentatif du transfert de chaleur par conduction

I.1.3.Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur d'un corps à un autre corps, sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace.

Ce transfert de chaleur concerne les longueurs d'ondes comprises entre **100 μm** et **0,01 μm** et va de l'infrarouge à l'ultraviolet en couvrant le visible.

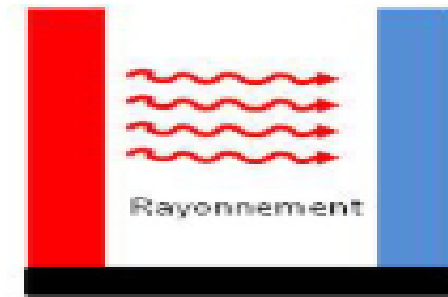


Figure I.2. Schéma présentatif de transfert de chaleur par rayonnement

I.1.4. Transfert de chaleur par convection

La convection caractérise la propagation de chaleur dans un fluide, gaz ou liquide dont les molécules sont en mouvement. On distingue deux types de convection par la suite.



Figure I.3. Schéma présentatif de transfert de chaleur par convection

I.2. Les nano fluides

I.2.1. Définition

Les nano fluides sont des suspensions colloïdales de nanoparticules solides dans un liquide. Les expériences menées récemment ont indiqué que les nano fluides ont une conductivité thermique sensiblement plus élevée que les fluides de bases. Parmi les nombreux avantages des nano fluides par rapport aux suspensions solides-liquides conventionnelles, il convient de mentionner que la surface spécifique est plus élevée, stabilité plus élevée de la suspension colloïdale, puissance de pompage inférieure requise pour atteindre un taux de transfert de chaleur équivalent. Ensuite, la réduction du colmatage des particules par rapport aux colloïdes congénitaux et un niveau de contrôle plus élevé de la thermodynamique et des propriétés de transport en faisant varier le matériau, la concentration, la taille et la forme des

particules [4] Bien que des tentatives ont été faites pour expliquer les raisons physiques de cette amélioration dans les nano fluides, il existe encore beaucoup d'inconvénients remarquables. Il y a au moins quatre raisons pour lesquelles une théorie définitive sur les nano fluides n'existe pas toujours [5].

- Le comportement thermique est trop différent des composites solide-solides ou des suspensions solides-liquides standards.
- Le transport thermique dans les nano fluides, en plus d'être étonnamment efficace par rapport aux suspensions solides-liquides standards, dépend des variables non traditionnelles telles que la taille, la forme et la surface de la particule.
- La compréhension de la physique derrière les nano fluides nécessite une approche multidisciplinaire.
- Probablement, la difficulté la plus redoutable est liée à des problèmes multi scalaires. En fait, les nano fluides impliquent au moins quatre échelles : l'échelle moléculaire, la micro-échelle, la méso-échelle et la macro-échelle. La difficulté principale réside dans le fait de mettre en relation et d'optimiser l'interaction entre ces échelles.

I.2.2.Types de nanoparticules

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion, aussi seules les nanoparticules les plus couramment utilisées dans les applications liées aux transferts thermiques sont ici brièvement mentionnées.

D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories figure(I.4) :

- Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (l'aluminium Al, cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou d'oxydes (oxyde d'aluminium Al₂O₃, oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO₂...).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO₂, Nanotube de silicium...) [6]

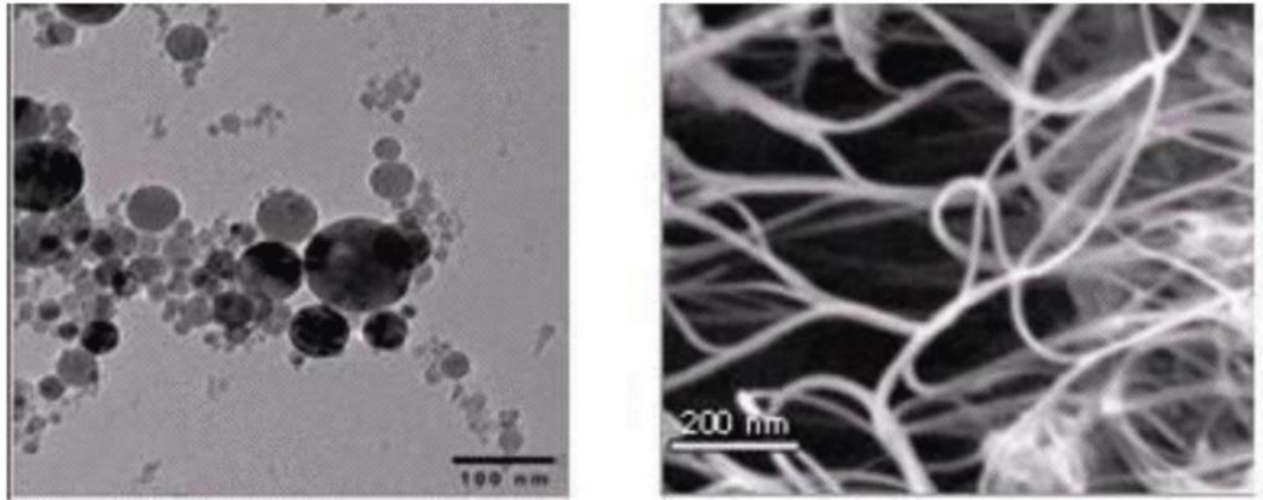


Figure I.4 : Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone Bang et Chang, 2005)

I.2.3.Fabrication et préparation des nanofluides

Le point délicat est la fabrication de si petits morceaux de matière plus ou moins bien calibrés. Inutile d'essayer d'en faire chez soi en ponçant un bout de cuivre pour en faire de la poussière par exemple. Ça ne fera que des particules de taille micrométrique au mieux, qui encrasseront le circuit. Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories :

- ✓ Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- ✓ Les procédés chimiques, comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique.

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

Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nanofluide :

- ✓ La méthode en une seule étape consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules. Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur (figure I.5).
- ✓ La méthode en deux étapes consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrasons est souvent nécessaire afin de briser les agglomérats. En outre, pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces

de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le pH. On peut également utiliser les forces de répulsion stériques à l'aide de molécules adsorbées ou greffées sur la surface

- ✓ Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en oeuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients et certains ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules pour une production de masse vu les contraintes inhérentes au procédé.

Les principaux moyens peuvent être :

- La mécano synthèse (broyage à haute énergie).
- La précipitation chimique (réduction de sels métalliques par exemple).
- Les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur (CVD ou PVD).
- Les dépôts chimiques en phase vapeur assistés par plasma (PECVD).
- La condensation de vapeurs par détente brutale dans des tuyères supersoniques.
- La pulvérisation cathodique radiofréquence.
- La sublimation par ablation laser (vaporisation d'un échantillon par impulsion laser).
- La pyrolyse laser (interaction entre un faisceau laser continu et un flux de réactifs).
- La désintégration d'électrodes submergées par passage d'étincelles (comme pour un Usinage par électroérosion). [7]

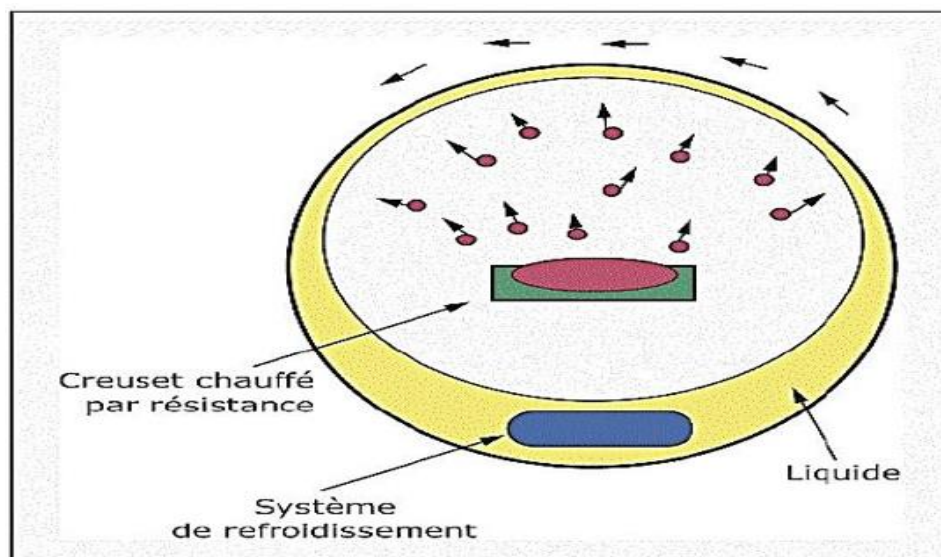


Figure I.5 : Procédé de synthèse de nano fluide en une seule étape (Ribeiro et Gruss 2009)

I.2.4. Les applications des nanofluides :

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électromouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées.

En thermique, les nanofluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement décomposant électriques et électroniques, radars, automobile...etc).

Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des Micro électro Mechanical Systems [8]

I.2.4.1. Autres applications

- L'échangeur de chaleur.
- le refroidissement d'éléments électroniques (produire un nanofluide stable qui est compatible avec des circuits et des composants électroniques).
- Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulations de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pourraient entraîner une augmentation de l'efficacité énergétique des réfrigérateurs).
- Aéronautique et spatial.
- Refroidissement des systèmes nucléaire.
- Transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique).
- Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage,
- Stockage thermique).

I.2.5. Les avantages et les inconvénients

I.2.5.1. Les avantages des nanofluides

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant
- ainsi la miniaturisation du système.

- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

I.2.5.2. Les inconvénients des nanofluides

- Fortes pertes de charge.
- Erosion.
- Sédimentation.
- Bouchons dans les écoulements.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.

I.3. Agrégation des nanoparticules

L'un des mécanismes de transfert de chaleur les plus discutés dans les nanofluides est peut-être le regroupement de nanoparticules. Les nanoparticules ont été expérimentalement observées pour agglomérer en grappes lorsqu'elles sont suspendues dans le liquide.

Théoriquement, le regroupement des nanoparticules dans les motifs de percolation crée des trajectoires de résistance thermique inférieure qui auraient un effet majeur sur la conductivité thermique globale et la viscosité. L'effet sur l'amélioration de la conductivité incorrecte serait négatif pour les fractions de faible volume de particules, car il y aurait des zones exemptes de particules dans le liquide.

Plusieurs études de la dynamique moléculaire (MD) ont montré une amélioration substantielle de la conductivité thermique avec l'augmentation du groupement de nanoparticules [9] malgré l'opposition forte des autres experts (Par exemple, Hong et al [10]). Il est évident que le regroupement de particules doit avoir un certain effet sur la conductivité thermique, mais sa magnitude est encore inconnue

I.4. Caractéristiques thermo-physiques des nanofluides

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nanofluide, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels. (*Tableau .I1*)

Tableau I.1 : les propriétés thermophysiques de différents matériaux

	Nanoparticule et fluide de base	K ($W/m.k$)	ρ (kg/m^3)	C_p ($J/kg.k$)	μ ($Pa.s$)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80.2	7870	447	
	Ni	90.7	8900	444	
	Au	317	19.300	129	
	Ag	429	10.500	235	
	C(diamant)	2300	3500	509	
Oxyde métallique (solides)	SiO₂	1.38	2220	745	
	TiO₂	8.4	4157	710	
	Al₂O₃	63	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
Liquides non métallique	L'eau	0.613	1000	4183	0.0008513
	Ethylène-glycol (EG)	0.258	1132	2349	0.0157

Les propriétés thermo physiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu, etc.).

I.4.1.Fraction volumique (φ)

La fraction volumique est la propriété la plus important pour le nanofluide, puisque les calculs des tous les autres propriétés se basés sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut défini la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules+fluide de base). La valeur de la fraction volumique est variée entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante

$$\varphi = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad \text{I.1}$$

Où V_s, V_f : son respectivement le volume des nanoparticules et le volume du fluide de base [m³]

I.4.2. Lamasse volumique

La masse volumique des nanofluides est proportionnelle à la fraction volumique en particules et augmente avec l'ajout des nanoparticules. Dans la littérature, et en l'absence de résultats expérimentaux, la masse volumique des nanofluides est souvent calculée à partir de la loi de mélange dans laquelle le nano fluide est supposé homogène Pak(1998)

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

Avec:

ρ_{nf} : la masse volumique du nanofluide

ρ_f : la masse volumique de base fluide

ρ_s : la masse volumique des nanoparticules solides

I.4.3.La conductivité thermique :

La conductivité thermique, est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur. C'est une propriété très importante pour l'amélioration des performances thermiques d'un fluide caloporteur. La synthèse des nanofluides répond au besoin d'améliorer et d'amplifier la conductivité thermique des liquides. Il existe plusieurs modèles théoriques permettant d'estimer, sous certaines conditions, la conductivité thermique des suspensions. Nous présenterons dans cette partie les modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides.

I.4.3.1.Modèle de Maxwell :

Maxwell fut le premier à dériver un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules Maxwell(1881)

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2\varphi(K_s - K_f)}{(K_s + 2K_f) - \varphi(K_s - K_f)} K_f \quad \text{I.3}$$

Où

K_{nf} : la conductivité thermique du nanofluide

K_f : la conductivité thermique du fluide de base

K_s : la conductivité thermique des particules solides

Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle.

I.4.3.2. Modèle de Hamilton & Crosser :

Le modèle de Hamilton-Crosser (1962) est une extension du modèle de Maxwell, qui tient compte de la forme des particules. En effet, pour prendre en compte la non-sphéricité des particules (cas des NTC), ce modèle intègre un facteur géométrique appelé sphéricité, et noté ϕ , faisant référence à la géométrie sphérique. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de l'aire d'une sphère de même volume que la particule sur l'aire de cette même particule.

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_s - K_f)\phi}{K_s + (n-1)K_f - \phi(K_s - K_f)} K_f \quad \text{I.4}$$

est un facteur de forme empirique donné par : $n = 3/\psi$

Ce modèle peut être utilisé lorsque la conductivité thermique des particules est au moins 100 fois plus élevée que celle du fluide de base.

I.4.3.3. Modèle de Yu et Choi :

Yu et Choi (2003) ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle de Hamilton-Crosser, qui tient compte de l'effet d'interface entre les particules et le fluide de base mais qui n'est valable que pour les particules de forme sphérique.

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f - 2(K_s - K_f)(1+B)^3\phi}{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)(1+B)^3\phi} K_f \quad \text{I.5}$$

Où B est le rapport de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

I.4.4. Viscosité dynamique des nanofluides :

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nanofluides mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique.

Ainsi, ces deux propriétés sont étroitement corrélées, et doivent être maîtrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluides dans des échangeurs.

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'estimer ou de mesurer la viscosité dynamique des nanofluides et de quantifier l'importance des principaux paramètres qui l'influencent.

Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides.

I.4.4.1. Modèles d'Einstein :

D'une manière générale, les formules existantes dérivent du travail fondamental d'Einstein(1906). Basé sur l'hypothèse que l'énergie a une dépendance linéaire avec la viscosité, Einstein a déterminé l'énergie dissipée autour d'une seule particule dans un fluide en associant son énergie au travail réalisé pour la faire avancer relativement au fluide. A partir de ce résultat, il a déterminé l'expression décrivant une dépendance linéaire de la viscosité des suspensions dans un fluide avec la concentration.

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) \quad \text{I.6}$$

Où : μ_{nf} la viscosité dynamique du nonofluide.

μ_f la viscosité dynamique du fluide de base.

La formule d'Einstein a depuis été vérifiée expérimentalement et est considérée satisfaisante pour des suspensions très diluées de particules sphériques (browniennes ou non browniennes), typiquement pour des concentrations volumiques inférieures à 1%. Il est à noter que ce modèle ne tient pas compte des effets de la taille des particules et des interactions inter particules.

I.4.4.2. Modèles de Brinkman :

La formule de Brinkman(1952) complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4%.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad \text{I.7}$$

Cette relation décrit une évolution non linéaire de la viscosité dynamique avec la

concentration volumique mais ne tient pas compte de la collision entre les particules. En effet, l'écoulement autour de chaque particule est influencé par la présence éventuelle d'autres particules à proximité et par les collisions entre particules.

I.4.4.3. modèle de Batchelor :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + \eta\varphi + \kappa_h \varphi^2 + \dots) \quad \text{I.8}$$

Où : η est la viscosité intrinsèque et κ_h est le coefficient de Huggins. La valeur de η et κ_h est de 2.5 et 6.5 respectivement pour des particules sphériques.

I.4.5. Chaleur spécifique :

La conductivité thermique et la viscosité dynamique sont les deux propriétés thermo physiques les plus étudiées dans le cas des nanofluides. La chaleur spécifique des nanofluides, quant à elle, est très rarement étudiée, notamment sur le plan expérimental.

La chaleur spécifique ou la capacité thermique massique est définie par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré Kelvin la température de l'unité de masse d'une substance. Cette grandeur est incorporée dans l'équation de l'énergie, et nécessite alors d'être déterminée d'une manière rigoureuse.

La plupart des études effectuées dans la littérature utilise un des deux modèles définis par :

I.4.5.1. Modèle du Pak and Cho(1998) :

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_s \quad \text{I.9}$$

I.4.5.2. Modèle de Xuan (2000):

$$(\rho C_p)_{nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s}{(1-\varphi)\rho_f(C_p)_f + \varphi\rho_s} \quad \text{I.10}$$

Pour déterminer la chaleur spécifique des nanofluides. Le premier modèle (I.10) est basé sur la loi de mélange d'une suspension homogène, tandis que le modèle de l'équation (I.11) est fondé sur l'hypothèse d'équilibre thermique entre les particules et le fluide de base.

I.4.6.Coefficient d'expansion thermique :

La variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique appelé également coefficient de dilatation isobare

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad \text{I-11}$$

Le calcul de la valeur de ce coefficient pour les nanofluides est déterminée par analogie avec la relation (I.12) qui exprime la masse volumique du nanofluide.

$$\beta_{nf} = \varphi \beta_s + (1 - \varphi) \rho \beta_f \quad \text{I.12}$$

Pak et Cho (1998) ont utilisé la formule suivante :

CHAPITRE II

Formulation
Mathématique

*Formulation Mathématique***II.1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à la mise en équations du problème considéré en utilisant les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie. Ces dernières expriment les principes fondamentaux de la physique.

Ces équations de conservation associées aux lois constitutives contiennent l'ensemble des connaissances nécessaires pour reproduire intégralement le phénomène observé par la voie de la résolution ou de la simulation. Ces équations sont établies sur la base d'hypothèses et de postulats souvent anciens.

L'objectif principal de cette étude est la simulation numérique de l'écoulement laminaire bidimensionnel d'un nanofluide confiné dans une cavité circulaire et annulaire dont le cylindre interne qui est munit de deux ailettes est soumis à une génération de chaleur volumique uniforme, alors que la paroi du cylindre externe étant supposée adiabatique.

Cette configuration est une coupe transversale d'un échangeur de chaleur à ailettes longitudinales.

Les simulations numériques sont effectuées pour un modèle monophasique en supposant que les propriétés physiques du nanofluide sont constantes sauf pour la conductivité thermique qui varie en fonction de la température en tenant compte des mouvements Browniens des nanoparticules dans la base fluide.

II.2. Modèle physique et formulation**II.2.1 Modèle physique**

La géométrie du problème physique considéré dans cette étude est illustrée dans les figures (II.1) et (II.2).

Il s'agit d'une coupe transversale d'un échangeur de chaleur à ailettes longitudinales, et donc une cavité circulaire annulaire de rapport d'aspect $AR=3$ et $AR=2$ ($AR=D_{ext}/D_{int}$) avec respectivement D_{ext} et D_{int} les diamètres externe et interne de la cavité. pour $AR=3$ on a $D_{ext}=0.24m$ et $D_{int}=0.08m$ et $D_{ext}=0.100 m$ et $D_{int}=0.05m$ pour $AR=2$.

L'épaisseur du diamètre interne est $e=0.005m$.

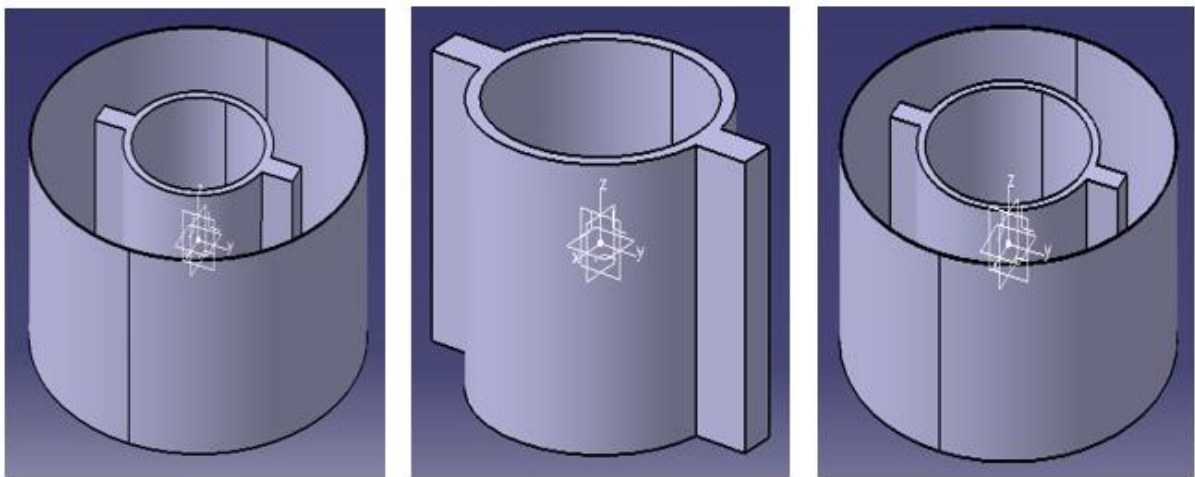
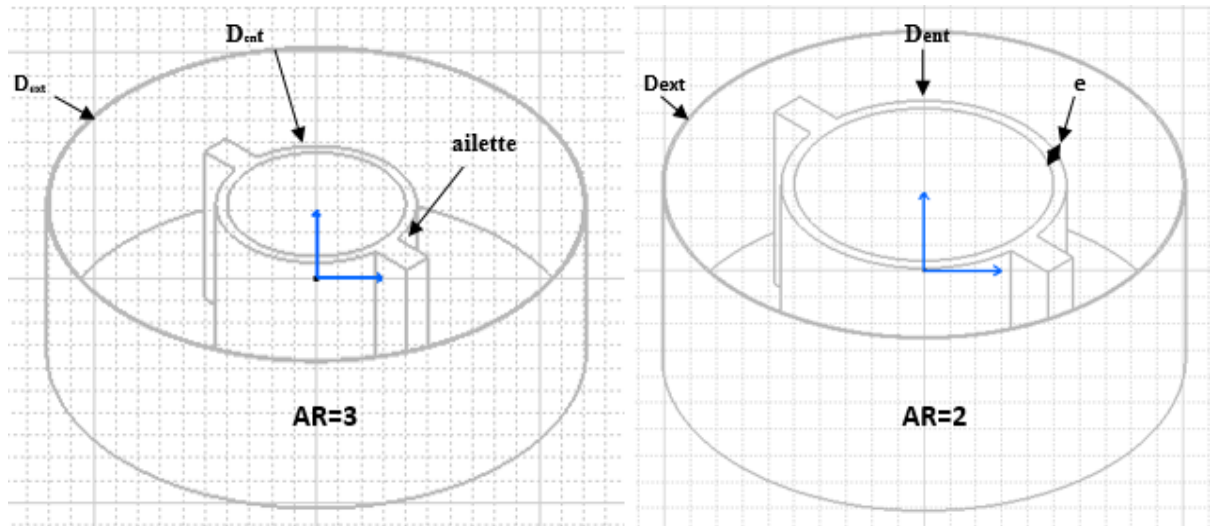


Figure II.1 : Configuration de la cavité à ailettes

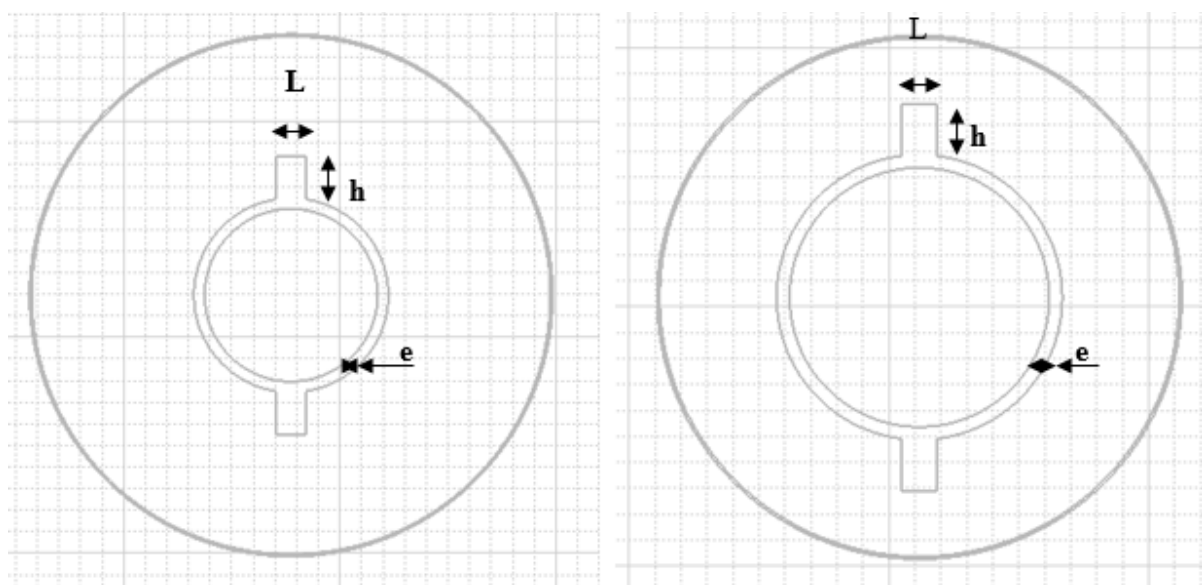


Figure II.2 : Configuration étudiée (Coupe transversale de l'échangeur de chaleur)

Les dimensions de l'ailette sont tels que : La largeur $L=0.0139$ m et la hauteur $h=0.02$ m
L'épaisseur du diamètre interne de la cavité étant soumise à une génération de chaleur volumique uniforme, alors que la paroi du diamètre externe étant supposée adiabatique. Le transfert de chaleur à lieu de la paroi chauffée du diamètre interne vers le fluide remplissant la cavité initialement à la température ambiante $T_0=298$ K.

Pour écrire les équations caractérisant le phénomène de transfert de chaleur dans une cavité, il est nécessaire d'adopter les hypothèses suivantes:

- L'écoulement est stationnaire et bidimensionnel.
- Le fluide est Newtonien et incompressible.
- L'écoulement engendré est laminaire.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- La puissance volumique dissipée est négligeable.
- Les propriétés thermo physique du nanofluide sont constantes sauf dans le terme de la masse volumique où l'approximation de Boussinesq est adoptée.

Les équations gouvernantes sont l'équation de continuité, les équations de conservation de la masse et l'équation d'énergie pour le fluide et pour le solide en coordonnées cartésiennes à deux dimensions s'écrivent comme suit :

- Equation de continuité $\rho_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0$ II.1

- Equations de quantité de mouvement

Selon x

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$
 II.2

Selon y

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho_{nf} g \beta_{nf} (T - T_0)$$
 II.3

- Equation d'énergie

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{k_{nf}}{Cp_{nf}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$
 II.4

- Equation d'énergie pour le solide

$$k_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q_v = 0 \quad \text{II.5}$$

II.3. Conditions aux limites :

- **Dans le fluide:** $T_0=298K, u=0$ et $v=0$

- **La paroi du diamètre externe:** $u=0, v=0, \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ II.6

- **La paroi du diamètre interne:** $u=0, v=0, \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} = Qv$ II.7

II.4. Propriétés thermo physiques du nanofluide :

L'introduction de nanoparticules solides dans un fluide modifie ses propriétés physiques

- La masse volumique effective du nanofluide est donné par :

$$\rho_{nf} = \phi \rho_f + (1-\phi) \rho_s \quad \text{II.8}$$

- La viscosité du nanofluide est donnée par la relation de Brinkman[11] :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad \text{II.9}$$

- La chaleur spécifique est donnée :

$$(C_p)_{nf} = (1-\phi)(C_p)_f + \phi(C_p)_s \quad \text{II.10}$$

- Le coefficient d'expansion thermique du nanofluide:

$$(\beta_p)_{nf} = (1-\phi)(\beta_p)_f + \phi(\beta_p)_s \quad \text{II.11}$$

- La conductivité thermique effective du nanofluide est approximée par le modèle de Patel et al [12] en tenant compte des mouvements Browniens des nanoparticules dans le fluide de base comme suit:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \left[1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + ck_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \right] \quad \text{II.12}$$

Où c est une constante déterminée expérimentalement et est donnée par $c=3.6 \times 10^4$

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f}{d_s} \frac{\phi}{(1-\phi)} \quad \text{II.13}$$

Le diameter des molecules de la base de fluide est $d_f=2A^0$

$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f} \tag{II.14}$$

Où u_s est la vitesse du mouvement Brownien des nanoparticules dans la base fluide donnée par:

$$u_s = \frac{2K_b T}{\pi \mu_f d_s^2} \tag{II.15}$$

Avec $K_b 1.3807 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$ est la constatnte de Boltzmann

II.5 Calcul du nombre de Nusselt :

- Nombre de Nusselt :

$$(Nu)_{nf} = \frac{q_m Dh}{(k_{nf} (T_p - T_m))} \tag{II.16}$$

q_m le flux de chaleur moyen (W/m^2)

D_h : C'est le diamètre hydraulique est défini :

$$D_h = 4X \frac{\text{section mouillée}}{\text{périmètre}}$$

T_p La température moyenne de la paroi

$$T_m(z) = \frac{1}{A} \iint T dA \tag{II.17}$$

T_m La température moyenne de mélange

$$T_m(z) = \frac{\iiint_v T u dv}{\iiint_v u dv} \tag{II.18}$$

CHAPITRE III

Procédure de
Résolution
Avec FLUENT

*Procédure de résolution
avec Fluent***III.1.Introduction :**

Pour obtenir une solution numérique du problème étudié, on doit transformer les équations différentielles du modèle mathématique au moyen d'un processus discrétisation en un format facile pour le processus numérique. Ce format n'est autre que le système d'équations algébriques obtenu après la discrétisation.

Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis.

La méthode des volumes finis est à l'origine de la majorité des codes de calculs (Fluent, CFD, ...). La méthode des volumes finis qui se distingue par sa fiabilité quant aux résultats, son adaptation au problème physique, sa garantie pour la conservation de la masse et de quantité de mouvement et de tout scalaire transportable sur chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes numériques.

La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. La simulation ne remplace pas l'expérimentation mais la complète. Elle permet d'effectuer l'analyse du problème dans des conditions réalistes (reproduire des tests que l'on fait en expérimentation pour mieux les comprendre et à moindre coût).

À travers la simulation, le système étudié devient plus flexible. On peut plus facilement faire des études paramétriques. L'utilisation peut aussi faire varier l'échelle de temps pour une étude, ce qui est impossible par ailleurs, elle se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatiques. Ces derniers sont couramment appelés des environnements de simulation

III.2.Présentation le code de calcul

Il existe un certain nombre de codes industriels, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulement de fluides (FLUENT, CFX, PHOENICS, STARCD, TRIO, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, N3S, CFDS-FLOW3D ...).

Le code de calcul "FLUENT" est commercialisé par le groupe ANSYS est actuellement l'un des pôles de compétences en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (ComputationalFluidDynamics) généralistes qui simulent tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe "FLUENT" aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques

Ce code est largement utilisé dans l'industrie mécanique, aéronautique, automobile et offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Le logiciel "FLUENT" modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Il est composé, comme tout logiciel du type CFD, de trois éléments clés qui sont : le pré-processeur, le solveur et le post-processeur [11].

III.2.1.GAMBIT

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale,...etc.) En raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexe (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

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

Il peut être utilisé pour construire une géométrie et lui générer un maillage éventuellement, une géométrie d'un autre logiciel de CAO peut être importée dans ce préprocesseur. Les options de génération de Gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structure. Sinon, Gambit génère automatiquement un maillage non structure adapté au type de géométrie construite. Avec les outils de vérification du maillage, les défauts sont facilement détectés.

Il permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au

niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau.

III.2.2.FLUENT

FLUENT est un code de calcul pour modéliser l'écoulement des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des maillages non structurés, qui peuvent être produits pour des géométries complexes, avec une facilité relative.

Fluent est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage.

En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur la même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace.

FLUENT s'utilise à travers une interface graphique, l'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures.

Fluent emploie la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité et quantité de mouvement et de l'énergie. En utilise cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle.

III.2.3.Solveur FLUENT

Pour des fluides incompressibles, les calculs se font en pression relative. La méthode utilisée est la méthode des volumes finis. Les étapes de calcul dans le solveur sont les suivantes :

- Intégration des équations continues sur chaque volume de contrôle. Le théorème d'Ostrogradski est utilisé pour transformer certaines intégrales de volume en intégrales de surface.
- Discrétisation en espace (pour les écoulements non permanents) des équations : substitution des dérivées partielles par des approximations en différences finies ; transformation du système d'équations en système algébrique,

- Résolution du système algébrique par un processus itératif ; utilisation d'un algorithme pour corriger la pression et les composantes de la vitesse afin d'assurer la conservation de la masse

III.2.4. Post-processeur FLUENT :

- Le Post-processeur permet de visualiser les différents résultats à l'écran (champs de vitesse, champs de température, ligne de courant ...etc.).

III.3. Etapes principales de simulation :

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

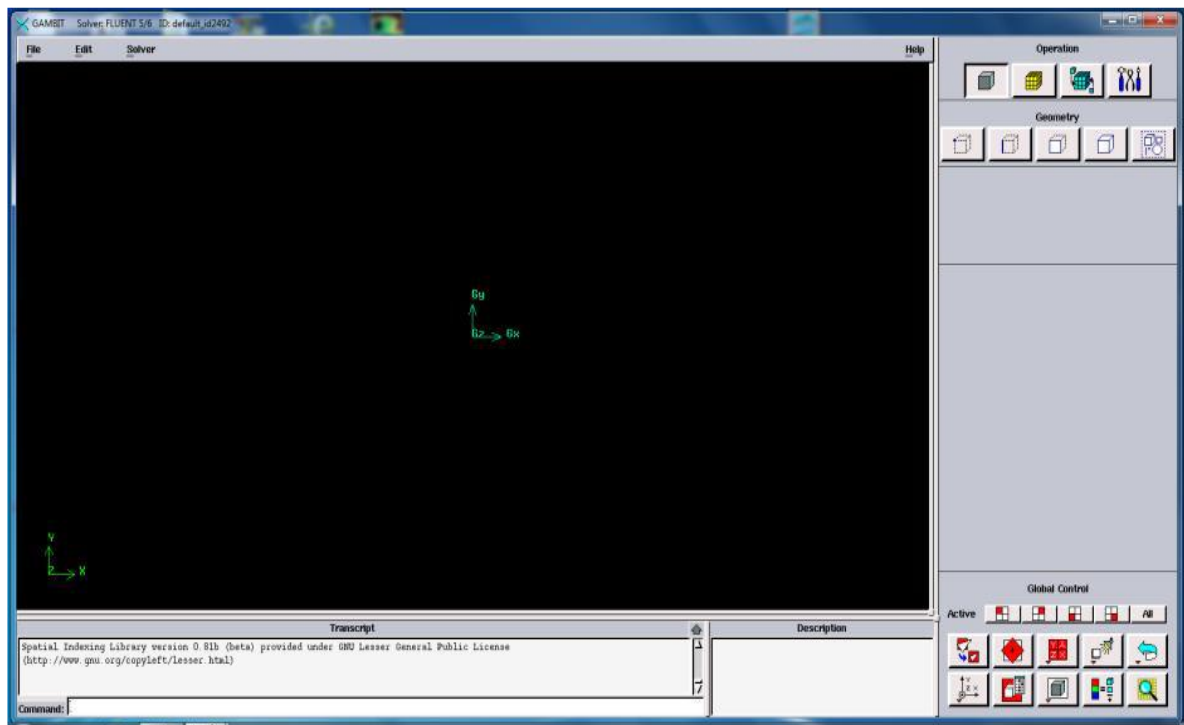


Figure III.1 : Interface du Gambit

III.3.1. Construction de la géométrie

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

a- Création des points

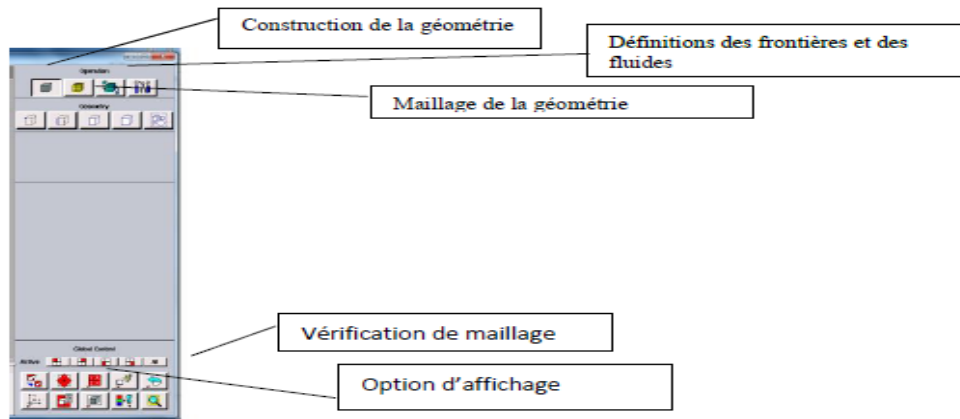


Figure III.2 : Les opérations pour construire une géométrie

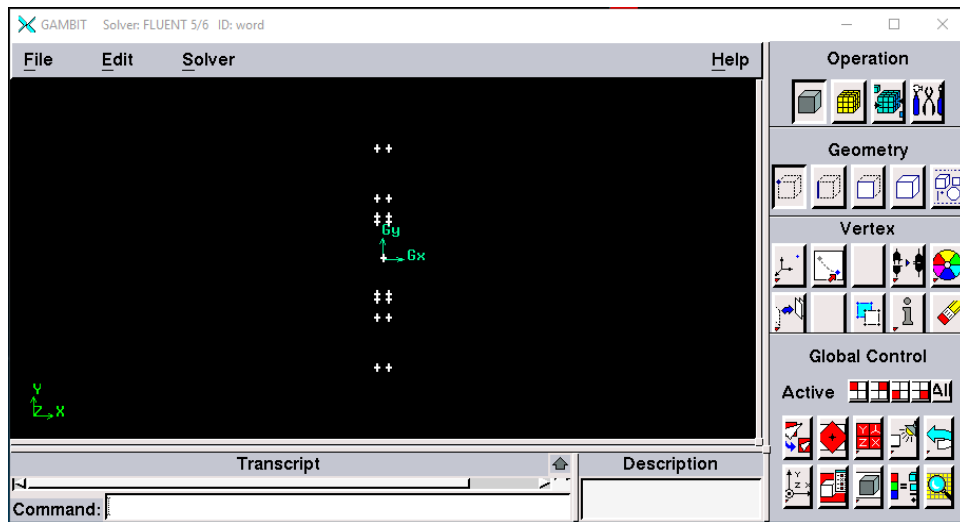


Figure III.3 : Création des points

b- Création des lignes

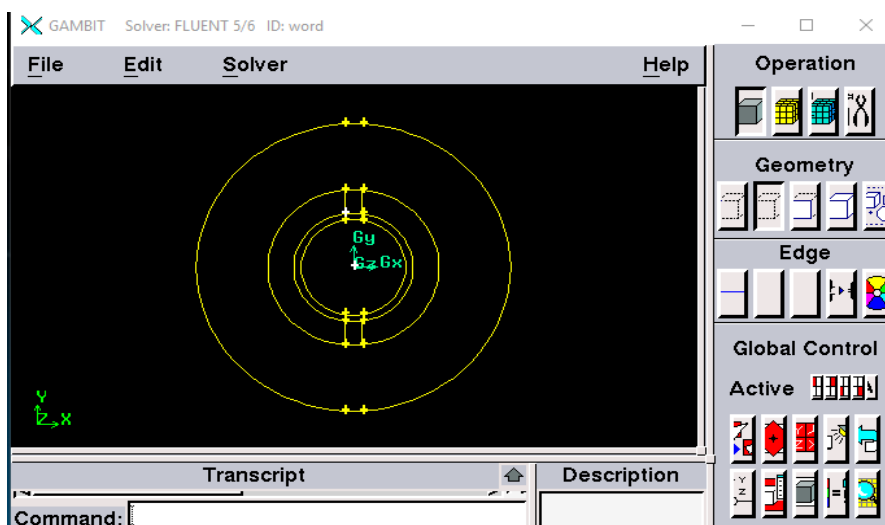


Figure III.4 : Création des lignes

c-Création des faces

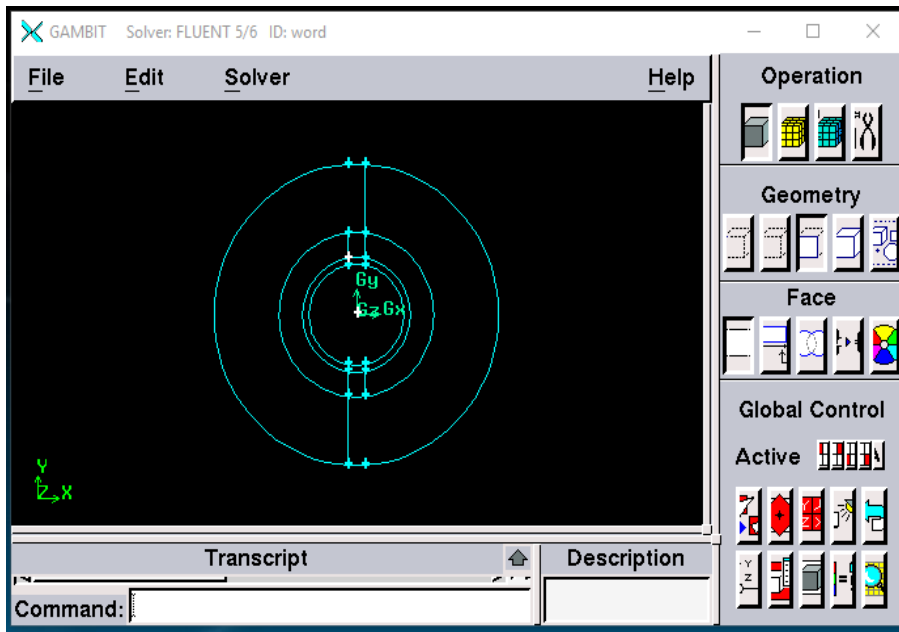


Figure III.5: Création des faces

III-3-2. Maillage

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

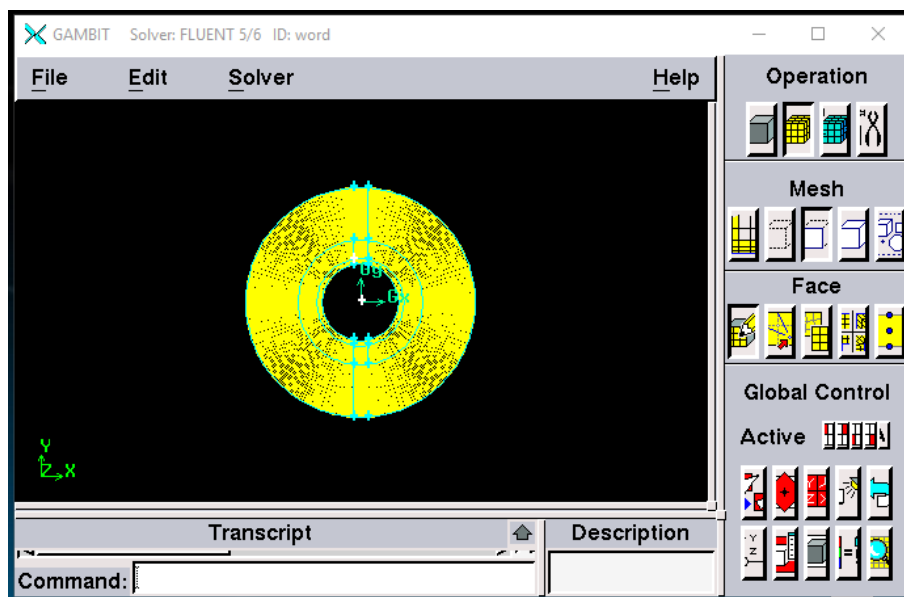


Figure III.6 : Maillage des faces

III.3.3. Les conditions aux limites

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

Comme conditions aux limites.

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

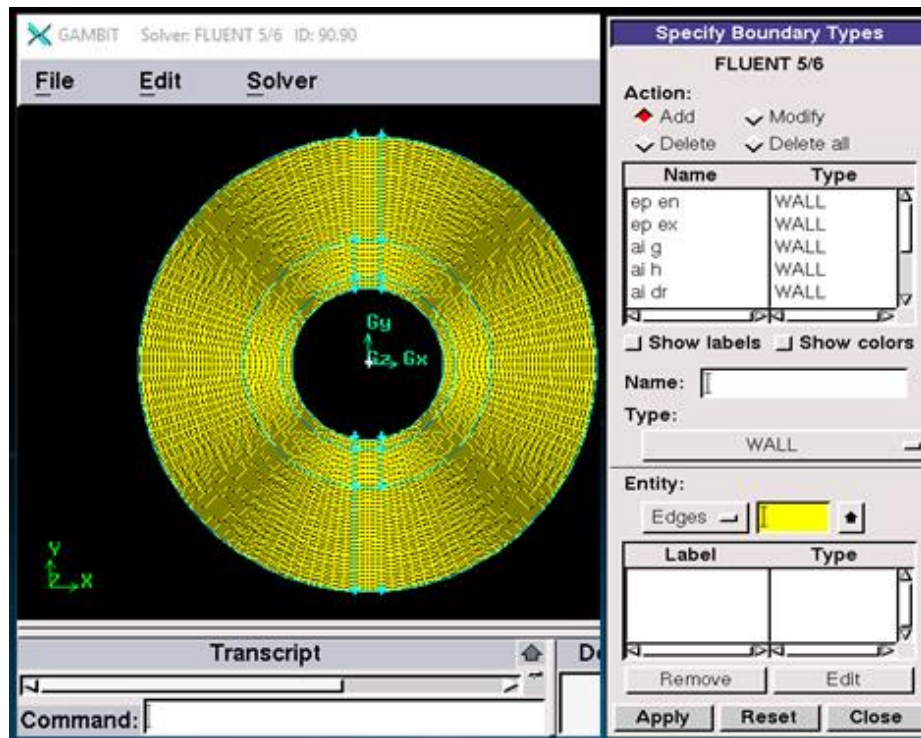


Figure III.7 : Les conditions aux limites

- ✓ La première condition aux limites " **velocityinlet**" correspond à une vitesse et une température imposées à l'entrée du domaine,
- ✓ La deuxième condition aux limites est de type " **wall** ",
- ✓ La troisième condition aux limites est " **pressure outlet**"

III-3-4. L'exportation du fichier .Msh

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



Figure III.8 : L'exportation du fichier.Msh

III.3.5. Simulation sous FLUENT

Ce partie fournit une explication sur FLUENT, et de ses aptitudes, et des instructions pour paramétrer le solveur. Il explicite les étapes nécessaires pour réussir une simulation d'un problème en mécanique des fluides. Une attention particulière est donnée aux écoulements internes.

a. Lancement de Fluent

On peut démarrer 4 versions de Fluent 2D, 3D, 2DDP et 3DDP ayants la même interface figure III.9

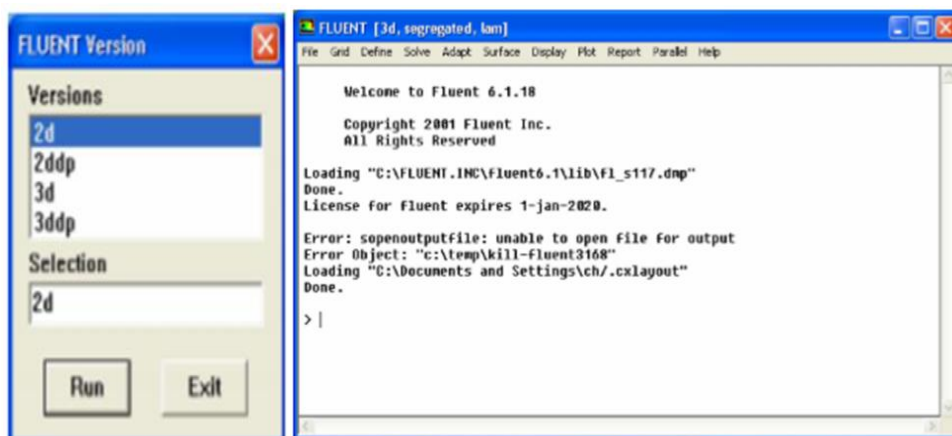


Figure III.9 : Lancement de Fluent

- 2D (2 Dimensions)
- 2DDP (2 Dimensions Double Précision)
- 3D (3 Dimensions)
- 3DDP (3 Dimensions Double Précision)

b. Importation de la géométrie (*.msh)

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

File → Read → Mesh



Figure III.10 : Importation de la géométrie

c. Vérification du maillage importé

Grid → Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

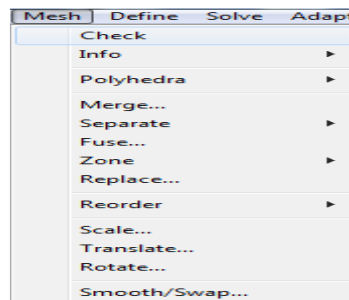


Figure III.11 : Vérification du maillage sous Fluent

d. Lissage du maillage (Smooth and swap the grid)

Grid → Smooth/Swap...

Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage, cliquez sur le bouton Smooth puis sur le bouton Swap. Répétez jusqu'à ce que FLUENT affiche que zéro faces sont swapped

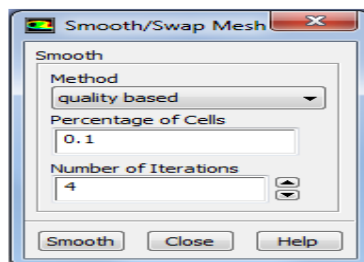


Figure III.12 : Lissage de maillage

e. Vérification de l'échelle

Grid → Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

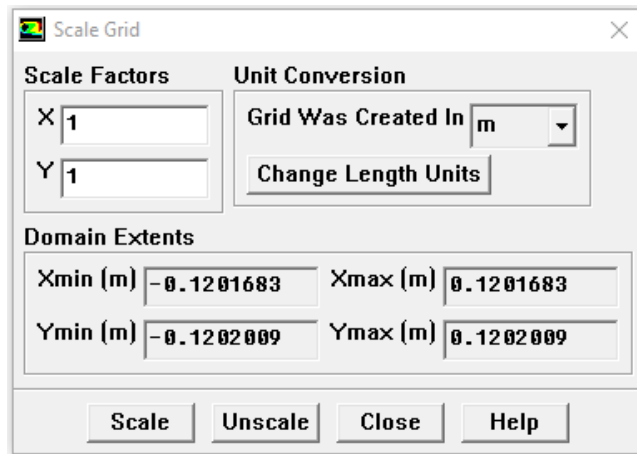


Figure III.13 : Vérification des unités

f. Affichage de la grille

Display → Grid

Vous pouvez afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.

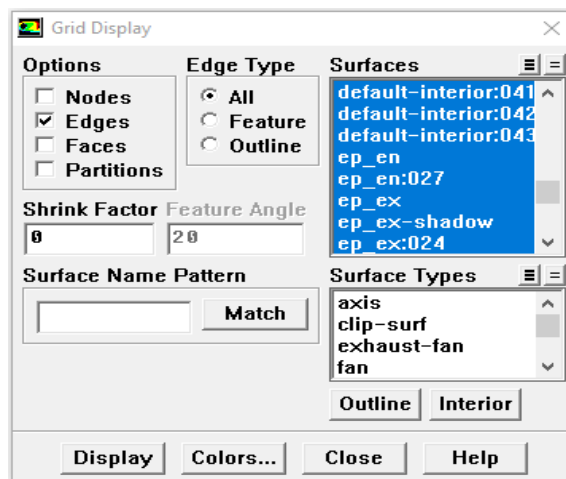


Figure III.14 : Affichage de la grille et vérification des conditions

g. Choix du solveur

Define → Models → Solver...

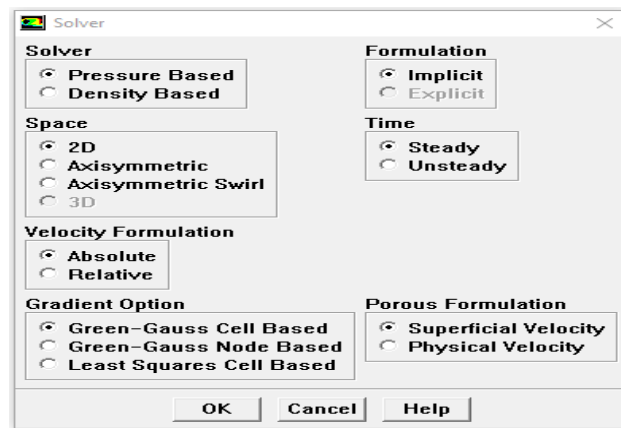


Figure III.15 : Choix du solveur sous Fluent

- ✓ *Segregated Solver* : est le plus approprié pour les écoulements incompressibles
- ✓ (Ventilateurs, pompes...)
- ✓ *Coupled Solvers*, les solveurs « couplé implicite » et « couplé explicite », sont plutôt réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse.
- ✓ C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

h. L'équation de l'énergie :

Define → Models → Energy... ; L'instruction énergie doit être activée pour l'étude du champ thermique

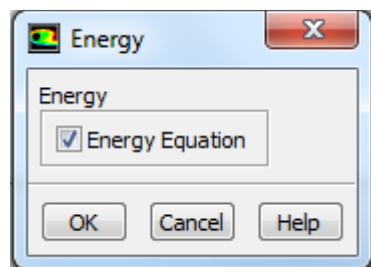


Figure III.16 : Equation de l'énergie

i. Choix du modèle de turbulence

Define → Models → Viscous ; Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement t. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents ... etc.

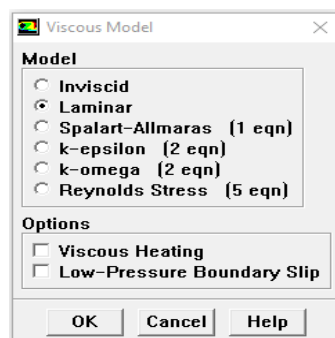


Figure III.17 : Choix du type d'écoulement

j. Définition des caractéristiques du fluide

Define → Materials ; Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque des données de Fluent.

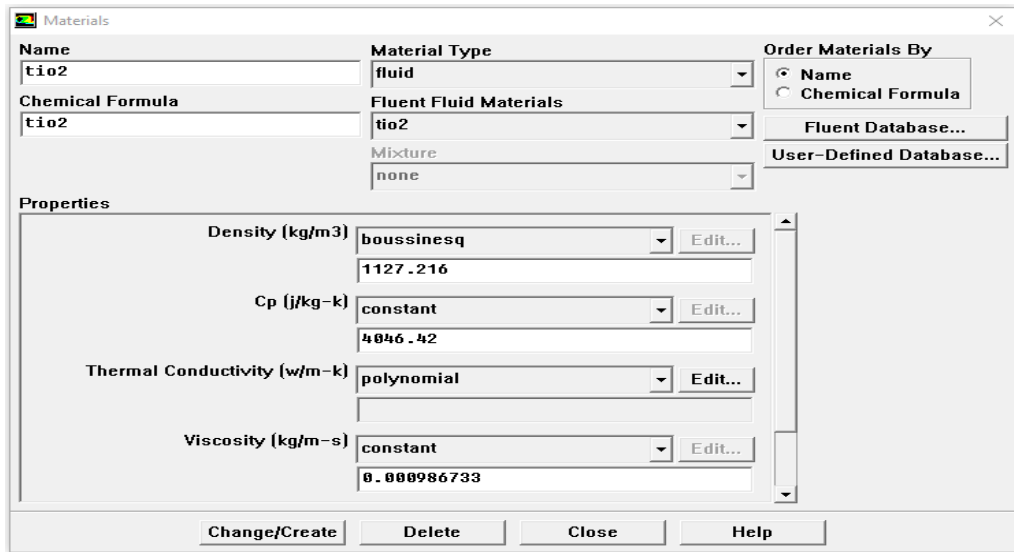


Figure III.18 : Définition des caractéristiques du fluide

K. Operating conditions

Define → Operating → conditions ; Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ».

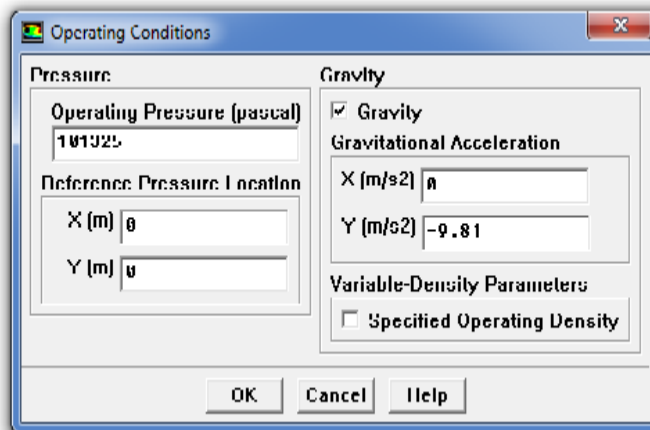


Figure III.19 : Choix de la pression de référence

En effet, Fluent effectue tous les calculs, avec une pression appelée gauge pressure et ce afin d'éviter les erreurs d'ordre numérique lors du calcul pour des écoulements à faible nombre de mach. La relation liant la pression absolue à la « gauge pressure » est donnée par :

$$P_{abs} = P_{op} + P_{gauge}$$

Fluent prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme operating pressure. Ensuite, il faut choisir les conditions aux limites

L. Conditions aux limites usuelles

Define → Boundary → Conditions

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites dans notre cas une source De chaleur à la paroi du diamètre interne

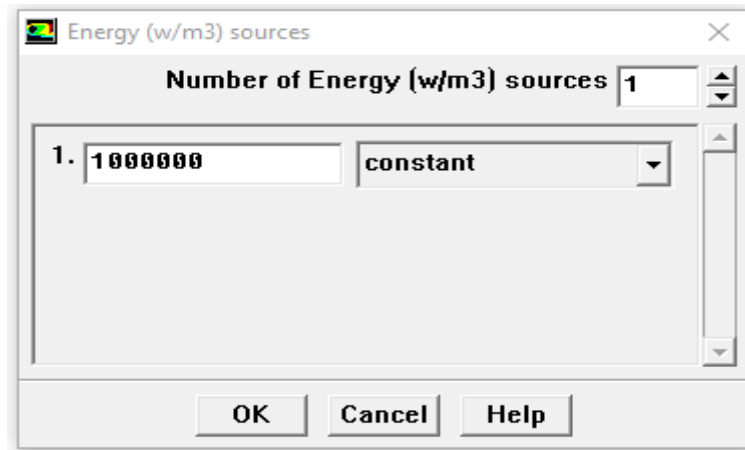


Figure III.20 : source de chaleur

-Wall : pour toutes les parois ($u=v=0$)

Est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides.

M. Initialisation du calcul :

Solve → Initialize → Initialize...

Initialiser le champ d'écoulement pour la valeur à l'entrée :

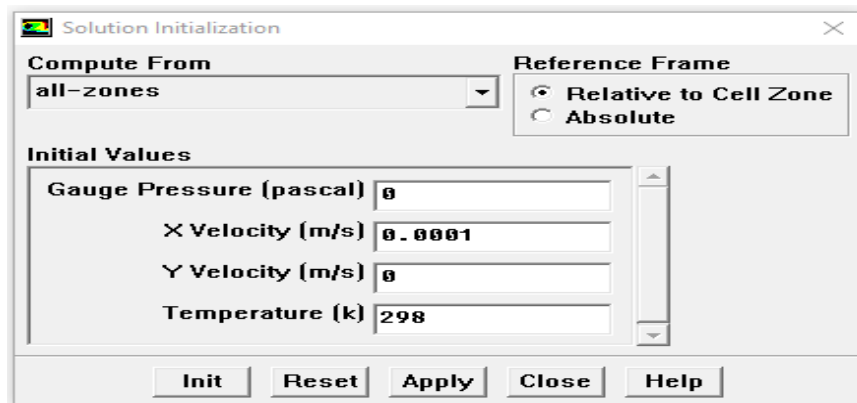


Figure III.21 : Initialisation de la solution

N. Choix des critères de convergence

Solve → Monitors → Residual...

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

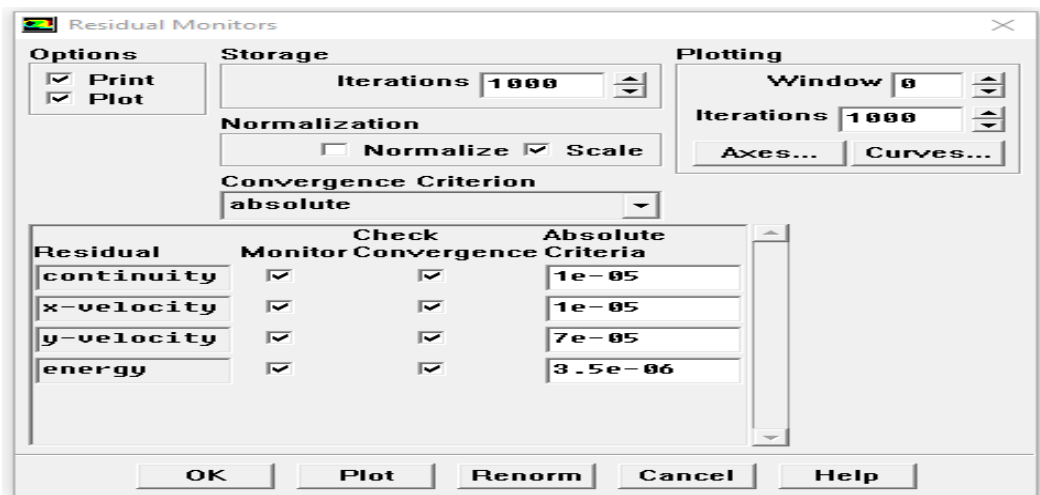


Figure III.22 : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence

Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence.

O. Lancement du calcul

Solve → Iterate... ; Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations.

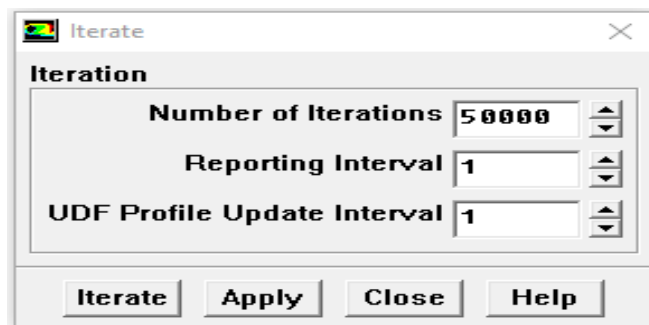


Figure III.23 : Choix du nombre des itérations

P. Allures de l'évolution des résidus de calcul

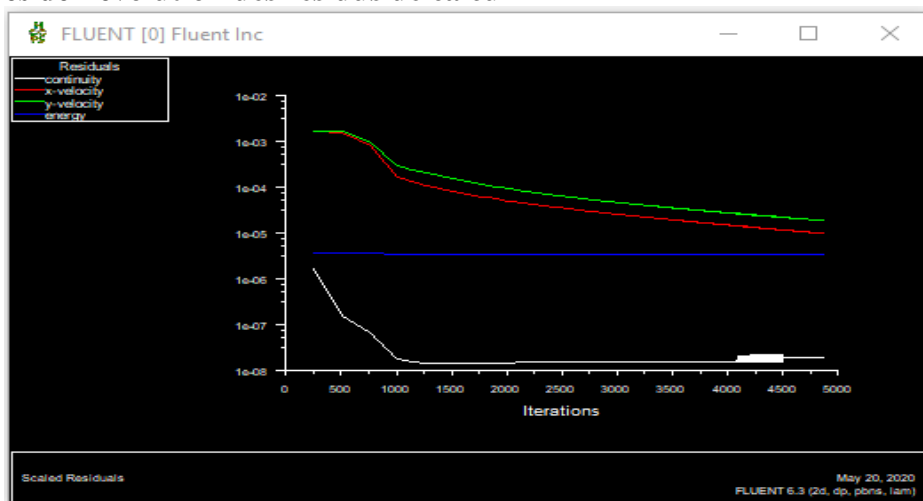


Figure III.24 : Allures de l'évolution des résidus de calcul

q. Visualisation des résultants

Display→ Contours ; Display→ Temperature ; Display→ Velocity

Ces options permettent de déterminer les vecteurs des variables, traçage des profils, ligne de courant. Le logiciel Fluent fournit des outils intégrés de post-traitement. Toutefois, rien n'interdit d'exporter les données dans divers formats afin de les traiter sous d'autres logiciels tels que : TECPLOT pour la visualisation, ou Origin pour une analyse plus poussée.

1. Calcul de la température moyenne

Repport→ surface→ integrals

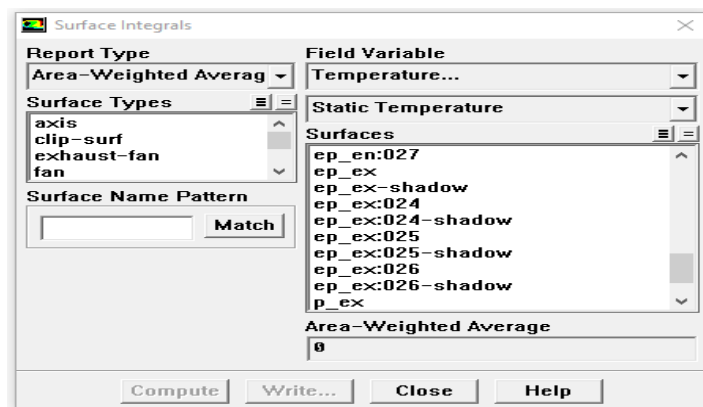


Figure III.25 : Calcul de la température moyenne

2. Calcul de la densité du flux moyen

Repport→ Flux Reports

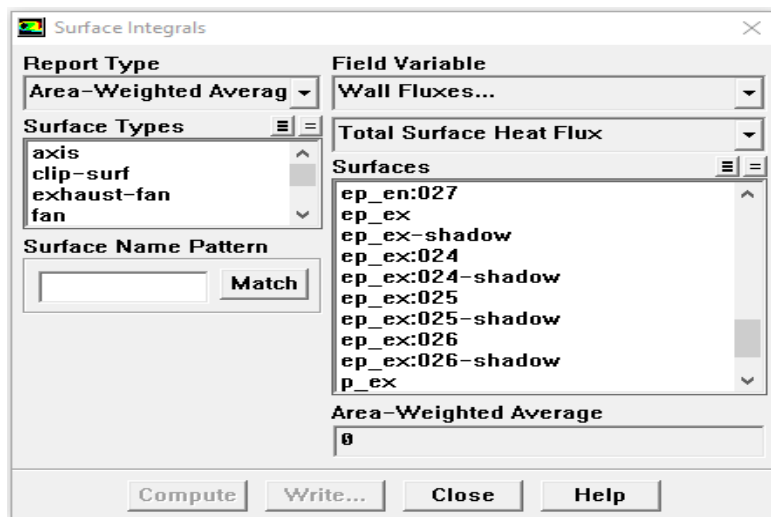


Figure III.26 : Calcul de la densité du débit massique moyen

3. Calcul de la température de mélange (Tm)

Repport→ volume→ integral

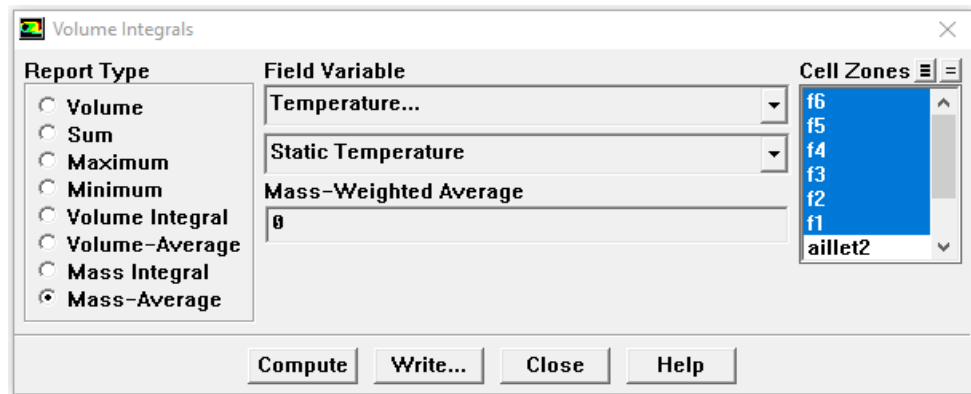


Figure III.27 : Calcul de la température de mélange

Plot→xyplot

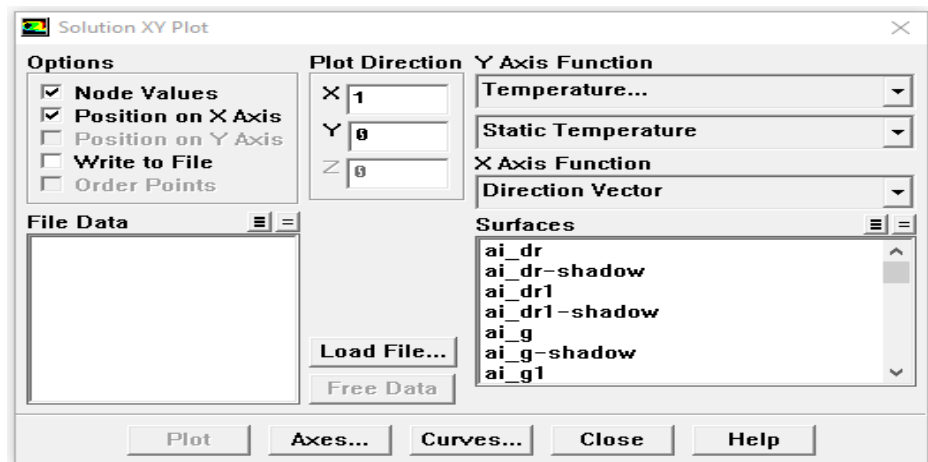


Figure III.28 : Obtention des graphes

Cette application nous permet de tracer les graphes de certains paramètres pour différentes zones de la configuration.

4. Sauvegarde de fichier

File→ Write→ Case & Dat

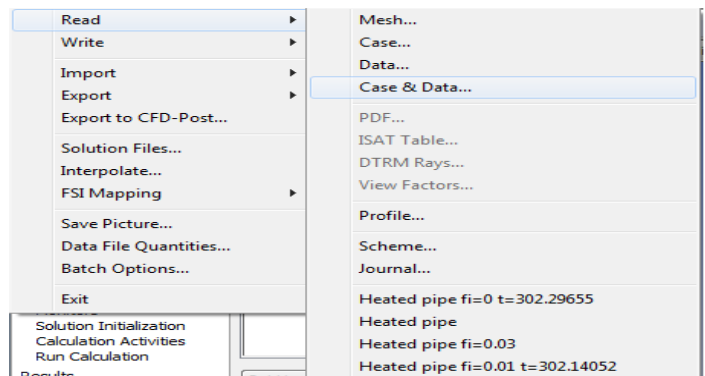


Figure III.29 : Sauvegarde de fichier

III.4. Conclusion

Ce chapitre expose la description du problème et la simulation par le code de calcul FLUENT, essentiellement la procédure qu'il propose pour résoudre les problèmes en mécanique de fluide. La construction des géométries avec génération de maillage et l'incorporation des conditions aux limites sont effectuées par le processeur GAMBIT.

CHAPITRE IV

Résultats et Discussion

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de simulations du transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité cylindrique annulaire remplie de nanofluide, dont la base fluide est l'eau avec des nanoparticules de TiO₂ et Al₂O₃.

Le cylindre interne de fine épaisseur qui est muni de deux ailettes est soumis à une génération de chaleur volumique uniforme, alors que la paroi externe est adiabatique.

L'objectif de ce travail est de voir l'influence de la taille des nanoparticules sur le transfert de chaleur. Les simulations ont été réalisées pour deux configurations de rapports d'aspect AR=3 et AR=2 (AR=D_{ext}/D_{int}), pour un nombre de Rayleigh Ra=1,2x10⁴, des nanoparticules de diamètre respectivement dp=5nm, 20nm et 80nm et des concentrations volumiques de φ=0.03 à 0.09.

IV.2. Propriétés physiques

L'écoulement est initialement à une température T₀=298K. Le fluide de base considéré est de l'eau, alors que les nanoparticules sont en l'oxyde d'aluminium AL₂O₃ et l'oxyde de titaneTiO₂ de différentes concentrations.

Les tableaux suivants résument les propriétés physiques utilisées dans les simulations

Tableau IV.1 : Propriétés thermo physiques du fluide de base (H₂O)

Propriétés Thermophysiques	H2O
$\rho(Kg.m^{-3})$	997.1
$Cp(J.kg^{-1}.k^{-1})$	4186
$K (W.m^{-1}.k^{-1})$	0.613
$\mu(kg.m^{-1} s^{-1})$	8.91*10 ⁻⁴
$\mathcal{B}(k^{-1})$	0.00021

Tableau IV.2: Propriétés thermophysiques de (Al₂O₃)

Propriétés Thermophysiques	Al ₂ O ₃
$\rho(Kg.m^{-3})$	2719
$Cp(J.kg^{-1}.k^{-1})$	871
$K (W.m^{-1}.k^{-1})$	202.4

Tableau IV.3 : Propriétés thermo physiques de (TiO₂)

Propriétés Thermophysiques	TiO ₂
$\rho(Kg.m^{-3})$	4250
$Cp(J.kg^{-1}.k^{-1})$	686.2
$K (W.m^{-1}.k^{-1})$	8.9538

IV.3. Effet du maillage

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui réponde à nos objectifs, parmi ces paramètres, on peut citer :

- ✓ Selon la durée des simulations
- ✓ Selon la chaleur moyenne
- ✓ Selon un nombre Nusselt moyen
- ✓ Selon Le nombre de mailles.
- ✓ Selon La distance entre les mailles (concentration des mailles).
- ✓ Selon La forme de la maille.
- ✓ Selon Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

Un maillage non uniforme adéquat a été choisi pour la résolution du problème considéré. Pour étudier l'influence du maillage sur la résolution numérique, nous avons utilisé six types de maillages différents basés sur des nombres de nœuds différents selon les directions x et y. (8100) nœuds, (15000) nœuds, (16500) nœuds, (18000) nœuds, (22500) nœuds, (27000) nœuds pour un rapport d'aspect AR=3. Le maillage (18000) nœuds étant considéré comme maillage de référence pour calculer l'écart existant entre le maillage de référence et les autres types de maillage.

Pour ces maillages nous avons calculé la température moyenne et le nombre de Nusselt moyen et la comparer avec le maillage pris comme référence (18000).

$$\text{Ecart Tm en \%} = 100 \cdot \left| \frac{T_m(18000) - T_m(N_i \times N_j)}{T_m(N_i \times N_j)} \right|$$

$$\text{Ecart Numen \%} = 100 \cdot \left| \frac{\text{Num}(18000) - \text{Num}(N_i \times N_j)}{\text{Num}(N_i \times N_j)} \right|$$

Avec :

N_i : Le nombre des nœuds total suivant x

N_j : Le nombre des nœuds total suivant y

Tableau IV.4 : Variation de la température moyenne du fluide et le nombre de Nusselt moyen et l'écart en % pour chaque maillage pour AR=3

Maillage	(8100) _{noeuds}	(15000) _{noeuds}	(16500) _{noeuds}	(18000) _{noeuds}	(22500) _{noeuds}	(27000) _{noeuds}
Tm(K)	547.79	395.92	383.50	335.52	316.59	315.40
Écart de T (%)	38.86	15.4	12.76	-	5.67	6.43
Num	18.22	19.01	19.04	19.27	19.78	19.91
Écart Num (%)	8.49	4.51	4.36	-	0.66	3.19

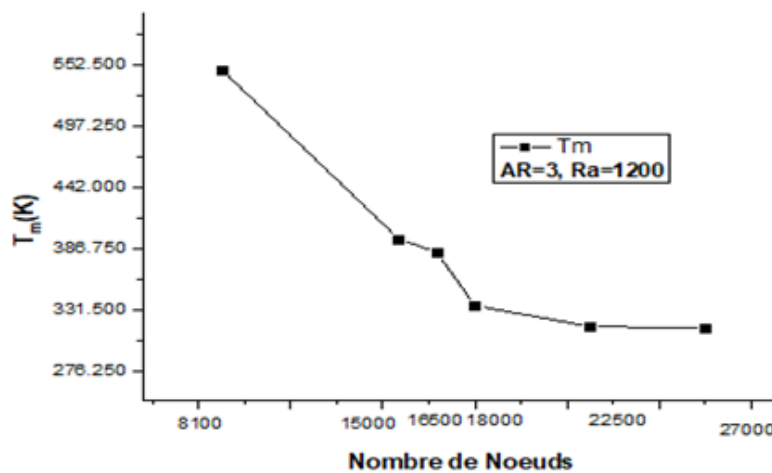


Figure IV.1 : Variation des températures moyennes en fonction du nombre de nœuds de maillage pour AR=3

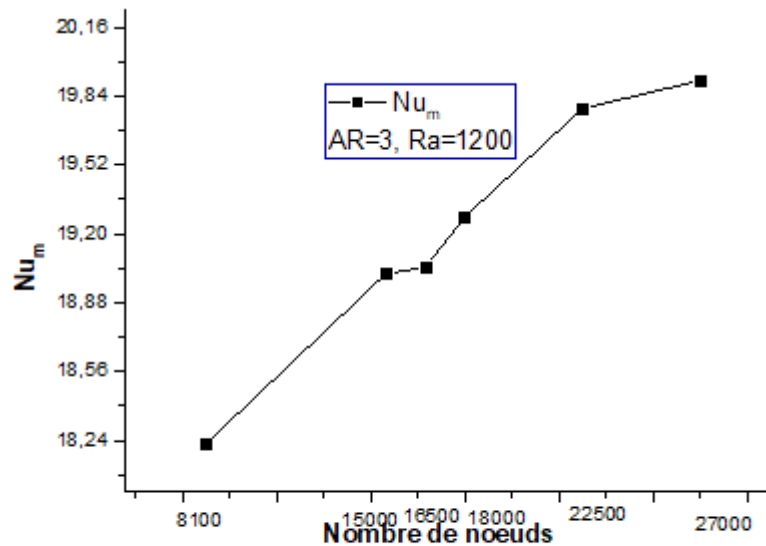


Figure IV.2 : Variation de nombre de Nusselt en fonction du nombre de nœuds de maillage pour $AR=3$

IV.4.Champs de Température

Dans nos simulations nous avons utilisé deux nanofluides à fluide de base l'eau dans lequel nous avons rajouté des nanoparticules de dioxyde de Titanium TiO_2 et d'oxyde d'Aluminium Al_2O_3 à des différentes concentrations, pour des diamètres des nanoparticules $d_p=5nm$, $20nm$ et $80nm$ pour des rapports d'aspect $AR=3$ et $AR=2$ pour des concentrations de nanoparticules $\phi=0.03$ et $\phi=0.09$.

IV.4.1. Effet du rapport d'aspect AR

IV.4.1.1.Le nanofluide (Al_2O_3)

Les figures (IV.3 et IV.4), montrent les contours de température pour les rapports d'aspect $AR=3$ et $AR=2$ pour le nanofluide Al_2O_3 pour un diamètre des nanoparticules $d_p=5nm$ à des concentrations $\phi=0.03$ et $\phi=0.09$.

Nous constatons d'après ces figures que la chaleur se transmet par convection naturelle de la paroi interne qui est chauffée vers le fluide qui l'entoure, la configuration avec un rapport $AR=3$ la température maximale est supérieur à celle de $AR=2$ puisque le diamètre interne est plus grand et on a aussi une diminution de la température quand la concentration est plus grande $\phi=0.09$.

De même, les figures (IV.5 et IV.6) montrent les contours de température mais pour un diamètre de nanoparticules $dp=80nm$, on peut constater que la température diminue quand la concentration augmente et le rapport d'aspect diminue. La variation du diamètre des particules n'est pas visible ici.

IV.4.1.2. Le nanofluide TiO_2

Les figures (IV.7 et IV.10), montrent la variation des champs de températures pour les configurations à rapport d'aspect $AR=2$ et $AR=3$ pour le nano fluide TiO_2 avec des concentrations de $\phi=0.03$ et $\phi=0.09$ et des diamètres des nanoparticules $dp=5nm$ et $dp=80nm$, nous constatons d'après ces figures que la température diminue quand la concentration des nanoparticules augmente et le rapport d'aspect augmente c'est-à-dire pour $AR=3$.

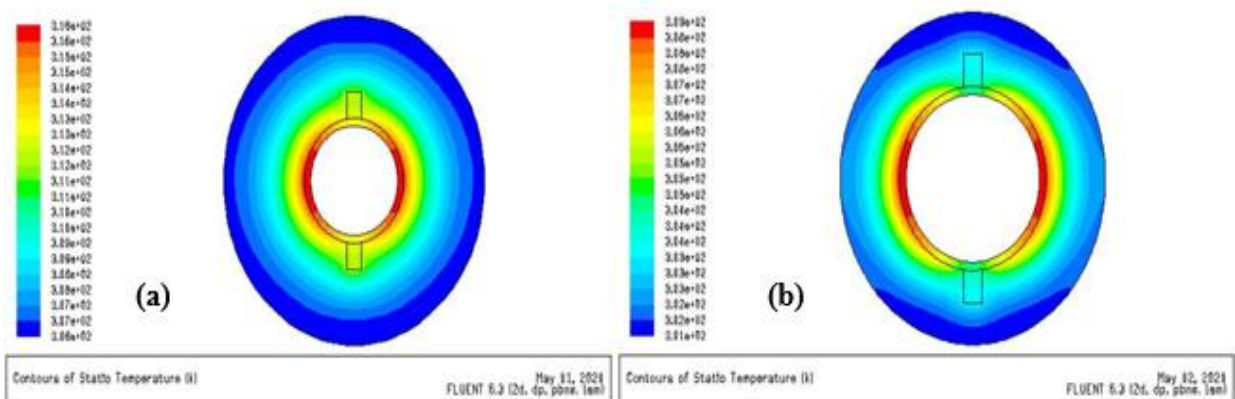


Figure IV.3: Variation des contours de température pour, le nanofluide Al_2O_3 , $dp=5nm$, $\phi=0.03$, (a) $AR=3$, (b) $AR=2$

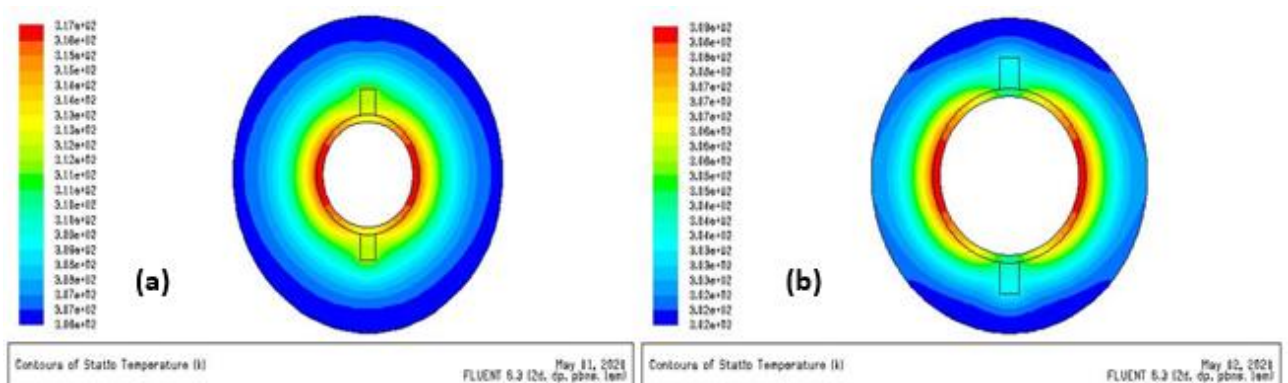


Figure IV.4: Variation des contours de température pour, le nanofluide Al_2O_3 , $dp=5nm$, $\phi=0.09$, (a) $AR=3$, (b) $AR=2$

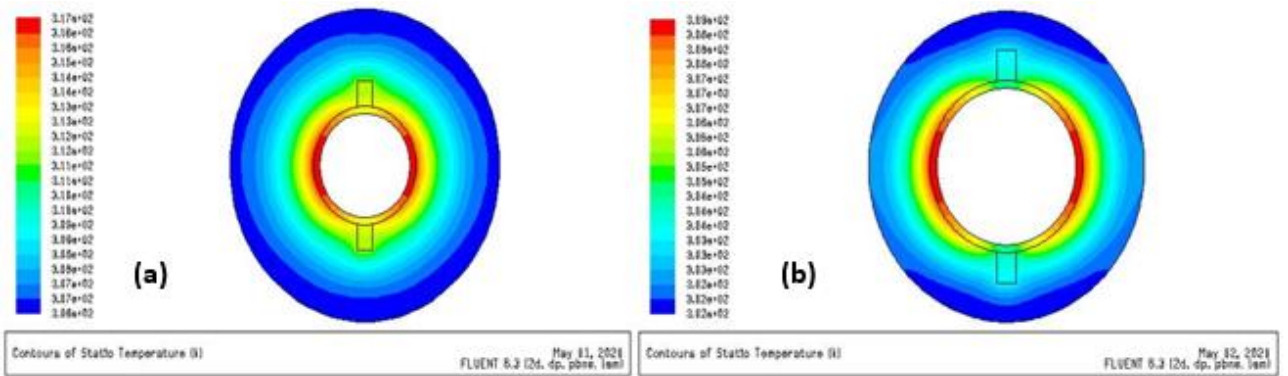


Figure IV.5. Variation des contours de température pour, le nanofluide Al_2O_3 $dp=80nm$, $\phi=0.03$, (a) $AR=3$, (b) $AR=2$

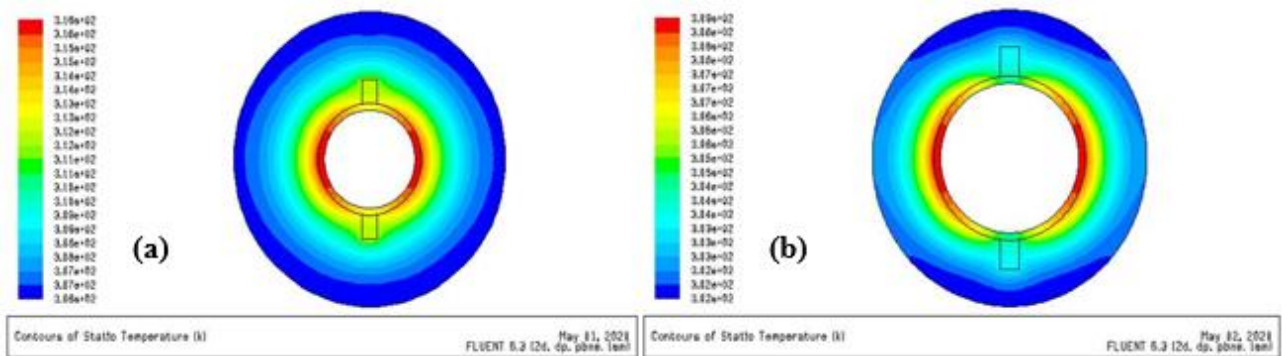


Figure IV.6. Variation des contours de température pour, le nanofluide $Al_2O_3 dp=80nm$, $\phi=0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

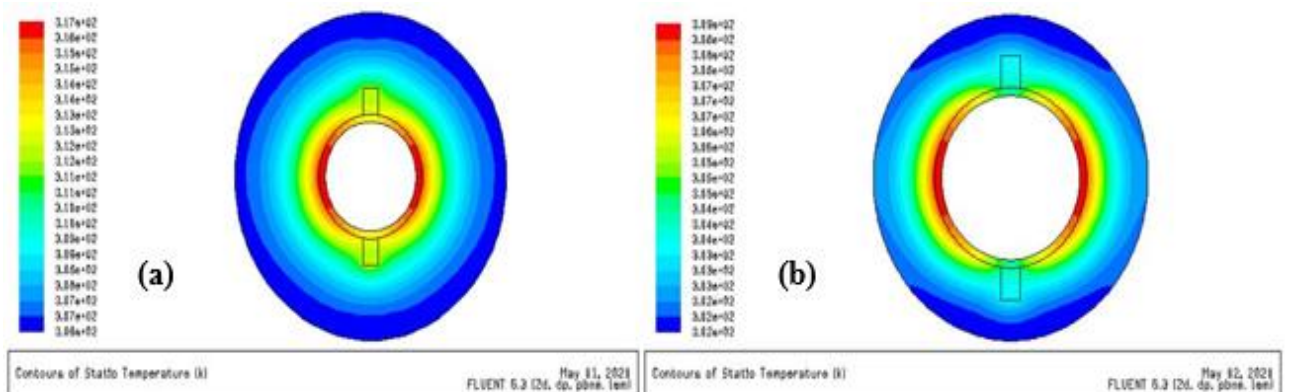


Figure IV.7. Variation des contours de température pour, le nanofluide Tio_2 $dp=5nm$, $\phi=0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

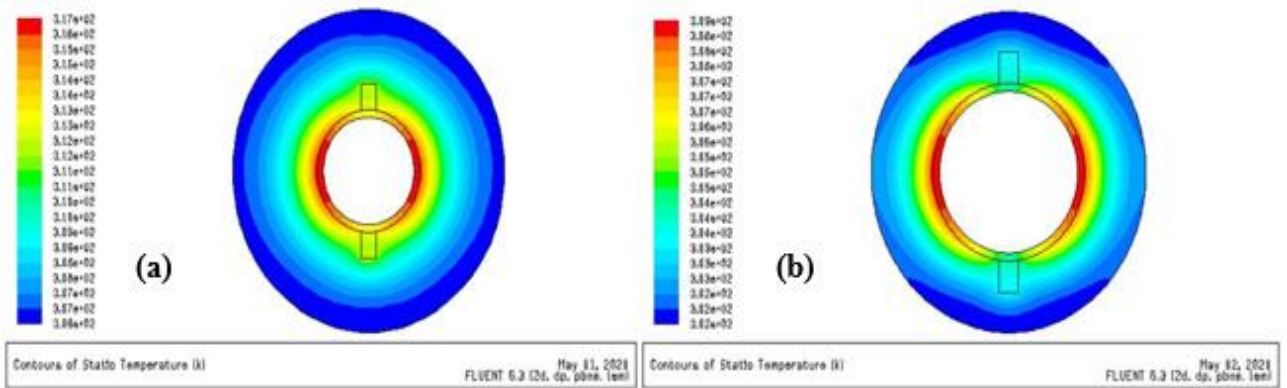


Figure IV.8 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Tio2 $dp=5nm, \phi=0.09, (a)A=3, (b) A=2$

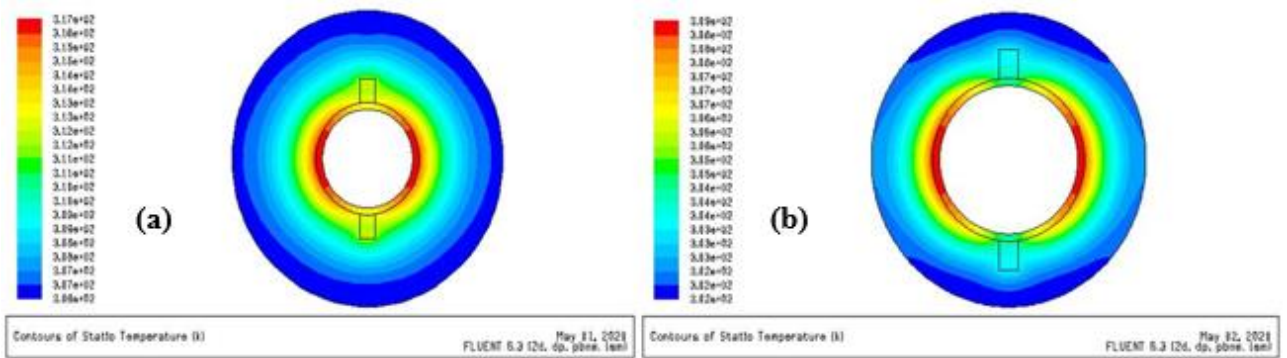


Figure IV.9 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Tio2 $dp=80nm, \phi=0.03 (a) AR=3, (b) AR=2$

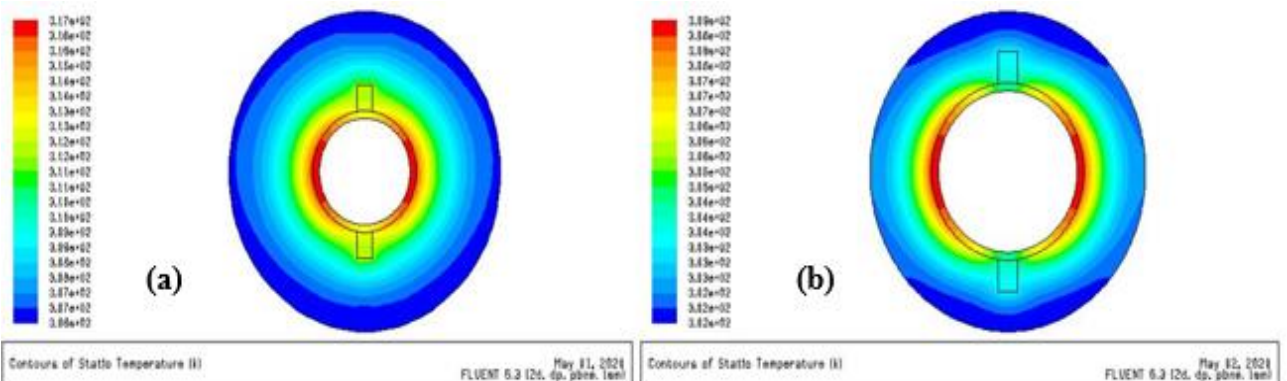


Figure IV.10 :Variation des contours de température pour, le nanofluide Tio2 $dp=80nm, \phi=0.09, (a) AR=3, (b) AR=2$

IV.5 Variation des champs de vitesse :

IV.5.1. Effet du rapport d'aspect AR :

Le nanofluide Al_2O_3 :

Les figures IV.11-IV.14, montrent la variation des champs de vitesse pour les deux configurations AR=3 et AR=2, nous constatons que la vitesse diminue quand le rapport d'aspect augmente et les grandes vitesses sont localisées au milieu loin de la paroi, comme on peut constater deux zones de recirculations dans l'espace annulaire dont la taille est plus grande pour AR=3.

Les figures IV.15-IV.17, montrent les contours des lignes de courants, ces derniers sont caractérisés par l'apparition de deux zones de recirculation de part et d'autre des ailettes et dont la taille est plus grande pour RA=2.

Le nanofluide TiO_2

De même pour le nanofluide TiO_2 , les figures (IV19 à IV26) montrent les contours de vitesse et de lignes de courant pour les concentrations et les diamètres des particules citées ci-dessus. Les mêmes remarques sont observées.

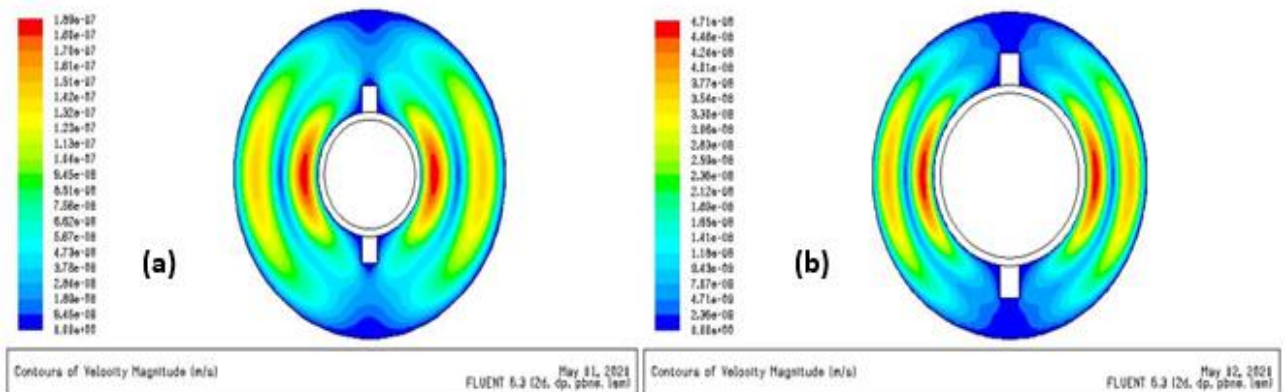


Figure IV.11 :Variation de vitesse le nanofluide Al_2O_3 $dp=5nm$, $\phi=0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

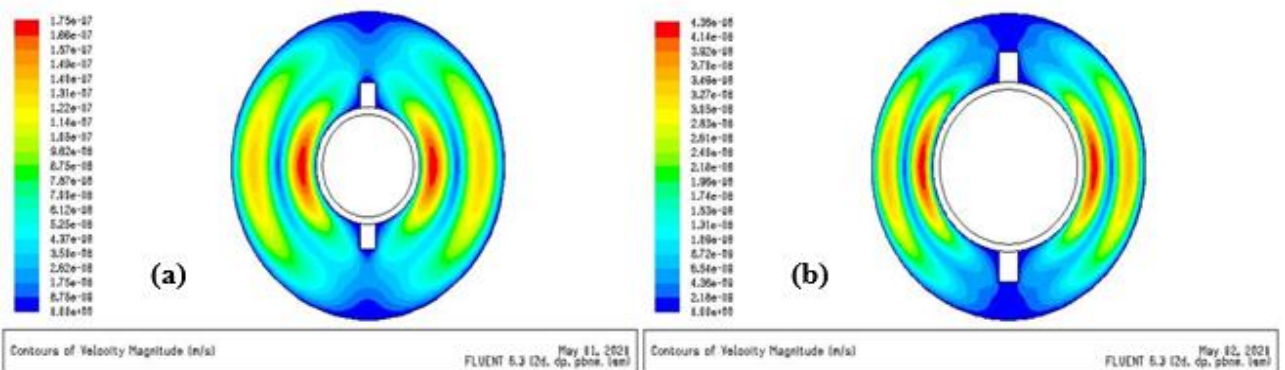


Figure IV.12 :Variation de vitesse le nanofluide Al_2O_3 $dp=5nm$, $\phi=0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

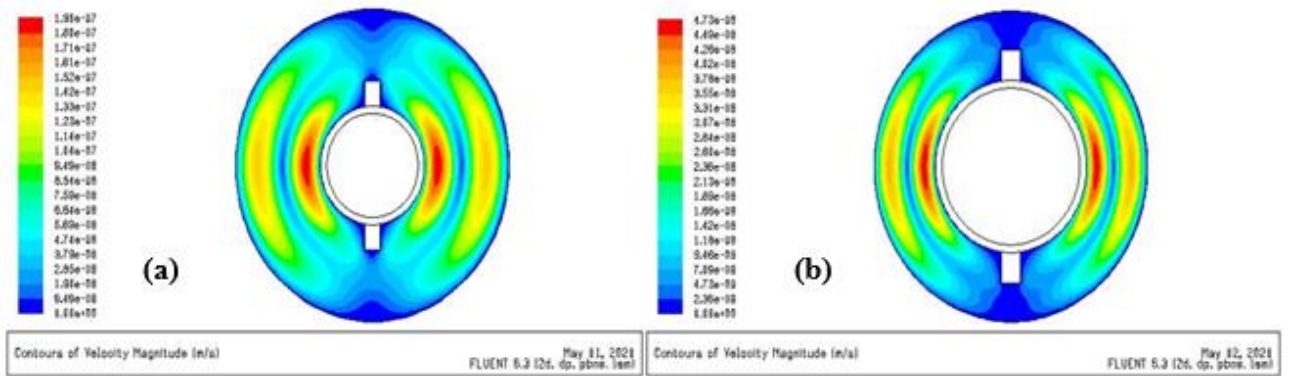


Figure IV.13 :Variation de vitesse le nanofluide Al_2O_3 $dp=80nm$, $\phi=0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

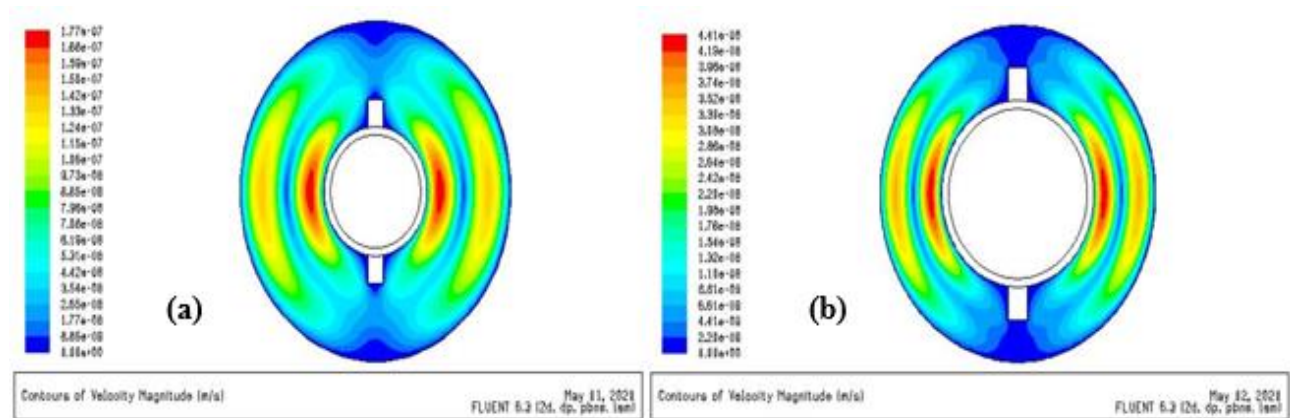


Figure IV.14 :Variation de vitesse le nanofluide Al_2O_3 $dp=80nm$, $\phi=0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

IV.6. Variation de la fonction de courant pour le nanofluide Al_2O_3 :

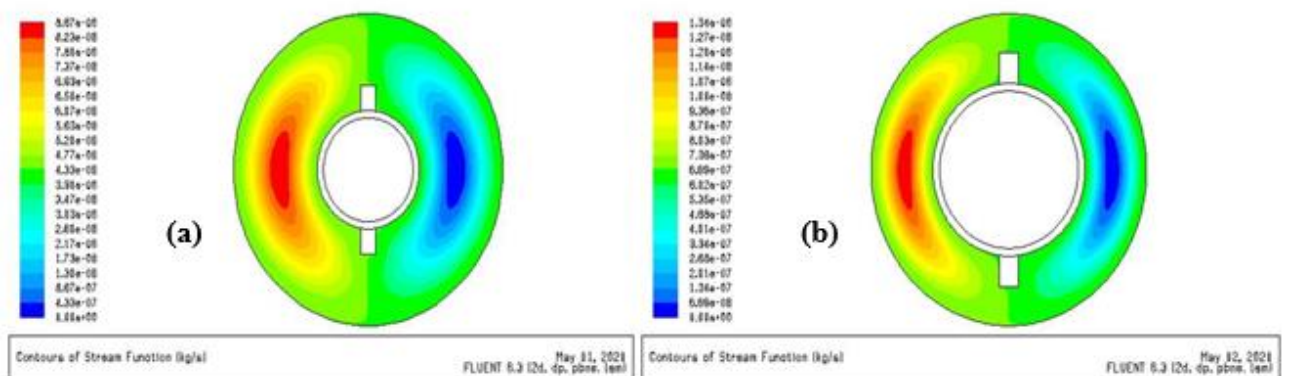


Figure IV.15: Variation de la fonction de courant pour le nanofluide Al_2O_3 , $dp=5nm$, $\phi=0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

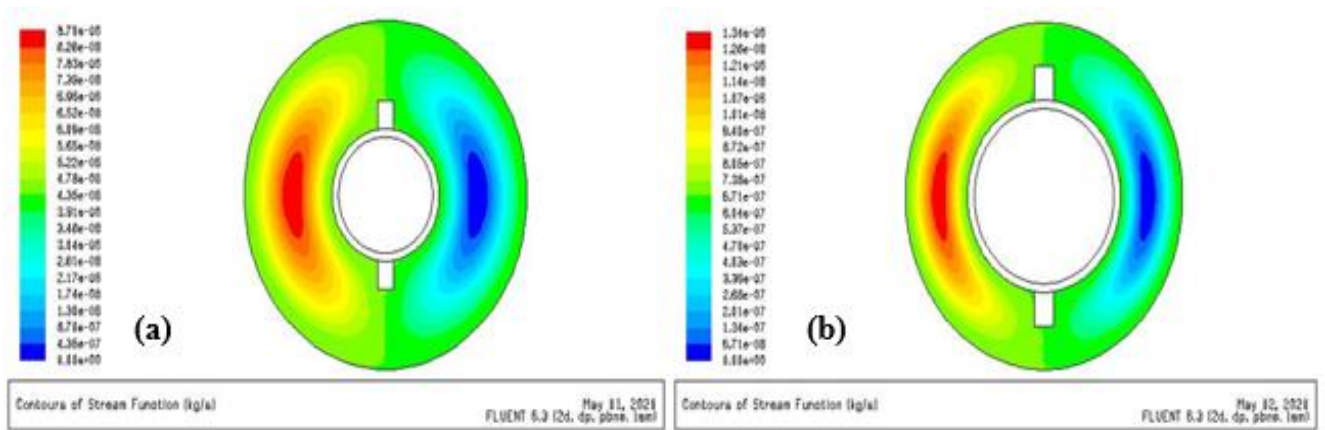


Figure IV.16 :Variation de la fonction de courant pour Le nanofluide Al_2O_3 , $dp=5nm$, $\phi=0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

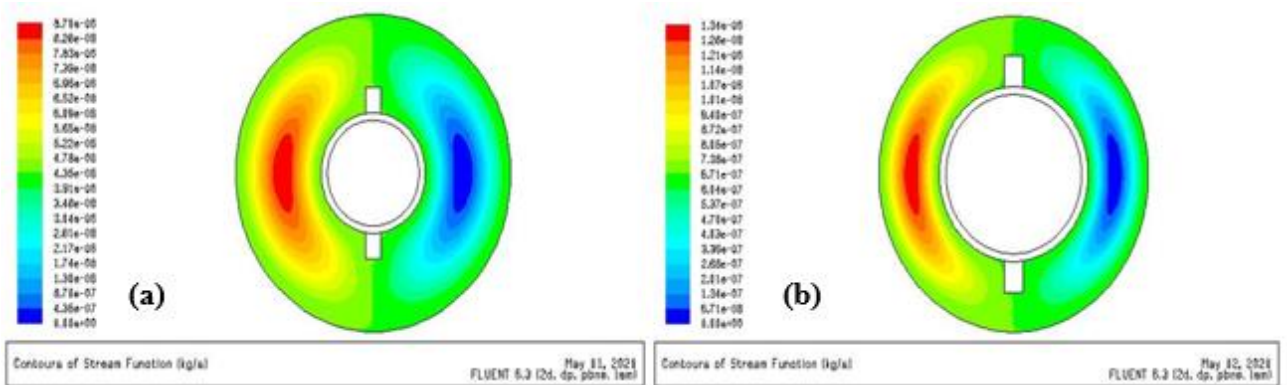


Figure IV.17 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide Al_2O_3 , $dp=80nm$, $\phi=0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

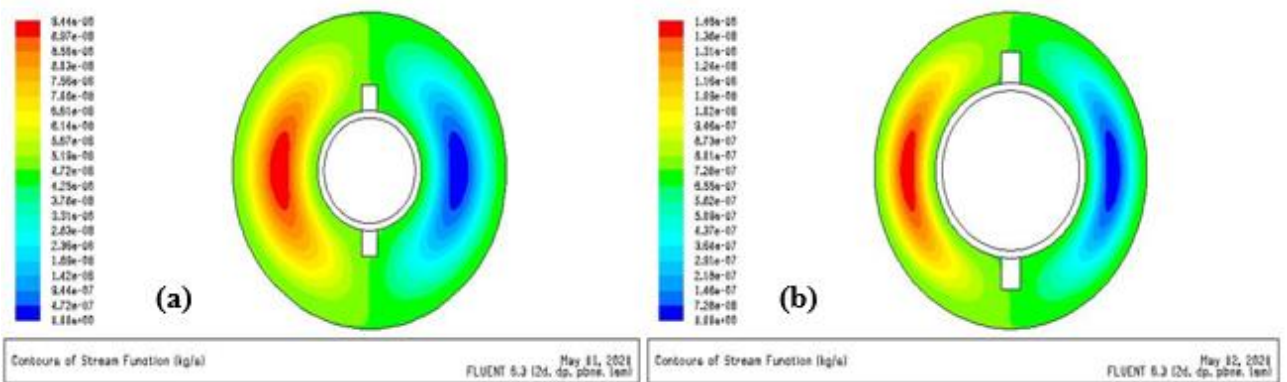


Figure IV.18:Variation de la fonction de courant pour le nanofluide Al_2O_3 , $dp=80nm$, $\phi=0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

IV.7. Variation des champs de vitesse Le nanofluide(Tio₂)

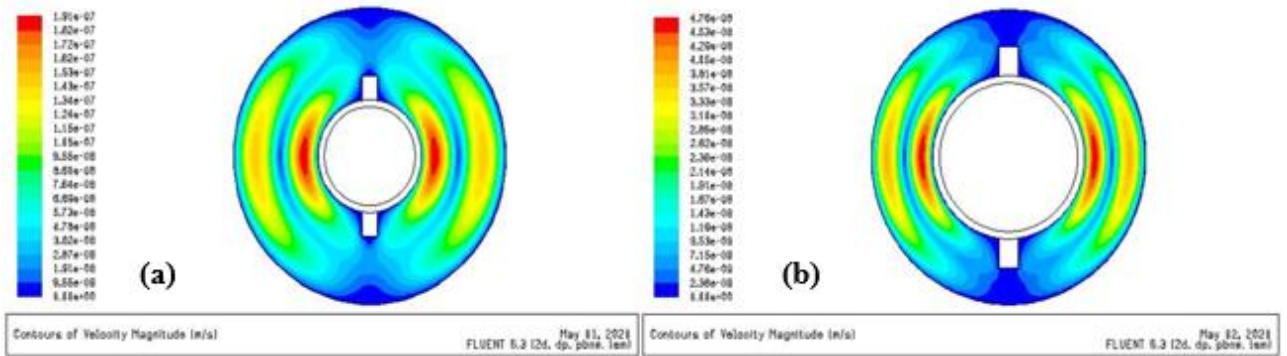


Figure IV.19 : Variation de vitesse le nanofluide Tio₂ $D_p = 5\text{nm}$, $\phi = 0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

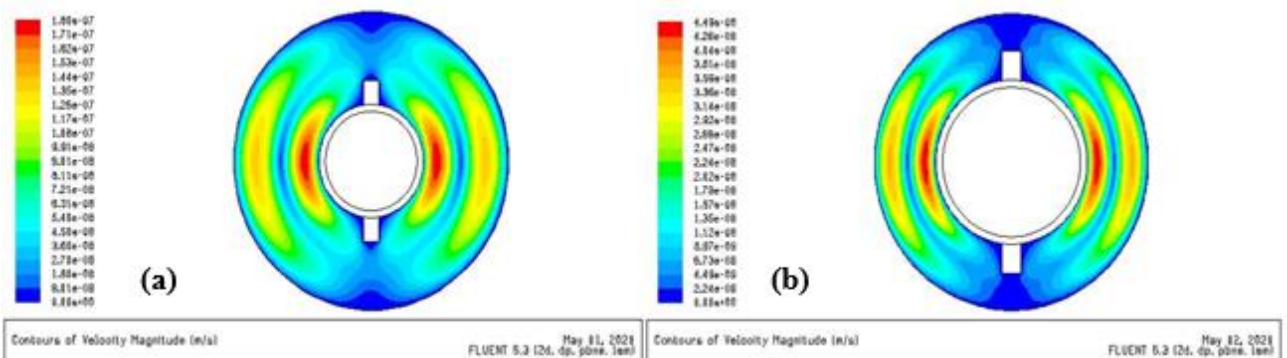


Figure IV.20 : Variation de vitesse le nanofluide Tio₂ $d_p = 5\text{nm}$, $\phi = 0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

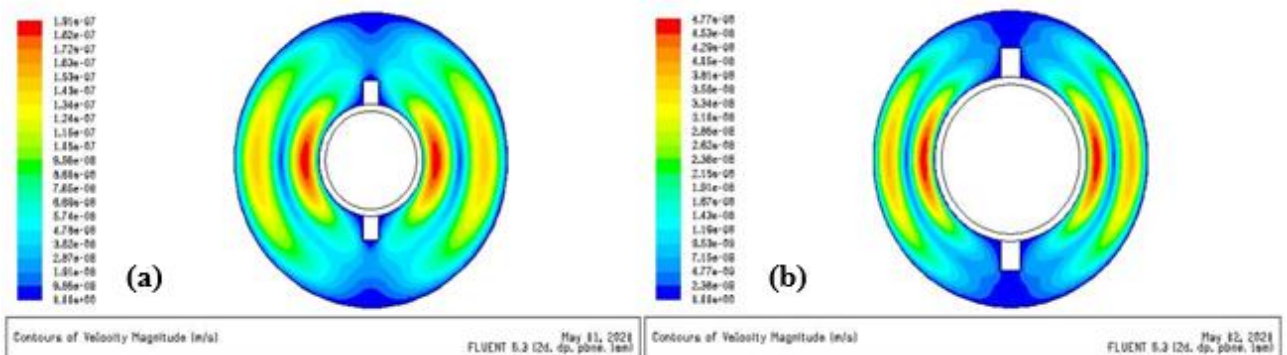


Figure IV.21 : Variation de vitesse le nanofluide Tio₂ $d_p = 80\text{nm}$, $\phi = 0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

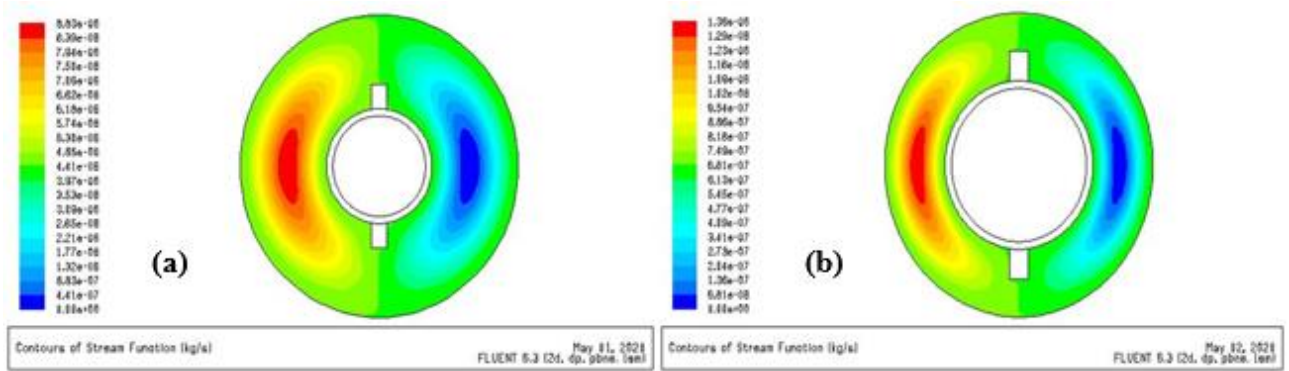


Figure IV.22 : Variation de vitesse le nanofluid TiO_2 $dp=80nm$, $\phi=0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

IV.8. Variation de la fonction de courant pour Le nanofluid TiO_2

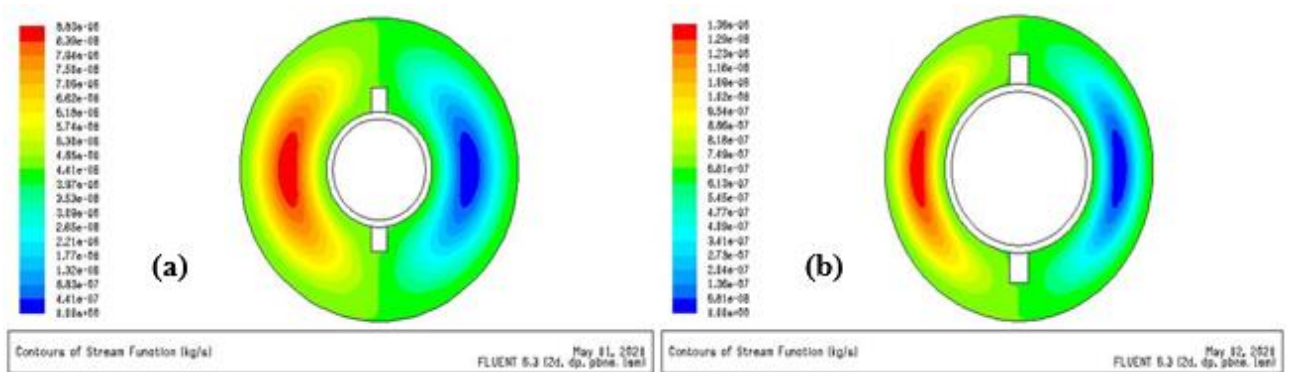


Figure IV.23 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluid TiO_2 , $dp=5nm$, $\phi=0.03$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

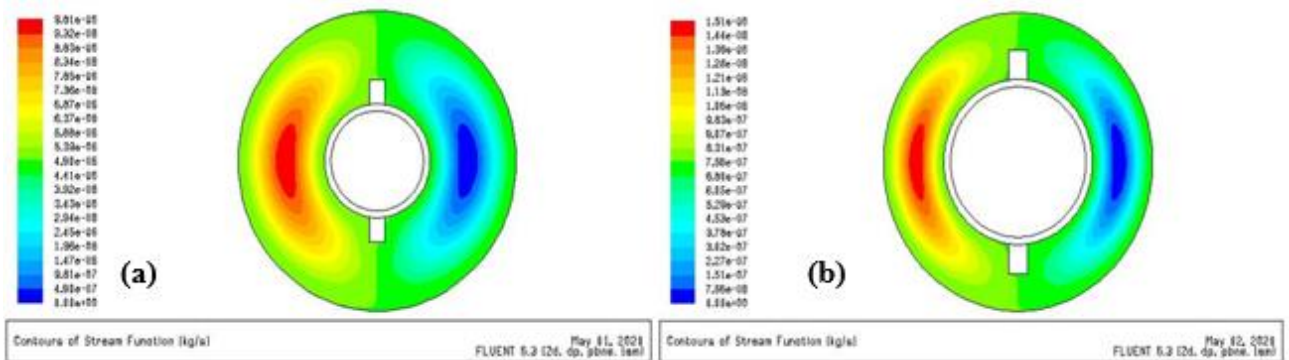


Figure IV.24 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluid TiO_2 , $dp=5nm$, $\phi=0.09$, (a) $A=3$, (b) $A=2$

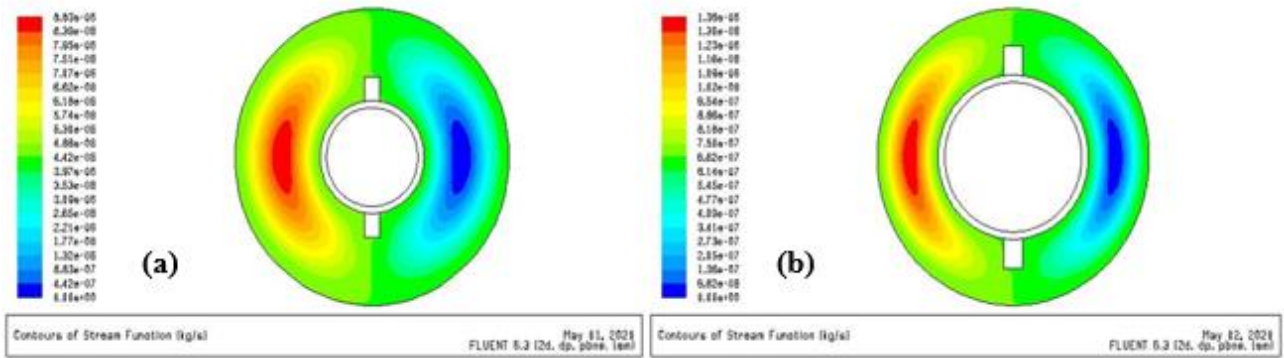


Figure IV.25 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide $TiO_2, dp=80nm, \phi=0.03,$ (a) $A=3,$ (b) $A=2$

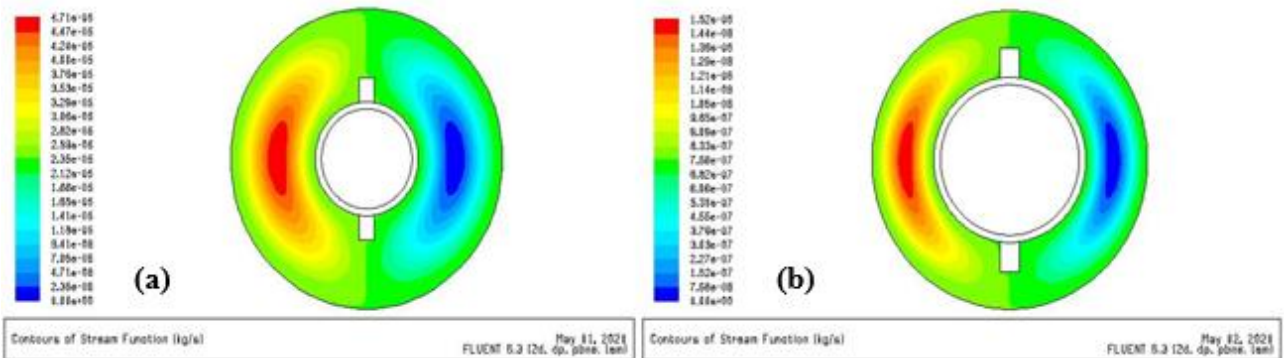


Figure IV.26 : Variation de la fonction de courant pour le nanofluide $TiO_2, dp=80nm, \phi=0.09,$ (a) $A=3,$ (b) $A=2$

IV.9.Effet de la taille des nanoparticules

Pourvoir l'influence de la taille des particules nanométriques, nous avons tracé le nombre de Nusselt moyen pour les deux nanofluides en fonction de la concentration. Figures IV.27 et IV.28.

Ces figure montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente quand la concentration augmente et le diamètre des particules est plus petit, donc on a un bon échange de chaleur quand le diamètre des particules est petit $dp=5nm$ et $dp=20nm$ aussi le nanofluide (eau+Al $2O_3$) offre une amélioration du transfert de chaleur par rapport au nanofluide (eau+ TiO_2).

Ce ci est aussi montré par les profils de température et de vitesse dans l'espace annulaire dans les figures IV.29et IV.30, IV31 et IV.32.

Les figures (IV.29 et IV.30) montrent les profils de température et de vitesse d'une ligne horizontale dans l'espace annulaire du la cavité et ces figures montrent que la température

diminue quand la concentration des nanoparticules augmente et le diamètre des nanoparticules est plus petit. La variation de la température est visible pour la concentration $\phi=0.09$ alors que, la vitesse diminue pour les deux nanofluides.

Les figures (IV.31 et IV.32) montrent aussi la variation de la température et de la vitesse dans une ligne radiale verticale dans l'espace annulaire, d'après ces figures nous constatons que la température est plus élevée près de la paroi et diminue et s'éloignant de cette dernière. Cependant la vitesse est nulle près des parois interne et externe et présente un maximum au milieu de l'espace annulaire.

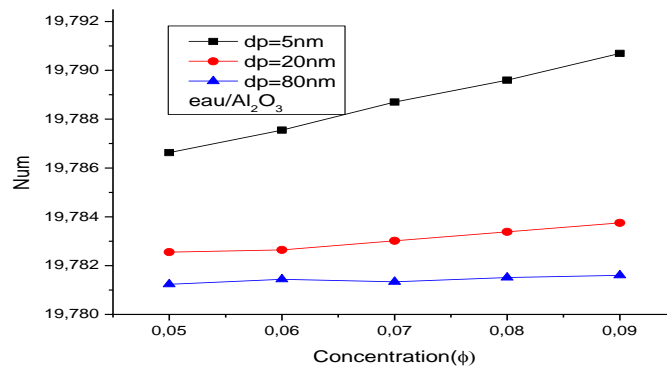


Figure IV.27 : Variation du nombre de Nusselt (*eau/AL₂O₃*) en fonction de la concentration

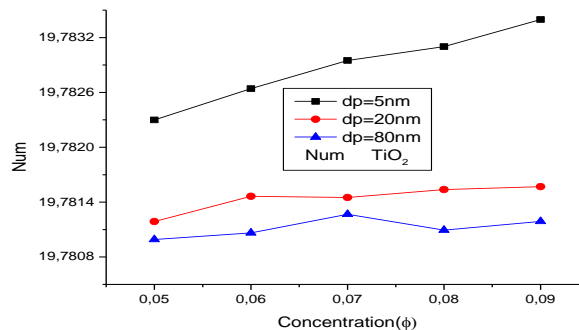


Figure IV.28 : Variation de nombre de Nusselt de (*eau/TiO₂*) en fonction de concentrations

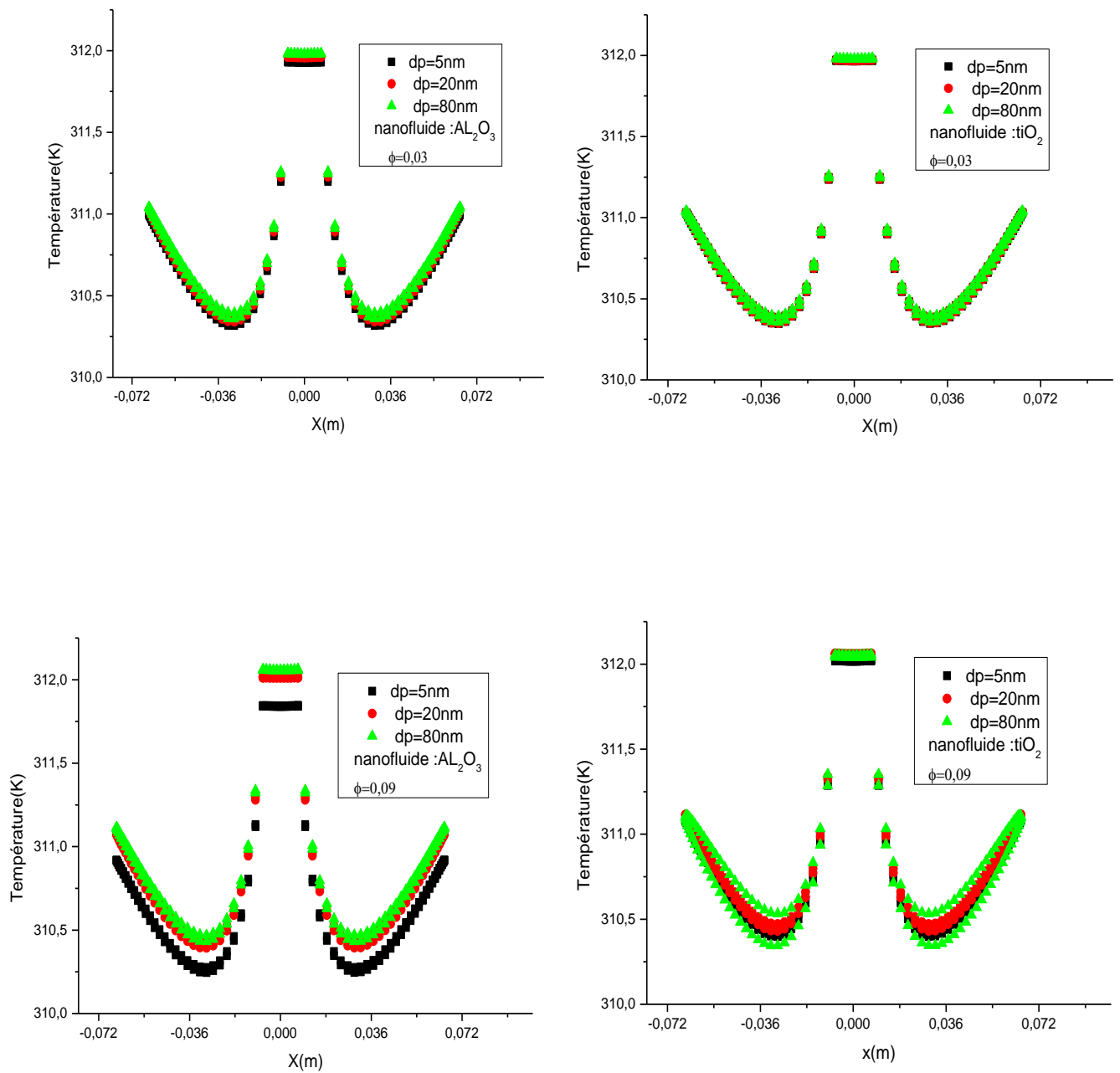


Figure IV.29 : Evolution de profile de température sur une ligne radiale horizontale $X(0.12, 0)$ (TiO_2 et Al_2O_3) $\phi=0.03$ et 0.09

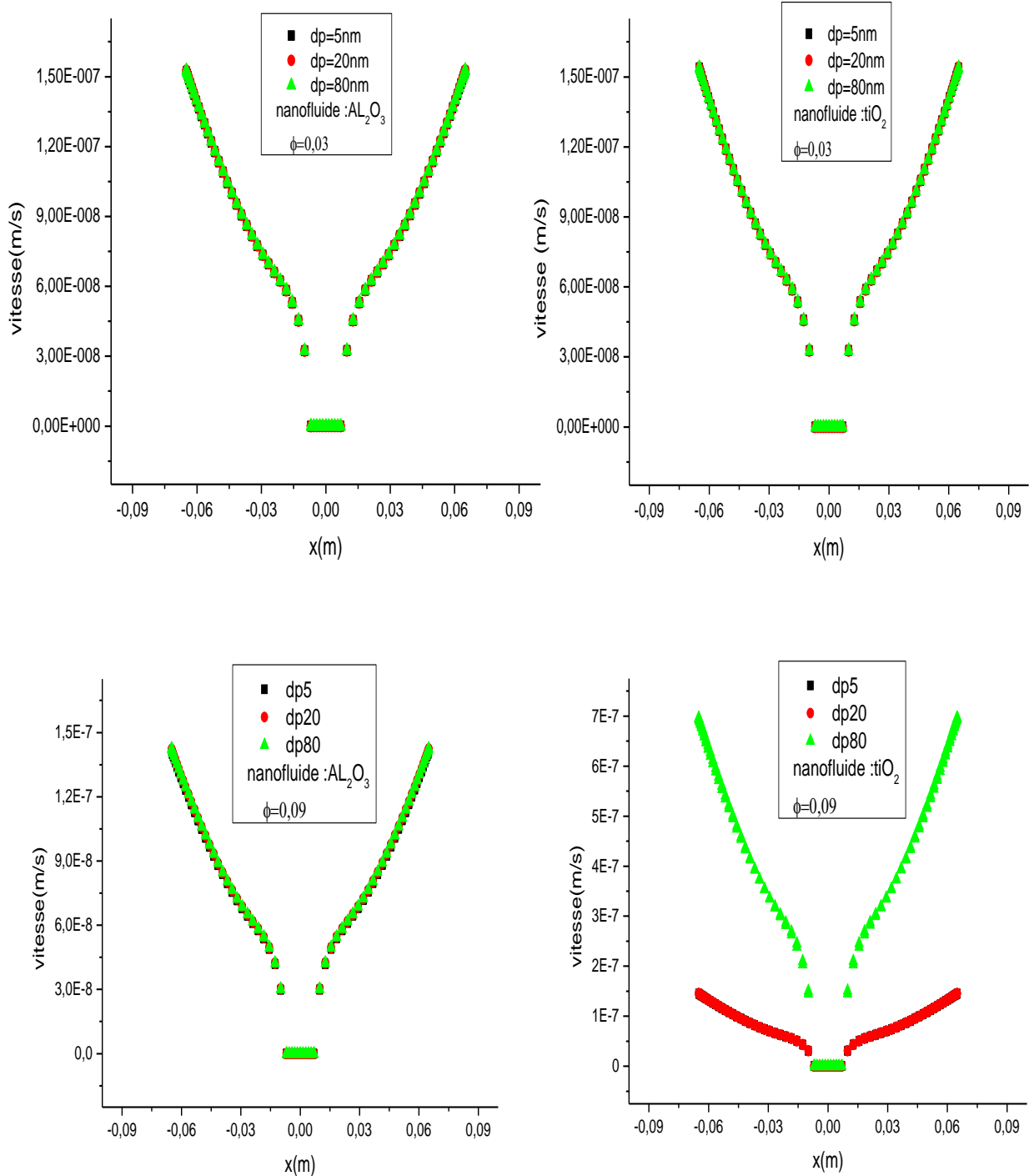


Figure IV.30 : Evolution de profile de vitesse sur une ligne radiale horizontale $X(0.12,0)$ (TiO_2 et Al_2O_3) $\phi=0.03$ et 0.09

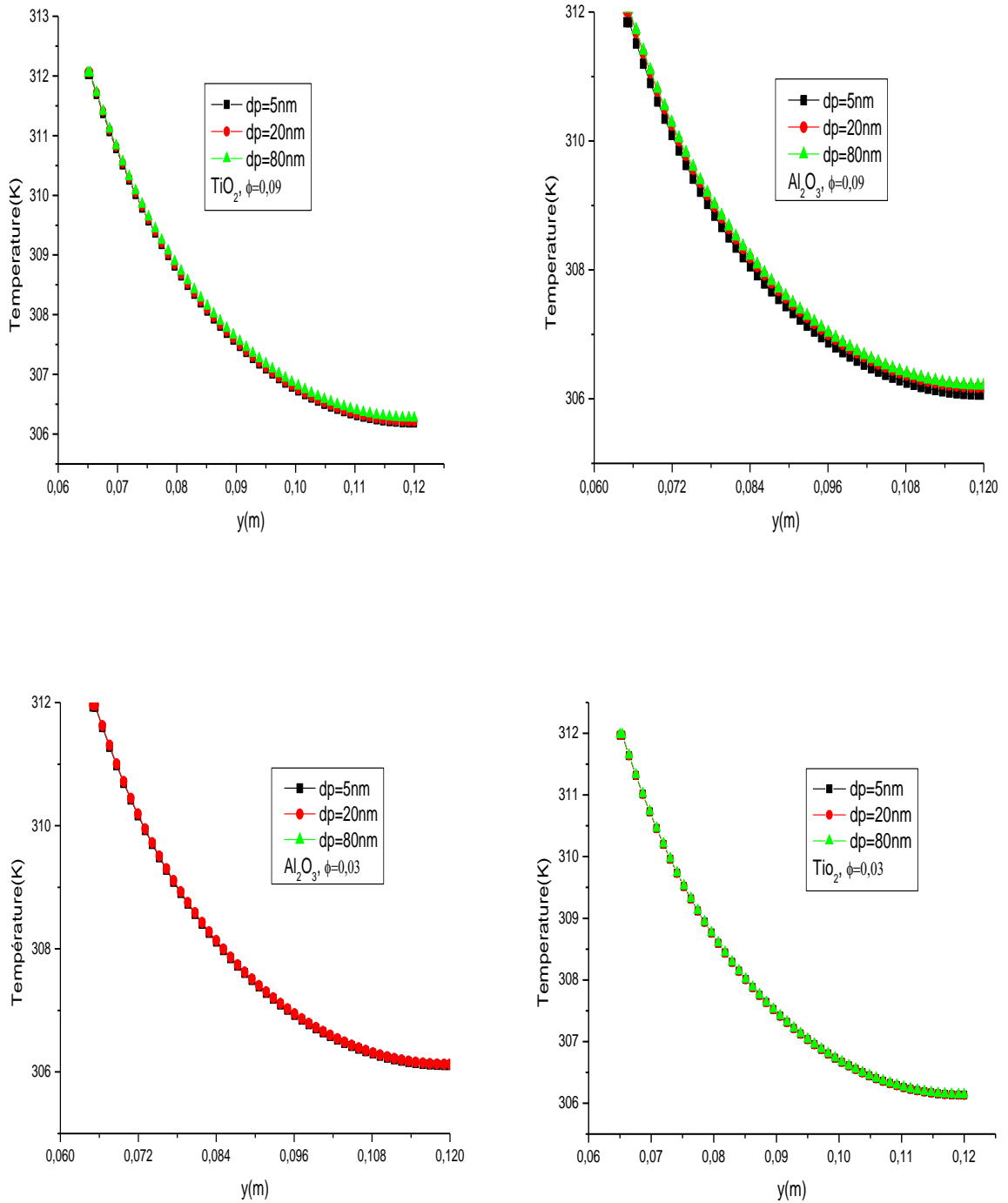


Figure IV.31 : Evolution de profile de température sur une ligne $y(0,0.12)m$ (TiO_2 et Al_2O_3)
 $\phi=0.03$ et 0.09

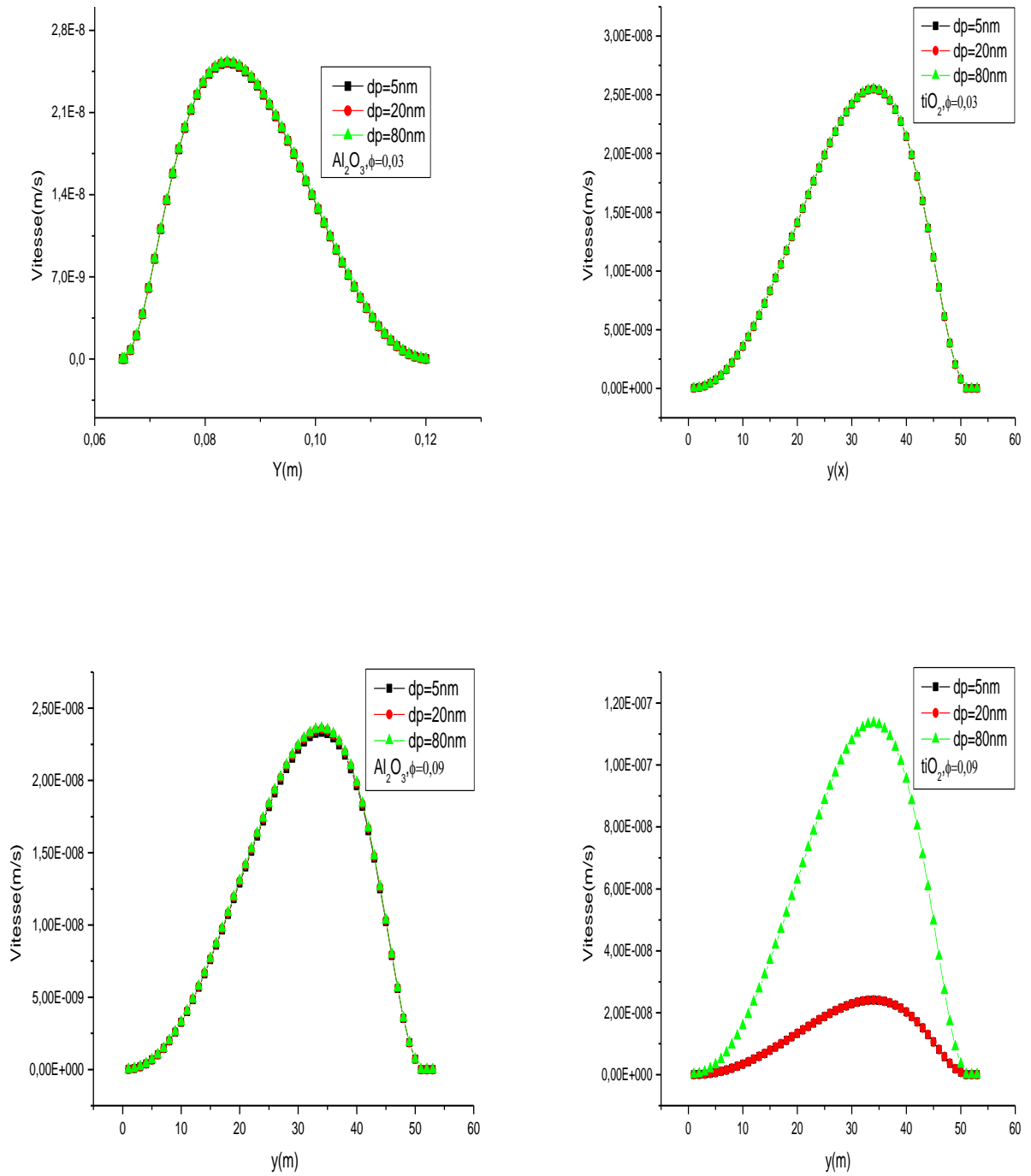


Figure IV.32 : Evolution de profile de vitesse sur une ligne $y(0,0.12)m$ (TiO₂ et Al₂O₃)
 $\phi=0.03$ et 0.09

***CONCLUSION
GENERALE***

Conclusion Générale

Dans ce mémoire nous avons étudié numériquement de transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité cylindrique annulaire remplie de nanofluide, dont la base fluide est l'eau mélangée à des nanoparticules de TiO_2 et Al_2O_3 par des logiciels Gambit pour la création de géométrie et Fluent pour les calculs numériques.

L'objectif principal de cette étude est la simulation numérique de l'écoulement laminaire bidimensionnel d'un nanofluide confiné dans une cavité circulaire et annulaire dont le cylindre interne qui est munit de deux ailettes est soumis à une génération de chaleur volumique uniforme, alors que la paroi du cylindre externe étant supposée adiabatique pour voir l'influence de la taille des nanoparticules sur le transfert de chaleur en tenant en compte des mouvements Browniens des particules par l'utilisation du modèle de Patel.

Les simulations numériques ont été effectuées pour un nombre de Reynolds $Re=1200$ (cavité $AR=3$) et $Re=900$ (cavité $AR=2$) et des différentes fractions volumiques du nanofluide ($\phi=0,03$ à $0,09$) dont la base fluide est l'eau mélangé avec des nanoparticules de TiO_2 et Al_2O_3 pour des diamètres des nanoparticules $d_p=5\text{nm}$, 20nm et 80nm .

Nous avons présenté les contours de température et de vitesse ainsi que la fonction de courant pour les fractions $\phi=0,03$ et $0,09$ et pour les deux rapports d'aspect de la conduite pour voir l'effet de la concentration du nanofluide ainsi que la taille de la conduite. Aussi nous avons présenté le nombre de Nusselt moyen en fonction de la concentration pour les eux nanofluide pour voir le taux de transfert de chaleur.

Nous avons présenté les profils de température et de vitesse respectivement pour une ligne horizontale et dans une ligne verticale de l'espace annulaire de la cavité pour les deux nanofluides utilisés et les diamètres des nanoparticules citées.

Les conclusions qu'on a pu tirer de ce travail sont:

- ✚ L'augmentation de la concentration et la diminution de la taille des nanoparticules dans la base de fluide l'eau a pour effet de diminuer la température du fluide dans la cavité.
- ✚ L'augmentation de la concentration a pour effet d'augmenter le transfert de chaleur

- ✚ Le changement de température pour les nanoparticules (eau/ Al_2O_3) est meilleur que pour la nanoparticule (eau/ TiO_2)
- ✚ Les particules de diamètre plus petit (5nm) offrent un meilleur taux de transfert de chaleur que celle de 20nm et 80nm.
- ✚ La variation des diamètres des nanoparticules n'a pas d'effet remarquable sur les profils de température et de vitesse excepté pour une concentration élevée ($\phi=0.09$) pour les deux nanofluides.

Références

- [1] Choi, S. Eastman, JA. - Enhancing thermal conductivity of fluids with nano-particles. ASME-Publications-FED.1995; 231:99–106.
- [2] Wen, D. Lin, G.Vafaei,S. Zhang, K.—Review of nanofluids for heat transfer applications. Particuology. 2009; 7:141–150.
- [3] LELEU René, Dossier Technique de l'ingénieur, j1080, Transfert de chaleur ,1992.
- [4] Saidur, R. Leong, K. Y, Mohammad, H A.—A review on application and challenges of nanofluids. RenewSustEnergRev.2011; 15, no.3: 1646–1668.
- [5] Das, SK. Choi, S U S. Yu, W.Pradeep, T. Nanofluids: Science and Technology.Hoboken, NJ: John Wiley& Sons, 2007.
- [6] B1. Bang, I., C., Chang, S., H. (2005):boilingheattransfer performance and phenomena of Al₂O₃- Water nanofluids from a plan surface in a pool, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 2407-2419.
- [7] R Ribeiro J., P., Gruss J., A. (2009) : Nanofluides pour les applications thermiques, technique de l'ingénieur, 2ème édition
- [8] RIBIERO João-Paulo, Dossier Technique de l'ingénieur, nm5115, Nanofluides pour les applications thermiques, 2009.
- [9] Evans, W. Prasher, R. Fish, J. Meakin, P. Phelan, P. and Keblinski,P.—Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nano composites and colloidal nanofluids. Int. J. Heat Mass Transf. 2008; 51,no. 5–6: 1431–1438.
- [10] Hong, KS.Hong, T K. and Yang,H S. —Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles. Appl. Phys. Lett. 2006; 88, no. 3: 31901.
- [11]Brinkman, H., The viscosity of concentrated suspensions and solutions. The Journal of Chemical Physics, 1952. 20(4): p. 571-571.
- [12]Patel, H.E., et al. A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids. in International Heat Transfer Conference 13. 2006. Begel House Inc.

Résumé :

Dans ce mémoire, on a mené une simulation numérique de la convection naturelle stationnaire dans une cavité annulaire remplie de nanofluide et dont le cylindre interne qui est munie de deux ailettes étant soumis à une génération de chaleur. Le nano fluide utilisé est de base l'eau mélangé avec des nanoparticules de TiO_2 et Al_2O_3 .

Les équations gouvernantes sont été discrétisées par la méthode des volumes finis et la résolution de ces équations est faite en utilisant les outils de simulation le logiciel Fluent et Gambit pour la construction de la géométrie, le maillage et les conditions aux limites.

Les simulations numériques ont été effectuées pour un nombre de Reynolds $Re=1200$ (cavité $AR=3$) et $Re =900$ (cavité $AR=2$) et des différentes fractions volumiques du nanofluide ($\phi=0,03$ à $0,09$) dont la base fluide est l'eau mélangé avec des nanoparticules de TiO_2 et Al_2O_3 pour des diamètres des nanoparticules $dp=5nm, 20nm$ et $80nm$.

Les résultats sont analysés à travers les champs thermique et hydrodynamiques avec une attention particulière au nombre de Nusselt en fonction du diamètre et la concentration des nanoparticules.

Une étude paramétrique a été menée en considérant le rapport d'aspect de la cavité, le diamètre des nanoparticules, la concentration et le type de nanoparticules.

Mots clés: Nanofluide, Convection naturelle, nombre de Rayleigh, Fluent ,nombre de Nusselt.

ملخص:

في هذه الرسالة أجرينا محاكاة عددية للحمل الحراري الطبيعي الثابت في تجويف حلقي مملوء بسائل نانوي والذي تتعرض اسطوانته الداخلية المزودة بزعنفتين لمصدر من الحرارة . السائل النانوي المستخدم هو الماء ممزوج بجسيمات نانوية للالمنيوم والتيتان.

يتم تحديد المعادلات الحاكمة من خلال طريقة الحجم المحدود ويتم حل هذه المعادلات باستخدام أدوات المحاكاة وبرنامجي فليانت و غامبيت لبناء الهندسة والشبكة وشروط الحدود

تم اجراء عملية محاكاة عددية لرقمي رينولد $Re=1200$ (ذات تجويف 3) و $Re=900$ (ذات تجويف 2) مع اختلاف تراكيز الجزيئات النانوية من $\phi=0.03$ الى $\phi=0.09$ واختلاف اقطارها D من (5, 20, 80 نانومتر)

تم تحليل النتائج من خلال المجالات الحرارية والهيدروديناميكية مع إيلاء اهتمام خاص لرقم نسلت كدالة القطر وتركيز الجسيمات النانوية.

تم إجراء دراسة بارامترية مع الأخذ بعين الاعتبار نسبة أبعاد التجويف وقطر الجسيمات النانوية وتركيزها ونوع الجسيمات النانوية.

كلمات مفتاحية: نانوفلويد - الحمل الطبيعي- عدد رايلى - فليانت - عدد نيسلت