

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme MASTER Académique  
Spécialité : ENERGETIQUE

Thème :

**Simulation numérique de la convection  
forcée entre deux disques en présence  
d'un nanofluide**

Proposé et dirigé par :

**Mr. SALHI. F**

Présenté par :

**KLALECHE Sofiane**

**MADJOUR Abderrahmane**

**2014/2015**

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme MASTER Académique  
Spécialité : ENERGETIQUE

Thème :

**Simulation numérique de la convection  
forcée entre deux disques en présence  
d'un nanofluide**

Proposé et dirigé par :

**Mr. SALHI. F**

Présenté par :

**KLALECHE Sofiane**

**MADJOUR Abderrahmane**

**2014/2015**

## Remerciements

Nous remercions Dieu pour le courage et la volonté sans lesquels cette étude n'aurait jamais vu le jour.

D'abord nous tenons à exprimer toutes nos gratitude à notre promoteur Mr.SALHI Faouzi pour sa disponibilité, sa gentillesse et ces conseils judicieux tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements vont à nos très chers parents pour leurs efforts fournis et leurs conseils pendant toute ces années d'études.

Nous souhaitons 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.

## Dédicaces

*Je dédie ce mémoire*

*À mes très chers parents*

*À mes sœurs*

*À toute ma famille*

*À tous mes amis(es)*

*Sofiane*

## Dédicaces

*Je dédie ce mémoire*

*À mes très chers parents*

*À mes frères et ma sœur*

*À tous mes amis(es)*

*À toute ma famille*

*Abderrahmane*

## NOMENCLATURE

### SYMBOLES LATINS

$C_p$  : est la chaleur spécifique [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ]

$D$  : dimension géométrique (diamètre) [m]

$e$  : épaisseur de la couche limite [m]

$f$  : résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide [N]

$Gr$  : nombre de Grachof.

$h$  : le coefficient d'échange convectif du nanofluide [ $\text{W.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$ ]

$h_p$  : coefficient d'échange convectif des fluides pures (Eau, E.G) [ $\text{W.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$ ]

$M$  : Emittance [ $\text{W/m}^2$ ].

$Nu$  : le nombre de Nusselt.

$Nu_m$  : le nombre de Nusselt moyen.

$P$  : la pression [Pa]

$Pr$  : nombre de Prandtl.

$q$  : la source de la chaleur [w]

$\vec{q}$  : flux de chaleur perdu par conduction thermique [w]

$Q$  : débit volumique d'écoulement [ $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ]

$r$  : perte de chaleur volumique due au rayonnement.

$Ra$  : le nombre de Rayleigh.

$Re$  : le nombre de Reynolds.

$R_{ext}$  : Le rayon extérieur [m]

$R_i$  : rayon intérieur [m]

$S$  : surface [ $\text{m}^2$ ]

$t$  : variable indépendante représente le temps [s]

$T$  : température dimensionnelle [k]

$T_f$  : température du filme laminaire de l'écoulement [k]

$T_p$  : température de la paroi du milieu considéré [k]

$u$  : composante axiale du vecteur vitesse [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$v$  : composante radiale du vecteur vitesse [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$V$  : vitesse caractéristique de l'écoulement. [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$V_c$  : vitesse critique [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$V_m$  : vitesse moyenne du fluide [ $m.s^{-1}$ ]

$V_p$ : volume de solide (nanoparticules) [ $m^3$ ]

$V_T$ : volume totale (volume du nanofluide) [ $m^3$ ]

$\vec{v}(u, v, w)$  : désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide [ $m.s^{-1}$ ]

$n$  : facteur de forme.

$x$  : variable indépendante représente la position [m]

## INDICES

$f$ : fluide

$bf$ : fluide de base.

$nf$ : nanofluide.

$p$ : particule.

## SYMBOLES GRECS

$\rho_{nf}$ : masse volumique de nanofluide [ $Kg.m^{-3}$ ]

$\lambda_{nf}$ : Conductivité thermique de nanofluide [ $w.Kg^{-1}k^{-1}$ ]

$\lambda$ : Conductivité thermique [ $w.m^{-1}.k^{-1}$ ]

$\sigma = 5,67.10^{-8}$  est la constante de STEFAN-BOLTZMANN [ $W/(m^2.k^4)$ ].

$\nu$  : Coefficient de viscosité cinématique du fluide [ $m^2.s^{-1}$ ]

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide (Poiseuille, Pa. s).

$\rho$  : masse volumique [ $Kg.m^{-3}$ ]

$\Phi$  : flux de chaleur [w]

$\beta$  : Coefficient d'expansion thermique.

$\phi$  : Concentration volumique.

$\alpha_f$ : Diffusivité thermique.

$\alpha$  : Coefficient d'absorption.

$\varepsilon$  : Coefficient d'émission.

$\xi$  : Coefficient de réflexion.

$\vec{\tau} = (\tau)_{ij}$  : Tenseur des contraintes visqueuses.

## Liste des figures

Numéro de la figure	Titre de figure	Page
I.01	Conduction entre deux plaques horizontales.	4
I.02	Conduction dans une couche élémentaire de mur plan.	5
I.03	Principe physique de la convection naturelle.	16
I.04	Emanation de chaleur sur une puce électronique.	17
I.05	Nanotube de carbone	20
I.06	Nanoparticules d'Argent	20
I.07	Vue microscopique des nanoparticules dans un tube	22
I.08	Rapprochement et attraction entre nanoparticules conduisant à des ensembles plus massifs.	24
I.9	Nanofluides vus au microscope électronique (de gauche à droite) : éthylène glycol + cuivre à 0,5% ; eau+alumine ; eau+or à 2nm ; eau + nanotubes.	24
I.10	Exemple de nanofluides aqueux et opaques avec seulement 1 % de nanoparticules de diverses natures	25
I.12	Transparence naissante avec la diminution de la taille moyenne des nanoparticules de $SiO_2$ dans de l'éthanol	25
II.1	Configuration bidimensionnelle de la géométrie de notre étude	28
III.1	Interface générale du logiciel Gambit	42
III.2	Panneau Global Control.	43
III.3	Panneau d'opération (création des points (a), des segments (b)).	44
III.4	Panneau d'opération (création des surfaces (c), des volumes (d)).	45
III.5	Panneau d'opération (construction des groupes (e)).	46
III.6	Panneau d'opération (options de maillage).	47
III.7	Construction des maillages de type couches limites.	47

III.8	Construction des maillages des segments (g) et des surfaces (h) de la géométrie	47
III.9	Construction des maillages des volumes (d) et des groupes (e) de la géométrie.	48
III.10	mise en place des conditions aux limites(k) et des caractéristiques des domaines (l).	49
III.11	Panel des outils de configuration.	49
III.12	Procédure de modélisation de la géométrie sous Gambit	52
III.13	La géométrie à réaliser sous Gambit	52
III.14	Position des points après recadrage de la zone graphique.	54
III.15	Visualisation des segments du domaine.	55
III.16	Visualisation des faces du domaine	56
III.17	Maillage des segments	57
III.18	Maillage du domaine	57
III.19	Définition du segment de l'entrée	58
III.20	Définition des blocs.	58
III.21	Procédure de modélisation sur le logiciel Fluent	60
III.22	Importation de la géométrie	61
III.23	Vérification du maillage sou Fluent	62
III.24	Lissage du maillage	62
III.25	Choix de l'unité de longueur	63
III.26	Choix du solveur sous Fluent	63
III.27	Affichage de la grille	64
III.28	Choix du régime d'écoulement.	64
III.29	Définition des caractéristiques du fluide (eau)	65
III.30	Définition des caractéristiques du fluide (éthylène-glycol)	65
III.31	Interprétation de l'UDF	67
III.32	Valeurs des conditions aux limites pour la paroi inférieure	67
III.33	vitesse à l'entrée	68
III.34	Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence	68
III.35	Allures de l'évolution des résidus de calcul	69
IV.1	Variation du nombre de Nusselt le long de la paroi inférieure à différents nombre de Reynolds	70
IV.2	Effet du nombre de Reynolds sur Nusselt (Résultats de Maïga et al)	71
IV.3	Evolution du nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x (paroi inférieure) à Re=500	72
IV.4	Evolution du nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x (paroi inférieure) à Re=2000	72
IV.5	Evolution du nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x à Re=500 (cas de E.G)	73
IV.6	Evolution du nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x (paroi inférieure) à Re=2000 (cas de l'E.G)	73

IV.7	Evolution de la température en fonction de l'abscisse x (paroi inferieure) à Re=500	76
IV.8	Evolution de la température en fonction de l'abscisse x (paroi inferieure) à Re=2000	76
IV.9	Evolution de la température en fonction de l'abscisse x à Re=500 (cas de l'E.G).	77
IV.10	Evolution de la température en fonction de l'abscisse x (paroi inferieure) à Re=2000 (cas de l'E.G)	77
IV.11	Figure récapitulative des différents rapports (h/hr) en fonction des concentrations et nombres de Reynolds de toutes les simulations.	80

### Liste des tableaux

Numéro de tableau	Titre de tableau	Page
Tableau :I.01	Ordre de grandeur de la conductivité thermique à la température ambiante (20°C).	6
Tableau :I.02	Allures du nombre de Nusselt en convection naturelle et forcée	14
Tableau :I.03	Les propriétés thermo-physiques de différents matériaux.	21

## Table des matières

Remerciements .....	i
Dédicace .....	ii
Nomenclature .....	iv
Liste des figures et des tableaux.....	vi
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le transfert de chaleur et les nanofluides</b>	
I. Modes de transfert de chaleur .....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Conduction .....	3
I.2.1. Loi de Fourier et notion de flux .....	4
I.2.2. Equation de conduction de chaleur .....	5
I.2.3. La conductivité thermique .....	6
I.3. Rayonnement .....	7
I.4. Convection .....	8
I.4.1. Introduction.....	8
I.4.2. Définition .....	9
I.4.3. Phénomène de convection.....	9
I.4.4. Procédure de calcul d'un flux de chaleur.....	9
I.4.4.1. Groupements adimensionnels .....	10
a) Nombre de Prandtl.....	10
b) Nombre de Rayleigh.....	10
c) Nombre de Grachof .....	10
d) Nombre de Nussel.....	11
e) Nombre de Reynolds.....	11
I.4.4.2. Régimes d'écoulement. ....	12
I.4.4.2.1. Ecoulement laminaire .....	12
I.4.4.2.2. Ecoulement turbulent .....	13
I.4.4.3. Choix de la corrélation et calcul de Nusselt.....	13
I.4.4.4. Calcul de h .....	14
I.4.5. Types de convection .....	15
I.4.5.1. Convection libre ou naturelle.....	15
I.4.5.2. Convection forcée .....	16

I.4.6. Domaines Applications .....	16
I.5. Généralité et définition des nanofluides .....	17
I.5.1. Introduction.....	17
I.5.2. Définition d'un nanofluide.....	18
I.5.3. Définition des nanoparticules .....	18
I.5.3.1. Taille des nanoparticules.....	20
I.5.4. Préparation de nanofluide .....	21
I.5.4.1. Procédés de fabrication de nanoparticules .....	21
I.5.4.2. Procédés d'obtention d'un nanofluide .....	22
I.5.5. Nature du mélange obtenu .....	23
I.5.6. Les applications des nanofluides .....	24
I.5.6.1. Les avantages du nanofluide .....	26
I.5.6.2. Les inconvénients du nanofluide .....	26

## **Chapitre II : Modèle physique et mathématique**

II. Modèle physique et mathématique .....	28
II.1. Introduction .....	28
II.2. Modèle physique.....	28
II.3. Formulation mathématique.....	29
II.3.1. Formulation différentielle des équations dans le cas général .....	29
II.4. Hypothèses simplificatrices .....	31
II.5. Modèle mathématique pour le fluide de base .....	31
a) Equation de conservation de la masse.....	31
b) Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes).....	31
c) Equation de conservation de l'énergie .....	32
II.6. Modèle mathématique pour un nanofluide(mélange fluide de base +nanoparticuls .....	32
a) Equation de conservation de la masse.....	32
b) Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes).....	33
c) Equation de conservation de l'énergie .....	33
II.7. Propriétés thermophysiques des nanofluides.....	34
II.7.1. La fraction volumique.....	34
II.7.2. Masse volumique .....	35
II.7.3. Conductivité thermique.....	35

a)-Modèle de Maxwell(1873) .....	35
b)-Modèle de Hamilton et Crosser(1962) .....	36
II.7.4. Viscosité dynamique.....	37
II. 7.4.a)-Modèle d'Einstein .....	37
II.7.4.b)-Modèle de Brinkman (1952).....	37
II.7.4.c)-Modèle de (Masuda et al1993;Lee et al1999;Wang et al1999 et Maiga et al2005).....	38
II.7.5. Chaleur spécifique .....	38
II.7.6.Coefficient d'expansion thermique .....	39
II.8. Méthode numérique .....	39
II.9. Procédure numérique .....	40

### **Chapitre III : Procédure de simulation numérique**

III.1. Introduction .....	41
III.2. Présentation du logiciel Gambit .....	41
III.2.1. Description de l'interface général du logiciel Gambit.....	41
III.2.1.1.Description de menu du Panel graphique.....	42
III.2.1.2. Description des menus du Panel Global Control .....	43
III.2.1.3. Description des menus du Panel Operation.....	44
III.2.2. Types, techniques et qualité d'un maillage .....	50
III.2.2.1. Choix du type de maillage.....	50
a)-Maillage structuré .....	50
b)-Maillage non structuré .....	50
c)-Maillage hybride .....	50
III.2.2.2. Technique générales de génération d'un maillage .....	51
III.2.2.3. Qualité d'un maillage .....	51
III.3. Procédure de modélisation .....	52
III.4. Utilisation de Gambit .....	52
III.4.1. Réalisation du maillage .....	52
III.4.2.Ouverture de la session .....	53
III.4.3. Création des points du domaine .....	54
III.4.4. Recadrage de la zone graphique.....	54
III.4.5. Créations des segments .....	55
III.4.6. Création des surfaces du domaine .....	55
III.4.7. Maillage de la géométrie obtenu .....	56
III.4.7.1. Création du maillage des segments .....	56

III.4.7.2. Maillage des surfaces obtenus.....	57
III.4.7.3. Mise en place des conditions aux limites.....	58
III.4.7.4. Mise en place des différents blocs de calculs.....	58
III.4.8. Exportation du maillage et sauvegarde de session.....	59
III.5. Présentation du logiciel "Fluent.....	59
III.5.1. Procédure de modélisation sous Fluent.....	60
III.5.2. Procédure de simulation sous Fluent.....	61
III.5.3. Choix du mode simple précision ou double précision.....	61
III.5.4. Principales étapes de simulation sous FLUENT.....	61
III.5.4.1 Importation de la géométrie(MSH).....	61
III.5.4.2 Vérification du maillage importé de Gambit.....	62
III.5.4.3 Lissage du maillage.....	62
III.5.4.4 Vérification de l'unité de longueur.....	63
III.5.4.5 Choix du Solveur.....	63
III.5.4.6 Affichage de la grille.....	64
III.5.4.7 Choix du régime d'écoulement.....	64
III.5.4.8 Définition des caractéristiques du fluide.....	65
a) Cas où le fluide est de l'eau.....	65
b) Cas où le fluide est l'Ethylène Glycol.....	65
c) Cas d'un nanofluide (injection et interprétation de l'UDF).....	66
III.5.4.9 Mise en place des conditions aux limites usuelles.....	67
III.5.4.10 Mise en valeur de la vitesse à l'entrée de la conduite (géométrie considérée).....	68
III.5.4.11 Choix des critères de convergence.....	68
III.5.4.12 Sauvegarde du fichier. Cas and Dat.....	69
III.5.4.13 Traitement graphique des résultats.....	69

### **Chapitre IV : Résultats et discussions**

IV. Résultats et discussions.....	71
IV.1. Introduction.....	71
IV.2. Effet du nombre de Reynolds sur Nusselt.....	71
IV.3. Résultats sous forme de courbes pour l'évolution du nombre de Nusselt le long de la paroi inférieure lors de simulation de la convection forcée avec l'eau en écoulement.....	73
IV.4. Résultats sous forme de courbes de l'évolution du nombre de Nusselt le long	

de la paroi inferieure lors de simulation de la convection forcée avec l’EthylèneGlycol enécoulement .....	73
IV.5. Analyses et discussions des figures (IV.3, IV.4, IV.5 et IV.6) .....	74
IV.6. Résultats sous forme de courbes de l’évolution de la température le long de la paroi inferieure lors de simulation de la convection avec l’eau en      écoulement .....	77
IV.7. Résultats en courbes de l’évolution de la température le long de la paroi inferieure lors de simulation de la convection forcée avec l’Ethylène Glycol en écoulement .....	78
IV.8. Analyses et discussions des figures (IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10) .....	79
IV.9. Récapitulation des courbes.....	81
 <b>Conclusion générale .....</b>	 <b>84</b>
<b>Bibliographie</b>	

# Introduction Générale

## Introduction Générale

L'amélioration du transfert de chaleur est un objectif capital dans plusieurs applications, et pour ce faire, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude d'essais numériques et expérimentaux portant sur la description des phénomènes géométriques et les modes de transfert de chaleur.

Chronologiquement, les idées d'amélioration ont commencé à toucher surtout la géométrie des systèmes à l'échelle macroscopique, et la nature physico-chimique des milieux convectifs. Les tentatives d'amélioration ont parfois touché l'aspect microscopique du processus.

Mais l'apparition et le développement rapide des nanosciences et nanotechnologies, pendant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, ont permis à la convection de prendre une grande part de ce nouvel penchant, et donc un autre aspect de perfectionnement. C'est au niveau nanométrique de la matière, du milieu convectif, que les récents travaux ont été concentrés en visant le développement d'un liquide de refroidissement plus performant permettant une diminution de la consommation énergétique.

Parmi les solutions d'actualité trouvée est celle des **nanofluides**, introduite par Choi en 1995 à *Argonne National Laboratory*, qui sont des solutions colloïdales formées par des particules de taille nanométrique (1 à 100 nm), à bases métalliques ou oxydes-métalliques en suspension dans un liquide de base telle que l'eau pure, l'Éthylène- Glycol et les huiles.....La présence des nanoparticules dans des fluides de base change leurs propriétés de diffusion telles que la conductivité thermique et la viscosité.

D'autres parts, La convection forcée en cavité ouverte est importante à cause de sa présence dans plusieurs applications industrielles, circuits électroniques, échangeurs thermiques, réacteurs nucléaires, croissance cristalline, systèmes des énergies géothermiques, systèmes d'échauffement et de refroidissement.... C'est pour cette raison que l'écoulement en cavité ouverte continue à attirer l'attention de plusieurs chercheurs, dont le but est d'approfondir leurs connaissances sur ce domaine afin d'améliorer les échanges thermiques dans les applications industrielles citées.

Pour cela et pour tous ces causes, nous avons eu la motivation d'aborder ce sujet important.

Le présent travail, est une simulation numérique du transfert de chaleur par convection forcée entre deux disques coaxiaux dont le disque inférieur est soumis à un flux thermique constant, lors d'un écoulement laminaire de deux fluides conventionnels séparément (l'eau et l'éthylène glycol). Par la suite, ces deux fluides ont été utilisés comme des fluides de base pour deux nanofluides dans les quels on injecte des nanoparticules d' $Al_2O_3$  à différentes fractions volumiques (de 0 à 10%), tout en considérant constante la température d'entrée dans toutes les simulations ( $T=293.2K$ ). Le but principal de notre travail est la mise en évidence de l'effet des nanofluides sur les performances thermiques en convection forcée, et ce, pour les nombres de Reynolds : ( $Re= 250, 500, 1000, 1500, 2000$ ).

Pour ce faire, nous avons réparti notre étude en quatre chapitres plus une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les différents modes de transfert de chaleur et les nanofluides, définitions des différents régimes d'écoulement, quelques groupements adimensionnels, les nanofluides et leurs classements ainsi que leurs procédures de fabrication et leurs domaines d'application.

Le second chapitre traite la mise en équation du problème de la convection en absence et en présence des nanoparticules dans les fluides précités. Aussi une présentation des modèles de fermeture a été faite portant sur la conductivité thermique, la viscosité dynamique, la masse volumique et la chaleur spécifique.

Le troisième chapitre contient une présentation du logiciel Gambit ainsi que, celle du code de calcul (Fluent) que nous avons utilisé pour la résolution numérique du problème. La procédure de résolution est aussi présentée.

Le quatrième chapitre, a été consacré à la discussion des résultats obtenus avec les simulations numériques. Nous présentons en courbes les évolutions du nombre de Nusselt local pour chaque nanofluide. Une courbe récapitulant toutes les simulations effectuées a été introduite à la fin de ce chapitre ce qui nous permet de comparer les performances des deux nanofluides utilisés.

En fin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :  
Généralités sur le transfert de  
chaleur et les nanofluides

## I. Modes de transfert de chaleur :

### I.1. Introduction :

Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les deux corps.

On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

- La conduction thermique ou diffusion thermique
- Le rayonnement thermique
- La convection

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques. Cependant, seule la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transmission de la chaleur ; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide.

En outre il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode : le plus souvent deux si non trois modes entrent en jeu. Il sera donc nécessaire de poser correctement les problèmes pour prendre en compte ces différents mécanismes.

### I.2. Conduction :

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur entre deux milieux en contact physique.

Dans la plupart des cas on étudie la conduction dans les milieux solides, puisque dans les milieux fluides (c'est-à-dire liquide ou gazeux), la conductivité thermique est faible. La conduction est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène, opaque et compact.

La conduction s'effectue de proche en proche :

- Si on chauffe l'extrémité d'un solide il y a transfert progressif.
- Si on coupe le solide, le transfert sera rompu.

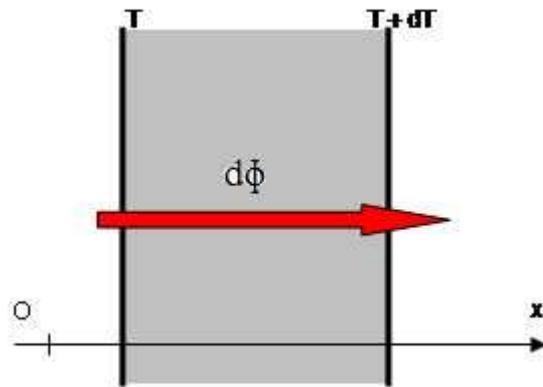
*Exemple* : Barre en métal chauffée à l'une de ces extrémités.

On comprend donc intuitivement que la conduction a une origine microscopique. Il s'agit d'un mécanisme de diffusion de la chaleur. Il correspond au transfert de chaleur dans un solide d'un point chaud vers un point froid.

### I.2.1. Loi de Fourier et notion de flux :

Après cette brève définition sur l'origine microscopique du mécanisme de conduction thermique (citée en exemple), intéressons nous à son aspect macroscopique, tel que l'a découvert J.B Fourier au début du 19<sup>ème</sup> siècle [1].

La quantité de chaleur élémentaire  $dQ$  transmise entre deux plans infinis portés aux températures  $T$  et  $T+dT$ , perpendiculaires à un axe  $ox$ , est proportionnelle à : la surface d'échange, la différence de température entre les 2 parois, le temps écoulé est inversement proportionnel à la distance entre les plans d'après la loi de Fourier.



**Figure I.1** : conduction entre deux plaques horizontales

Soit la loi de Fourier :

$$dQ = -\lambda S \frac{dT}{dx} dt \quad (\text{I.01})$$

Le signe - dans cette équation indique que la chaleur se transmet dans la direction de diminution de température.

$S$  : est la surface d'échange (perpendiculaire à l'axe  $ox$ ) [ $\text{m}^2$ ]

$dT$  : est l'écart de température entre les 2 plans séparés de  $dx$  [K]

$dt$  : désigne le temps [s]

$\lambda$  : est le coefficient de proportionnalité appelé conductivité thermique ou conductance spécifique.

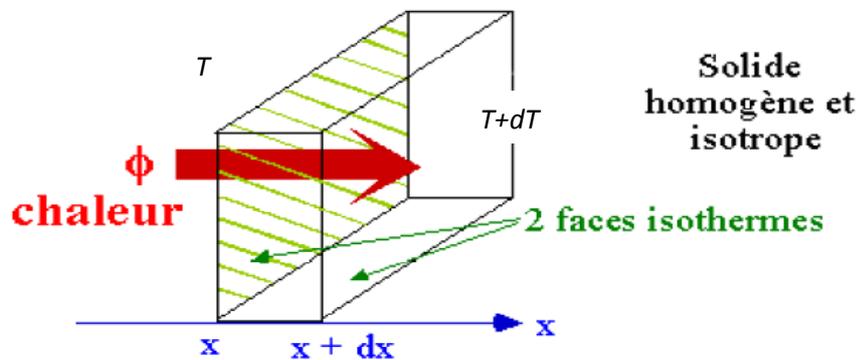
On définit le flux de chaleur élémentaire  $d\Phi$  comme étant la quantité de chaleur transmise par unité de temps et on écrit :

$$d\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{I.02})$$

### I.2.2. Equation de conduction de chaleur :

Soit un corps solide, homogène et isotrope à travers lequel passe un courant unidirectionnel de chaleur. Soit une petite couche plane perpendiculaire à la direction  $x$  de propagation de la chaleur d'épaisseur  $dx$  et d'aire  $S$  à l'intérieur de ce milieu. Les deux faces de cette couche sont des surfaces isothermes. La première est à la température  $T$  et la seconde à la température  $T+dT$  (avec  $dT < 0$ ). La première loi de la thermodynamique, appliquée au système fermé de la figure (le corps solide parallélépipédique) permet d'établir l'équation de conduction de chaleur comme suit :

$$\lambda \left( \frac{d^2T}{dx^2} \right) + q = \rho C_p \frac{dT}{dt} \quad (\text{I.03})$$



**Figure I.2 :** Conduction dans une couche élémentaire de mur plan

$\rho$  : est la masse volumique [ $\text{Kg m}^{-3}$ ].

$\lambda$  : est la conductivité thermique [ $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ].

$C_p$  : est la chaleur spécifique [ $\text{J. Kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ].

$t$  : est le temps caractéristique [s].

Le terme  $q$  de l'équation (I.02) représente la source de la chaleur, les variables indépendantes sont la position ( $x$ ) et le temps ( $t$ ).

### I.2 .3. La conductivité thermique :

La conductivité thermique  $\lambda$  (souvent notée  $k$  dans les pays anglo-saxons) exprime, par sa définition, l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Elle représente le flux de chaleur qui traverse une unité de surface pour un matériau soumis à un gradient de température égale à l'unité.

La conductivité thermique s'exprime en  $[W m^{-1}K^{-1}]$

La conductivité thermique dépend de :

- La nature physico-chimique du matériau
- La nature de la phase considérée (solide, liquide, gaz)
- La température

Le tableau suivant représente quelques grandeurs de la conductivité thermique à température ambiante pour certains matériaux.

Type de matériau	Conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
Gaz à la pression atmosphérique	0.006-0.18
Matériaux isolants	0.025-0.25
Liquides non métalliques	0.1-1.0
Solides non métalliques	0.025-3
Liquides métalliques	8.5-85
Alliages métalliques	10-150
Métaux purs	20-400

**Tableau : I.01 :** Ordre de grandeur de la conductivité thermique à la température ambiante ( $20^{\circ}C$ ) [2]

La conductivité thermique dépend de la température lorsqu'il s'agit des plages étendues de variation de température. Dans certains cas on pourra considérer une variation linéaire avec  $T$ , sous la forme :  $\lambda = \lambda_0 (1 + b(T - T_0))$

$\lambda_0$  désigne la conductivité à  $T = T_0$  et  $b$  est une constante expérimentale.

### I.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre froid sans nécessité de support matériel. C'est donc le seul mode où la chaleur peut se propager dans le vide.

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre froid sans nécessité de support matériel. C'est donc le seul mode où la chaleur peut se propager dans le vide.

Le rayonnement thermique ne diffère des autres ondes électromagnétiques, comme les ondes hertziennes par exemple, que par son origine : la température.

En effet tout corps rayonne tant que sa température est différente de zéro Kelvin. Les corps émettent de l'énergie par leur surface, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques, et ce d'autant plus que leur température est élevée. Inversement, soumis à un rayonnement, ils en absorbent une partie qui se transforme en chaleur.

Le rayonnement est un processus physique de transmission de la chaleur sans support matériel. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par du vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid : le corps chaud émet un flux  $\Phi_1$  et absorbe une partie du flux  $\Phi_2$  émis par le corps froid. Comme  $\Phi_1 > \Phi_2$ , le bilan du flux est tel que le corps chaud cède de l'énergie au corps froid. A l'inverse, le bilan du flux peut être retrouvé sur le corps froid qui émet moins d'énergie qu'il n'en absorbe.

L'équation de Stefan-Boltzmann qui permet de calculer le flux de chaleur transmis par rayonnement est :

$$\Phi = M.S = \sigma T^4 S \quad (\text{I.04})$$

Sachant que :

- $\sigma = 5,67.10^{-8}$  est la constante de STEFAN-BOLTZMANN [ $W/(m^2.k^4)$ ].
- $M$  : Emittance [ $W/m^2$ ].
- $T$  : température absolue [k].
- $S$  : surface [ $m^2$ ].

On définit:

-Coefficient d'absorption :  $\alpha = \frac{\text{Flux absorbé}}{\text{Flux incident}}$

-Coefficient d'émission :  $\varepsilon = \frac{\text{Flux émis}}{\text{Flux incident}}$

-Coefficient de réflexion :  $\xi = \frac{\text{Flux réfléchis}}{\text{Flux incident}}$

.

La conservation de l'énergie implique:

$$\alpha + \varepsilon + \xi = 1$$

## I.4. Convection :

### I.4.1. Introduction :

La convection est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide gazeux ou liquide (écoulement) et échange de la chaleur avec une surface qui est à une température différente.

C'est ce qui se passe le long d'un radiateur. L'air froid s'échauffe au contact avec le radiateur, se dilate et monte sous l'effet de la poussée d'Archimède. Il est alors remplacé par de l'air froid et ainsi de suite ; il y a existence de courants de fluide dans l'air ambiant.

Deux types de convection peuvent être distingués ; la convection forcée (due à l'action d'une pompe, ventilateur...) et la convection naturelle dans laquelle le mouvement du fluide est créé par une différence de densité, elle-même provoquée par des différences de température. L'échange thermique par convection a pour origine le mouvement d'un fluide. Ce mode est le plus visé dans certains domaines bien spécifiés tels que le refroidissement des processeurs et composants électroniques, les radiateurs, les échangeurs de chaleurs et la

sûreté des réacteurs nucléaires, etc. L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés.

### **I.4.2. Définition**

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

### **I.4.3. Phénomène de convection**

Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes.

D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules fluides adjacentes, l'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces particules. Ensuite ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transfèrent une partie de leur énergie, celle-ci est à présent emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

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

### **I.4.4. Procédure de calcul d'un flux de chaleur convectif en utilisant des corrélations expérimentales :**

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection naturelle ou forcée s'effectue de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl.
2. Suivant la valeur de Re et la configuration → choix de la corrélation.
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation.
4. Calcul de  $h = \lambda \text{Nu}/D$  et de  $\Phi = h S (T_p - T_f)$  (I.05)

Premièrement nous allons définir quelques groupements adimensionnels relatifs aux différents calculs dans la convection.

Rappelons que :

- en convection forcée :  $\text{Nu} = f^{ct}(\text{Re}, \text{Pr})$  ;
- en convection naturelle :  $\text{Nu} = f^{ct}(\text{Gr}, \text{Pr})$  ;

#### I.4.4.1. Groupements adimensionnels

L'écriture adimensionnelle des équations, fait apparaitre plusieurs groupements adimensionnels. Chacun de ces groupements a une signification physique particulière.

**a) Nombre de Prandtl :** 
$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$$

C'est un nombre qui est purement lié aux caractéristiques du fluide, c'est le rapport entre la viscosité cinématique ( $\nu$ ) et la diffusivité thermique ( $\alpha$ ).

**b) Nombre de Rayleigh :** 
$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr}$$

Utilisé en mécanique des fluides, il caractérise le transfert de chaleur au sein d'un fluide. Inférieur à une valeur critique, le transfert s'opère essentiellement par conduction, tandis qu'au-delà de cette valeur c'est la convection libre ou naturelle qui devient importante.

On peut le considérer comme le produit du nombre de Grachof, reliant la force d'Archimède à la viscosité du fluide, et du nombre de Prandtl.

**c) Nombre de Grachof :** 
$$\text{Gr} = \frac{g \beta H^3 \Delta T}{\nu^2}$$

C'est le rapport entre la force de gravité causant le mouvement du fluide et la force de viscosité.

**d) Nombre de Nusselt :**

Les échanges thermiques sont caractérisés par un nombre adimensionnel dit nombre de Nusselt qui est le rapport entre le flux échangé par convection à celui échangé par conduction

à la paroi :

$$Nu = \frac{hl}{\lambda}$$

$h$  : Le coefficient de transfert de chaleur est donné par la relation suivante :  $h = \frac{\Phi}{(T_p - T_f)S}$

Le nombre de Nusselt moyen est défini par :

$$Nu_m = \frac{1}{B} \int_0^B Nu(X) dX$$

Avec B constante.

**e) Nombre de Reynolds**

Le passage d'un régime à l'autre dépend de la valeur d'un paramètre adimensionnel, le nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

V : est une vitesse caractéristique de l'écoulement [m/s]

D : est une des dimensions géométriques [m]

$\nu$  : est le coefficient de viscosité cinématique du fluide [m<sup>2</sup>/s].

Par exemple, dans le cas de l'écoulement dans une conduite circulaire, si on prend pour valeur de V la vitesse moyenne du fluide [ $V = \frac{Q}{S}$ ] et pour D la valeur du diamètre de la conduite, le nombre critique de Reynolds est de 2000.

Si  $Re < 2000$  Régime laminaire

Si  $Re \gg 2000$  Régime turbulent

Une autre façon de présenter la condition pour que le régime soit laminaire est de poser :

$V < 2000 \frac{\nu}{D} = V_c$  ,  $V_c$  : étant appelé vitesse critique.

Pour le cas d'une conduite de 10 cm de diamètre transportant de l'eau à 20° C, on a :

$$D = 0,1\text{m} \quad v = 10^{-6} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \rightarrow V_c = \frac{2000 \cdot 10^{-6}}{0,1} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

On voit alors que dans la plupart des problèmes pratiques d'hydraulique, on aura affaire au régime turbulent.

#### **I.4.4.2. Régimes d'écoulement**

L'écoulement d'un fluide, peut se produire de deux façons différentes, selon les conditions locales de vitesse. En effet, depuis très longtemps, on a observé qu'à faible vitesse, l'écoulement se faisait de telle façon qu'en régime permanent, les lignes de courant sont stables et ne se mélangent pas. Dans cet écoulement, appelé *laminaire*, les couches fluides glissent les unes sur les autres et il n'y a pas de transfert de particules d'un filet fluide à un autre.

Par ailleurs, lorsque la vitesse croît, les filets fluides paraissent osciller et vibrer, puis ils perdent leur identité propre. Dans ce régime, appelé *turbulent*, les particules oscillent rapidement autour de leur trajectoire.

##### **I.4.4.2.1. Écoulement laminaire:**

Dans ce type d'écoulement les fluides ne se mélangent pas et la trajectoire de chaque particule de fluide est parallèle aux autres. Dans ce cas le transfert thermique s'effectue par conduction entre les différentes couches.

##### **-Conditions d'existence**

Comme on l'a vu précédemment, le régime laminaire existe pour de faibles valeurs du nombre de Reynolds, c'est-à-dire :

- si le fluide est très visqueux ;
- si les vitesses sont faibles ;
- si les dimensions sont petites.

Ces conditions sont peu fréquentes dans l'hydraulique classique et on ne les rencontre guère que dans les domaines de la lubrification, et des écoulements en milieux poreux.

#### I.4.4.2.2. Écoulement turbulent :

Au sein du fluide en écoulement turbulent, la chaleur se transmet par mélange des particules de fluide et donc la température du fluide s'égalise rapidement. On peut considérer qu'un fluide en écoulement turbulent a une conductivité thermique infinie par rapport à un fluide au repos ou en écoulement laminaire. Néanmoins, dans un écoulement visqueux, dans une direction perpendiculaire à la paroi il existe une couche limite de fluide dont l'écoulement peut-être considéré comme laminaire. L'épaisseur de ce film laminaire dépend des propriétés physiques et de la nature de l'écoulement mais dans ce film le transfert se fait par conduction.

L'essentiel de la chute de température s'effectue dans cette couche limite qui oppose une résistance importante au passage de la chaleur. Le flux thermique de conduction à travers la couche laminaire s'exprime par la loi de Fourier :

$$\Phi = \frac{\lambda S}{e} (T_f - T_p) \quad (\text{I.06})$$

Cette relation (I.06) est rarement utilisée en pratique vu la complexité du calcul de l'épaisseur de la couche limite ( $e$ ). Alors, quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur  $\Phi$  est donné par la relation dite loi de Newton :

$$\Phi = hS \Delta T \quad (\text{I.07})$$

Avec:  $\Delta T = (T_f - T_p)$

$T_f$ : représente la température du film laminaire de l'écoulement

$T_p$ : est la température de la paroi du milieu considéré

$h$  : le coefficient d'échange convectif [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

#### I.4.4.3. Choix de la corrélation et calcul de Nusselt

La relation générale pour la convection forcée est  $\text{Nu} = f^{ct}(\text{Re} \cdot \text{Pr})$ . Le nombre de Nusselt obéit à la relation suivante :  $\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^m$  où  $C$ ,  $n$  et  $m$  sont des constantes dépendantes des caractéristiques géométriques du problème et du fluide et  $\text{Nu}$  dépend du type d'écoulement comme présenté dans le tableau suivant :

Convection forcée. Allure du nombre de Nusselt		
Geometries	Plaque plane	Cylindre
Régime laminaire	$Nu=0,664.Re_L^{0,5}.Pr^{1/3}$ Avec: $Re < 5.10^5$ et $Pr > 0,6$	$Nu=3,66$ Avec : $Re < 2300$
Régime turbulent	$Nu=0,037.Re_L^{0,8}.Pr^{1/3}$ Avec: $5.10^5 < Re < 10^7$ et $Pr > 0,6$	$Nu=0,023.Re_L^{0,8}.Pr^{0,4}$ Avec: $Re > 10000$ et $7 > Pr > 160$
Convection naturelle sur une plaque plane. Allure du nombre de Nusselt		
Plaque verticale	$Nu=0,59(Gr.Pr)^{1/4}$ avec : $10^5 < Gr.Pr < 10^9$	
Plaque horizontale	$Nu=0,54(Gr.Pr)^{1/4}$ avec : $10^4 < Gr.Pr < 10^7$	

**Tableau : I.02** : Allures du nombre de Nusselt en convection naturelle et forcée [3]

#### I.4.4.4. Calcul de $h$ :

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer  $h$  qui dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange,...

Le calcul de  $h$  est un problème complexe de la mécanique des fluides. Dans le cas d'une convection forcée à l'intérieur d'une conduite cylindrique, en l'absence de convection naturelle,  $h$  dépend essentiellement des grandeurs suivantes :

- $V_m$  : la vitesse moyenne du fluide [ $m.s^{-1}$ ]
- $\rho$  : la masse volumique du fluide [ $kg\ m^{-3}$ ]
- $C_p$  : chaleur spécifique du fluide [ $J. K^{-1}.kg^{-1}$ ]
- $\mu$  : la viscosité dynamique du fluide [Poiseuille, Pa. S]
- $\lambda$  : la conductivité thermique du fluide [ $W. K^{-1}. M^{-1}$ ]
- $D$  : le diamètre intérieur du tube [m]
- $x$  : l'abscisse de la section considérée par rapport à l'entrée du tube. [m]

Autrement dit :  $h=f^{ct}(V_m, \rho, C_p, \mu, \lambda, D, x)$

Pour estimer la valeur du coefficient d'échange, il existe deux méthodes:

- soit on calcule (analytiquement ou par une méthode numérique)  $h$  à partir d'une expression existante de  $h$ .

-soit on trouve  $h$  expérimentalement. Dans ce cas on cherche à tracer le nombre de Nusselt sous la forme d'un produit de nombres sans dimensions:

$Nu = C Re^n .Pr^m$  après avoir pris le choix de corrélation et déterminer les constantes :  $C$ ,  $n$  et  $m$ . Et avec :  $h = \lambda Nu/D$  et de  $\Phi = h S (T_p - T_f)$  on calcule le flux de chaleur échangé. On trouve dans la littérature des tables exprimant ces relations. Le but des expériences est de fournir des formules approchées (dites empiriques) ou de déterminer  $h$  par des expériences et de tabuler les résultats. Ensuite, on peut faire des calculs simplifiés en veillant à ce que les hypothèses posées pour établir l'expression de  $h$  soient à peu près respectées. (Pour la lecture des tables de coefficients  $h$  il faudra faire très attention aux températures de référence, car  $h$  dépend de la température).

#### I.4.5. Types de convection :

##### I.4.5.1. Convection libre ou naturelle :

Dans ce type de convection le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide comme le montre la figure (I.03)

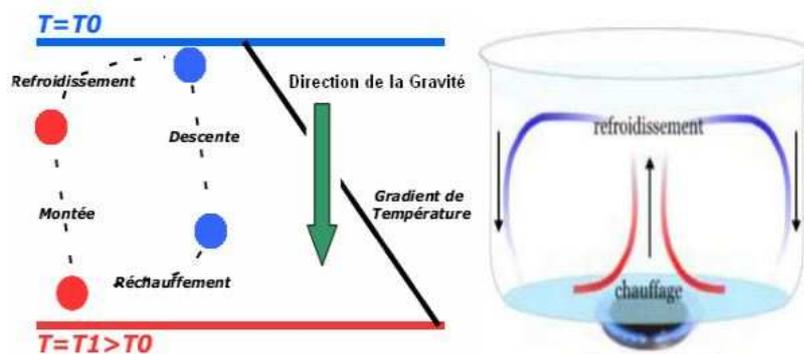


Figure (I.3) : Principe physique de la convection naturelle.

### **I.4.5.2. Convection forcée :**

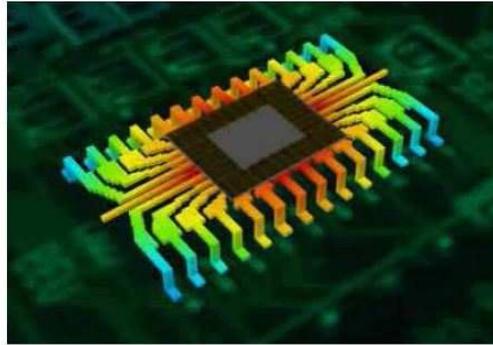
Dans ce type de convection le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques (compresseur, pompe, ventilateur, etc...) ; c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides.

### **I.4.6. Domaines d'applications**

Les applications du transfert de chaleur par convection sont nombreuses pour que l'on puisse envisager de les citer toutes. Elle intervient chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz. Par exemple, le chauffage d'un liquide dans une casserole, dans un radiateur de chauffage central, ou dans un radiateur associé à un moteur d'une voiture ou dans un évaporateur ou condenseur. La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques, voir des sècheurs à air chaud.

La convection naturelle est rencontrée dans plusieurs situations. En effet, elle est toujours présentée tant que la température du fluide est variable ainsi que lorsqu'il y a un champ d'accélération tel que la gravité. Dans quelques applications, le transfert de chaleur en convection naturelle est parfois petit, comparé aux autres modes de transfert de chaleur (conduction - rayonnement), par conséquent, il peut être négligé. Il y a des situations où on a besoin de supprimer la convection naturelle, comme dans le cas de la chaleur perdue par la vapeur depuis une canalisation, depuis des fenêtres, ou depuis des collecteurs solaires. Mais d'autre part on cherche à augmenter le transfert de chaleur par convection naturelle afin de refroidir les composants microélectroniques dégageant de la chaleur par effet Joule.

Généralement, le refroidissement se fait par convection forcée et par changement de phase, cependant, la convection naturelle est une partie intégrante de la dissipation de chaleur surtout dans le cas des ordinateurs portables et les appareils électroniques de petites dimensions. Bien que la convection forcée reste le principal mode de refroidissement, il est toutefois important de déterminer avec certitude le processus de transport du fluide dans l'absence de courte durée d'un écoulement externe forcé quand il y a interruption temporaire du système de refroidissement par ventilation.



**Figure (I.4) :** Emanation de chaleur sur une puce électronique

D'après la revue scientifique américaine (*YEH'S REVIEW - 2002*), une étude de l'*U.S. Air force* a indiqué que plus de 52% des défauts des systèmes électroniques sont étroitement liés à la hausse incontrôlée des températures. Quant aux ventilateurs installés sur les PC, bien qu'ils soient souvent bon marché en matière de coûts, ils représentent des inconvénients majeurs car ils font du bruit et requièrent de l'espace, donc peu efficaces et peu fiables. Les études de convection sont donc nécessaires à la gestion des flux thermiques et la conception des équipements (équipements électroniques, fabrication des films fins, décomposition des vapeurs chimiques et bien d'autres domaines...)

## **I.5. Généralité sur les nanofluides**

### **I.5.1 Introduction**

L'efficacité d'un processus de transfert thermique est généralement limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés. La miniaturisation de nombreuses applications est conditionnée par la possibilité d'évacuer de façon efficace les puissances thermiques dissipées au sein des appareillages. Le considérable récent développement des recherches traitant des nanofluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroître de façon non négligeable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pure une faible concentration de nanoparticules. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de "Nanofluides". Ce terme a été introduit par Choi [4] au laboratoire d'Argonne en U.S American 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale.

Dans cette étude on essayera de montrer la potentialité de remplacer les fluides avec des nanofluides qui peuvent jouer le même rôle que ces fluides ordinaire mais avec une bonne efficacité du dégagement de la chaleur.

L'adjonction des particules métalliques dans un fluide a mis en évidence une nette amélioration des capacités thermiques de celui-ci.

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

### **I.5.2. Définition d'un nanofluide :**

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométriques en suspension dans un liquide. Les études de ces fluides composites montrent des aptitudes particulièrement intéressantes du fait d'une meilleure conductivité thermique et d'un coefficient d'échange convectif significativement accru par rapport à des liquides classiques, l'eau en particulier. Une telle augmentation de la conductivité thermique du nanofluide ne peut pas seulement être imputée à la plus grande conductivité thermique des nanoparticules en suspension, l'amélioration vient d'une combinaison de plusieurs facteurs physiques simultanés.

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégaions, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants les plus utilisés sont:

- l'eau.
- l'éthylène glycol, EG.
- les huiles.
- le Toluène.
- Les fluides de réfrigération.

### **I.5.3. Définition des nanoparticules :**

Les nanoparticules sont des particules dont les 3 dimensions sont dans la gamme 1-100 nm environ. Les nanomatériaux sont des objets dont au moins une de leurs trois dimensions est nanométrique, c'est-à-dire inférieure à 100 nm. Cette définition est cependant encore en discussion et certaines définitions parlent de nanoparticules dès qu'une ou deux de leurs dimensions est inférieure à 100nm [5].

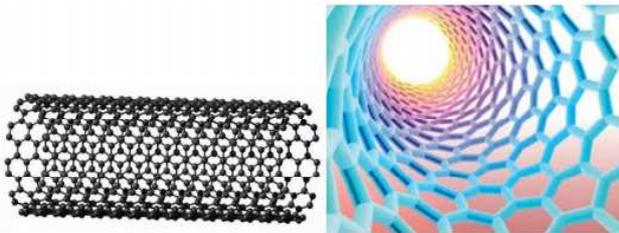
Les normes ISO/TS 8004-1 :2010 et ISO/TS 8004-3 :2010 définissent les nano-objets comme des matériaux avec une, deux ou trois dimensions situées entre 1 et 100 nm et les nanoparticules comme des nano-objets ayant trois dimensions externes situées entre 1 et 100 nm.

Les nanomatériaux peuvent être répartis selon le nombre de leurs dimensions qui se trouvent dans le domaine nanométrique comme suit :

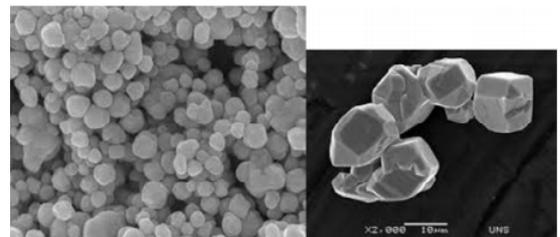
- Trois dimensions (forme sphérique): tels que les Fullerènes (C60), nanoparticules sphériques (nano poudre de TiO<sub>2</sub>, Ag,...), ...
- Deux dimensions (sous forme de ligne): comme les nanotubes, les nano-filaments, ...
- Une seule dimension (sous forme de plan): comme les films minces, couches minces,...

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont : [6]

- Les nanoparticules des oxydes métalliques :
  - 1-l'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
  - 2-l'oxyde de cuivre (CuO).
  - 3-l'oxyde de silicium(SiO<sub>2</sub>).
  - 4-l'oxyde de titanium (TiO<sub>2</sub>).
- Les nanoparticules métalliques :
  - 1-l'aluminium(Al).
  - 2-le cuivre(Cu)
  - 3-l'or (Au).
  - 4-l'argent (Ag)
- Les nanoparticules non métalliques :
  - 1-les nanotubes de carbone (CNT)
  - 2-le diamant(C).



**Figure (I.5) :** nanotube de carbone



**Figure (I.6) :** nanoparticules d'Argent

Les nanoparticules, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels, voir le tableau 03 :

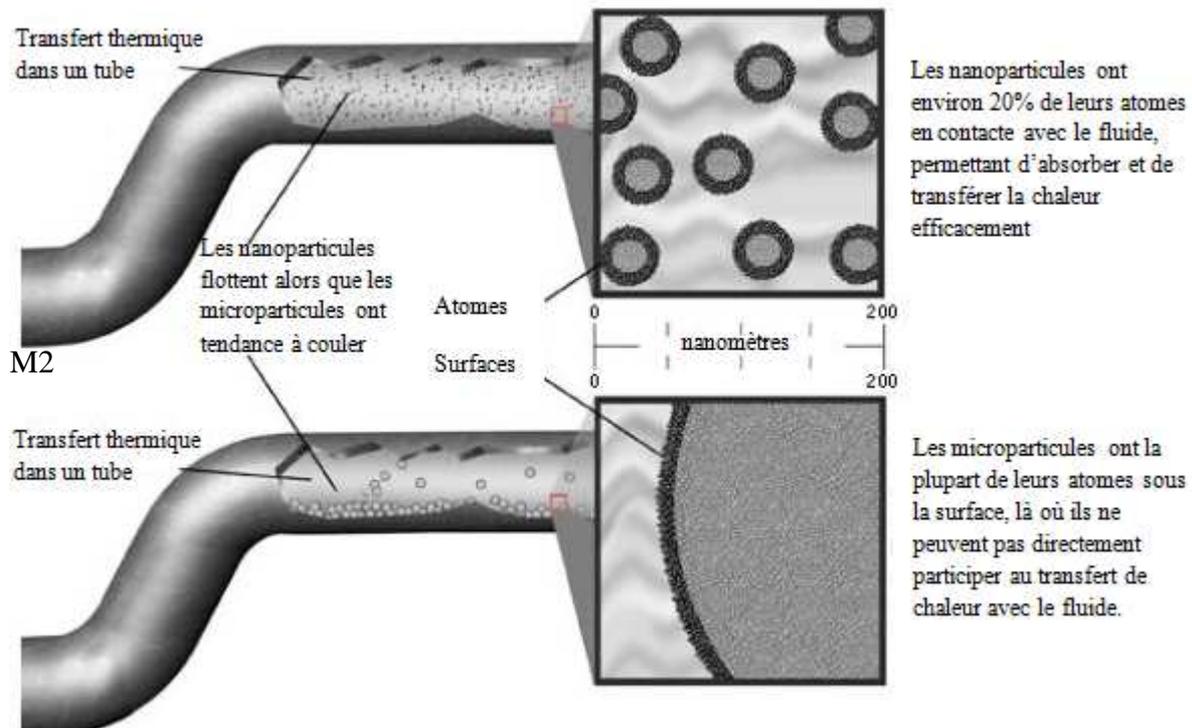
	Nanoparticules et fluide de base	k (W/m.K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>p</sub> (J/kg.K)	$\mu$ (Pa.s)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80,2	7870	447	
	Ni	90,7	8900	444	
	Au	317	19,300	129	
	Ag	429	10,500	235	
	C (diamant)	2300	3500	509	
Oxyde Métallique (solides)	SiO <sub>2</sub>	1,38	2220	745	
	TiO <sub>2</sub>	8,4	4157	710	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
Liquides non métalliques	L'eau	0,600	998.2	4183	0,0001003
	Ethylène-glycol (EG)	0,252	1111.4	2349	0,0157

**Tableau. 03 :** Les propriétés thermo-physiques de différents matériaux [7]

### I.5.3.1. Taille des nanoparticules :

Si l'idée même d'utiliser des particules solides en suspension pour perfectionner l'échange thermique est ancienne, puisqu'elle découle notamment des études analytiques de Maxwell vers 1873 [4], ce n'est que depuis les années 1990 que l'utilisation de particules d'échelle nanométrique est étudiée. Cela a été rendu possible grâce au développement de procédés de fabrication particuliers et novateurs.

Les études scientifiques antérieures se contentaient de tester des suspensions plus ou moins bien contrôlées, des particules de taille millimétrique ou micrométrique, donc 1000 à 1 000 000 de fois plus grosses que des nanoparticules. Celles-ci deviennent, avec le temps, malheureusement moins efficaces. En effet, elles sédimentent rapidement vu leur masse plus importante et elles réduisent l'efficacité du transfert thermique paroi-fluide en se déposant un peu partout (Figure I.07).



**Figure (I.7):** Vue microscopique des nanoparticules dans un tube.

## I.5.4. Préparation de nanofluides :

### I.5.4.1. Procédés de fabrication de nanoparticules :

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

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

**I.5.4.2. Procédés d'obtention d'un nanofluide : [8]**

Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nanofluide

- en une étape : vaporisation d'un matériau solide sous vide, puis condensation directe de sa vapeur dans le liquide
- en deux étapes : d'abord la fabrication d'une nanopoudre sèche, puis mélange et dispersion de celle-ci dans le liquide

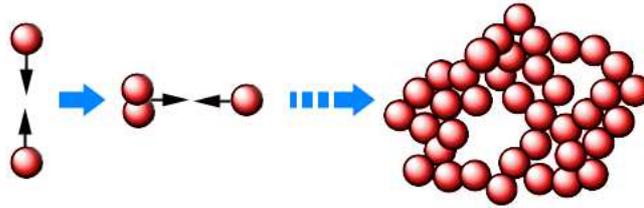
Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de travaux de recherche pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients et certaines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

Les principaux moyens de fabrications peuvent être :

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

La fabrication en deux étapes présente un peu plus de risques, car le collage se produit déjà dans la nanopoudre. Les nanoparticules à base d'oxydes métalliques seraient a priori moins sujettes aux regroupements que les nanoparticules à base de métaux purs dans les procédés en deux étapes.

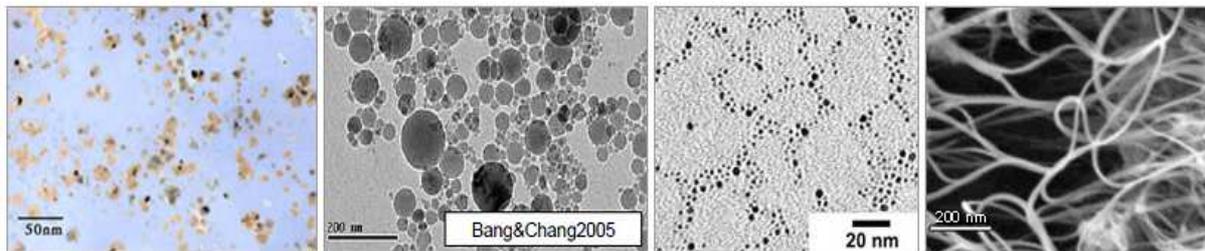
L'intégration en une seule étape directe minimise ces agglomérations, mais l'inconvénient de ces techniques de vaporisation sous atmosphère est de ne pouvoir utiliser que des liquides à faible pression de vapeur saturante (pour éviter qu'ils ne se vaporisent eux-mêmes trop vite dans l'enceinte) et le contrôle sur la taille des nanoparticules formées est limité. Cependant, elle est recommandée pour des métaux purs afin d'éviter l'oxydation rapide des nanoparticules par l'air ambiant.



**Figure (I.8) :** Rapprochement et attraction entre nanoparticules conduisant à des ensembles plus massifs

### I.5.5. Nature du mélange obtenu :

Les nanoparticules sont principalement mises en suspension dans de l'eau, de l'huile ou de l'éthylène glycol (l'un des composés du LDR couramment employé dans les watercoolings), même si tout liquide peut être utilisé. La fraction volumique de ces nanoparticules est généralement entre 0.1 à 10 % à pour éviter la saturation du fluide et la

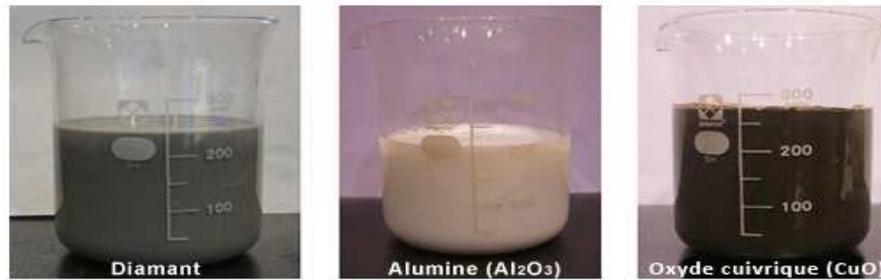


sédimentation.

**Figure (I.9) :** Nanofluides, vus au microscope électronique (de gauche à droite) : éthylène glycol+ cuivre à 0,5 % ; eau +alumine ; eau +or à 2nm ; eau +nanotubes de carbone

En ce qui concerne l'aspect visuel du nanofluide, il varie principalement selon la technique de fabrication, la nature du matériau, ainsi que la taille des nanoparticules et des agglomérats. Même avec une très faible fraction volumique, le mélange d'une nanopoudre dans de l'eau (méthode en deux étapes), celui-ci devient presque à coup sûr opaque à cause des nanoparticules qui empêchent les ondes lumineuses de le traverser, puisqu'il est pratiquement impossible d'éviter les regroupements de matière en paquets avec cette méthode, même avec des produits dispersants (Figure I.10). Cette opacité se manifeste quand les dimensions des nanoparticules ne sont pas suffisamment réduites par rapport aux longueurs

d'ondes présentes dans la lumière visible (400 à 700 nm). L'opacité n'est donc pas simplement liée à la concentration des nanoparticules dans le liquide.



**Figure (I.10) :** Exemples de nanofluides aqueux et opaques avec seulement 1 % de particules de diverses natures

### I.5.6. Les applications de nanofluides :

- **L'industrie :**

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

- **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 [9] ont employé un nanofluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur. De leur côté, Ma et col [10] ont étudié l'effet du nanofluide sur les possibilités de transport de la chaleur d'un caloduc d'oscillation, ils ont prouvé qu'à la puissance d'entrée de 80 W, et seulement pour une concentration volumique de  $\phi = 1\%$ , la différence de température entre le vaporisateur et le condenseur est de  $16.6^{\circ}\text{C}$ .

- **Refroidissement des systèmes thermiques :**

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides améliore le taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, Tzeng et col [11] ont dispersé les nanoparticules de CuO et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission. Dans une application, Zhang et Que [12] ont rapporté une étude pour réduire l'usure (lubrification) à l'aide des nanoparticules, et améliorer les propriétés tribologique, et la résistance à l'usure avec la réduction du frottement entre les éléments mécanique mobiles.

- **Refroidissement des systèmes spatiaux :**

Pour les applications dans l'espace, You et col [13], Vassallo et col [14] 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 où la densité de puissance est très élevée.

- **Refroidissement des systèmes militaires :**

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermique très élevés ( $q > 500$  à  $1000 \text{ W/cm}^2$ ), où les nanofluides ont montrés leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires, y compris les véhicules militaires, les sous-marins, et les diodes lasers à haute puissance.

- **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 sûreté neutronique, et de la performance économique des systèmes nucléaires.

- **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 sûre en produisant le refroidissement efficace autour

de la région chirurgicale, Jordan et col [15] 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.

Autres applications (piles à combustible, le chauffage solaire de l'eau, refroidisseurs, réfrigérateurs domestiques, Diesel combustion, Forage, Lubrifiants, stockage thermique, ...).

#### **I.5.6.1. Les avantages des nanofluides :**

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

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Volume réduit par rapport au liquide pur pour obtenir une équivalence d'intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux fluides conventionnelles, 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.5.6.2. Les inconvénients des nanofluides :**

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

- le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.

- instabilité des nanoparticules (dispersion).
- chute de pression accrue lors du pompage.
- le coût élevé des nanofluides.
- difficultés dans le processus de production.

Au cours de ce chapitre on a présenté des généralités sur les différents modes de transfert de chaleur et les nanofluides, les régimes d'écoulement, quelques groupements adimensionnels, les nanofluides et leurs classements ainsi que leurs procédures de fabrication et leurs domaines d'application.

Chapitre II:  
Modélisation physique et  
mathématique

## II. Modélisation physique et mathématique

### II.1. Introduction

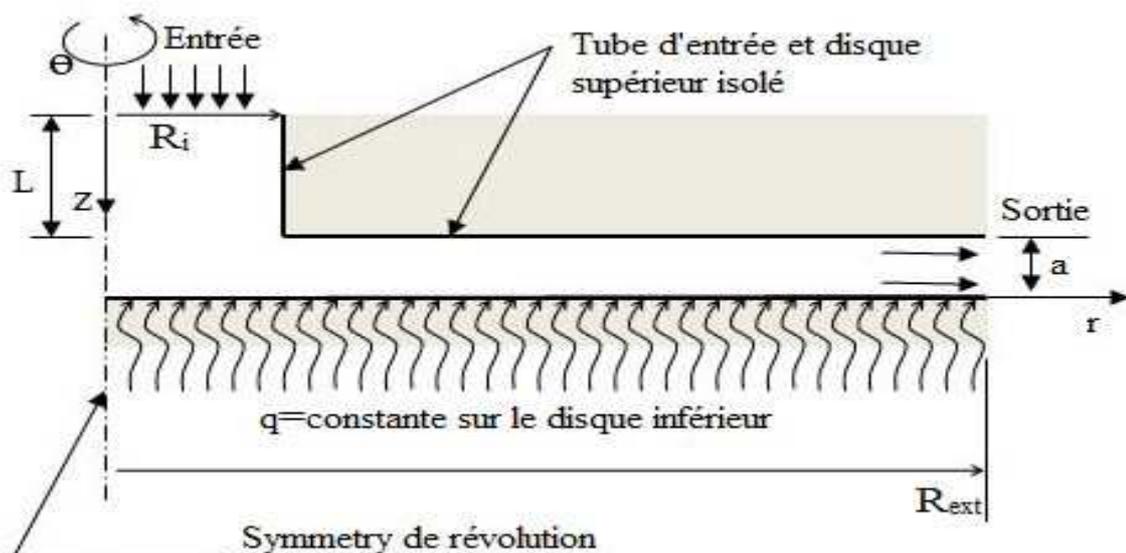
L'écoulement des fluides dans une cavité ouverte chauffée est caractérisé par un système d'équations différentielles qui expriment la modélisation mathématique de ce problème physique.

Dans ce chapitre nous décrivons et formulons le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées.

On se propose d'étudier le transfert de chaleur par convection forcée dans un écoulement radial entre deux disques, dont l'un d'eux est chauffé par une source de chaleur. Dans notre étude, on cherche à mettre en évidence les performances des nanofluides et comparer, par la suite, entre deux nanofluides qui n'ont pas le même fluide de base Eau/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  et Ethylène-glycol/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### II.2 Modèle physique

La configuration géométrique bidimensionnelle du problème considéré est illustrée dans la figure (II.1).



**Figure (II.1) :** Configuration bidimensionnelle de la géométrie de notre étude

L'écoulement du fluide entre par une conduite verticale de rayon  $R_i=0.01634m$ , puis s'écoule entre deux disques coaxiaux distants de  $a=0.003175m$ . Le rayon extérieur  $R_{ext}=0.15m$ .

Comme le montre la figure (II.1), la paroi de base est chauffée par un flux de chaleur constant, les autres parois sont adiabatiques. Nous imposons une vitesse à l'entrée de la conduite d'amenée qui correspond au nombre de Reynolds souhaité. Le flux de chaleur imposé au disque inférieur est de l'ordre de  $10000 W/m^2$  [16].

### II.3. Formulation mathématique

La convection forcée engendrée par des transferts de chaleur au voisinage des surfaces chauffées a été largement étudiée tant au niveau théorique qu'expérimental. En mécanique des fluides, en supposant que le fluide est un milieu continu, on peut utiliser les lois classiques de conservation suivantes :

- Loi de Lavoisier (principe de conservation de la masse) pour établir l'équation de continuité.
- Deuxième loi de Newton (principe de conservation de la quantité de mouvement) pour établir les équations de quantité de mouvement (Navier-Stokes).
- Loi de conservation d'énergie (Premier principe de la thermodynamique) pour établir l'équation de l'énergie.

Ainsi, la résolution d'un problème de convection forcée consiste à déterminer les champs de vitesse et de température en chaque point du domaine occupé par le fluide. Pour cela, nous devons établir les équations de base régissant le problème.

#### II.3.1. Formulation différentielle des équations dans le cas général:

Il existe plusieurs façons pour représenter les équations de conservation, précédemment citées, nous avons choisi une forme vectorielle pour alléger l'écriture.

- **Équation de continuité (ou équation de bilan de la masse)**

L'équation de continuité exprime le principe de la conservation de la masse d'un fluide en mouvement. Dans un volume élémentaire, la masse du fluide prélevé ou injectée est égale à la somme de la variation de la masse du fluide durant un intervalle de temps élémentaire et des

flux massiques traversant la surface de ce volume. Elle est définie par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (\text{II.1})$$

- **Équation de conservation de la quantité de mouvement**

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et les causes qui le produisent. Donc, on peut indiquer que le taux de variation de la quantité de mouvement, contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures, qui lui sont appliquées.

Les équations s'écrivent sous la forme suivante :

$$\frac{\partial (\rho \bar{v})}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{v} \otimes \bar{v}) = -\bar{\nabla} p + \bar{\nabla} \cdot \bar{\tau} + \rho \bar{f} \quad (\text{II.2})$$

- **Équation de conservation de l'énergie**

La première loi de thermodynamique permet d'établir des relations entre les différentes formes d'énergie. L'équation de l'énergie, dans laquelle les termes de dissipations visqueuses sont négligés, s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \bar{v}] = -\bar{\nabla} \cdot (\bar{\tau} \cdot \bar{v}) + \rho \bar{f} \cdot \bar{v} - \bar{\nabla} \cdot (\bar{q}) + r \quad (\text{II.3})$$

Dans ces équations :

- $t$  : représente le temps (unité SI : s).
- $\rho$  : désigne la masse volumique du fluide (unité SI :  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).
- $\bar{v}(u, v, w)$  désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI :  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $p$  : désigne la pression (unité SI : Pa).
- $\bar{\tau} = (\tau_{i,j})_{i,j}$  : est le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa).
- $f$  : désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI :  $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).
- $e$  : est l'énergie totale par unité de masse (unité SI :  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).
- $\bar{q}$  : est le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI :  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ).
- $r$  : représente la perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI :  $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

## II.4. Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices retenues dans notre étude des phénomènes de convection forcée sont les suivantes:

- Le fluide est newtonien, incompressible
- L'écoulement est laminaire et bidimensionnel.
- On néglige le transfert d'énergie par rayonnement.
- Il n'y pas de réaction chimique.
- Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression est négligeable.
- Propriétés thermophysiques du fluide constantes
- Ecoulement permanent.

## II.5. Modèle mathématique pour le fluide de base :

Compte tenu des hypothèses précédentes, le système d'équation régissant le modèle peut être réduit sous la forme dimensionnelle suivante:

### a) Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.4})$$

### b) Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes) :

- **Équation de conservation de quantité de mouvement suivant x :**

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

- **Équation de conservation de quantité de mouvement suivant y**

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.6})$$

### c) Équation de conservation de l'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

Avec  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$  représente la diffusivité thermique.

## II.6. Modèle mathématique pour un nanofluide (mélange fluide de base +nanoparticules) :

Les modèles existants pour la modélisation des écoulements des nanofluides sont basés essentiellement sur les deux approches de description de mouvement en mécanique des fluides, à savoir l'approche de Lagrange qui considère que les nanoparticules, en mouvement dans le fluide, comme des sources d'énergie, quantité de mouvement et de masse pour le fluide de base. Dans cette approche, les températures et les trajectoires des nanoparticules sont obtenues en résolvant des équations différentielles ordinaires qui décrivent l'échange d'énergie et de quantité de mouvement entre les nanoparticules et le fluide de base.

Or, les modèles basés sur l'approche d'Euler considèrent que les nanofluides sont des milieux continus. Parmi ces modèles, on distingue le plus simple qui s'appelle modèle homogène d'Euler dans le quel on considère le nanofluide comme un mélange homogène comportant deux phases à la même vitesse et à la même température. Ce mélange a en tout point, des propriétés thermodynamiques qui sont en fonction de la concentration  $\phi$ . [5]

Les équations qui régissent l'écoulement du nanofluide seront alors reproduites sous la forme :

### a) Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.4})$$

**b) Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes) :**

- **Équation de conservation de quantité de mouvement suivant x :**

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

- **Équation de conservation de quantité de mouvement suivant y**

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.9})$$

**c) Équation de conservation de l'énergie**

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\alpha_{nf}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

La performance d'un modèle nanofluide utilisé dépend des :

-Equations gouvernant le phénomène.

-Les conditions aux limites imposées.

-Les équations de fermetures utilisées.

Les équations qui gouvernent le nanofluide semblent performantes par ce qu'elles représentent des équations de conservation. Excepté le cas où le nanofluide sera autre qu'un fluide newtonien.

Les conditions aux limites utilisées pour les nanofluides sont identiques à celles utilisées au niveau des parois par exemple (pas de pénétration, pas de mouvement au niveau d'une paroi fixe, une température égale,....)

Dans de telles conditions le nanofluide est considéré comme une suspension diluée et les particules n'ont aucun effet sur les parois.

Les équations de fermeture dans ce modèle sont seulement les équations correspondantes à

$\lambda_{nf}, \mu_{nf}, \rho_{nf}$  et  $C_{p,nf}$  .

Beaucoup d'études expérimentales ont été faites pour déterminer les propriétés du nanofluide tout en considérant que le nanofluide soit un mélange homogène et par conséquent toutes les données sont disponible dans les littératures pour calculer ces propriétés ce qui justifie le choix de ce modèle. Il faut noter que l'approche qui a été prise en considération considère que les particules suspendues dans le fluide de base ne présentent ni sources de masse ni d'énergie à l'écoulement.

Aussi, il est à signaler que les valeurs calculées de la vitesse et température présentent des valeurs moyennées dans l'espace du mélange qui peuvent être différentes des valeurs réelles de la vitesse et la température du fluide de base et les nanoparticules. Surtout lorsque les tailles des nanoparticules deviennent plus importantes.

Les propriétés de transport  $\mu_{nf}$ ,  $\lambda_{nf}$  présentent des valeurs effectives de la viscosité et la conductivité pour le nanofluide et sont données par des relations empiriques de fermeture. Ces propriétés de transport font objet de plusieurs travaux de recherche

## II.7. Propriétés thermophysiques des nanofluides

Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et cinématique, etc.) des fluides de base sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. Nous supposons, dans notre travail, que les nanoparticules sont bien dispersées de façon uniforme et forment une suspension stable dans le fluide de base et qu'elles sont en état d'équilibre thermique avec ce dernier.

### II.7.1. La fraction volumique ( $\phi$ ) :

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque le calcul de tous les autres propriétés se base sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut définir 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 varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} \quad (\text{II.11})$$

$V_p$ : volume de solide (nanoparticules) [ $\text{m}^3$ ].  $V_T$ : volume totale [ $\text{m}^3$ ].

### II.7.2. Masse volumique ( $\rho_{nf}$ ) :

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique  $\phi$  à une température T donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange. Dans le cas d'un mélange la masse volumique est donnée par la relation suivante : [5]

$$\rho_{nf} = \left( \frac{m}{V} \right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_{bf} V_{bf} + \rho_p V_p}{V_T} = \rho_{bf} (1 - \phi) + \rho_p \phi \quad (\text{II.12})$$

### II.7.3. Conductivité thermique ( $\lambda_{nf}$ ):

La conductivité thermique généralement est une propriété importante et principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température.

En plus de sa variation en fonction de la température, la conductivité thermique du nanofluide varie en fonction de la fraction volumique aussi. La conductivité thermique d'un nanofluide peut être spécifiée selon plusieurs modèles qui se trouvent dans la littérature. On cite seulement les deux modèles suivants parce qu'ils sont basés sur la théorie effective du milieu (*effective medium theory*) qui stipule que l'application des équations gouvernant un milieu homogène peut être étendue pour des milieux hétérogènes. [5]

#### a. Modèle de Maxwell (1873):

Maxwell a présenté son modèle analytique pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique de nanofluide (valable jusqu'à  $\phi=6\%$ ), mais ce modèle est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, cette condition peut être considérée comme un point négatif pour le modèle, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules de forme sphériques. Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivante: [5]

$$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left[ 1 + \frac{3(\lambda_p - \lambda_{bf})\phi}{(\lambda_p + 2\lambda_{bf}) - \phi(\lambda_p - \lambda_{bf})} \right] \quad (\text{II.13})$$

( $\phi$  : fraction volumique ;  $p$ : particule ;  $bf$ : fluide de base ;  $nf$ : nanofluide)

### b. Modèle de Hamilton et Crosser (1962) :

Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite du modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'est valable que dans le cas des particules sphériques ou les particules solides contenues dans les nanofluides ne le sont pas toujours. Pour cela le modèle de Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nanofluide quelque soit la forme de la nanoparticule, et ça en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité ( $\psi$ ). Ce facteur est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left[ \frac{\lambda_p + (1-n)\lambda_{bf} + (n-1)(\lambda_p - \lambda_{bf})\phi}{\lambda_p + \lambda_{bf}(1-n) - (\lambda_p - \lambda_{bf})\phi} \right] = \lambda_p \left[ \frac{n(\lambda_p - \lambda_{bf})\phi}{\lambda_{bf}(1-n) - (\lambda_p - \lambda_{bf})\phi} + 1 \right] \quad (\text{II.14})$$

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

$n = 3$  pour les particules sphériques et  $n = 6$  pour les particules cylindriques.

Pour ( $\psi = 1$ ) (particules sphériques) le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell. [5]

Par ailleurs, d'autres modèles, en se basant sur des données expérimentales, développent des corrélations simplifiées pour le calcul des propriétés thermophysiques des nanofluides. Parmi ces modèles on trouve celui de *Maiga et al 2005* où deux équations pour le calcul de la conductivité thermique ont été fournies telles que:[16]

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} = 4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1 \quad \text{Pour : eau- } Al_2O_3 \quad (\text{II.15})$$

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} = 28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1 \quad \text{Pour : Ethylène Glycol- } Al_2O_3 \quad (\text{II.16})$$

Dans le présent travail on a justement utilisé ces deux équations.

### II.7.4. Viscosité dynamique( $\mu$ ) :

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

La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier du fait que les nanoparticules se déplacent en tant que des corps solides à une vitesse donnée et interrompent, par conséquent, le mouvement du fluide. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nanofluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température, cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité dynamique du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide, Pour ce qui suit nous allons citer trois modèles pour le calcul des viscosités apparentes :

#### a. Modèle d'Einstein (1906) :

Dans ce modèle, la relation donnant la viscosité d'une solution liquide-solide fut déduite originellement par Einstein en 1906 sous la forme :  $\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + \phi)$ , qui a été corrigée cinq ans plus tard par Einstein lui-même à la relations suivante qui est largement connu en tant que relation d'Einstein :[5]

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi) \quad (\text{II.17})$$

Cette relation est valable juste pour  $\phi = 3\%$  .

#### b. Modèle de Brinkman (1952)

Par contre, Brinkman a généralisé la formule pour qu'elle soit utilisable pour une large plage de concentrations volumiques : [5]

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (\text{II.18})$$

Les deux modèles (a) et (b) sont basés sur une étude analytique utilisant un modèle moléculaire, où on traite les nanoparticules comme des sphères qui n'ont aucune interaction entre eux.

**c. Modèle de ( Masuda et al 1993 ; Lee et al 1999 ; Wang et al 1999 et Maiga et al 2005):**

Pour calculer la viscosité dynamique des nanofluides les chercheurs ont dû avoir recours aux données expérimentales pour proposer des corrélations liant la viscosité des nanofluides et la fraction volumique, nous citerons, entre autres, les corrélations proposées dans plusieurs travaux de recherche y compris ceux cités en titre et qui seront utilisées dans nos calculs :[16]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 123\phi^2 + 7.2\phi + 1 \quad \text{Pour : eau- } Al_2O_3 \quad (\text{II.19})$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 306\phi^2 - 0.19\phi + 1 \quad \text{Pour : Ethylène Glycol- } Al_2O_3 \quad (\text{II.20})$$

Il est à noter que toutes les études expérimentales montrent que la viscosité des nanofluides est toujours supérieure à la viscosité du fluide de base. Pareillement, les viscosités des nanofluides déduites expérimentalement sont aussi supérieures aux viscosités calculées par les relations de prédiction analytiques.

### II.7.5. Chaleur spécifique :

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

La chaleur spécifique d'un nanofluide est donnée, en fonction de la fraction volumique  $\phi$  par deux formules, dont la première est déduite analytiquement, en considérant le nanofluide en tant que mélange en équilibre comme suit :

on considère  $Q$  le flux échangé par une certaine quantité de masse d'un nanofluide [5]

$$(C_p)_{nf} = \frac{Q}{m_{nf}\Delta T} = \frac{Q_p + Q_f}{\rho_{nf} V_T \Delta T} = \frac{(m_p (C_p)_p + m_{bf} (C_p)_{bf}) \Delta T}{\rho_{nf} V_T \Delta T} = \frac{(\rho C_p)_p V_p + (\rho C_p)_{bf} V_{bf}}{\rho_{nf} (V_p + V_{bf})} \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Ce qui peut être réécrit sous la forme : } (\rho C_p)_{nf} = \phi(\rho C_p)_p + (1-\phi)(\rho C_p)_{bf} \quad (\text{II.22})$$

Malgré que les chaleurs spécifiques données par cette formule sont en bonne accord avec l'étude expérimentale de Zhou et Ni 2008. Dans nos calculs, nous avons choisi, une autre plus simple qui a été proposée par plusieurs chercheurs dans le domaine :

$$(C_p)_{nf} = \phi(C_p)_p + (1-\phi)(C_p)_{bf} \quad (\text{II.23})$$

### II.7.6. Coefficient d'expansion thermique ( $\beta$ ) :

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

Pour le calcul de la valeur de ce coefficient dans le cas des nanofluides, suite aux premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation qui détermine la masse volumique de très nombreux auteurs ont utilisé l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \phi)\beta_{bf} + \beta_p \quad (\text{II.24})$$

Notons bien que les indices : - *bf* : basique fluide  
- *p* : particules

Dans notre étude nous n'aurons pas besoin de ce paramètre parce que nous n'avons pas tenu compte de la convection naturelle.

### II.8. Méthode numérique :

La résolution des équations de conservation d'un phénomène physique se fait par l'utilisation d'une méthode numérique bien déterminée. Cette dernière consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations. A cette étape, intervient le concept de la discrétisation des équations différentielles, qui a pour résultat, un système d'équations algébriques non linéaires, ces équations décrivent les propriétés discrètes du fluide dans chaque noeud du domaine étudié.

Il existe plusieurs méthodes numériques de discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles, les plus utilisées sont:

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

Dans la présente étude, nous utilisons la méthode des volumes finis.

## II.9. Procédure numérique :

Pour résoudre numériquement un problème basé sur les équations de Navier-Stokes plusieurs possibilités existent. La première est l'écriture d'un code numérique propre. Cette voie offre des avantages certains, comme le contrôle complet de l'algorithme, ou une souplesse incomparable au niveau de la personnalisation des fonctions. Par contre, ce programme demandera probablement plusieurs jours de travail avant de donner son premier résultat.

L'autre possibilité consiste à utiliser les codes (commerciaux) existants. Le plus grand avantage sera certainement de disposer directement d'un outil fiable et validé.

D'un autre côté, l'accès au code étant limité, certaines parties du programme se considèrent comme une boîte noire. De plus, la souplesse sera plus ou moins réduite selon le logiciel et le domaine d'application choisi.

Dans notre étude de transfert de chaleur nous avons utilisé un code de calcul CFD-Fluent qui emploie la méthode des volumes finis comme procédés de discrétisation, alors que la géométrie a été réalisée sur le logiciel Gambit. La présentation des deux logiciels en question fera l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre III:

## Simulation numérique

### III.1. Introduction :

Avant d'entamer la simulation numérique de la convection forcée lors de l'écoulement des différents fluides auxquelles nous avons eu recours dans notre étude (écoulement radial entre deux disques coaxiaux) à l'aide d'un code de simulation numérique, il convient de clarifier certains points sur cette méthode.

De nos jours, la simulation numérique en mécanique des fluides (CFD : Computational Fluide Dynamique) est l'un des outils de conception inéluctable, qui est amplement utilisé dans l'industrie. Le choix d'une telle méthode repose particulièrement sur le type et la complexité du problème à résoudre.

Dans notre étude, nous utilisons deux logiciels commerciaux : Gambit qui nous sert d'outil de conception de la géométrie en question et Fluent pour la simulation numérique de la convection forcée. La présentation de ces deux logiciels se fera dans ce qui suit.

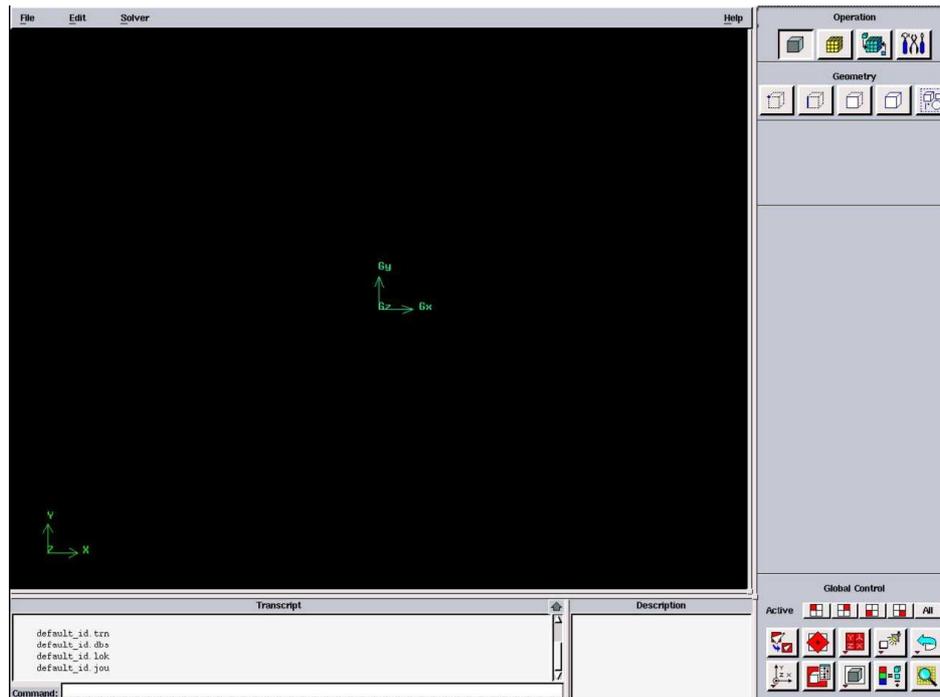
### III.2. Présentation du logiciel Gambit. [17]

Gambit est un logiciel industriel permettant la construction de maillages structurés ou non. Il possède en outre de nombreuses possibilités d'extraction qui permettent l'utilisation de ses maillages par des logiciels industriels, tel que Fluent. Lors de la création d'une session, Gambit crée implicitement quatre fichiers :

- un fichier d'extension « **db**s » qui contient toutes les données de la session ;
- un fichier « **jo**u », qui retrace l'historique de la session ;
- un fichier « **tr**m », qui reprend toutes les commandes et leurs résultats lors des différentes sessions ;
- un fichier « **lo**k ».

#### III.2.1. Description de l'interface général du logiciel Gambit

L'interface générale de Gambit est divisée en 6 parties comme montrée sur la figure suivante, ces différentes parties seront détaillées dans ce qui suit:



**Figure (III .1) :** Interface générale du logiciel Gambit.

Dans ce qui suit nous allons détailler quelques fonctions de ce logiciel (celles qui seront plus utiles pour notre étude).

- une zone graphique, qui donne accès à une liste de menus (*files, edit, solver*).
- un panel relevant différentes informations comme les actions réalisées et leurs résultats (*Transcript*).
- un panel permettant d'insérer des commandes directement (*command*).
- un panel de (*Description*) qui donne les définitions des différents boutons.
- le panel (*Global Control*) permet entre autre, de zoomer, de changer de repère et de vérifier les maillages.
- le dernier panel (*Operation*) au dessus de Global Control contient les boutons permettant le dessin et le maillage des pièces ou domaines. Ce dernier fait l'objet d'une présentation plus complète dans ce qui suit.

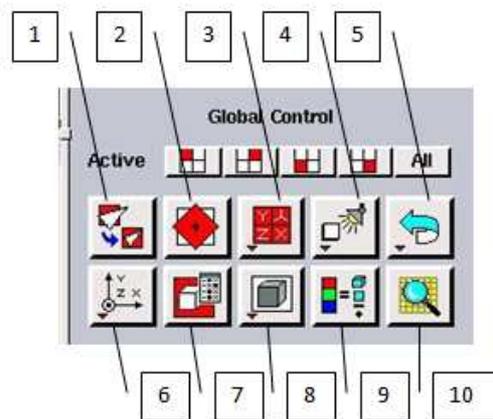
### III.2.1.1. Description des menus du Panel graphique :

- **File** : permet d'ouvrir, de fermer, de sauvegarder des sessions, d'importer et d'exporter des fichiers. Il sert notamment lors de l'exportation de maillages pour Fluent avec les commandes (*Files/Export/Mesh/...* le détail est donné plus loin) ;

- **Edit** : permet principalement de modifier la configuration de Gambit. Ce menu est généralement inutilisé et il convient de bien connaître le logiciel avant de le reconfigurer ;
- **Solver** : permet de choisir le type de code de calcul utilisé avec le maillage ainsi créé. Par exemple, choisissez *Fluent5/6* pour utiliser **Fluent**, *Generic* pour utiliser **Thétis**. Par défaut, Gambit utilise le solveur *Generic*. Ce format de fichier permet de récupérer les coordonnées des nœuds, la définition des éléments, des blocs et sous blocs de maillages et des conditions aux limites.

### III.2.1.2. Description des menus du Panneau Global Control

Cette figure (III.2) représente le menu du panneau Global Control sur Gambit.



**Figure (III.2) : Panneau Global Control.**

Il est composé de 15 boutons disposés sur trois lignes. La première ligne nommée **Active** détermine les fenêtres graphiques utilisées lorsque l'on divise le panel graphique en 4. Les deux lignes suivantes sont décrites ci-après, de gauche à droite et de haut en bas :

- 1- **Fit to window** : recadre la fenêtre sur la dimension de la géométrie ;
- 2- **Select Pivot** : Choix du type de rotation pour le repère (globale ou locale) ;
- 3- **Select Preset Configuration** : permet de diviser en 4 le panel graphique et de ne rendre actives que certaines fenêtres ;
- 4- **Modify Light Source, Annotate, Specify Label** : orientation des sources lumineuses et permet de nommer les pièces ;
- 5- **Undo Redo** : permet d'annuler la dernière opération ;
- 6- **Orient Model** : permet de choisir l'orientation du repère ;

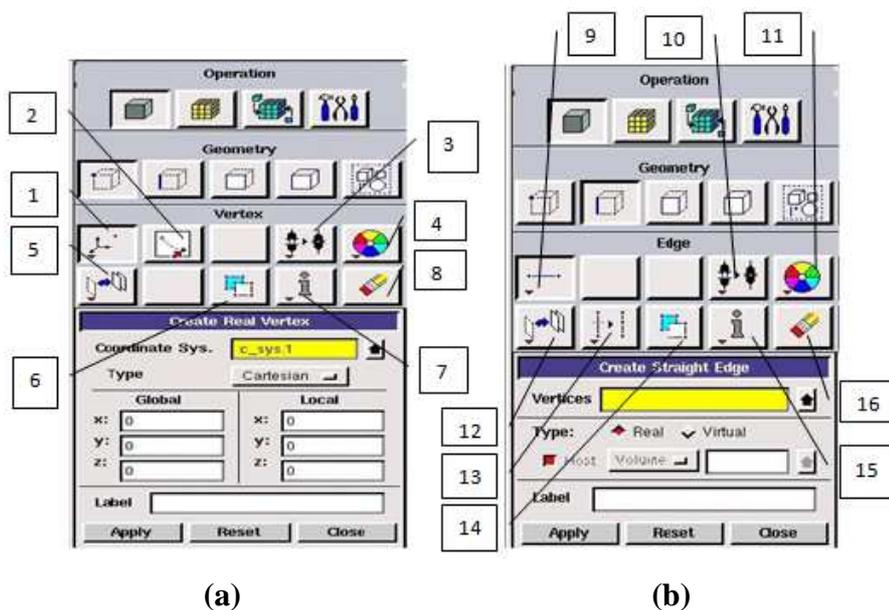
- 7- **Specify Model Display Attribute** : options de visualisation ;
- 8- **Render Model** : apparence du model avec les lignes de définitions uniquement, en ombrée, ou en plein ;
- 9- **Specify Color Mode** : définition des couleurs des points, lignes, surfaces, etc...
- 10- **Examine Mesh** : permet de vérifier la qualité du maillage selon différents critères (déformation, ratio longueur, largeur, etc.).

### III-2-1-3-Description des menus du panel Operation

Il contient 4 boutons de commande qui sont les suivants :

**1-Geometry Command Button** : possède un sous-panel (*Geometry*) de 5 boutons et chacun de ces derniers englobe un sous-panel de 10 boutons dont certains sont inutiles les autres sont illustrés au dessous des figures III. (3, 4 et 5) suivantes :

Fonction des boutons étant sous le panneau d'opération lors de la création des points et des segments sous le panneau des opérations.



**Figure (III.3)** : Panneau d'opération (création des points (a), des segments (b)).

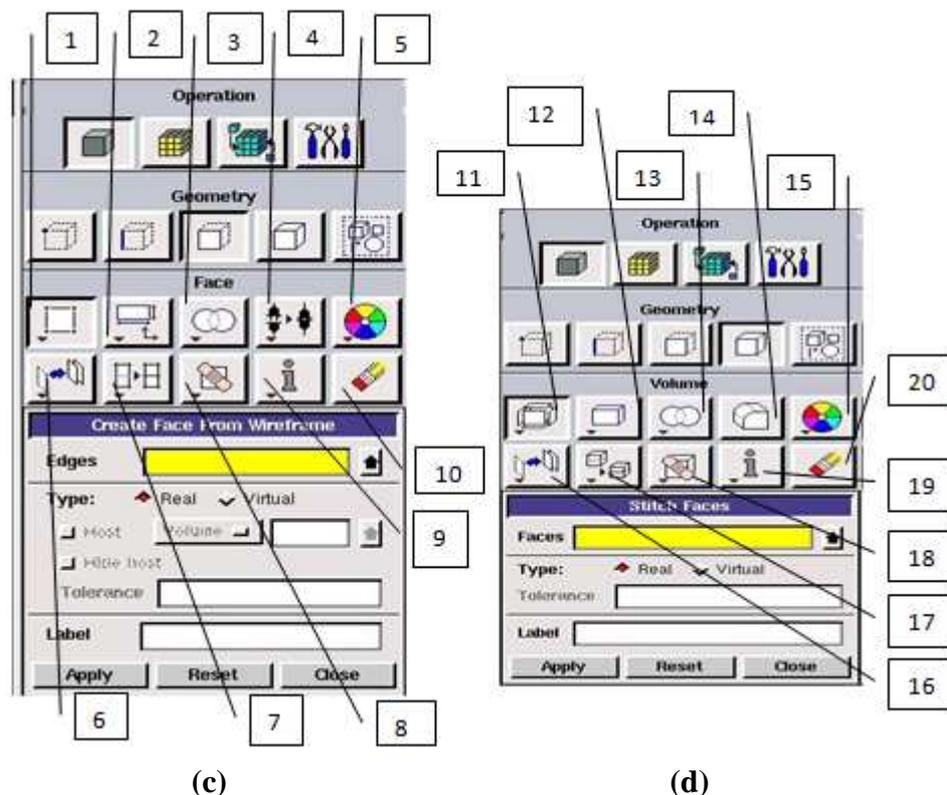
**a)- Menu des points**

- 1- créer un point.
- 2- déplacer les points virtuels.
- 3- connecter/Déconnecter les points.
- 4- modifier la couleur ou le nom des points.
- 5- déplacer/Copier/Aligner les points.
- 6- convertir les points virtuels en réels.
- 7- information sur les points créés.
- 8- effacer les points.

**b)- Menu des segments**

- 9 - créer une ligne.
- 10 - connecter/Déconnecter les lignes.
- 11 - modifier la couleur ou le nom des lignes.
- 12 - déplacer/Copier/Aligner les lignes.
- 13 - couper/Coller des lignes.
- 14 - convertir les lignes virtuelles en réelles.
- 15 - information sur les lignes créées.
- 16 - effacer les lignes.

Fonction des boutons étant sous le panneau d'opération lors de la création des surfaces et des volumes sous le panneau des opérations.



**Figure (III.4) :** Panneau d'opération (création des surfaces (c), des volumes (d)).

**c)- Menu des surfaces**

- 1- créer une surface à partir de lignes.
- 2- créer une surface à partir de géométrie prédéfinie.
- 3 - opérations booléennes sur les surfaces.
- 4- connecter/Déconnecter les surfaces.
- 5- modifier la couleur ou le nom des surfaces.
- 6- déplacer/Copier/Aligner les surfaces.
- 7- couper/coller des surfaces.
- 8- convertir les surfaces virtuelles en réelles.
- 9- information sur les surfaces créées.
- 10- effacer les surfaces.

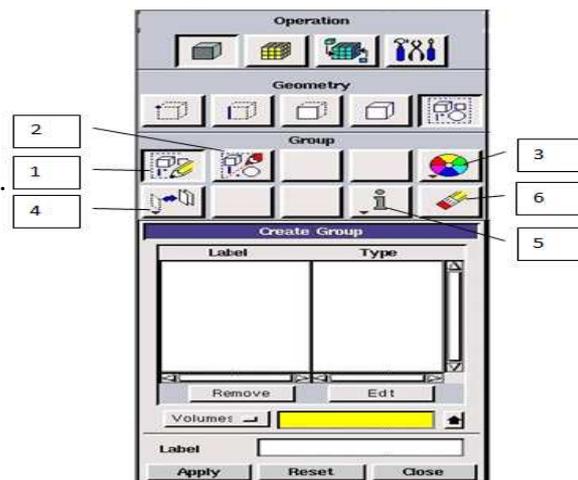
**d)- Menu des volumes**

- 11 - créer un volume à partir de surfaces.
- 12 - créer un volume à partir de géométries prédéfinies.
- 13 - opérations booléennes sur les volumes.
- 14- coller une surface à un volume.
- 15- modifier la couleur / nom des volumes.
- 16 - déplacer/copier/aligner les volumes.
- 17- couper/coller des volumes.
- 18 - convertir les volumes virtuels en réels.
- 19 - information sur les volumes créés.
- 20- effacer les volumes.

Fonction des boutons étant sous le panneau d'opération lors de la création des groupes sous le panneau des opérations.

**e)- Menu des groupes**

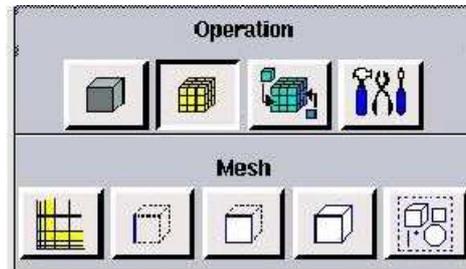
- 1- créer un groupe.
- 2- modifier un groupe.
- 3- modifier la couleur ou le nom des groupes.
- 4- déplacer/copier/aligner les groupes.
- 5- information sur les groupes créés.
- 6- effacer les groupes.



(e)

**Figure (III. 5) :** Panneau d'opération (construction des groupes (e)).

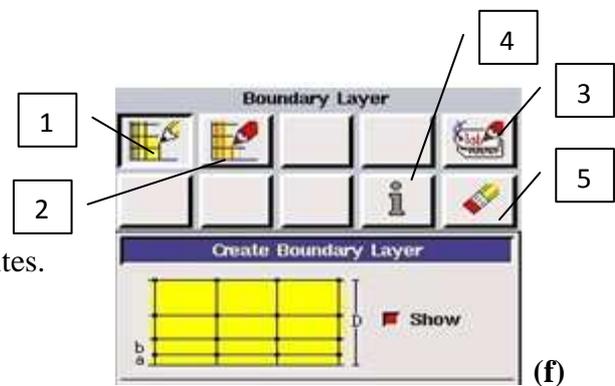
**2-Mesh Command Button** : possède un sous-panel *Mesh* de 5 boutons dont chacun renferme un sous-panel de 10 boutons qui sont détaillés sous les figures III. (7, 8 et 9) :



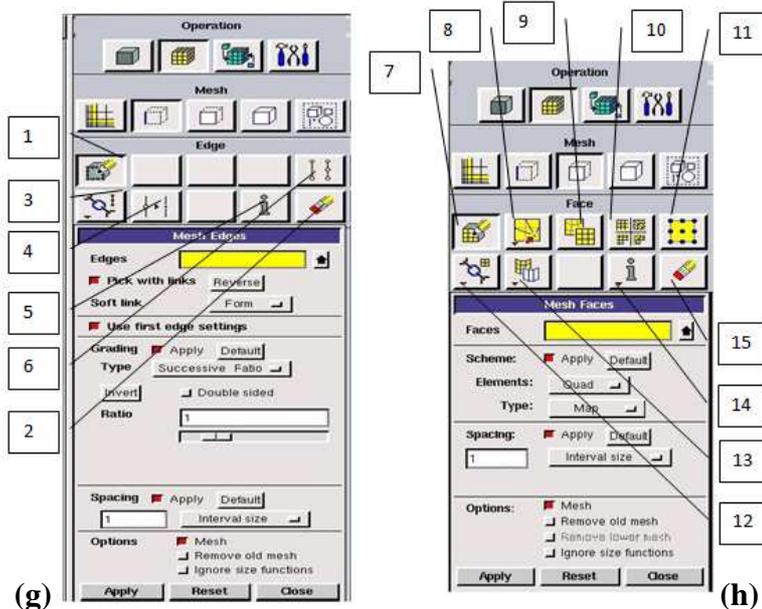
**Figure (III.6):** Panneau d'opération (options de maillage).

**f)- Définition des couches limites**

- 1- créer une couche limite.
- 2- modifier une couche limite.
- 3- modifier la couleur ou le nom des couches limites.
- 4- information sur les couches limites créées.
- 5- effacer les couches limites.



**Figure(III.07) :** Construction des maillages de type couches limites.



**Figure(III.08) :** Construction des maillages des segments (g) et des surfaces (h) de la géométrie

L'utilité des différents boutons affichés lors de la création d'un maillage des segments (g) et des surfaces (h) sous le panneau des opérations sur Gambit.

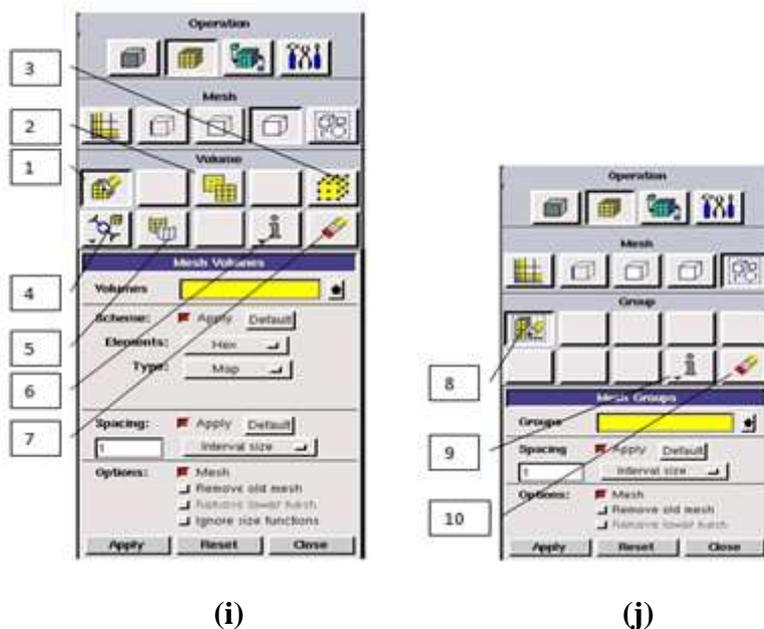
### g)-Définition des maillages des segments

- 1- créer un maillage sur une ligne.
- 2- définir le type d'élément de maillage de la ligne.
- 3 - lier/délier les maillages des lignes.
- 4- couper/coller des maillages de ligne.
- 5- information sur les maillages de lignes créées.
- 6- effacer les maillages des lignes.

### h)-Définition des maillages des surfaces

- 7 - créer un maillage sur une surface.
- 8 - déplacer un noeud sur un maillage, modifier un élément.
- 9 - lisser le maillage sur une surface.
- 10 - définir le type d'élément.
- 11 - lier/délier les maillages des surfaces.
- 12 - couper/coller des maillages de surface
- 13 - définir le type de noeud.
- 14 - information sur les maillages des surfaces créées.
- 15 - effacer les maillages des surfaces.

Affichage sur le panneau des opérations sur Gambit lors de la création d'un maillage de volume.



**Figure (III.9):** Construction des maillages des volumes (d) et des groupes (e) de la géométrie.

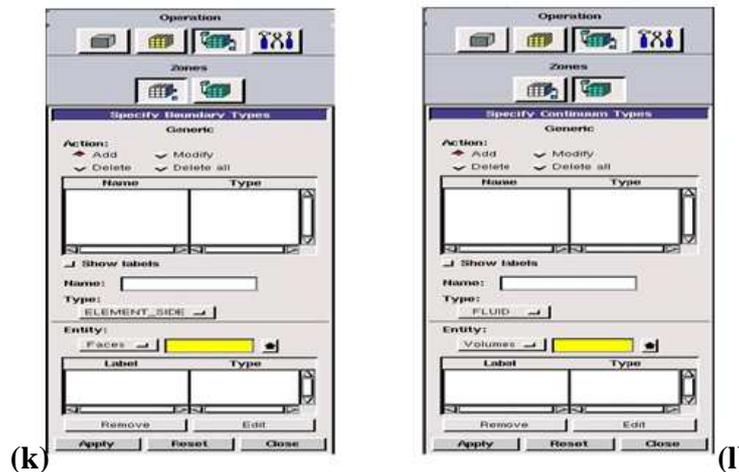
**i)- Définition des maillages des volumes**

- 1- créer un maillage dans un volume.
- 2- lisser le maillage dans un volume.
- 3- définir le type d'élément.
- 4- lier/délier les maillages des volumes.
- 5- couper/coller des maillages de volume.
- 6- information sur les maillages de volumes créés.
- 7- effacer les maillages des volumes.

**j)- Définition des groupes**

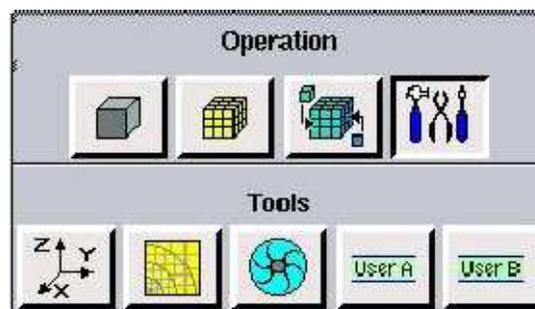
- 8 - créer un groupe de maillage.
- 9 - information sur les groupes créés.
- 10 - effacer les groupes.

**3- Operation** : c'est la partie réservée aux caractéristiques et la mise en place des conditions aux limites de la géométrie considérée et qui se trouve sur le panneau des opérations comme le montre la figure suivante.



**Figure (III.10):** mise en place des conditions aux limites(k) et des caractéristiques des domaines (l).

**4-Tools** : Ces outils permettent de configurer le système de coordonnées et modifier certains paramètres, ils sont rarement utilisés.



**Figure (III.11) :** Panel des outils de configuration.

### III.2.2. Types, techniques et qualité d'un 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. Cependant il existe différents types et techniques de maillage qui dépendent de la structure à mailler, voici les types et techniques de maillage recommandés.

#### III.2.2.1. Choix du type de maillage

##### *a)-Maillage structuré (quadra/hexa) :*

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients

- Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes

##### *b)-Maillage non structuré (tri/tétra.)*

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte.

Ses avantages :

- Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

##### *c)-Maillage hybride*

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages sont la combinaison entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré

### III.2.2.2. *Techniques générales de génération d'un maillage*

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne **Q**ualité des éléments
- Assurer une bonne **R**ésolution dans les régions à fort gradient
- Assurer un bon **L**issage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier
- Minimiser le nombre **T**otal des éléments (temps de calcul raisonnable)

On peut se souvenir de ces règles en utilisant la formulation mnémotechnique **QRLT**.

### III.2.2.3. *Qualité d'un maillage*

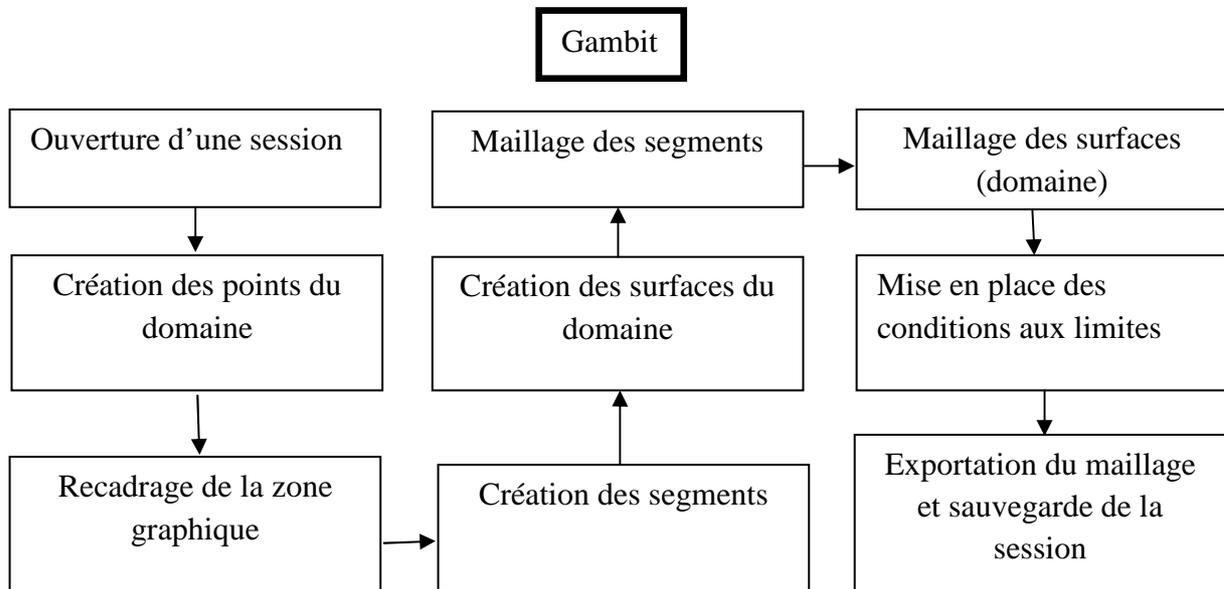
La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants :

- Minimisation des éléments présentant des distorsions. (skewness en anglais)
- Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc ...etc.)

Enfin, la qualité de maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

### III.3. Procédure de modélisation

La figure III.6 représente les différentes procédures que nous avons suivit pour la réalisation de la géométrie sur Gambit.



Figure(III.12) : Procédure de modélisation de la géométrie sous Gambit

### III.4. Utilisation de Gambit

Cette section contient une présentation succincte du logiciel Gambit, ainsi notre utilisation permettant une première prise en main.

#### III.4.1. Réalisation du maillage sur Gambit.

Pour illustrer la construction d'un maillage sous Gambit, on propose le maillage de la géométrie suivante (la géométrie qui fera l'objet de notre étude) :

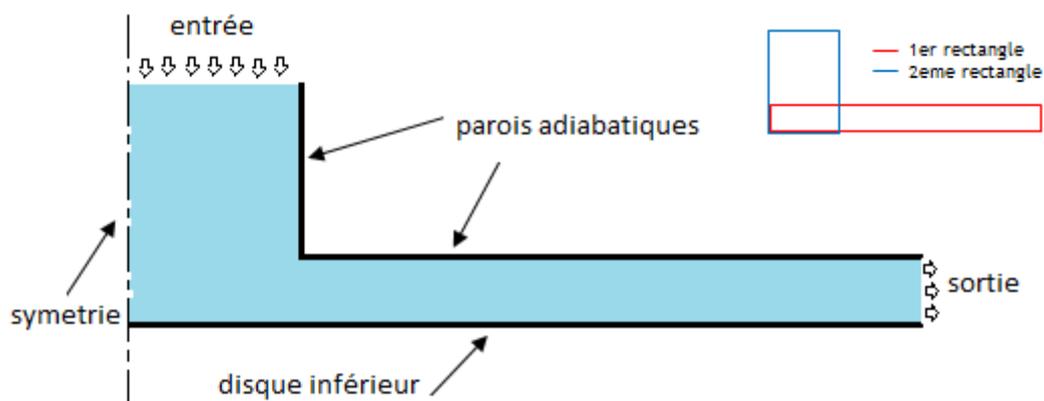


Figure (III.13) : La géométrie à réaliser sur Gambit

Dans notre cas nous allons introduire un maillage raffiné le long de la Paroi inférieure (disque inférieur), la symétrie et les Parois adiabatiques.

Cette géométrie ne peut pas être assimilée à un rectangle, donc elle doit être divisée. Une manière de le faire est de créer un premier rectangle horizontal qui renfermera, une partie de la symétrie, la paroi inférieure, la paroi adiabatique horizontale allant jusqu'à la symétrie et en fin la sortie, et un deuxième verticale qui sera défini à partir de 4 segments. En effet, le premier segment sera consacré pour l'entrée et les trois autres réparties sur les parois comme suit l'un de ces segments représentera la symétrie, l'autre une partie de la paroi inférieure le dernier pour la connexion avec le premier rectangle (la paroi horizontale adiabatique et une partie du 1<sup>er</sup> rectangle).

Les deux surfaces ainsi définies devront être maillées de façon conforme. Dans notre cas, le maillage est raffiné exponentiellement le long de la symétrie et aussi le long de toutes les parois, pour obtenir un maillage correct.

La topologie est simple au début, devenue compliquer par la suite mais elle permet une facilité accrue de la mise en place du maillage et des conditions limites. Voici maintenant la description des étapes sous Gambit :

### III.4.2. Ouverture de la session

Après avoir lancé Gambit, sauvegarder la session sous le nom « eau » avec *Files>Save as*. En haut du panel graphique, nous devons avoir les informations principales de la session, à savoir le type de code et l'identité de la session. Ici on aura : GAMBIT Solver : Generic ID : eau.

*Remarque* : dans le panel Transcript, on a les lignes de commandes suivantes : Command> Save name « eau.db » A chaque action de l'utilisateur, la commande et son résultat apparaissent dans ce panel. Il est important de toujours vérifier le résultat de l'action avant de continuer.

### III.4.3. Création des points du domaine

Après avoir entré les coordonnées de chaque point situé à la limite du domaine nous suivrons dans l'ordre les étapes suivantes : Apply ( Operation>Geometry>Vertex>Create Real Vertex)

Les coordonnées des points concernant notre géométrie sont les suivantes.

Point 1 : [00 ; 00] (m)

Point 2 : [0.15 ; 00] (m)

Point 3 : [0.15 ; 0.003175] (m)

Point 4 : [00 ; 0.003175](m)

Point 5 : [0.01634 ; 00] (m)

Point 6 : [0.01634 ; 0.003175] (m)

Point 7 : [0.01634 ; 0.045] (m)

Point 8 : [00 ; 0.045] (m)

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

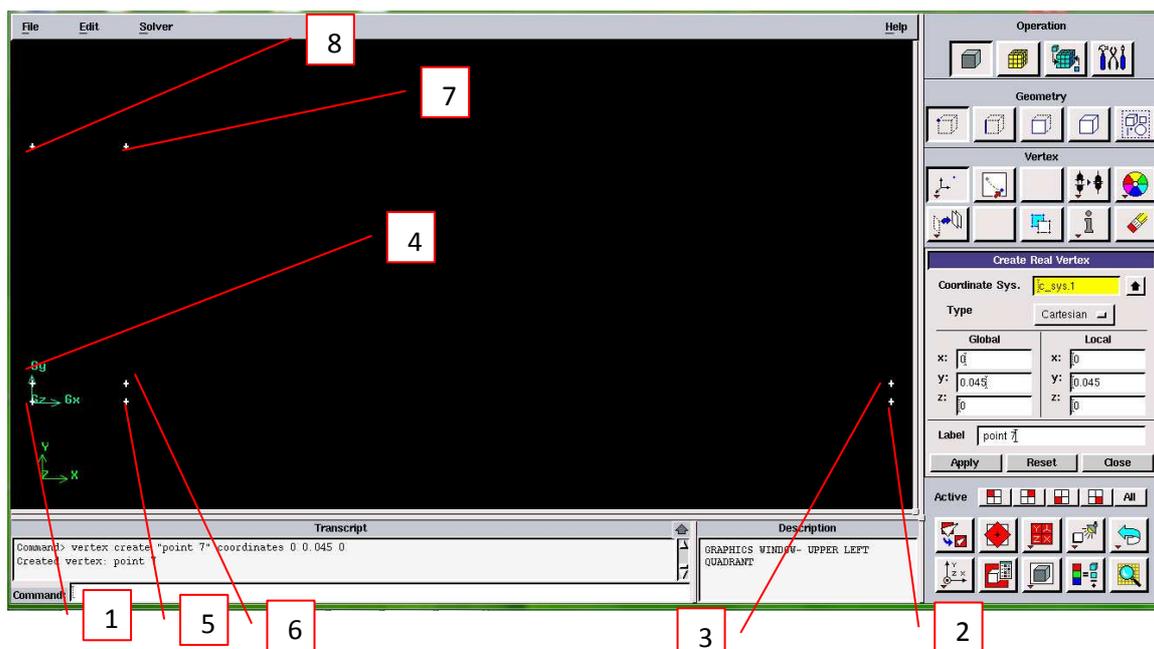


Figure (III.14) : Position des points après recadrage de la zone graphique.

### III.4.4. Recadrage de la zone graphique

Cette étape est simple et nécessaire pour faire apparaître tous les points déjà définis, et la procédure est comme suit: **Fit to window**

### III.4.5. Créations des segments

Pour la création des segments nous suivrons les étapes suivantes :

#### Operation>Geometry>Edge>Create Real Edge

Paroi_inf 1 : point 1 et 2	Sortie: point 2 et 3	Paroi_sup: point 3 et 4
Symetrie_1 : point 4 et 1	Paroi_inf 2 : point 1 et 5	Paroi_vert: point 5 et 7
Entrée: point 7 et 8	Symétrie : point 8 et 1.	

Pour faciliter la mise en place des segments, il est possible de sélectionner avec la souris les deux extrémités du segment (bouton gauche) puis de valider avec (bouton droit). Voici ce que l'on obtient à ce stade de la construction :

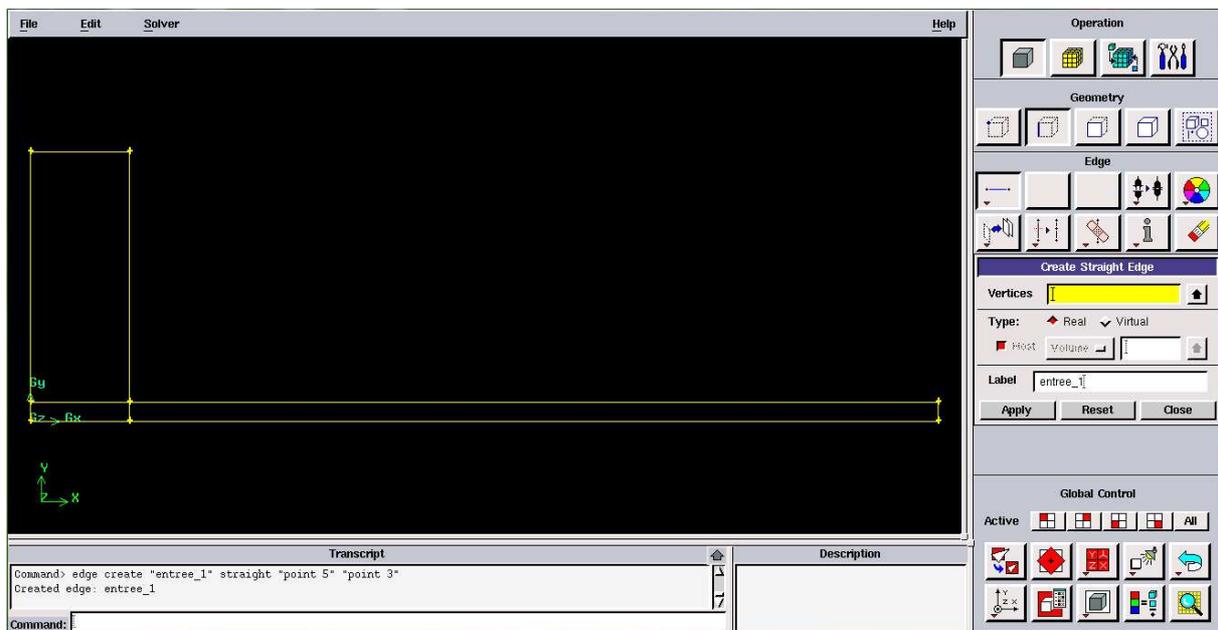


Figure (III.15) : Visualisation des segments du domaine.

### III.4.6. Création des surfaces du domaine

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

Face 1 : constituée des segments n° :1, 2, 3,4.

Face 2 : constituée des segments n° :5, 6, 7,8.

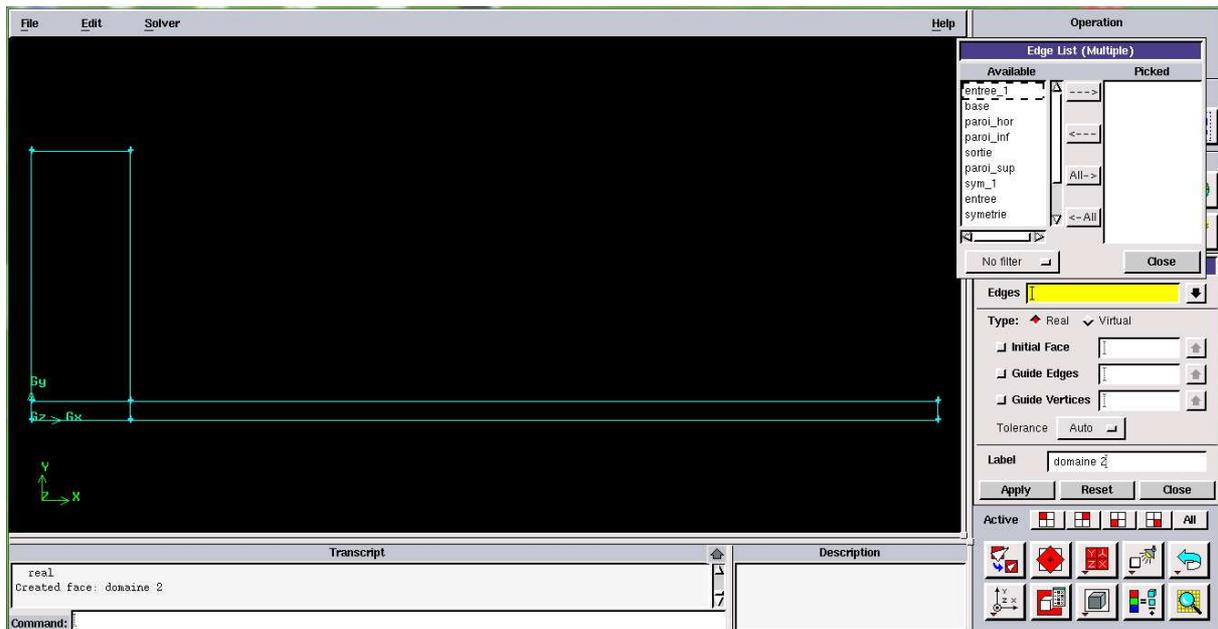


Figure (III.16) : Visualisation des faces du domaine.

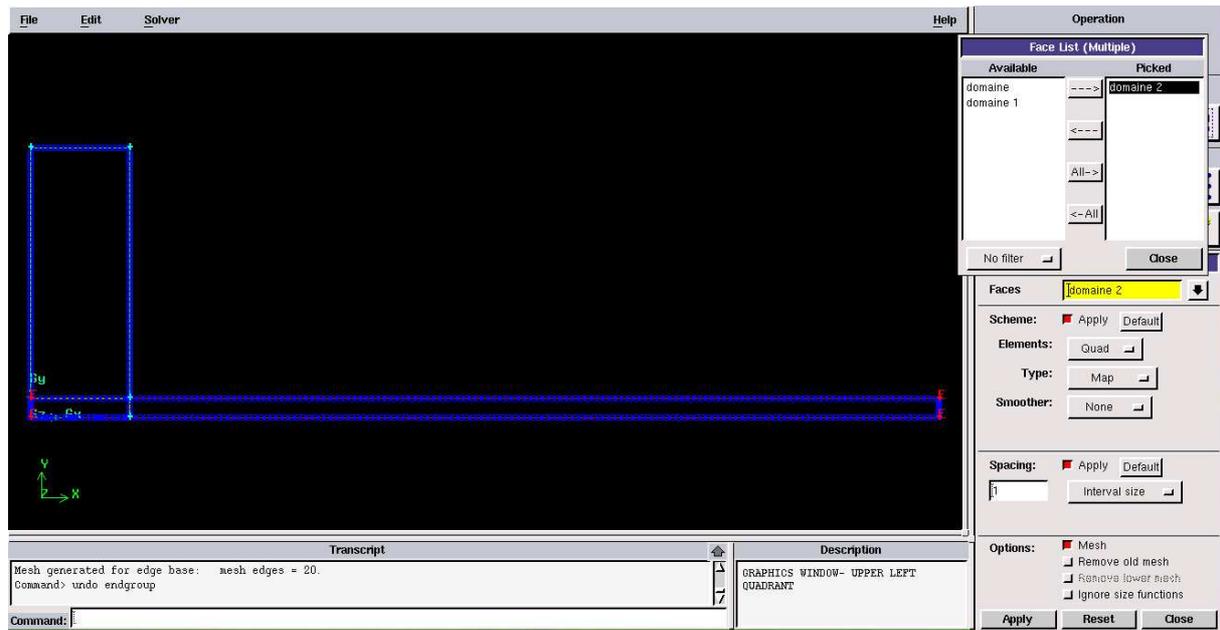
*Remarque* : les faces 1 et 2 constitueront les deux sous bloc du bloc 1.

### III.4.7. Millage de la géométrie obtenue

Cette procédure se fait en deux étapes (maillage des segments puis maillage des surfaces déjà réalisées). Vu les différents types de maillage existants (présentés avant en III-3) et afin d'obtenir un maillage de qualité qui répond à toutes les exigences concernant notre structure nous avons opté pour le maillage 2D structuré.

#### III.4.7.1. Création du maillage des segments

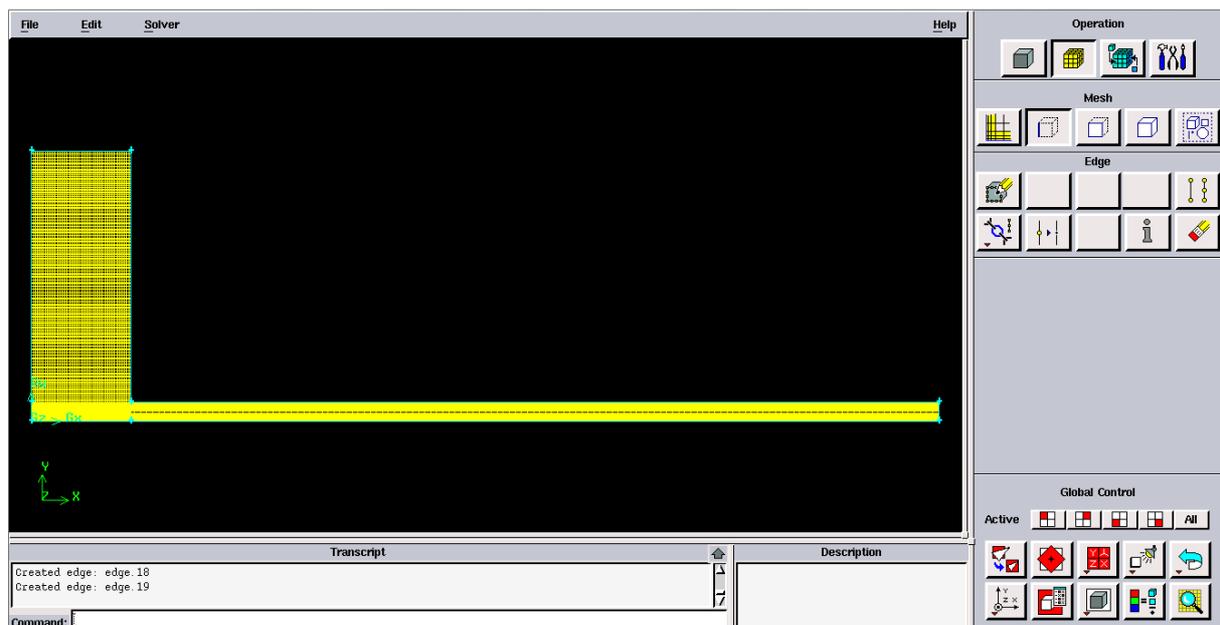
Les étapes à suivre sont : Operation>Mesh>Edge>Mesh Edge. Dans notre cas nous avons choisis un raffinement (bi\_exponent) avec une valeur de 0.8 pour tous les segments de notre géométrie, autrement dit : un maillage serré aux extrémités de ces derniers.



Figure(III.17) : Maillage des segments

### III.4.7.2. Maillage des surfaces obtenues

Les étapes à suivre dans l'ordre pour cette opération sont : Operation>Mesh>Face> Mesh. Nous sélectionnons les faces, vérifions les critères de maillage (*Quad & Map*) puis validons. La sélection des faces implique la continuité de la mise en place du maillage dans les blocs. La figure suivante nous montre ce que l'on doit obtenir :



Figure(III.18) : Maillage du domaine

### III.4.8. Mise en place des conditions aux limites

Les étapes à suivre sont : Operation>Zones>Specify Boundary Types. Nous sélectionnons les segments en fonction des conditions aux limites choisies. Voici un exemple:

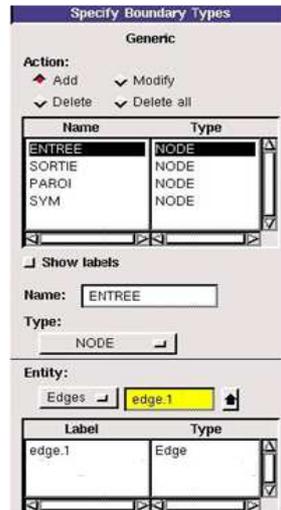


Figure (III.19) : Définition du segment de l'entrée.

*Remarque* : les lignes de séparation entre les deux sous blocs ne sont pas définies dans les conditions limites.

### III.4.9. Mise en place des différents domaines de calculs (les deux rectangles)

Cette étape sert à définir les différentes faces (blocs) de la géométrie (dans notre cas ce sont les deux rectangles déjà définis). Les étapes à suivre sont : Operation>Zones>Specify Continuum Types.

Voici ce que l'on doit avoir :

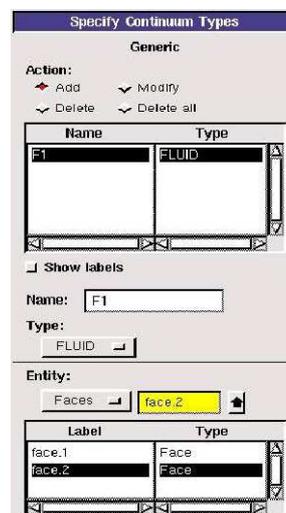


Figure (III.20) : Définition des blocs.

### III.4.8. Exportation du maillage et sauvegarde de session

Les étapes à suivre sont : Files>Save Files>Export>Mesh Exemple.neu. Dans le panel *Transcript*, nous obtiendrons les informations suivantes : nombre de nœuds, d'éléments, de conditions limites et de blocs. Le logiciel informe aussi de la réussite de l'exportation du maillage, pour notre cas nous avons considéré 8000 nœuds.

### III-5-Présentation du logiciel "Fluent"

Fluent est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts m2thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une facilité relative. Les types de mailles supportées sont des mailles, en 2D, triangulaires ou quadrilatérales, ou en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales, et les mailles (hybrides) mélangées. Fluent est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés. Ainsi, il a les capacités de modélisation suivantes:

- Ecoulements 2D ou 3D.
- Etats permanents ou transitoires.
- Ecoulements incompressibles ou compressibles incluant toute vitesse de régimes (subsoniques, transsoniques, supersoniques et hypersoniques).
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents.
- Ecoulements Newtonien ou non.
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou radiatif.
- Les écoulements avec changements de phases.
- Ecoulements en milieu poreux.

Ce code de calcul emploie la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation. Les équations intégrales qui gouvernent l'écoulement, tels que l'équation de continuité, l'équation de conservation de la masse, celle de l'énergie ainsi que d'autres scalaires, comme la turbulence, sont résolues par cette méthode statistique. En utilisant cette technique basée sur un volume de contrôle, Fluent passe par les étapes suivantes:

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille de calcul.
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, (les inconnues), telles que les vitesses, pression, température ...
- Linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant, pour pouvoir mettre à jour les valeurs des variables dépendantes (inconnues).

### III-5-1- Procédure de modélisation sous Fluent

Cette figure (III.16) illustre les différents procédures à suivre pour la simulation sur Fluent

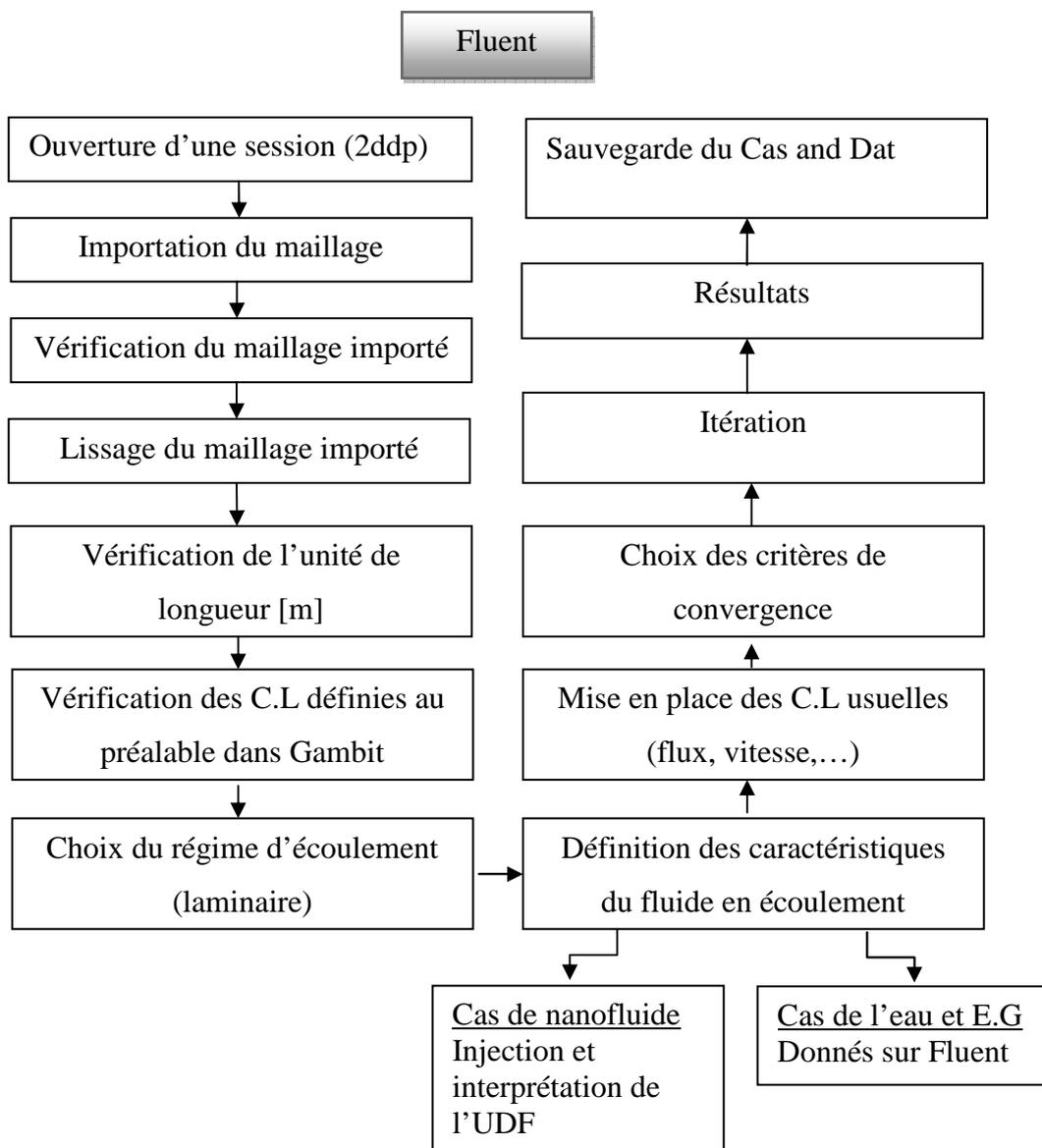


Figure (III.21) : Procédure de modélisation sur le logiciel Fluent

Les différentes étapes que nous avons réalisées au cours de notre étude (citées en procédé de modélisation) sont détaillées dans ce qui suit :

### III.5.2. Procédure de simulation sous Fluent

Au chargement du maillage sous Fluent, avant tout, nous devons mettre la géométrie à l'échelle, (mettre, pour notre cas). Le logiciel permet aussi de réordonner les nœuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire, pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité de l'accès à la mémoire.

### III.5.3. Choix du mode simple précision ou double précision.

Fluent offre deux modes de calcul: le mode "double précision" et le mode "simple précision". Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. En outre, Le mode "double précision" est préconisé, entre autres, pour les écoulements impliquant des longueurs d'échelles très disparates, comme dans notre cas (très long canal mince comparé au diamètre de ce dernier). Donc, c'est le mode que l'on va utiliser.

### III.5.4. Principales étapes de simulation sous FLUENT

#### III.5.4.1. Importation de la géométrie (\*.MSH)

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit. Les étapes sont les suivantes : File→read→case...



Figure (III.22) : Importation de la géométrie

### III.5.4.2. Vérification du maillage importé de Gambit

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



Figure (III.23) : Vérification du maillage sous Fluent

### III.5.4.3. Lissage du maillage

Cette étape est simple elle sert à lisser le maillage importé de Gambit. Les étapes à suivre dans l'ordre sont: Grid → Smooth/Swap

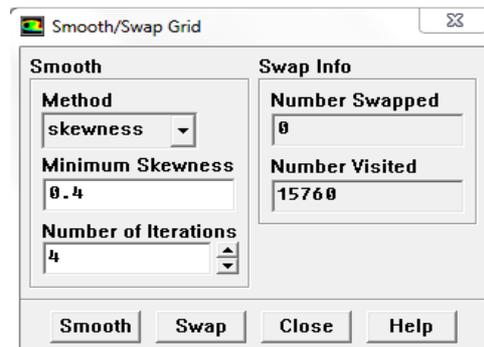


Figure (III.24): Lissage du maillage

#### III.5.4.4. Vérification de l'unité de longueur

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

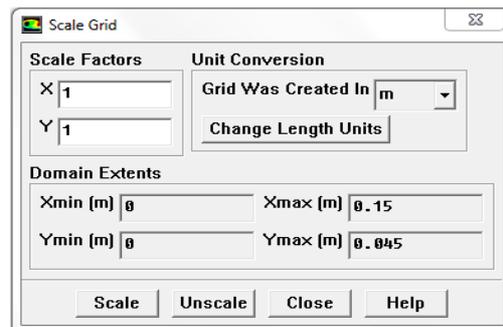


Figure (III.25). Choix de l'unité de longueur

#### III.5.4.5. Choix du Solveur

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

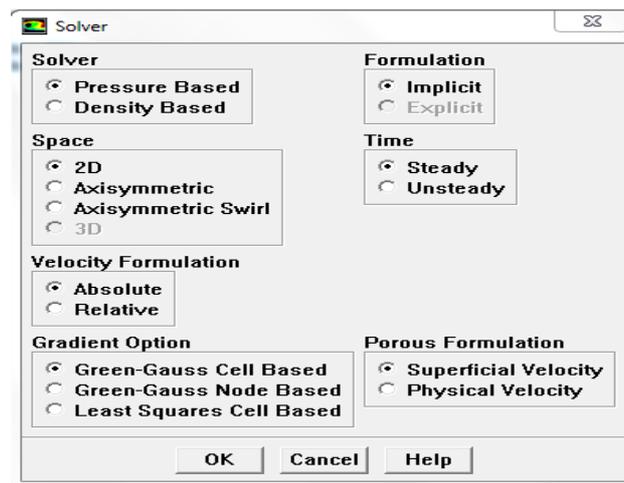


Figure (III.26) : Choix du solveur sous Fluent

### III.5.4.6. Affichage de la grille

Cette affichage ce fait de la manière suivante : **Display → Grid**. Nous pouvons afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.

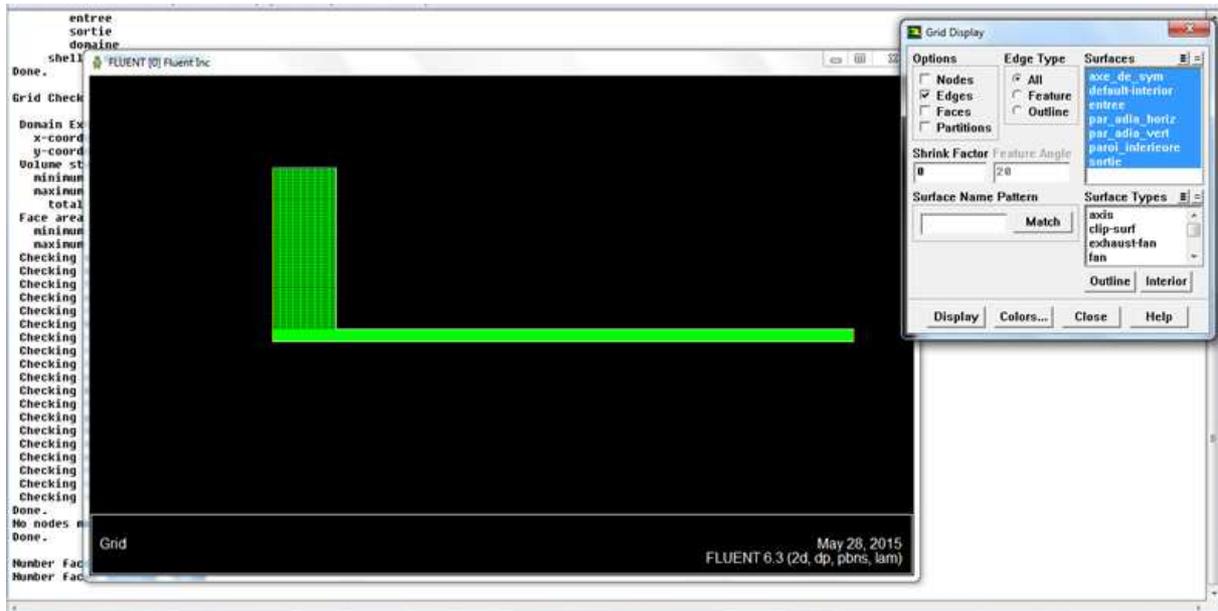


Figure (III.27) : Affichage de la grille

### III.5.4.7. Choix du régime d'écoulement

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

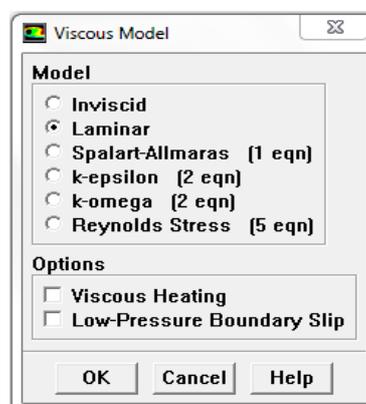


Figure (III.28): Choix du régime d'écoulement

### III.5.4.8. Définition des caractéristiques du fluide

a)-Cas où le fluide est de l'eau : Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque des données de Fluent. On ouvrant dans l'ordre les anglets suivants : **Define**→**Materials**.

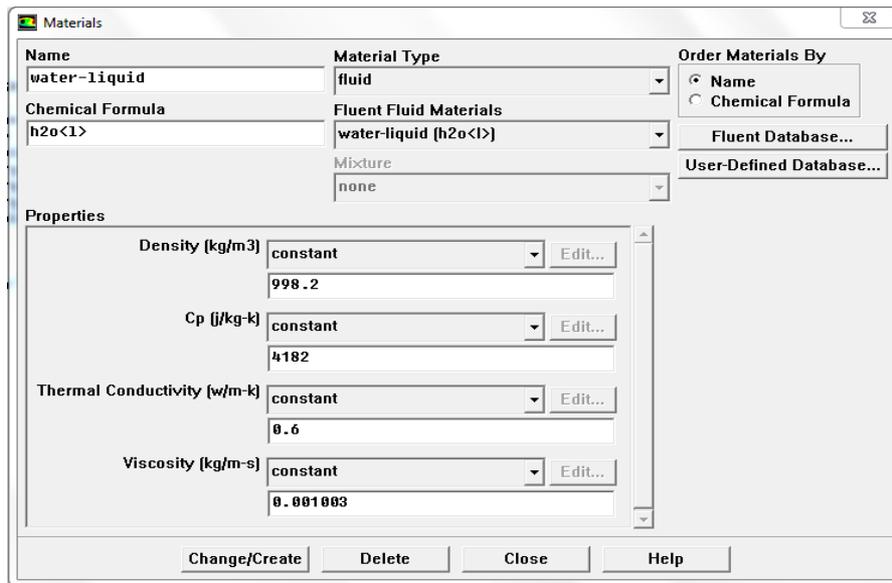


Figure (III.29): Définition des caractéristiques du fluide (eau)

b)-cas ou le fluide est l'éthylène glycol : de même ses caractéristiques sont définits de la bibliothèque des données de fluent et la procédure est la suivante : **Define**→**Materials**

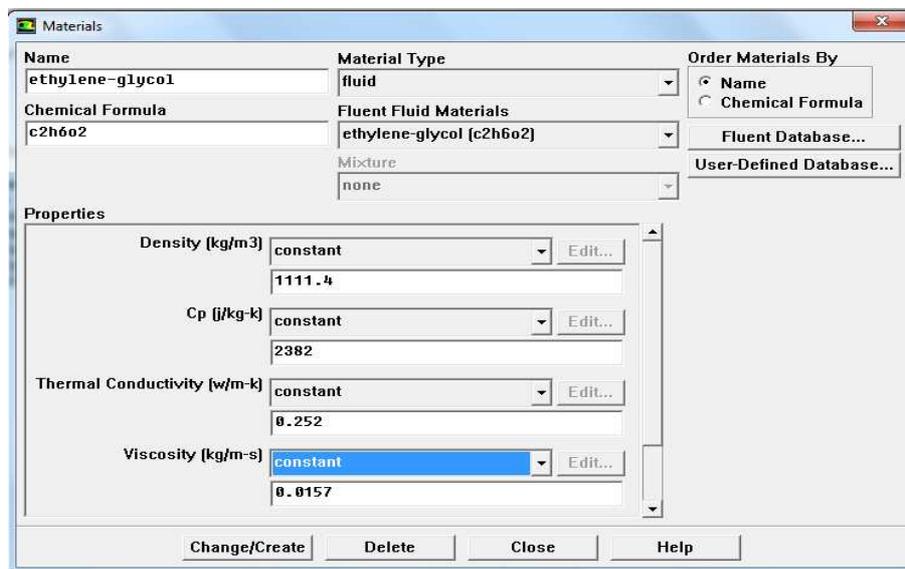


Figure (III.30): Définition des caractéristiques du fluide (éthylène-glycol)

**c)-Cas d'un nanofluide (Injection et interprétation de l'UDF):**

L'UDF contient l'ensemble des équations de conductivité, viscosité, et densité celle-ci sont en fonction de la fraction des nanoparticules dans le cas d'un nanofluide, l'UDF est écrite sous un fichier (.txt)

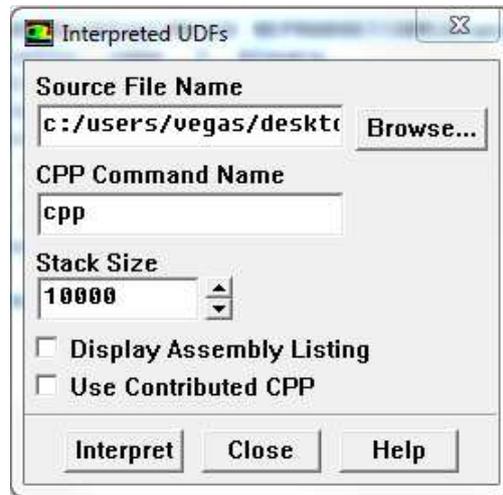
```
#include "udf.h"
/*CONDUCTIVITE THERMIQUE K*/
DEFINE_DIFFUSIVITY(COND_NANO,c,t,i)
{
real PHI,K_FLUIDE,K_NANO;
PHI=0.02;
K_FLUIDE=6.0e-01;
K_NANO=(4.97*pow(PHI,2.0)+2.72*PHI+1.0)*K_FLUIDE;
return K_NANO;
}
/*DESITE MASSE VOLUMIQUE*/
DEFINE_PROPERTY(DENSITE,c,t)
{
real RHO_F,PHI,RHO_P,RHO_NANO;
PHI=0.02;
RHO_F=998.2;
RHO_P=3970;
RHO_NANO=(1.0-PHI)*RHO_F+PHI*RHO_P;
return RHO_NANO;
}
/*VISCOSITE DYNAMIQUE*/
DEFINE_DIFFUSIVITY(VISCO_NANO,c,t,i)
{
real MU_NANO,MU_FLUID,PHI;
PHI=0.02;
MU_FLUID=0.001003;
MU_NANO=MU_FLUID*(123*pow(PHI,2.0)+7.3*PHI+1.0);
return MU_NANO;
}
```

Exemple de l'UDF injectée dans le cas où le fluide de base est l'eau avec une fraction de 2% de nanoparticule d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

```
#include "udf.h"
/*CONDUCTIVITE THERMIQUE K*/
DEFINE_DIFFUSIVITY(COND_NANO,c,t,i)
{
real PHI,K_FLUIDE,K_NANO;
PHI=0.02;
K_FLUIDE=0.252;
K_NANO=(28.905*pow(PHI,2.0)+2.8273*PHI+1.0)*K_FLUIDE;
return K_NANO;
}
/*DESITE MASSE VOLUMIQUE*/
DEFINE_PROPERTY(DENSITE,c,t)
{
real RHO_F,PHI,RHO_P,RHO_NANO;
PHI=0.02;
RHO_F=1111.4;
RHO_P=3970;
RHO_NANO=(1.0-PHI)*RHO_F+PHI*RHO_P;
return RHO_NANO;
}
/*VISCOSITE DYNAMIQUE*/
DEFINE_DIFFUSIVITY(VISCO_NANO,c,t,i)
{
real MU_NANO,MU_FLUID,PHI;
PHI=0.02;
MU_FLUID=0.0157;
MU_NANO=MU_FLUID*(306*pow(PHI,2.0)-0.19*PHI+1.0);
return MU_NANO;
}
```

Exemple de l'UDF injectée dans le cas où le fluide de base est l'E.G avec une fraction de 2% de nanoparticule d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Et pour l'interprétation de l'UDF nous procédons dans l'ordre des fonctions qui suivent:  
**Define**→**User-defined**→**functions**→**interpreted...**

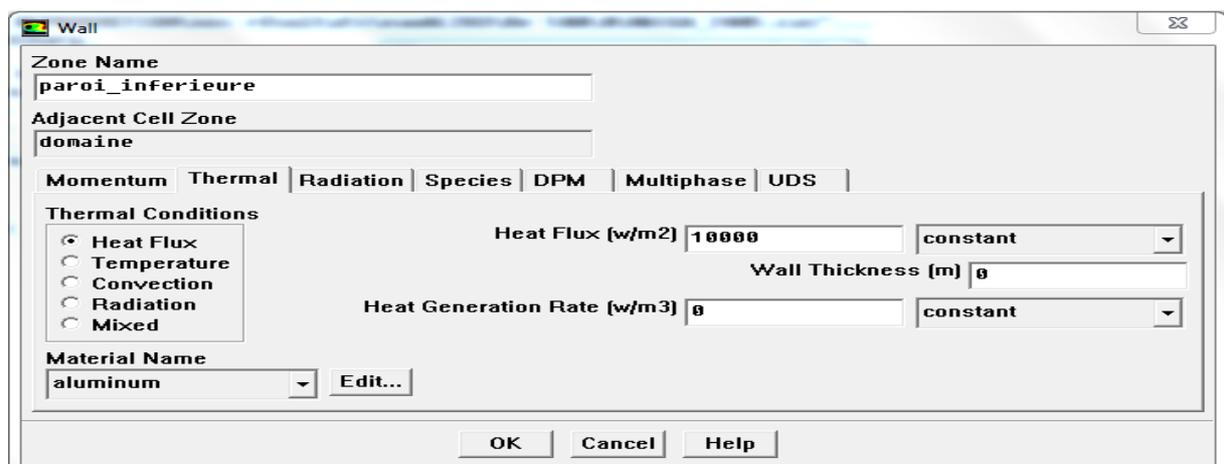


**Figure (III.31)** : Interprétation de l'UDF

Remarque : Concernant la définition des caractéristiques des nanofluides, pour la densité, la conductivité et la viscosité, nous remplacerons les constantes relatives à ces derniers, définis dans la bibliothèque des données de Fluent par : **Edit** →**user-defined functions**. Mise à part, Cp restera telle qu'elle est dans cette bibliothèque des données.

#### III.5.4.9. Mise en place des conditions aux limites usuelles

Dans notre cas nous avons imposé une densité de flux de chaleur de  $10000 \text{ w/m}^2$  sur la paroi inférieure. La procédure à suivre : **Define**→**Boundary Conditions**



**Figure (III.32)**: Valeurs des conditions aux limites pour la paroi inférieure

### III.5.4.10. Mise en valeur de la vitesse à l'entrée de la conduite (géométrie considérée)

Utilisée pour les écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue. Dans notre cas  $V_e = -0.01537345$  m/s, le signe moins relève du fait que l'écoulement est radial et que le repaire des coordonnées de la géométrie en 2D soit dans le sens opposé de l'écoulement des fluides considérés.

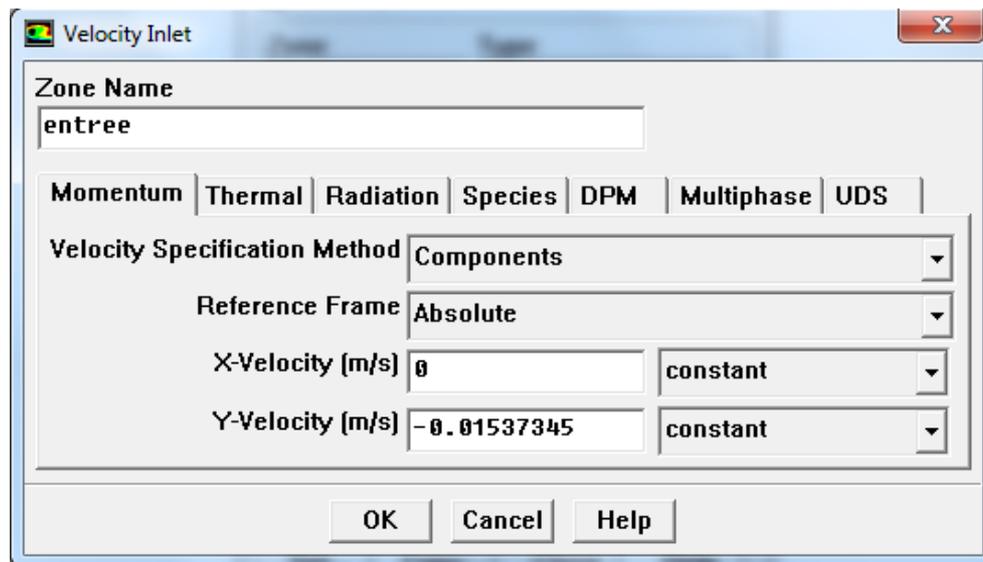


Figure (III.33) : vitesse à l'entrée

### III.5.4.11. Choix des critères de convergence.

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêteront, c'est  $10^{-15}$  pour tout les résidus dans notre cas . Les étapes à suivre sont : **Solve**→**Monitors**→**Residual...**

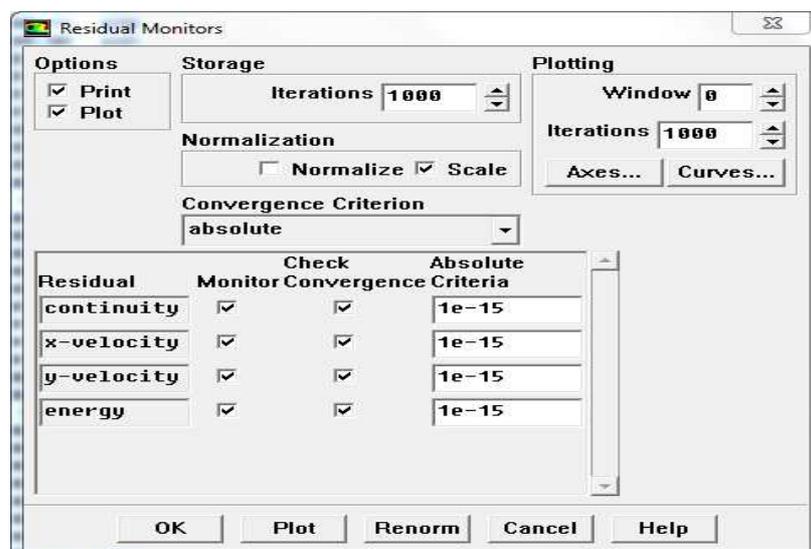
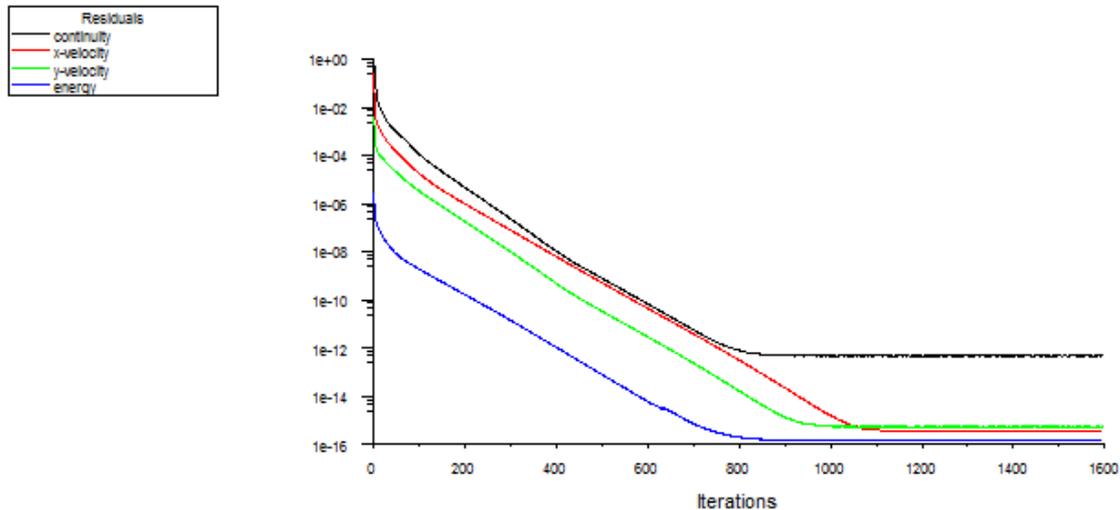


Figure (III.34) : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence

Après avoir fixé les conditions de flux et de pression respectivement **out flux et pressur outlet**. Nous initialisons les données et il nous reste qu'à lancer les itérations comme suit **Solve → initialize → iterate**.



**Figure (III.35) :** Allures de l'évolution des résidus de calcul

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables ; pression, vitesse, température... du problème entre la présente itération et l'itération précédente. Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans FLUENT est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent  $10^{-3}$ . Dans notre cas c'est  $10^{-15}$  et dans l'exemple précédent (figure III.35) on voit bien que la solution converge à cette valeur.

#### III.5.4.12. Sauvegarde du fichier .CAS&.DAT

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

#### III.5.4.13. Traitement graphique des résultats.

Une fois la simulation achevée, après avoir atteint la convergence il nous reste qu'à extraire les différents résultats sous forme de courbes à partir des outils graphiques disponibles dans FLUENT qui nous permettent de traiter l'information contenue dans notre

solution CFD et de visionner facilement nos résultats. Les fonctions que nous avons utilisées pour cette fin sont : **Display** et **Plot**.

Au cours de ce chapitre on a interprété la présentation du logiciel Gambit ainsi que, celle du code de calcul (Fluent) que nous avons utilisé pour la résolution numérique du problème. La procédure de résolution est aussi présentée. Et les résultats que nous avons obtenus ainsi que leur traitement feront l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre IV:

## Résultats et discussions

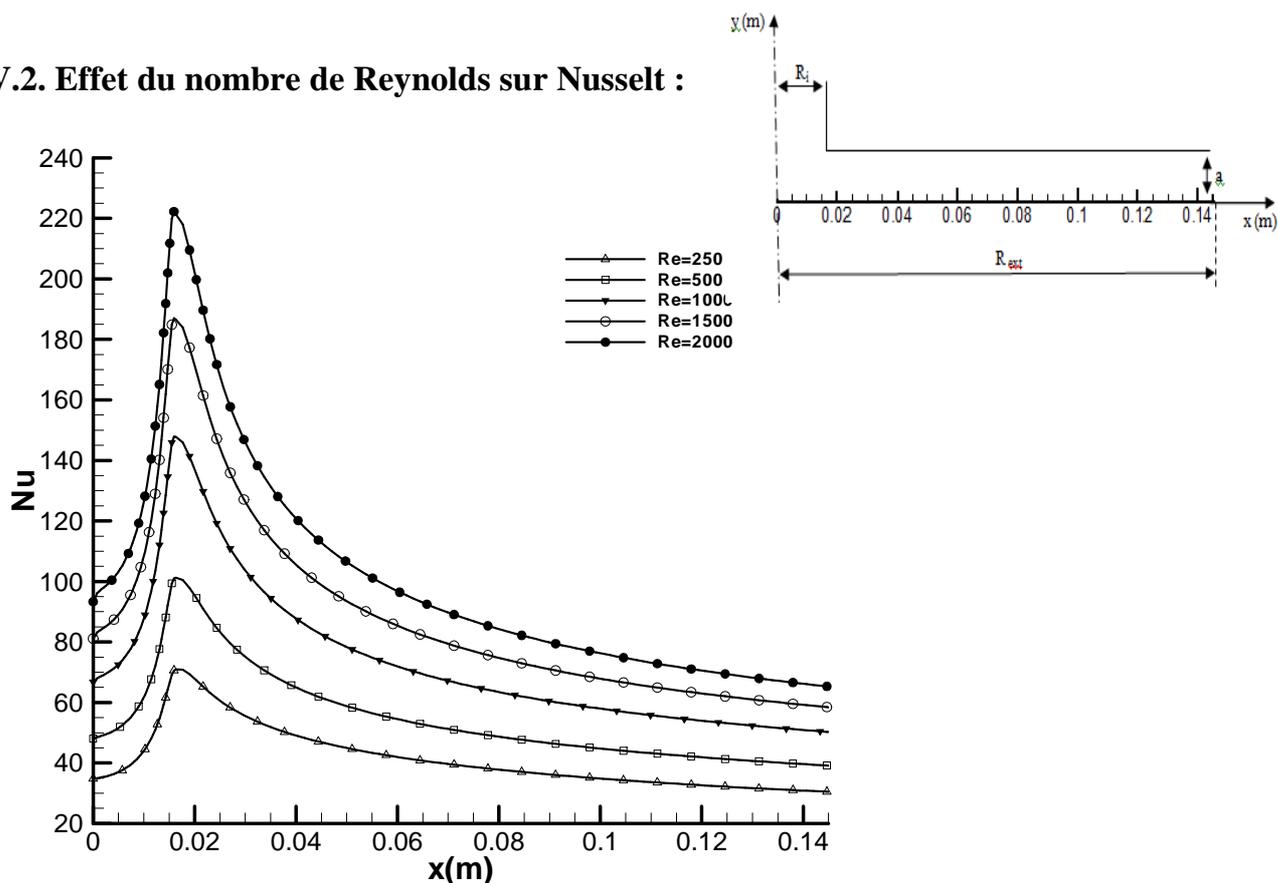
## IV. Analyses et discussions

### IV.1. Introduction :

Après avoir bien posé le problème sous "Fluent", comme expliqué au chapitre précédent, on procèdera maintenant à l'analyse des résultats des simulations qui ont été réalisées en considérant le flux de chaleur constant sur la paroi inférieure (le disque) ainsi que la température d'entrée du fluide ( $T=293.2K^\circ$ ) pour toute les simulations.

Pour exploiter ces résultats, on tire les courbes tracées par Fluent après chaque simulation et pour plus de clarté nous avons présenté l'évolution du nombre de Nusselt et la température sur le disque (paroi inférieure) à différents nombre de Reynolds et différentes concentrations des nanoparticules dans le fluide de base qui est l'eau premièrement et l'éthylène glycol par la suite puis une comparaison entre ces deux nanofluides.

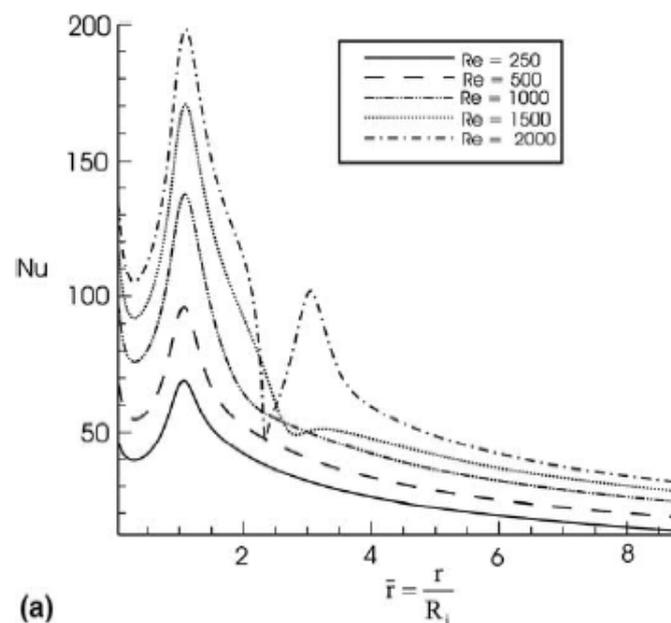
### IV.2. Effet du nombre de Reynolds sur Nusselt :



**Figure (IV.1) :** Variation du nombre de Nusselt le long de la paroi inferieure à différents nombre de Reynolds

Cette figure (IV.1) représente la variation de nombre de Nusselt local le long de la paroi inférieure à différentes valeurs du nombre de Reynolds pour une fraction volumique égale à zéro. Nous constatons la même allure des courbes quelque soit le nombre de Reynolds. Le nombre de Nusselt, sur chaque courbe, augmente à partir de sa valeur au point d'arrêt ( $x=0$ ) jusqu'à une valeur maximale qui correspond à ( $x=R_i$ ) ce qui peut être expliqué physiquement par le fait de l'intensité des transferts convectifs dans cette zone ( $0 < x < R_i$ ). Entre les deux disques, le nombre de Nusselt diminue progressivement à partir de sa valeur maximale ce qui est dû essentiellement à l'importance des transferts conductifs dans cet espace confiné. On peut remarquer clairement aussi que les nombres de Nusselt les plus importants correspondent au Re le plus grand.

Par ailleurs, ces résultats ont été comparés avec ceux trouvés numériquement par Maïga et al 2005 (Figure IV.2) [16], sous les mêmes conditions, où une concordance incontestable est aperçue entre les deux. Il est à signaler qu'une différence est aperçue entre les deux courbes correspondantes à Reynolds égale à 2000, ceci peut être le fait du régime laminaire qui a été toujours maintenu dans notre étude.



**Figure (IV.2) :** Effet du nombre de Reynolds sur Nusselt (Résultats de Maïga et al) [16].

### IV.3. Résultats sous forme de courbes pour l'évolution du nombre de Nusselt le long de la paroi inférieure lors de simulation de la convection forcée avec l'eau en écoulement.

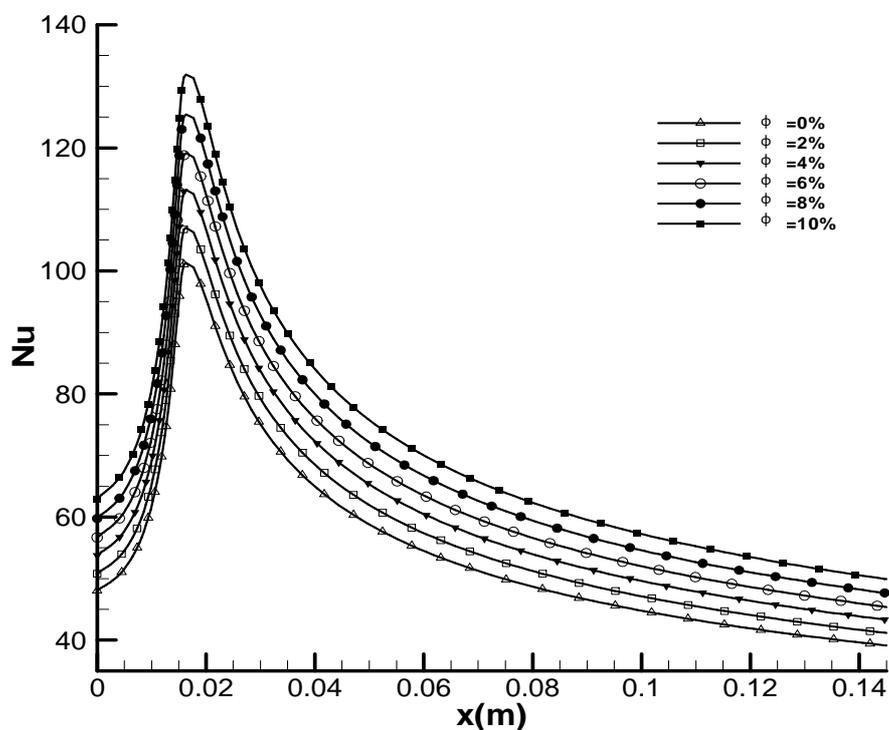


Figure (IV.3) : Evolution du nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x (paroi inférieure) à  $Re=500$

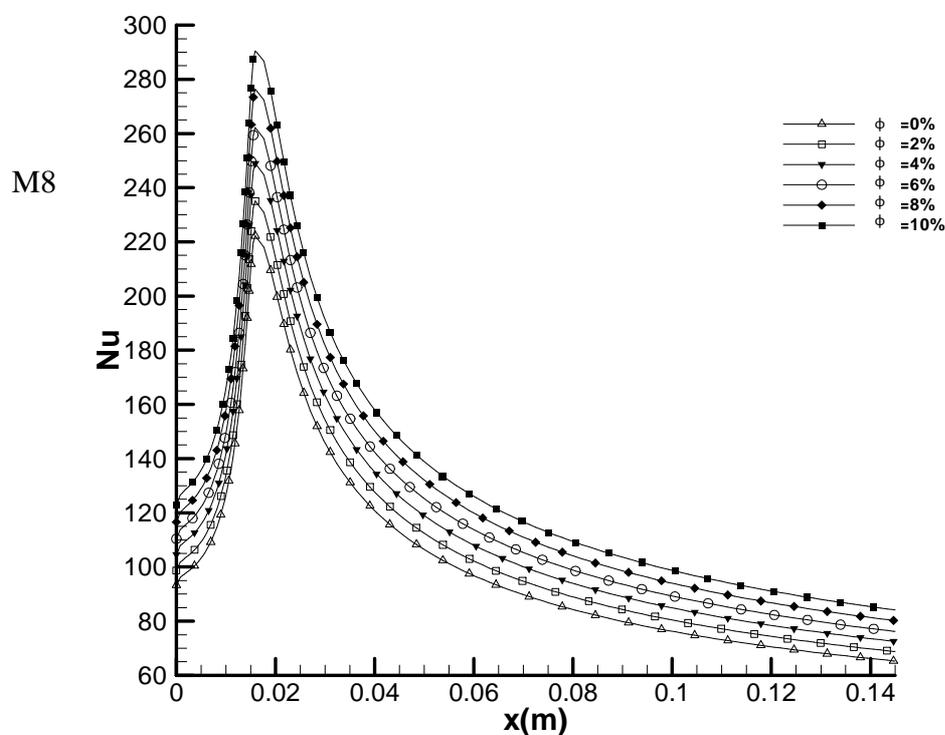
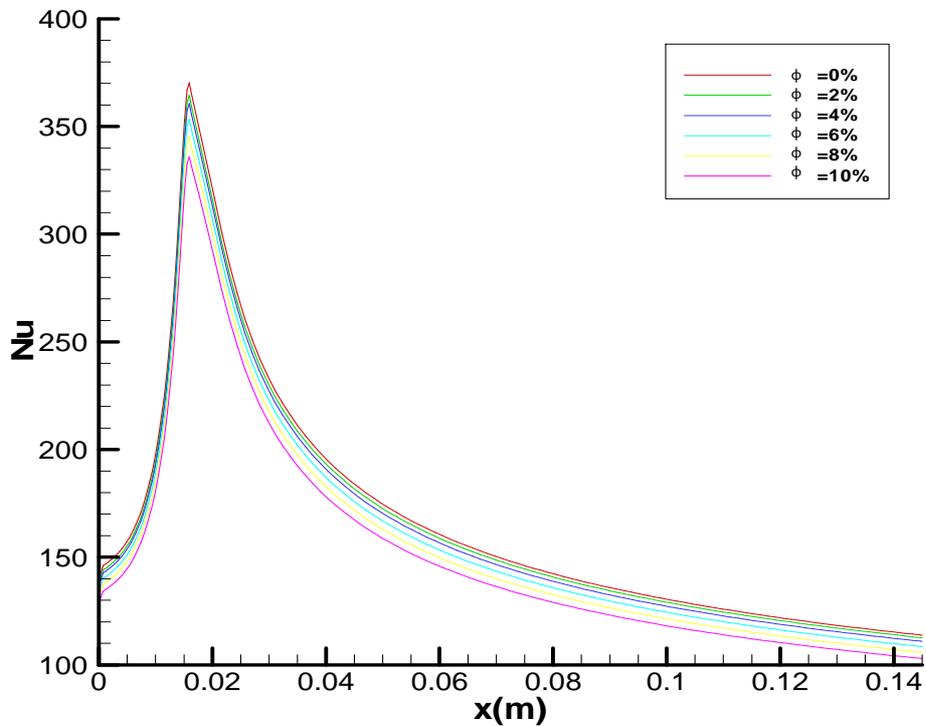
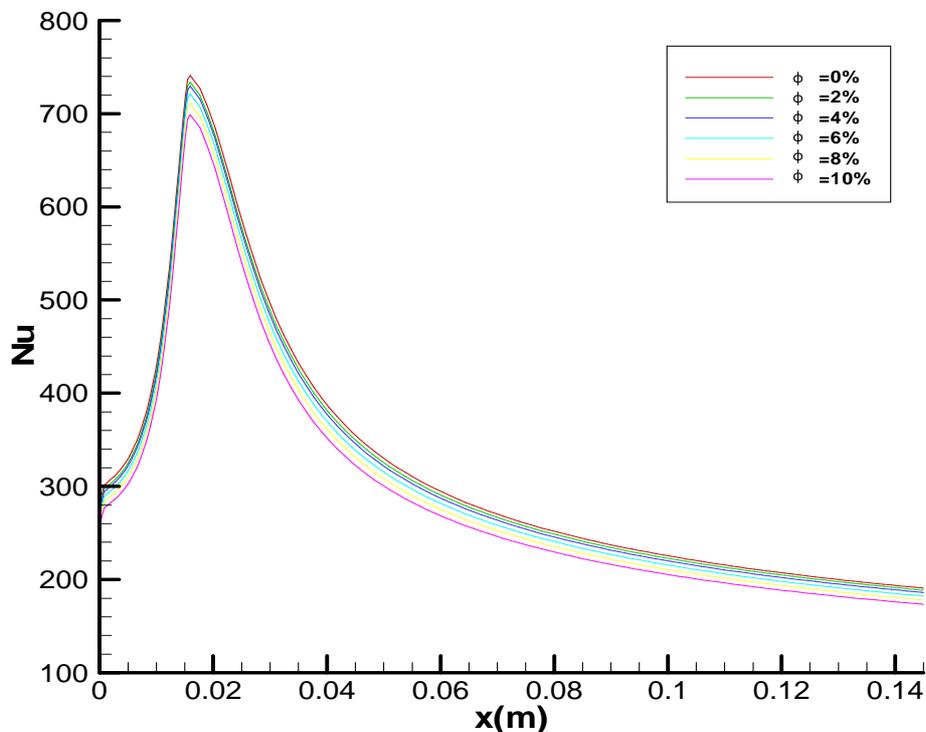


Figure (IV.4) : Evolution du nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x (paroi inférieure) à  $Re=2000$

**IV.4. Résultats sous forme de courbes de l'évolution du nombre de Nusselt le long de la paroi inferieure lors de simulation de la convection forcée avec l'Ethylène Glycol en écoulement.**



**Figure (IV.5) :** Evolution du nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x à Re=500 (cas de E.G)



**Figure (IV.6) :** Evolution du nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x (paroi inferieure) à Re=2000 (cas de l'E.G)

### IV.5. Analyses et discussions des figures (IV.3, IV.4, IV.5 et IV.6) :

La figure (IV.3) interprète en courbes l'évolution du nombre de Nusselt local le long de la paroi inférieure, pour différentes fractions volumiques des nanoparticules dans l'eau, avec un nombre de Reynolds égale à 500.

Nous remarquons que les courbes présentées sur la figure (IV.3) ont la même allure, superposées dans l'ordre de décroissance de la concentration volumique des nanoparticules dans ce fluide où nous constatons que le nanofluide portant la plus grande concentration présente la plus grande valeur du nombre de Nusselt c.à.d. le meilleur transfert thermique.

L'allure de ces courbes se présente comme suit :

-Ascendante de  $x=0$  jusqu'à atteindre sa valeur maximale à  $x=R_i$  causée par l'importance du transfert convectif dans cette zone, qui est due à la stagnation du fluide dans cette dernière (zone), ce qui a engendré une augmentation sensible du nombre de Nusselt

-Descendante de  $x=R_i$  jusqu'à atteindre sa valeur minimale à  $x=R_e$  qu'est le produit de la domination du transfert conductif dans cet espace confiné, ce qui explique la réduction du nombre de Nusselt.

-Nous observons aussi un pic de l'allure au niveau de  $x=R_i$  provenant essentiellement des modifications du champ de l'écoulement.

Par ailleurs, la superposition des courbes est issue de la variation de la concentration des nanoparticules dans le nanofluide comme suit :

Lorsque la fraction volumique de nanofluide égale à zéro, c.à.d. le fluide en écoulement est l'eau, dans ce cas, la valeur du nombre de Nusselt est relativement petite, l'ajout des nanoparticules et l'augmentation de la fraction volumique induisent l'augmentation du nombre de Nusselt ce qui implique une amélioration de la conductivité thermique du nanofluide. Donc l'augmentation du nombre de Nusselt est due essentiellement à l'amélioration de la conductivité thermique effective du nanofluide.

Cependant, nous constatons que les courbes sur les figures (IV.4, IV.5 et IV.6), ont la même allure que la figure en question (fig.IV.3), ce qui est le résultat des mêmes phénomènes et conditions aux limites régissant l'écoulement entre les deux disques, mais à différents nanofluides et nombres de Reynolds.

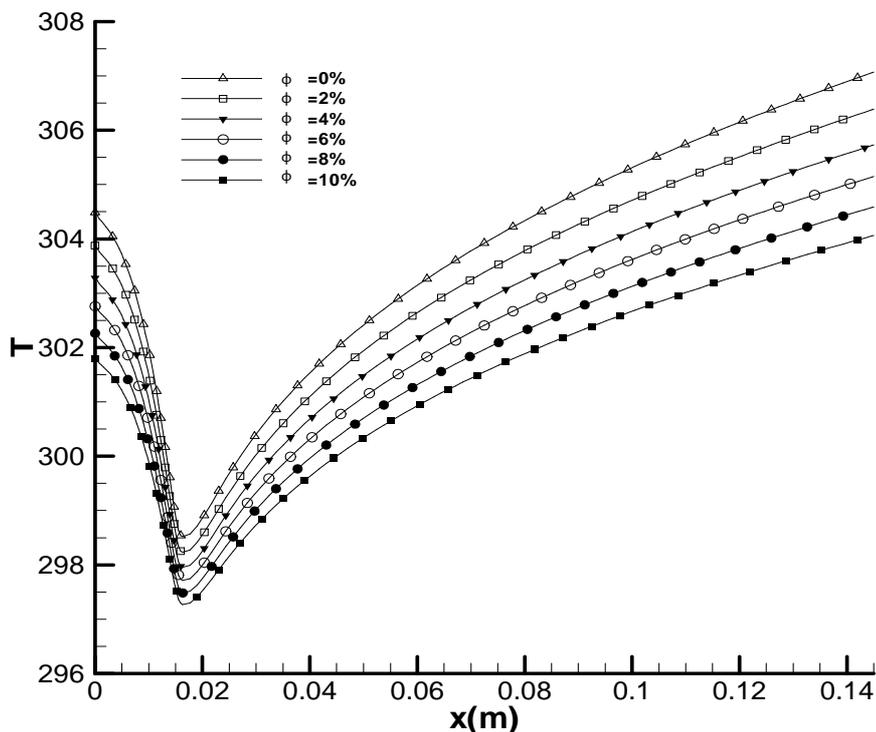
L'examen des quatre figures (IV.3, 4,5 et 6) nous mène à relever deux cas de comparaison:

-Dans le premier cas, nous remarquons que pour le nanofluide à base d'eau, les valeurs respectivement dans l'ordre : minimales, maximales, du nombre de Nusselt à  $Re=500$  (figure IV.3) sont clairement inférieures aux valeurs correspondantes (min, max) dans le cas où  $Re=2000$  (figure IV.4) et il est de même lorsque le nanofluide est à base d'éthylène glycol (comparaison des figures :IV.5 et IV.6), ce qui implique que la variation du nombre de Reynolds influence sur la valeur du nombre de Nusselt, autrement dit : le transfert thermique en convection forcée dépend du nombre de Reynolds.

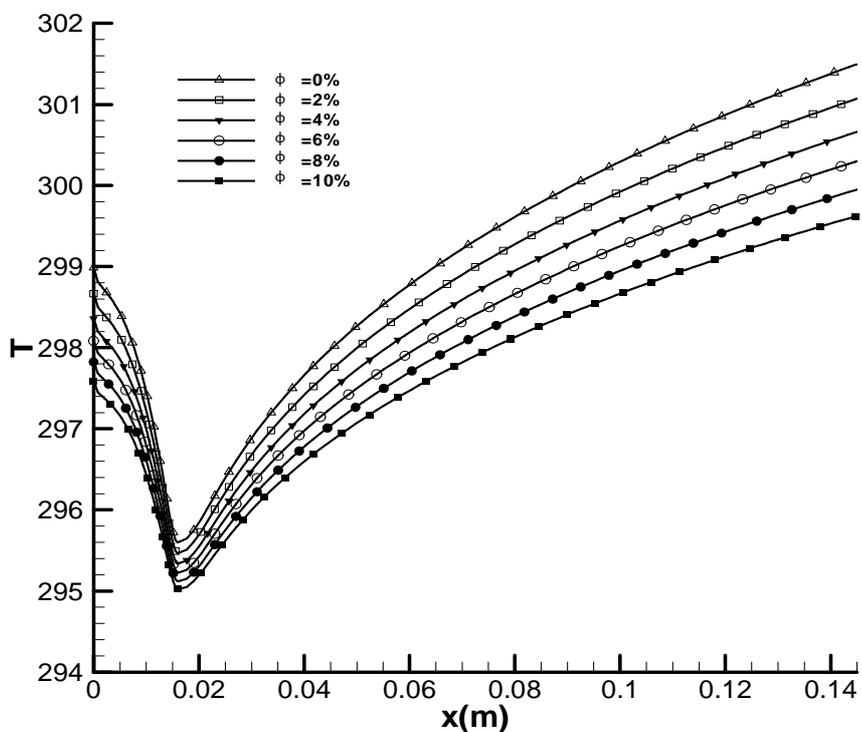
-Deuxième cas : nous relevons que le nanofluide à base l'éthylène glycol présente un refroidissement plus important que celui du nanofluide à base d'eau. Ce refroidissement est caractérisée par la supériorité des valeurs du nombre de Nusselt à différentes fractions volumiques représentées dans la figure (IV.5) comparées (comparaison terme à terme) aux valeurs y correspondantes sur la figure (IV.3). Ce qui signifie que le transfert thermique en convection forcée dépend aussi du fluide de base du nanofluide utilisé.

Notons aussi que, pour le cas du nanofluide à base d'éthylène glycol, l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules dans le nanofluide (figures IV.5 et IV.6), n'influence pas sur l'amélioration du nombre de Nusselt.

**IV.6. Résultats sous forme de courbes de l'évolution de la température le long de la paroi inférieure lors de simulation de la convection avec l'eau en écoulement**

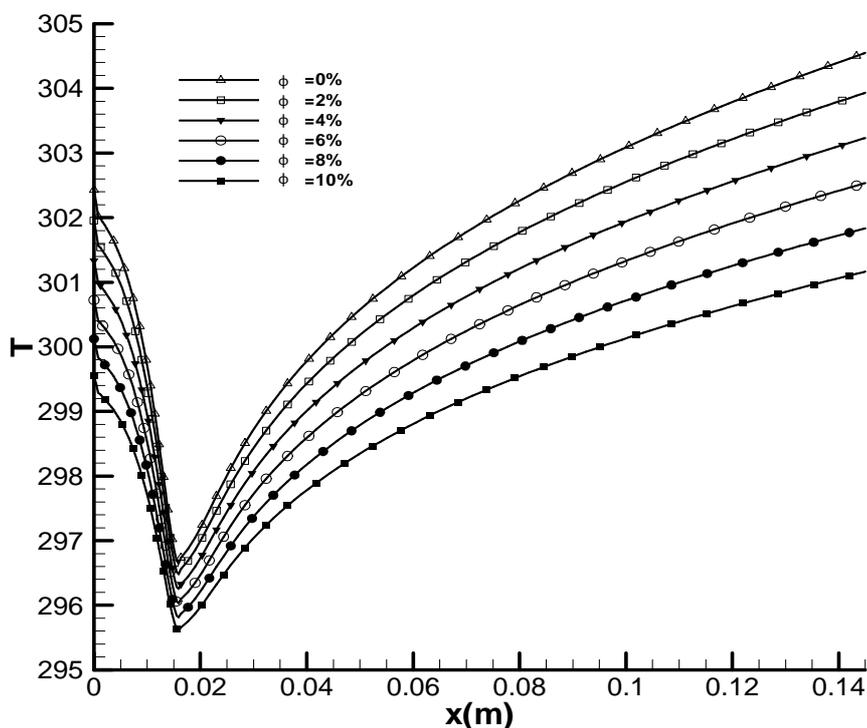


**Figure (IV.7) :** Evolution de la température en fonction de l'abscisse  $x$  (paroi inférieure) à  $Re=500$

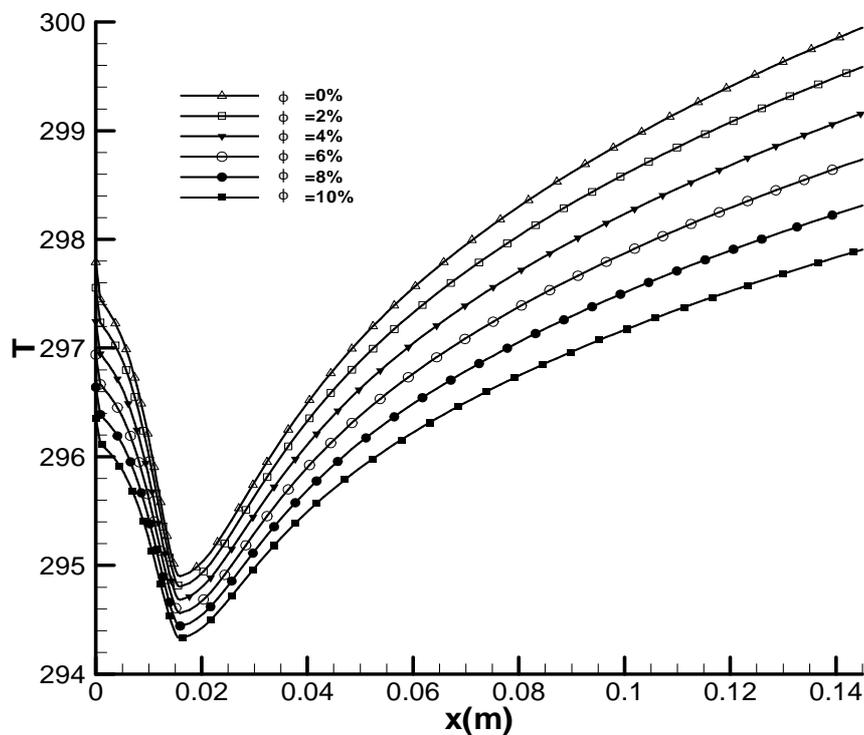


**Figure (IV.8) :** Evolution de la température en fonction de l'abscisse  $x$  (paroi inférieure) à  $Re=2000$

**IV.7. Résultats en courbes de l'évolution de la température le long de la paroi inférieure lors de simulation de la convection forcée avec l'Ethylène Glycol en écoulement.**



**Figure (IV.9) :** Evolution de la température en fonction de l'abscisse  $x$  à  $Re=500$  (cas de l'E.G).



**Figure (IV.10) :** Evolution de la température en fonction de l'abscisse  $x$  (paroi inférieure) à  $Re=2000$  (cas de l'E.G)

### IV.8. Analyses et discussions des figures (IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10) :

La figure en titre (IV.7) représente l'évolution de la température le long de la paroi inférieure en fonction de l'abscisse  $x$ , pour un nombre de Reynolds de l'ordre de 500, et une fraction volumique de nanoparticule d' $AL_2O_3$  allant de zéro jusqu'à 10% avec un pas de 2%.

Nous constatons une allure similaire dans toutes les courbes de cette figure qui se présente comme suit :

- Une diminution dans la conduite d'aménagé (de  $x=0$  à  $x=R_i$ ) qui est due à l'intensification du transfert convectif dans cette zone, interprétée par l'augmentation du nombre de Nusselt sur la figure (IV.3).
- Une augmentation progressive entre les deux disques (de  $R_i$  jusqu'à  $R_e$ ), qui peut être expliquée par la croissance des transferts conductifs dans cette aire confinée, notée par la diminution du nombre de Nusselt sur la figure (IV.3).
- Aussi, nous remarquons un pic de l'allure à  $x=R_i$  dont nous relevons les températures les plus basses atteintes lors du refroidissement dans ce cas de simulation, ces derniers sont dus à l'accélération du fluide dans cette zone et nous pouvons marquer cette espace comme zone de transition pour le transfert de chaleur convectif et conductif.

Cependant, la superposition des courbes est due à l'effet de la concentration des nanoparticules, où nous relevons que le nanofluide ayant la grande fraction volumique présente un meilleur refroidissement.

D'autre part, ressort que les courbes sur les figures (IV.8, IV.9 et IV.10) ont la même allure que celles contenues dans la figure (IV.7).

Il est à souligner que dans la figure(IV.7), la température du fluide de base ( $\phi =0$ ) au contacte immédiat avec la paroi inférieure ( $x=0$ ) est  $T=304.5K$  et qu'elle atteint sa valeur minimale ( $T=298.5K$ ) à  $x=R_i$  et une température  $T=307K$  à la sortie de la conduite ( $x=0.15m$ ). Cependant l'ajout des nanoparticules d' $AL_2O_3$  à différentes fractions pour ce fluide c'est-à-dire l'introduction des nanofluides engendre une diminution importante de la température de cette paroi, voir qu'avec une fraction de 10%, la température avoisine les  $302K$  à  $x=0$ ,  $297.5K$  à  $x=R_i$  et  $304K$  à  $x=R_e$ .

Dans le cas d'écoulement du nanofluide à base d'Ethylène Glycol avec  $Re=500$  (figure IV.9), nous avons pour ( $\phi =0$ ) des valeurs de température qui approchent les : 302K à  $x=0$ , 296.5K à  $x=R_i$  et 304.5K à  $x=R_e$ . Par ailleurs l'injection des nanoparticules à différentes fractions volumiques dans ce fluide baisse significativement la température de la paroi, exemple : avec  $\phi =10\%$  nous avons obtenu : à  $x=0 \rightarrow T=299.6K$ , à  $x=R_i \rightarrow T=295.5K$  et à  $x=R_e \rightarrow T=301K$ .

La comparaison entre les valeurs des températures sur les courbes des figures (IV.7 et IV.9) obtenues par la simulation avec les deux nanofluides, nous révèle que :

L'utilisation des nanofluides augmente significativement le refroidissement et que le nanofluide à base de l'Ethylène Glycol présente un meilleur refroidissement que celui à base d'eau, constaté du fait que les valeurs des températures de la paroi inférieure obtenues avec le nanofluide à base d'Ethylène Glycol sont nettement inférieures à ceux eu avec le nanofluide à base d'eau dans les mêmes conditions aux limites.

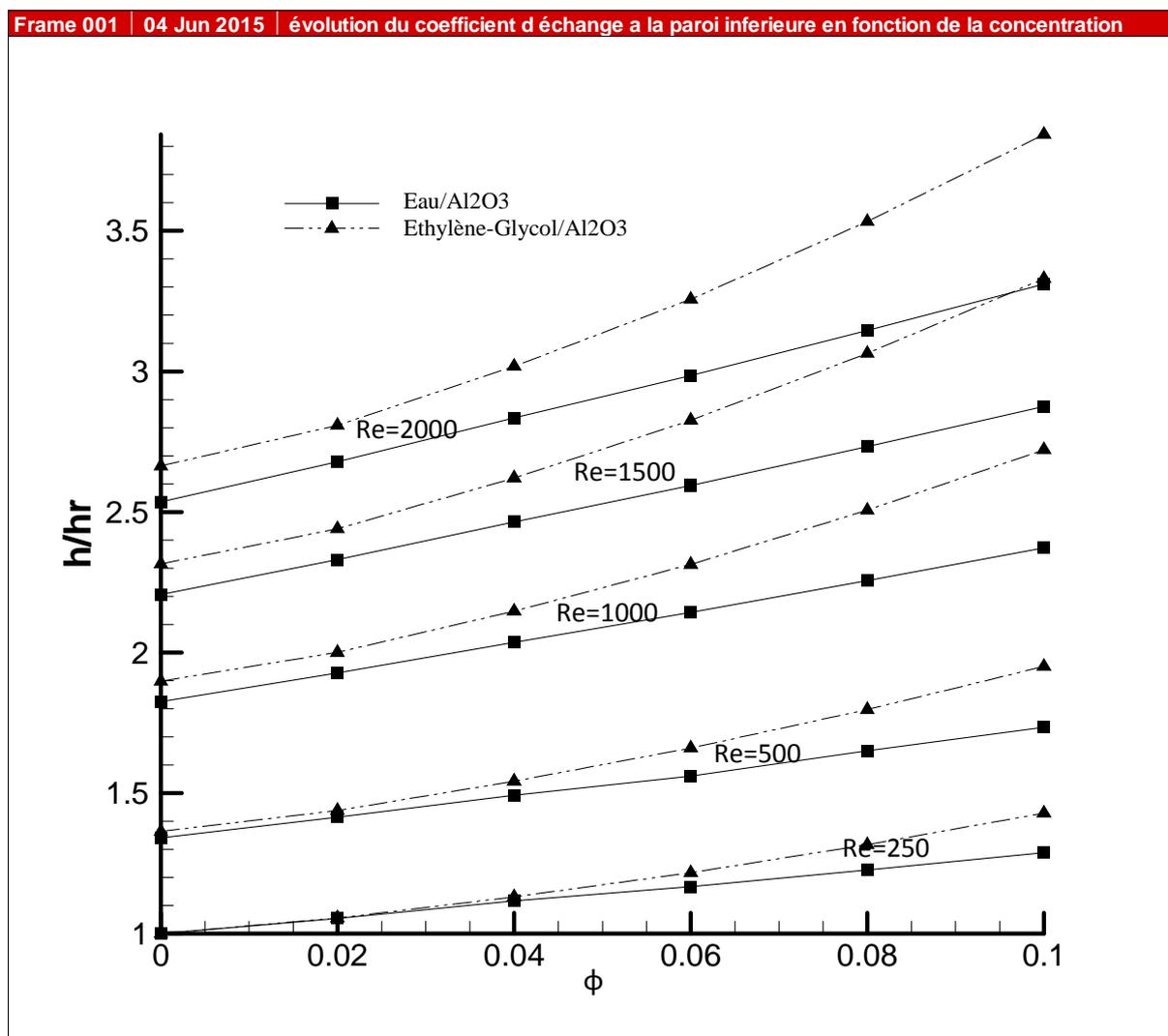
Et de même pour la comparaison entre les courbes présentées sur les figures (IV.8, IV.10), mais avec des températures plus basses que ceux citées avant dans les mêmes points de la paroi inférieure ( $x=0$ ,  $x=R_i$  et  $x=R_e$ ).

En outre, nous remarquons que les valeurs des températures portées sur la figure (IV.8) dans ces points de la paroi sont clairement inférieures à celles obtenues en figure (IV.7) dans les mêmes conditions aux limites, excepté le nombre de Reynolds qu'est égale à  $Re=2000$ .

Notons aussi que la température minimale ( $T=295K$ ) dans ce cas de figure (IV.8) est obtenue avec le nanofluide ayant la plus grande fraction volumique  $\phi =10\%$  et de même pour le cas de la comparaison des figures (IV.9, IV.10) où nous enregistrons la valeur minimale de la température de la paroi inférieure dans notre simulation obtenue avec le nanofluide à base d' l'Ethylène Glycol à  $Re=2000$  qui est  $T_{min}=294.3K$ .

Compte tenu de des résultats précédents, il nous est permis de conclure que le transfert de chaleur par convection forcée dépend du nombre de Nusselt et de la nature du nanofluide en écoulement.

## IV.9. Récapitulation des courbes



**Figure (IV.11) :** Figure récapitulative des différents rapports ( $h/hr$ ) en fonction des concentrations et nombres de Reynolds (de toutes les simulations).

La figure (IV.11) représente la variation du rapport  $h/hr$  (rapport du coefficient de transfert convectif des deux nanofluides (Eau/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et E.G/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sur les coefficients du transfert convectif de référence correspondant), en fonction de la fraction volumique des nanoparticules d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à différents nombre de Reynolds.

L'analyse de cette figure nous révèle que :

-Les courbes présentées suivent deux allures distinctes en fonction du nanofluide qu'elles représentent (Eau/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et E.G/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de plus elles sont croissantes dans l'ordre de l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

-L'allure des courbes représentatives du nanofluide E.G/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, est supérieure à celle qui représente Eau/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à différents nombres de Reynolds.

-Les courbes sont superposées dans l'ordre de l'augmentation de la valeur du nombre de Reynolds.

-Les courbes des deux nanofluides se confondent entre 0 et 2% de fraction volumique en abscisse dans le cas d'écoulement à Re=250.

L'analyse de ces observations nous donne :

-La croissance de l'allure des courbes est due à l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans ces nanofluides, ces dernières présentent une conductivité thermique effective plus élevée que celle de l'eau et l'éthylène glycol, ce qui induit une augmentation de la conductivité thermique effective de ces nanofluides qui génère l'augmentation du coefficient d'échange (h) et par conséquent le rapport (h/hr).

-La supériorité numérique de l'allure des courbes représentant l' (Ethylène Glycol/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) par rapport a celles qui représentent l'Eau/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est due au fait que la capacité calorifique de l'E.G est inférieure à celle de l'eau, ce qui le rend plus conducteur à la chaleur que l'eau, d'où l'augmentation du coefficient de transfert convectif dans ce fluide (E.G) ce qui implique l'augmentation de son rapport (h/hr) est de même lors de l'augmentation de la fraction volumique dans ces deux fluides (eau, E.G).

-La superposition des différentes courbes en fonction du nombre de Reynolds est due à l'augmentation proportionnelle de la vitesse d'écoulement des nanofluides entre les deux disques avec celle du nombre de Reynolds. Ce qui accélère l'évacuation de la chaleur entre ces derniers et le tout implique l'augmentation du transfert de chaleur, ainsi que celle de coefficient d'échange convectif et de rapport (h/hr). Ce qui résulte que l'efficacité d'un nanofluide dépend de la vitesse d'écoulement de ce dernier.

-L'égalité des allures des courbes qui représentent les deux nanofluides entre 0% et 2% en abscisse prouve que la faible concentration des nanoparticules n'influence pas trop sur le transfert thermique. Par contre le point de croisement des courbes nous montre que l'efficacité d'un nanofluide dépend aussi du fluide de base utilisé, voir un rapport max de 3.3 pour (eau/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) à  $\text{Re}=2000$  avec  $\phi=10\%$ , égalisé à  $\text{Re}=1500$  par le nanofluide (E.G/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) avec la même fraction, ces rapports correspondent à 2.52 pour l'eau pure ( $\phi=0\%$ ) et 2.65 pour l'éthylène glycol pure ( $\phi=0\%$ ).

Compte tenu des résultats précédents nous pouvons dire que l'utilisation des nanofluides en convection forcé améliore significativement le transfert de chaleur et que l'efficacité d'un nanofluide dépend du liquide de base et la fraction volumique.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'amélioration du transfert de chaleur par l'utilisation des nanofluides. Dans ce cadre, nous avons étudié numériquement la convection forcée entre deux disques, sans et en présence des nanofluides. L'influence de certains paramètres tels que la fraction volumique, le fluide de base et le nombre de Reynolds sur le transfert de chaleur a été analysé. Les résultats obtenus ont été validés par ceux disponibles dans la littérature (Maïga et Al).

A travers les résultats que nous avons obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- l'ajout des nanoparticules aux fluides de base (Eau- Ethylène Glycol), avec des proportions adéquates (ne dépassant pas 10%) pour éviter l'agrégation, améliore significativement le transfert de chaleur.
- l'augmentation du transfert de chaleur en convection forcée est proportionnelle à l'augmentation du nombre de Reynolds et la fraction volumique des nanoparticules présentes dans les nanofluides.
- Le nanofluide à base d'Ethylène Glycol (E.G) présente une meilleure performance en comparaison avec de l'eau.

En outre, dans ce travail le nanofluide a été assimilé à un milieu homogène qui se comporte comme un fluide Newtonien ce qui nous a permis d'utiliser les équations de Navier-Stokes. Or cette approche mérite d'être confrontée à celle qui traite le nanofluide en tant que mélange hétérogène dans lequel les nanoparticules présentent des sources de masse de chaleur et de quantité de mouvement.

# Bibliographie

## Bibliographie

- [1] Fourier, J. Théorie Analytique de la Chaleur. Paris: Chez Firmin Didot. (1822).
- [2] Julien Chevalier, Etude de la rhéologie des nanofluides soumis à de très fort taut de cisaillement à l'aide de microsysteme fluide. Physique ; Université Joseph Fourier I, France 2008.
- [3] Dr.Nebali.A. Cours TDM. Département de Genie mécanique (UMMTO), 2013.
- [4] Sarit K .Das, Stephen U.S. Choi, Wenhua Yu. Nanofluids Science and Technology. WILEY 2007.
- [5] E.E. (Stathis) Michaelides, Nanofluidics: Thermodynamic and Transport Properties, Springer International Publishing Switzerland. 2014.
- [6]Stéphane FOHANNO, Guillaume POLIDORI, Catalin POPA. Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle (journée thématique : SFT-Paris 2012). Université de Reims Champagne-Ardenne, France 2012.
- [7] Mouassi Ammar. Intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nanofluides.. Hydrocarbure et Chimie. Université M'hamed Bougara (Boumerdes) 2012.
- [8] Amin Behzadmehr, Hassan Azarkish An .Introduction to the NanoFluid: universty of Sistan and Baluchestan, 2000.
- [9] Tsai C.Y,H.T, P.P Ding, B Chan, T.Y, P.H, Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, Material Letters 58(2004) 1461-1465.
- [10] Ma H.B, C Wilson, B Borgmeyer, K Park, Q Yu, S.U.S Choi , M Tirumala, Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe, Applied Physics Letters 88 (14) (2006) 143116.
- [11] Tzeng S.C, C.W Lin and K.D Huang, Heat Transfer enhancement of nanofluids in rotary blade coupling fo Four-Wheel-Drive Vehicles. Ac ta Mechanic a 179(2005): 11-23.
- [12] Zhang Z and Q Que , Synthesis, Structure and Lubricating Properties of Dialkydithiophosphate-Modified Mo-S Compound Nanoclusters,Wear 209(1997):8-12.
- [13] 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.
- [14] Vassallo P,R Kumar and S D'Amico,Pool Boiling Heat Transfer Experiments in Silica-Water Nano-fluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 47(2004) : 407-411.
- [15]Jordan A ,A Scholz,P Wust,H FaMng and R Felix, Magnetic Fluid Hypothermia (MFH) :Cancer Treatment with AC Magnetic Field Induced Excitation of Biocompatible Superparamagnetic Nanoparticles. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 201(1999):413-419.
- [16].S .E.B. Maïga et al. / Int .J Heat and Fluid Flow 26 (2005) 530-546.
- [17]Tutorial Gambit(Chap03). Laboratoire inter établissements TREFLE UMR CNRS 85 05 Janvier(2009).