

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
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 de MASTER Académique en  
génie mécanique**

**Spécialité : ENERGETIQUE**

### **Thème**

**SIMULATION NUMERIQUE DE LA  
CONVECTION NATURELLE DANS DES  
CAVITES EN PRESENCE D'UN NANOFILUIDE**

**Proposé et dirigé par :**

**Encadreur Mr. SALHI.F**

**Co-Encadreur Mr. Ait HAMADOUCHE.M.A**

**Présenté par :**

**ABBAD Ferhat**

**MANSEUR Aghilas**

**2018/2019**

# *Remerciements*

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

**N**ous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre encadreur Mr F. SALHI et Co-encadreur Mr M.A. AIT HAMADOUCHE pour l'intérêt porté à notre travail, leurs disponibilités, leurs conseils précieux et surtout leur grande patience.

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

**N**ous souhaitons témoigner toute notre reconnaissance aux enseignants ayant contribué et participé à notre formation.

**N**ous 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 frères et mes sœurs*

*À toute ma famille*

*À tous mes amis(es)*

*Ferhat*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire*

*À mes très chers parents*

*À mon frère et mes sœurs*

*À toute ma famille*

*À tous mes amis(es)*

*Aghilas*

## Liste des figures

| Numéro de la figure | Titre de figure   | Page |
|---------------------|---|------|
| I.1                 | Principe physique de la convection naturelle.                                   | 7    |
| I.2                 | Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre                      | 8    |
| II.1                | Cavité carrée   | 11   |
| II.2                | Cavité avec ondulation  | 11   |
| II.3                | Maillage unidimensionnel  | 18   |
| II.4                | Volume de contrôle bidimensionnel   | 19   |
| III.1               | Interface générale du logiciel Gambit   | 21   |
| III.2               | Panneau Global Control  | 22   |
| III.3               | Panneau d'opération ((a)création des points, (b) des segments).                 | 23   |
| III.4               | Panneau d'opération ((c) création des surfaces, (d) des volumes).               | 24   |
| III.5               | Panneau d'opération (construction, des groupes (e)).                            | 25   |
| III.6               | Panneau d'opération (construction, des groupes (e))                             | 25   |
| III.7               | Panneau d'opération (option de maillage)  | 26   |
| III.8               | Construction des maillages de type couche limites                               | 26   |
| III.9               | Construction des maillages des segments (g) et des surfaces (h) de la géométrie | 27   |
| III.10              | Construction des maillages des volumes (i) et des groupes (j) de la géométrie   | 28   |
| III.11              | Panel des outils de configuration.  | 28   |
| III.12              | Procédure de modélisation de la géométrie sous Gambit                           | 31   |
| III.13              | Exemple de la géométrie réalisé sur gambit                                      | 32   |
| III.14              | Position des points après recadrage de la zone graphique                        | 33   |
| III.15              | Visualiser des segments du domaine  | 34   |
| III.16              | Visualisation des faces du domaine.   | 34   |
| III.17              | Maillage des segments   | 35   |
| III.18              | Maillage de domaine   | 35   |
| III.19              | Définition de la condition aux limites  | 36   |
| III.20              | Définition de bloc  | 37   |
| III.21              | Exportation du maillage généré  | 38   |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| III.22 | Choix de la version de Fluent  | 40 |
| III.23 | Importation de la géométrie  | 41 |
| III.24 | Vérification de maillage sous Fluent   | 42 |
| III.25 | Vérification de l'échelle  | 42 |
| III.26 | choix de solveur   | 43 |
| III.27 | Etablir les équations de l'énergie   | 43 |
| III.28 | Choix de modèle d'écoulement   | 44 |
| III.29 | Définir les propriétés physiques des matériaux.  | 44 |
| III.30 | Choix de pression de référence   | 45 |
| III.31 | Nom de domaine de fluide   | 45 |
| III.32 | Valeurs des conditions aux limites (paroi inferieur)   | 46 |
| III.33 | Valeurs des conditions aux limites (paroi supérieure)  | 46 |
| III.34 | Valeur des conditions aux limites (paroi gauche)   | 47 |
| III.35 | Valeurs des conditions aux limites (paroi droite)  | 47 |
| III.36 | Initialisation de la solution  | 48 |
| III.37 | Choix de Résidu  | 48 |
| III.38 | Choix du nombre d'itérations   | 49 |
| III.39 | Allures de l'évolution des résidus de calcul   | 49 |
| IV.1   | Contour de température au sein d'une cavité carrée sans ondulation fermée et remplie d'eau à 0% concentration de nano particule                    | 51 |
| IV.2   | Contour de température au sein d'une cavité carrée sans ondulation fermée et remplie de nanofluide (eau + CuO) à une concentration de 8%           | 52 |
| IV.3   | L'Evolution de coefficient d'échange à la paroi inferieur en fonction de coefficient d'échange de référence ( $\lambda_r$ )                        |    |
| IV.4   | Contour de température au sein d'une cavité avec ondulation fermée et remplie de l'eau à 0% concentration de nano particule                        | 53 |
| IV.5   | Contour de température au sein d'une cavité avec ondulation fermée et remplie de nanofluide (eau + CuO) à une concentration de 8% de nanoparticule | 53 |
| IV.6   | Ligne de courant au sein de cavité carrée à 8% de concentration.   | 54 |
| IV.7   | Ligne de courant au sein d'une cavité avec ondulation a 8% de concentration de CuO   | 55 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| IV.8  | Evolution de température au niveau de la ligne médiane (entre la paroi chaude et froide) pour différentes concentration de CuO (cavité carrée)                | 56 |
| IV.9  | Evolution de température au niveau de la ligne médiane (entre la paroi chaude et froide) pour différentes concentration de CuO (cavité ondulé)                | 57 |
| IV.10 | Evolution de nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x à la paroi inferieure dans une cavité carrée pour différents concentrations de nanoparticule CuO   | 58 |
| IV.11 | Evolution de nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x à la paroi inferieure dans une cavité ondulé pour défférents concentrations de nanoparticule (CuO) | 59 |
| IV.12 | Figure récapitulative des différents rapports (h/hr) en fonction des concentrations de nanoparticule pour les deux cas.                                       | 60 |

# Nomenclature

## SYMBOLES LATINS

$g$  : gravité [ $\text{m.s}^{-2}$ ]

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

$H$  : dimension géométrique (hauteur=longueur) [m]

$Gr$  : nombre de Grachof.

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

$Nu$  : le nombre de Nusselt.

$P$  : la pression [Pa]

$Pr$  : nombre de Prandtl.

$Ra$  : le nombre de Rayleigh.

$Re$  : le nombre de Reynolds.

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

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

$T$  : température dimensionnelle [K]

$T_c$  : température de fluide chaude [K]

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

$U_0$  : vitesse caractéristique du fluide [m/s]

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

$V_T$  : volume totale (volume du nanofluide) [ $\text{m}^3$ ]

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

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

$x$  : coordonné axial [m].

$y$  : coordonné transversale [m].

## INDICES

f : fluide

bf : fluide de base.

nf : nanofluide.

p: particule.

## SYMBOLES GRECS

$\lambda$  : Conductivité thermique [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]

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

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

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

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

$\Phi$  : flux de chaleur [w]

$\beta$  : Coefficient d'expansion thermique [ $\text{K}^{-1}$ ]

$\phi$  : Concentration volumique.

$\alpha$ : diffusivité thermique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

# SOMMAIRE

**Remerciement**

**Dédicaces**

**Nomenclature**

**Sommaire**

**Introduction générale .....1**

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

**I.1. Introduction.....3**

**I.2.Mode de transfert de chaleur .....3**

**I.2.1. Conduction .....3**

**I.2.2. Rayonnement .....4**

**I.2.3. Convection .....4**

**I.2.3.1.Définition.....4**

**I.2.3.2. Type de convection .....5**

**a. Convection forcée .....5**

**b. Convection libre ou naturelle .....6**

**I.3.Régimesd'écoulement.....7**

**I.3.1.Écoulement laminaire .....7**

**I.3.2. Écoulement turbulent .....7**

**I.4. Les nanofluides .....8**

**I.4.1 Définition d'un nanofluide .....8**

**I.4.2. Définition des nanoparticules .....8**

**I.5. Conclusion .....9**

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

**II.1. Introduction .....10**

|  |    |
|--|----|
| II.2. Modèle physique .....  | 10 |
| II.2.1. Présentation des géométries .....  | 10 |
| II.2.2. Hypothèse simplificatrice .....  | 11 |
| II.3. Modèle mathématique pour le fluide de base .....                                     | 12 |
| a)Equation de continuité .....   | 12 |
| b) Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes) .....                  | 12 |
| c)Equation de conservation de l'énergie .....  | 13 |
| II.4. Modèle mathématique pour un nanofluide (mélange fluide de base +nanoparticules)..... | 13 |
| a).Équation de conservation de la masse .....  | 13 |
| b).Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes) .....                  | 13 |
| c). Equation de conservation de l'énergie .....  | 13 |
| II.5. Propriétés thermophysiques des nanofluides .....                                     | 14 |
| II.5.1. La fraction volumique ( $\phi$ ) .....   | 14 |
| II.5.2. Masse volumique ( $\rho_{nf}$ ) .....  | 14 |
| II.5.3. Conductivité thermique ( $\lambda_{nf}$ ) .....                                    | 14 |
| II.5.4. Viscosité dynamique( $\mu$ ) .....   | 15 |
| II.5.5. Chaleur spécifique .....   | 15 |
| II.5.6. Coefficient d'expansion thermique ( $\beta$ ) .....                                | 15 |
| II.6. Nombre adimensionnelle .....   | 16 |
| II.6.1.Le Nombre de Reynolds .....   | 16 |
| II.6.2. Nombre de Nusselt .....  | 16 |
| II.6.3. Nombre de Grashof .....  | 16 |
| II.6.4. Nombre de Prandh .....   | 17 |
| II.6.5. Nombre de Rayleigh .....   | 17 |

|  |    |
|--|----|
| II.7. Méthode numérique .....                  | 17 |
| II.7.1. La méthode des différences finies..... | 18 |
| II.7.2. La méthode des éléments finis .....    | 18 |
| II.7.3. La méthode des volumes finis .....     | 18 |
| II.8. Conclusion .....                         | 19 |

### **Chapitre III : Simulation numérique**

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction.....  | 20 |
| III.2. Présentation du logiciel Gambit .....                          | 20 |
| III.2.1. Description de l'interface générale du logiciel Gambit ..... | 20 |
| III.2.1.1. Description des menus du Panel graphique .....             | 21 |
| III.2.1.2. Description des menus du Panneau Globale Control .....     | 22 |
| III.2.1.3. Description des menus du panel Operation .....             | 23 |
| 1. Geometry Command Button .....                                      | 23 |
| a)- Menu des points .....   | 23 |
| b)- Menu des segments .....   | 23 |
| c)- Menu des surfaces .....   | 24 |
| d) Menu des volumes .....   | 24 |
| e) - Menu des groupes .....   | 25 |
| 2. Mesh Command Button .....  | 25 |
| f) Définition des couches limites .....                               | 26 |
| g)-Définition des maillages segment .....                             | 27 |
| h). Définition des maillages des surfaces .....                       | 27 |
| i)- Définition des maillages des volumes .....                        | 28 |
| j)- Définition des groupes .....                                      | 28 |

|   |    |
|---|----|
| 3. Opération .....  | 28 |
| 4. Tools .....  | 28 |
| III.2.2. Types, techniques et qualité d'un maillage .....           | 29 |
| III.2.2.1. Choix du type de maillage .....                          | 29 |
| a) -Maillage structuré (quadra/hexa) .....                          | 29 |
| b) -Maillage non structuré (tri/tétra.) .....                       | 29 |
| c)-Maillage hybride .....   | 29 |
| III.2.2.2. Techniques générales de génération d'un maillage .....   | 30 |
| III.2.2.3. Qualité d'un maillage .....                              | 30 |
| III.3. Procédure de modélisation .....                              | 31 |
| III.4. Utilisation de Gambit .....                                  | 31 |
| III.4.1. Réalisation du maillage sur Gambit .....                   | 31 |
| III.4.2. Ouverture de la session .....                              | 32 |
| III.4.3. Création des points du domaine .....                       | 32 |
| III.4.4. Créations des segments .....                               | 33 |
| III.4.5 Création des surfaces des domaines .....                    | 34 |
| III.4.6. Millage de la géométrie obtenue .....                      | 34 |
| a. Création du maillage des segments .....                          | 35 |
| b. Maillage des surfaces obtenues .....                             | 35 |
| III.4.7. Mise en place des conditions aux limites .....             | 36 |
| III.4.8. Mise en place le domaine de calculs .....                  | 37 |
| III.5. Exportation du maillage de Gambit .....                      | 37 |
| III.6. Présentation du logiciel "Fluent" .....                      | 38 |
| III.6.1.Résolution numérique par la méthode des volumes finis ..... | 39 |

|   |    |
|---|----|
| III.6.2. Principales étapes de simulation sous FLUENT ..... | 40 |
| III.6.2.1. Importation de la géométrie (.MSh) .....         | 40 |
| a. Ouvrir la version de Fluent .....                        | 40 |
| b. Lire le fichier exporté (avec extension .MSh) .....      | 40 |
| c. Vérification du maillage .....                           | 41 |
| d. Vérifier l'unité .....                                   | 42 |
| e. Choix du solveur .....                                   | 43 |
| f. Autorisation du transfert de chaleur .....               | 43 |
| g. Choix du type d'écoulement .....                         | 44 |
| h. Définir les propriétés des matériaux .....               | 44 |
| i. Conditions d'opération .....                             | 45 |
| III.6.2.2. Les Conditions aux limites .....                 | 45 |
| III.6.2.3. Initialisation de la solution .....              | 48 |
| III.6.2.4. Choix des critères de convergence .....          | 48 |
| III.6.2.5. Lancement du calcul .....                        | 49 |
| III.6.2.6. La convergence des calculs .....                 | 49 |
| III.6.2.7. Sauvegarde du fichier. CAS&.DAT .....            | 49 |
| III.6.3. Traitement graphique des résultats .....           | 49 |
| III.7. Conclusion .....                                     | 50 |

## **IV. Résultat et discussions**

|  |    |
|--|----|
| IV.1. Introduction .....   | 51 |
| IV.2. Contour de température et ligne de courant pour les deux cas ..... | 51 |
| IV.2.1. Contour de température.....                                      | 51 |
| IV.2.1.1. Cavité carée à 0% .....  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| IV.2.1.2. Cavité carrée à 8% .....  | 52 |
| IV.2.1.3. Cavité ondulé à 0% .....  | 53 |
| IV.2.1.4. Cavité ondulé à 8% .....  | 53 |
| IV.2.2. Lignes de courant .....   | 54 |
| IV.2.2.1. Cavité carrée à 8% .....  | 54 |
| IV.2.2.2. Cavité ondulé à 8% .....  | 55 |
| IV.3. Evolution de coefficient d'échange à la paroi inferieur en fonction de polynôme de concentration..... | 56 |
| IV.4. Evolution de température .....  | 57 |
| IV.4.1. Cavité carrée .....   | 57 |
| IV.4.2. Cavité ondulé .....   | 58 |
| IV.5. Evolution de nombre de Nusselt à la paroi chaude .....  | 59 |
| IV.5.1. Cas simple .....  | 59 |
| IV.5.2. Cas ondulé .....  | 60 |
| IV.6. Evolution du coefficient d'échange a la paroi inferieure en fonction de la concentration .....        | 61 |
| <b>Conclusion générale</b> .....  | 62 |

## **Bibliographie**

## **Annexe**

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

Dans le cadre de la maîtrise de la dépense d'énergie, beaucoup de pays et d'industriels se sont engagés par des traités internationaux afin d'atteindre des objectifs communs de réduction de la consommation énergétique dans les principaux secteurs consommateurs. L'un des axes les plus prisés ces dernières années, pour atteindre cet objectif d'économie d'énergie, est l'amélioration des performances thermiques des équipements et processus industriels, qui préconisent un apport ou une évacuation d'énergie sous forme de chaleur pour assurer un fonctionnement entretenu et une augmentation de leur durée de vie, d'où l'importance de maîtriser les aspects du transfert de chaleur sous ses différents modes, et de contribuer à leur amélioration.

En raison de l'importance qu'ils présentent dans la pratique industrielle et dans notre quotidien, les transferts de chaleur par convection naturelle dans les cavités ont fait l'objet de nombreuses investigations. En effet, ce type de convection est présent dans de nombreux systèmes et processus industriels ; par exemple les systèmes thermiques solaires, les systèmes de refroidissement des circuits électroniques et des réacteurs nucléaires, les bâtiments et, plus précisément, l'isolation de parois opaques ou vitrées.

La convection naturelle est un phénomène de transfert thermique entre un solide et un fluide de températures différentes qui se traduit par une diffusion de chaleur entre les deux milieux. Les gradients de température ainsi créés au niveau du fluide se traduisent par des gradients de masse volumique qui provoquent une poussée verticale (poussée d'Archimède) générée par une dilatation locale du fluide. Etant donné que le champ de vitesse dans le fluide dépend de son champ de température, la convection naturelle est le siège d'un couplage des problèmes mécaniques et thermiques qui doivent être résolus simultanément et qui sont influencés par les propriétés thermodynamiques du fluide, les écarts de températures et la géométrie des systèmes concernés.

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 nanoparticule. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de " Nanofluides ". Ce terme a été introduit par Choi [1] au laboratoire d'Argonne en U.S American 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale.

Dans cette étude on essaiera de montrer la potentialité de remplacer les fluides avec des nanofluides qui peuvent jouer le même rôle que ces fluides ordinaires 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.

Dans le présent travail, nous nous intéressons à l'étude de la convection naturelle dans les cavités fermées en présence d'un nonofluide. Pour cela nous proposons d'analyser l'influence de quelques paramètres dynamiques et thermo physiques sur la structure de l'écoulement, distributions de température et les transferts de chaleur, et ce pour deux géométries différentes.

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux des définitions et généralités sur le transfert de chaleur et les nanofluides.

Le second chapitre traite la mise en équation du problème de la convection en absence et en présence des nanoparticules dans le fluide de base, ainsi que les modèles mathématiques régissant les écoulements de fluides avec transfert de chaleur par convection sont présentés.

Le troisième chapitre présente la modélisation du problème et présentation de logiciel GAMBIT et le code de calcul FLUENT.

Le dernière chapitre est consacré à la présentation et discussion des résultats numériques obtenus lors de la simulation.

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

## 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. MODE DE TRANSFERT DE CHALEUR :

### I.2.1. 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.

Ce transfert de chaleur obéit à la loi de Fourier : [2]

$$dQ = -\lambda S \frac{dT}{dx} dt \quad (\text{I.1})$$

$dQ$  : La chaleur transmise par conduction (W)

$\lambda$  : Conductivité thermique ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

$S$  : Surface de la section de passage de flux de chaleur ( $\text{m}^2$ )

$\frac{dT}{dx}$  : Gradient de température en  $x$  ( $\text{K/m}$ )

Le flux de chaleur  $\Phi$  en watt qui circule en  $x$  :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{I.2})$$

## **I.2.2. 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 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 ses températures diffèrent de zéro Kelvin.

Les corps émettent de l'énergie par leur surface, ou 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 flux de chaleur transmise par rayonnement est donné par l'équation de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi = \sigma T^4 S \quad (\text{I.3})$$

Sachant que :

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  est la constante de Stefan-Boltzmann [ $\text{W/ (m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ]

$T$  : température absolue [K]

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

## **I.2.3. Convection :**

### **I.2.3.1. Définition :**

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 mêmes provoquées par des différences de température. L'échange thermique par convection a pour origine le mouvement d'un fluide.

L'intensité de la convection est reliée à plusieurs paramètres tels que, les valeurs de températures, la nature de fluide et la surface d'échange. Le flux convectif est donné par la loi de newton :

$$\Phi = hS(T_S - T_\infty) \quad [\text{W}] \quad (\text{I.4})$$

Sachant que :

$h$  : coefficient d'échange convectif moyen [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]

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

$T_S$  : Température de la paroi [K]

$T_\infty$  : Température de fluide [K]

### **I.2.3.2.type de convection :**

#### **a. Convection forcée**

La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoquée par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques ; 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.

La convection est dite forcée quand il existe une cause du mouvement autre que les variations de températures du fluide, cette cause étant la seule à prendre en compte en raison de son importance relative.

**b. Convection libre ou naturelle :**

La convection naturelle (ou libre) se distingue de la convection forcée par le fait que le mouvement du fluide n'est pas dû à un apport externe d'énergie mécanique, mais qu'il trouve sa source au sein même du fluide, sous l'effet conjugué de gradients de masse volumique et d'un champ de pesanteur. Les variations de masse volumique sont généralement dues à des gradients de température.

L'écoulement d'un fluide par convection naturelle due aux différences de température peuvent être résulté d'un chauffage ou d'un refroidissement par le bas, ce sont l'écoulement de Rayleigh–Bénard ou bien il résulte par des gradients de température provoquée par un chauffage ou un refroidissement par les côtés latéraux.

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions à température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant.

Le phénomène inverse de courants descendants se produits pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud.

Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poids spécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ de pesanteur terrestre.

L'intervention du poids a pour effet de donner à la verticale un rôle privilégié. La définition de la géométrie d'un système convectif doit donc faire intervenir la forme et les dimensions ainsi que la disposition par rapport à la verticale.

Les effets de convection naturelle sont familiers. On peut les observer quotidiennement dans l'eau que l'on chauffe dans un récipient, dans les panaches de certaines cheminées d'usines, la circulation atmosphérique, les vents, les tempêtes sont aussi des effets de la convection naturelle.

Pour formaliser la convection naturelle, il faut décrire le couplage des champs de température, de pression et de vitesse à partir des équations de conservation de la quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie.

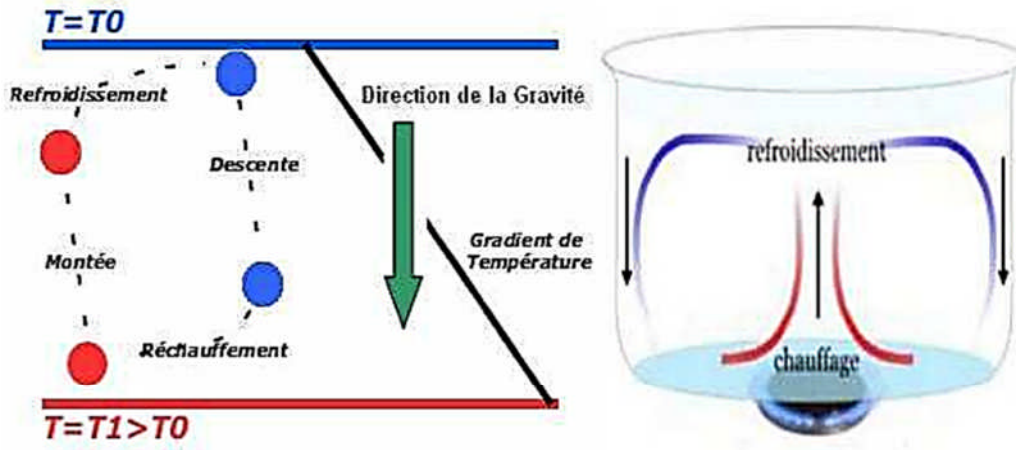


Figure (I.1) : Principe physique de la convection naturelle.

### I.3. 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.3.1.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

#### I.3.2.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. 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.

## I.4. Les nanofluides :

### I.4.1. 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'agrégations, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule. [3-4]

Les liquides de base les plus utilisés sont :

- L'eau
- L'éthylène glycol, EG.
- Les huiles.
- Le Toluène.
- Les fluides de réfrigération.

### I.4.2. 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.



Figure (I.2) : Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont :

Les nanoparticules des oxydes métalliques :

- l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
- l'oxyde de cuivre ( $\text{CuO}$ ).
- l'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ).
- l'oxyde de titanium ( $\text{TiO}_2$ ).

Les nanoparticules métalliques :

- l'aluminium( $\text{Al}$ ).
- le cuivre( $\text{Cu}$ )
- l'or ( $\text{Au}$ ).
- l'argent ( $\text{Ag}$ )

Les nanoparticules non métalliques :

- les nanotubes de carbone (CNT)
- le diamant( $\text{C}$ ).

## **I.5. Conclusion**

Dans ce chapitre des notions fondamentales sur le transfert thermique et les nanofluides ont été présentées. Et on donnera plus de détails sur les propriétés thermophysiques du nanofluide qu'on a utilisé dans ce modeste travail à savoir (Eau + $\text{CuO}$ ) au chapitre suivant.

**Chapitre II :**  
**Modélisation physique et mathématique**

**II.1. INTRODUCTION :**

Dans ce chapitre, nous abordons les équations mathématiques, qui décrivent le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité fermée, de géométrie bidimensionnelle. La formulation mathématique, des équations gouvernantes est basée sur l'équation de continuité, les équations de mouvement (décrites par les équations de Navier-Stokes dans le cas d'une cavité fermée et remplie de fluide), et l'équation de l'énergie. Le terme des forces de poussée dans l'équation d'énergie est exprimé par l'approche de Boussinesq. On donne dans ce chapitre aussi la formulation mathématique de l'écoulement du nanofluide eau+CuO, ainsi que les modèles utilisés pour le calcul de ses propriétés thermophysiques.

**II.2. Modèle physique :**

Le domaine d'étude consiste en une cavité fermée, la géométrie étant bidimensionnelle en coordonnées cartésiennes. Les dimensions de la cavité sont sa longueur  $L$  et sa hauteur  $H$ . Nous allons dans ce qui suit présenter deux figures portant sur deux géométries différentes avec les mêmes conditions aux limites la première figure est une cavité carrée et la second est une cavité avec ondulation.

**II.2.1. Présentation des géométries**

La longueur de la cavité étant égale à sa hauteur (1cm), la paroi horizontale inférieure est portée à une température chaude ( $T_c=315$  K) et la paroi supérieure est portée à une température froide ( $T_f=300$  K). Les deux parois verticales sont considérées comme étant adiabatique.

La configuration géométrique bidimensionnelle du problème considéré est illustrée dans la figure (II.1) &figure (II.2).

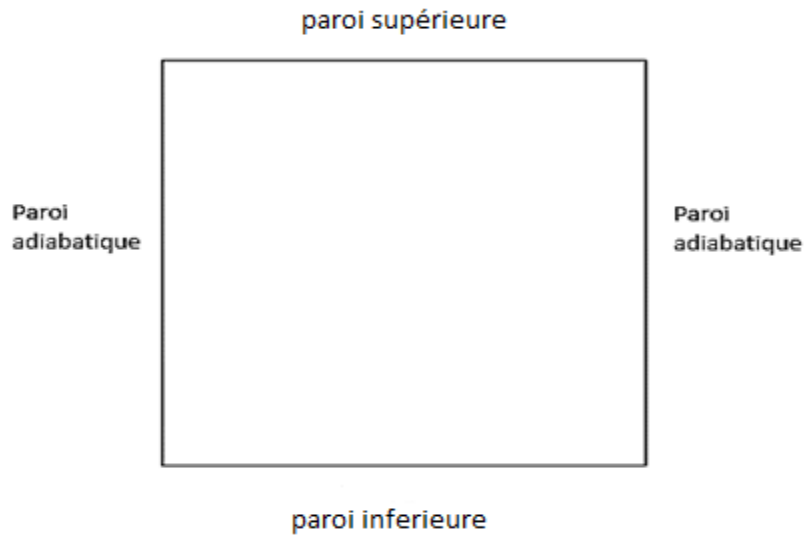


Figure (II.1) : Cavité carrée

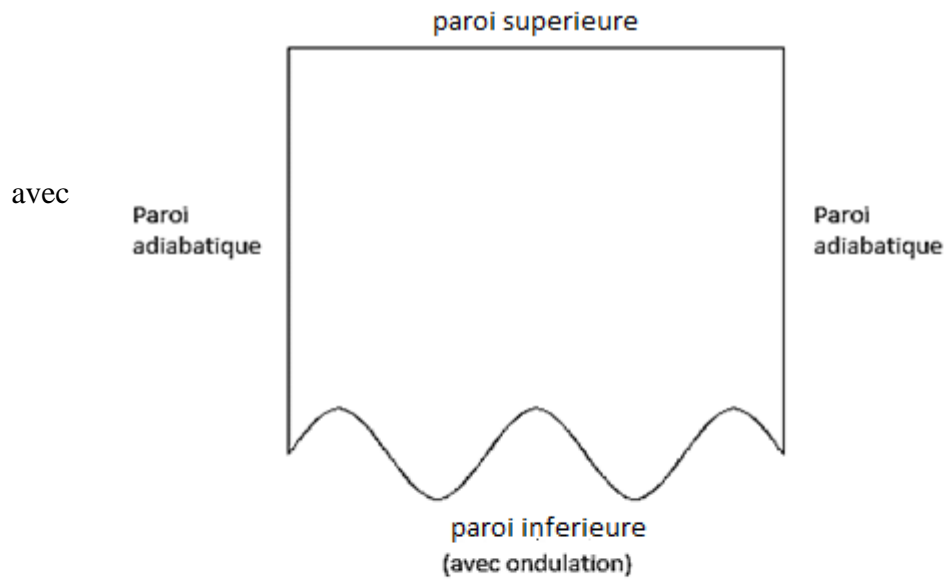


Figure (II.2) : Cavité

ondulation

**II.2.2. Hypothèses simplificatrices :**

Le processus de convection naturelle dans une cavité fermée est gouverné par un ensemble d'équations qui traduisent la conservation des différentes propriétés

physicochimiques mises en jeu. La résolution des équations gouvernantes nécessite un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, on admet à cet effet :

- Fluide newtonien et incompressible.
- Écoulement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.
- Régime d'écoulement laminaire et permanent.
- Absence de source interne de chaleur, de source de masse ou de réaction chimique.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- On considère que Les propriétés thermo- physiques du fluide à l'intérieur de la cavité sont constantes sauf pour la masse volumique dont les variations dues aux différences de températures qui engendrent le mouvement, on adopte à cet effet l'approximation de Boussinesq :

#### Approximation de Boussinesq :

Le mouvement de fluide dans la convection naturelle est produit par le changement de la densité. Donc la supposition de la densité constante ne peut pas être faite dans l'analyse des problèmes de la convection naturelle. Au lieu de cela une simplification alternative appelée "approximation de Boussinesq" est faite. L'approche de base dans cette approximation est de considérer la densité comme constante dans l'équation de continuité et le terme d'inertie de l'équation de quantité de mouvement, mais variable avec la température dans le terme de pesanteur. Dans ce cas l'équation devient. [3-5]

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_c)] \quad (\text{II.1})$$

Où  $\beta$  est le coefficient d'expansion thermique ; il est défini comme étant le rapport de la variation de la masse volumique en fonction de la température  $T$  à pression constante

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (\text{II.2})$$

Pour un gaz parfait on aura  $\beta = \frac{1}{T}$

### II.3. 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) Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.3})$$

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

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_f \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.4})$$

Suivant y

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial y} + g\beta_f(T - T_f) + \nu_f \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.5})$$

**c) Equation de conservation de l'énergie :**

$$(\rho c_p)_f \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda_f \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.6})$$

**II.4. 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 lequel 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  $\phi$ . [3]

**a).Équation de conservation de la masse :**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.7})$$

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

• suivant x :

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

• suivant  $y$  :

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

c). Equation de conservation de l'énergie :

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

## II.5. Propriétés thermophysiques des nanofluides :

Les propriétés thermo physiques (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.5.1. La fraction volumique ( $\phi$ ) :

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque le calcul de toutes les autres propriétés se base sur la fraction volumique du Nanofluide. On peut définir la fraction volumique comme étant le rapport de volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base).

$$\phi = \frac{V_{par}}{V_{total}} \quad (\text{II.11})$$

La valeur de la fraction volumique varie entre 0% (fluide de base pure) et 8%.

### II.5.2. 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 : [3]

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \rho_p \phi \quad (\text{II.12})$$

### II.5.3. Conductivité thermique ( $\lambda_{nf}$ ):

La conductivité thermique généralement est une propriété importante et principalement dans notre étude joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur. Elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du

fluide, 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 .

Dans notre travail on a utilisé l'équation suivant : [3]

$$\lambda_{nf} = \lambda_{bf}(11.6\phi^2 + 9.6\phi + 1) \quad (\text{II.13})$$

#### II.5.4. 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 influencée 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.

On a appliqué l'équation suivante pour calculer les valeurs de la viscosité dynamique [6-7] :

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \quad (\text{II.14})$$

#### II.5.5. 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 la formule suivante : [6-8]

$$(c_p)_{nf} = \frac{1}{\rho_{nf}} ((1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p) \quad (\text{II.15})$$

#### II.5.6. 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 de nanofluide, on a utilisé l'expression suivante [3-6]:

$$(\beta_{nf}) = \frac{1}{\rho_{nf}} ((1 - \phi)(\rho\beta)_{bf} + \phi(\rho\beta)_p) \quad (\text{II.16})$$

## II.6. Nombres adimensionnels :

### II.6.1. Le Nombre de Reynolds :

Représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les équations de Navier-Stokes. On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{U_0 H}{\nu} \quad (\text{II.17})$$

- $U_0$ : vitesse caractéristique du fluide [m/s]
- $H$ : dimension caractéristique [m]
- $\nu$ : Viscosité cinématique du fluide [m<sup>2</sup>/s]

### II.6.2. Nombre de Nusselt :

Est un nombre adimensionnel utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert thermique convectif et le transfert thermique conductif à travers une interface (souvent fluide/solide). On le définit de la manière suivante.

$$Nu = \frac{h_c H}{\lambda} \quad (\text{II.18})$$

- $h_c$ : est le coefficient de transfert de chaleur [ $W/m^2 \cdot K$ ]
- $\lambda$ : est une conductivité thermique du fluide [ $W/m \cdot K$ ]
- $H$ : dimension caractéristique [m]

### II.6.3. Nombre de Grashof :

IL correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. IL est défini par :

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2} \quad (\text{II.19})$$

- $g$ : est la gravité [m/s<sup>2</sup>]

- $\beta$  : est coefficient d'expansion thermique [ $K^{-1}$ ]
- $\Delta T$  : est la différence de température entre la paroi inférieure et la paroi supérieure [K]
- $H$  : est la dimension géométrique [m].
- $\nu$  : est la viscosité cinématique [ $m^2/s$ ]

#### II.6.4. Nombre de Prandtl :

C'est un nombre adimensionnel. Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement (ou viscosité cinématique et la diffusivité thermique. Sa formule est la suivante :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (I.20)$$

- $\nu$  : est la viscosité cinématique [ $m^2/s$ ]
- $\alpha$  : Diffusivité thermique [ $m^2/s$ ]

#### II.6.5. Nombre de Rayleigh :

C'est un nombre sans dimension, qui donne le rapport des forces de poussée à la force de viscosité au sein de l'écoulement. Ce nombre est utilisé en convection naturelle pour distinguer si l'écoulement est laminaire ou turbulent. Il est défini comme étant le produit du nombre de Prandtl par le nombre de Grashof comme suit :[3]

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu} = Pr \times Gr \quad (II.21)$$

$\beta$  : Coefficient d'expansion thermique. [ $K^{-1}$ ]

$\nu$  : est la viscosité cinématique du fluide [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$g$  : la gravité [ $m/s^2$ ]

$\alpha$  : Diffusivité thermique [ $m^2/s$ ]

$H$  : est la dimension géométrique [m].

Pour les écoulements dans les enceintes fermées, chauffées d'en bas, la convection naturelle se déclenche lorsque le nombre de Rayleigh sera supérieur à 1700. L'écoulement devient turbulent si le nombre de Rayleigh dépassera la valeur de  $3 \cdot 10^5$  [4]

#### II.7. 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 nœud du domaine étudié.

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

### II.7.1. La méthode des différences finies :

Le domaine de calcul est discrétisé en un nombre fini de points sur lesquels on approche les opérateurs de dérivation des équations modèles par des développements en séries de Taylor tronquées à l'ordre de précision choisie [9] .

Soit le maillage régulier unidimensionnel :

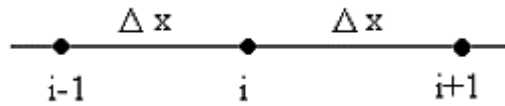


Figure (II.3) : maillage unidimensionnel.

Ou  $\Delta x = x_i - x_{i-1} = x_{i+1} - x_i$  (II.22)

### II.7.2. La méthode des éléments finis :

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chacun de ces domaines, appelés éléments finis, la fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible. Ces éléments, triangles ou quadrilatères, rectilignes ou curvilignes, doivent réaliser une partition du domaine d'étude (ils sont disjoints et leur union recouvre le domaine tout entier). Cette partition qui est généralement appelée découpage ou discrétisation du domaine doit respecter un certain nombre de règles qui permettent d'assurer un bon déroulement du calcul. [9]

### II.7.3. La méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est l'approche par excellence utilisée en mécanique des fluides numérique. Elle repose sur un principe aussi valable en vie courante, en politique qu'en démarche scientifique. C'est le principe 'diviser pour régner', qui est très efficace en tant qu'approche scientifique. Donc l'approche consiste à diviser le domaine de calcul en plusieurs petits volumes qui ne se chevauchent pas et dont la somme fait exactement le volume du domaine de calcul à étudier. C'est très important pour assurer le principe de conservation et surtout la conservation des flux

entre l'entrée et la sortie du domaine de calcul. En résumé, cette méthode nous donne un bilan local des flux dans un petit volume de contrôle. [10]

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

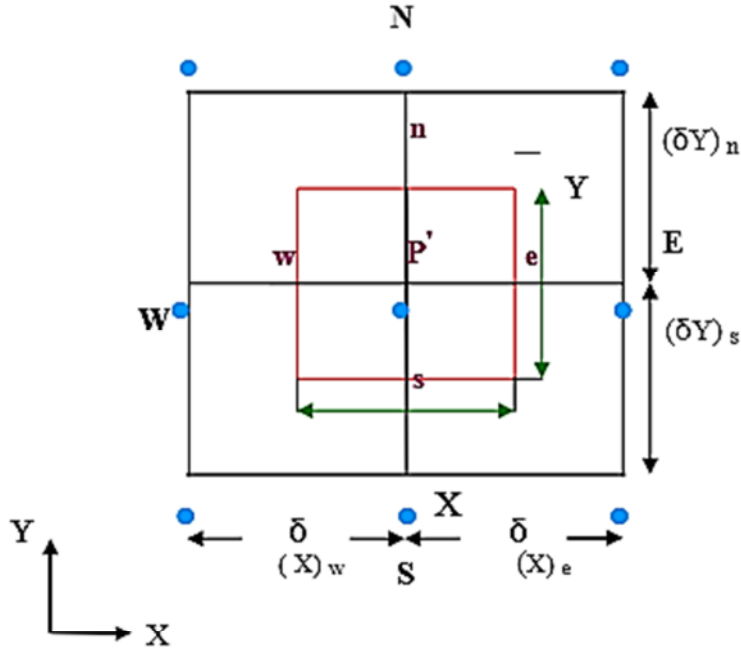


Figure (II.4) : volume de contrôle bidimensionnel.

## II.8. Conclusion :

Le phénomène physique a été décrit mathématiquement par les différentes équations de conservation. Une présentation des regroupements adimensionnels nombre de Prandtl, nombre de Grashof, et nombre de Rayleigh a été faite en prévision de les utiliser dans la suite comme des paramètres de contrôle de la présente étude.

**Chapitre III :**  
**Simulation numérique**

**III.1. Introduction :**

La simulation numérique des écoulements est maintenant considérée comme de véritables expériences numériques lorsque les simulations sont faites avec soin. L'avantage des méthodes numériques est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (surface libre, champ de vitesse, champ de pression, contraintes, ...) sont immédiatement obtenues. Dans une expérience l'obtention de ces quantités en tous les points du champ est souvent impossible ou très difficile à réaliser. La première partie de ce chapitre porte sur les démarches d'utilisation d'un code de calcul numérique de dynamique des fluides pour modéliser la convection naturelle dans des cavités. Nous présentons le logiciel de CFD choisi pour cette modélisation.

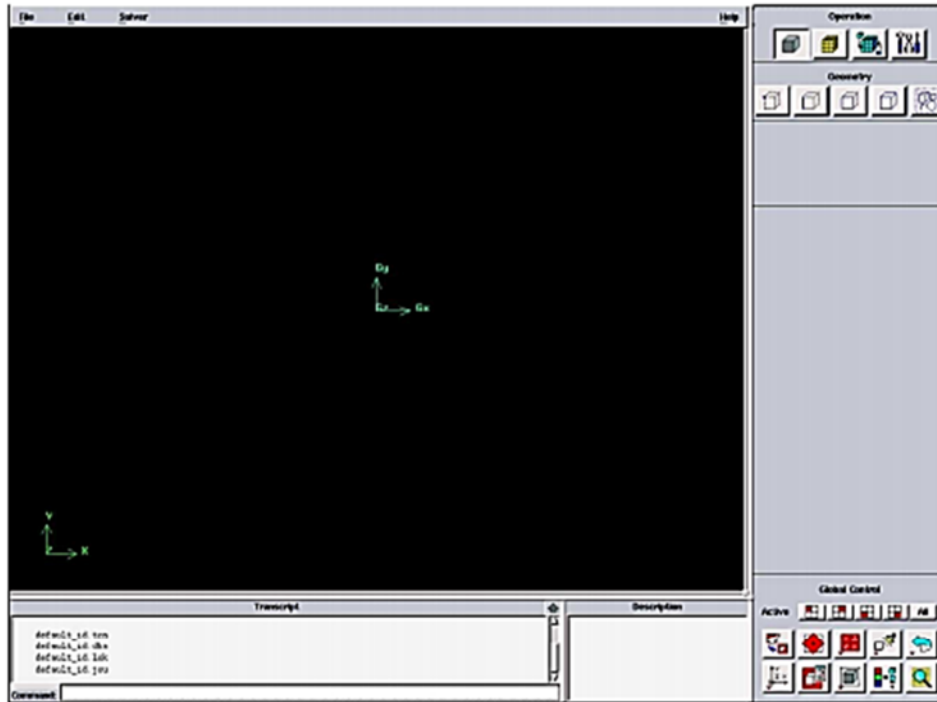
**III.2. Présentation du logiciel Gambit :**

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 « dbs » qui contient toutes les données de la session ;
- un fichier « jou », qui retrace l'historique de la session ;
- un fichier « trm », qui reprend toutes les commandes et leurs résultats lors des différentes sessions ;
- un fichier « lok ».

**III.2.1. Description de l'interface générale 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 autres, de zoomer, de changer de repère et de vérifier les maillages.
- le dernier panel (Opération) 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.

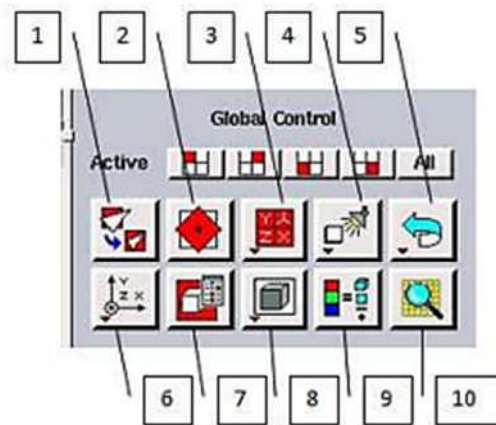
### III.2.1.1. Description des menus du Panel graphique :

- **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 :

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.).

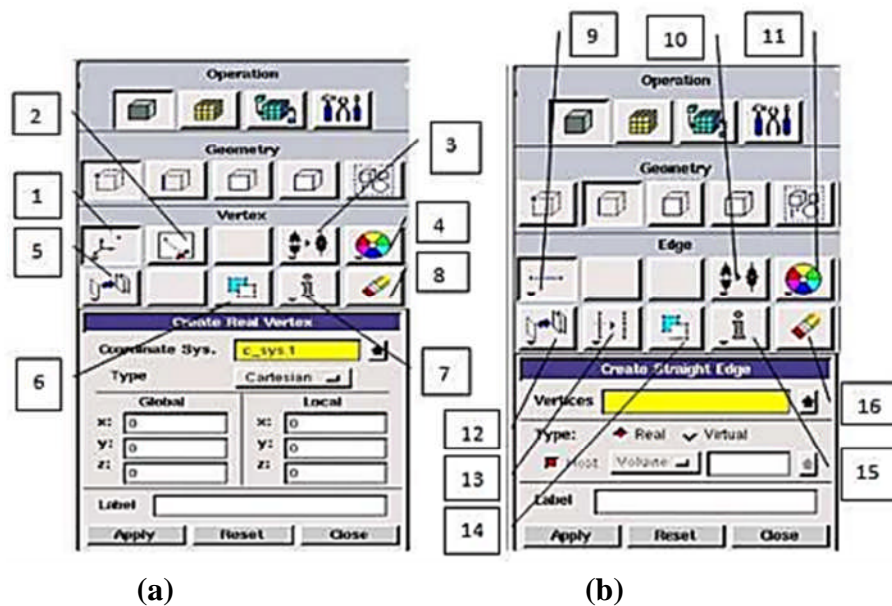
### III.2.1.3. Description des menus du panel Operation :

Il contient 4 boutons de commande qui sont les suivants :

#### 1-Geometry Command Button :

Possède un sous-panneau (Geometry) de 5 boutons et chacun de ces derniers englobe un sous-panneau de 10 boutons dont certains sont inutiles les autres sont illustrés au-dessous des figures 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 ((a)création des points, (b) des segments).

#### a)- Menu des points :

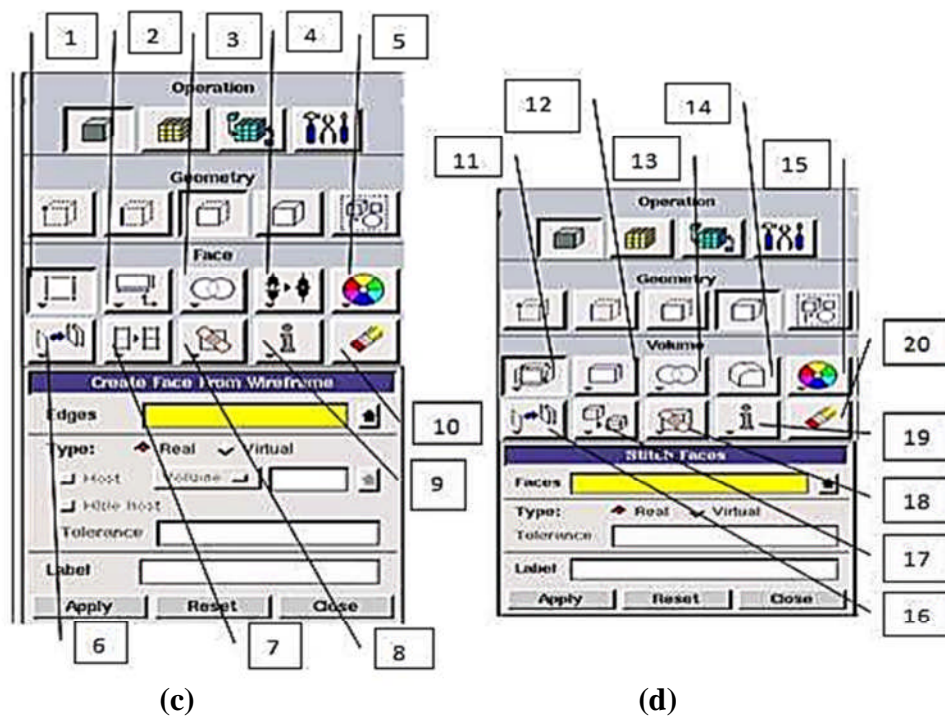
- 1- créer un point.
- 2- déplacer les points virtuels.
- 3- connecter/Déconnecter les points.

#### b)- Menu des segments :

- 9 - créer une ligne.
- 10 - connecter/Déconnecter les lignes.
- 11 – modifier la couleur ou le nom des Lignes.

- 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.
- 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 ((c) création des surfaces, (d) des volumes).

**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.

**d) - Menu des volumes :**

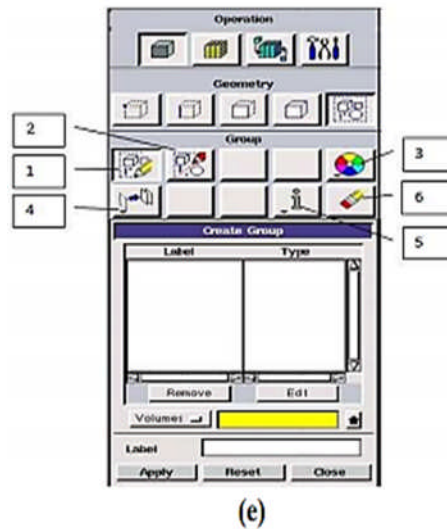
- 11 - créer un volume à partir de surfaces.
- 12 - créé un volume à partir de géométries Prédéfinie.
- 13 - opérations booléennes sur les volumes.
- 14- coller une surface à un volume.
- 15- modifier la couleur / nom des

- |  |   |  |
|--|---|--|
| 6- déplacer/Copier/Aligner les surfaces.         | volumes.  | 16- déplacer/copier/aligner les volumes. |
| 7- couper/coller des surfaces.                   |   | 17- couper/coller des volumes.           |
| 8- convertir les surfaces virtuelles en réelles. | 18 - convertir les volumes virtuels en réelles. |  |
| 9- information sur les surfaces créées.          | 19 - information sur les volumes créés.         |  |
| 10- effacer les surfaces.                        | 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 :**

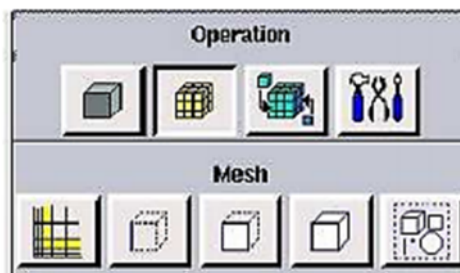
- 1- créer un groupe.
- 2- modifier un groupe.
- 3- modifier la couleur ou le nom des groupes.
- 4- déplacer/copier/aligner les groupes.
- 5- information sur les groupes créés.
- 6-effacer les groupes.



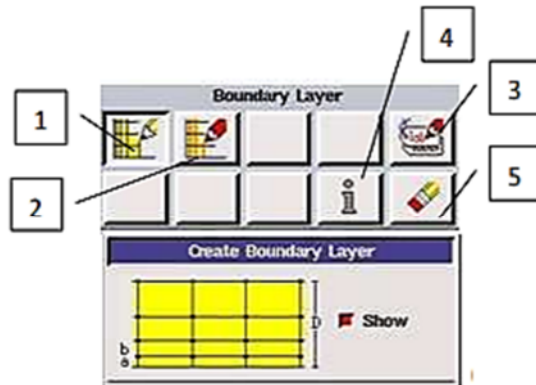
**Figure(III.5) :** Panneau d'opération (construction, des groupes (e)).

**2-Operation mesh :**

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



**Figure(III.6) :** panneau d'opération (option de maillage).



(f)

Figure (III.7) : construction des maillages de type couche limites.

**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.

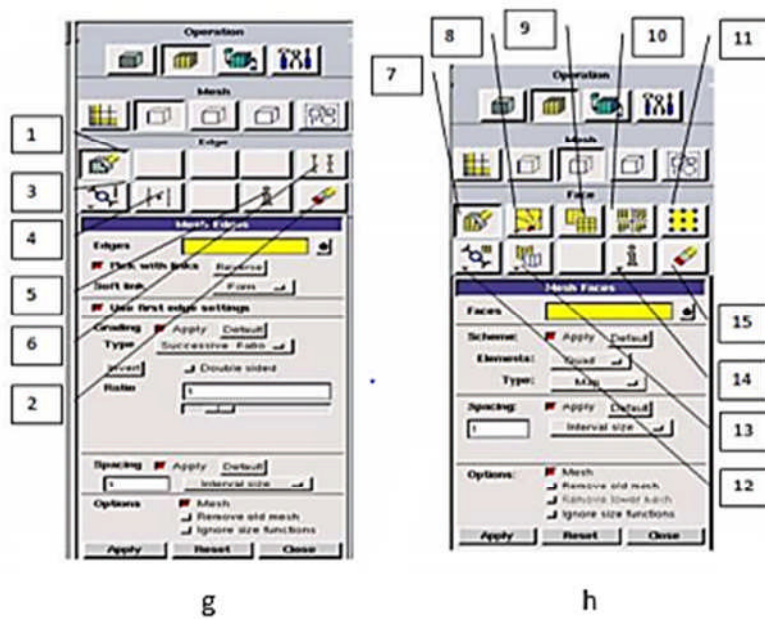


Figure (III.8) : Construction des maillages des segments (g) et des surfaces (h) de la géométrie

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.

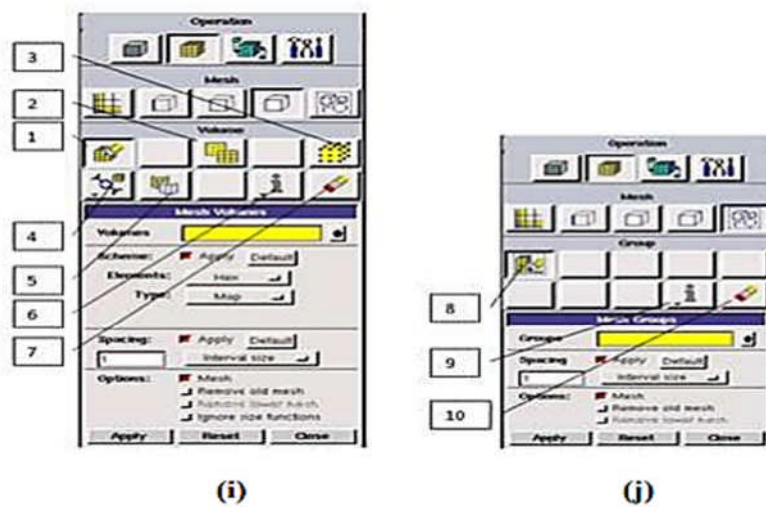
**g)-Définition des maillages segment :**

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

**h). Définition des maillages des surfaces :**

- 7- créer un maillage sur une surface.
- 8- déplacer un nœud sur un maillage, modifier un élément.
- 9-lisser le maillage sur une surface.
- 10- définir le type d'élément.
- 11- lier/déliier les maillages des surfaces.
- 12- couper/coller des maillages de surface.
- 13-définir le type de nœud.
- 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 (i) et des groupes (j) de la géométrie.

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

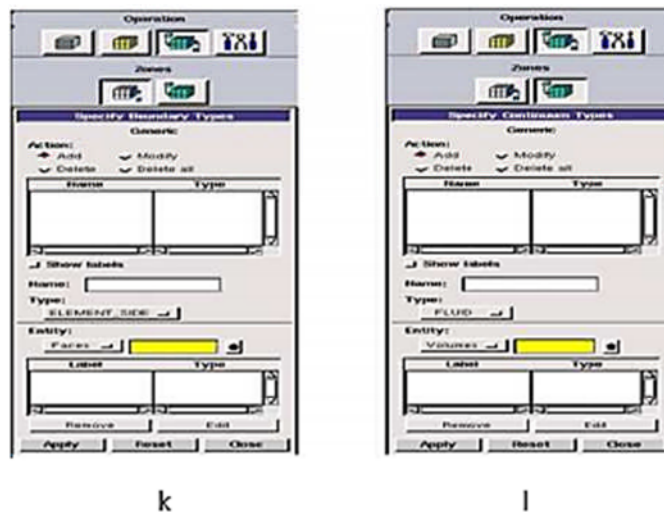
- 1- créer un maillage dans un volume.
- 2- lisser le maillage dans un volume.
- 3- définir le type d'élément.
- 4- lier/délier les maillages des volumes.
- 5- couper/coller des maillages de volume.
- 6- information sur les maillages de volumes créés.
- 7- effacer les maillages des volumes.

**j) - Définition des groupes :**

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

**3- Opération :**

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 mailles 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 **Qualité** des éléments
- Assurer une bonne **Résolution** dans les régions à fort gradient
- Assurer un bon **Lissage** dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier
- Minimiser le nombre **Total** des éléments (temps de calcul raisonnable).

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

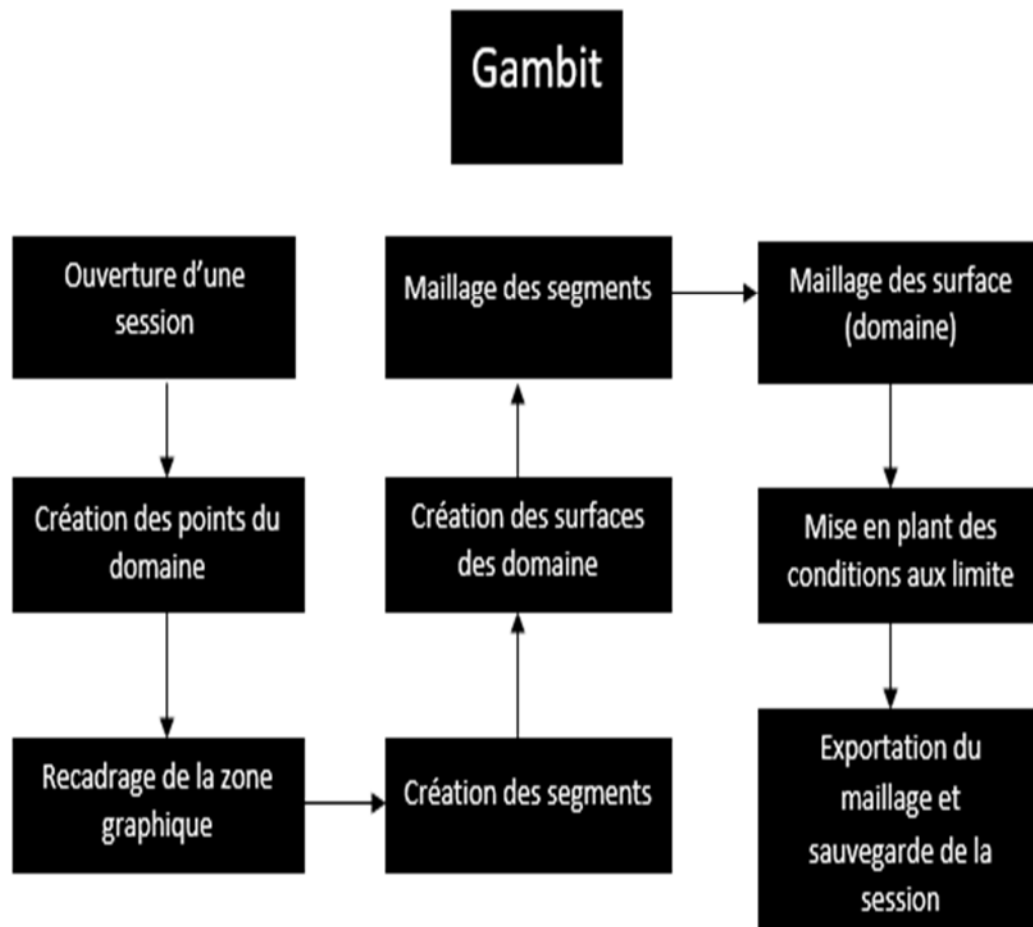
**III.2.2.3. Qualité d'un maillage**

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 à un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

### III.3. Procédure de modélisation



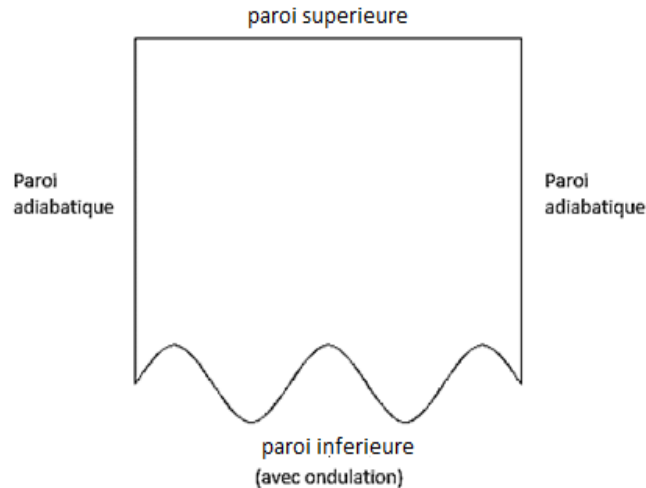
**Figure (III.12) :** Procédure de modélisation de la géométrie sous Gambit

### III.4. Utilisation de Gambit :

Cette section contient une présentation succincte du logiciel Gambit, ainsi notre utilisation permet 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) : exemple de la géométrie réaliser sur gambit

### III.4.2. Ouverture de la session

Après avoir lancé Gambit, sauvegarder la session 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.dbs » 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 suivons dans l'ordre des étapes suivant : Apply (Operation>Geometry>Vertex>Create Real Vertex).

Les coordonnées des points concernant notre géométrie sont les suivantes :

|                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| Point 1 : [00 ; 0,001] (m)    | point 2 : [00 ; 0.0035] (m)  |
| Point 3 : [0.001 ; 0.002] (m) | point 4 : [0.003 ; 00] (m)   |
| Point 5 : [0.005 ; 0.002] (m) | point 6 : [0.007 ; 00] (m)   |
| Point 7 : [0.009 ; 0.002] (m) | point 8 : [0.01 ; 0.0035](m) |
| Point 9 : [0.01 ; 0.001] (m)  | point 10 : [0.01 ; 0.01] (m) |
| Point 11 : [00 ; 0.01] (m)    |                              |

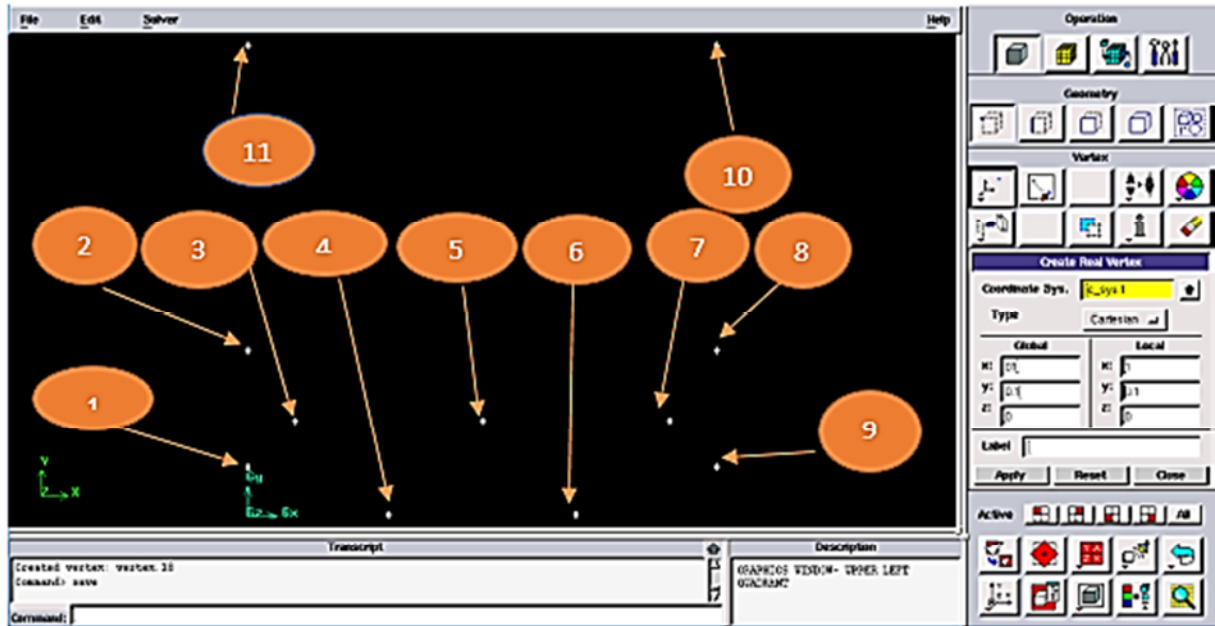


Figure (III.14): Position des points après recadrage de la zone graphique.

### III.4.4. Créations des segments

Pour la création des segments nous suivrons les étapes suivantes :

**Operation>Geometry>Edge>Create Real Edge**

Paroi ondulé, point 1, 3, 4, 5, 6, 7, et 9

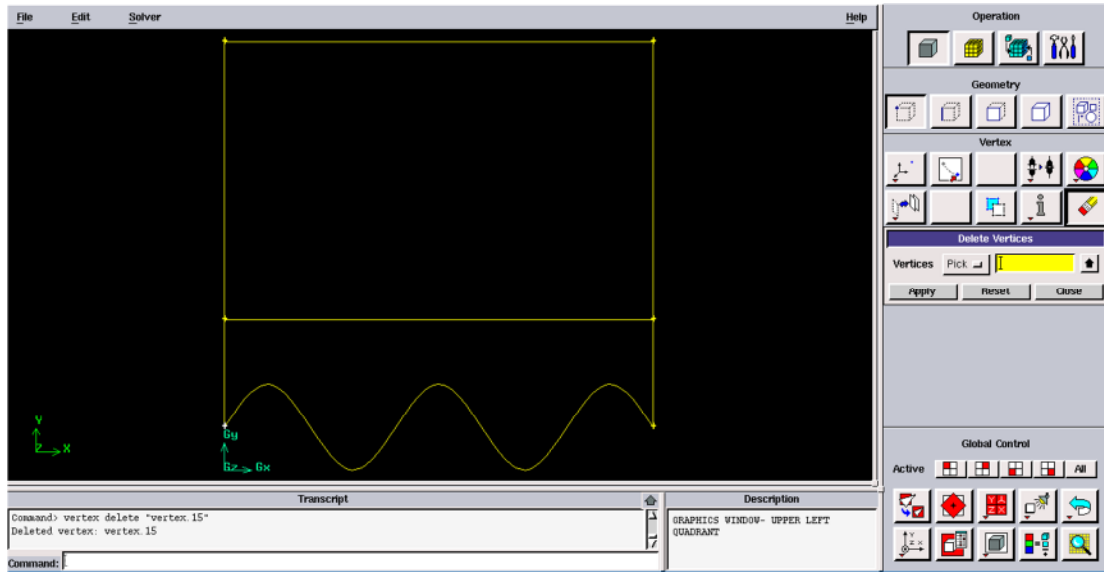
Toit, point 10 et 11.

Paroi gauche, point 1,2 et 11.

Parois droite, point 8,9 et 10.

Pour faciliter la mise en place des segments, il est possible de sélectionner avec la souris les deux extrémités de segment (bouton gauche) puis valider avec (bouton droite).

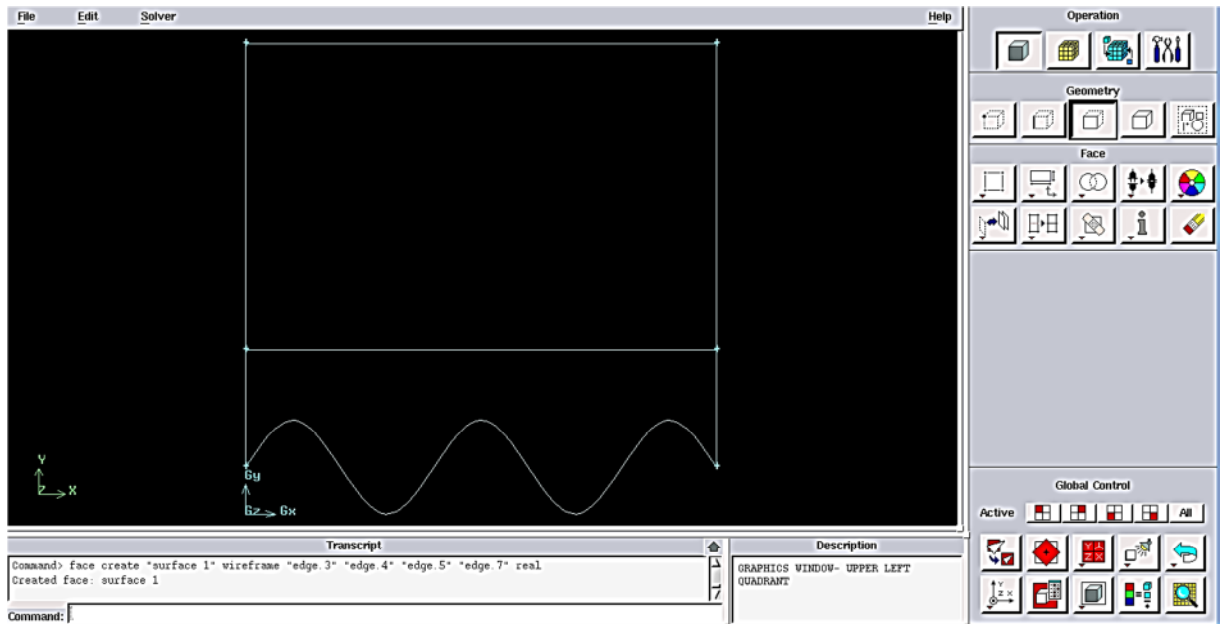
Voici ce que l'on obtient à ce stade de la construction :



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

### III.4.5. Création des surfaces des domaines :

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



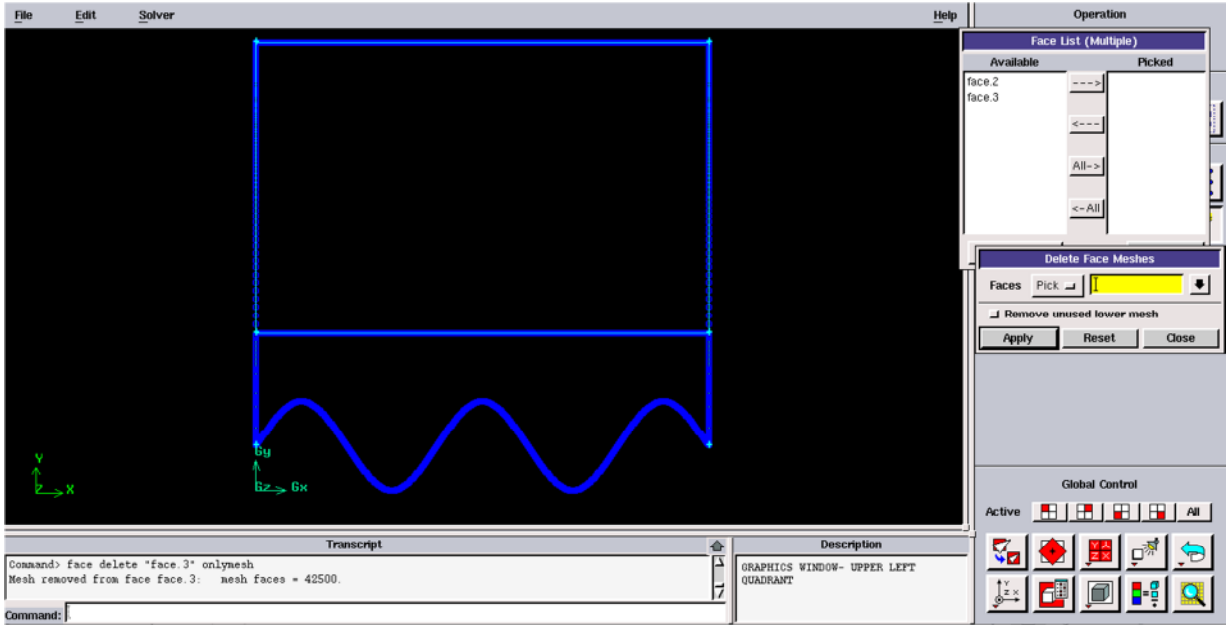
Figure(III.16): visualisation des faces du domaine.

### III.4.6. Maillage de la géométrie obtenue :

Cette procédure se fait en deux étapes (maillage des segments puis maillage des surfaces). Les différents types de maillage existent (présenté en III.1.5.1)

### a. Création du maillage des segments :

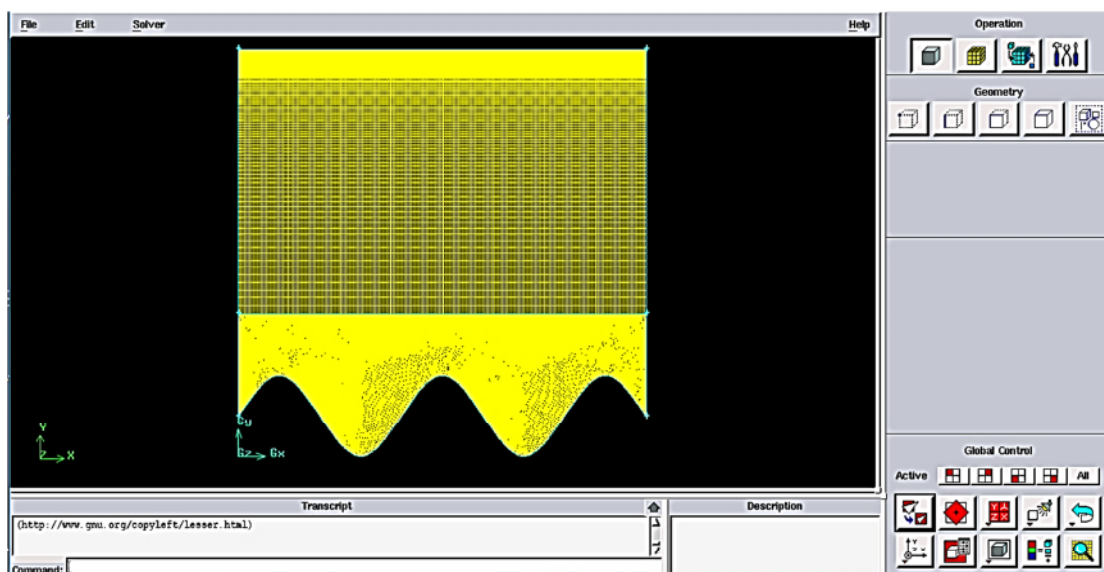
Les étapes à suivre sont : operation >Mesh>Edge>Mesh>Edge. Dans notre cas nous avons choisi un raffinement pour les parois



Figure(III.17): maillage des segments

### b. Maillage des surfaces obtenues :

Les étapes à suivre dans l'ordre pour cette opération : operation >mesh>face>mesh ; nous sélectionnons les faces ; vérifions les critères de maillage



Figure(III.18) : Maillage de domaine

### III.4.7. Mise en place des conditions aux limites

Les étapes à suivre sont : operation > zones > specify Boundry Types. Nous sélectionnons les segments en fonction des conditions aux limites choisies :

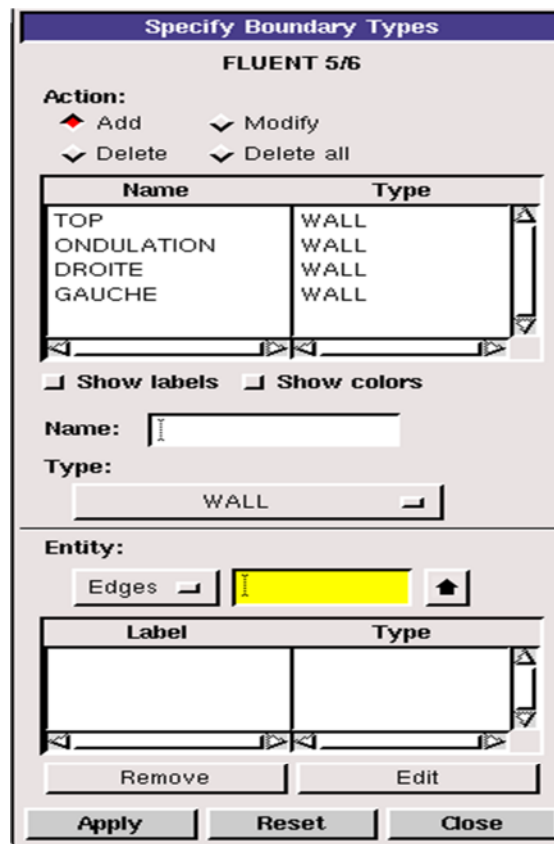


Figure (III.19) : définition des conditions aux limites

### III.4.8. Mise en place le domaine de calculs :

Cette étape sert à définir la face (blocs) de la géométrie. Les étapes à suivre sont : Operation>Zones>Specify Continuum Types.

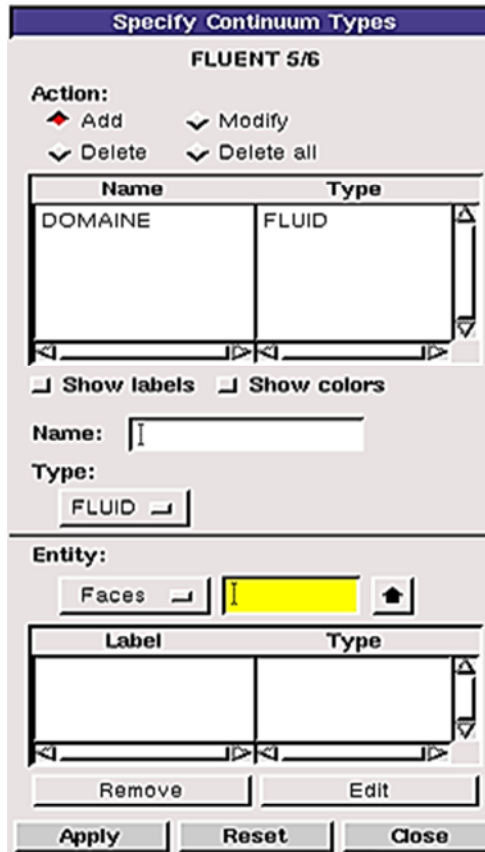


Figure (III.20) : définition de bloc

### III.5. Exportation du maillage de Gambit :

Une fois que toutes les étapes englobant la création de la géométrie à savoir la définition des surfaces, la génération et la vérification du maillage, la définition du type des conditions aux limites ont été réalisées, il va avoir exporter le maillage, en utilisant l'extension 'nom du fichier.msh' pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser et cela après avoir enregistré le travail (file-Save). On peut ensuite fermer Gambit en sauvegardant la session (si on souhaite la rouvrir) et lancer Fluent comme le montre la figure (III.21) :

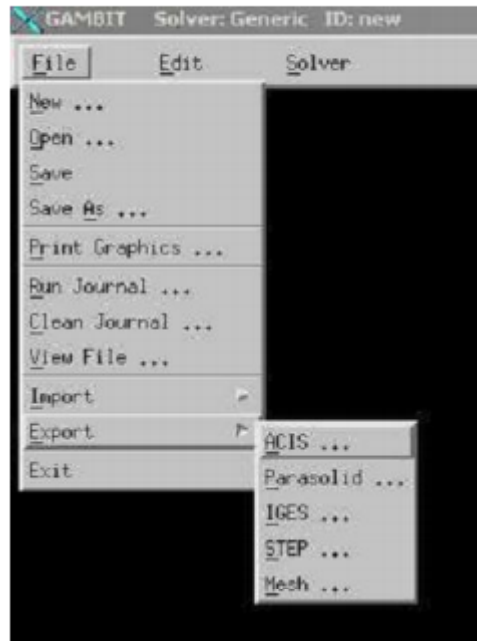


Figure (III.21) : Exportation du maillage généré

### III.6. Présentation du logiciel "Fluent"

Fluent est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques 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 sur plusieurs processeurs simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés. Ainsi, il a les capacités de modéliser :

- Ecoulements 2D ou 3D.
- Etats permanents ou transitoires.
- Ecoulements incompressibles ou compressibles incluant toute vitesse de régimes (subsoniques, transsoniques, supersoniques et hypersoniques).
- Ecoulement non visqueux, laminaire ou turbulent.

- 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 discret 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.6.1. Résolution numérique par la méthode des volumes finis :**

Les trois méthodes numériques les plus utilisées dans les codes de calculs sont les volumes finis, les différences finies et les éléments finis.

La méthode des différences finies consiste à discrétiser les équations continues aux nœuds d'un maillage prédéfini en calculant chaque dérivée partielle à l'aide de série de Taylor tronquées. On obtient des équations non-linéaires reliant la valeur des inconnues en un nœud aux valeurs de ces mêmes inconnues aux nœuds voisins.

La technique des éléments finis discrétise l'espace à l'aide d'éléments géométriques simples (triangle, rectangle en 2D et tétraèdre, hexaèdres en 3D). Elle convient pour modéliser des géométries très complexes. Ensuite, la forme des équations est remplacée par la forme faible dans laquelle les inconnues sont calculées,

La méthode des volumes finis consiste à discrétiser le domaine d'écoulement en multitude de volumes de contrôle (cellule) puis d'effectuer des bilan (de masse, de quantité de mouvement,...) sur ces petits volumes. Pour cette raison, la formulation fait apparaître des intégrations de volume. L'avantage de cette

méthode est que tout ce qui sort d'un volume, rentre dans un autre, cette méthode est donc conservative et permet de simuler des écoulements dans des géométries complexes, à partir de différents types de maillages plus ou moins fins.

### III.6.2. Principales étapes de simulation sous FLUENT :

#### III.6.2.1. Importation de la géométrie (.MSh) :

##### a. Ouvrir la version de Fluent :

Puisque la géométrie est en 2D, et un peu complexe, le choix du 2D double précision semble le plus approprié à notre simulation, alors, on l'a choisi comme suit :

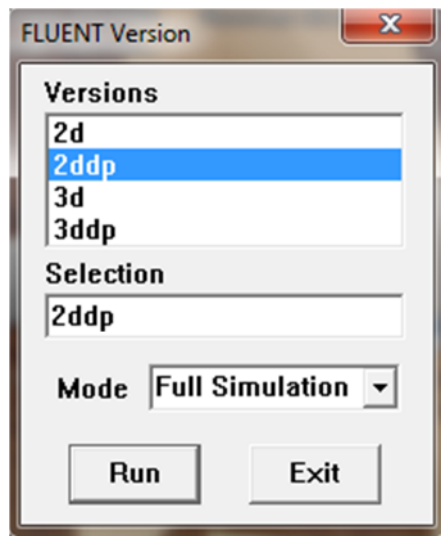


Figure (III.22) : Choix de la version de Fluent.

##### b. Lire le fichier exporté (avec extension .MSh) :

*File*       $\longrightarrow$  *Read*       $\longrightarrow$  *Case*

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

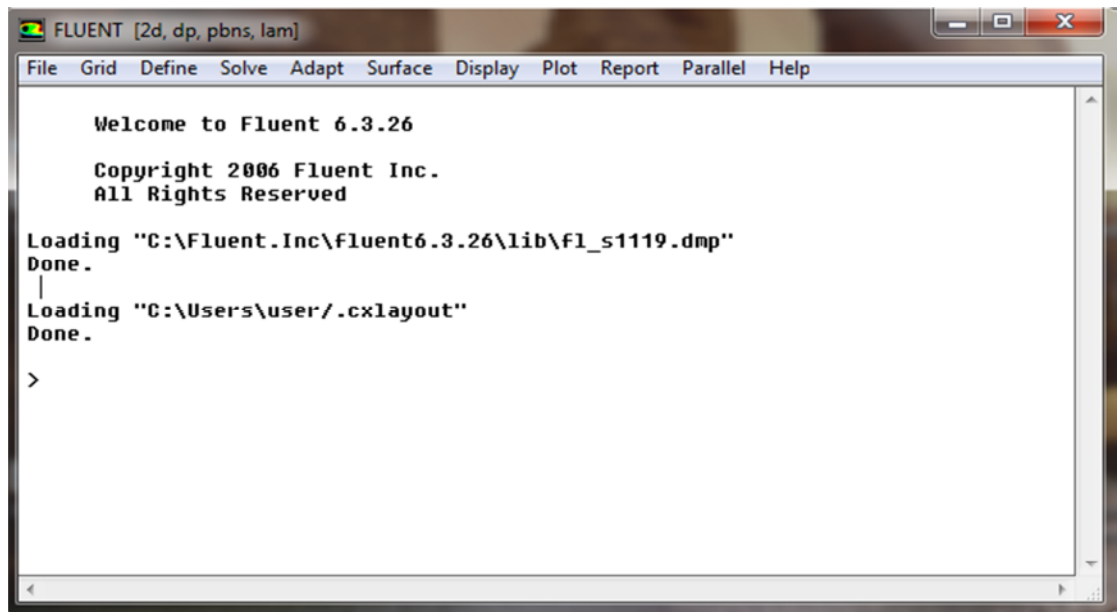


Figure (III.23) : Importation de la géométrie.

### c. Vérification du maillage :

*Grid* —→ *Check*

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

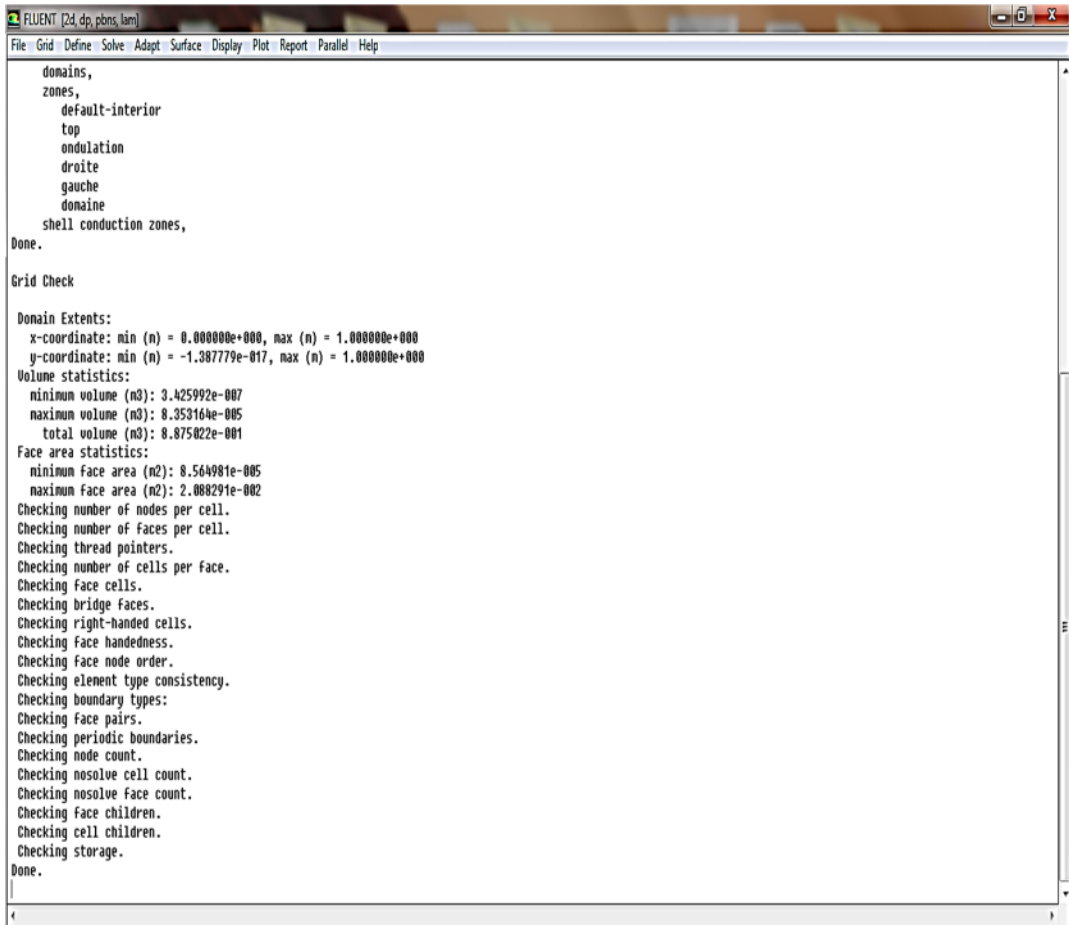
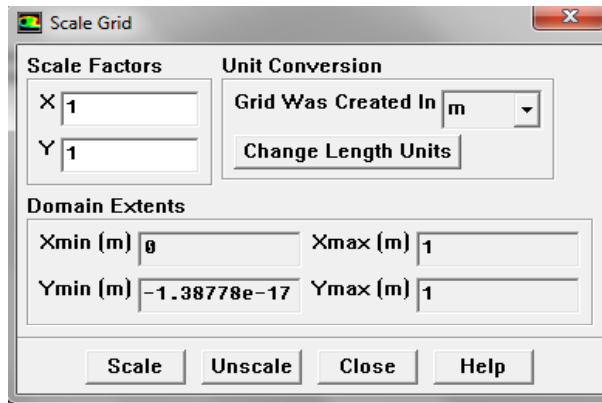


Figure (III.24) : vérification de maillage sous Fluent.

**d. Vérifier l'unité :**

*Grid*       $\longrightarrow$       *Scale*

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

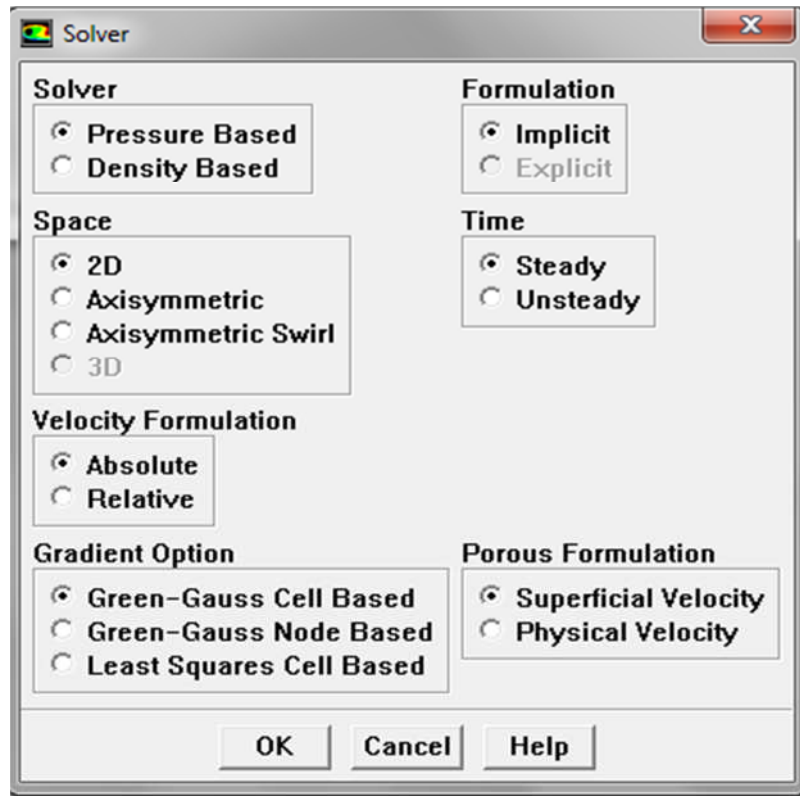


Figure(III.25) : vérification de l'échelle.

### e. Choix du solveur :

*Define* → *Models* → *Solver*

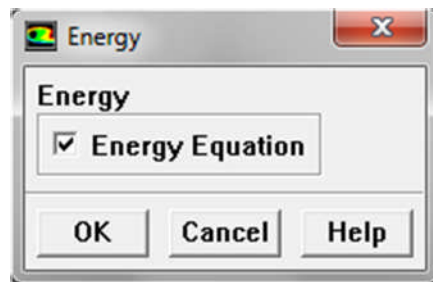
Celui-ci nous permet de définir la dimension de notre espace de travail (2D), la vitesse (absolu), la formulation ou bien la méthode (implicite ou explicite), choisir le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.



Figure(III.26) : choix de solveur.

### f. Autorisation du transfert de chaleur :

*Define* → *Models* → *Energy*

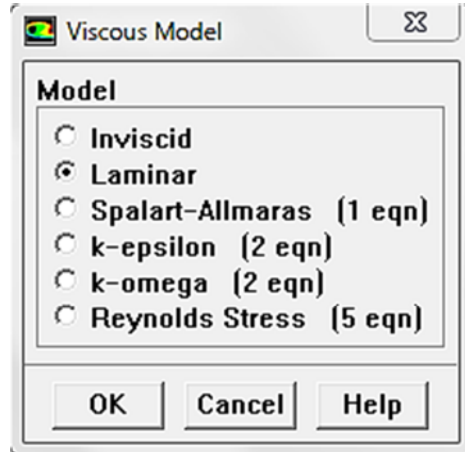


Figure(III.27) : Etablir les équations de l'énergie.

### g. Choix du type d'écoulement :

Define → Models → Viscous

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement. Parmi eux les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents...etc. (écoulement laminaire pour notre cas).

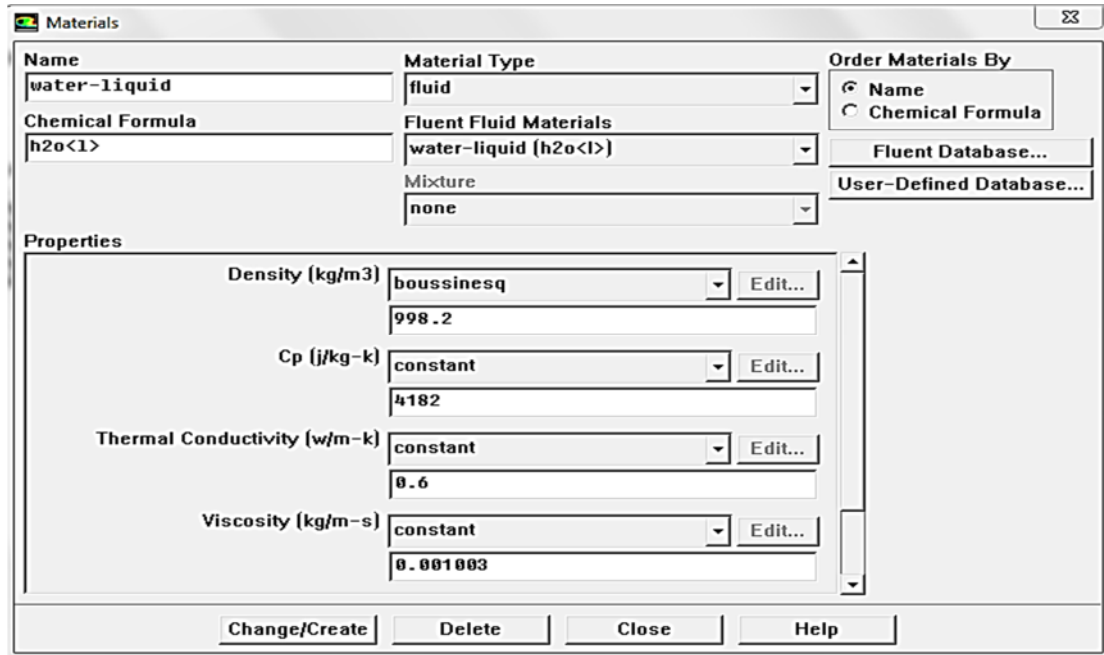


Figure(III.28) : choix de modèle d'écoulement.

### h. Définir les propriétés des matériaux :

Define → Materials...

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

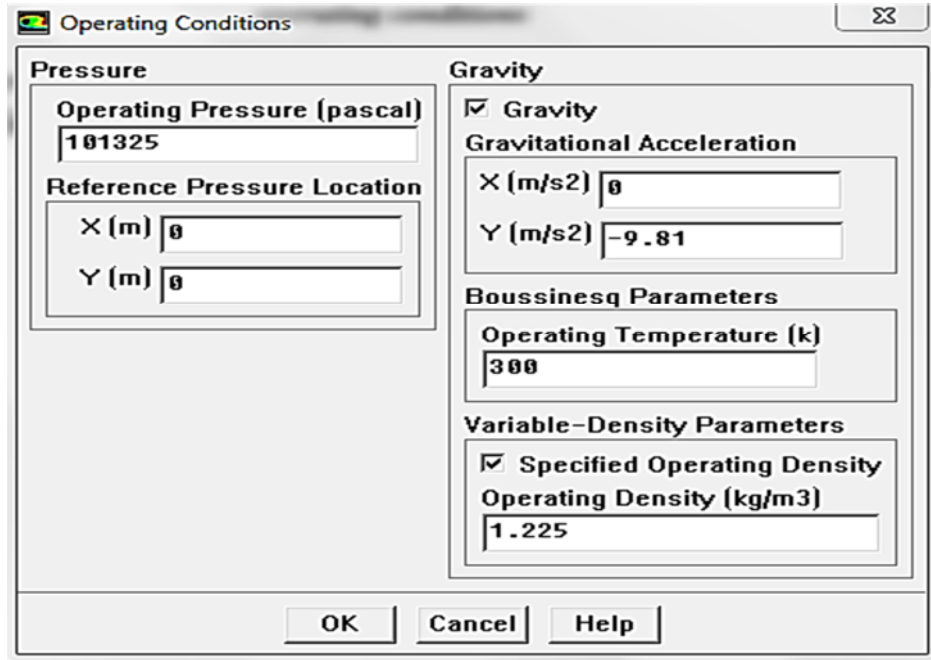


Figure(III.29): définir les propriétés physiques des matériaux.

### i. Conditions d'opération :

*Define* → *operating conditions*

Avant d'imposer les conditions aux limites, il faut choisir tout d'abord la valeur de la pression de référence « operating condition ».

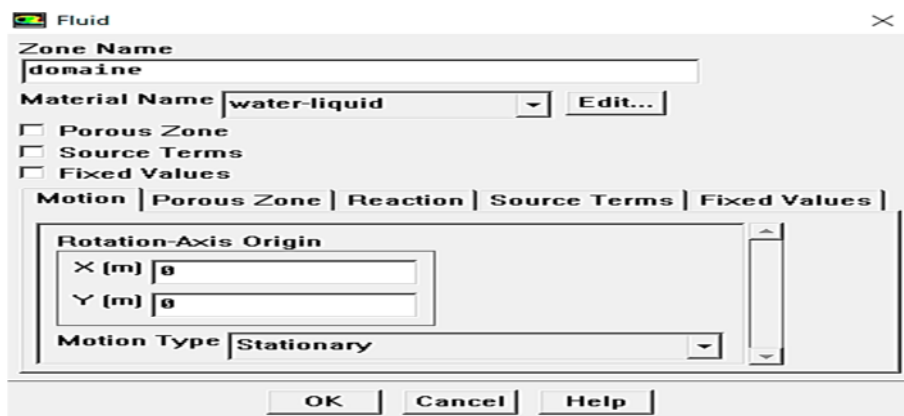


Figure(III.30) : choix de pression de référence.

### III.6.2.2. Les Conditions aux limites :

*Define* → *Boundary Conditions*

Les conditions aux limites pour chaque frontière seront définies avec la fenêtre Boundary condition, après avoir sélectionné chaque fois, la frontière concernée et faire rentrer les conditions aux limites de cette dernière ensuite valider. Il faut fixer les conditions aux limites.



Figure(III.31) : nom de domaine de fluide.

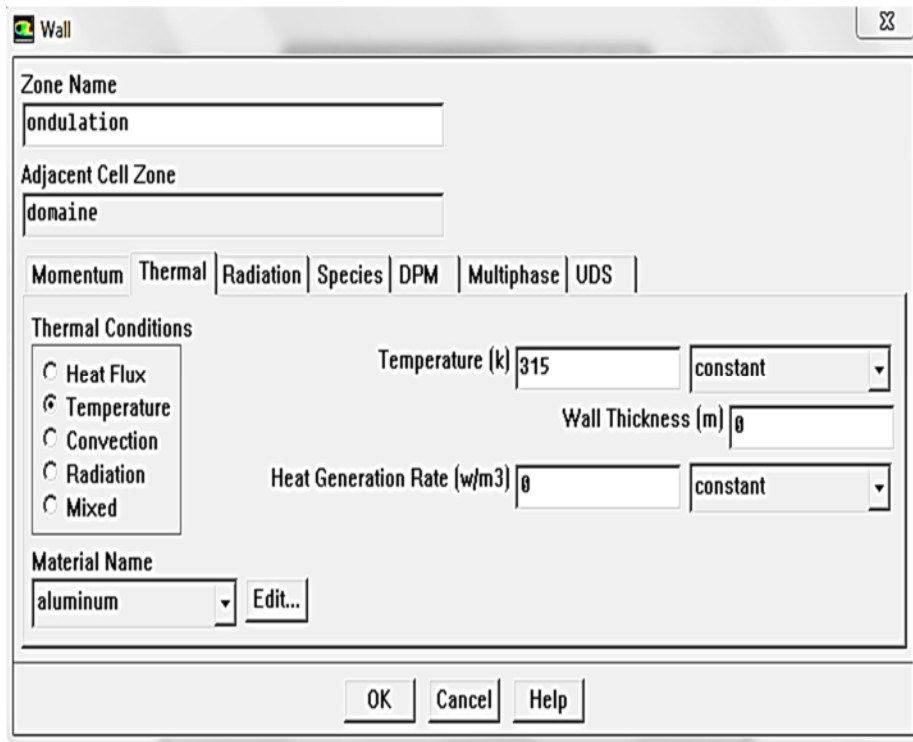
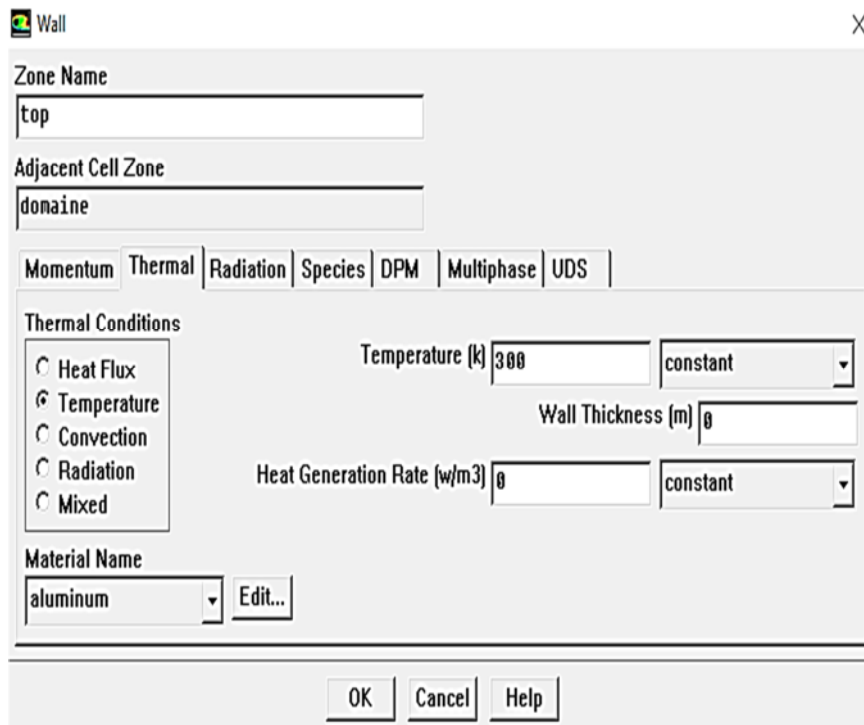


Figure (III.32) : Valeurs des conditions aux limites (paroi inferieur).



Figure(III.33) : valeurs des conditions aux limites (paroi supérieure)

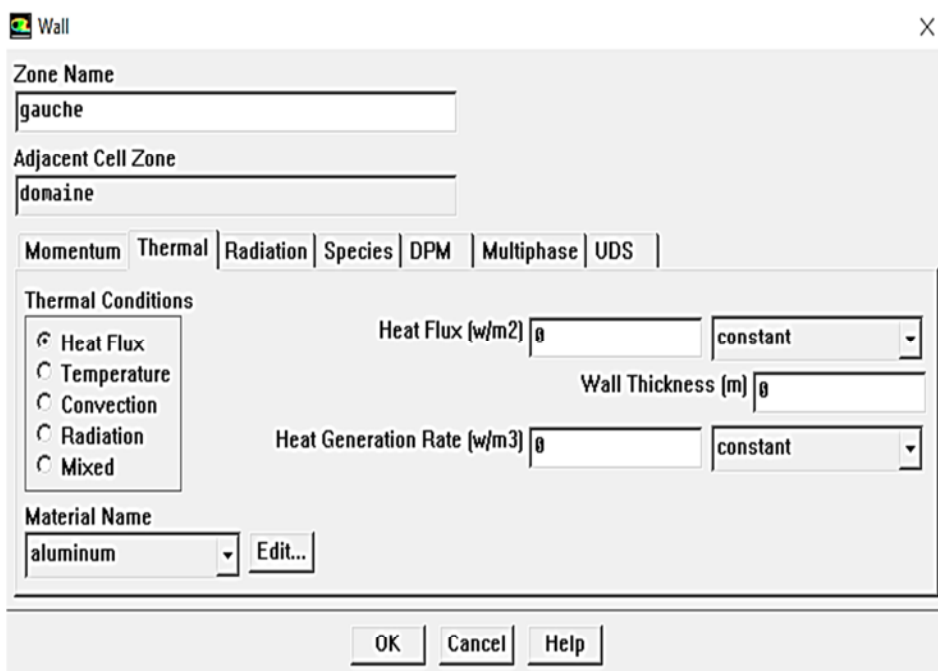


Figure (III.34) : valeur des conditions aux limites (paroi gauche)

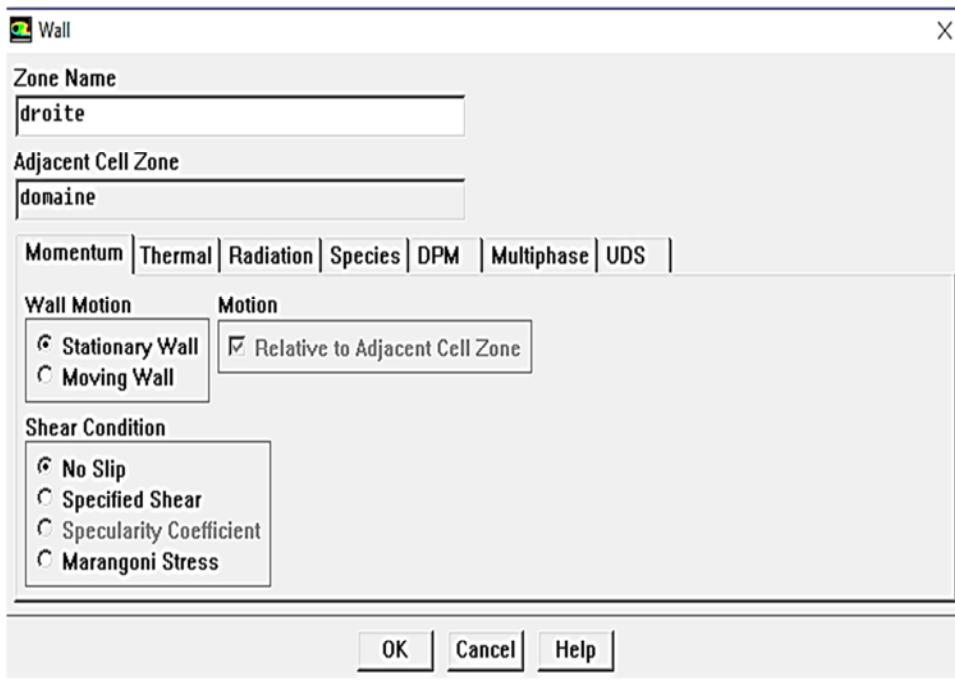


Figure (III.35) : valeurs des conditions aux limites (paroi droite)

**III.6.2.3. Initialisation de la solution.**

Solve → *iInitialize* → *iInitialize*

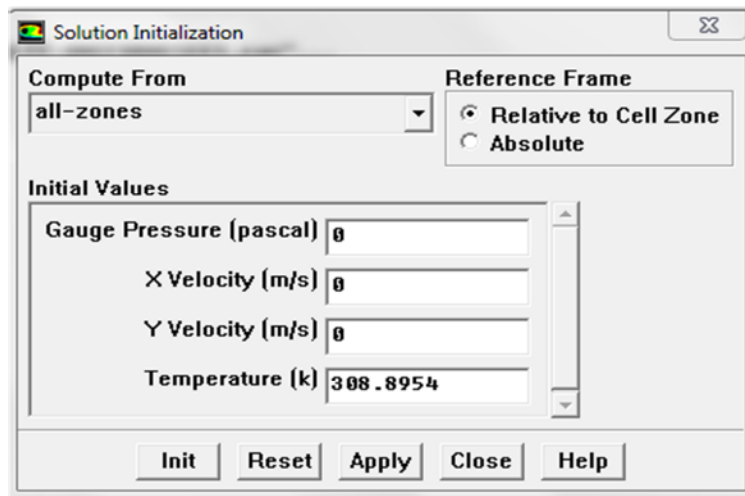


Figure (III.36) : Initialisation de la solution

**III.6.2.4. Choix des critères de convergence.**

Solve → Monitors → Residual

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

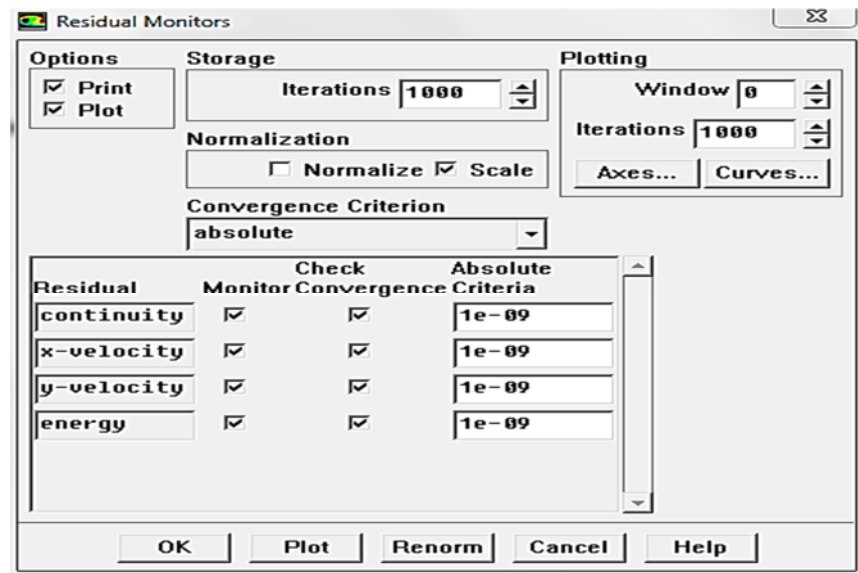


Figure (III.37) : choix de Résidu

### III.6.2.5. Lancement du calcul :

*Solve* → *iterate*

Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations.

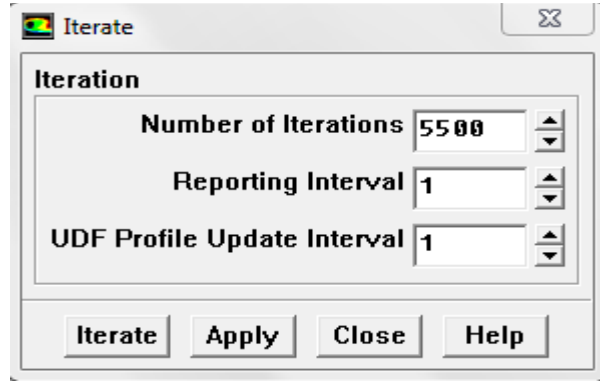


Figure (III.38) : Choix du nombre d'itérations.

### III.6.2.6. La convergence des calculs

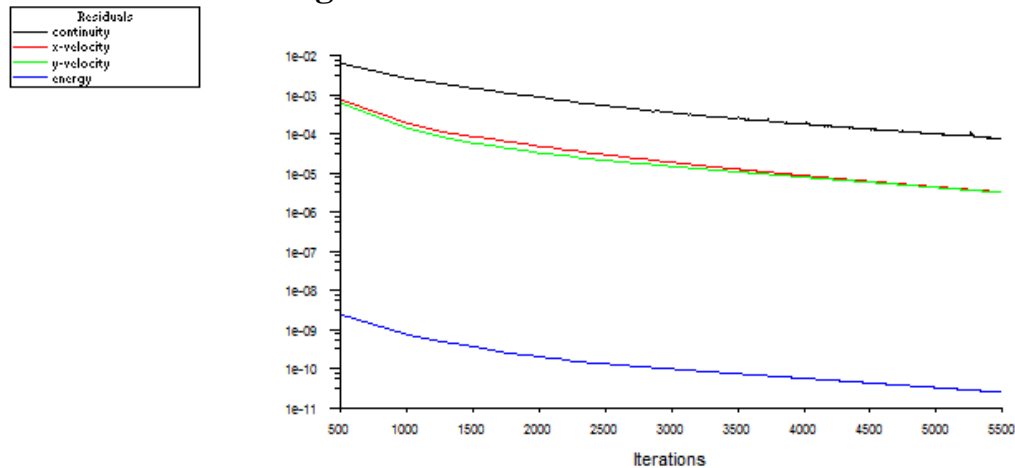


Figure (III.39) Allures de l'évolution des résidus de calcul.

### III.6.2.7. 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.6.3. Traitement graphique des résultats.

Une fois la simulation achevée, après avoir atteindre 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**.

### **III.7. Conclusion :**

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.1. Introduction :

Ce dernier chapitre est destiné aux discussions des résultats issus de la simulation numérique de la convection naturelle, laminaire et stationnaire au sein d'une cavité carrée et ondulé dont les parois horizontales sont maintenues à une différence de températures (15K), alors que les parois verticales sont isolées thermiquement (adiabatique).

Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finies et sont résolues numériquement en utilisant un code CFD : " Ansys Fluent".

Nous allons présenter l'influence de la concentration de nanofluide dans l'eau sur les contours des températures et des vitesses sur le coefficient d'échange convectif ainsi sur le nombre de Nusselt, et ce pour les deux géométries présentées dans le chapitre III.

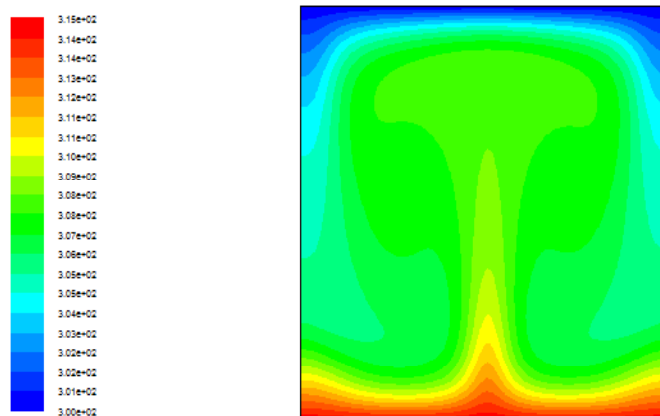
Pour exploiter les résultats, on tire les courbes tracées par Fluent après chaque simulation et pour plus de clarté nous avons présenté l'évolution du nombre de Nusselt, du coefficient d'échange au niveau de la paroi inférieure de la cavité et ce pour différentes concentrations des nanoparticules dans le fluide de base qui est de l'eau.

Le régime laminaire a été adopté dans nos simulations parce que le nombre de Rayleigh passe de ( $2.1 \times 10^5$  pour une concentration nulle) à ( $8.83 \times 10^4$  pour une concentration maximale 8%) et cette marge de variation correspond à un écoulement laminaire. ( $Ra_c = 3.0 \times 10^5$  pour les écoulements dans les enceintes).

### IV.2. Contour de température et ligne de courant pour les deux cas :

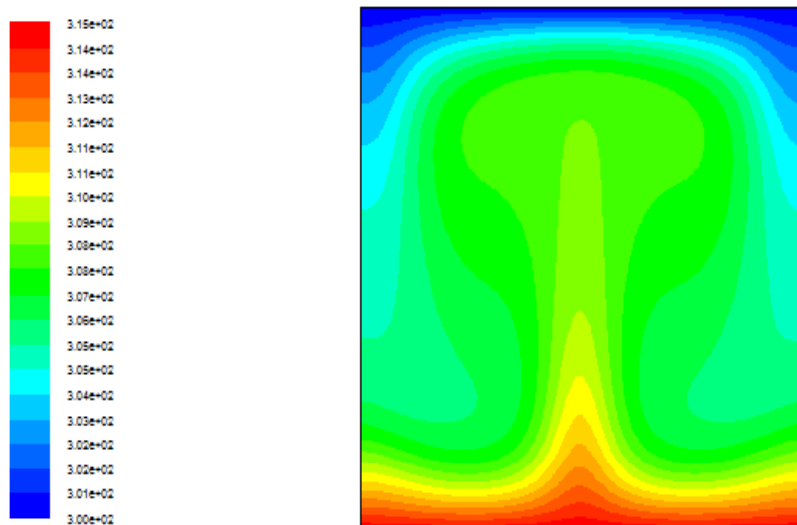
#### IV.2.1. Contour de température

##### IV.2.1.1. cavité carrée à 0% :



**Figure (IV.1) :** contour de température au sein d'une cavité carrée sans ondulation fermée et remplie d'eau à 0% de concentration de nano particule.

## IV.2.1.2. Cavité carrée à 8% :

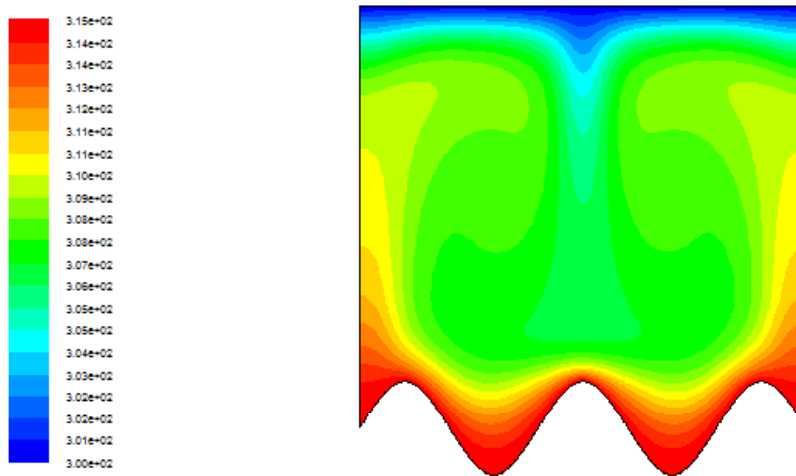


**Figure (IV.2) :** contour de température au sein d'une cavité carrée sans ondulation fermée et remplie de nanofluide (eau + CuO) à une concentration de 8%.

La figure (IV.1 & IV.2) traduit le phénomène de la convection naturelle. Les isothermes présentées montrent que la chaleur récupérée de la paroi inférieure est transportée par convection naturelle vers le haut au milieu de la cavité par la paire de cellules au centre. Ce qui explique la température relativement élevée dans la partie centrale de la cavité. La chaleur est évacuée de façon équitable à travers les deux parois latérales.

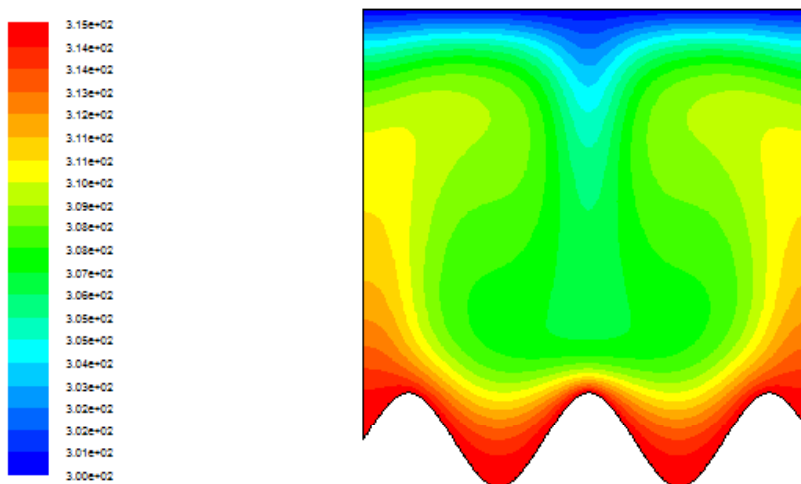
On remarque que la chaleur dans la figure (IV.2) est plus transportable par rapport à la figure (IV.1) cette différence due à l'augmentation de concentration de nano particule (CuO).

## IV.2.1.3. Cavité ondulé à 0% :



**Figure (IV.3) :** contour de température au sein d'une cavité avec ondulation fermée et remplie de l'eau à 0% concentration de nano particule.

## IV.2.1.4. Cavité ondulé à 8%:



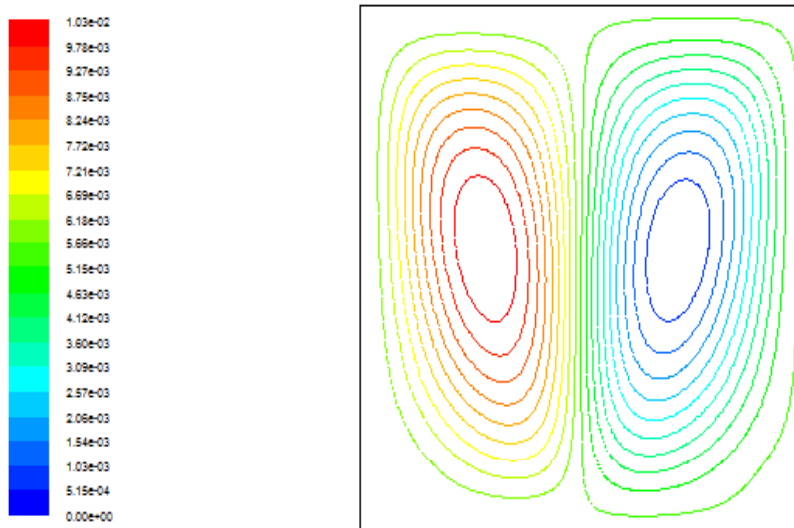
**Figure (IV.4) :** contour de température au sein d'une cavité avec ondulation fermée et remplie de nanofluide (eau + CuO) à une concentration de 8% de nanoparticule.

La figure (IV.3 & IV.4) traduit le phénomène de la convection naturelle. Les isothermes présentées montrent que la chaleur récupérée de la paroi inférieure est transportée par convection naturelle vers le haut aux extrémités gauche et droite de la cavité par la paire de cellules au centre. Ce qui explique la température relativement

élevée dans les côtés gauche et droite de la cavité, contrairement au cas simple où on constate des températures faibles à ce niveau. La chaleur est évacuée de façon équitable à travers les deux parois latérales.

## IV.2.2. lignes de courant :

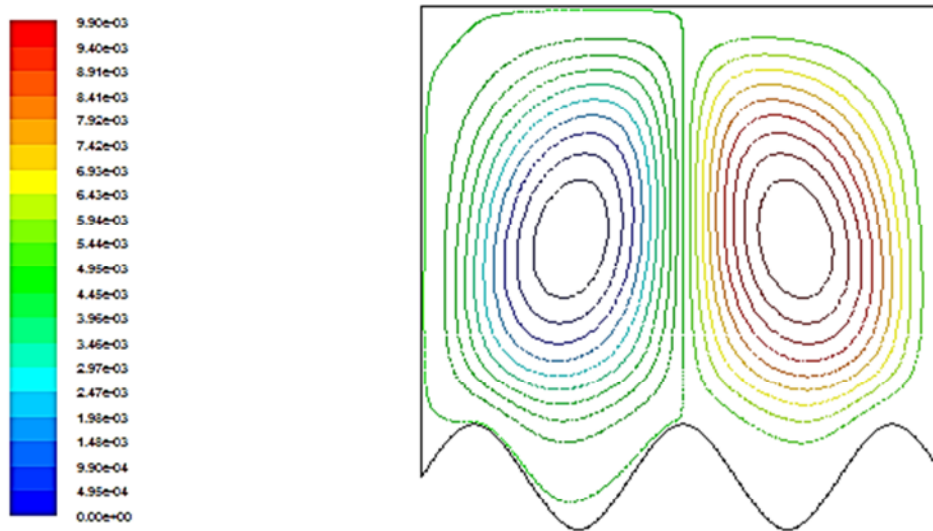
### IV.2.2.1. Cavité carrée à 8% :



**Figure (IV.5) :** ligne de courant au sein de cavité carrée à 8% de concentration.

Nous remarquons à partir de la figure ci-dessus que la quantité de fluide proche du centre de la paroi inférieure se déplace vers la paroi supérieure où elle se divise en deux flux l'un se dirige vers la paroi adiabatique gauche et l'autre se dirige vers la paroi adiabatique droite ce qui donne naissance de deux cellules contrarotatives celle de droite qui tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et la seconde tourne dans le sens contraire, c'est le phénomène de formation des boucles de Rayleigh-Bénard.

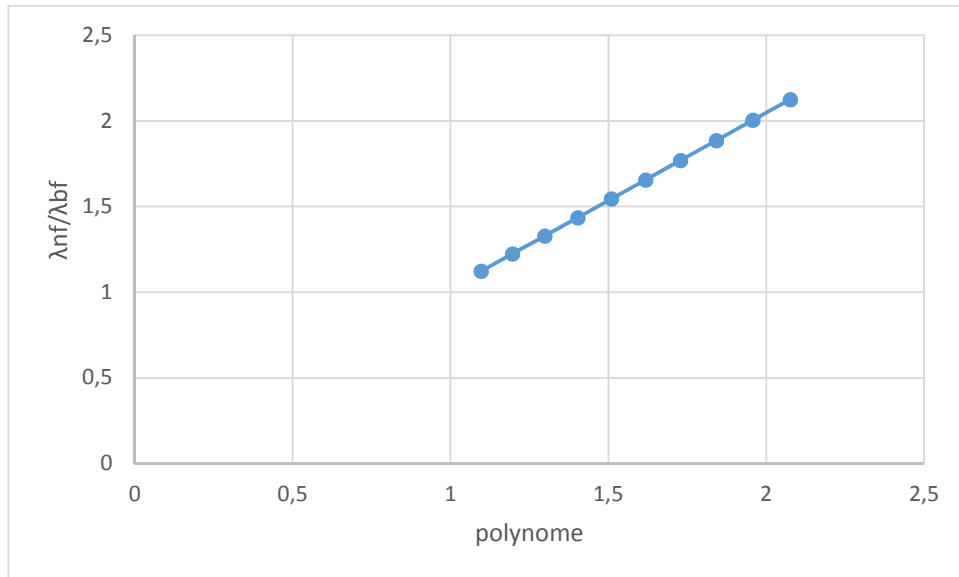
## IV.2.2.2. Cavité ondulé à 8% :



**Figure (IV.6)** : ligne de courant au sein d'une cavité avec ondulation à 8% de concentration de CuO

La figure (IV.5&IV.6) : représente la différence de température entre la paroi inférieure et supérieure de la cavité donne toujours naissance aux boucles de Rayleigh-Bénard mais seulement la présence de l'ondulation, dans ce cas, inverse le sens de rotation dans les boucles qui se forment c'est à dire celle de gauche tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et inversement pour celle de droite.

### IV. 3. Evolution de coefficient d'échange à la paroi inferieur en fonction polynôme de concentration



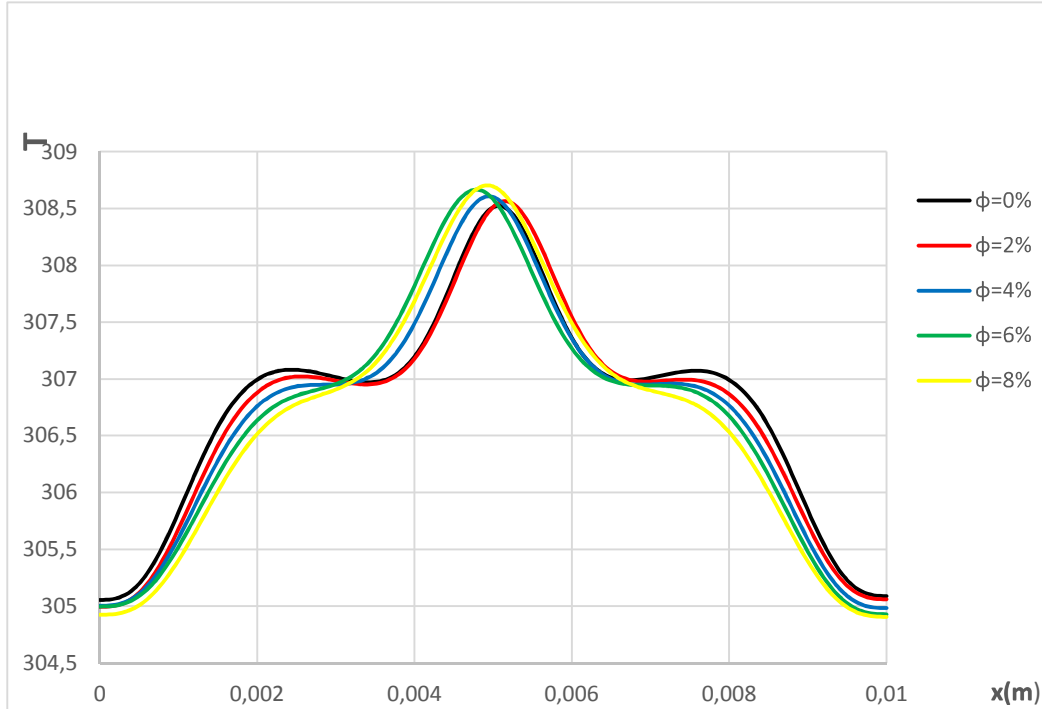
**Figure(IV.7)** : figure représente l'Evolution de coefficient d'échange à la paroi inferieur en fonction de polynôme de concentration ( $11.6\phi^2 + 9.6\phi + 1$ )

La figure représente la variation de rapport  $\lambda_{nf}/\lambda_{bf}$  (rapport de coefficient de transfer conductive de nanofluide au coefficient du conductive de fluide de base ) en fonction de polynome de la concentration des nanoparticules .

Nous aubservons que l'amélioration du rapport est proportionnelle à la concentration  $\phi$  ceci est dû essentiellement à l'amélioration de la conductivité thermique du nano fluide au fur et à mesure que la concentration augmente

## IV.4. Evolution de température :

### IV.4.1. Cavité carrée :



**Figure(IV.8) :** évolution de température au niveau de la ligne médiane (entre la paroi chaude et froide) pour différentes concentrations de CuO (cavité carrée).

La figure (IV.8) : représente l'évolution de la température au niveau de la ligne médiane pour des concentrations de nano particule allant de 0% à 8% avec un pas de 2%.

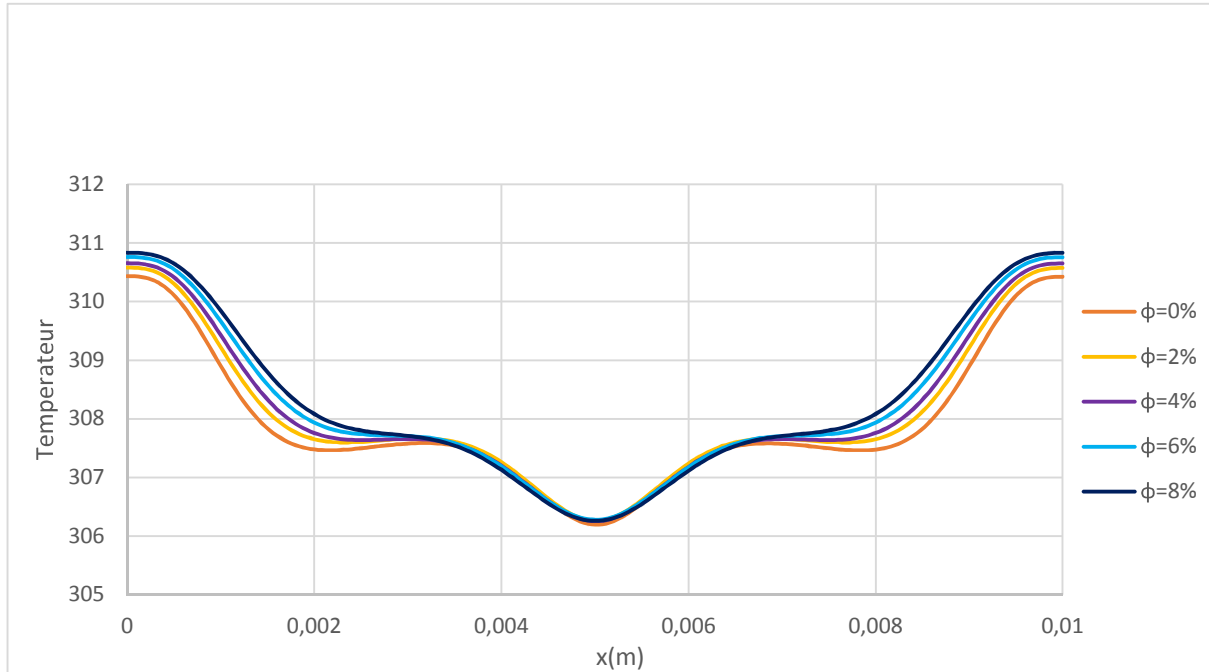
Une symétrie est aperçue au niveau de l'axe de cavité, Nous constatons une allure similaire qui se présente comme suit :

Une augmentation progressive de la température (de 0 à 0.002m et de 0.01 m à 0.008m). Suivie d'une zone où l'évolution est moins importante (la pente de la courbe diminue) voire constantes pour les faibles concentrations (de 0.002m à 0.004m et de 0.008m à 0.006m).

Deux autres zones d'augmentation progressive sont aussi aperçues pour les segments (de 0.004 à 0.005 et de 0.006 à 0.005).

L'évolution de température est sensiblement affectée par la présence des nanoparticules dans le fluide de base ce qui est matérialisée par le changement de l'allure des courbes au fur et à mesure que la concentration augmente.

## IV.4.2. Cavité ondulé :



**Figure(IV.9) :** évolution de température au niveau de la ligne médiane pour différentes concentrations de CuO (cavité ondulé)

La figure(IV.9) : représente l'évolution de la température au niveau de la ligne médiane pour différentes concentrations de nano particule allant de 0% à 8% avec un pas de 2%.

Une symétrie est aperçue au niveau de l'axe de cavité, Nous constatons une allure similaire qui se présente comme suit :

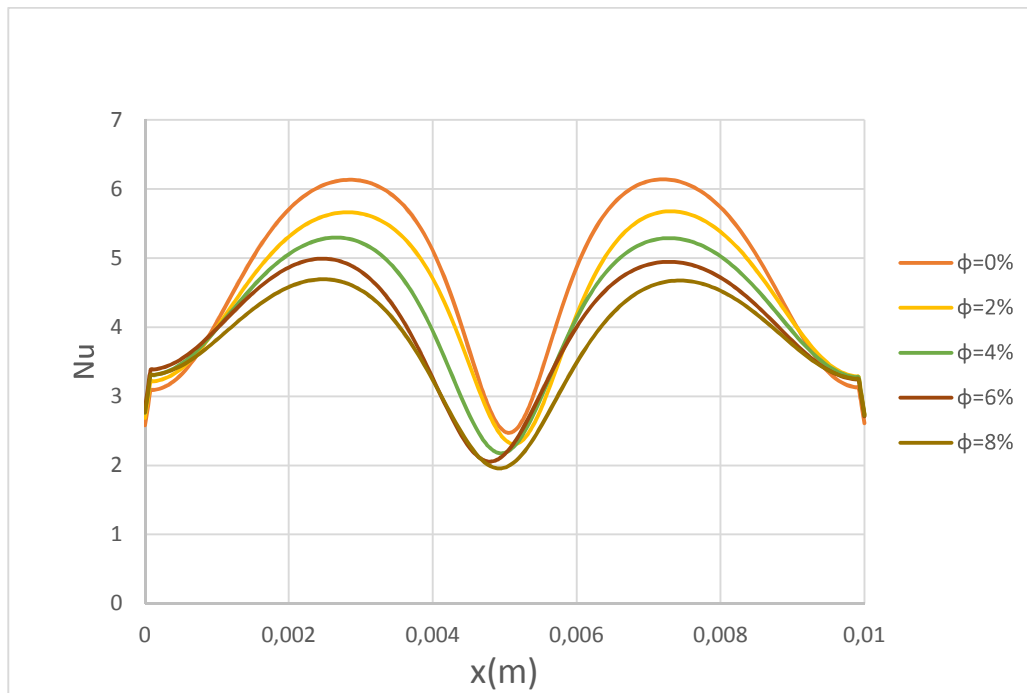
Une diminution progressive de la température (de 0 à 0.002m et de 0.01 à 0.008). Suivie d'une zone où l'évolution est moins importante (la pente de la courbe diminue) voire constantes pour les faibles concentrations (de 0.002m à 0.004m et de 0.008m à 0.006m).

Deux autres zones de diminution progressive sont aussi aperçues pour les segments (de 0.004 à 0.005 et de 0.006 à 0.005).

L'évolution de température est sensiblement affectée par la présence des nanoparticules dans le fluide de base ce qui est matérialisée par le changement de l'allure des courbes au fur et à mesure que la concentration augmente.

## IV.5. Evolution de nombre de Nusselt à la paroi chaude :

### IV.5.1. Cas simple :



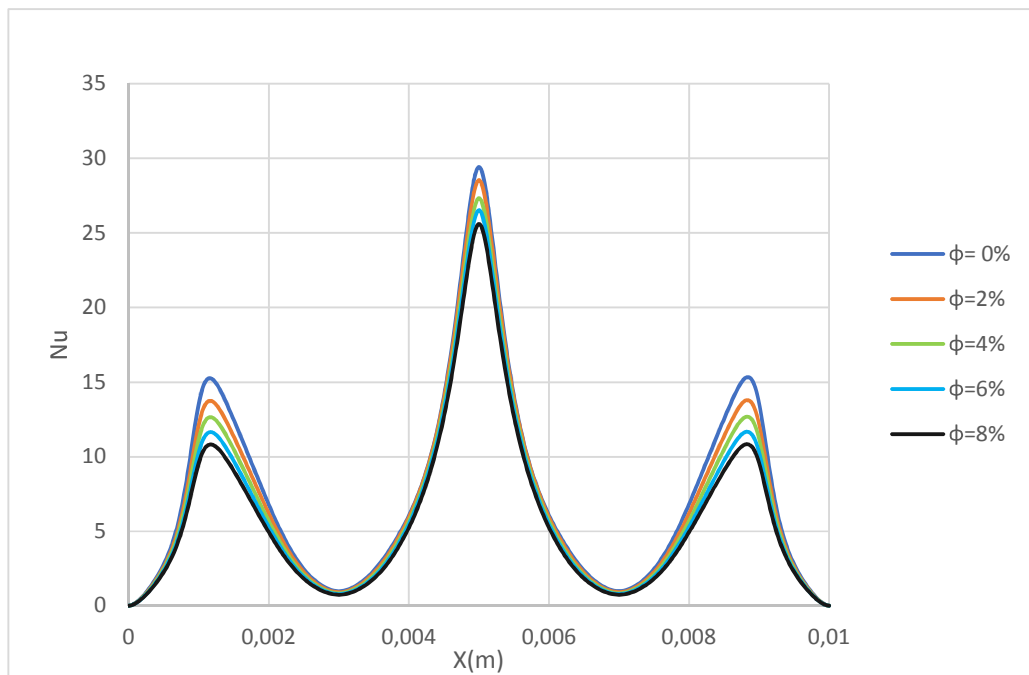
**Figure(IV.10)** : évolution de nombre de Nusselt en fonction de l'abscisse x à la paroi inférieure dans une cavité carrée pour différents concentrations de nanoparticule (CuO)

La figure (IV.10) représente la variation du nombre de Nusselt le long de la paroi inférieure pour différentes concentrations de nanoparticule (CuO) allant de 0% à 8% avec un pas de 2%.

On remarque que la valeur de Nusselt diminue avec l'augmentation de la concentration de nanoparticule (CuO). Ce qui peut être expliqué par le fait de l'augmentation de la conductivité du nanofluide avec l'augmentation de la concentration.

Des valeurs minimales du nombre de Nusselt sont obtenues au milieu de la paroi inférieure.

## IV.5.2. : Cas ondulé :



**Figure(IV.11)** :évolution de nombre de Nusselt le long de la paroi inférieure pour différents concentrations de nanoparticule (CuO).

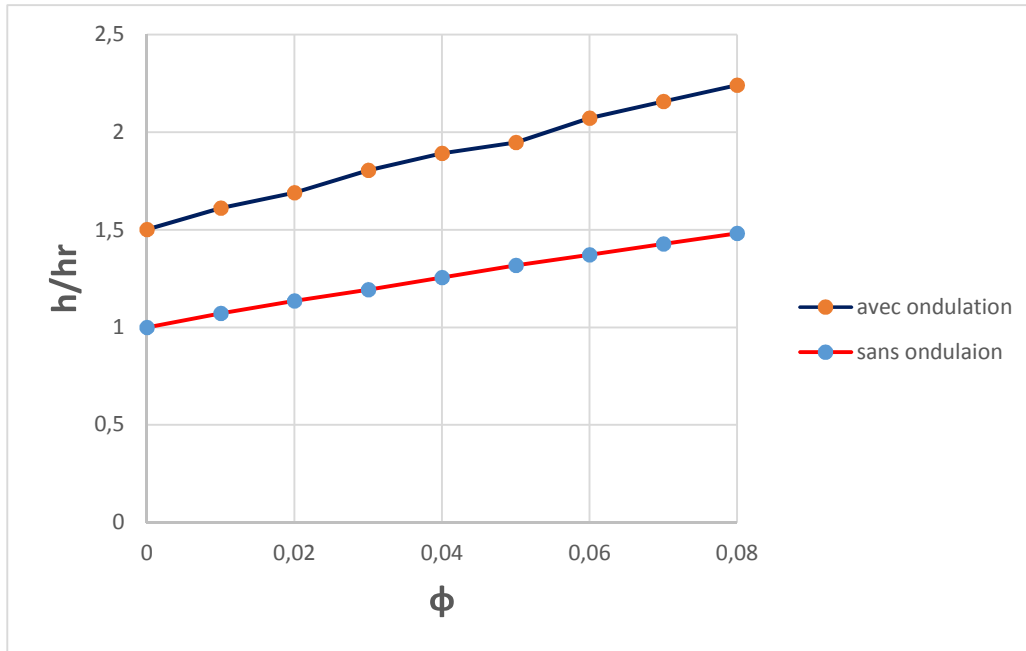
La figure (IV.11) représente la variation du nombre de Nusselt le long de la paroi inférieure pour différentes concentrations de nanoparticule (CuO) allant de 0% à 8% avec un pas de 2%.

On remarque que la valeur de Nusselt diminue avec l'augmentation de la concentration de nanoparticule (CuO). Ce qui peut être expliqué par le fait de l'augmentation de la conductivité du nanofluide avec l'augmentation de la concentration.

Des valeurs maximales du nombre de Nusselt sont obtenues au milieu de la paroi inférieure.

#### IV.6. Evolution du coefficient d'échange à la paroi inferieure en fonction de la concentration :

Pour les deux cas :



**Figure (IV.12) :** figure récapitulative des différents rapports ( $h/hr$ ) en fonction des concentrations de nanoparticules pour les deux cas.

La figure représente la variation de rapport  $h/hr$  (rapport de coefficient de transfert convectif de nanofluide au coefficient du transfert convectif de référence) en fonction de la concentration des nanoparticules du 0% à 8% avec un pas de 2%.

Nous observons que l'amélioration du coefficient est proportionnelle à la concentration  $\phi$  ceci est dû essentiellement à l'amélioration de la conductivité thermique du nano fluide au fur et à mesure que la concentration augmente. Cependant, l'augmentation de la concentration ne devait pas dépasser 10% pour éviter le phénomène d'agrégation. Aussi nous constatons que le type de la géométrie de cavité est un facteur important pour le perfectionnement de transfert thermique, parce que nous voyons clairement que le rapport  $h/hr$  pour la cavité ondulée est toujours supérieur à  $h/hr$  pour la cavité simple .

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'apporter une amélioration du transfert de chaleur par l'utilisation des nano fluides. Dans ce cadre, nous avons étudié numériquement la convection naturelle dans une cavité chauffée d'en bas, sans et en présence de nanofluide (Eau-CuO), et ce pour deux géométries différentes. L'influence de certains paramètres tels que la fraction volumique, le type de la géométrie sur le transfert de chaleur ont été mise en évidence

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

L'ajout des nanoparticules (CuO) aux fluides de base (Eau), avec des proportions adéquates (ne dépassant pas 8%) pour éviter l'agrégation, améliore significativement le transfert de chaleur.

L'augmentation du transfert de chaleur en convection naturelle est proportionnelle à l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

Une diminution de nombre de Nusselt est clairement aperçue au fur et à mesure que la fraction volumique augmente vu l'amélioration de la conductivité thermique du fluide.

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. Les résultats trouvés peuvent être confronter à d'autres résultats qui seront trouvés en utilisant d'autre approche telle que celle de Lagrange où considère les nanoparticules comme corps solides présents dans le fluide de base avec lequel elles échangent de la chaleur et de quantité de mouvement.

# **Bibliographie**

# Bibliographie

- [1]**S.U.S. Choi**. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Developments and applications of Non-Newtonian Flows. D.A. Siginer and H.P. Wang (Eds.), FED-vol. 231/MD-vol. 66, ASME, New York, 99-105, 1995.
- [2]**Fourier, J.** Théorie Analytique de la Chaleur. Paris : Chez Firmin Didot. (1822).
- [3]**Gladés Bachir**. Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard. Thèse doctorat L'Université Toulouse III- Paul Sabatier 2010.
- [4] **Stephen U. S. Choi\* and J. A. Eastman**. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. International mechanical engineering congress and exhibition 1995
- [5]**J. Boussinesq**. Théorie analytique de la chaleur, Vol.2. Gauthier-Villars, Paris, 1903.
- [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]**H.C. Brinkman**. The viscosity of concentrated suspensions and solution. J. Chem. Phys., 20, pp.571–581, (1952).
- [8]**Y. Xuan and W. Roetzel**. «Conception for heat transfer correlation of nanofluids», International Journal of Heat and Mass Transfer, 43(19), pp.3701-3707, (2000)
- [9]**LOAN C. POPA**, Modélisation numérique du transfert thermique – méthode des volumes finies, Universitaria Craiova, pp. 36-43 (2002).
- [10]**Suhas V.Patankar**. « Numerical heat transfer and fluid flow », Hemisphere publishing corporation, États-Unis d'Amérique, ISBN 0-89116-522-3 (1980).

# **Annexe**

## A. Les propriétés thermophysiques

### A.1. Les Propriétés thermophysiques des fluides de base et les nanoparticules

Les propriétés thermophysiques de différentes nanoparticules ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CuO, Cu, Ag et Au) et de fluide de base (eau et EG) à une température ambiante  $T= 20\text{ }^\circ\text{C}$  sont présentées au niveau du tableau (a)

| Les Propriétés thermophysiques        | Les fluides de base |       | Les phases solides      |      |      |       |       |
|---------------------------------------|---------------------|-------|-------------------------|------|------|-------|-------|
|                                       | eau                 | EG    | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | CuO  | Cu   | Ag    | Au    |
| $C_p(\text{J kgK})$                   | 4181.8              | 2386  | 761.55                  | 561  | 385  | 235   | 129   |
| $\rho(\text{kg m}^3)$                 | 998.2               | 1117  | 3960.14                 | 6450 | 954  | 10500 | 19300 |
| $K(\text{W mK})$                      | 0.593               | 0.257 | 37.17                   | 20   | 401  | 429   | 317   |
| $\beta(\text{K}^{-1}) \times 10^{-6}$ | 210                 | 618   | 7.5                     | 18   | 16.7 | 19.7  | 14.2  |
| $\mu \times 10^{-3} (\text{Pa.s})$    | 1.002               | 21.4  |                         |      |      |       |       |

**Table (a)** : Propriétés thermophysiques des différentes nanoparticules et des fluides de base à  $T=20^\circ\text{C}$ .

## A.2. Tableau des propriétés thermophysiques de nanofluide (eau CuO)

| concentration<br>$\phi$ | Les Propriétés thermophysiques |                 |            |                                     |                                |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------|
|                         | $C_p(J\ kgK)$                  | $\rho(kg\ m^3)$ | $K(W\ mK)$ | $\beta(K^{-1})$<br>$\times 10^{-6}$ | $\mu \times 10^{-3}$<br>(Pa.s) |
| 0%                      | 4181,8                         | 998,2           | 0,593      | 210                                 | 1,002                          |
| 1%                      | 3959,95369                     | 1052,718        | 0,65061588 | 198,236166                          | 1,0277013                      |
| 2%                      | 3759,95389                     | 1107,236        | 0,70960752 | 187,630785                          | 1,0547052                      |
| 3%                      | 3578,72499                     | 1161,754        | 0,76997492 | 178,020769                          | 1,0830117                      |
| 4%                      | 3413,74285                     | 1216,272        | 0,83171808 | 169,272268                          | 1,1126208                      |
| 4%                      | 3262,91647                     | 1270,79         | 0,894837   | 161,274404                          | 1,1435325                      |
| 6%                      | 3124,4989                      | 1325,308        | 0,95933168 | 153,934542                          | 1,1757468                      |
| 7%                      | 2997,01931                     | 1379,826        | 1,02520212 | 147,174687                          | 1,2092637                      |
| 8%                      | 2879,23046                     | 1434,344        | 1,09244832 | 140,928703                          | 1,2440832                      |

**Table (b) :** Propriétés thermophysiques de nanofluide pour différents concentrations de nanoparticules dans l'eau.

## B. Nombre de nusselt et de coefficients du transfert convectif

Dans le tableau (b) nous donnons les variations de nombre de nusselt et de coefficients du transfert convectif lors de la simulation en fonction de concentration de nanoparticule(CuO) dans le fluide de base (eau) pour différent cavité.

| Concentration<br>$\phi$ | Cavité carré sans ondulation |           | Cavité carré avec ondulation |           |
|-------------------------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
|                         | $\overline{Nu}$              | $\bar{h}$ | $\overline{Nu}$              | $\bar{h}$ |
| 0%                      | 4.741621                     | 284.4973  | 7.119779                     | 427.1868  |
| 1%                      | 4.582204                     | 305.2141  | 6.910278                     | 460.2838  |
| 2%                      | 4.44906                      | 323.2154  | 6.709006                     | 487.396   |
| 3%                      | 4.310219                     | 339.766   | 6.513735                     | 513.4647  |
| 4%                      | 4.196703                     | 357.3469  | 6.319797                     | 538.127   |
| 5%                      | 4.091166                     | 374.7974  | 6.047027                     | 553.9766  |
| 6%                      | 3.976728                     | 390.5712  | 6.002382                     | 589.5192  |
| 7%                      | 3.871242                     | 406.3174  | 5.847495                     | 613.7406  |
| 8%                      | 3.771338                     | 421.7955  | 5.699825                     | 637.4821  |

**Table (c) :** variations de nombre de nusselt et de coefficients du transfert convectif

## C : Propriétés thermophysiques des nanofluides :

**Masse volumique :**  $\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \rho_p \phi$

**Conductivité thermique :**  $\lambda_{nf} = \lambda_{bf}(11.6\phi^2 + 9.6\phi + 1)$

**Viscosité dynamique :**  $\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2)$

**Chaleur spécifique :**  $(c_p)_{nf} = \frac{1}{\rho_{nf}} ((1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p)$

**Coefficient d'expansion thermique :**

$$(\beta_{nf}) = \frac{1}{\rho_{nf}} ((1 - \phi)(\rho\beta)_{bf} + \phi(\rho\beta)_p)$$