

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AMMAR TELIDJI – LAGHOUAT
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Promotion N° 12 / Univ. Lagh.
N° / 2022/ Mécanique



MEMOIRE

Présenté pour Obtenir le Diplôme de MASTER en Génie Mécanique

Option : Energétique

THÈME

**L'effet de la fraction volumique solide des
nanoparticules sur la convection naturelle**

Par :

BOUZALEKH Hicham & HAMAMA Zakaria

Soutenu devant Le Jury :

Mme. Maria hannane REGUE	M.C.B	Univ. Laghouat	Président
Mme. Badia GHERNAOUT	Pr.	Univ. Laghouat	Encadreur
Mr. Ahmed BENCHATTI	Pr.	Univ. Laghouat	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Résumé

L'objet de notre travail est la simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité carré remplie d'un nanofluide (Al_2O_3 ; Cu; TiO_2) de différentes fractions volumiques, Les parois verticales de l'enceinte sont soumises à des gradients de températures, tandis que les parois horizontales sont maintenues adiabatiques et imperméables. L'écoulement du transfert thermique régit par l'équation de continuité, de quantité de mouvement, et d'énergie. Nous avons utilisé ANSYS, ce logiciel basé sur une méthode de volumes finis, pour résoudre le système d'équations trouvé. La structure de l'écoulement dans la cavité et le taux de transfert de chaleur en faisant varier le nombre de Rayleigh ($\text{Ra} = 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 5 \times 10^5, 10^6$) et les fractions des nanoparticules dans l'eau ont été déterminé. Les résultats obtenus sont présentés sous forme des champs de température, les lignes de courants, profils des vitesses horizontale et verticale.

Abstract

The object of our work is the numerical simulation of natural convection in a square cavity filled with a nanofluid (Al_2O_3 ; Cu; TiO_2) of different volume fractions, The vertical walls of the enclosure are subjected to temperature gradients, while the horizontal walls are kept adiabatic and impermeable. The flow of heat transfer governed by the equation of continuity, momentum, and energy. We used ANSYS, this software based on a finite volume method, to solve the system of equations found. The structure of the flow in the cavity and the rate of heat transfer by varying the Rayleigh number ($\text{Ra} = 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 5 \times 10^5, 10^6$) and the fractions of the nanoparticles in water were determined. The results obtained are presented in the form of temperature fields, current lines, horizontal and vertical velocity profiles.

إهداء

أبدأ بالحمد مصليا على سيدنا محمد خير نبي أرسل

الى ينبوع العطاء والدي الغالي

الي نبع الحنان امي الغالية

الى من يحملون في عيونهم طفولتي و شبابي أخواتي و أخواتي

الى من ضاقت السطور من ذكرهم فوسعهم قلبي أصدقائي

الى من ضحوا بحرمتهم من اجل حرية غيرهم

الى من هم أكرم منا مكانة شهداء فلسطين

الى كل محبي العلم و المعرفة

الى الاساتذة الكرام الذين بذلوا كل جهد وعطاء فكانوا سبيلا في تحفيزي

Sommaire

Résumé.....	2
Abstract.....	2
Dédicace.....	3
Sommaire.....	4
Nomenclature.....	7
Introduction.....	9

Chapitre I. Définitions et Revue

1. La convection	12
2. La convection dans les cavités	12
2.1 Cavité avec gradient vertical de température	14
2.2 Cavité avec gradient horizontal de température.....	14
3. Champ de l'écoulement	14
3.1 Champ de température	14
3.2 Champ de la fonction de courant (lignes de courants).....	14
3.3 Régime stationnaire	14
3.4 Ecoulement bidimensionnel	15
3.5 Fluide Newtonien	15
3.6 Régime laminaire	15
3.7 Fluide incompressible	16
3.8 Approximation de Boussinesq	16
4. Généralité et définition des NANOFLUIDES	17
4.1 Définition d'un nanofluide	17
4.2 Préparation de nanofluides	17
4.2.1 Procédé en une étape (one-step method).....	17
4.2.2 Procédé en deux étapes (two-step méthode).....	18
4.3 Les applications de <i>nanofluides</i>	18
4.4 Les avantages de nanofluides	18
4.5 Les inconvénients du nanofluides.....	18
4.6 Propriétés des nanofluides	19
4.6.1 La fraction volumique	19

4.6.2 Conductivité thermique.....	20
4.6.3 Viscosité dynamique	20
4.6.4 Masse volumique	20
4.6.5 Chaleur spécifique	21
4.6.6 Coefficient d'expansion thermique	21
5. Revue bibliographique.....	22

Chapitre II. Problème Physique et Formulation Mathématique

1. Configuration géométrique	27
2. Equations gouvernantes	28
2.1 Equation de conservation de la masse	28
2.2. Conservation de la quantité de mouvement	29
2.3. Equation d'énergie.....	29
3. Hypothèses simplificatrices	30
4. Equations adimensionnelles du problème étudié.....	30
5. Les nombres adimensionnels	31
5.1. Nombre de Rayleigh.....	31
5.2. Nombre de Prandtl.....	31
5.3. Nombre de Nusselt	32
5.4. Nombre de Reynolds.....	32
6. Conclusion du chapitre II.....	32

Chapitre III .Méthode Numérique et Simulation

1. Introduction à la résolution numérique	33
1.1Méthodes des différences finies	33
1.2 Méthodes des éléments finis	33
1.3 Méthodes des volumes finis	34
2. Discrétisation des équations de transport	34
3. Présentation de notre plateforme de travail : ANSYS Workbench 2019.R3.....	37
3.1 ANSYS Inc.....	37

3.2 ANSYS Fluent.....	38
3.3 Simulation CFD.....	38
3.3.1 Geometry.....	39
3.3.2 Maillage	39
3.3.3 Configuration	40
3.4 Solution	41
3.4.1 Les étapes principales	43
3.5 Résultats	44
4. Conclusion	44

Chapitre IV. Résultats et Discussions

1. Présentation des résultats	45
2. Effet de l'espace du maillage	48
3. Validation et comparaison avec la littérature	49
4. Champ de l'écoulement 2D	52
4.1 Effet du nombre de Rayleigh	59
4.2 Effet de la nature du nanofluide	60
5. Taux de transfert de chaleur	61

Conclusion Générale

Références Bibliographiques.....	68
----------------------------------	----

Nomenclature

A : Rapport d'aspect (W/H).

C_p : Chaleur spécifique à pression constante [J/kg.K]

dx : Distance entre deux points consécutifs du maillage suivant x [m].

dy : Distance entre deux points consécutifs du maillage suivant y [m].

g : Accélération de la pesanteur [m/s²].

H : hauteur de la cavité [m].

h : coefficient de transfert de chaleur local (W/ m² K)

h : longueur sans dimension du chauffe-eau partiel, h'/H

h' :longueur du chauffage, (m)

y_p: centre sans dimension de l'heater

y'_p: centre de l'emplacement du chauffage (m)

k: conductivité thermique (W m⁻¹ K⁻¹)

i : Indice des noeuds dans la direction x [-].

j : Indice des noeuds dans la direction y [-]

T : Température [K].

TH: Température de la paroi chaude [K].

TL : Température de la paroi froide [K].

U,V : Composantes de la vitesse adimensionnelles [-].

u,v : Composantes de la vitesse dimensionnelles [m.s⁻¹].

X,Y : Coordonnées cartésiennes adimensionnelles [-].

x,y : Coordonnées cartésiennes dimensionnelles [m].

SYMPOLES GRECS

α:Diffusion thermique fluide (m² s⁻¹)

β: Coefficient d'expansion thermique (K⁻¹)

φ:Fraction de volume de nanoparticules.

μ : Viscosité dynamique [kg/ms].

ν : Viscosité cinématique [m² /s].

θ : Température adimensionnelle [-].

ρ : Masse volumique [kg/m³].

ψ : Fonction de courant dimensionnelle [Kg/s].

INDICES

E : Noeud considéré du coté Est du noeud P.

W : Noeud considéré du coté Ouest du noeud P.

N : Noeud considéré du coté Nord du noeud P.

S : Noeud considéré du coté Sud du noeud P.

P : Noeud considéré du maillage.

e : La face Est du volume de contrôle considéré.

w : La face Ouest du volume de contrôle considéré

n : La face Nord du volume de contrôle considéré.

s : La face Sud du volume de contrôle considéré.

NOMBRES ADIMENSIONNELS :

R_a : Nombre de Rayleigh.

P_r : Nombre de Prandtl.

Nu_{moy} : Nombre de Nusselt moyen.

R_e : Nombre de Reynolds

INTRODUCTION

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

L'amélioration du transfert de chaleur par convection est l'objet principal de plusieurs travaux, et pour se faire, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude d'essais numériques et expérimentaux portant sur la description des phénomènes gérant la convection, l'effet de la nature des systèmes dans lesquels elle a lieu (géométrie spécialement), et les propriétés des fluides impliqués (propriétés physico-chimiques).

Chronologiquement, bien que les idées d'amélioration aient touché surtout la géométrie des systèmes, et la nature physico-chimique des milieux convectifs, les travaux n'ont touché que l'ordre macroscopique ou parfois microscopique du processus. Mais avec l'apparition et le développement rapide des nanosciences et nanotechnologies pendant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, la convection a pris une grande part de cette nouvelle richesse, et a pris un autre aspect de perfectionnement : c'est au niveau nanométrique de la matière du milieu convectif que les récents travaux ont été concentrés.

Les nanofluides sont alors l'un des fruits d'une telle richesse. Dotés de propriétés physico-chimiques particulières et intéressantes telle que leur importante conductivité thermique, les nanofluides offrent un coefficient de transfert thermique imbattable par les autres caloporteurs. Les études menées dans cette nouvelle direction ont fourni une riche bibliographie, mais très variée : bien qu'en majorité ils sont assez positifs

Finalement, comprendre finement le comportement des nanofluides, et donner des formules ou des corrélations universelles qui les décrivent, rendra possible de les intégrer dans différentes sortes d'échangeurs de chaleurs dans divers secteurs technologiques et industriels, visant toujours une meilleure efficacité.

Dans le présent travail, nous étudions la convection naturelle dans une enceinte carrée remplie de nanofluides. Notre objectif est de comprendre l'effet du nanofluide sur le mécanisme de la convection naturelle dans les enceintes. Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de Rayleigh ($10^4 \leq Ra \leq 10^6$) avec différentes fractions volumiques ($0.1 \leq \phi \leq 1$) et pour les nanofluides (Al_2O_3 , Cu , TiO_2). Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre, nous allons présenter des définitions de la convections et présenter les nanofluide, leur définition, préparation ainsi que certaine application puis quelques modèles les plus utiliser pour déterminer les propriétés thermo-physiques du nanofluide. Ainsi une revue bibliographique des travaux antérieurs est présentée.
- Le deuxième chapitre on présentera la forme géométrique choisi pour notre étude qui consiste a une cavité partiellement chauffée remplie par l'eau à la base de nano fluide contient différents type de nanoparticules, Al_2O_3 , Cu , TiO_2 . La formulation mathématique de problème et la résolution de diverses équations gouvernante de problème.
- Le troisième chapitre présente la méthode numérique de résolution (méthode des volumes finis) et une brève présentation des séquences de simulation à l'aide des logiciels FLUENT-ANSYS.
- Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenu suivi avec des interprétations enfin en concluent par une conclusion générale.

Chapitre I. Généralités et Définitions

1. La convection :

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide, ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte le fluide et l'énergie, l'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement (Figure I.1).



Figure I.1 Phénomène de convection thermique.

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection naturelle (libre) ou convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de température, on dit que la convection est naturelle ou

libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, Telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée.

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 et 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 quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie.

2. La convection dans les cavités :

L'étude de la convection naturelle dans les cavités a fait l'objet d'un très grand nombre de travaux tant théoriques qu'expérimentaux. L'intérêt de telles études réside dans son implication dans de nombreuses applications industrielles telles que le refroidissement des composants électroniques, la thermique des bâtiments, l'industrie métallurgique, la croissance des cristaux pour l'industrie des semi-conducteurs, et le cas d'une génération de chaleur accidentelle due à un incendie dans un bâtiment pour réacteur nucléaire,.....etc.

Dans ce type de cavité, généralement deux parois sont maintenues à des températures différentes tandis que les autres sont adiabatiques. On distingue principalement deux configurations, la première est celle d'une cavité contenant un fluide et soumise à un gradient vertical de température (convection de Rayleigh-Bénard), la seconde étant celle d'une cavité avec un gradient horizontal de température [12]

2.1 Cavité avec gradient vertical de température :

La cavité qui est chauffée par le bas et refroidie par le haut correspond à la configuration de la convection de Rayleigh Bénard qui traite de la stabilité et le mouvement d'un fluide confiné entre deux plaques horizontales qui sont maintenues à des températures uniformes et distinctes (Figure I.2). La convection de Rayleigh-Bénard a une longue et riche histoire, elle a été étudiée durant des décennies aussi bien pour ses différentes applications industrielles que du point de vue recherche fondamentale

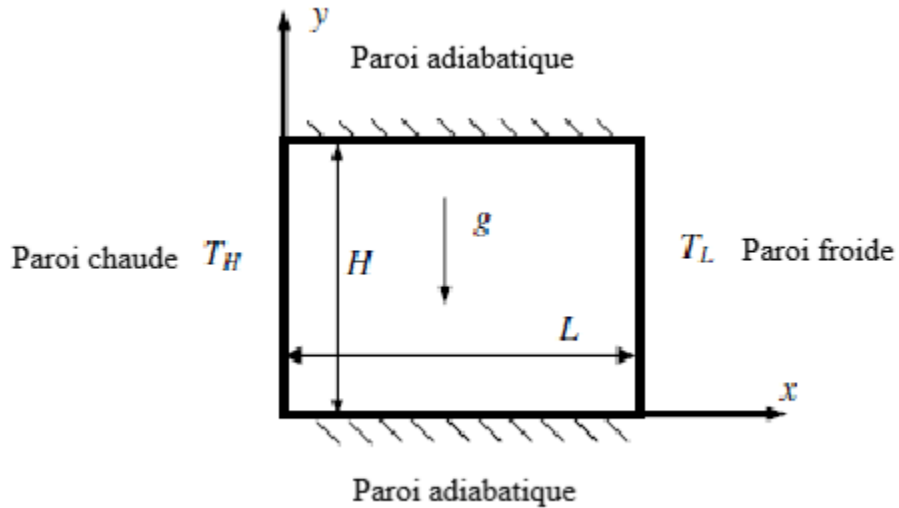


Figure I.2. Cavité carrée avec gradient de température verticale.

Une perturbation fait monter rapidement une particule de façon qu'elle garde sa masse volumique constante (Figure I.2), deux cas peuvent se produire:

* Si $\rho_2 > \rho_1$, la force d'Archimède est inférieure à son poids, la particule redescend, le mouvement est stable.

* Si $\rho_2 < \rho_1$, la force d'Archimède est supérieure à son poids, la particule continue à monter, le mouvement est instable. Au-delà d'une valeur critique de l'écart de température, des rouleaux contra-rotatifs, d'axes horizontaux apparaissent au sein du fluide (Figure I.3).

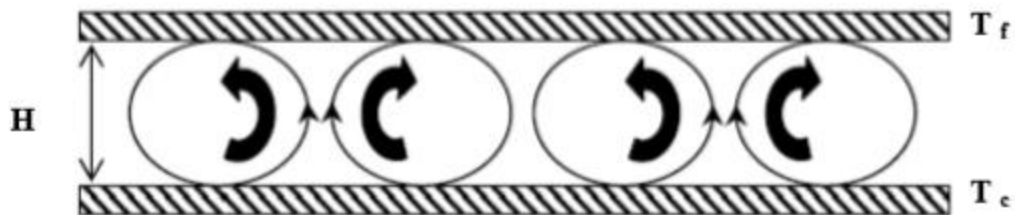


Figure I.3: Schéma représentant les rouleaux de la convection naturelle (Rayleigh- Bénard).

2.2 Cavité avec gradient horizontal de température :

Dans cette configuration, l'une des parois verticales est chauffée tandis que l'autre est refroidie, les parois horizontales étant considérées comme adiabatiques. Pour cette configuration, il n'y a pas de gradient critique de température et le fluide est alors ascendant le long de la paroi chaude et descendante le long de la paroi froide

3. Champ de l'écoulement :

3.1 Champ de température :

Une ligne isotherme est une ligne qui passe par tous les points ayant les mêmes températures, l'ensemble des ces isothermes appelé champ de température, les isothermes sont obtenues après la résolution de l'équation de l'énergie.

3.2 Champ de la fonction de courant (lignes de courants) :

Les lignes de courant sont des courbes qui ont été défini pour décrire l'écoulement des fluides et sa structure hydrodynamique, par leur définition les lignes de courant sont des courbes tangentes en chacun des points au vecteur de vitesse dans ce point. La fonction de courant peut être

$$\text{définit part: } \begin{cases} \psi = \frac{\partial U}{\partial Y} \\ \psi = -\frac{\partial U}{\partial X} \end{cases} \quad (\mathbf{I.1})$$

3.3 Régime stationnaire :

On dit que le régime de l'écoulement est stationnaire ou permanent si les variables décrivent le mouvement ne dépendent pas du temps.

3.4 Ecoulement bidimensionnel :

On dit que l'écoulement est bidimensionnel si l'écoulement est fait dans deux dimensions de l'espace (x, y) et avec la vitesse u a deux composantes u (u, v).

3.5 Fluide Newtonien :

Un fluide est dit newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses est une fonction linéaire du tenseur des déformations (**I.2**). Le facteur de proportionnalité se nomme viscosité et

celle-ci est indépendante du taux de cisaillement. Pour la plupart des fluides usuels dans des conditions standard, ce modèle est très satisfaisant. On peut définir ce fluide par une relation simple:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{I.2})$$

τ : La contrainte de cisaillement exercée par le fluide [Pa].

μ : La viscosité du fluide - une constante de proportionnalité [Pa .s].

$\frac{du}{dy}$: Le gradient de vitesse perpendiculaire à la direction de cisaillement [s⁻¹].

3.6 Régime laminaire :

On dit que l'écoulement est laminaire, lorsque le mouvement de particules fait d'une façon régulière et ordonnée, l'écoulement soit laminaire et régulier quand la vitesse soit faible. Le nombre adimensionnel Reynolds, nous aide à connaître la nature de l'écoulement, il est correspond au caractéristique du fluide et de la forme géométrique qui la gouverne, ce nombre est limitée par des corrélations dépend à la forme géométrique.

3.7 Fluide incompressible :

On dit qu'un fluide incompressible si sa densité varie faiblement avec la pression ou la température, on peut donc prendre $\rho = \rho_0$ pour un fluide incompressible et la utiliser dans les équations du mouvement. Cependant dans un certain nombre de situations cette hypothèse n'est pas justifiée, ainsi dans un écoulement de convection naturelle on va prend $\rho = \rho_0$ sauf dans le terme de gravité($-\rho\mathbf{g}$)

3.8 Approximation de Boussinesq :

Elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables aux niveaux de tous les termes des équations de quantité de mouvement sauf au niveau du terme des forces de volume (gravité). ρ Varie linéairement avec la temperature \mathbf{T} (développement de TYLOR du premier ordre). Elle est donnée par la relation suivante:

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(\mathbf{T} - \mathbf{T}_0)] \quad (\text{I.3})$$

Avec \mathbf{T}_0 : La température de référence.

ρ_0 : La densité volumique mesurée a T_0

4. Généralité et définition des NANOFUIDES :

4.1 Définition d'un nanofluide :

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique (nanoparticules) en suspension dans un liquide qui s'appelle un liquide de base. La liste des nanoparticules utilisées pour obtenir des nanofluides et très large on peut citer parmi eux [7] :

- l'aluminium, Al et l'oxyde d'aluminium, **Al₂O₃**.
- le cuivre, Cu et l'oxyde de cuivre, **CuO**.
- l'or, **Au**.
- l'argent, **Ag**.
- les nanotubes de carbone.
- le dioxyde de titane, **TiO₂**.

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'aggrégations, la sélection d'un telle fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants les plus utilisés sont :

- l'eau.
- L'éthylène glycol, EG.
- Les huiles.
- Le Toluène.

4.2 Préparation de nanofluides :

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

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

Par contre pour les nanofluides il existe deux procédés distinct

4.2.1 Procédé en une étape (one-step method) [9]

Consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base (synthèse direct dans un fluide de base) et de prévenir l'oxydation des particules de métal pur.

4.2.2 Procédé en deux étapes (two-step méthode) [9]

La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules, et dans la seconde étape Les nanoparticules sont disperser dans un fluide de base.

4.3 Les applications de *nanofluides* :

- Transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique).
- Refroidissement Electroniques.
- Défense.
 - Espace.
 - Refroidissement des systèmes nucléaires.
 - L'échangeur de chaleur.
 - Biomédecine.
 - Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire de l'eau, refroidisseurs, réfrigérateurs domestiques, Diesel combustion, Forage, Lubrifiants, stockage thermique...).

4.4 Les avantage de *nanofluides* :

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haut dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

4.5 Les inconvénients du nanofluides :

- manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.
- mauvaise caractérisation des suspensions.
- stabilité des nanoparticules dispersion.
- chute de pression accrue et la puissance de pompage
- viscosité supérieur, chaleur spécifique Basse.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.

4.6 Propriétés des nanofluides :

Les propriétés physiques du nanofluide dépendent essentiellement de fluide de base (liquide) et de la phase disperser (nanoparticules) sous un forme solide, donc leur définition nécessite un retour aux propriétés de chacun de ses composantes (fluide de base et nanoparticule):

4.6.1 La fraction volumique (ϕ) :

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

$$\phi = \frac{V_s}{V_T}$$

V_s : volume de solide (nanoparticules)

V_T : volume totale

4.6.2 Conductivité thermique (K) :

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

dépend de la température. En plus de sa variation en fonction de la température, la conductivité thermique du nanofluide varie en fonction de la fraction volumique aussi, la conductivité thermique d'un nanofluide est calculé selon les deux modèle suivant :

A-Modèle de Maxwell (1873)

Maxwell a présenter son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique de la nanofluide, mais ce modèle est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, et que cette condition peut être considéré comme un point négative pour le modèle, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules du forme sphériques. Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivant [8]:

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f - 2\phi(K_f - K_s)}{K_s + 2K_f + \phi(K_f - K_s)} \quad (1)$$

ϕ : fraction volumique = $\frac{V_s}{V_T}$

s: solid

f: fluide

nf: nanofluide

B-Modèle de Hamilton et Crosser (1962) :

Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite de modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'a valable que dans le cas des particules sphériques une chose qui rend le modèle non efficace pour la description du phénomène étudié, Pour cela le modèle du Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nanofluide quelque soit la forme de la nanoparticule, et ça en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité (ψ). Ce facteur est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante[8]:

$$\mathbf{K}_{nf} = \frac{\mathbf{K}_s + (\mathbf{n}-1)\mathbf{K}_f - (\mathbf{n}-1)(\mathbf{K}_f - \mathbf{K}_s)\varphi}{\mathbf{K}_s + (\mathbf{n}-1)\mathbf{K}_f + (\mathbf{K}_f - \mathbf{K}_s)\varphi} \quad (2)$$

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

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

4.6.3 Viscosité dynamique (μ) :

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

A-Modèle d'Einstein (1906) :

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

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi)\mu_f \quad (3)$$

Cette relation est valable juste pour: $\varphi = 0.03$

B-Modèle de Brinkman (1952) :

Par contre, Brinkman a généralisé la formule pour qu'il puisse être utilisé dans une large plage de concentrations volumiques[8].

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (4)$$

4.6.4 Masse volumique (ρ) :

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique ϕ 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:

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (5)$$

À partir de la on déduit alors la masse volumique du nanofluide [10]:

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

4.6.5 Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $C_p = \frac{dQ}{mdT}$ La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire

Pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut citer les deux modèles suivantes

A- Modèle du Pak et Cho :

Pak et Cho ont utilisé la formule suivante[8]:

$$(C_p)_{nf} = (1 - \phi)(C_p)_f + \phi(C_p)_s \quad (7)$$

B- D'autres auteurs dont Xuan et Roetzel ont travaillé avec la formule ci-dessous[11] :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (8)$$

Nous présentons sur les figures (1) à (4) les valeurs du rapport $\frac{(C_p)_{nf}}{(C_p)_f}$ obtenus à partir des deux relations (7) et (8) pour différents nanofluides avec comme fluide de base l'eau et pour différentes nanoparticules (**Al₂O₃**, **CuO**, **Cu**, **Ag** et **Au**) en fonction de la fraction volumique ϕ qui varie de **0** à **8%**. On constate une différence remarquable entre les valeurs calculées à partir des deux relations (7) et (8).

4.6.6 Coefficient d'expansion thermique :

Nous nous intéressons dans le cadre de notre étude aux seuls fluides porteurs incompressibles (masse volumique indépendante de la pression) mais dilatables. Cette variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique $\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_s$ appelé également coefficient de dilatation isobare. Le calcul de la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation qui détermine la masse volumique l'expression suivante[8] :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (9)$$

Remarque : Dans tous les travaux, sans exception, les nanofluides ont été caractérisés en fonction de la fraction volumique $\varphi = \frac{V_s}{V_T}$, ce paramètre dépend de la température T du nanofluide au moment du mélange, même si on suppose que le volume des particules solides varie peu pour de faibles variations de température, celui des fluides par contre varie et les expériences des uns et des autres pour réaliser le nanofluide avec un φ donné ont été conduites à des températures différentes. Pour mener bien une étude il vaut mieux prendre un autre paramètre indépendant de la température, c'est le cas de la fraction massique $C = \frac{MS}{MT}$, C reste constante égale à C_0 dans un milieu homogène et ce pour toute valeur de T

5. Revue bibliographique

Après cette préface, nous exposons chronologiquement quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent l'écoulement avec transfert de chaleur par convection naturelle, dans les cavités remplies par un nanofluides.

Soufi El habib[1] Les Nanofluides sont relativement une nouvelle classe de fluides qui sont constitués d'un fluide de base avec des particules de taille nanométrique (1 à 100 nm), en suspension. Il est introduit par Choi en 1995 à Argonne National Laboratory. Des nombreuses recherches ont été réalisées pour améliorer le transfert de chaleur à l'aide des nanofluides par la modification de certaines de ses propriétés, l'une des paramètres qui ont fait l'objet d'études est la forme de la cavité qui contient les nanofluides. Dans cette étude, nous allons montrer comment la forme de la cavité affecte le phénomène de transfert de chaleur en présence d'un nanofluides

Hakan F. Oztop a , Eiyad Abu-Nada b, [2] Le transfert de chaleur et le débit de fluide dû aux forces de flottabilité dans un enclos partiellement chauffé à l'aide de nanofluides sont à l'aide de différents types de nanoparticules. Le chauffe-eau monté à la chasse d'eau est situé à la verticale gauche mur avec une longueur finie. La température du mur vertical droit est inférieure à celle du d'autres murs sont isolés. La technique du volume fini est utilisée pour résoudre les équations de gouvernance. Les calculs ont été effectués pour le numéro de Rayleigh ($10^3 \leq Ra \leq 5 \cdot 10^5$), hauteur du chauffage ($0,1 \leq h \leq 0,75$), emplacement du chauffage ($0,25 \leq Y_p \leq 0,75$), rapport d'aspect ($0,5 \leq A \leq 2$) et fraction de volume des nanoparticules ($0 \leq \varphi \leq 0,2$). Différents types de nanoparticules ont été testés. Une augmentation du nombre moyen de Nusslet a été avec la fraction de volume des nanoparticules pour toute la gamme du nombre de Rayleigh. Transfert de chaleur augmente également avec l'augmentation de la hauteur du chauffage. Il a été constaté que l'emplacement du chauffage affecte le débit et les champs de température lors de l'utilisation de nanofluides. Il a été constaté que l'amélioration du transfert de chaleur, en utilisant nanofluides, est plus prononcée à faible rapport d'aspect qu'à un rapport d'aspect élevé.

SALHI HICHAM[3] Dans ce travail on a mené une étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans une enceinte carrée chauffée et remplie d'un mélange d'eau et des nanofluides. On a différentes positions de source de chaleur et différentes fractions volumiques pour les nanofluide. Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finis en utilisant un schéma hybride. Les champs thermique et dynamique ont été obtenus ainsi que le nombre de Nusselt. Notre procédure de simulation a été validée en comparant les résultats qu'on obtient avec ceux d'autres travaux. L'influence des paramètres (nombre de Rayleigh, type de nanofluide, la position des sources de chaleur) a été considérée. Des corrélations entre le nombre de Nusselt et les différents paramètres de contrôle de notre configuration ont été également obtenues.

Majid Siavashi et al [4] Convection naturelle de nanofluide de Cu-eau dans une cavité inclinée remplie de milieux poreux a été investigué à l'aide d'un modèle de mélange en deux phases. L'effet de l'angle d'inclinaison de la cavité, configuration du chauffage, l'utilisation de milieux nanofluides et poreux sur l'amélioration du transfert de chaleur a été étudiée avec des investigation de l'effet de variables de décision (nombre de Rayleigh, nombre de Darcy, angle d'inclinaison, et volume fraction des nanoparticules Cu) sur les caractéristiques de transfert de

chaleur. L'enquête examine le flux laminaire pour convection naturelle ($10^4 \leq Ra \leq 10^6$). Darcy-Brinckman-Forchheimer modèle a été utilisé comme pour lesimulation de milieux poreux et modèle de mélange en deux phases a été appliquée pour modéliser le comportement de nanofluide. Conformément, il a été démontré que l'utilisation simultanée de nanofluide avec des milieux poreux dans les faibles flux de convection sont bénéfiques, mais pour les champs de convection naturels forts qui seraient défavorables et diminue le taux de transfert de chaleur. Il a été conclu que l'effet de l'angle d'inclinaison dépend fortement sur l'emplacement de mur chaud comme dans certains états ayant la cavité carrée inclinée serait d'avantage tandis que dans un autre cas, le transfert total de chaleur diminuerait. Les résultats montrent qu'une bonne sélection de chauffage con figuration (mur latéral ou chauffage d'angle) et angle d'inclinaison en ligne avec concentration nanofluide et pour les propriétés des médias peuvent fortement affecter les performances de transfert de chaleur. En outre, des solutions optimales pourraient existent pour des conditions différentes

S.A.M. Mehryan, et al. [5], Les nanofluides hybrides sont un nouveau type de fluides de travail améliorés, conçus avec des thermo- améliorés propriétés physiques. Les nanofluides hybrides profitent des propriétés thermophysielles de plus de un type de nanoparticules. La présente étude vise à aborder le transfert de chaleur convectif gratuit des Al_2O_3 -Cu hybride d'eau nanofluide dans une cavité remplie d'un milieu poreux. Deux types d'importants poreux les médias, la boule de verre et la mousse métallique en aluminium, sont considérés pour la matrice poreuse. Les données expérimentales montrent une amélioration spectaculaire de la conductivité thermique et de la viscosité dynamique des nanofluides hybrides, et donc, ces propriétés thermophysiques ne pouvaient pas être modélisées à l'aide de modèles de nanofluides. Ainsi, les données expérimentales disponibles pour la conductivité thermique et la viscosité dynamique des nanofluides hybrides sont directement utilisées dans la présente étude théorique. Diverses comparaisons avec les résultats publiés précédemment dans la littérature sont effectuées et les résultats sont jugés d'excellent accord. Dans la plupart des cas, le nombre moyen de Nu_l est en baisse func- fraction de volume des nanoparticules. Les résultats montrent la réduction du transfert de chaleur en utilisant nanoparticules dans les milieux poreux. La réduction observée du taux de transfert de chaleur est beaucoup plus élevée pour lesnanofluide par rapport au nanofluide unique.

K.Mehmooda,S. Hussaina,b, M. Sagheer[6] Cette étude examine l'influence du rayonnement thermique non linéaire et champ sur convection mélangée dans une cavité poreuse

carrée. Ici, la cavité est saturée de nanofluide d'alumine-eau. Le modèle élargi Darcy-Brinkman-Forchheimer a été adopté formuler des équations différentielles de gouvernance. Après avoir transformé les équations en forme sans dimension, celles-ci sont résolues en utilisant la méthode d'élément fini de Galerkin résiduelle pondérée. Le dernier modèle Koo-Kleinstreuer-Lee (KKL) est utilisé pour l'évaluation de la conductivité thermique efficace et de la viscosité dynamique du nanofluide. Effet des paramètres pertinents dans plages spécifiques telles que le nombre Richardson ($0,01 \leq Ri \leq 100$), paramètre de rayonnement ($0 \leq Rd \leq 5$), paramètre de rapport de température ($1,1 \leq Nr \leq 1,4$), champ magnétique incliné paramètre ($0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$), Nombre de darcys ($10^{-6} \leq Da \leq 10^{-3}$), paramètre de porosité ($0,2 \leq 0,8$) et une fraction de volume des particules solides ($0 \leq \phi \leq 0,04$) a été étudiée et présentée sous forme de rationalisations, d'isothermes et de parcelles. De plus, l'énergie cinétique température moyenne ont également été prises en compte pour une meilleure compréhension de la philosophie de flux. On trouve que le paramètre de rayonnement, paramètre de rapport de température, Darcy le nombre et le paramètre de porosité augmentent le transfert de chaleur, l'énergie cinétique et la température moyenne tandis que le champ magnétique incliné p

S. Hussain et al. [7], présentent une analyse computationnelle a été effectuée dans un canal horizontal avec une cavité ouverte remplie de nanofluide hybride d'Al₂O₃ Cu-eau ayant un obstacle carré adiabatique à l'intérieur. Le mur inférieur de la cavité est prise comme chaude tandis que tous les murs de repos du canal et de la cavité sont adiabatiques, sauf la gauche fin du canal qui est pris comme froid. Trois emplacements verticaux différents de l'obstacle sont considérés. Les équations de différentiels partiels qui régissent sont résolues par la méthode de l'élément fini Galerkin dans l'espace et le Crank-Nicolson à temps. La méthode Newton est utilisée pour faire face aux systèmes nonlinaires équations et la méthode d'élimination gaussienne a été appliquée pour résoudre les sous-problèmes linéaires associés dans chaque itération non linéaire. Les paramètres émergents sont Richardson numéro $00:01 \leq Ri \leq 200$, fraction de volume nanoparticule $0:06 / 0:04$, $0 \leq Re \leq 200$ et Hartmann numéro $00 \leq Ha \leq 100$. Les calculs des rationalisations, des isothermes, du nombre moyen de Nusslet et de la génération d'entropie principal intérêt pour cette étude

Palm et coll [8] ont étudié un écoulement radial de nanoparticules de trioxyde d'aluminium (Al₂O₃) suspendues dans l'eau. Le montage étudié est sous forme de deux disques coaxiaux parallèles dont l'inférieur est chauffé uniformément. Le nanofluide est alimenté en haut à travers

le disque supérieur. Pour un pourcentage de 4% de nanoparticules, l'augmentation du facteur de transfert convectif est de 25 % relativement au fluide de base. En considérant des propriétés dépendantes de la température, les prédictions du modèle montrent que les efforts de cisaillements sont moins considérables et le coefficient de transfert est ainsi plus important

Behzadmehr et coll. [9] ont étudié la convection forcée turbulente dans un tube circulaire, utilisant de l'eau à 1% de nanoparticules cuivre (Cu). Une comparaison entre le modèle à une seule phase et le modèle à deux phases a été faite, puis une comparaison avec les résultats expérimentaux de **Depew et Farbar [10]** a montré la précision du modèle à deux phases vis à vis au modèle à une seule phase, du point de vue prédiction du coefficient de transfert thermique convectif et du nombre de Nusselt. Les résultats numériques ont montré que l'augmentation du nombre de Reynolds a engendré la croissance de la valeur asymptotique du nombre de Nusselt.

Apurba et Niladri [11] ont étudié l'effet du nanofluide sur un écoulement en régime laminaire dans une conduite rectangulaire horizontale bidimensionnelle chauffé à deux extrémités haute et basse. Le fluide qui circule dans la conduite est un mélange d'eau et de nanoparticule de cuivre. Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de Reynolds et de la fraction volumique augmente le transfert thermique

Chapitre II. Problème Physique et Formulation

Mathématique

Dans ce chapitre on va transformer le problème physique à un problème mathématique pur, pour cela on limite le problème dans une forme géométrique, et on donne les équations générales gouvernant (équation de continuité, équation de quantité de mouvement et équation d'énergie), puis on les applique sur la géométrie considérée après simplification par des hypothèses imposées, et borne le problème avec les conditions des frontières. Les équations obtenus sont des équations dimensionnelles on les dépose en forme adimensionnelle, pour faire la résolution par une méthode numérique.

1. Configuration géométrique :

Le problème physique est schématisé sur la figure 1. Une cavité partiellement chauffée remplie par l'eau à la base de nano fluide contient différents type de nanoparticules **Cu et TiO₂. Al₂O₃** Le nano fluide considéré est incompressible et l'écoulement laminaire, nous considérons également que les nanoparticules sont en équilibre thermique et sans frottement entre-elle. Les propriétés de nanofluides sont données dans le tableau 1. La paroi gauche est maintenue à la température chaude tandis que la paroi droite est froide. Les propriétés thermo physiques de nanofluide sont constantes à l'exception de la masse volumique laquelle est obéit à l'approximation de boussinesq. Les équations gouvernantes pour le modèle d'un écoulement stationnaire laminaire sont établis.

Les parois inférieure et supérieure sont maintenus adiabatiques, tandis que les parois gauche et droite sont maintenus isothermes de température $T = 310 \text{ K}$ et 300 K respectivement (la paroi gauche est partiellement chaud ($0.1 < s < 0.75$)).

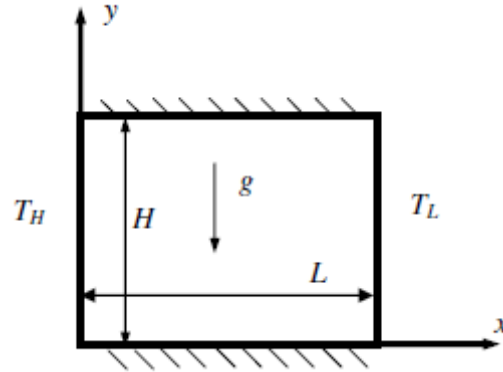


Figure II.1 : configuration géométrique.

Tableau II.1. Propriétés de nanoparticules :

	$C_p(J/Kg.K)$	$\rho (Kg/m^3)$	$K (W/mK)$	$\beta (K^{-1}).10^{-5}$	$\alpha.10^{-7} (W/Kg.K)$
eau	4179	997.1	0.613	21	1.47
Al ₂ O ₃	765	3970	40	0.85	131.7
Cu	385	8933	400	1.67	1163.1
TiO ₂	686.2	4250	8.9538	0.9	30.7

2. Equations gouvernantes :

L'analyse de la convection thermique se fait par l'application des trois lois Fondamentales de conservation (conservation de la masse, de la quantité de mouvement, et Del 'énergie).

2.1 Equation de conservation de la masse :

D'après le principe de la conservation de masse de fluide que l'on suit reste constante Dans son mouvement, on peut écrire notre équation de continuité se forme indiciel:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (\text{II.1})$$

($j = 1, 2, 3$: indice de sommation).

2.2. Conservation de la quantité de mouvement :

Cette équation est déduite de la deuxième loi de la dynamique, qui stipule que la variation de la quantité de mouvement d'une particule fluide est égale à la somme des forces extérieures sur cette particule. Elle s'écrit sous forme tensorielle comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (\text{II.2})$$

(**i** : indice de direction, = **1** à **3**).

(**j** : indice de somme, = **1** à **3**).

Avec :

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)$ Représente le taux de variation de la quantité de mouvement.

$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)$ Représente le taux net de transport de quantité de mouvement suivant la direction **i**, par mouvement du fluide.

f_i Représente les forces du volume suivant la direction **i**.

$\frac{\partial p}{\partial x_i}$ Représente les forces dues à la pression.

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$: Représente les forces nettes de viscosité.

2.3. Equation d'énergie

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le premier principe de la thermodynamique pour un fluide Newtonien incompressible qui s'énonce que la variation d'énergie totale (somme de l'énergie cinétique et de l'énergie interne) est égale à la somme de la puissance des efforts extérieurs et le transferts de chaleur, elle s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mathbf{u}_j T) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + \mathbf{q} + \mu \Phi \quad (\text{II.3})$$

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (\text{II.4})$$

α : La diffusivité thermique.

K : La conductivité thermique.

ρ : La masse volumique.

C_p : La chaleur spécifique à pression constante

- q : La génération de chaleur par unité de volume (densité de chaleur volumétrique).
- μ : La viscosité dynamique du fluide.
- φ : La dissipation visqueuse.

3. Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier la résolution du problème physique, des hypothèses simplificatrices sont introduites au niveau de la modélisation. Nous nous limitons donc aux hypothèses couramment retenues dans les études de la convection naturelle :

- Le régime est stationnaire.
- L'écoulement est bidimensionnel (2D).
- Le fluide est newtonien
- Le régime d'écoulement est laminaire.
- Le fluide est incompressible.
- Le transfert de chaleur par rayonnement négligeable.
- L'approximation de Boussinesq est valide.
- Les propriétés physiques du fluide à l'intérieur de la cavité sont supposées constantes (sauf qui satisfait l'approximation de Boussinesq).

4. Equations adimensionnelles du problème étudié

Compte tenu des hypothèses fixées précédemment, les équations du modèle Mathématique sous forme dimensionnelle sont les suivantes:

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.5})$$

- **Equation de la conservation de la quantité de mouvement projetée suivant x:**

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

- **Equation de la conservation de la quantité de mouvement projetée suivant y :**

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g\beta(T - T_f) + \vartheta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

- **Equation de conservation d'énergie:**

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

- **Conditions aux limites sous forme adimensionnelles**

Suivant x

- $U=V=0$ pour $\begin{cases} X = 0 \\ X = L \end{cases}$ Et $0 < Y < H$ (II.9a)

- A $X=0$ $0 < Y < H$ $T=T_H = (310\text{k}^\circ)$ (paroi chaud) (II.9b)

- A $X=L$ $0 < Y < H$ $T=T_L = (300\text{k}^\circ)$ (paroi froid) (II.9c)

Suivant y

- $U=V=0$ pour $\begin{cases} Y = 0 \\ Y = H \end{cases}$ Et $0 < X < L$ (II.9d)

- $\begin{cases} Y = 0 \\ Y = H \end{cases}$ Et $0 < X < L$ $\frac{\partial T}{\partial Y} = 0$ (paroi adiabatiques) (II.9e)

5. Les nombres adimensionnels

Nous a permis la mise en évidence de quatre paramètres de contrôle qui caractérise le problème étudié à savoir, respectivement, le nombre de Rayleigh (**Ra**), le nombre de Prandtl (**Pr**), le nombre de Reynolds(**Re**) et le nombre de Nusselt(**Nu**).

5.1. Nombre de Rayleigh

C'est un nombre sans dimension, caractérisant aussi le transfert de chaleur au sein d'un fluide. On le définit de la manière suivante

$$\mathbf{Ra} = \frac{\rho \beta g \Delta T H^3}{\alpha \mu} \quad (\text{II.10})$$

5.2. 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. On le définit de la manière suivante

$$\mathbf{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{II.11})$$

5.3. Nombre de Nusselt

Le coefficient moyen de transfert de chaleur pour la convection naturelle peut être représenté sous forme adimensionnelle par le nombre de Nusselt. Les nombres de Nusselt local et moyen sont calculés à l'interface solide-fluide et à la paroi froide par les relations suivantes

$$\mathbf{Nu} = -\frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (\text{II.12})$$

6. Conclusion du chapitre II

A la fin de ce chapitre, nous aboutissons au modèle mathématique. Ce dernier est alors constitué d'un système d'équations, complété par des conditions aux limites. Il s'agit d'un système complexe formé par des équations, qui sont issues de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Les équations de bilan sont donc connues mais:

- La résolution analytique de ces équations de bilan n'est pratiquement jamais réalisable
- Les non-linéarités visibles dans les équations sont principalement à l'origine des difficultés pour obtenir une solution analytique.
- Donc, l'utilisation des méthodes numériques s'avère indispensable pour la résolution du système d'équations obtenu. Dans notre étude, on a utilisé le logiciels FLUENT-ANSYS. basé sur la méthode des volumes finis pour résoudre les différentes équations. Cette méthode est exposée dans le chapitre suivant

Chapitre III. Méthode Numérique et Simulation

1. Introduction à la résolution numérique :

Dans la réalité, les systèmes et phénomènes physiques les plus intéressants sont aussi les plus complexes à étudier. Ils sont souvent régis par un grand nombre de paramètres nonlinéaires interagissant entre eux (la modélisation de la pollution atmosphérique, la turbulence des fluides et es écoulements dans les conduites ...). Les modèles mathématiques sont déterminées d'après le phénomène physique. Ces modèles utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées

Partielles (EDP) non-linéaires dont on ne connaît pas de solutions analytiques en général. Il faut alors résoudre le problème numériquement en transformant les équations continues de la physique en un problème discret sur un certain domaine de calcul (le maillage). Pour la discrétisation de ce problème, on utilise des méthodes numériques qui sont disponibles dans la littérature, il existe trois grandes familles de méthode :

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des volumes finis (MVF).

1.1 Méthodes des différences finies :

La variable inconnue est décrite par plusieurs valeurs dans les points d'un maillage. Le développement de l'inconnue en séries Taylor tronquées est utilisé pour approximer les dérivées de l'inconnue, dans chaque point du maillage, par différences finies en utilisant les inconnues voisines. En remplaçant les dérivées dans les équations différentielles par différences finies on obtient un système d'équations algébriques pour les valeurs de l'inconnue dans chaque point du maillage.

1.2 Méthodes des éléments finis :

Dans la méthode des éléments finis, on utilise des fonctions linéaires ou quadratiques sur chaque élément, pour décrire la variation locale de l'inconnue. Les équations différentielles sont exactement vérifiées par la solution exacte. En remplaçant l'approximation de dans les équations différentielles, on constate que ces-dernières ne vérifient pas exactement, et un résidu est défini dans ce cas pour mesurer l'erreur. Le résidu est minimisé en le multipliant par une fonction de Pondération et en l'intégrant. Le résultat de l'intégration est un ensemble d'équations algébriques pour les coefficients des fonctions d'approximation. Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux problèmes d'équilibre, elle permet de traiter des géométries complexes contrairement aux différences finies mais elle demande un grand coût de temps de calcul et de mémoire.

1.3 Méthodes des volumes finis :

La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes entourant chaque point du maillage. Cette méthode, même si elle ne fournit qu'une précision du premier ordre, possède des qualités qui en font l'une des plus adaptées à l'étude des écoulements turbulents. En effet, celle-ci est très robuste et permet de traiter des équations comportant des termes sources complexes et non linéaires. De plus, elle a l'avantage de satisfaire la conservation de la masse sur chaque volume de contrôle. Enfin, elle peut être utilisée avec des maillages relativement grossiers, ce qui permet la mise en œuvre de code pour un coût raisonnable. Comme la plupart des codes commercialisés tels que: PHOENICS, STAR-CD, CFX3D, FLUENT ...etc. Le code ANSYS utilise la méthode des volumes finis pour la modélisation numérique. Les principes fondamentaux de la méthode des volumes finis sont brièvement rappelés ici.

2. Discrétisation des équations de transport :

Les équations précédentes peuvent être écrites sous la forme généralisée suivante

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi \quad (\text{III.1})$$

Ou encore:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho U \varphi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V \varphi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho W \varphi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + S_\varphi \quad (\text{III.2})$$

Considérons le volume de contrôle sur la figure (III.1).

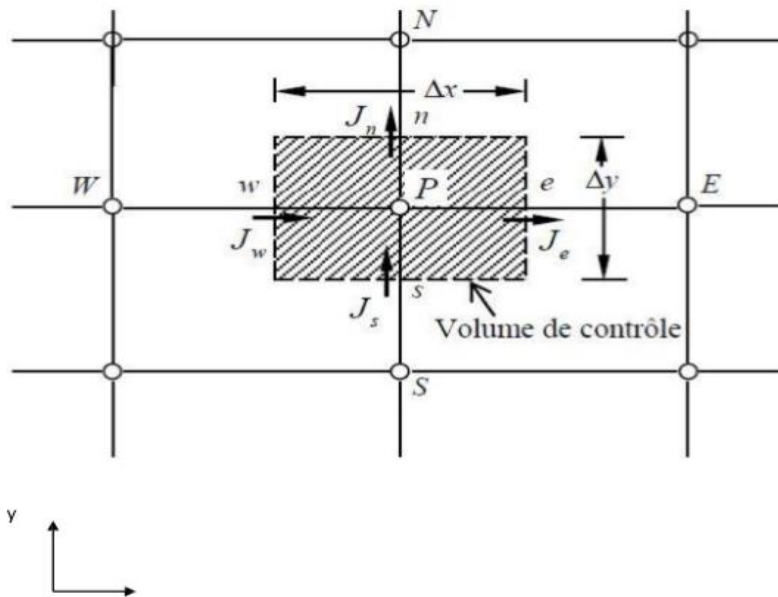


figure (III.1): Volume de contrôle pour un écoulement bidimensionnel.

L'intégration de l'équation (III.2) sur le volume de contrôle de la (figure (III.1)) donne :

$$J_e - J_w + J_n - J_s = \iint S_\varphi dV \quad (III.3)$$

où les indices e, w, n, s , indiquent que les quantités correspondantes sont évaluées aux faces est, ouest, nord et sud du volume de contrôle, respectivement, et les quantités J_e, J_w, J_n, J_s sont les flux totaux intégrés sur les faces du volume de contrôle, où leurs expressions sont donnés par :

$$\begin{aligned} J_e &= \int_s^n (\rho U \varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x})_e dy = [(\rho U)_e \varphi_e - \frac{\Gamma_{\varphi,e}}{\Delta x_{EP}} (\varphi_E - \varphi_P)] \Delta y_{ns} \\ J_w &= \int_s^n (\rho U \varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x})_w dy = [(\rho U)_w \varphi_w - \frac{\Gamma_{\varphi,w}}{\Delta x_{WP}} (\varphi_P - \varphi_W)] \Delta y_{ns} \\ J_n &= \int_w^e (\rho V \varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y})_e dx = [(\rho V)_n \varphi_n - \frac{\Gamma_{\varphi,n}}{\Delta x_{NP}} (\varphi_N - \varphi_P)] \Delta y_{ew} \\ J_s &= \int_w^e (\rho V \varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y})_s dx = [(\rho V)_s \varphi_s - \frac{\Gamma_{\varphi,s}}{\Delta x_{PS}} (\varphi_P - \varphi_S)] \Delta y_{ew} \end{aligned} \quad (III.4)$$

La tâche la plus difficile dans l'évaluation de J_e, J_w, J_n et J_s est celle de l'approximation des quantités $\varphi_e, \varphi_w, \varphi_n$ et φ_s .

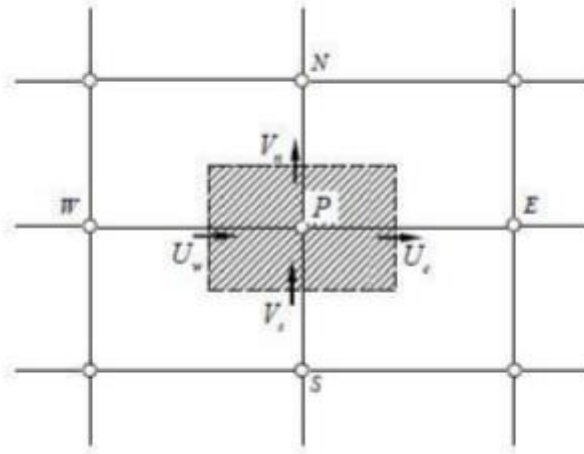


Figure (III.2): Volume d'intégration de l'équation de continuité.

De la même façon, l'intégration de l'équation de continuité sur le volume de contrôle de la figure (III.2) conduit à :

$$\mathbf{F}_e - \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_n - \mathbf{F}_s = \mathbf{0} \quad (III.5)$$

Où $\mathbf{F}_e, \mathbf{F}_w, \mathbf{F}_n$ et \mathbf{F}_s sont les flux de masse de l'écoulement à travers les faces du volume de contrôle définis par :

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_e &= (\rho U)_e \Delta y_{ns} \\ \mathbf{F}_w &= (\rho U)_w \Delta y_{ns} \end{aligned} \quad (III.6)$$

$$F_n = (\rho V)_n \Delta y_{ew}$$

$$F_s = (\rho V)_s \Delta y_{ew}$$

L'intégration du terme source est obtenue en supposant qu'est uniforme sur le Volume de contrôle.

$$\iint_v S_\varphi dV \cong S_u + s_p \varphi_p \quad (\text{III.7})$$

Effectuons l'opération ((III.3)- (III.5)* φ_p) et remplaçons le terme source par son expression (III.7) dans l'équation (III.3), après quelques manipulations, on obtient :

$$(J_w - F_w \varphi_p) + (J_n - F_n \varphi_p) - (J_s - F_s \varphi_p) = (S_U - S_U \varphi_p) \quad (\text{III.8})$$

(III.7) On utilise de nouvelles notations D (D représente la diffusion) définies par :

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{\delta x_e} \Delta y_{ns}$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w}{\delta x_w} \Delta y_{ns} \quad (\text{III.9})$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n}{\delta y_n} \Delta y_{ew}$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s}{\delta y_s} \Delta y_{ew}$$

L'équation discrétisée complète peut alors s'écrire sous la forme :

$$a_p \varphi_p = \sum_{i=N,S,E,W} a_i \varphi_i + b \quad (\text{III.10})$$

Où :

$$a_E = D_e A(|P_e|) + F_e \mathbf{0}$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + F_w \mathbf{0} \quad (\text{III.11})$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + F_n \mathbf{0}$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + F_s \mathbf{0}$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S - S_p$$

$$b = S_U$$

Est le nombre de Peclet défini pour les différentes faces par :

$$P_e = \frac{F_e}{D_e} \quad ; \quad P_w = \frac{F_w}{D_w} \quad ; \quad P_n = \frac{F_n}{D_n} \quad ; \quad P_s = \frac{F_s}{D_s} \quad (\text{III.12})$$

La fonction $\mathbf{A}(|\mathbf{P}|)$ est choisie en fonction du schéma de discrétisation désiré.

3. Présentation de notre plateforme de travail : ANSYS Workbench 2019.R3

3.1 ANSYS Inc

Fondée en 1970, ANSYS, Inc. développe et commercialise dans le monde entier logiciel de simulation et technologies largement utilisés par les ingénieurs, les concepteurs, les chercheurs et les étudiants dans une variété d'industries et de disciplines. Cercles académiques. ANSYS, Inc. se spécialise dans le développement de solutions ouvertes et flexibles, permettant aux utilisateurs d'analyser directement les données sur leurs ordinateurs de bureau, tout en ayant une plate-forme commune qui prend en charge le rapide, efficace développement de produits compétitifs, de la phase conceptuelle jusqu'aux essais finaux et aux Validation.

ANSYS Workbench donne accès à certaines applications aux ingénieurs sans connaissance du CFD. Avec l'importance croissante des calculs couplés (fluide/structure interaction), cet aspect déjà bien établi dans la gamme de produits ANSYS est d'autant plus Important.

3.2 ANSYS Fluent

Le calcul numérique a été effectué à l'aide du code "Fluent ». Fluent est un code CFD (anonyme de : Computational Fluid Dynamics) qui permet prédiction des flux de fluides en résolvant des équations d'équilibre basées sur la méthode du volume fini et systèmes de discrétion existant dans sa base de données. Fluent permet de simuler tous les flux de fluides, incompressible ou compressible, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que les multiphases les flux, les turbulences, le transfert de chaleur, les réactions chimiques, etc.

Le logiciel Fluent dispose de très bonnes interfaces qui permettent une simulation facile. Mise en place d'un la simulation à l'aide d'ANSYS Fluent se fait en trois étapes :

- ANSYS- Fluent-Pre : lorsque vous installez la géométrie de la maille, vous choisissez le mode, le modèle, les conditions limites....
- ANSYS- Fluent-Solver : qui résout les équations et affiche les différents résidus à chaque itération.
- ANSYS- Fluent -Post: où les résultats sont exploités. La séquence logique du processus d'analyse à l'aide du logiciel ANSYS est affiché dans le figure ci-dessous.

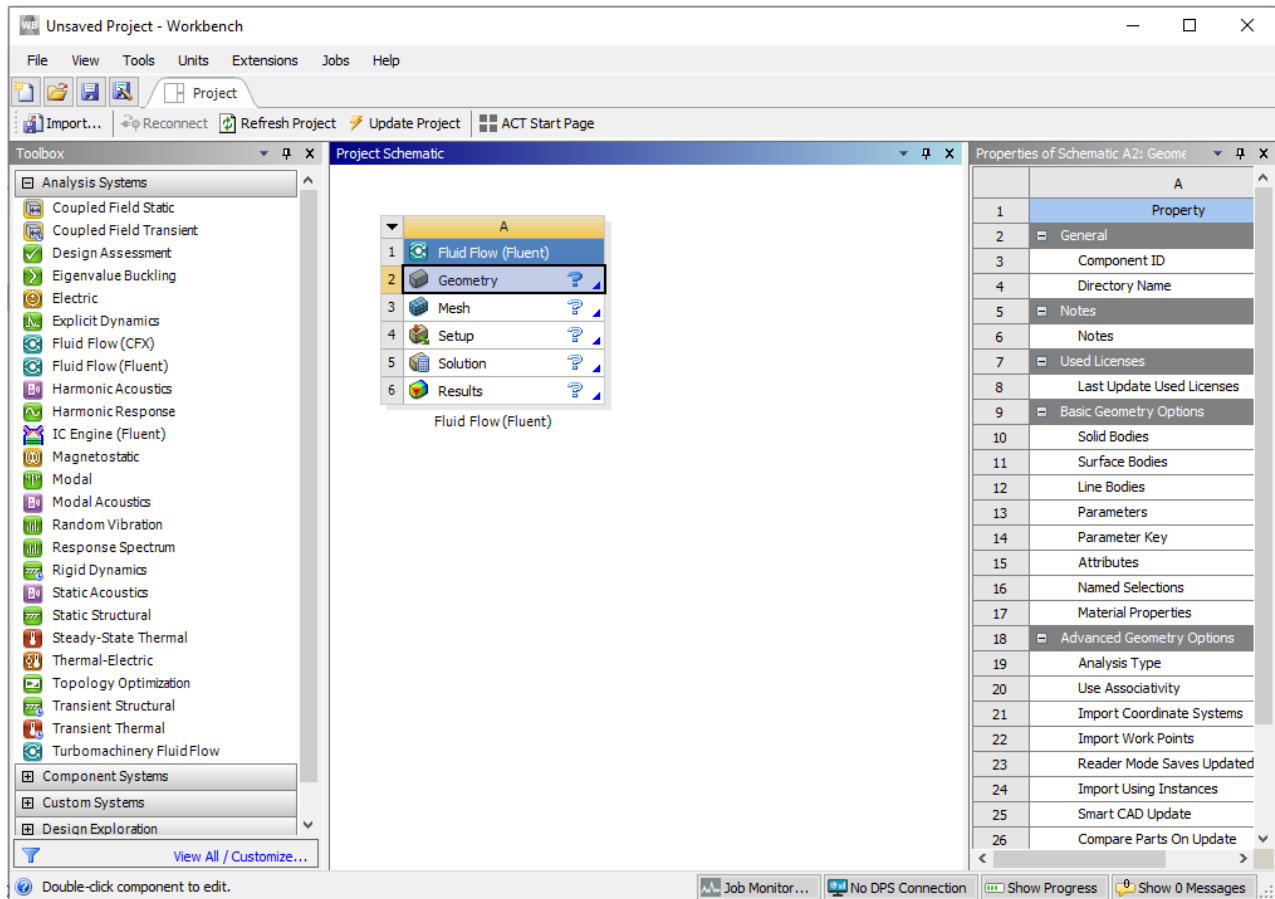
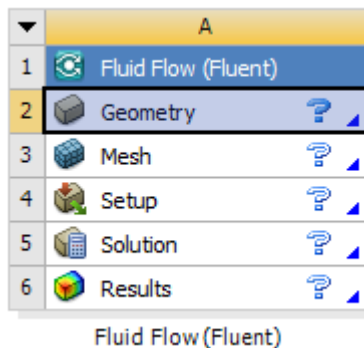


Figure (III.3): Interface graphique ANSYS Workbench.

3.3 Simulation CFD:

3.3.1 Geometry:

Sélectionnez Géométrie sous Schéma de projet dans ansys workbench. Cliquez avec le bouton droit sur Géométrie et sélectionnez Propriétés. Sélectionner le type d'analyse 2D sous Options de géométrie avancées dans propriétés de Schéma A2 : Géométrie. Cliquez avec le bouton droit sur Géométrie dans Le schéma de projet et sélectionnez pour lancer Nouvelle géométrie designmodeler. Sélectionnez Unités>Millimeter comme unité de longueur dans le menu Design Modeler.



Figure(III.4) : Sélection de la géométrie

	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Component ID	Geometry
4	Directory Name	FFF
5	Notes	
6	Notes	
7	Used Licenses	
8	Last Update Used Licenses	
9	Basic Geometry Options	
10	Solid Bodies	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Surface Bodies	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Line Bodies	<input type="checkbox"/>
13	Parameters	Inde... ▾
14	Parameter Key	ANS;DS
15	Attributes	<input type="checkbox"/>
16	Named Selections	<input type="checkbox"/>
17	Material Properties	<input type="checkbox"/>
18	Advanced Geometry Options	
19	Analysis Type	2D ▾
20	Use Associativity	3D 2D
21	Import Coordinate Systems	<input type="checkbox"/>
22	Import Work Points	<input type="checkbox"/>
23	Reader Mode Saves Updated File	<input type="checkbox"/>
24	Import Using Instances	<input checked="" type="checkbox"/>
25	Smart CAD Update	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Compare Parts On Update	No ▾
27	Enclosure and Symmetry Processing	<input checked="" type="checkbox"/>
28	Decompose Disjoint Geometry	<input checked="" type="checkbox"/>

No DPS Connection
 Show Progress
 Show 0 Messages

Figure(III.5) Sélection du type d'analyse 2D

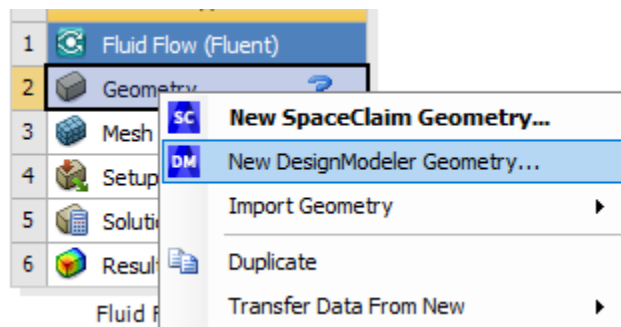


Figure (III.6):Lancement de DesignModeler

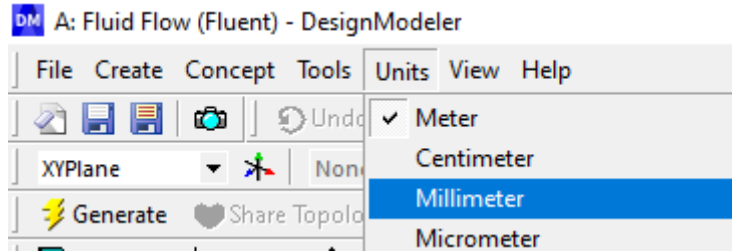
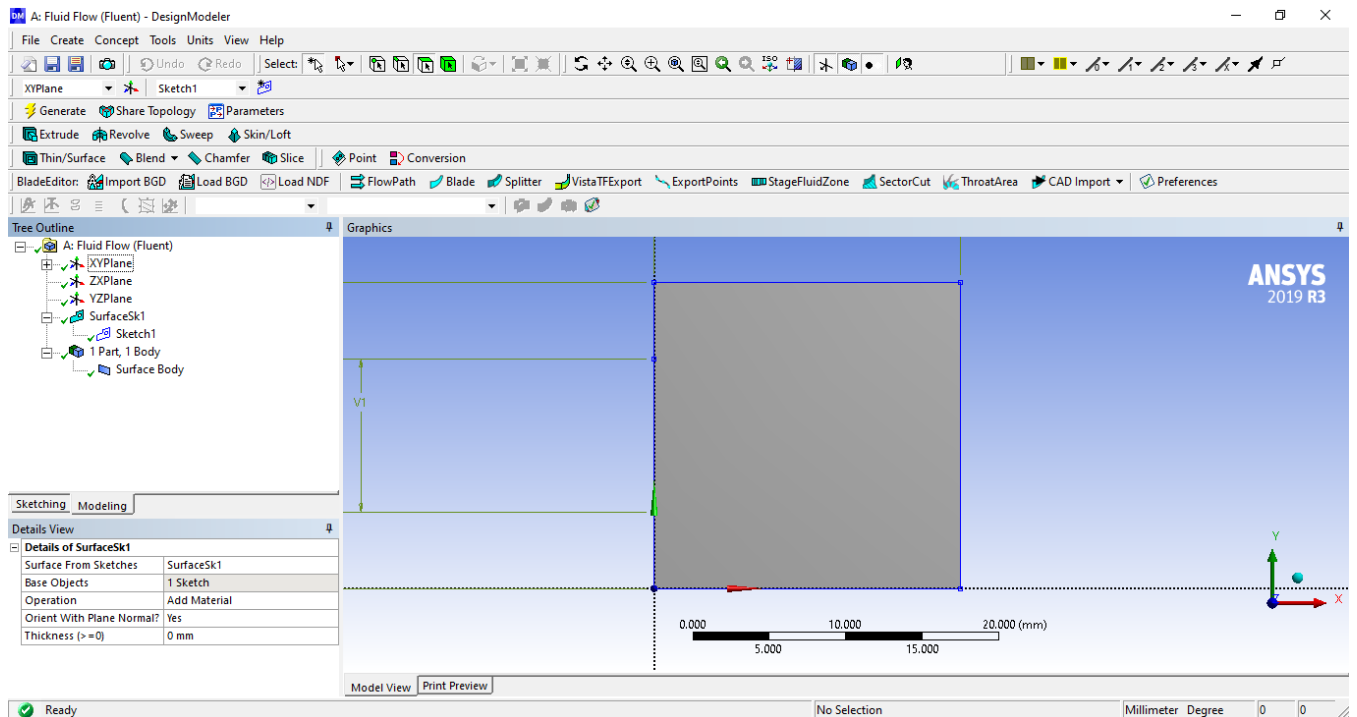


Figure (III.7) Sélection de l'unité de longueur



Figure(III.8) : vue 2D de la géométrie étudiée.

3.3.2 Maillage :

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

- le nombre de mailles.
- la distance entre les mailles (concentration des mailles).
- la forme de la maille.
- les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

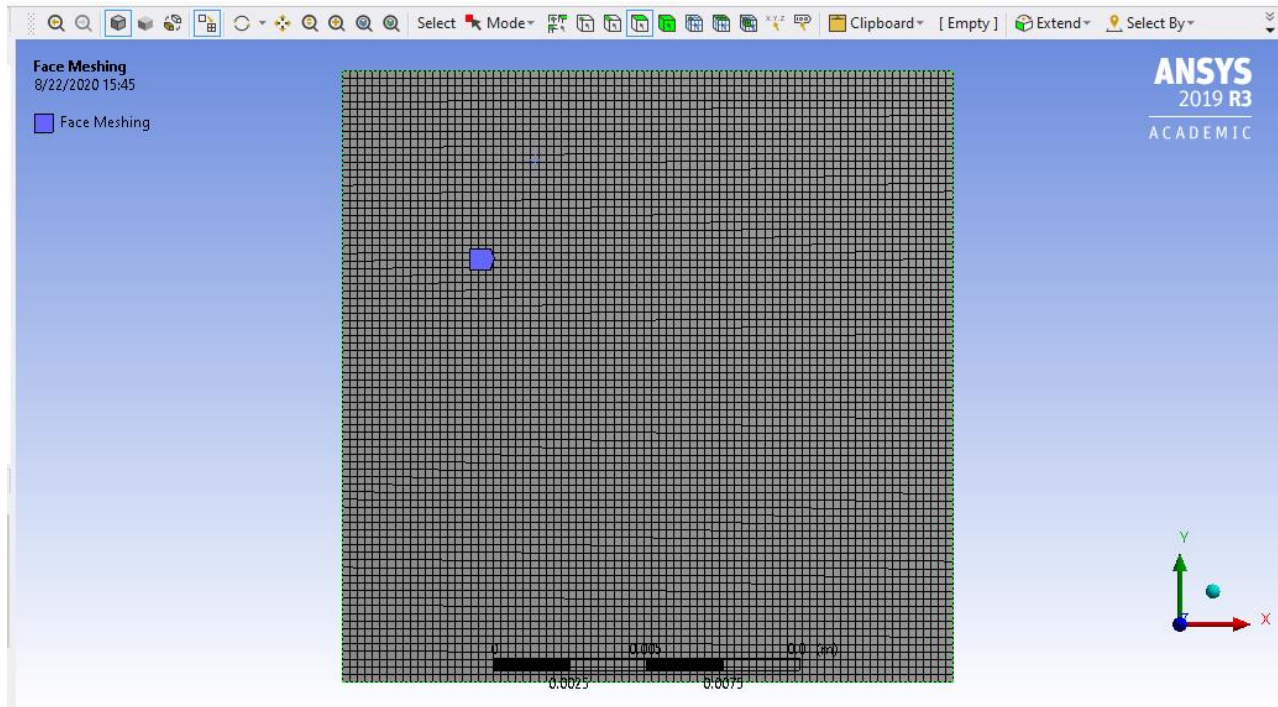
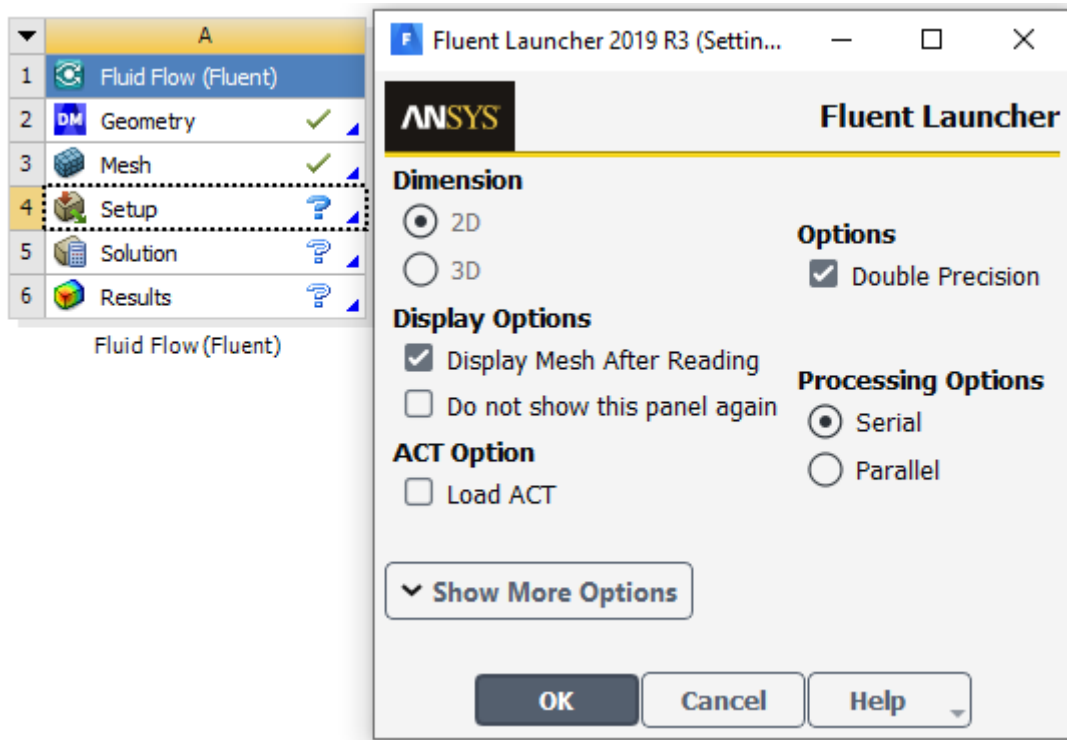


Figure (III.9) : 2D vue du maillage étudié.

3.3.3. Configuration :

FLUENT offre deux modes de calcul "double précision (dp)" et "simple Précision". Pour la plupart des cas, le solveur simple précision sera suffisamment exact, mais certains types de problèmes nécessitent l'utilisation de la version double précision.



Figure(III.10) 2D vue du Configuration étudié.

3.4. Solution :

Ansys FLUENT est un logiciel 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 relative facilité. Les types de mailles supportées sont :

- Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales.
- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales.

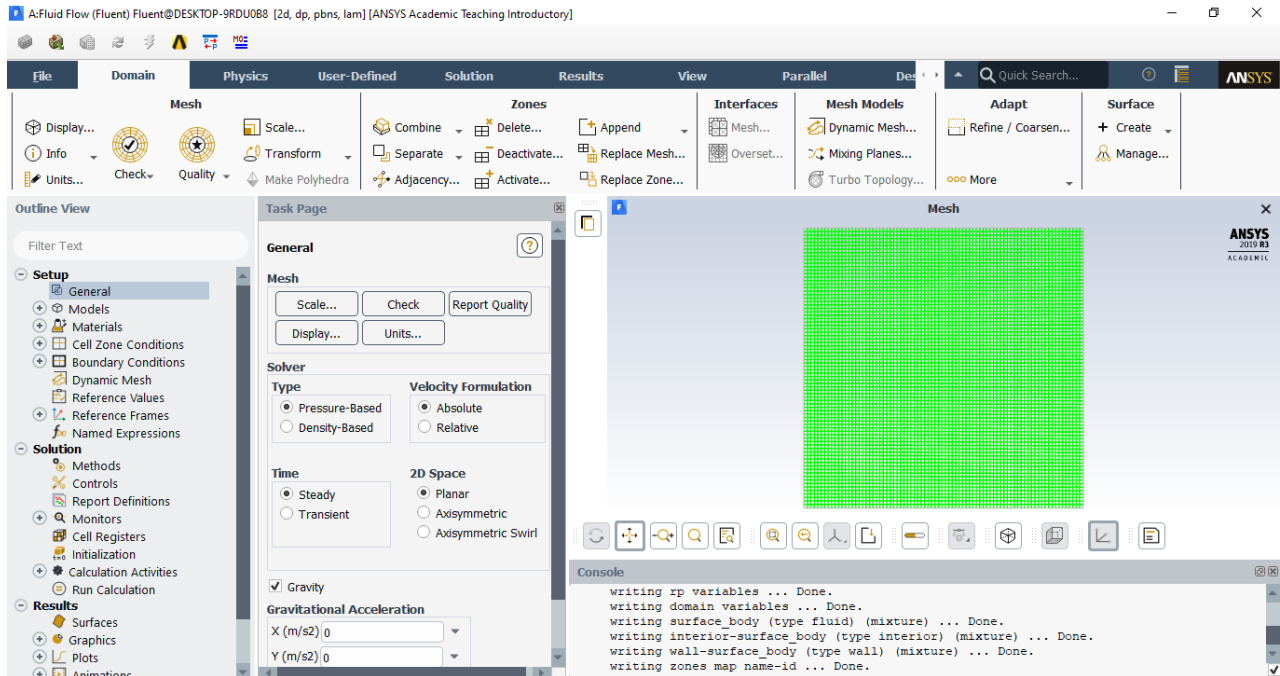


Figure (III.11) 2D vue du Solution (FLUENT) étudié.

3.4.1 Les étapes principales :

- ❖ L'énergie est «On » et pour le modèle visqueux (laminar)
- ❖ Material → fluid → *Entrer des propriétés*
- ❖ *conditions limites* → *Entrer les conditions* .
- ❖ *Méthodes* → *Régime (simple)*.
- ❖ *initialize* → *initialisation standard(tous zones)* → *initialize*.
- ❖ *exécuter le calcul* → *nombre d'itérations* → *calcul*

Figure (III.12)

Figure (III.13)

Figure (III.14)

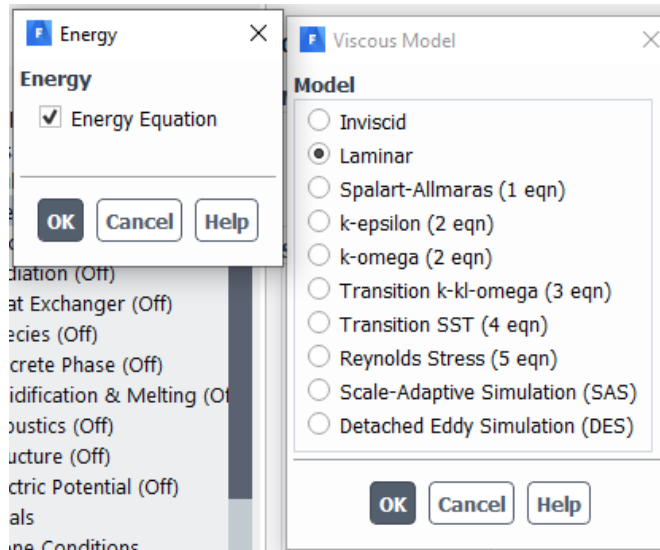


Figure (III.12) les

tapes de simulation

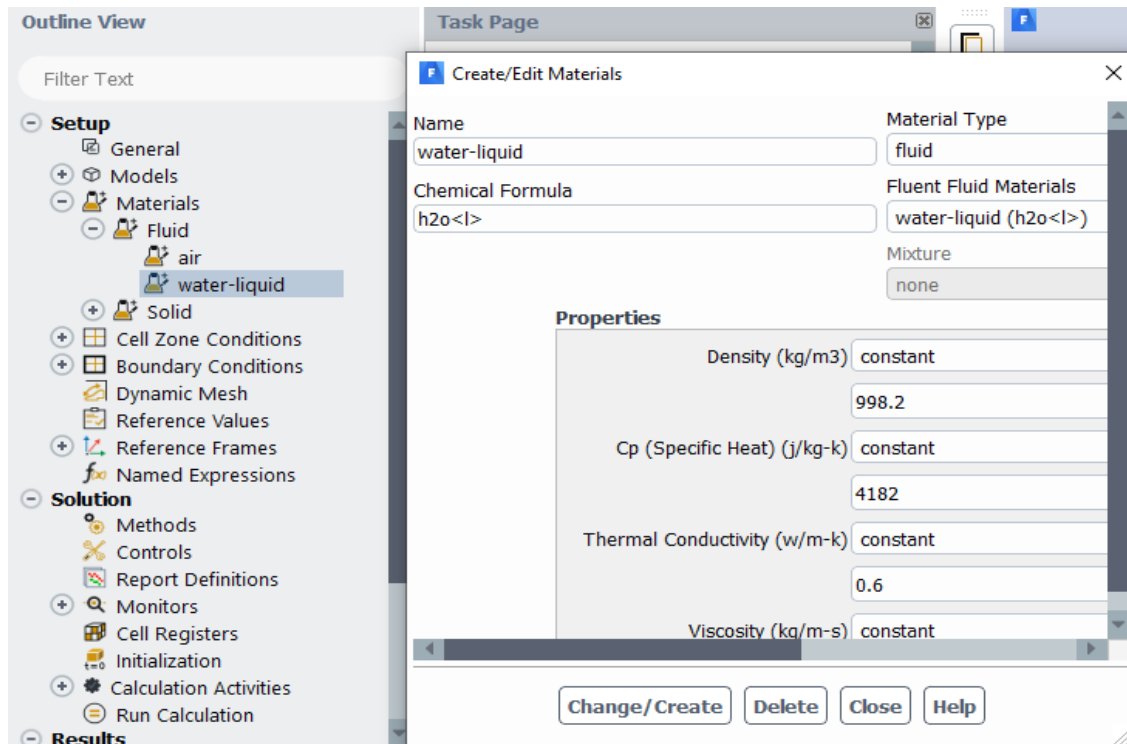


Figure (III.13): les propriétés du fluide utilisé.

3.5 résultats :

Les résultats sont exploités comme :

- ❖ Champ de température (isothermes, vecteurs de vitesse).

4. Conclusion :

A Travers ce chapitre, nous avons présenté brièvement la méthode des volumes finis, les étapes de discrétisation du modèle mathématique, ainsi que la résolution des équations algébriques. Une résolution numérique bidimensionnelle des équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie a été mise en œuvre pour simuler la circulation de l'air et le champ de température dans l'enceinte. La résolution est effectuée par Ansys, basé sur la méthode des volumes finis. Les résultats obtenus par ce code sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus par simulation numérique 2D de l'écoulement et du transfert de chaleur d'un nanofluide (fluide de base : eau ; nanoparticules : Cu, Al₂O₃ et TiO₂) dans une cavité carrée.

Nous allons d'abord voir l'effet de l'espacement des mailles sur nos résultats du calcul numérique, nous allons valider les résultats, en comparant nos résultats obtenus avec ceux obtenus dans la littérature. Ensuite, nous étudierons l'influence de plusieurs paramètres sur l'écoulement et le transfert de chaleur dans la cavité. Tel que :

- Nombre de Rayleigh (Ra = 10⁴, 5 × 10⁴, 10⁵ et 5 × 10⁵, 10⁶).
- Type de nano-fluide : eau-Cu, eau-Al₂O₃ et eau-TiO₂.
- Fraction volumique de nanoparticules.

Les résultats de simulation numérique obtenus sont présentés sous la forme de :

- champs de température,
- lignes de courants,
- Profils des composantes de vitesse horizontale et verticale.
- Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh.

IV.2 Test de sensibilité du maillage

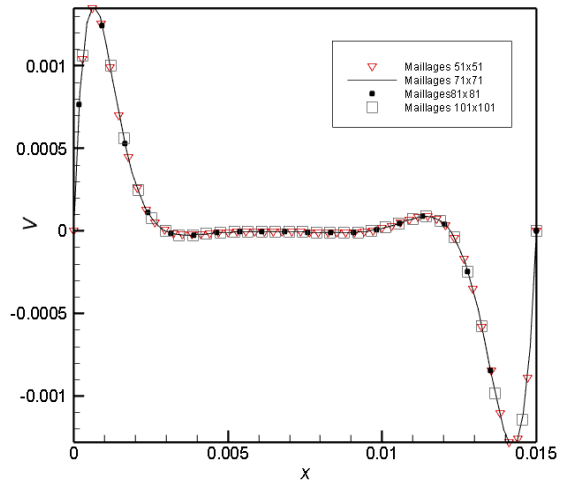
Le choix du maillage a une grande influence sur la recherche d'un compromis entre précision et rapidité de calcul. Pour explorer l'effet de l'espacement maillage sur les solutions numériques, nous avons testé quatre maillages uniformes : 52 x 52 , 72 x 72 , 92 x 92 et 112 x 112 nœuds. L'évolution du nombre de Nusselt moyen a été réalisée pour quatre combinaisons différentes de maillage dans une cavité carrée, remplie TiO₂, pour le nombre de Rayleigh Ra = 10⁴, 5 × 10⁴, 10⁵ et 5 × 10⁵, 10⁶ , est présenté dans le tableau ci-dessous.

Sur la figure IV. 1, on présente le profils de composantes de vitesse verticale (a), composante de vitesse horizontales (b) et de la température au centre de la cavité pour différents maillages et pour ($Ra=5. 10^5$). On remarque une faible différence entre les quatre maillages.

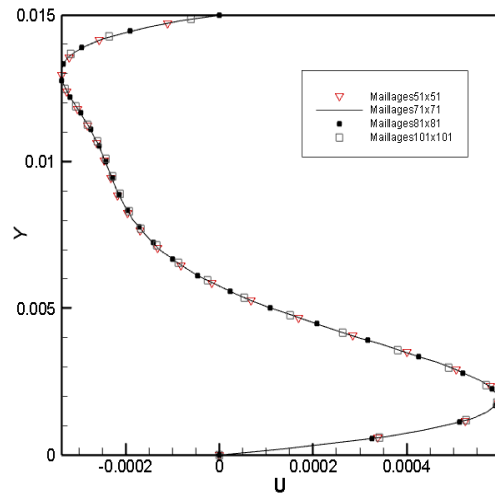
Tableau IV.1: Variation du nombre de Nusselt sur la paroi chaude en fonction du maillage.

/	Ra	H (cm)	Nu
Maillage 52 × 52	10^4	0.0042	1.456266
	5×10^4	0.0071	2.669454
	10^5	0.00895	3.864744
	5×10^5	0.0153	5.489731
	10^6	0.0193	6.398245
Maillage 72 × 72	10^4	0.0042	1.347865
	5×10^4	0.0071	2.548765
	10^5	0.00895	3.238769
	5×10^5	0.0153	5.128797
	10^6	0.0193	5.865721
Maillage 92 × 92	10^4	0.0042	1.299764
	5×10^4	0.0071	2.516485
	10^5	0.00895	3.197864
	5×10^5	0.0153	5.094685
	10^6	0.0193	5.826988
Maillage 112 × 112	10^4	0.0042	1.264982
	5×10^4	0.0071	2.486158
	10^5	0.00895	3.167812
	5×10^5	0.0153	5.076518
	10^6	0.0193	5.786541

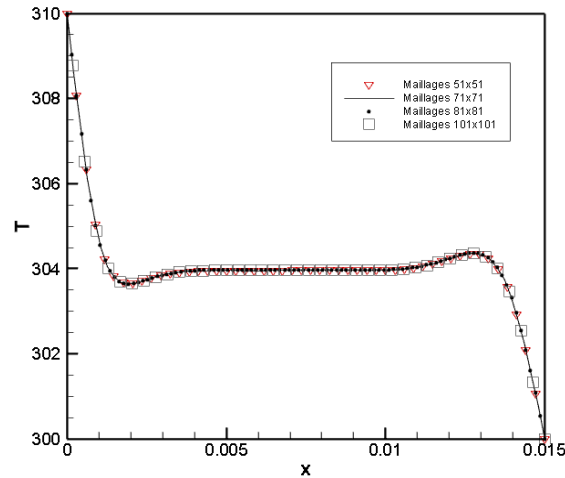
S



(a)



(b)



(c)

Figure IV.1: Profils de composantes de vitesse verticale (a), composante de vitesse horizontales (b) de température au centre de la cavité pour différents maillages ($Ra=5 \cdot 10^5$).

VII.3 validation et comparaison avec la littérature :

Afin de valider nos résultats numériques obtenus, nous avons fait une comparaison de nos résultats de simulation avec le travail de *khanafer*, les mêmes conditions aux limites de ce travail ont été utilisés pour la comparaison, une cavité carrée remplie d'air ($Pr = 0,71$), les parois horizontales sont adiabatiques et la paroi gauche à la température $T=310$ et la paroi droite à la température $T=300$. Ainsi, le même maillage a été utilisé par la référence, maillage uniforme 72×72 nœuds, le nombre de Rayleigh variant de $= Ra = 5 \times 10^4, 5 \times 10^5$.

Tableau IV.2 : Comparaison de nos résultats de la simulation avec Khanafer et al. [15]

Ra	Nu	
	Présente étude	Khanafer et ali. [15]
5×10^4	2.548	2.245
5×10^5	5.128	4.522

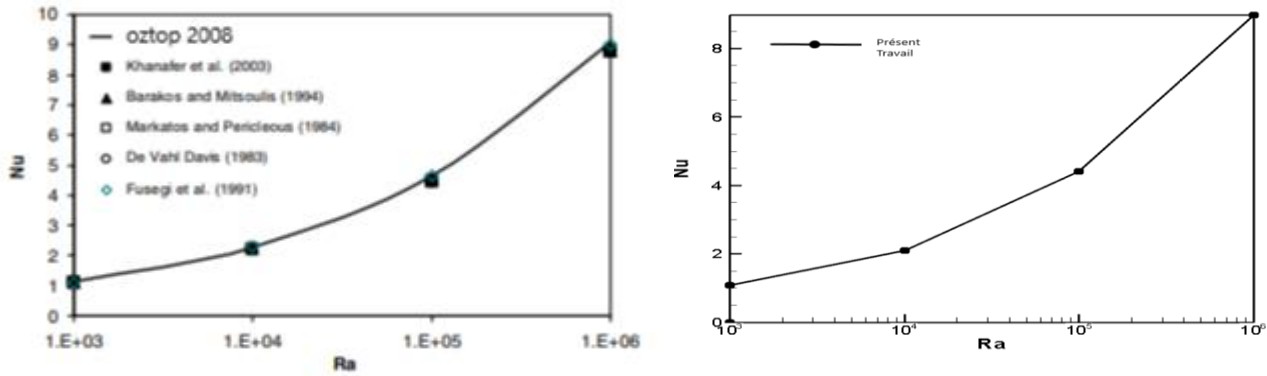


Figure IV. 2: Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Rayleigh ($A=1$) et ($Pr=0.7$).Oztop et al. [8] (gauche) et Présent Travail (droite)

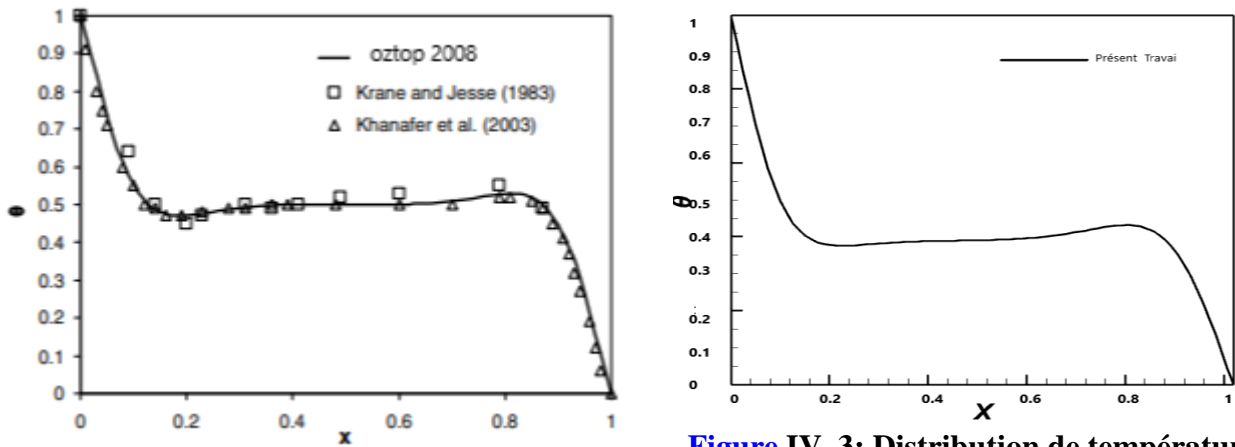


Figure IV. 3: Distribution de température ($Ra = 10^5$, $Pr=0.7$), oztop et al. [8] (gauche) et Présent Travail (droite) .

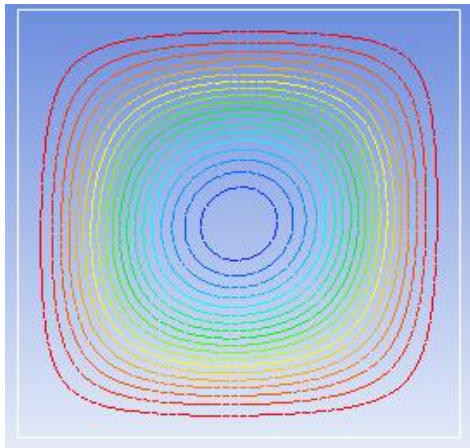
IV.4 Effet du nombre de Rayleigh :

Les figures IV.4-9 illustrent les isothermes et lignes de courant des trois nanofluides dans la cavité aux parois verticales différentiellement chauffées. Une légère inclinaison des isothermes est observée à un Rayleigh égal à 10^4 indiquant ainsi la naissance de la convection. Il est également constaté que l'allure des isothermes est très influencée par l'augmentation du nombre de Rayleigh. En effet, les isothermes sont presque parallèles aux parois verticales de l'enceinte au niveau des coins hauts à droite et bas à gauche, alors qu'elles deviennent presque horizontales au milieu de l'enceinte et ceci au fur et à mesure que Rayleigh augmente ($Ra=10^5$, $Ra=5 \times 10^5$). On constate aussi

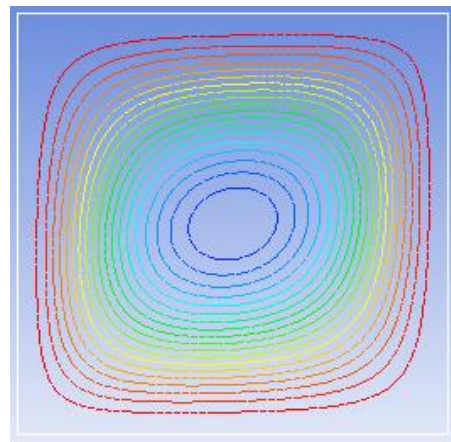
que l'écoulement thermique est principalement concentré auprès des parois actives (parois verticales isothermes) caractérisé par des isothermes d'autant plus serrées que le nombre de Rayleigh est élevé. Ceci indique un transfert de chaleur pariétal intéressant alors que la partie centrale est quasiment homogène.

les lignes de courant indiquent que l'écoulement est monocellulaire occupant la majeure partie de l'enceinte. En augmentant le nombre de Rayleigh, la forme de ces lignes se modifie d'une forme circulaire à une autre elliptique. On note que, les lignes de courant présentent une symétrie par rapport au centre de la cavité et l'intensité de ces lignes diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche du centre de la cavité.

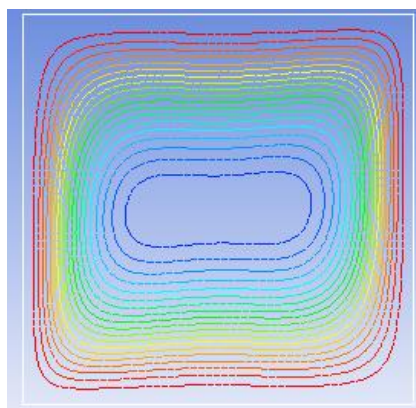
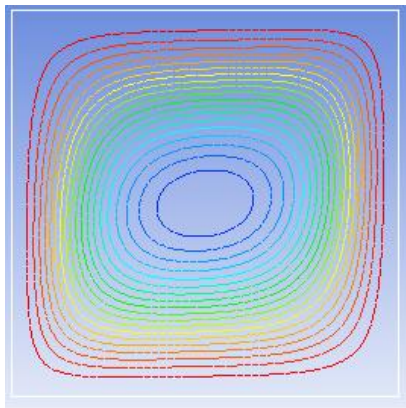
Toutefois, une légère diminution de l'intensité de ces lignes par rapport au cas de l'eau pure est obtenue. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la présence des nanoparticules entraîne une intensification de la traînée visqueuse qui tend à son tour à ralentir le mouvement du fluide à l'intérieur de la cavité.



a) $Ra = 10^4$

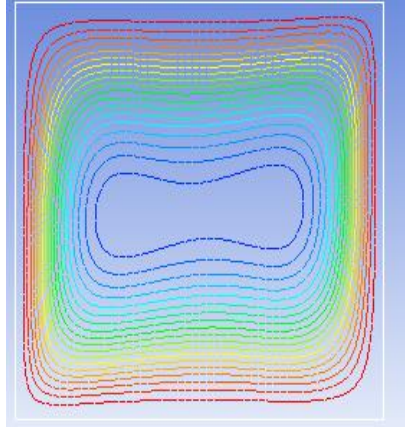


b) $Ra = 5 \times 10^4$



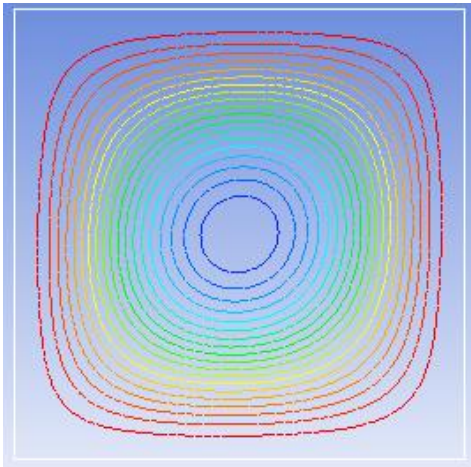
c) $Ra = 10^5$

d) $Ra = 5 \times 10^5$

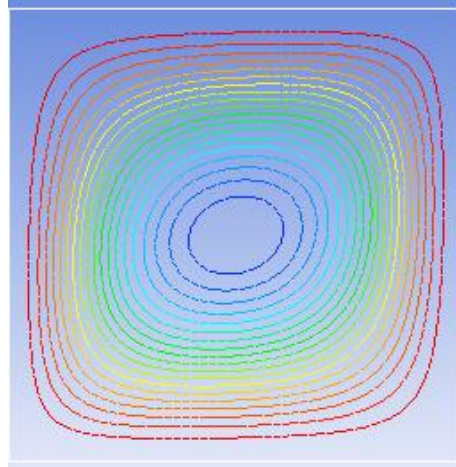


e) $Ra = 10^6$

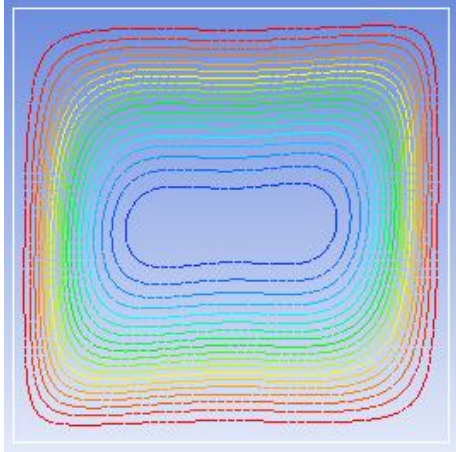
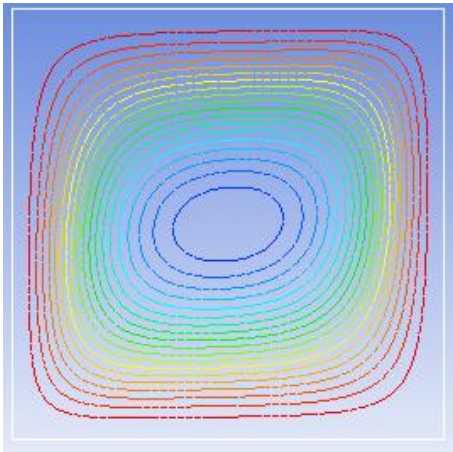
Figure IV.4 : Lignes de courant pour différents nombre de Rayleigh et pour le cas de nanofluide TiO_2



a) $Ra = 10^4$

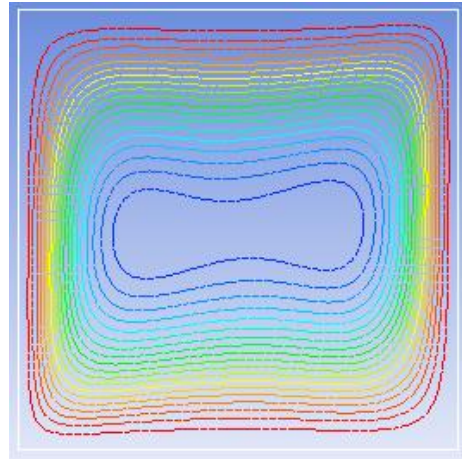


b) $Ra = 5 \times 10^4$



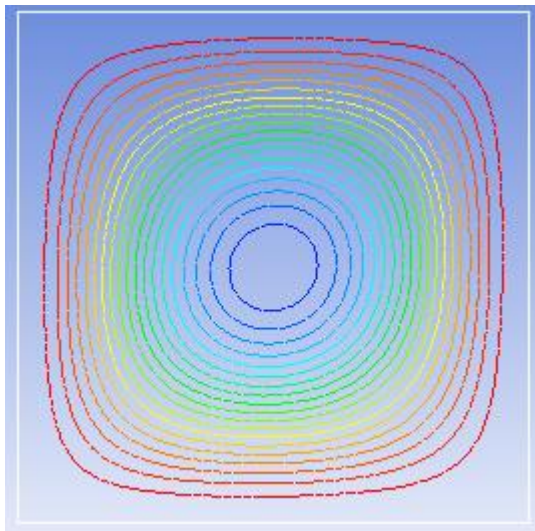
c) $Ra = 10^5$

d) $Ra = 5 \times 10^5$

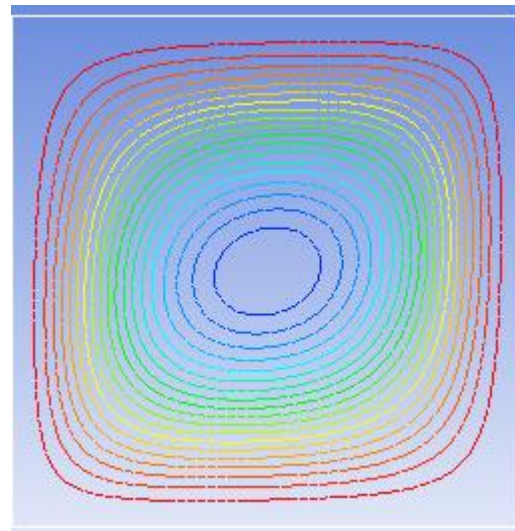


e) $Ra = 10^6$

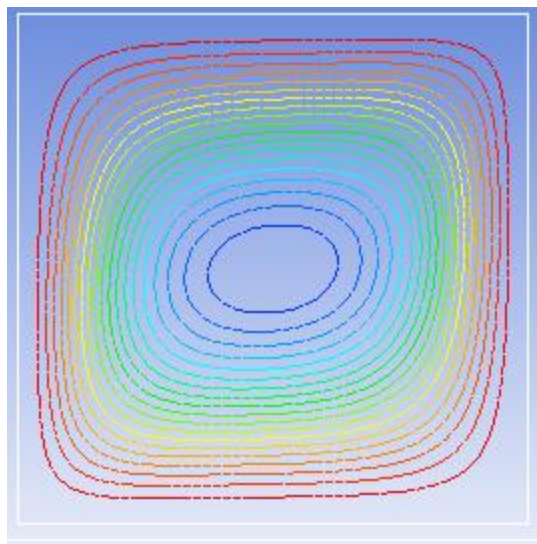
Figure IV.5 : Lignes de courant pour différents nombre de Rayleigh et pour le cas de nanofluide eau-Cu



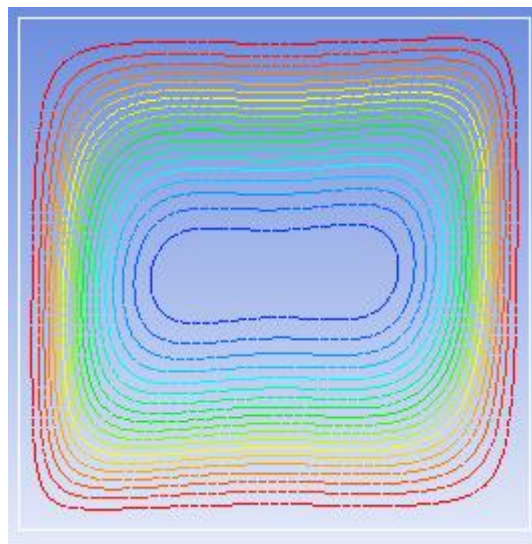
a) $Ra = 10^4$



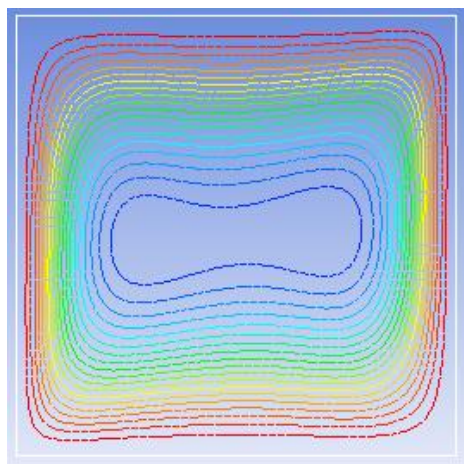
b) $Ra = 5 \times 10^4$



c) $Ra = 10^5$

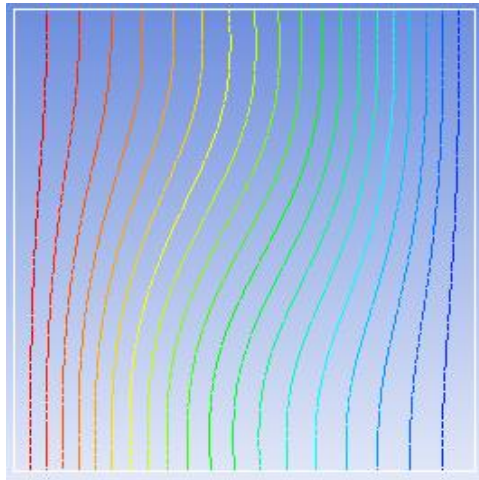


d) $Ra = 5 \times 10^5$

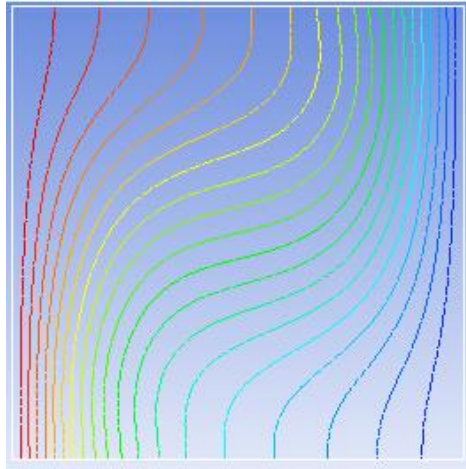


e) $Ra = 10^6$

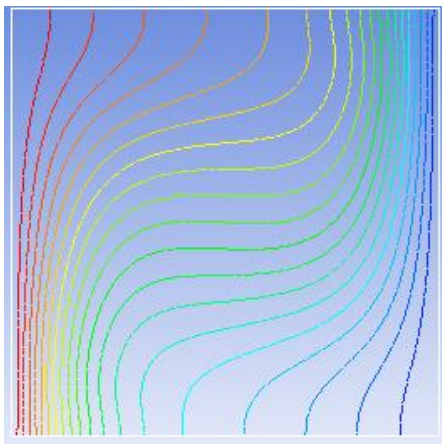
Figure IV.6 : Lignes de courant pour différents nombre de Rayleigh et pour le cas de nanofluide eau- Al_2O_3



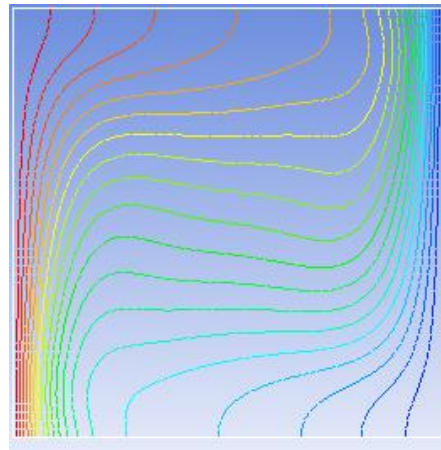
a) $Ra = 10^4$



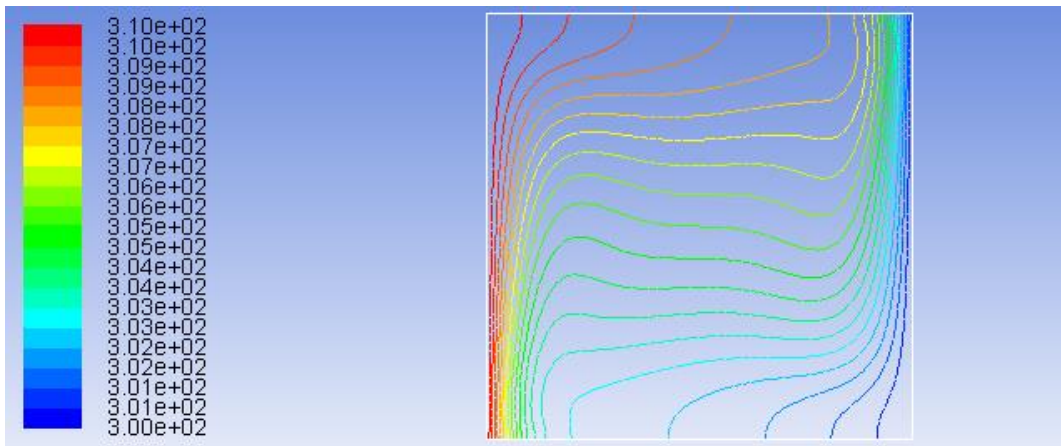
b) $Ra = 5 \times 10^4$



c) $Ra = 10^5$

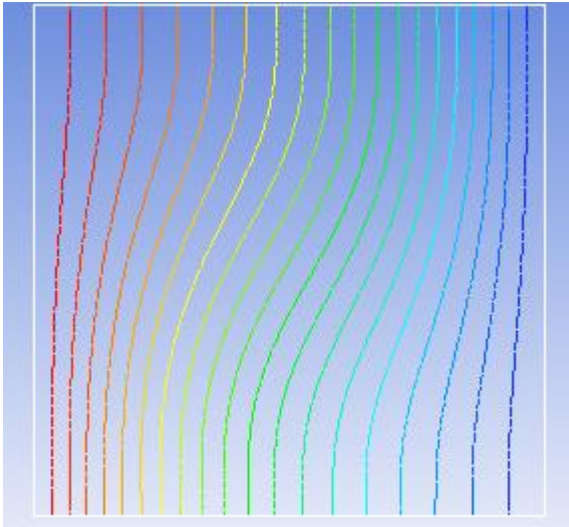


d) $Ra = 5 \times 10^5$

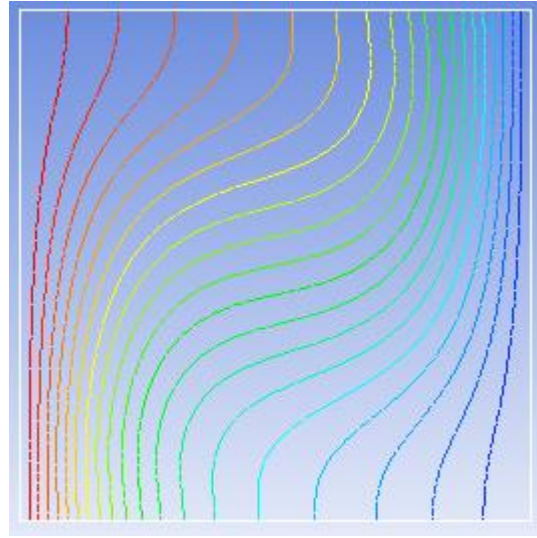


e) $Ra = 10^6$

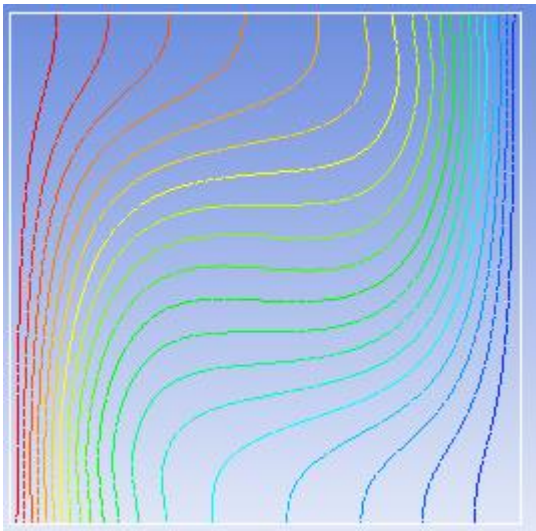
Figure IV.7 : Lignes isothermes pour différents nombre de Rayleigh et pour TiO_2



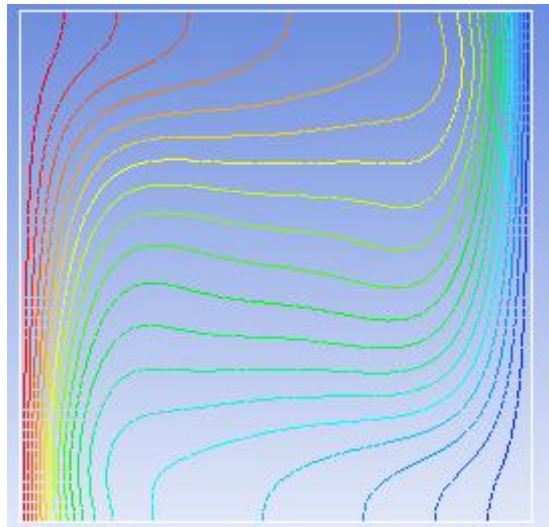
a) $Ra = 10^4$



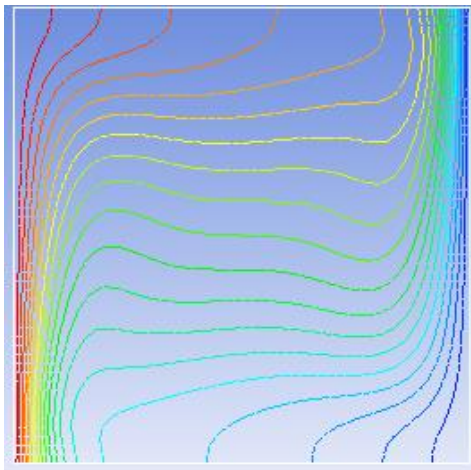
b) $Ra = 5 \times 10^4$



c) $Ra = 10^5$

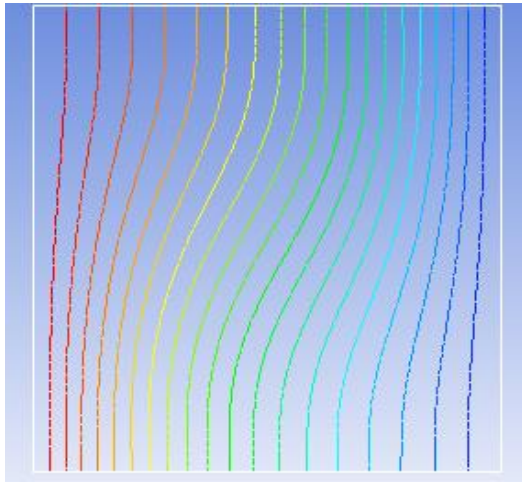


d) $Ra = 5 \times 10^5$

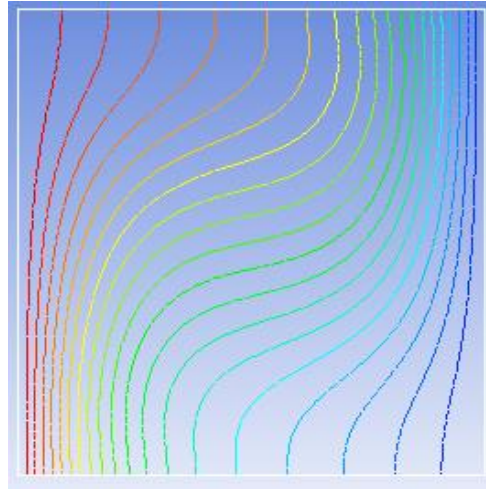


e) $Ra = 10^6$

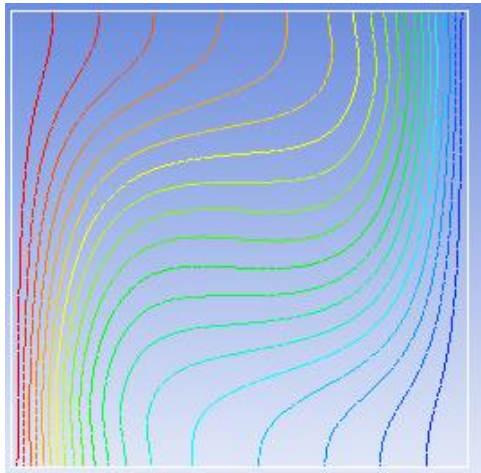
Figure IV.8 : Lignes isothermes pour différents nombre de Rayleigh et pour le cas de nanofluide eau-Cu



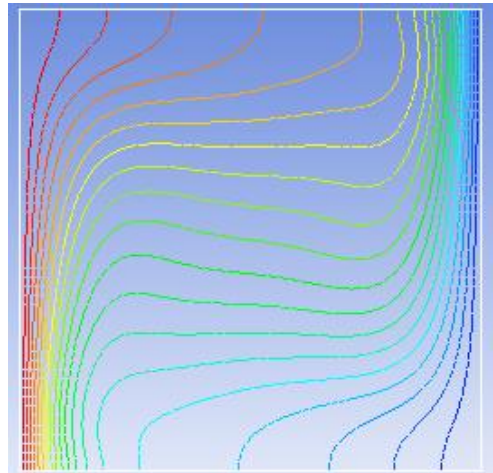
a) $Ra = 10^4$



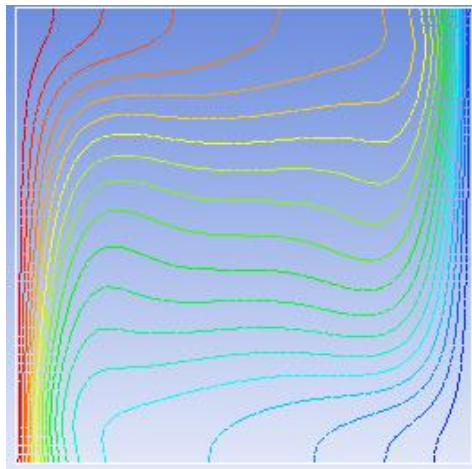
b) $Ra = 5 \times 10^4$



c) $Ra = 10^5$

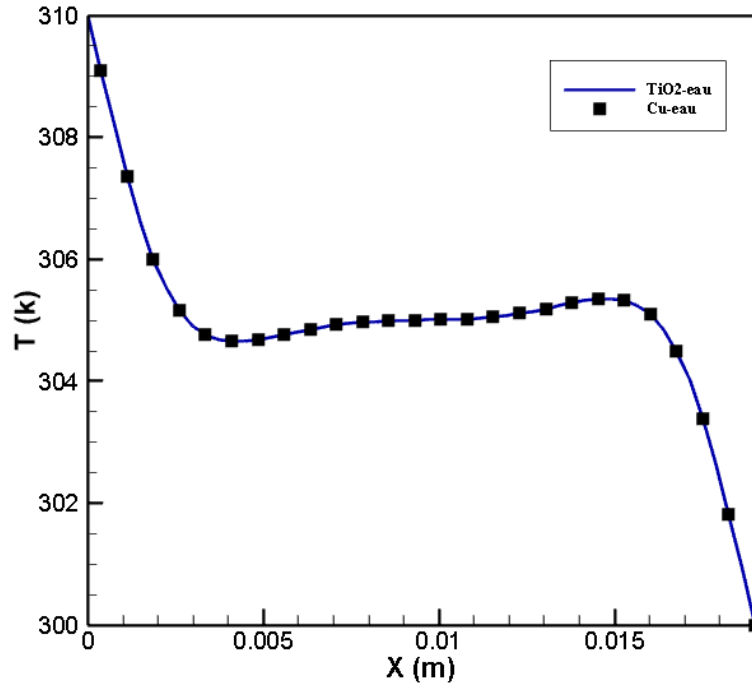


d) $Ra = 5 \times 10^5$



e) $Ra = 10^6$

Figure IV.9 : Lignes isothermes pour différents nombre de Rayleigh et pour le cas de nanofluide eau- Al_2O_3



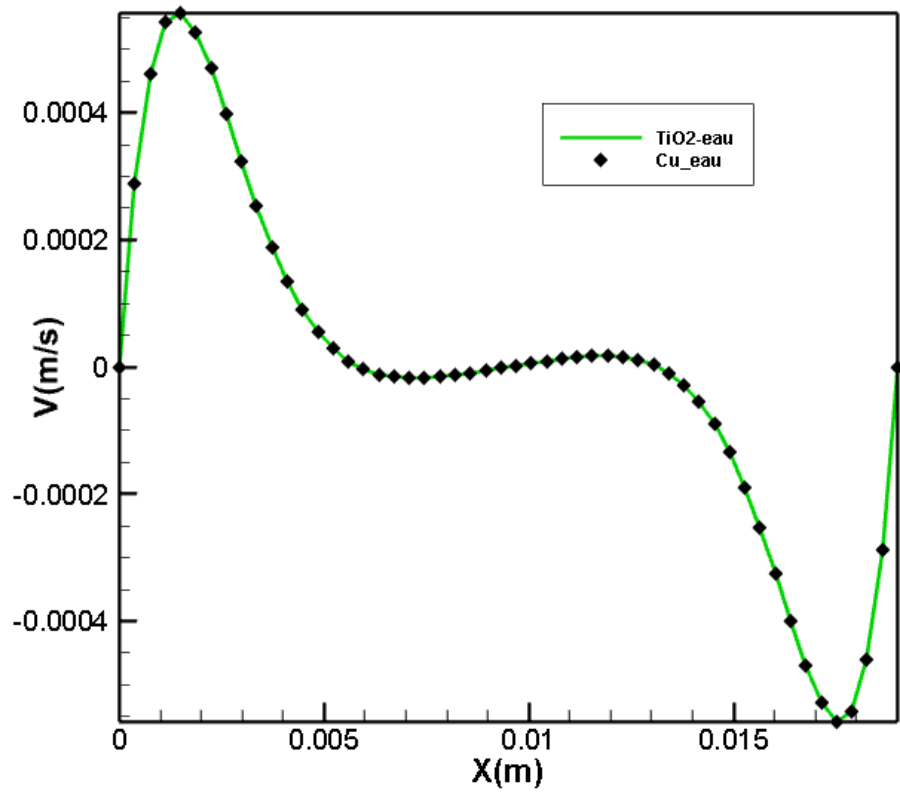
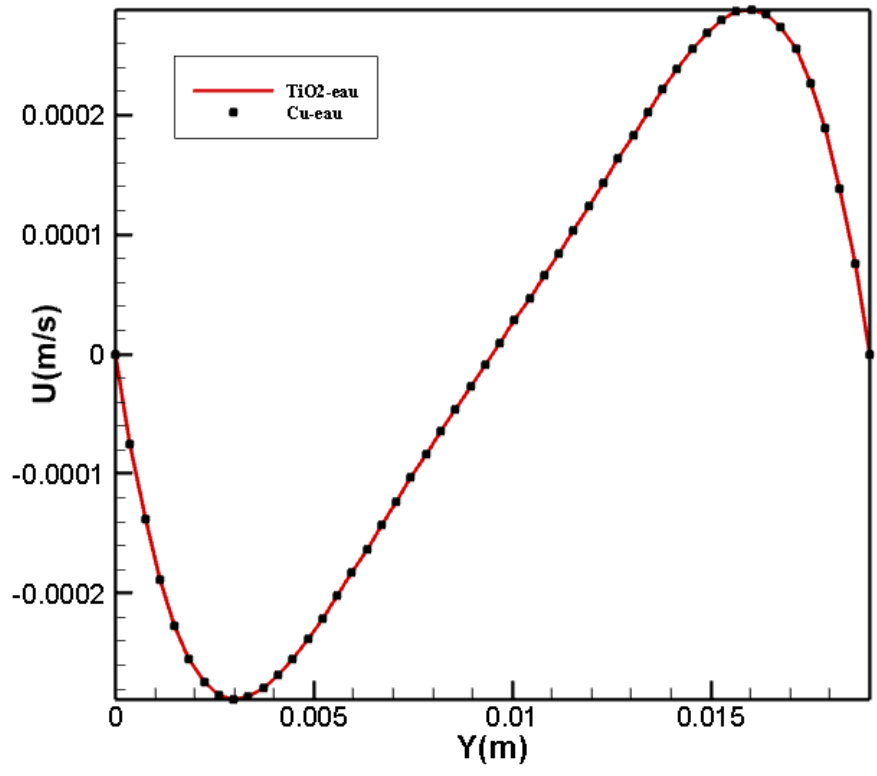


Figure IV.10: Profils des composantes de vitesse verticale/ horizontale et température au centre de la cavité pour $Ra = 10^4$ (nanofluide : TiO₂-eau , Cu-water et pour $\phi = 0,2$)

IV.5 Taux de transfert de chaleur :

Dans cette partie, nous étudierons le taux de transfert de chaleur sur convection naturelle dans une cavité carrée remplie d'un nano-fluide. et différents nombres de Rayleigh et soumis à un gradient de température horizontal.

Pour cela, nous avons présenté le nombre de *Nusselt* moyen en fonction du nombre de Rayleigh.

La figure IV. 11 montre que le nombre moyen de Nusselt est une fonction de nombre de Rayleigh. La variation du nombre de Rayleigh est due à une forte influence sur la structure de l'écoulement, l'intensité du flux augmente avec le nombre Rayleigh et cette croissance est plus élevée plus le nombre est Rayleigh..

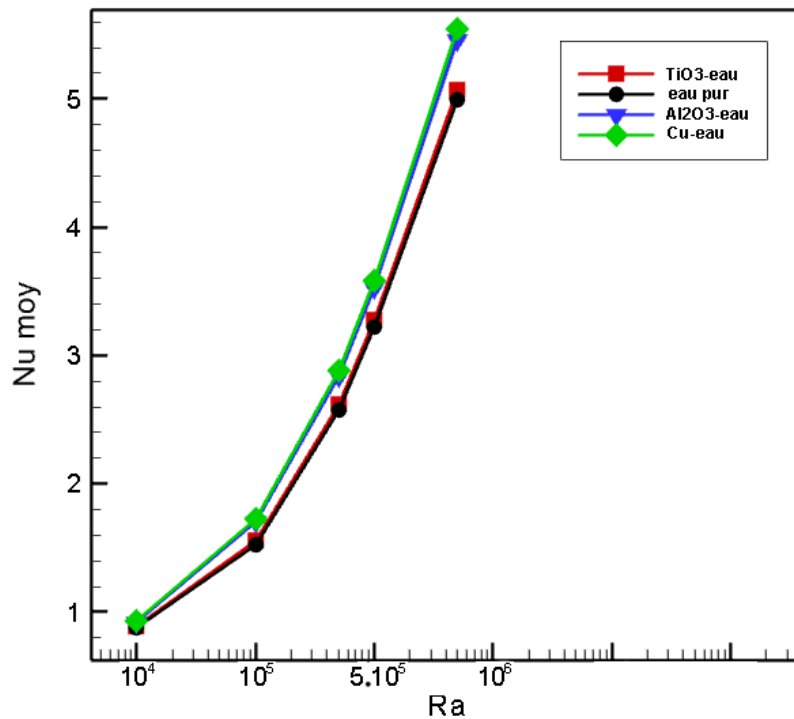
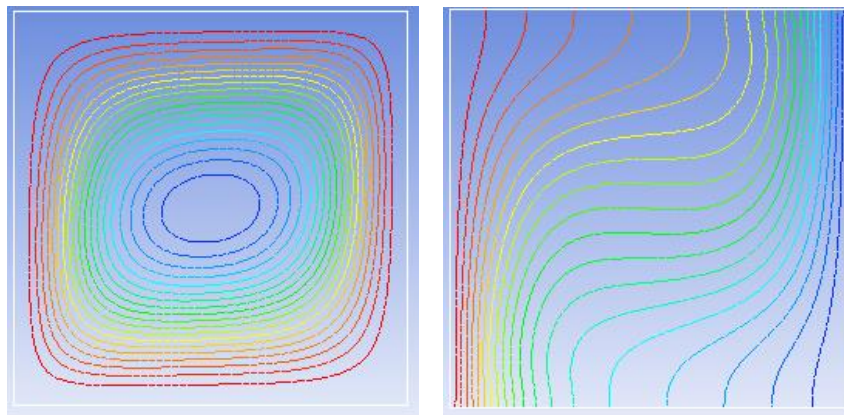


Figure IV.11 : Variation du nombre moyen de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh pour différents de nanofluide.

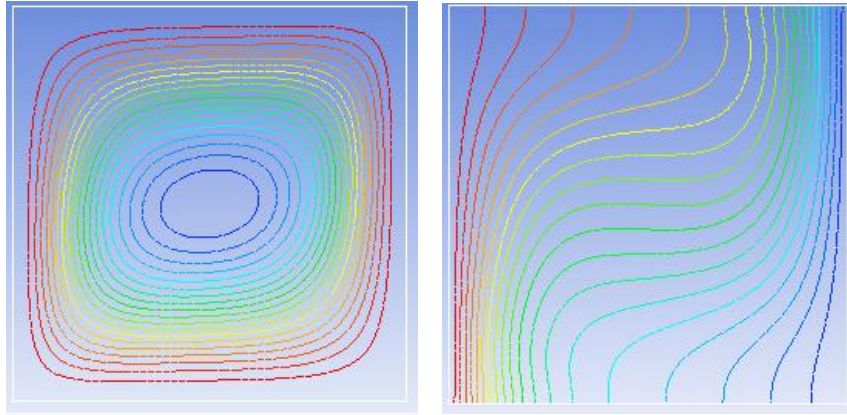
IV.6 Effet de la nature du nanofluide :

Dans cette partie, on va étudier l'effet de la nature du nanofluide sur la convection naturelle dans une cavité carrée remplie par un fluide (Eau pur et nanofluide), et soumise à un gradient de température horizontal. Pour cela, nous avons présenté le champ de température, les lignes de courant. Pour le nombre de Rayleigh ($Ra = 5.10^5$) et différents de Type de nano-fluide :(*Eau pur, avec Cu, avec Al_2O_3 et TiO_3*) (Figures (IV 5).a, b, c, d). On constate que les lignes isothermes présentent une forte courbure au centre de la cavité et deviennent presque des lignes horizontales et moins important proche des parois verticales, chaude et froide. Ces courbures traduisent le phénomène de convection naturelle au milieu de la cavité et le phénomène de conduction proche des parois verticales et spécialement dans les couches limites thermiques qui se développent proche de celle-ci (parois isothermes chaude et froide).

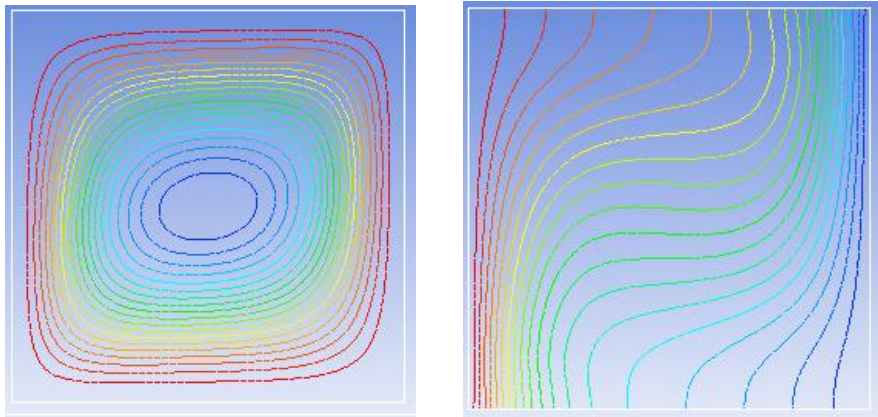
Pour chaque nano fluides, une cellule est observée dans le système circulaire Directions dans le sens des aiguilles d'une montre. Elle affiche presque la même distribution par nano fluides (Al_2O_3 -eau et TiO_2 -eau) et aussi distribuer de (eau pur et Cu-eau) à ces deux nano fluides en raison de la valeur plus proche que la conductivité thermique de (Al_2O_3 et TiO_2) et (eau, Cu).



a) Nano fluide : Al_2O_3 -eau



b) Nano fluide : Cu-eau



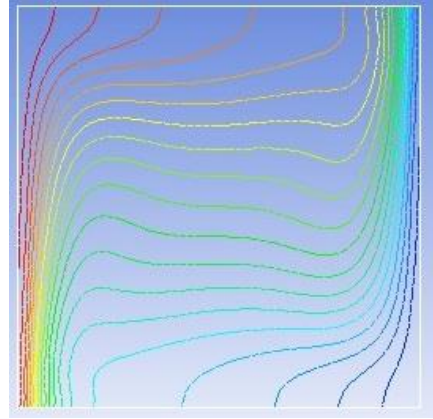
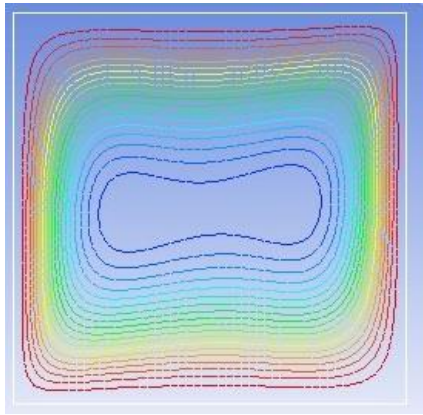
c) Nano fluide : TiO₂-eau

Figure (IV.12) Lignes de courant (gauche) et lignes isothermes (droite) pour différents nanofluides et pour le cas de $\phi = 0.5$, $\phi = 0.1$, $Ra = 10^5$

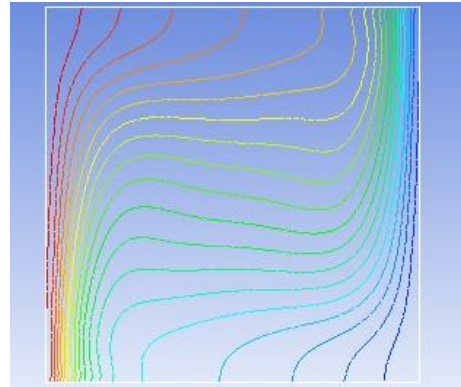
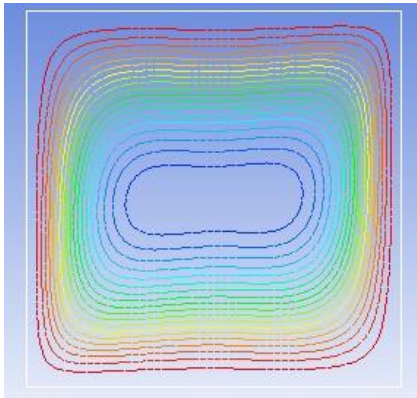
IV.7 Effet de la fraction de nanofluide

Dans la figure IV. 13, on montre les Lignes de courant (gauche) et lignes isothermes (droite) pour différents fractions de nanofluide (Cu-eau) pour $Ra = 10^6$, les lignes de courant deviennent uniforme en augmentant la fraction volumique, et les lignes isothermes deviennent presque horizontales proche des parois pour les fraction volumique plus élevées.

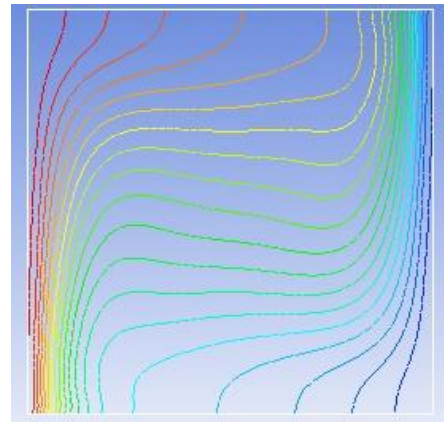
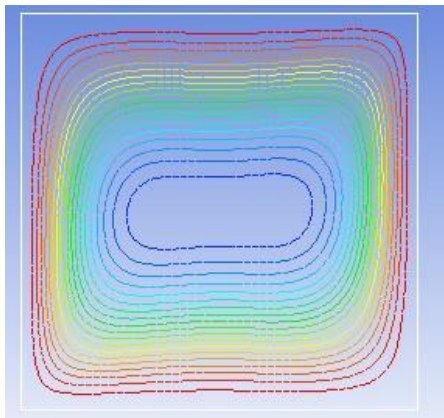
Dans les tableaux IV.3-5, on présente Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Rayleigh pour différents fraction volumique pour les trois nanofluides, on constate que le nombre du Nusselt augmente avec l'augmentation de la fraction volumique de 1 à 10%, surtout pour Al₂O₃.



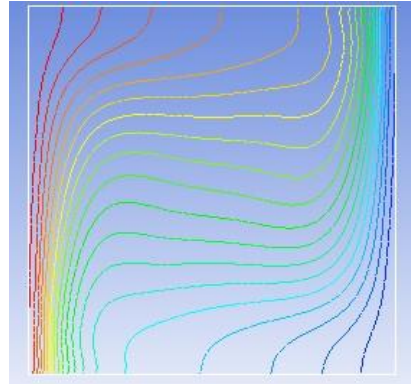
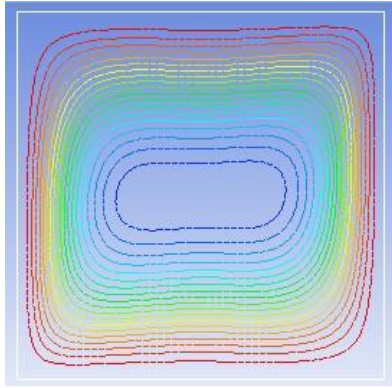
$\varphi = 0.1$



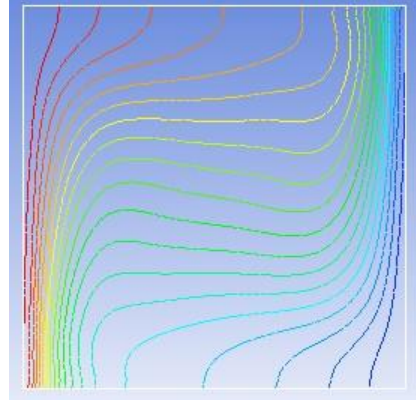
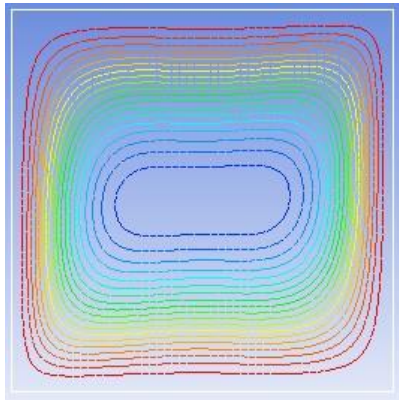
$\varphi = 0.2$



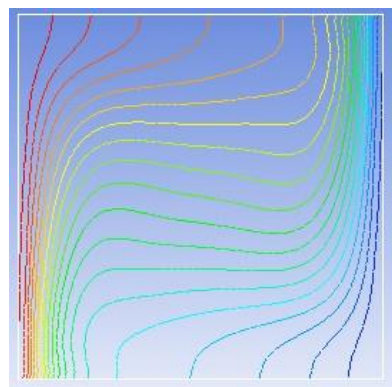
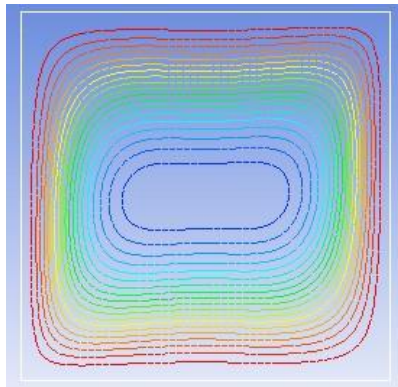
$\varphi = 0.3$



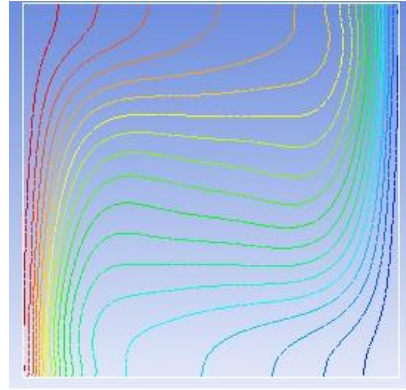
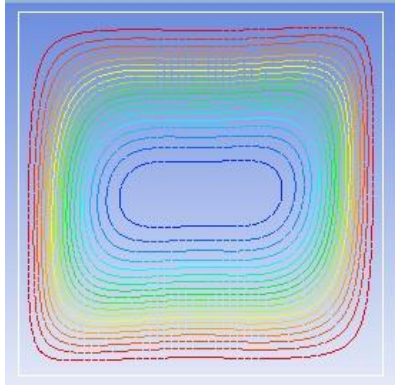
$\varphi = 0.4$



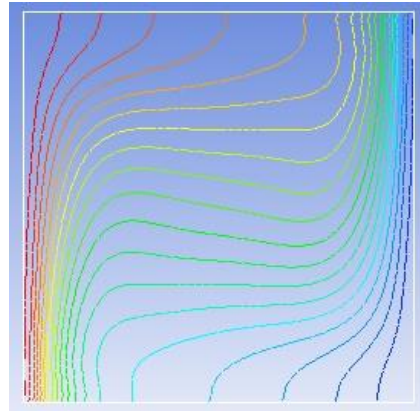
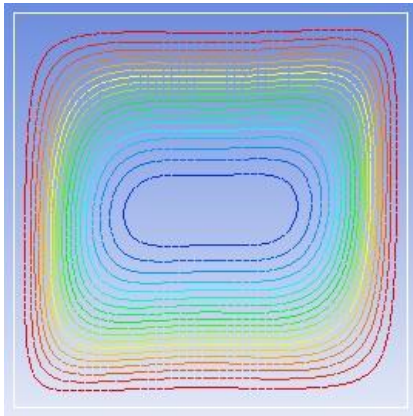
$\varphi = 0.5$



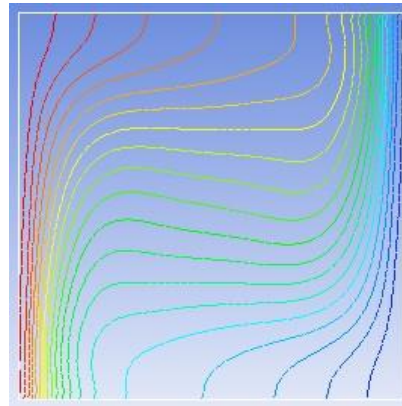
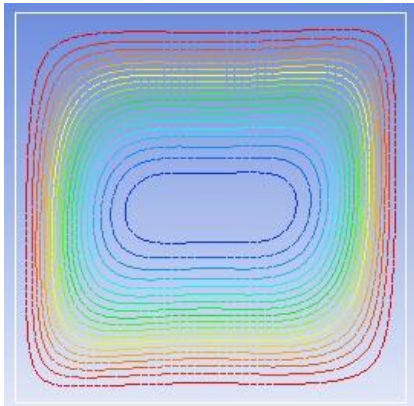
$\varphi = 0.6$



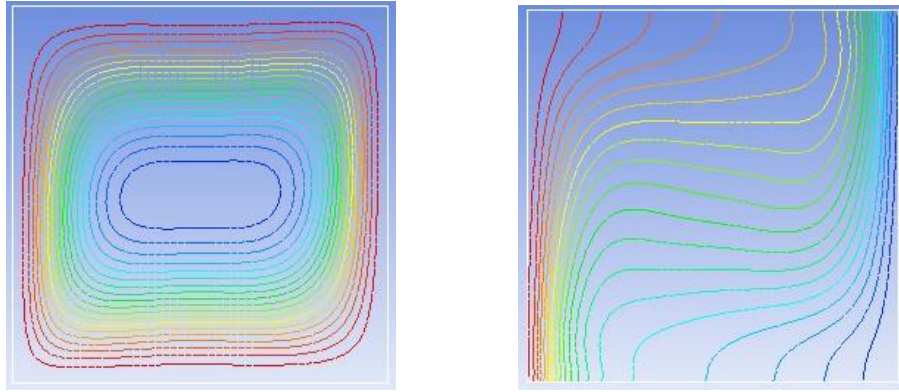
$\varphi = 0.7$



$\varphi = 0.8$



$\varphi = 0.9$



$$\varphi = 1$$

Figure IV.13 Lignes de courant (gauche) et lignes isothermes (droite) pour différents fractions de nanofluide (Cu-eau) pour ($Ra = 10^6$)

Tableau IV.3 : Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Rayleigh et pour Cu -eau pour différents fraction volumique

Ra Φ	Nu				
	10^4	5.10^4	10^5	5.10^5	10^6
1%	1.333377	2.596834	3.509732	5.369834	6.317896
2%	1.351749	2.609823	3.542391	5.409753	6.358965
3%	1.355067	2.618756	3.570234	5.454356	6.397875
4%	1.366664	2.638976	3.599924	5.489452	6.428976
5%	1.378396	2.658725	3.638962	5.514561	6.469085
6%	1.390232	2.678541	3.672340	5.539047	6.497852
7%	1.402134	2.699876	3.697234	5.586423	6.518757
8%	1.514047	2.704873	3.710982	5.578009	6.583566
9%	1.525928	2.726794	3.749186	5.608342	6.600934
10%	1.534769	2.754289	3.798532	5.656155	6.665476

Tableau IV.4 : Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Rayleigh et pour TiO_2 pour différents fraction volumique

Ra Φ		Nu				
		10^4	5.10^4	10^5	5.10^5	10^6
1%		1.357843	2.445193	2.815831	4.865412	5.489634
2%		1.362672	2.490085	2.835658	4.893467	5.587923
3%		1.363696	2.498006	2.864744	4.995617	5.623445
4%		1.363785	2.525008	2.946831	5.000164	5.783692
5%		1.364439	2.551584	3.125945	5.099187	5.831473
6%		1.375985	2.577715	3.329347	5.198456	5.967321
7%		1.385044	2.603432	3.545891	5.298764	6.063125
8%		1.394668	2.621564	3.615831	5.369816	6.100256
9%		1.417442	2.652975	3.765658	5.413984	6.215684
10%		1.456266	2.669454	3.864744	5.489731	6.398245

Tableau IV.5 : Nombre de Nusselt en fonction de nombre de Rayleigh pour Al_2O_3 pour différents fraction volumique

Ra Φ		Nu				
		10^4	5.10^4	10^5	5.10^5	10^6
1%		1.190659	2.287686	2.856487	2.416548	5.054820
2%		1.225645	2.305621	2.902418	2.492194	5.121657
3%		1.296574	2.357674	2.956687	2.532410	5.204151
4%		1.326894	2.383478	2.995621	2.643102	5.296564
5%		1.389165	2.426545	3.054875	2.731465	5.335495
6%		1.416572	2.476748	3.106873	2.834623	5.456489
7%		1.453694	2.489985	3.154871	2.894567	5.506481
8%		1.479843	2.565471	3.176987	4.946523	5.554562
9%		1.496781	2.534198	3.196452	4.955642	5.616547
10%		1.529128	2.577939	3.219945	4.990532	5.687165

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique de la convection naturelle laminaire dans une cavité remplie d'un nanofluide (fluide de base; l'eau et de fraction volumique des nanoparticules (Al_2O_3 , Cu et Ti_2O)).

Le logiciel ANSYS-Fluent a été utilisé pour la résolution numérique des équations régissant l'écoulement. Les résultats sont en bon accord avec les travaux expérimentaux et numériques.

L'objectif principal de cette étude est de connaître la structure de l'écoulement dans la cavité et le taux de transfert de chaleur en modifiant les concentrations de nanoparticules dans l'eau.

Les résultats principaux se résument dans :

- Le transfert thermique augmente avec l'augmentation de la valeur de la fraction volumique et du nombre du Rayleigh.
- Le taux de transfert de chaleur (Nusselt) augmente avec l'augmentation de nombre du Rayleigh.
- Les nanoparticules améliorent le taux de transfert de chaleur qui est indiqué par l'augmentation du nombre de Nusselt.

On peut alors dire que l'augmentation du nombre de Rayleigh, ainsi que la fraction volumique de nanoparticules favorise davantage le transfert de chaleur. Mais on ne peut pas augmenter indéfiniment la fraction volumique de la nanoparticule, ce qui va conduire à la sédimentation des particules.

Comme des perspectives liées à ce travail, on propose :

- D'étudier numériquement ou expérimentalement de nouvelles configurations géométriques afin d'améliorer le transfert de chaleur par convection naturelle.
- Il serait intéressant de faire des études numériques plus détaillées afin de plus comprendre le phénomène étudié en utilisant des méthodes plus avancées, telle que la simulation transitoire en régime turbulent.
- Développement des modèles de calcul et des corrélations empiriques simples afin de simplifier les études numériques de la convection naturelle dans les cavités.

Références bibliographiques

- [1] **Soufi El habib** Application des NANOFLUIDES pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple. Mémoire Master en Génie Des Procédés Université d'Ouargla (2013).
- [2] **Oztop, H. F., Abu-Nada, E.**, Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled with Nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29 5, pp. 1326-1336 (2008),
- [3] **Mahmoodi, M.**, Numerical Simulation of Free Convection of a Nanofluid in L-Shaped Cavities *national Journal of Thermal Sciences*, 50 9, pp. 1731-1740. (2011),
- [4] **Cho, C. C., Chen, C. L., Chen, C. K.**, Natural Convection Heat Transfer Performance in Complex-Wavy-Wall Enclosed Cavity Filled with Nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 60 pp. 255-263 (2012),
- [5] **Patankar, S. V.**, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, (1980)
- [6] **De Vahl Davis, G.**, Natural Convection of Air in a Square Cavity a Bench Mark Numerical Solution. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 3 3, pp. 249-264 (1983)
- [7] **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).
- [8] **Stéphane FOHANNO**, Guillaume POLIDORI, Catalin POPA. Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle. Université de Reims Champagne-Ardenne, France(2012).
- [9] **Amin Behzadmehr Hassan Azarkish** An Introduction to the NanoFluid universty of Sistan and Baluchestan, (2000)
- [10] **Elena V Timofeeva** Nanofluids for Heat Transfer: nanoscale research letters, special issue on nanofluides, (2010)
- [11] **Hicham.Salhi Mohamed.Si-Ameur** convection naturelle dans une enceinte remplie de nanofluide : étude numérique, Université de Batna, Algérie (2011).
- [12] **ATTIA Aissa** simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée contenant du métal Liquide mémoire master en génie mécanique .université Laghouat, (2011).
- [13] **MOURED Mohammed Elamine**. Convection à double diffusion tridimensionnelle dans des cavités Mémoire de Master Université Laghouat (2015).
- [14] **Khanafar, K., Vafai, K., Lightstone, M.**, Buoyancy-driven heat transfer Enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids 46, 3639– 3653.(2003)
- [15] **Krane, R.J., Jessee, J.**,Some detailed field measurements for a natural convection flow in a vertical square enclosure. *Proceedings of the First ASMEJSME Thermal Engineering Joint Conference*, vol. 1, 323-329. (1983)
- [16] **Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R. A. Williams**, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer In Press*, Corrected Proof.
- [17] **Abu-Nada, E., 2008**.Application of nanofluids for heat transfer enhancement of Separated flows encountered in a backward facing step. *Int. J. Heat Fluid Flow* 29, 242–249.
- [18] **Apurba et Niladri**. Study of heat transfer due to laminar flow of copper–water nanofluid through two isothermally heated parallel plates. *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009) 391–400.