

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

**Alipacha Sif-eddine**

**Mekroucha Haroune**

## **Thème**

---

**Contribution à l'étude par une approche numérique des nano-fluides  
dans des espaces confinés**

---

Soutenu le 25/09/2022 devant le jury composé de:

Mr. HAMDI

Président

Mr. ADNANI

Rapporteur

Mme. ADJOUADI

Examineur

**Année Universitaire 2021-2022**

## ***Remerciements***

*Tout d'abord, louange à « ALLAH » qui nous a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré les bons et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.*

*Nous tenons à exprimer mes remerciements et notre gratitude à Monsieur **Adnani Massinissa**, pour tous ses efforts, ses conseils, son soutien moral et scientifique nous a permis de mener à terme ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

*Pour terminer, nous tenons à remercier tous nos collègues et nos amis pour leur soutien moral et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

## ***Dédicace***

*Je dédie ce mémoire :*

*A mes chers parents ma mère et mon père*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien leur*

*Encouragement.*

*Mes frères et mes sœurs.*

*Toute ma famille.*

*Tous mes ami(e)s.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen,  
du secondaire ou de*

*L'enseignement supérieur.*

***Haroune et Sif-eddine***

# *Sommaire*

# Sommaire

---

<i>Introduction générale</i> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités Et Synthèse Biographique**

<i>I.1.Introduction</i> .....	2
<i>I.2.Concepts sur la convection</i> .....	2
<i>I.2.1.Définition</i> .....	2
<i>I.2.2.Type de convection</i> .....	2
<i>I.2.2.1.Convection naturelle</i> .....	2
<i>I.2.2.2.Convection forcée</i> .....	3
<i>I.2.2.3.Convection mixte</i> .....	4
<i>I.3.Généralités sur les nano-fluides</i> .....	4
<i>I.3.1.Définition</i> .....	4
<i>I.3.2. Les applications des nano-fluides</i> .....	5
<i>I.3.3. Propriétés thermo-physiques des nano-fluides</i> .....	5
<i>I.3.4.Préparation des nano-fluides</i> .....	8
<i>I.3.5.Les avantages et inconvénients des nano-fluides</i> .....	9
<i>I.4.Synthèse bibliographique</i> .....	10
<i>I.5.Conclusion</i> .....	18

## **Chapitre II : Formulation Mathématique et Position du Problème**

<i>II.1. Introduction</i> .....	19
<i>II.2. Formulation physique</i> .....	19
<i>II.3.Formulation mathématique</i> .....	20
<i>II.3.1.Les équations gouvernantes dimensionnelles</i> .....	20
<i>II.3.1.1.Les hypothèses simplificatrices du problème</i> .....	20
<i>II.3.1.2.Les variables sans dimension</i> .....	21
<i>II.3.1.3.Les nombres sans dimension</i> .....	21
<i>II.3.2.Les équations gouvernantes adimensionnelles</i> .....	22
<i>II.3.3.Condition aux limites</i> .....	23
<i>II.4.Conclusion</i> .....	23

## **Chapitre III: Résultats et discussions**

<i>III.1. Introduction</i> .....	24
----------------------------------	----

<i>III.2. Maillage</i> .....	24
<i>III.3. Paramètres du nano-fluide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau)</i> .....	24
<i>III.4. Validation</i> .....	25
<i>III.5. Choix de maillage</i> .....	26
<i>III.6. Résultats et discussions</i> .....	27
<i>III.6.1. Effets de concentration et du nombre Rayleigh</i> .....	27
<i>III.6.2. Le nombre de Nusselt moyen</i> .....	33
<i>III.7. Conclusion</i> .....	35
<i>Conclusion générale</i> .....	36

# Liste des figures

---

<i>Figure I.1 : schéma représentatif de convection naturelle.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure I.2 : schéma représentatif de la convection forcée.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure I.3: nano-fluide vus au microscope électronique.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.4 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.5 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.6 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.7 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.8 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.9 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.10 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.11 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I.12 : Schéma de la géométrie du problème.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.1 : géométrie du problème.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure III.1 : Maillage de la géométrie (100×100).....</i>	<i>24</i>
<i>Figure III.2 : Comparaison des lignes de courant entre nos résultats et ceux de la référence.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure III.3 : Comparaison des lignes d'isothermes entre nos résultats et ceux de la référence.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure III.4 : Nombre de Nusselt en fonction du maillage.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure III.5 : Les lignes de courants pour différents fraction et différents nombre Rayleigh.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure III.6 : Les lignes isothermes pour différents fraction et différents nombre Rayleigh.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.7 : Le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents nombre de Rayleigh</i>	

*pour la fraction de Nanoparticule  $\varphi=0.02$ .....33*

**Figure III.8 :** *Le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents nombre de Rayleigh*

*pour la fraction de Nanoparticule  $\varphi=0.04$ .....34*

**Figure III.9 :** *Le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents nombre de Rayleigh*

*pour la fraction de Nanoparticule  $\varphi=0.06$ .....34*

# Liste des tableaux

---

<i>Tableau I.1:</i> Combinaison fluide de base/ nanoparticules disponibles en littérature.....	5
<i>Tableau I.2:</i> Les avantages et inconvénients des nano-fluides .....	9
<i>Tableau II.1:</i> Les conditions aux limites de la cavité .....	23
<i>Tableau III.1 :</i> Paramètres thermo-physique du fluide de base et de la nanoparticule.....	25
<i>Tableau III.2:</i> le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents maillages.....	26
<i>Tableau III.3:</i> les nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Ra.....	33

# NOMENCLATURE

---

## Symboles Latins

- K** : La conductivité thermique [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ].  
 **$K_f$**  : La conductivité thermique du fluide de base ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).  
 **$K_{nf}$**  : La conductivité thermique de nanofluide ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).  
**g** : : gravité [ $\text{m.s}^{-2}$ ].  
 **$C_p$**  : est la chaleur spécifique [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ].  
 **$C_{pr}$**  : la chaleur massique de fluide ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).  
 **$C_{ps}$**  : la chaleur massique de fluide ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
**H** : dimension géométrique (hauteur=longueur) [m].  
**h** : le coefficient d'échange convectif [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ].  
**p** : la pression [Pa].  
**P** : pression adimensionnelle.  
**T** : température dimensionnelle [K].  
 **$T_c$**  : température de fluide chaude [K].  
 **$T_f$**  : la température de paroi froide [K].  
**U, V** : Vitesse adimensionnelle.  
**u** : composante suivant x du vecteur vitesse [ $\text{m.s}^{-1}$ ].  
**v** : composante suivante y du vecteur vitesse [ $\text{m.s}^{-1}$ ].  
**x** : coordonné axial [m].  
**y** : coordonné transversale [m].  
**Pr** : nombre de Prandtl.  
**Ra** : nombre de Rayleigh.  
**Nu** : nombre de Nusselt.  
**Gr** : nombre de Grachof.

## Symboles grecs

- $\alpha$**  : la diffusivité thermique [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ].  
 **$\beta$**  : coefficient d'expansion thermique [ $\text{K}^{-1}$ ].  
 **$\beta_f$**  : coefficient d'expansion thermique de fluide ( $\text{K}^{-1}$ ).  
 **$\beta_{nf}$**  : coefficient d'expansion thermique de nanofluide ( $\text{K}^{-1}$ ).  
 **$\beta_s$**  : coefficient d'expansion thermique de nanoparticule ( $\text{K}^{-1}$ ).  
 **$\phi$**  : La fraction volumique  
 **$\mu$**  : La viscosité dynamique [ $\text{N.s.m}^{-2}$ ].  
 **$\mu_f$**  : La viscosité dynamique du fluide de base.  
 **$\mu_{nf}$**  : La viscosité dynamique du nanofluide.  
 **$\rho$**  : Masse volumique [ $\text{kg/m}^3$ ].  
 **$\theta$**  : Température adimensionnelle.

## Indices

**f**: fluide.

**s** : solide.

**nf**: nanofluide.

**c** : Chaude.

**f** : froide.

# *Introduction Générale*

# Introduction générale

Le transfert thermique au sein des nano-fluides ouvre depuis plusieurs années un portail de recherche important pour les études expérimentales, analytiques et numériques menant ce domaine à des publications liées à l'utilisation des nano-fluides comme des fluides actifs. La présence des nanoparticules dans le fluide traditionnel améliore le transfert thermique d'une manière remarquable par rapport à un fluide traditionnel.

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

Dans le présent travail, nous étudions la convection naturelle dans une enceinte carrée remplie de nano-fluides. Notre objectif est de comprendre l'effet du nano-fluide sur le mécanisme de la convection naturelle dans les enceintes, ainsi l'amélioration du taux de transfert de chaleur.

Cette étude mène à remplacer les fluides avec des nano-fluides qui peuvent jouer le même rôle que ces fluides ordinaires mais avec une bonne efficacité du transfert de la chaleur.

Ce travail est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à des définitions et généralités sur la convection et les nano-fluides.
- Le second chapitre nous décrivons et formulons le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées pour notre modèle d'études.
- Le dernier chapitre est consacré à la présentation et discussion des résultats numériques obtenus lors de la simulation.

***Chapitre I : Généralités  
Et Synthèse Biographique***

# Généralités Et Synthèse Biographique

## I.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons contribuer à la présentation des connaissances liées à la convection naturelle et mixte et les différentes applications des nano-fluides.

Ainsi, nous présentons une synthèse bibliographique de quelques résultats des recherches effectuées par le passé, qui sont en relation sur notre thème.

## I.2.Concepts sur la convection :

### I.2.1.Définition :

La convection est une mode de transfert d'énergie par l'action combinée de la conduction. La convection est le mécanisme le plus important de transfert de chaleur, elle permet de déterminer les échanges de chaleur qui se produisent entre un fluide ou gaz et une paroi solide.

D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules fluides adjacentes,

L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces particules.

Ensuite ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie, celle-ci est à présent emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement. [1]

### I.2.2.Type de convection :

Le transfert de chaleur par convection est désigné, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection naturelle et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement.

Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte. [1]

**a. Convection naturelle :**

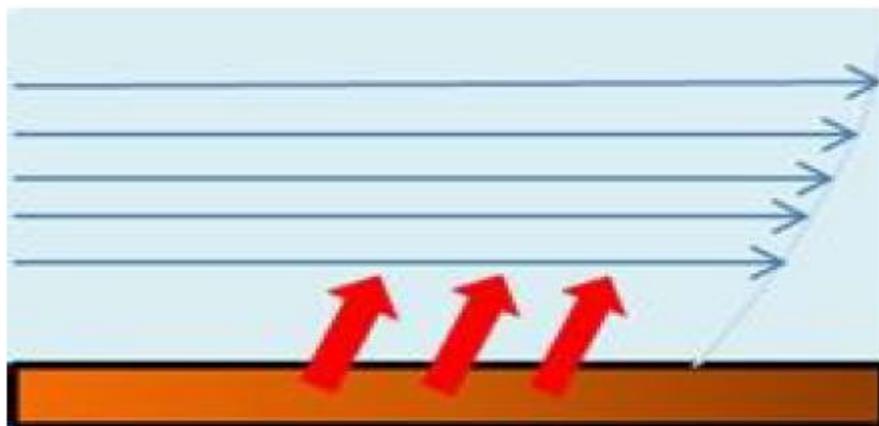
Le transfert de chaleur par convection désigne la transmission de la chaleur par un fluide en écoulement. La convection est dite naturelle si le mouvement du fluide n'est dû qu'à des variations de masse volumique. Ces gradients de masse volumique sont le moteur de l'écoulement du fluide, qui transfère d'ailleurs la chaleur ou soluté à son environnement. Ainsi, la compréhension des mécanismes de convection naturelle est importante pour accéder à des modélisations, et donc des prédictions, des effets sur l'environnement. [2]



**Figure I.1 :** schéma représentatif de convection naturelle.

**b. Convection forcée :**

Le phénomène de convection forcée apparaît quand le mouvement du fluide est imposé par une cause mécanique extérieure (pompe, ventilateur, compresseur...) au système.



**Figure I.2 :** schéma représentatif de la convection forcée.

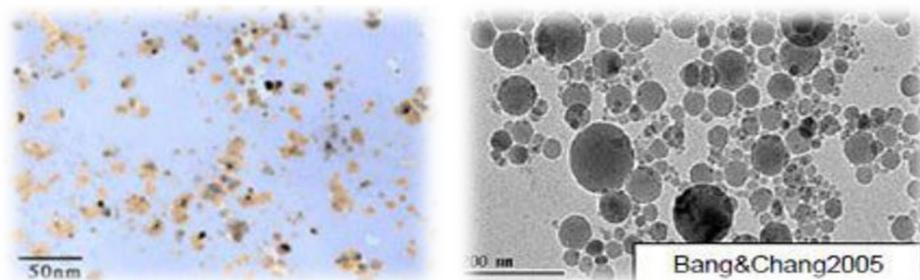
**c. Convection mixte :**

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convections sont considérées séparément, du même ordre de grandeur.

**I.3.généralités sur les nano-fluides :****I.3.1.définition:**

Les nano-fluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide, appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés. Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Avec les nano-fluides, l'idée est alors d'insérer, au sein du fluide de base, des nanoparticules afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange. Les solvants les plus utilisés sont: [3]

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



**Figure I.3 :** nano-fluide vu au microscope électronique. [3]

Le tableau (I.1) regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparés par différents groupes de recherche.

**Tableau. I.1** : Combinaison fluide de base/ nanoparticules disponibles en littérature.

	Eau	Ethylène glycol	Huile	Toluène	éthanol
Ag	X		X		
Au	X			X	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X	X	X		
C (graphite)	X		X		
C (NTC)	X		X		X
Cu	X	X	X		
CuO	X	X			
Fe		X			
SiC	X	X			
SiO <sub>2</sub>	X	X			X
TiO <sub>2</sub>	X	X			
ZnO	X				

### I.3.2. Les applications des nano-fluides:

- L'échangeur de chaleur.
- Le refroidissement d'éléments électroniques (produire un nano-fluide stable qui est compatible avec des circuits et des composants électroniques).
- Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulation de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pourraient entraîner une augmentation de l'efficacité énergétique des réfrigérateurs).
- Aéronautique et spatial.
- Refroidissement des systèmes nucléaire.
- Transport (gestion de refroidissement / Véhicule moteur thermique).
- Autres applications (piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage, stockage thermique). [4]

### I.3.3. Propriétés thermo-physiques des nano-fluides :

#### A. Conductivité thermique (K) :

Elle indique 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 nano-fluide varié en fonction de la fraction volumique aussi, la conductivité thermique d'un nano-fluide est calculée selon les deux modèles suivant : [5]

➤ **Modèle de Maxwell :**

Maxwell à présenter son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nano-fluide en fonction de la fraction volumique de nano-fluide, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules du forme sphériques. Le modèle de Maxwell (1873) est donné par la formule suivante :

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

Avec :

$K_{nf}$  : La conductivité thermique du nano-fluide.

$K_f$  : La conductivité thermique du fluide de base.

$K_s$  : La conductivité thermique des particules solides.

➤ **Modèle de Hamilton et Crosser :**

Le modèle de Hamilton et Crosser (1962) a été établi pour résoudre la limite de modèle de Maxwell. Pour cela le modèle du Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nano-fluide quelque soit la forme de la nanoparticule, et ça en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité ( $\psi$ ).

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivant : [5]

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_s)\varphi}{K_s + (n-1)K_f + (K_f - K_s)\varphi} K_f \quad (I.2)$$

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

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

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

**B. Viscosité dynamique ( $\mu$ ) :**

La viscosité peut être défini 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.

Cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité du fluide de base et la fraction volumique du nano-fluide. Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes : [5]

➤ **Modèle d'Einstein :**

La viscosité dynamique d'un nano-fluide est donnée par Einstein (1906) pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivantes :

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

Avec :

$\mu_{nf}$  : La viscosité dynamique du nano-fluide.

$\mu_f$  : La viscosité dynamique du fluide de base.

$\varphi$  : La fraction volumique des nanoparticules.

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

➤ **Modèle de Brinkman :**

Par contre, Brinkman (1952) a étudié la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques. Elle est donnée par la formule suivante :

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

**C. La masse volumique ( $\rho$ ) :**

La détermination de la masse volumique d'un nano-fluide parfaitement homogène en fonction de la fraction volumique à une température donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange. Dans le cas d'un mélange, la masse volumique est donnée par la relation suivante : [5]

$$\rho_{nf} = \left[ \frac{m}{V} \right]_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} \quad (I.5)$$

Avec :

$\rho_{nf}$  : La masse volumique du nano-fluide.

**D. Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) :**

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nano-fluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des travaux sur les nano-fluides, on déduit l'expression suivante : [5]

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (I.6)$$

Avec :

$\beta_{nf}$  : Le coefficient de dilatabilité du nano-fluide.

$\beta_f$  : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

$\beta_s$  : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

### E. Fraction volumique ( $\varphi$ ):

La fraction volumique est un rapport sans dimension entre deux volumes, le volume de solide (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). La fraction volumique est donnée par la relation suivant : [5]

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

Avec :

$V_s$  : Volume des nanoparticules solides [ $m^3$ ].

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

### F. Chaleur massique ( $C_p$ ) :

La chaleur massique (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.

La chaleur spécifique est donnée par la relation suivant Pak et Cho : [5]

$$C_{p_{nf}} = (1 - \varphi)C_{p_f} + \varphi C_{p_s} \quad (I.8)$$

Avec :

$C_{p_f}$  : La chaleur spécifique du nano-fluide du fluide de base.

$C_{p_s}$  : La chaleur spécifique des nanoparticules.

### I.3.4. Préparation des nano-fluides :

La production de nanoparticules peut être divisée en deux catégories principales, à savoir, les procédés physiques et les procédés chimiques :

- Les procédés physiques: broyage mécanique, technique de condensation de gaz inertes.
- Les procédés chimiques : comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique.

Il existe principalement deux procédés de production des nano-fluides, à savoir, la technique en une étape et la technique en deux étapes : [6]

➤ **La technique en une étape :**

Combine la production des nanoparticules et la dispersion de ces derniers dans le liquide de base en une seule étape, évitent l'oxydation et la décantation des particules.

➤ **La technique en deux étapes :**

Les nanoparticules sont produites une fois et dispersées dans le fluide de base. Il évite les ajustements en raison des forces attractives entre les molécules et effectue un bon travail mécanique.

**I.3.5. Les avantages et inconvénients des nano-fluides :**

Nous allons résumer les résultats des avantages, et inconvénients des nano-fluides sur le tableau ci-dessus : [7]

<b>Les avantages des nano-fluides :</b>	<b>Les inconvénients des nano-fluides :</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ L'avantage de l'emploi des nano fluides en tant que fluides caloporteurs dépend fortement d'un compromis entre l'augmentation de la conductivité thermique, et l'augmentation de la viscosité.</li> <li>➤ Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.</li> <li>➤ Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.</li> <li>➤ Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fortes pertes de charge.</li> <li>➤ Le coût élevé des nano-fluides.</li> <li>➤ Difficultés dans le processus de production.</li> <li>➤ viscosité supérieur, chaleur spécifique Basse.</li> <li>➤ Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.</li> </ul>

**Tableau I.2 :** Les avantages et inconvénients des nano-fluides.

#### I.4.Synthèse bibliographique :

Dans cette partie, nous allons présenter quelques résultats des recherches effectuées par le passé, qui sont en relation sur notre thème de contribution à l'étude par une approche numérique des nano-fluides dans des espaces confinés :

**YAHIAOUI et M'HAMDI [8]** ont présenté une Approche numérique à l'étude de la convection naturelle dans une cavité carrée remplie de nano-fluides, réalisée avec mélanges de fluide de base (l'air) et nanoparticules ( $AL_2O_3$ ) pour un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^6$ , et deux fractions volumiques des nanoparticules (0.02, 0.04) . La surface de la paroi inférieure est supérieure est maintenue adiabatique, la paroi droite chauffée par une source de chaleur (paroi chaude) et la paroi gauche est refroidies (paroi froide) celle-ci est doté d'une ailette horizontale chaude de longueur  $L=0.5$  et situé au milieu de la paroi  $h=0.5$ . (Voir la figure).

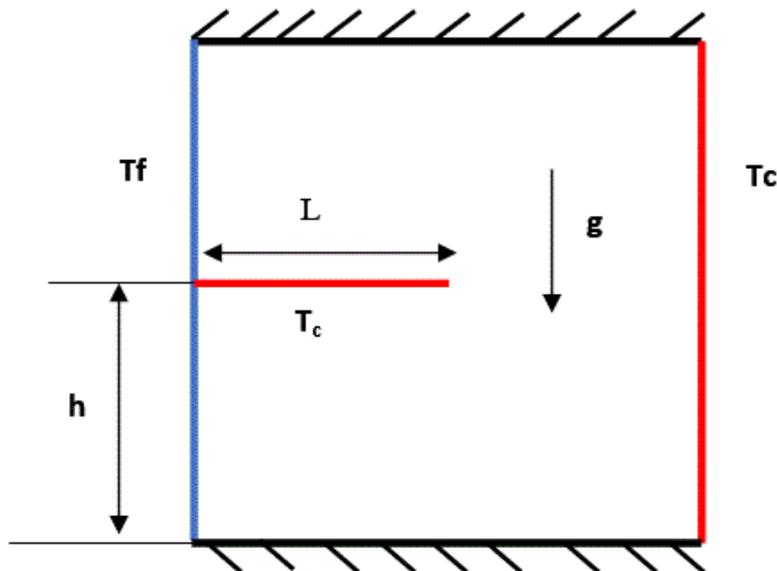


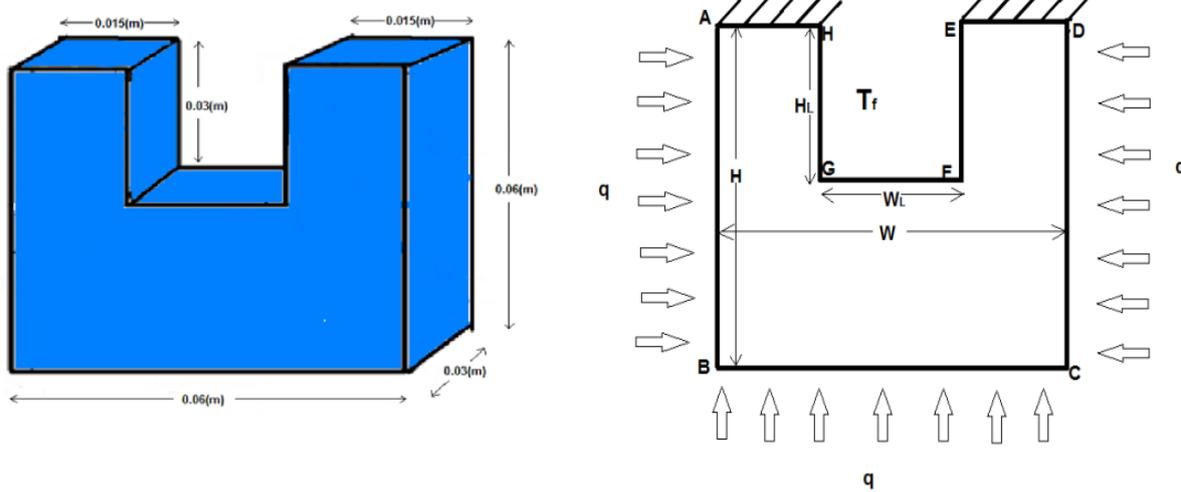
Figure I.4 : Schéma de la géométrie du problème. [8]

D'après les résultats :

- Le nombre de Nusselt est une fonction croissante avec l'augmentation de nombre de Rayleigh, aussi on a une amélioration du transfert de la chaleur avec l'augmentation de la fraction volumique.

- Le nombre de Nusselt est une fonction décroissante avec l'augmentation de la longueur de l'ailette, aussi on a une amélioration du transfert de la chaleur ceci est dû à l'augmentation de nombre Rayleigh de  $Ra=10^5$  à  $Ra=10^6$ .

**Soufi El Habib [4]** a présenté une étude des nano-fluides pour le refroidissement sur une géométrie de forme U avec des dimensions de 0.06(m) de hauteur, 0.06(m) en largeur et avec une épaisseur de 0.03(m). le cavité a deux surfaces latérales, une surface droite et une surface gauche, les deux de ces surfaces ont une dimension de 0.06(m) de hauteur et de 0.03(m) de largeur. Au bas fond de la cavité on trouve les surfaces inférieure qui ont une dimension de 0.06 (m) en longueur et de 0.03 (m) en sa largeur. (Voir la figure).



**Figure I.5 :** Schéma de la géométrie du problème. [4]

D'après les résultats :

- L'augmentation de la fraction volumique de nano-fluide et le nombre de Rayleigh peut améliorer la performance du transfert de chaleur convective.
- Le nano-fluide est un fluide favorable pour les systèmes des refroidissements par rapport les autre fluide.

**SALHI HICHAM [1]** a présenté une étude numérique du transfert de chaleur de nano-fluide dans les enceintes carrées remplies d'un mélange d'eau et nanoparticules. Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de *Rayleigh* ( $Ra = 103, 104, 105$ ) et pour différentes positions de source de la chaleur avec différentes fractions volumiques pour le fluide pur ( $\phi = 0$ )

et pour les nano-fluides (Ag et 2  $TiO$ ,  $\phi$  égale à 0.1, 0.2), avec des conditions aux limites de type *Dirichlet* pour les lignes de courant et la température de la source de chaleur, et de type *Neumann* pour la température des parois. (Voir la figure).

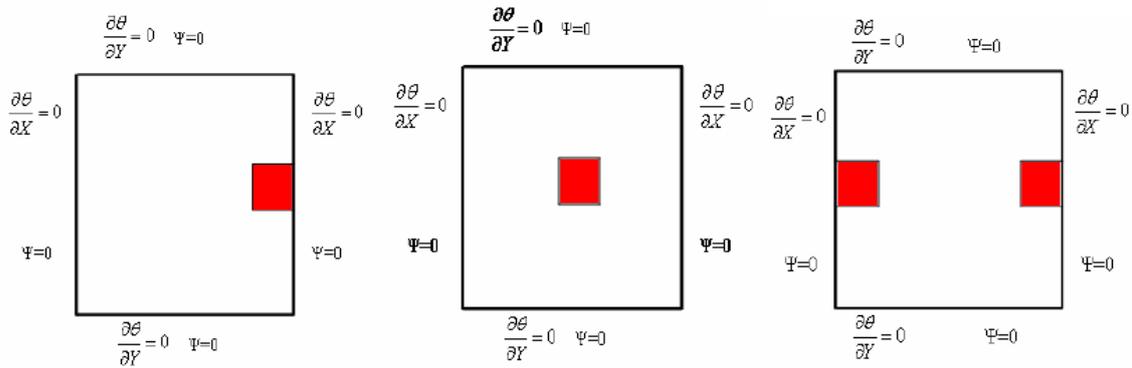


Figure I.6 Schéma de la géométrie du problème. [1]

Les résultats principaux se résument dans :

- L'effet du nano-fluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de *Rayleigh* élevé.
- l'augmentation de la fraction volumique du nano-fluide favorise d'avantage le transfert de chaleur.
- la position de la source de chaleur influence considérablement le champ de la température et les lignes de courant.
- le transfert thermique en présence des nanoparticules d'Ag s'améliore relativement celui des nanoparticules de  $TiO_2$ . En conséquence, le type de nanoparticule est un facteur principal pour le perfectionnement de transfert thermique.

M. ADNANI [9] a présenté une étude numérique de la convection mixte dans une cavité carrée en présence d'un bloc froide a l'intérieure de la cavité. Ils ont mené trois configurations pour les deux parois froid et chaud, les nombre de Reynolds et dépend son fixé à  $Re=100$ ,  $Pr=0,71$  respectivement. (Voir la figure).

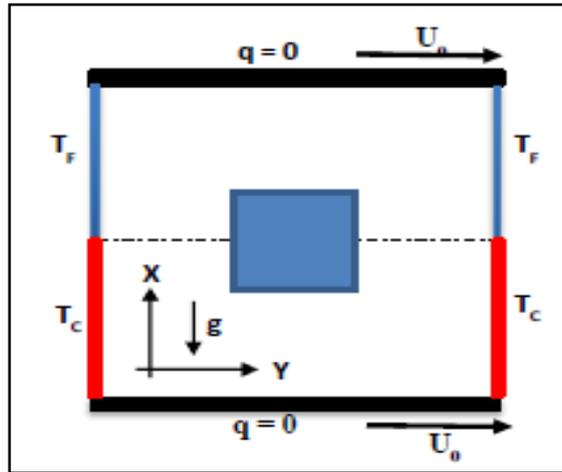
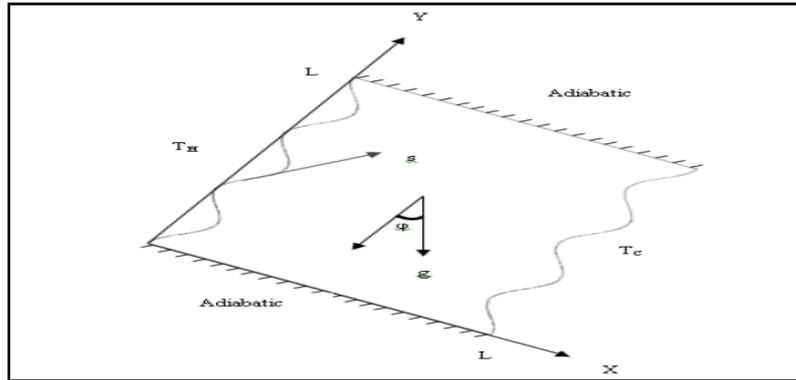


Figure I.7 : Schéma de la géométrie du problème. [9]

Les résultats montrent, aux faibles gradients de température, que le transfert thermique varie en fonction du sens du mouvement des parois horizontales et tend vers des situations invariantes indépendamment du sens du mouvement à des valeurs très élevées de Richardson et dans toutes les situations le transfert de chaleur et le champ d'écoulement augmentent avec l'augmentation du Ri.

Elif Büyük ÖĞÜT, Metin AKYOL et Müslüm ARICI [10] ont présenté dans cette étude, des simulations numériques qui ont été réalisées pour étudier la convection naturelle des nano-fluides à base d'eau. Cavité murale ondulée avec bords carrés obliques. Les parois supérieure et inférieure de la cavité sont supposées être adiabatiques, et les parois latérales sont dans différents états de température constante. Trois types différents de nanoparticules ont été utilisés dans l'étude, Cu, CuO et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Calculer la fraction volumique solide comme 0%, 5% et 10%, et le nombre de Rayleigh comme 10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup> et 10<sup>6</sup>. Les angles d'inclinaison de 0.450 et 90°, les amplitudes de 0.05, 0.075 et 0.1 et les nombres 1 et 3 de la cavité fermée sont analysés. Ondulation. Les résultats montrent que le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique. Nanoparticules et nombre de Rayleigh de plus il est observé que l'augmentation du nombre d'ondulations augmentera considérablement le taux de transfert de chaleur. (Voir la figure).

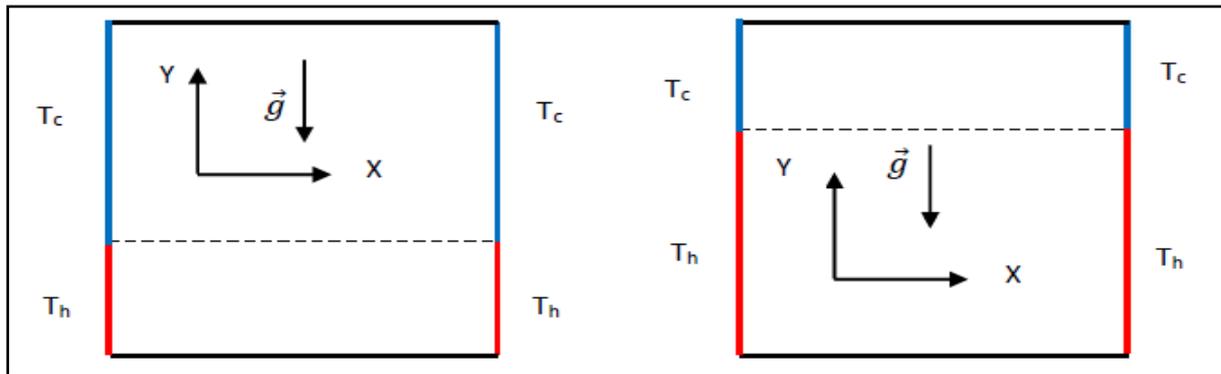


**Figure I.8** : Schéma de la géométrie du problème. [10]

D'après les résultats :

- Le nombre de Rayleigh, fraction volumique, type de nanoparticules, amplitude, le nombre d'ondulations et l'angle d'inclinaison ont un effet significatif sur la structure de la circulation et le taux de transfert de chaleur. Le taux de transfert de chaleur augmente, avec l'augmentation de la circulation du fluide en raison du nombre de Rayleigh. Le transfert de chaleur se fait par conduction pour les faibles valeurs du nombre de Rayleigh.

**M. ADNANI, B. MEZIANI et O. OUERDIA** [11] ont fait une étude numérique bidimensionnelle de la convection naturelle a été réalisée. Considérons une cavité contenant un fluide newtonien avec un rapport d'aspect  $H/L$  égal à 1, où  $H$  et  $L$  sont respectivement la hauteur et la largeur de la cavité. Les équations principales sont l'équation de quantité de mouvement, l'équation de continuité et l'équation d'énergie. Dans le premier cas, 25 % de la partie inférieure de la paroi latérale est maintenue à une température élevée ( $T_h$ ), et 75 % de la partie supérieure de la paroi latérale est maintenue à une température basse température ( $T_c$ ), où ( $T_h > T_c$ ). Dans le second cas, 75 % de la partie inférieure de la paroi latérale est maintenue à haute température, et 25 % de la partie supérieure de la paroi latérale est maintenue à basse température. Le mur horizontal reste isolé. (Voir la figure).



**Figure I.9** : Schéma de la géométrie du problème. [11]

D'après les résultats :

- L'écoulement devient plus important avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, ainsi, les effets de la viscosité deviennent plus importants lorsque le nombre de Prandtl augmente.
- Prandtl augmente ce qui aura pour conséquence l'affaiblissement du champ d'écoulement.

**S.-E. OUYAHIA, Y.K. BENKAHLA, W. BERABOU, M. BENZEMA, A. BOUDIAF [12]** ont présenté une étude d'un écoulement laminaire et stationnaire d'un nano-fluide, *constitué de nanoparticules de dioxyde de titane et d'eau (TiO<sub>2</sub>-eau)*, généré par une convection purement thermique, dans une cavité triangulaire isocèle de rapport de forme  $A = H/L = 1$ . Les parois inclinées la cavité sont isothermes froides, alors que sa base est isolée thermiquement.

La cavité est munie d'une source de chaleur carrée isotherme chaude (Cas 0). Cette dernière est fractionnée verticalement et horizontalement, en deux sources de chaleur identiques, pour donner naissance aux configurations notées Cas 1 et Cas 2, respectivement (voir figure).

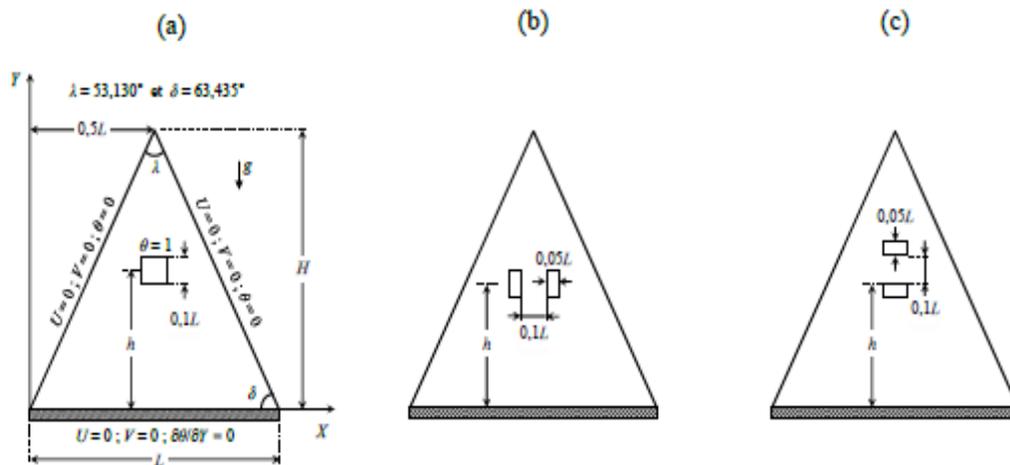


Figure I.10 : Schéma de la géométrie du problème. [12]

D'après les résultats :

- L'augmentation du nombre de Rayleigh intensifie les champs de vitesse et de température, induisant ainsi un passage d'un mode de conduction en un mode de convection.
- L'ajout de nanoparticules affaiblit l'écoulement alors qu'il améliore le transfert thermique en particulier, pour les faibles valeurs du nombre de Rayleigh.
- Le déplacement de la source de chaleur depuis la base de la cavité jusqu'au sommet donne place à un mécanisme de transfert thermique en mode de conduction.
- Le fractionnement de la source de chaleur suscite une augmentation du nombre de Nusselt moyen de la cavité en particulier, lors d'un fractionnement vertical.

**N.Sad chemloul et M.A.Belmiloud [5]** L'étude numériquement de la convection naturelle dans une cavité carrée dont la paroi horizontale inférieure et la paroi verticale droite sont chauffées, le nanofluide utilisé il est à trois différents types de nanoparticules à l'intervalle.

$0 \leq \varphi \leq 0.15$  nombre de Rayleigh est compris entre  $10^3$  et  $10^6$  le nombre de Prandtl est fixé à  $Pr=6.2$

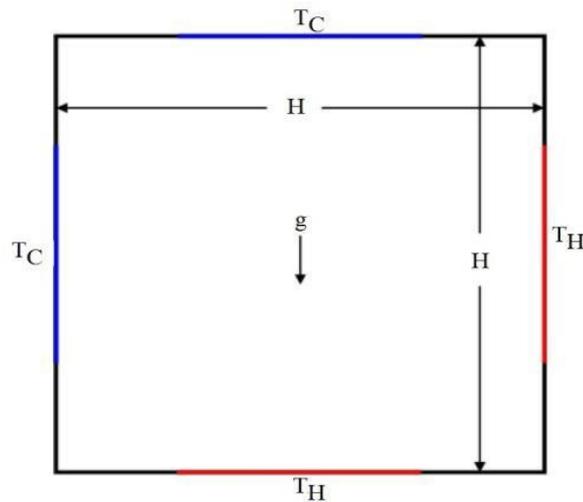


Figure I.11 : Schéma de la géométrie du problème. [5]

Les résultats montrent que le transfert de chaleur s'améliore à l'augmentation de nombre de Rayleigh et la valeur de la fraction volumique.

**B.Boudjeniba et al [5]** ont à une étude numérique concerne les transferts de chaleur par convection naturelle dans une cavité rectangulaire fermé contenant un nanofluides de base d'eau et des particules nanométrique de cuivre. La paroi horizontale inférieure est partiellement chauffée et les deux parois verticales de gauche et de droite sont refroidies sur leurs moitiés supérieures.

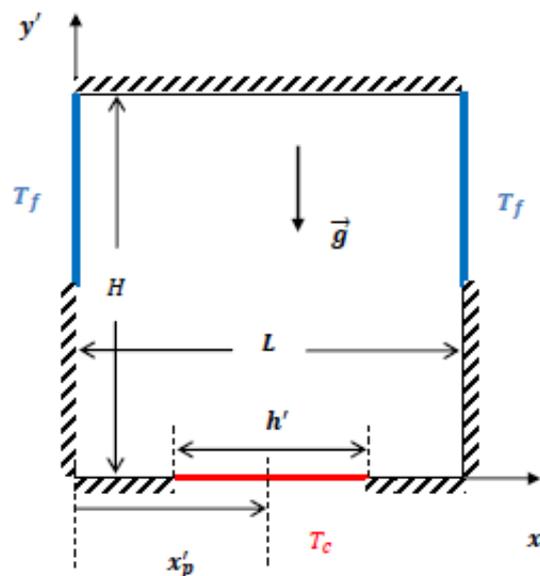


Figure I.12 : Schéma de la géométrie du problème. [5]

Les résultats obtenus avec différentes fraction volumique pour  $Ra=104$  et  $105$  dans une cavité bidimensionnelle remplie de nanofluide. Le transfert de chaleur est important lorsque un élément de chauffage est centré et a le nombre de Rayleigh plus élevée.

**S.R. Mishra et al. [7]** ont étudié un transfert thermique convectif naturel d'un fluide micropolaire le long d'une plaque plane immergée dans un milieu poreux en présence d'une source de chaleur volumétrique et d'une réaction chimique de premier ordre. La technique de similarité est utilisée pour transformer les équations différentielles partielles en équation ordinaire. Les résultats ont montré que, le profil de la vitesse réduit en raison de l'augmentation de paramètre magnétique et à la fois la présence et l'absence de la matrice poreuse, l'effet de la porosité du milieu combine à l'inertie donne lieu à une compression transversale produisant une couche limite plus mince, la flottabilité thermique améliore considérablement la distribution de la vitesse. La température du fluide augmente avec l'augmentation de coefficient d'inertie, le coefficient de la réaction chimique et du champ magnétique réduit la couche limite massique.

**Abbasian Arani et al [13]** ont étudié la convection mixte dans une cavité carrée remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules de Cu, avec deux parois horizontales adiabatiques, et un chauffage sinusoïdal pour les parois latérales, les résultats montrent que le transfert thermique influencé par les nanoparticules de Cu, le nombre de Richardson, et le chauffage sinusoïdal.

## **I.5. Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré pour définir des différents paramètres qu'on va utiliser au cours de notre étude pour bien comprendre les initiations de problème et pouvoir extraire des indices qui nous aidera à trouver des solutions pour notre cas.

***Chapitre II : Formulation  
Mathématique Et Position du  
Problème***

# Formulation Mathématique Et Position du Problème

## II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous décrivons et formulons le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées pour notre modèle d'études qui est une cavité carré remplis de nano-fluide, ce dernier est soumis à des équations gouvernantes qui seront présentés sous leurs formes dimensionnel et adimensionnel.

## II.2. Formulation physique :

Le domaine physique est une enceinte carrée fermée bidimensionnelle de longueur  $H$  remplie de nano-fluide avec un bloc carré au centre soumis à une température froide  $T_f$ , la paroi latérale droite est maintenue à une température élevée  $T_c$ , la paroi latérale gauche est maintenue à une température basse  $T_f$ . Les parois horizontales sont maintenues adiabatiques comme le montre la figure (II.1).

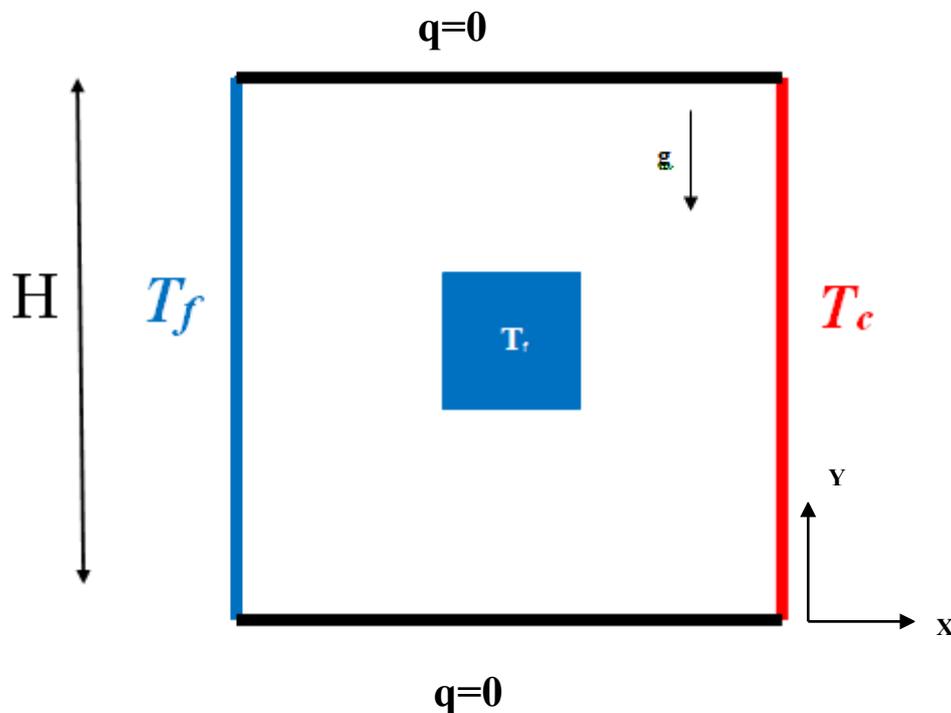


Figure II.1 : Géométrie du problème

### II.3. Formulation mathématique :

#### II.3.1. Les équations gouvernantes dimensionnelles :

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.1})$$

- Equation de quantité de mouvement :

Suivant x :

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

Suivant y :

$$\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \frac{1}{\rho_{nf}} (\rho\beta)_{nf} g(T - T_c) \quad (\text{II.3})$$

- Equation d'énergie :

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) = \frac{K_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (\text{II.4})$$

Le  $\alpha_{nf}$  est le coefficient de diffusion thermique du nanofluide et il décrit comme suit :

$$\alpha_{nf} = \frac{K_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (\text{II.5})$$

Donc l'équation d'énergie devient :

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (\text{II.6})$$

#### II.3.1.1. Les hypothèses simplificatrices du problème : [13]

- Le fluide est newtonien
- L'écoulement laminaire bidimensionnel
- L'écoulement et le transfert thermique sont indépendants du temps
- Le transfert de chaleur par radiation est négligé
- La dissipation visqueuse est négligée dans l'équation d'énergie
- L'approximation Boussinesq est adoptée, ce qui veut dire que l'influence de la variation de la masse volumique de fluide en fonction de la température n'est prise en compte que

dans le terme représentant les forces de volumes, la variation de la masse volumique est donnée :  $\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)]$

$\rho_0$  : Est la masse volumique de référence du fluide à la température de référence.

$T_0$  : Est la température de référence, avec :  $T_0 = \frac{T_c + T_f}{2}$

$\beta$  : Coefficient d'expansion thermique qui est donné par :  $\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_p$

### II.3.1.2. Les variables sans dimension :

La normalisation consiste à transformer les variables dépendantes et indépendantes en des variables sans dimension, c'est-à-dire qu'elles seront normalisées par rapport à certaines dimension caractéristiques. Cela permet de spécifier les conditions d'écoulement avec un nombre restreint de paramètres de façon à rendre les équations précédentes adimensionnelles, elles seront transformées par les relations suivantes :

$$X = \frac{x}{H} \quad , \quad Y = \frac{y}{H} \quad , \quad \mathbf{U} = \frac{u}{\alpha_f/H} \quad , \quad \mathbf{V} = \frac{v}{\alpha_f/H} \quad , \quad \mathbf{P} = \frac{H}{\rho_f \alpha_f^2} \mathbf{p} \quad , \quad \theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f} \quad (\text{II.7})$$

### II.3.1.3. Les nombres sans dimension :

#### A. Nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl est proportionnel au rapport entre le diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique. Il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux. Il peut être exprimé comme :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (\text{II.8})$$

Avec  $C_p$  la chaleur spécifique à pression constante [J/ (kg · K)].

#### B. Nombre de Grashof :

Le nombre de Grashof est proportionnel au rapport entre les forces de gravité par les forces visqueuses. Il peut être exprimé comme :

$$Gr = \frac{g \beta H^3 \Delta T \rho^2}{\mu^2} \quad (\text{II.9})$$

Avec :  $g$  Est l'accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>].

$\beta$  Est le coefficient d'expansion thermique [1/K].

$\Delta T$  Est La différence de température [°C].

#### C. Nombre de Rayleigh :

Le nombre de Rayleigh est proportionnel entre l'importance relative de la poussée d'Archimède et le produit de la trainée visqueuse par le taux de diffusion thermique. Il peut être exprimé comme :

$$Ra = Gr * Pr = \frac{g\beta H^3 \Delta T \rho^2}{\mu^2} Pr \quad (\text{II.10})$$

#### D. Nombre de Nusselt :

En convection, le phénomène de transfert de chaleur à la surface est évalué et caractérisé par le nombre adimensionnel est le nombre de Nusselt, il désigne le rapport entre les quantités de chaleur échangés par convection et par la conduction pur. [13]

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Flux convectif} = h \cdot \Delta T \\ \text{Flux conductif} = K \cdot \frac{\Delta T}{L} \end{array} \right. \rightarrow \frac{\text{Flux convectif}}{\text{Flux conductif}} \rightarrow Nu = \frac{h \cdot L}{k}$$

Par conséquent, le nombre de Nusselt représente le perfectionnement du transfert de chaleur, Si la valeur de Nu est grande cela veut dire que la convection est dominante. Si Nu = 1, cela veut dire que le transfert de chaleur se fait par conduction pure

Avec h : Le coefficient d'échange thermique [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>].

### II.3.2. Les équations gouvernantes adimensionnelles :

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (\text{II.11})$$

- Equation de quantité de mouvement :

Suivant X :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.12})$$

Suivant Y :

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{\rho_f \beta_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} * Ra * Pr * \theta \quad (\text{II.13})$$

- Equation d'énergie :

$$\left( U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.14})$$

**II.3.3. Condition aux limites :****Tableau II.1 :** Les conditions aux limites de la cavité sous forme adimensionnelles

Parois	Condition hydrodynamiques	Conditions thermique
Pour $Y=0$ et $0 < X < 1$	$U=V=0$	$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0$
Pour $Y=1$ et $0 < X < 1$	$U=V=0$	$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0$
Pour $X=0$ et $0 < Y < 1$	$U=V=0$	$\theta = 0$
Pour $X=1$ et $0 < Y < 1$	$U=V=0$	$\theta = 1$
Pour $0.3 < X < 0.7$ et $Y=0.3$ et $Y=0.7$	$U=V=0$	$\theta = 0$
Pour $0.3 < Y < 0.7$ et $X=0.3$ et $X=0.7$	$U=V=0$	$\theta = 0$

Ces différentes conditions sont résumées dans le tableau **(II.1)**

$$\text{Avec: } \theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f} \quad \text{(II.15)}$$

**II.4. Conclusion :**

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

***Chapitre III: Résultats  
Et Discussions***

# Résultats et discussion

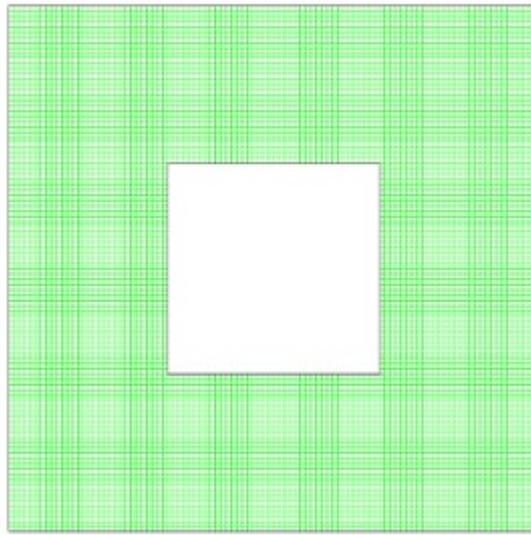
## III.1. introduction :

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude numérique afin d'obtenir l'évolution du transfert de chaleur (concentration des nanoparticules et le nombre de Rayleigh) en convection naturelle dans une cavité carré remplie de nano-fluide (**eau+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**).

Pour la simulation numérique nous avons utilisé le logiciel « FLUENT 6.3.26 », pour résoudre les équations de conservation (continuité, quantité de mouvement et d'énergie), avec les conditions aux limites. Nous avons réalisé le maillage par le pré-logiciel « GAMBIT 2.4.6 ».

## III.2. Maillage :

Le travaille sous Gambit consiste à suivre plusieurs étapes afin de crée le maillage de notre géométrie :



**Figure III.1 :** Maillage de la géométrie (100×100)

La figure III.1 montre le maillage utilisé. Ce maillage est un maillage uniforme (100×100) et le nombre de mailles est donc de 10000.

## III.3. Paramètres du nano-fluide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau) :

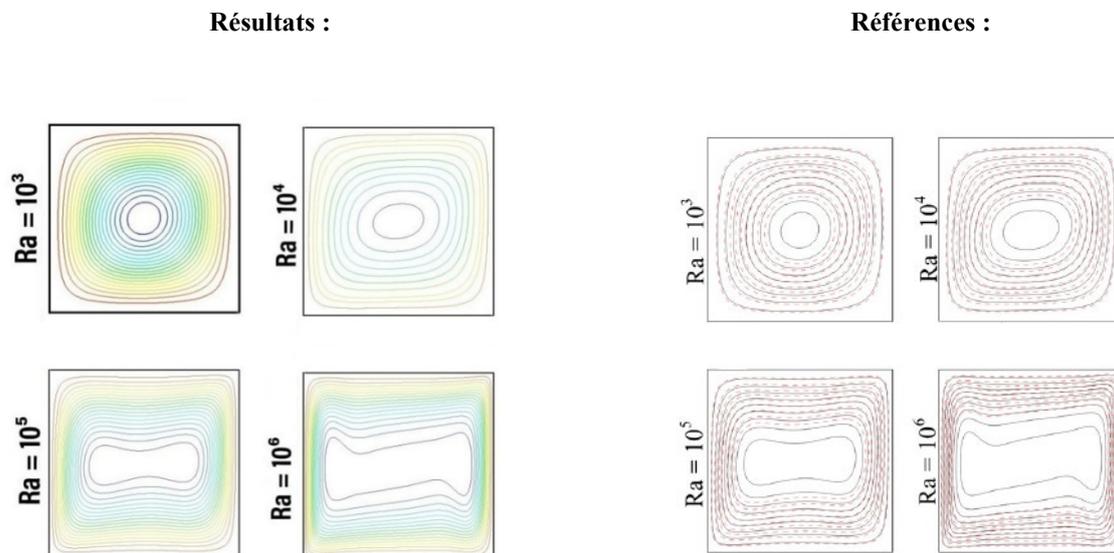
Les propriétés thermo-physiques du fluide de base (eau) et des nanoparticules (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sont présentées dans le tableau suivant :

Matériaux	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kg.K)	$K$ (W/m.K)	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )	$\mu$ (N*s/m <sup>2</sup> )
Oxyde Aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3970	765	40	$0.85 \cdot 10^{-5}$	/
eau	997.1	4179	0.613	$21 \cdot 10^{-5}$	$695 \cdot 10^{-6}$

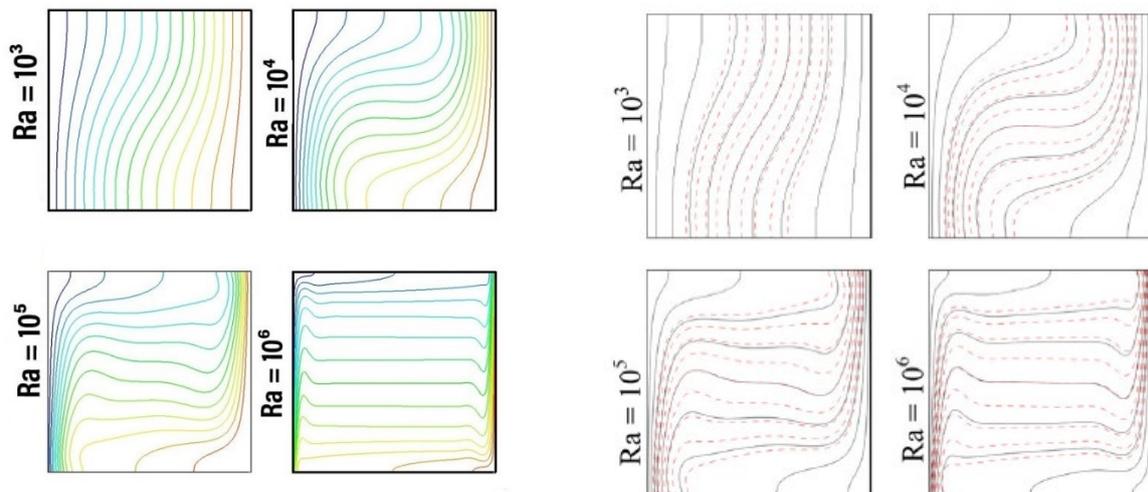
**Tableau III.1 :** Paramètres thermo-physique du fluide de base et de la nanoparticule.

### III.4.Validation :

Pour la validation , on a validé avec les résultats numériques de **Feng-Hsiang Lai, Yue-Tzu Yang** qui ont étudié la convection naturelle dans une cavité carrée de hauteur (H) et de longueur (W) remplie de nano-fluides (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau), les parois supérieure et inférieure étaient isolé tandis que la paroi gauche est maintenu à une température chaude et celle du côté droit est à une température froide .La comparaison concerne les isothermes, lignes de courant pour différents nombres de Rayleigh ( $10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ ).



**Figure III.2 :** Comparaison des lignes de courant entre nos résultats et ceux de la référence.



**Figure III.3** : Comparaison des lignes d'isothermes entre nos résultats et ceux de la référence

D'après la figure III.2 et la figure III.3, nos résultats sont identiques avec les résultats correspondants. Ceci permet donc de valider notre procédure de simulation numérique.

### III.5.Choix de maillage :

Pour examiner notre maillage et sa fiabilité nous avons calculé le nombre de Nusselt moyen en utilisant plusieurs maillages allant de 20x20 à 160x160 pour un nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) à  $\phi=0.02$  et  $\text{Ra}=10^3$ . Les résultats du maillage en fonction du nombre de Nusselt moyen sont présentés dans la figure III.4

grille	$\text{Nu}_{\text{moy}}$
<b>60x60</b>	5,45760
<b>80x80</b>	5,480452
<b>100x100</b>	5,494328
<b>120x120</b>	5,503579
<b>140x140</b>	5,51017
<b>160x160</b>	5,515093

**Tableau III.2:** le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents maillages.

Les valeurs du nombre de Nusselt sont presque constantes, et l'erreur ne dépasse pas 2%.

$$\varepsilon\% = \frac{Nu(100) - Nu(80)}{Nu(100)} = 0.25\%$$

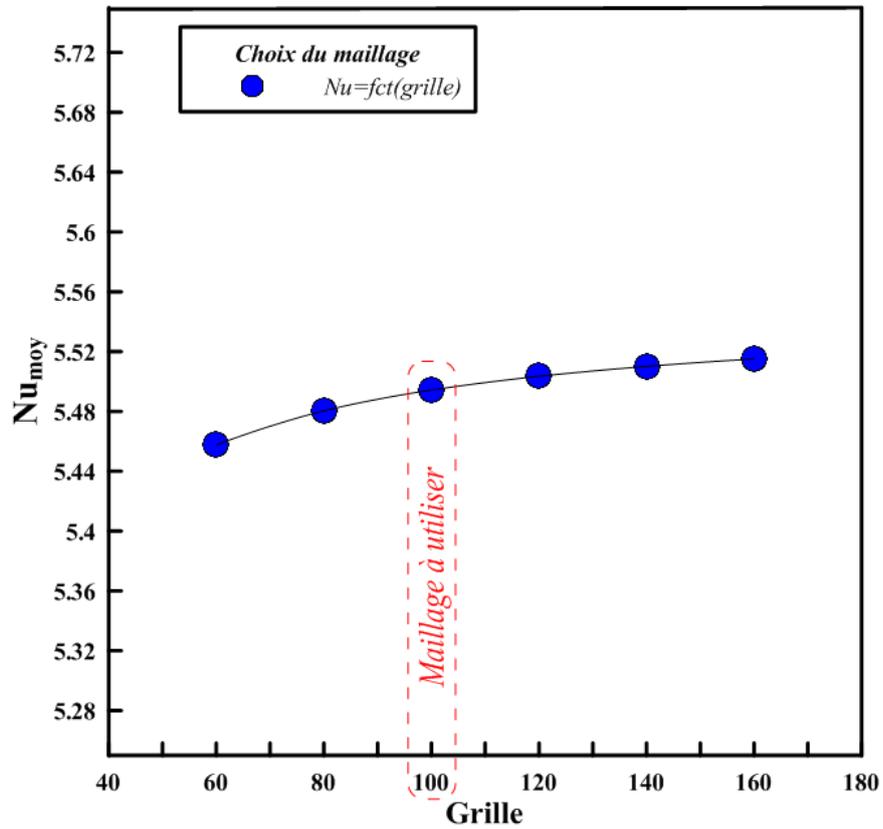


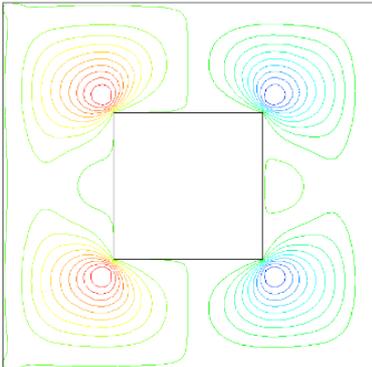
Figure III.4 : Nombre de Nusselt en fonction du maillage.

### III.6. Résultats et discussions :

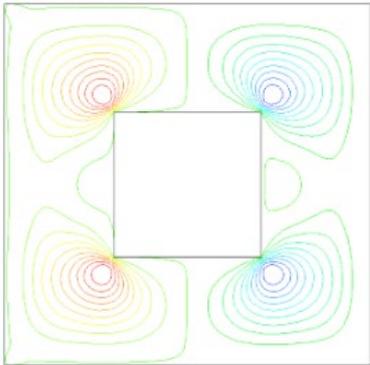
#### III.6.1. Effets de concentration et du nombre Rayleigh :

##### a. Les lignes de courants :

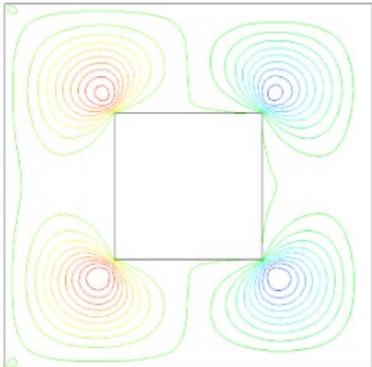
Pour  $\varphi=0.02$  :



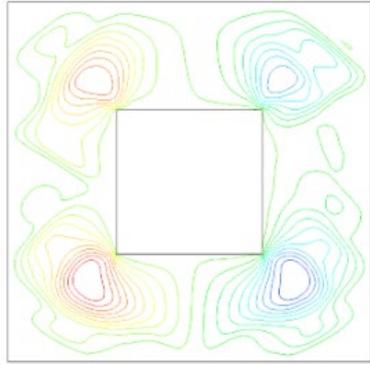
**Ra=10<sup>3</sup>**



**Ra=10<sup>4</sup>**

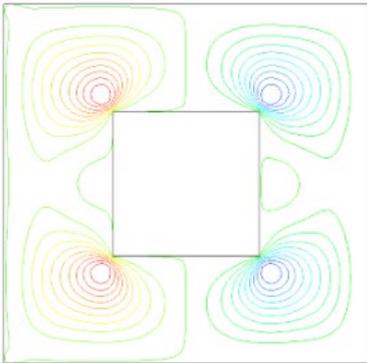


**Ra=10<sup>5</sup>**

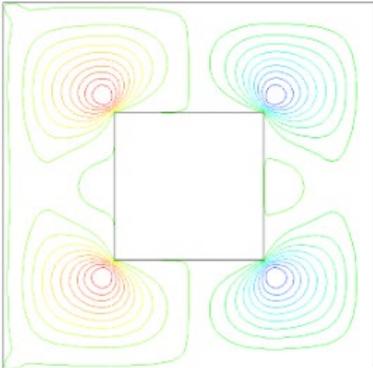


**Ra=10<sup>6</sup>**

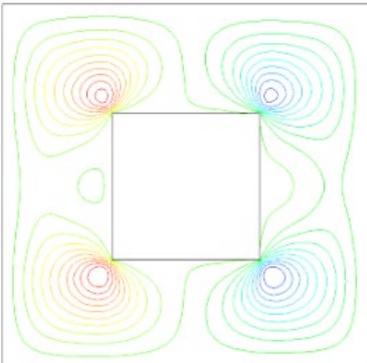
**Pour  $\phi=0.04$  :**



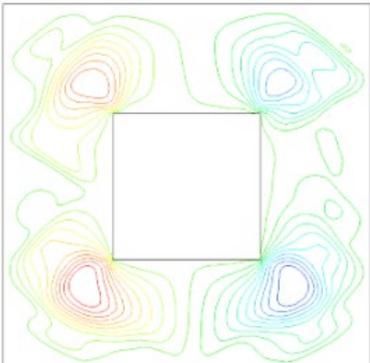
**Ra=10<sup>3</sup>**



**Ra=10<sup>4</sup>**

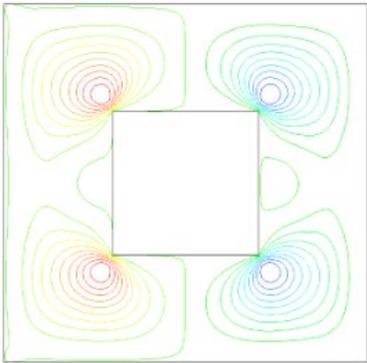


**Ra=10<sup>5</sup>**

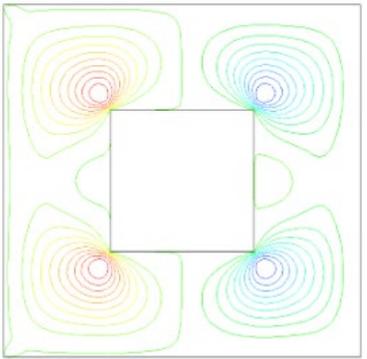


**Ra=10<sup>6</sup>**

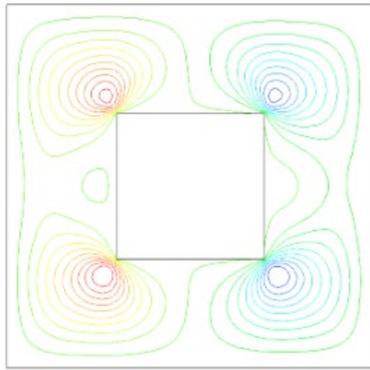
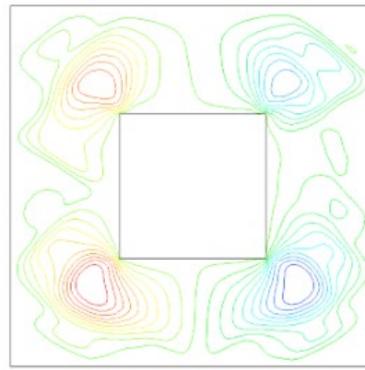
Pour  $\varphi=0.06$  :



**Ra=10<sup>3</sup>**



**Ra=10<sup>4</sup>**

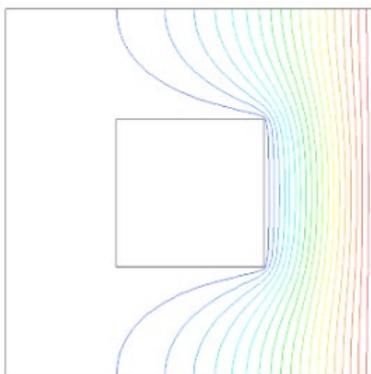
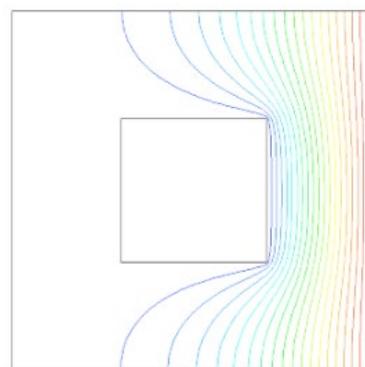
**Ra=10<sup>5</sup>****Ra=10<sup>6</sup>**

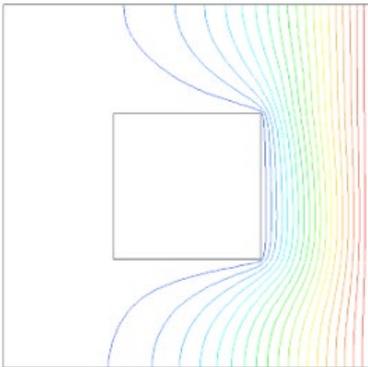
**Figure III.5 :** Les lignes de courants pour différents fraction et différents nombre Rayleigh.

Ces champs représentés par les contours des lignes de courant dans les la Figure III.5 pour un nombre de Rayleigh qui vari ( $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ) avec de différent fraction de nanoparticules allons de (0.02 à 0.06). On remarque la formation de quatre cellules localisées sur les quatre extrémités de la cavité carrée, les cellules sont symétriques par rapport a l'axe médian. Cette symétrie persiste jusqu'à un nombre de  $Ra=10^5$ . Au-delà la forme des cellules deviennent complexe.

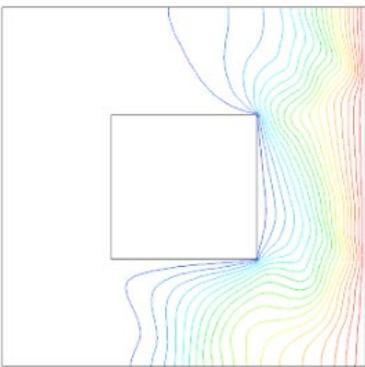
#### b. Les lignes isothermes

Pour  $\phi=0.02$  :

**Ra=10<sup>3</sup>****Ra=10<sup>4</sup>**

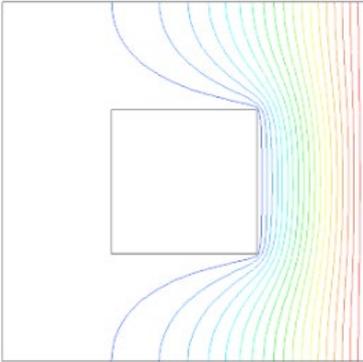


**Ra=10<sup>5</sup>**

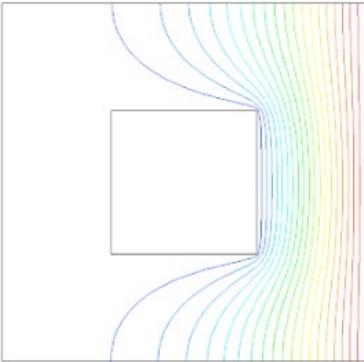


**Ra=10<sup>6</sup>**

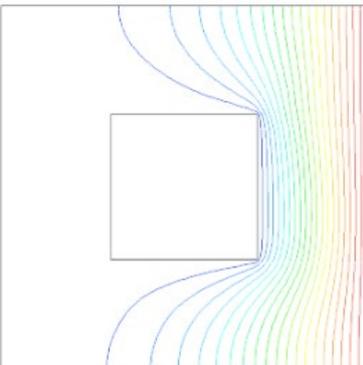
Pour  $\phi=0.04$  :



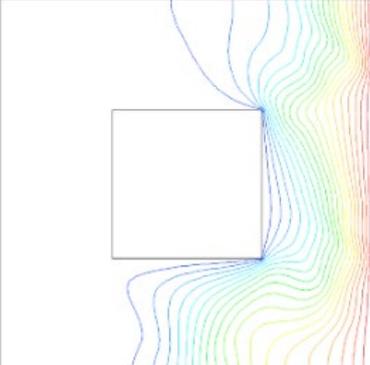
**Ra=10<sup>3</sup>**



**Ra=10<sup>4</sup>**

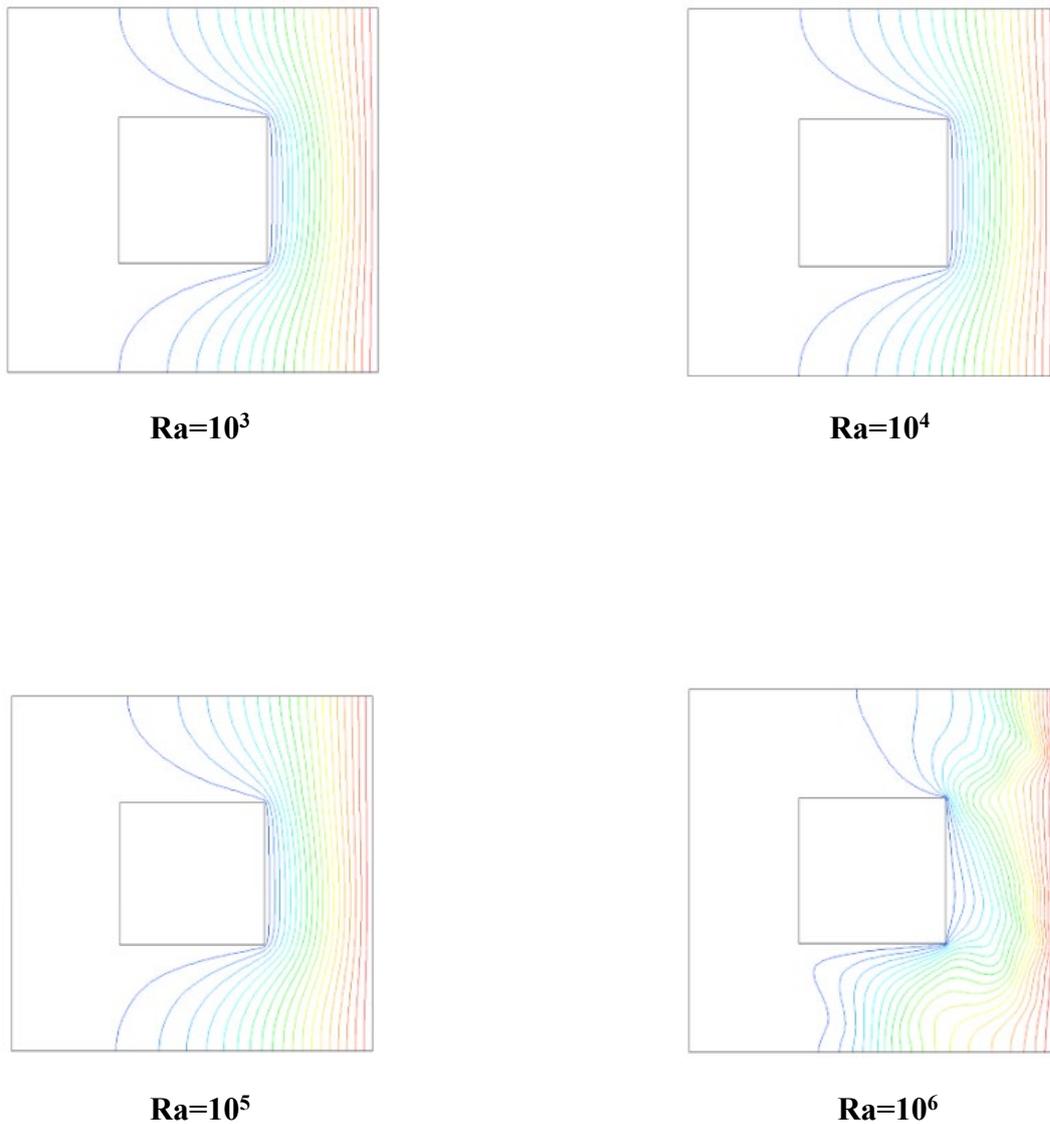


**Ra=10<sup>5</sup>**



**Ra=10<sup>6</sup>**

Pour  $\phi=0.06$  :



**Figure III.6 :** Les lignes isothermes pour différents fraction et différents nombre Rayleigh.

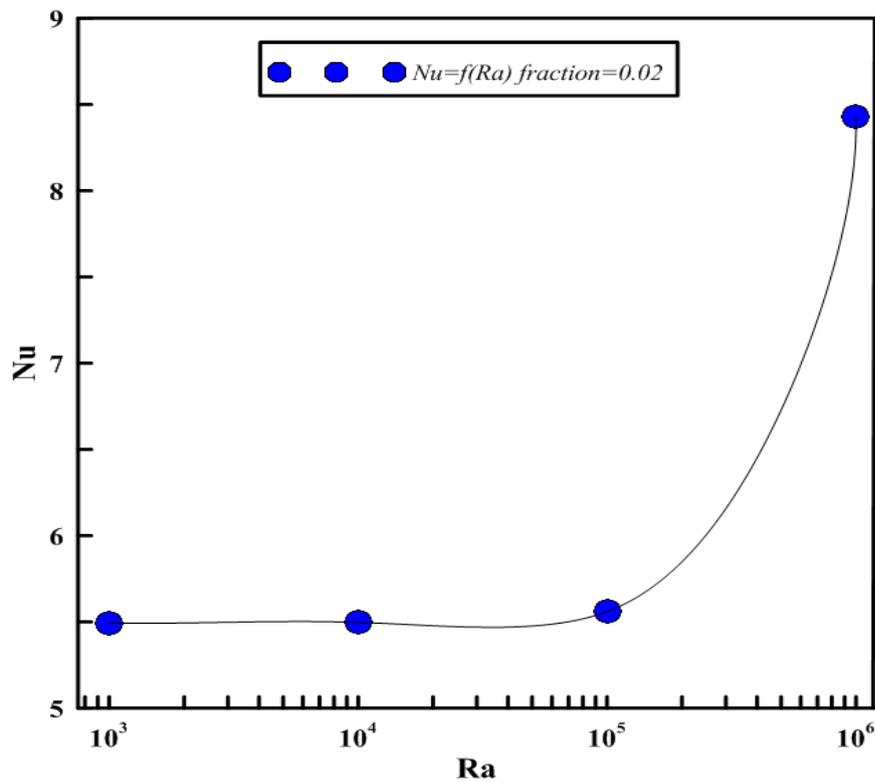
Ce champ représente les lignes isothermes dans la Figure III.6 pour un nombre de Rayleigh qui vari ( $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ) avec de différent fraction de nanoparticules allons de (0.02 à 0.06). A  $Ra=10^3$  on remarque que la situation thermique correspond à une conduction vue la stratification thermique présentée a droite de la cavité. En effet, on remarque une disposition horizontale des couches thermique le long de la paroi chaude.

En revanche, les lignes isothermes sont largement affectées à  $Ra=10^6$  et un panache thermique vient de se produire a droite du bloc froid et se dirige vers le long de la paroi chaude, ce scénario montre que le régime convectif vient de se développer et dominera toute la cavité.

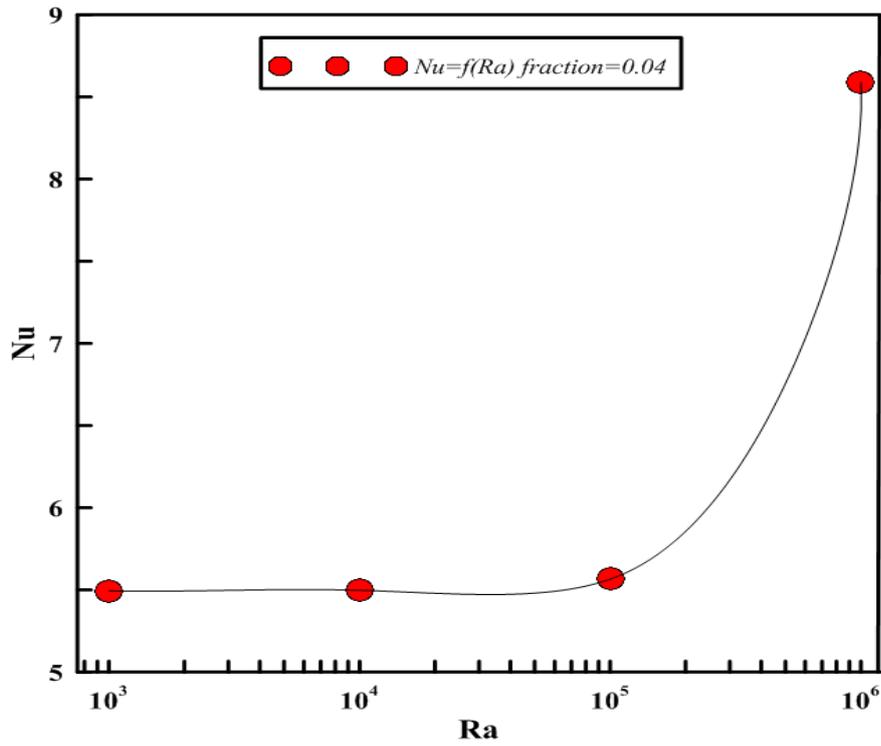
**III.6.2. Le nombre de Nusselt moyen :**

$\phi$	0.02	0.04	0.06
$Ra=10^3$	5.494328	5,494344	5.49436
$Ra=10^4$	5.497382	5,497559	5.49782
$Ra=10^5$	5.559844	5,565442	5.592268
$Ra=10^6$	8.42801	8.589539	8.40998

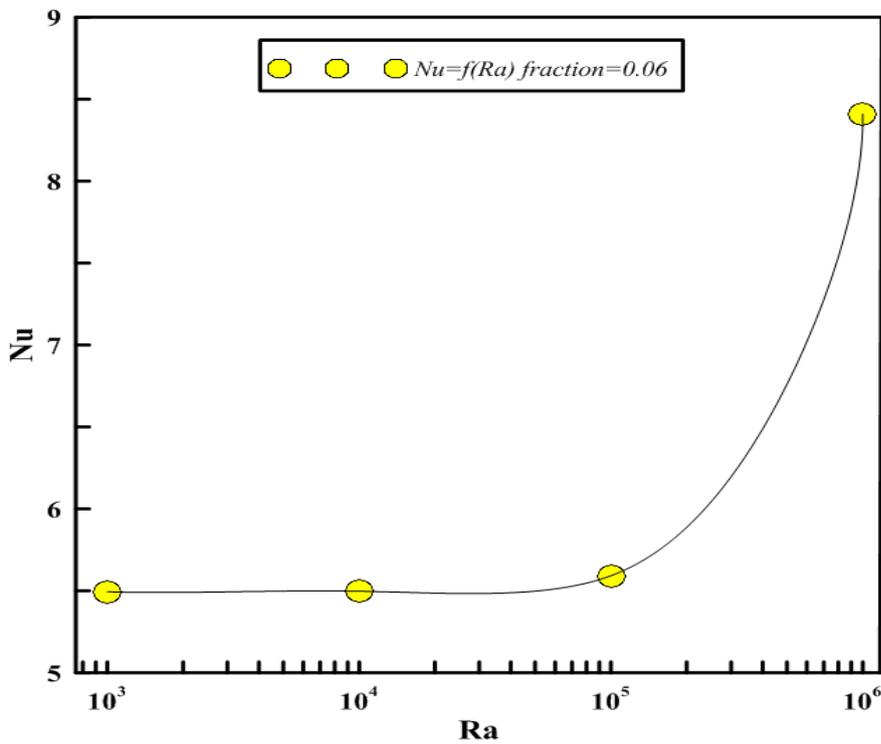
**Tableau III.3:** les nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Ra.



**Figure III.7 :** Le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents nombre de Rayleigh pour la fraction de Nanoparticule  $\phi=0.02$ .



**Figure III.8 :** Le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents nombre de Rayleigh pour la fraction de Nanoparticule  $\phi=0.04$ .



**Figure III.9 :** Le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents nombre de Rayleigh pour la fraction de Nanoparticule  $\phi=0.06$

La variation de Nusselt moyen en fonction de la concentration des nanoparticules à  $Ra = (10^3, 10^4, 10^5, 10^6)$ , montre une augmentation de  $Nu_{moy}$  pour toutes les fractions et pour chaque nombre de Rayleigh.

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

L'étude numérique nous montre l'importance des nano-fluides sur l'amélioration du transfert de chaleur, ainsi, l'évolution de Nusselt moyen en fonction de nombre de Rayleigh pour chaque fraction. On constate que l'effet du nano-fluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé et que constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et la fraction volumique pour différentes concentrations volumiques de nanoparticules.

# *Conclusion Générale*

# Conclusion générale

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique de la convection naturelle dans une cavité remplie de nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ +Eau).

La configuration géométrique est une enceinte carrée fermée de longueur  $H$  remplie de nano-fluide avec un bloc carré au centre soumis à une température froide, la paroi latérale droite est maintenue à une température chaude, la paroi latérale gauche est maintenue à une température froide. Les parois horizontales sont maintenues adiabatiques

En se basant sur la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations mathématiques, nous avons pu déterminer les lignes de courant, les isothermes ainsi que les variations du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh.

Les simulations numériques sont effectuées pour un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^6$ , et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0.02, 0.04 et 0.06). Les résultats principaux se résument dans:

- Une amélioration du taux de transfert de chaleur est due à l'existence de nanoparticules.
- L'effet du nano-fluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé.
- On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et la fraction volumique pour différentes concentrations volumiques de nanoparticules.

# *Références Bibliographiques*

# Références Bibliographiques

- [1] : Salhi Hicham, Etude numérique de la convection naturelle dans les enceintes : nano-fluide, thèse de doctorat, université de Batna, (2015).
- [2] : Guy LAURIAT : Professeur, laboratoire d'étude des transferts d'énergie et de matière (LETEM), université de Marne-La-Vallée
- [3] : BELAHMADI Essma, Etude numérique des transferts thermiques convectifs avec nano-fluides, thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI – CONSTANTINE, (2018).
- [4] : Soufi El Habib, Mémoire master académique, application des nano-fluides pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple, Thèse de master en génie chimique, Université kasdi merbah d'Ouargla, (2013).
- [5] : T. Benhalim, C. Ounnas, B. Mohamedi, K. Tahiri, SIMULATION DE L'EFFET DES NANOFLUIDES SUR LES CARACTERISTIQUES DE TRANSFERT DE CHALEUR D'UN ECHANGEUR TUBULAIRE PAR L'APPROCHE CFD, 1Centre de Recherche Nucléaire de Birine, Ain Oussera 17200 2LBMPT Université Ziane Achour, Djelfa 17000, (2018).
- [6] : Ridha MEBROUK, Etude paramétrique des échanges convectifs turbulents dans les configurations d'intérêt pratique, THESE EN COTUTELLE, UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1, (2017).
- [7] : Mathieu Bouton, Evaluation de l'intérêt énergétique des nano-fluides dans l'usage des machines frigorifiques, Génie des procédés, (2012).
- [8] : Yahiaoui et m'hamdi, Approche numérique à l'étude de la convection naturelle dans une cavité remplie de nano-fluide, mémoire de master, université de Bejaia, (2021).
- [9] : Adnani M, Meziani B et Ourrad O, Convection Mixte Dans Une Cavité Carrée En Présence D'un Bloc Soumis à une Température Froide, Congrès International sur les Energies Renouvelables et le Développement Durable, (2017).
- [10] : Elif Büyük ÖĞÜT, Metin AKYOL & Müslüm ARICI, Convection naturelle de nano-fluides dans une cavité carrée inclinée à parois latérales ondulées, Journal des sciences et technologies thermiques, (2017).

## Références Bibliographiques

[11] : M. ADNANI, B. MEZIANI et O. OUERDIA, NUMERICAL STUDY OF NATURAL CONVECTION IN A SQUARE CAVITY FOR DIFFERENT VALUES OF PRANDTL NUMBERS, Congrès annuel des Sciences et Technologies Appliquées, (2016).

[12] : S.-E. OUYAHIA, Y.K. BENKAHLA, W. BERABOU, M. BENZEMA, A. BOUDIAF, Convection naturelle d'un nano-fluide confiné dans une enceinte triangulaire : Effet du fractionnement et de la position de la source de chaleur, 23ème Congrès Français de Mécanique, (2017).

[13] : FAID Hanane, CHERIEF Kalthoum, Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité différentiellement chauffée remplie de nano-fluide, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, (2020).

# *Résumé*

# Résumé

---

Dans ce travail on a mené une étude numérique d'une convection naturelle dans une cavité carrée remplie de nanofluide (fluide de base l'eau et nanoparticules  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Le domaine physique est une enceinte carrée fermée bidimensionnelle de longueur  $H$  remplie de nano-fluide avec un bloc carré au centre soumis à une température froide, la paroi latérale droite est maintenu à une température chaude, la paroi latérale gauche est maintenue à une température froide, Les parois horizontales sont maintenues adiabatiques. Pour un nombre de Rayleigh qui variant de  $10^3$  à  $10^6$ , et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0.02, 0.04 et 0.06), Les résultats obtenus montrent une amélioration du taux de transfert de chaleur est due à l'existence de nanoparticules, l'effet du nano-fluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé et On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et la fraction volumique pour différentes concentrations volumiques de nanoparticules.

**Mot clé :** Nano-fluide, Convection naturelle, nombre de Rayleigh, cavité.

# Abstract

---

In this work a numerical study of a natural convection in a square cavity filled with nano-fluid (base fluid water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles) has been conducted. The physical domain is a two-dimensional closed square enclosure of length H filled with nanofluid with a square block in the center subjected to a cold temperature, the right side wall is maintained at a hot temperature, the left side wall is maintained at a cold temperature, the horizontal walls are maintained adiabatic. For a Rayleigh number that varies from 10<sup>3</sup> to 10<sup>6</sup>, and a volume fraction of nanoparticles between (0.02, 0.04 and 0.06), The results obtained show an improvement in the rate of heat transfer is due to the existence of nanoparticles, the effect of the nano-fluid on the convection is manifested particularly at a high Rayleigh number and It is found that the Nusselt number increases with the increase of the Rayleigh number and the volume fraction for different volume concentrations of nanoparticles.

**Keywords:** Nano-fluid, Natural convection, Rayleigh number, cavity.