

**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 : Installations Energétiques et Turbomachines

Par :

**BEDHOUCHE Amina**

**BENLALA Asma**

**Thème**

---

**Refroidissement des composantes électroniques avec ou non des nano-fluides**

---

Soutenu le 20/05/2023 devant le jury composé de :

Mr.M. M'HAMDI	Président
Mr. M. ADNANI	Rapporteur
Mr. M. MENDIL	Examineur

**Année Universitaire 2022-2023**

## ***Remerciement***

*Nous tenons tout d'abord à remercier le bon dieu le tout puissant de nous avoir attribué la faveur de réussir nos études.*

*Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude et nos sincères remerciements à*

**Mr. ADNANI Massinissa**  *votre soutien et votre contribution précieuse tout au long de la réalisation de notre mémoire, nous sommes reconnaissantes d'avoir pu bénéficier de votre encadrement, de vos conseils et de vos connaissances approfondies dans le domaine.*

*Votre expertise et votre disponibilité ont grandement enrichi notre travail et nous ont permis d'approfondir nos connaissances.*

*Nous tenons également à exprimer nos gratitude envers,*

*Les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous tenons également à remercier nos familles et amis pour leur soutien constant et leur encouragement tout au long de cette étape importante de notre vie universitaire. Leur présence et leurs mots d'encouragement ont été une source de motivation et de réconfort.*

*Nous souhaitons également exprimer nos reconnaissances envers notre institution universitaire pour nous avoir donné l'opportunité de réaliser ce mémoire, les ressources mises à nos dispositions ont grandement facilité nos recherches et notre réflexion.*

*Veillez accepter nos sincères remerciements et l'expression de nos profondes gratitude.*

## ***Dédicaces***

*Tout d'abord, je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a permis de suivre mes études et m'a muni de volonté, force et patience afin de réaliser ce modeste travail. J'ai le plaisir de dédier ce mémoire :*

***A mes chers parents,** votre soutien inconditionnel, votre amour infini et votre sacrifice sans limites ont été les piliers qui m'ont guidé tout au long de mon parcours universitaire. Vous avez cru en moi quand je doutais de moi-même, vous m'avez encouragé à chaque étape et vous avez fait tant de sacrifices pour me donner les meilleures chances de réussite. Vous avez été mes modèles, mes inspirations et mes héros, je suis remplie d'une immense gratitude et d'une reconnaissance éternelle pour tout ce que vous avez fait pour moi, je vous aime de tout mon cœur et je serai toujours reconnaissante d'avoir des parents aussi extraordinaires que vous.*

***A mon cher frère Farés,** je tiens à te remercier du fond du cœur pour ton amour, ton soutien et tes sacrifices tout au long de mes études. Ta présence constante et ton encouragement m'ont permis d'atteindre ce moment important, tu as été ma source de motivation et tu m'as appris que le savoir est une richesse, je te suis infiniment reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour moi. Je t'aime du plus profond de mon cœur.*

***A mon frère youssef et mon oncle Abd el Karim,** je tiens à vous remercier du fond du cœur pour votre amour, votre soutien et vos encouragements tout au long de mes études. Votre confiance m'a motivé à atteindre l'un de mes objectifs, et aujourd'hui je suis reconnaissante d'avoir partagé cette belle étape avec vous, merci d'être toujours à mes côtés.*

***Aux prunelles de mes yeux, mes chères sœurs,** avec un amour infini que je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour votre soutien, encouragement et amour inconditionnel, votre présence et confiance ont été une force qui m'a poussé à atteindre mes objectifs, je suis incroyablement reconnaissante d'avoir des sœurs aussi merveilleuses et je chéris les précieux liens familiaux que nous partageons, merci du fond du mon cœur.*

***A ma petite fille Hadjer et mon petit fils Adem,** je vous aime incroyablement.*

***Aux chers amis,** merci pour votre soutien, encouragement et confiance, spécialement **Asma,** je suis infiniment reconnaissante d'avoir une amie comme toi à mes côtés tous le long de mon parcours universitaire, ton amitié inébranlable, ton soutien, ton patience, amour et encouragement ont été une source de réconfort pour moi.*

***Amina***

## *Dédicaces*

*Grace à Dieu le tout puissant, j'ai achevé la réalisation de ce modeste travail que je tien très chaleureusement à le dédier :*

*A ma très **chère mère**, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes cotés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*A **mon père** qui n'a pas pu voir mon travail, je ne pourrais pas rédiger ce mémoire sans me rappeler de toi, car tu as été tout pour moi, repose en paix.*

*A mon frère **Lounis**, à qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite.*

*A mes chers amis **Amina** et **Ibtissem**, en souvenir de nos éclats de rire et des bons moments, en souvenir de tout ce qu'on a vécu ensemble, j'espère que notre amitié durera éternellement.*

*Asma*

# Sommaire

<b>Remerciement</b> .....	<b>II</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>III</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>IV</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>VI</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Nomenclatures</b> .....	<b>IX</b>
<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : Généralités et recherches bibliographiques</b> .....	<b>3</b>
1.1 Introduction .....	3
1.2 Systèmes de refroidissement des composants électroniques .....	3
1.2.1 Composants électroniques .....	3
1.2.2 Systèmes de refroidissement .....	4
1.2.3 Refroidissement monophasique .....	5
1.2.4 Refroidissement par liquide caloporteur et nano-fluide .....	5
a) Refroidissement par liquide .....	5
b) Refroidissement par nano-fluide .....	5
c) Refroidissement diphasique .....	6
1.2.5 Refroidissement par jets et spray .....	7
a) Refroidissement par jets .....	7
b) Refroidissement par spray .....	7
1.3 La convection .....	7
1.3.1 Convection forcée .....	8
1.3.2 La convection naturelle .....	9
1.3.3 La convection mixte .....	9
1.4 Généralités sur les nano-fluides .....	9
1.4.1 Définition .....	9
1.4.2 Préparation de nano-fluides .....	10
1.4.3 Les applications des nano-fluides .....	11
1.4.4 Les avantages des nano-fluides .....	12

1.4.5	Les inconvénients des nano-fluides.....	12
1.5	Propriétés thermo-physiques des nanoparticules.....	12
1.5.1	La densité .....	12
1.5.2	La capacité calorifique .....	13
1.5.3	Le coefficient d'expansion thermique.....	13
1.5.4	Viscosité dynamique .....	13
1.5.5	Conductivité thermique des nano-fluides.....	13
1.6	Synthèses Bibliographique : .....	14
1.7	Conclusion .....	20
	<b>CHAPITRE 2 : Modélisation mathématique.....</b>	<b>22</b>
2.1	Introduction .....	22
2.2	Géométrie et modèle physique .....	22
2.3	Hypothèses simplificatrices .....	23
2.4	Formulation mathématique.....	23
2.4.1	Equations gouvernantes dimensionnelles.....	23
2.4.2	Equation de continuité.....	23
2.4.3	Equation de quantité de mouvement (Navier Stokes).....	24
2.4.4	Équation d'énergie .....	24
2.4.5	Conditions aux limites.....	24
2.4.6	Equations adimensionnels .....	24
2.4.7	Equation de continuité adimensionnelle .....	25
2.4.8	Equation de quantité de mouvement adimensionnelle.....	25
2.4.9	Equation d'énergie adimensionnelle .....	25
2.5	Méthodes Numériques .....	25
2.5.1	Généralités sur les méthodes numériques .....	25
2.5.2	Choix de la méthode numérique (méthode des volumes finis) .....	26
2.6	Conclusion .....	27
	<b>CHAPITRE 3 : Résultats et discussions.....</b>	<b>28</b>
3.1	Introduction .....	28
3.2	Validation.....	28
3.3	Résultats .....	30
3.3.1	Effet de la fraction volumique et du nombre de Reynolds et Grashof.....	30
a)	Profil du nombre du Nusselt.....	30
3.4	Conclusion.....	49
	<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>50</b>

**Références bibliographiques ..... 52**

## Liste des figures

<b>Figure (1.1) :</b> Présentation type des composants électroniques.....	4
<b>Figure (1.2) :</b> Principe de fonctionnement d'un caloduc.....	7
<b>Figure (1.3):</b> Schéma de transfert de chaleur par convection.....	8
<b>Figure (1.4) :</b> Schéma de la convection forcée.....	9
<b>Figure (1.5) :</b> Convection naturelle .....	9
<b>Figure (1.6):</b> Nano-fluides vu au microscope électronique (éthylène glycol + cuivre à 0.5 %eau + alumina, eau +or à nm).....	11
<b>Figure (1.7) :</b> Procédé de synthèse de nano-fluide en une seule étape.....	12
<b>Figure (1.8):</b> géométrie du problème et système de coordonnées pour un conduit elliptique, Shariat et al.....	16
<b>Figure (1.9) :</b> Configuration schématique des problèmes étudiés par Mahmoudi et Al.....	17
<b>Figure (1.10) :</b> Représentation schématique du cas de convection mixte étudié.....	18
<b>Figure (1.11) :</b> effet de la concentration volumique de nano-fluides sur la température du processeur du PC à vide et à pleine charge.....	19
<b>Figure (1.12) :</b> Le schéma du modèle physique et les conditions aux limites .....	20
<b>Figure (1.13) :</b> principe d'un système de refroidissement avec fluide caloporteur intermédiaire.....	21
<b>Figure (2.1) :</b> Géométrie du problème considéré.....	23
<b>Figure (3.1) :</b> Comparaison des lignes de courants et isothermes entre nos résultats et ceux de <b>El hafad Bara</b> pour $Ra= 105$ et $\Phi= 0.06$ .....	31
<b>Figure (3.2) :</b> Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différentes fractions volumiques $Re=10$ et $Gr = 10^3$ .....	32
<b>Figure (3.3) :</b> Profil de Nusselt moyen en fonction de fraction volumique.....	33
<b>Figure (3.4) :</b> Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différents nombres de Reynolds ( $Gr= 10^3$ ) .....	34
<b>Figure (3.5) :</b> profil de nombre de Nusselt moyen en fonction de $Re$ pour $Gr= 10^3$ .....	35
<b>Figure (3.6) :</b> Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différents nombres de Reynolds ( $Gr= 10^4$ ) .....	36
<b>Figure (3.7) :</b> Profil de nombre de Nusselt en fonction de $Re$ pour $Gr= 10^4$ .....	36
<b>Figure (3.8) :</b> Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différents valeurs de nombre de Reynolds ( $Gr= 10^5$ ).....	37

**Figure (3.9) :** Profil de nombre de Nusselt en fonction de Re pour  $Gr= 10^5$ .....38

**Figure (3.10) :** Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différents valeurs de nombre de Reynolds et  $Gr= 10^6$ .....39

**Figure (3.11) :** Profil de nombre de Nusselt en fonction de Re pour  $Gr= 10^6$ .....39

**Figure (3.12) :** Lignes isothermes pour différents valeurs de fraction volumique à  $Re= 10$  et  $Gr= 10^3$ .....40

**Figure (3.13) :** Lignes de courants pour différents valeurs de fraction volumique à  $Re= 10$  et  $Gr= 10^3$ .....41

**Figure (3.14) :** Lignes isothermes pour différents valeurs de nombre de Reynolds à une fraction volumique  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^3$ .....42

**Figure (3.15) :** Lignes de courant pour différents valeurs de nombres de reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^3$ .....43

**Figure (3.16) :** Lignes isothermes pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$   $Gr= 10^4$ .....44

**Figure (3.17) :** Lignes de courant pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^4$ .....45

**Figure (3.18) :** Lignes isothermes pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^5$ .....46

**Figure (3.19) :** Lignes de courant pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^5$ .....47

**Figure (3.20) :** lignes isothermes pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^6$ .....48

**Figure (3.21) :** Lignes de courant pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^6$ .....49

## Liste des tableaux

**Tableau 3.1** : Propriétés thermo-physiques du fluide de base et de la nanoparticule .....30

# NOMENCLATURES

<b>Symboles</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité (SI)</b>
Cp :	Chaleur spécifique	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
L :	Hauteur de la cavité	m
g :	Accélération de la pesanteur	m s <sup>-2</sup>
p :	Pression	Pa
Φ :	Flux de chaleur	W
T :	Température dimensionnel	K
Tc :	Température chaude	K
Tf :	Température froide	K
v :	Volume des nanoparticules	m <sup>3</sup>
Nu :	Nombre de Nusselt	
u, v :	Composant de vitesse dimensionnel	m s <sup>-1</sup>
U, V :	Composantes de vitesse adimensionnel	-
x, y :	Cordonnées dimensionnel	m
X, Y :	Cordonnées adimensionnel	-

## Symboles grecs

α :	Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
β :	Coefficient d'expansion thermique	K <sup>-1</sup>
θ :	Température adimensionnelle	-
ν :	Viscosité cinématique	m s <sup>-1</sup>
μ :	Viscosité dynamique	kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
φ :	Fraction volumique des nanoparticules	
ρ :	Masse volumique	kg m <sup>-3</sup>

## Indices

f, s : fluide et solide

nf : Nano-fluide

### **Groupements adimensionnels**

Re Nombre de Reynolds -

Gr Nombre de Grashof -

$N_{umoy}$  Nombre de Nusselt moyen -

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

Dans le domaine de technologie, le refroidissement des équipements électroniques par convection mixte est largement utilisé, en raison de fait qu'elle maximise le refroidissement en combinaison de convection naturelle et forcée, ce qui garantit des températures recommandées et permet d'éviter les problèmes de surchauffe et donc assurer un fonctionnement optimal des équipements.

La convection mixte est un phénomène de transfert de chaleur qui se produit lorsque la convection naturelle et la convection forcée sont présentée simultanément dans un fluide, elle se produit lorsqu'un fluide est chauffé et déplacé à la fois par une source de chaleur et par un mouvement extérieur. Ce processus de transfert de chaleur peut se produire dans de nombreux systèmes de chauffage, de refroidissement et de climatisation, ainsi que dans les processus industriels. La convection mixte peut avoir des effets importants sur l'efficacité énergétique et la performance des systèmes qui en dépendent.

Le refroidissement est le processus de transfert de chaleur qui permet à un système de perdre de la chaleur, ce qui entraîne une diminution de sa température.

Le refroidissement de la plaque électronique est essentiel pour éviter la surchauffe des composants et pour prolonger leur durée de vie. Cela permet de maintenir une température optimale pour le fonctionnement de ces composants en utilisant des systèmes de refroidissements à air ou à eau, ou en faisant circuler un fluide réfrigérant dans le système.

Les nano-fluides sont des liquides qui contiennent des nanoparticules de taille nanométrique dispersées dans un liquide de base, ils ont des propriétés physiques différentes des liquides de base ce qui peut les rendre utiles pour les applications spécifiques. Ils peuvent être utilisés pour améliorer le refroidissement des plaques électroniques en raison de leur conductivité thermique élevée, lorsque ces nano-fluides sont dispersées dans un liquide de base, elles peuvent améliorer la capacité du liquide à transporter la chaleur à partir des plaques électroniques.

Ce travail sert à étudier l'application des nano-fluides pour le refroidissement des plaques électroniques.

Cette présente étude est structurée dans trois chapitres organisés de la manière suivante :

Le premier chapitre est destiné pour des généralités sur la convection mixte, le système de refroidissement et les nano-fluides (préparation et application) ainsi que leurs propriétés physiques. Et nous terminons le chapitre par une synthèse bibliographique des différentes études concernant notre cas de recherche.

Le second chapitre est consacré à la présentation de formulation physique et mathématique du problème étudié, aux hypothèses simplificatrices et l'établissement des équations dimensionnels et sans dimensions et des conditions aux limites qui les associées. Et on termine par la méthode numérique à adopter pour résoudre les équations trouvées.

Et pour le dernier chapitre est réservée à l'ensemble des résultats des simulations obtenus et leurs interprétations physique, une validation des résultats antérieurs est également présentée.

Finalement, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

**CHAPITRE 1**

**Généralités et recherches  
bibliographiques**

# CHAPITRE 1 : Généralités et recherches bibliographiques

## 1.1 Introduction

Le refroidissement des plaques électroniques est un aspect crucial de la conception et du fonctionnement des dispositifs électroniques modernes. Avec la miniaturisation croissante des composants électroniques et l'augmentation de leur densité de puissance, la dissipation thermique efficace devient de plus en plus importante pour éviter la surchauffe des composants. Une méthode prometteuse pour améliorer le refroidissement des plaques électroniques consiste à utiliser des nano-fluides, dans ce chapitre on s'intéressera aux systèmes de refroidissement et aux différentes caractéristiques de nano-fluides et leur rôle dans ce mode de transfert de chaleur.

## 1.2 Systèmes de refroidissement des composants électroniques

### 1.2.1 Composants électroniques

Un composant électronique est un dispositif qui est un élément constitutif d'un circuit électronique. Généralement, il termine par deux broches métalliques et est encapsulé dans un matériel métallique, céramique ou plastique. Ces composants sont normalement reliés entre eux par des soudures au circuit imprimé.

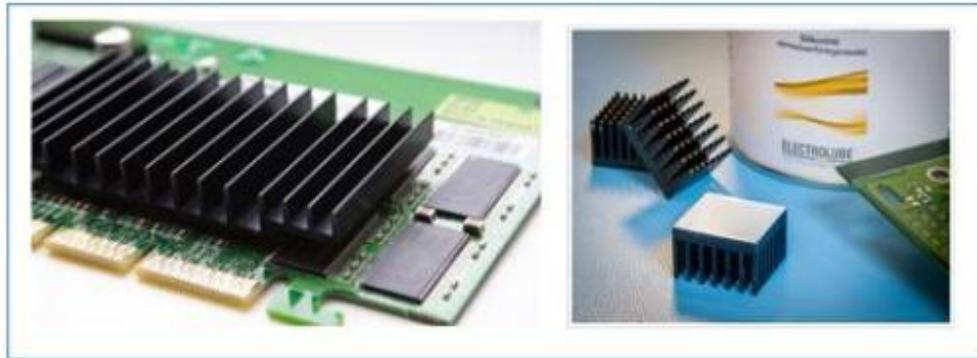
Il existe différents types de composants électroniques. Les composants discrets sont encapsulés un par un (tels que les transistors ou les diodes), tandis que les composants intégrés forment des ensembles plus complexes à partir de l'union des composants discrets. D'autres types de composants sont les actifs (ils génèrent une excitation électrique), les passifs (chargés de la connexion des composants actifs), les électromagnétiques (transformateurs, inducteurs), les électroacoustiques (microphones, casques) et les optoélectroniques. [1]

Enfin, les composants semi-conducteurs sont ceux qui sont faits de matériaux semi-conducteurs (qui conduisent ou isolent l'électricité en fonction de la température ambiante) comme le silicium.

Dans le cas des circuits électroniques, il est important de faire la distinction entre les composants (les dispositifs physiques/appareils) et les éléments (abstractions ou modèles)

L'enlèvement de la chaleur de ces composants, par exemple, pour les micros – ordinateurs fonctionnant avec des processeurs de grande vitesse ayant pour but de traitement de données.

De plus qu'il y a une tendance à assembler un plus grand nombre de ces composants et donc un apport important de chaleur. Par conséquent, le processus de refroidissement est d'un intérêt essentiel et primordial, puisque son but principal est le contrôle thermique de ces composants. [2]



**Figure (1.1) :** Présentation type des composants électroniques[2]

### 1.2.2 Systèmes de refroidissement

Une attention particulière doit donc être accordée à tous les systèmes de refroidissement, car la chaleur doit d'abord traverser l'épaisseur des différentes couches de l'assemblage par conduction thermique avant d'atteindre le liquide de refroidissement. Sélection des matériaux qui entrent dans la fabrication de ces canapés et des nombreux autres interfaces .c'est pour cette raison que les dispositifs d'échange thermique ont été développés et perfectionnés avec l'environnement. [3]

On distingue 2 modes différents de systèmes de refroidissement :

- **Systèmes de refroidissement actifs :**

Cette méthode repose sur la convection forcée pour transférer la chaleur et nécessite l'utilisation d'une pompe mécanique pour assurer la circulation du fluide calorifique ainsi qu'un circuit externe pour évacuer la chaleur du système vers l'extérieur. [4]

- **Systèmes de refroidissement passifs :**

Ils ne nécessitent pas d'alimentation externe, ce qui réduit le rendement énergétique. Un système de refroidissement passif peut être divisé en deux catégories : direct et indirect. Selon que le fluide de refroidissement entre ou non en contact avec les composants électroniques. [5]

### **1.2.3 Refroidissement monophasique**

Les échangeurs monophasiques comprennent une structure dans laquelle le passage du fluide de refroidissement ne change pas l'état.

- refroidissement à l'air
- convection naturelle dans l'air
- convection forcée dans l'air

### **1.2.4 Refroidissement par liquide caloporteur et nano-fluide**

#### **a) Refroidissement par liquide**

Le refroidissement par liquide (généralement en ajoutant de l'eau) est une autre méthode pour dissiper la chaleur dans le milieu environnant. Le fonctionnement principal de refroidissement par liquide caloporteur de pouvoir transféré de la chaleur tout comme l'air, les liquides transfèrent la chaleur par convection.

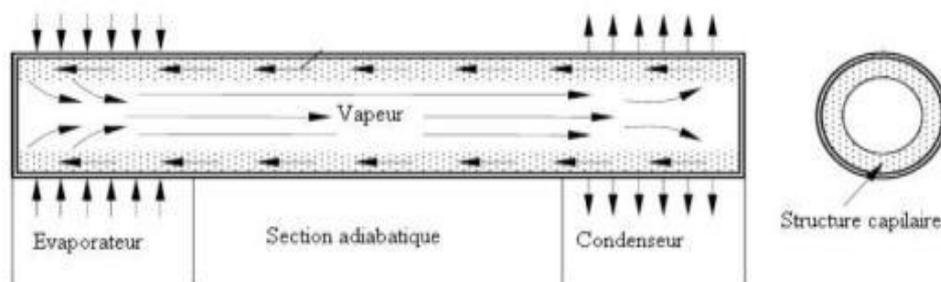
#### **b) Refroidissement par nano-fluide**

Les nano-fluide sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés. En effet, les fluides de bases souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent leur capacité de transfert de chaleur. [6]

### c) Refroidissement diphasique

Il s'agit d'un refroidissement qui se produit en même temps qu'une transition de phase dans la substance de refroidissement. Il existe quatre types de refroidissement différents qui varient dans leur configuration : [7]

- Refroidissement par changement de phase solide-liquide
- Refroidissement par changement de phase liquide-vapeur (caloducs) : un caloduc est un type de conducteur thermique qui utilise le principe de changement de phase des fluides caloporteurs pour déplacer la chaleur d'une source chaude vers une source froide. Le principe du caloduc est basé sur le mouvement d'un liquide en équilibre avec sa vapeur entre une région chauffée, l'évaporateur, une zone refroidie et le condenseur qui fonctionnent tous sans air.
- Refroidissement par immersion dans un fluide diélectrique
- Refroidissement par thermosiphon
- Refroidissement par boucle diphasique CPL et LHP.



**Figure (1.2) :** Principe de fonctionnement d'un caloduc [7]

## 1.2.5 Refroidissement par jets et spray

### a) Refroidissement par jets

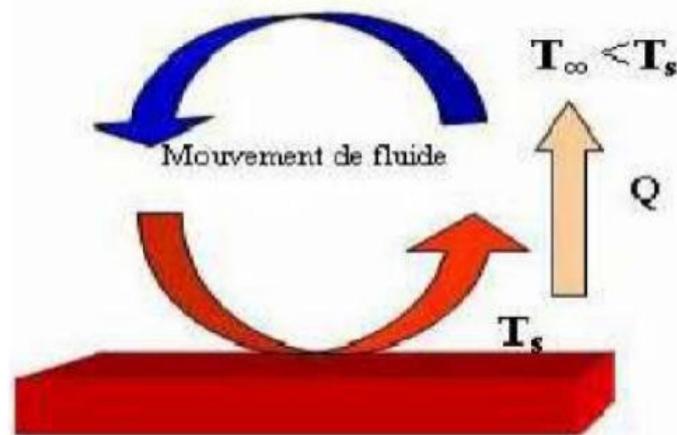
L'écoulement de jet appartient à la catégorie d'écoulement libre de cisaillement. Ce processus implique de nombreux processus naturels et de nombreuses applications, notamment, la propulsion aéronautique, propulsion spatiale, injection de carburant et le refroidissement des composants électroniques. Ce type d'évaporation a la particularité d'être extrêmement sensible à la condition aux limites liées au-dessus de l'évaporation (état et épaisseur de la turbulence, état et épaisseur de la couche limite, etc.) et à l'atmosphère environnante. [8]

### b) Refroidissement par spray

Parce qu'il dépend de nombreux facteurs, le système de refroidissement par pulvérisation est assez compliqué. Les facteurs suivants sont inclus : la surface de la gouttelette, sa vitesse, l'angle d'impact, sa densité, sa rugosité, le gaz Environnant, le flux thermique du buse et sa direction tous ces facteurs contribuent à déterminer le moment où la chaleur est transférée pendant le refroidissement.

## 1.3 La convection

La convection est le mécanisme le plus important de transfert de chaleur entre une surface solide un liquide ou un gaz.[9] La convection caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide (gaz ou liquide), dont les molécules sont en mouvement. La chaleur est transférée de manière beaucoup plus efficace que par la conduction thermique ou le rayonnement, qui sont les deux autres modes de transfert de chaleur. [10]

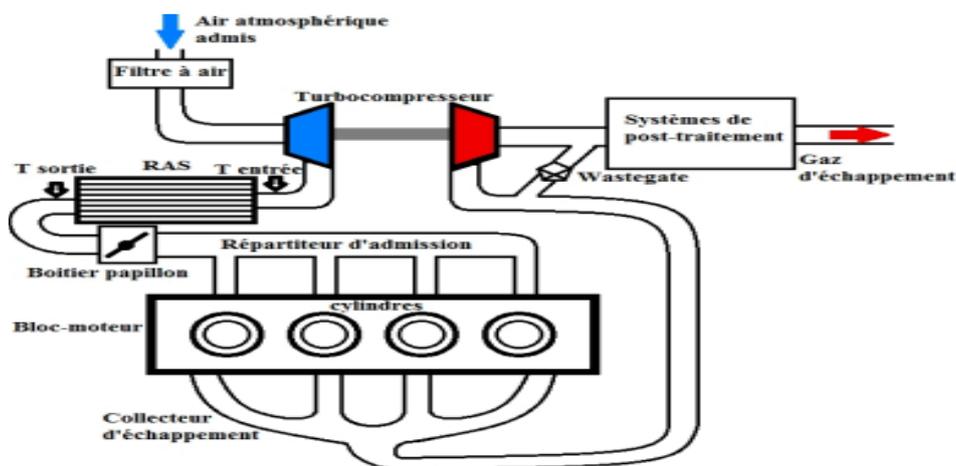


**Figure (1.3):** Schéma de transfert de chaleur par convection [10].

Dans le domaine de refroidissement des composants électronique, il existe deux types d'enlèvement de la chaleur par convection : refroidissements par convection naturelle et refroidissement par convection forcée

### 1.3.1 Convection forcée

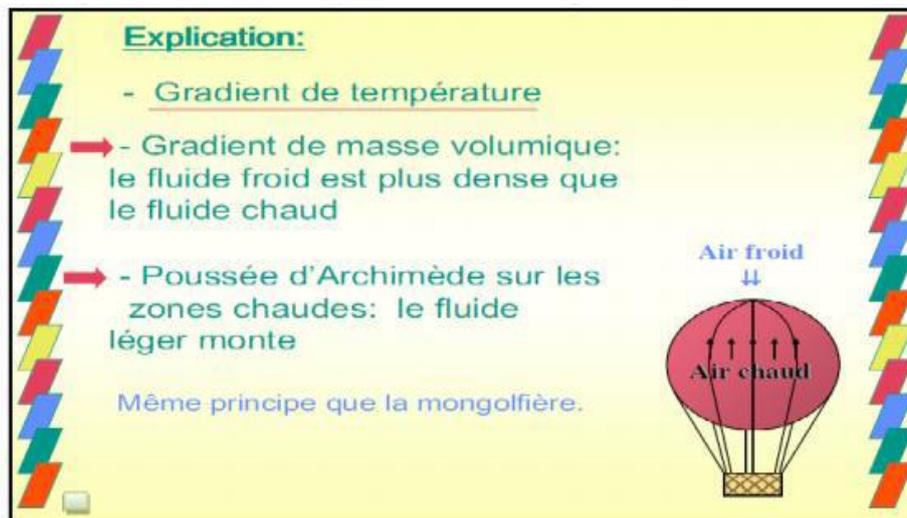
La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique (pompe, ventilateur, etc.) indépendant des phénomènes thermiques c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules de fluide.



**Figure (1.4) :** Schéma de la convection forcée.

### 1.3.2 La convection naturelle

En convection naturelle, les mouvements des particules de fluide ont pour origine les différences de masse volumique induites par un gradient de température imposé, en présence du champ de gravité.



**Figure (1.5) :** Convection naturelle

### 1.3.3 La 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 convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. [11]

## 1.4 Généralités sur les nano-fluides

### 1.4.1 Définition

Durant ces dernières années, plusieurs systèmes énergétiques ont été développés dans le domaine industriel produisant un flux de chaleur très élevé, là où les fluides de refroidissement conventionnels (eau, éthylène glycol et l'huile) ne sont pas efficaces. L'idée d'améliorer les propriétés thermo-physiques des fluides, est d'introduire des particules solides de très bonnes caractéristiques thermiques et de taille nanométrique au sein du fluide de base. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom "Nano-fluides". Ce terme a été introduit

par choix au niveau du laboratoire d'Argonne en U.S. American. 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspensions colloïdales. [12]

Les nano-fluides sont des solutions colloïdales composées de taille nanométrique (1 à 100 nm) (nanoparticules) en suspension, dans un liquide qui s'appelle un liquide de base. La liste des nanoparticules utilisées pour obtenir des nano-fluides est très large, on peut citer parmi eux : [13]

- **Les nanoparticules des Oxydes métalliques :**

L'oxyde d'aluminium,  $Al_2O_3$ , l'oxyde de cuivre,  $CuO$ , l'oxyde de silicium,  $SiO_2$ , l'oxyde de titane,  $TiO_2$ .

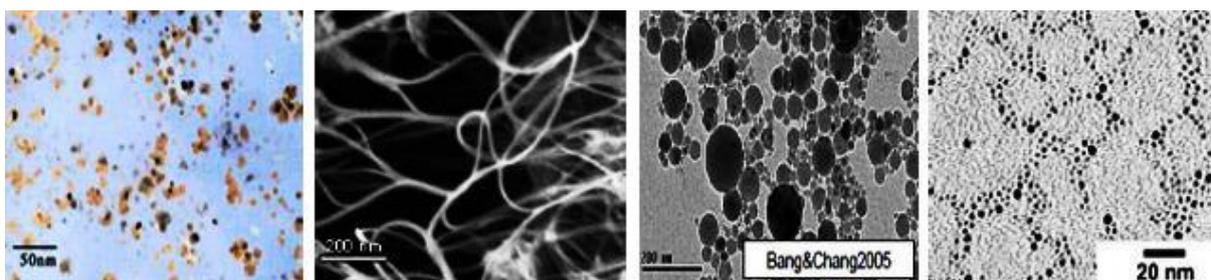
- **Les nanoparticules métalliques :**

L'aluminium,  $Al$ , le cuivre,  $Cu$ , l'argent,  $Ag$ , l'or,  $Au$ , la silicium,  $Si$ .

- **Les nanoparticules non métalliques :**

Les nanotubes de carbone, CNT, le diamant,  $C$ .

Le choix des liquides de base est primordial pour un nano-fluide, Il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'aggrégation, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de la nanoparticule.[14]



**Figure (1.6):** Nano-fluids vu au microscope électronique (éthylène glycol + cuivre à 0.5 %eau + alumina, eau +or à 2 nm) [14]

### 1.4.2 Préparation de nano-fluides

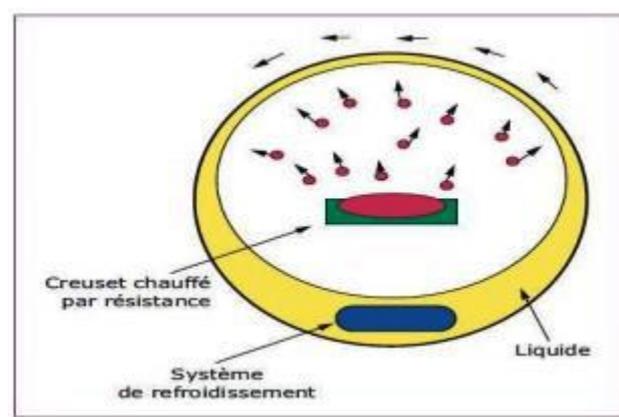
Les procédés de fabrication des nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories : [15]

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

Il existe deux méthodes principales pour produire des nano-fluides :

- La méthode en deux étapes consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrasons est souvent nécessaire afin de briser les agglomérats.
- La méthode en une seule étape consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base, elle n'est utilisable que pour certaines nano-fluides.

Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur



**Figure (1.7) :** Procédé de synthèse de nano-fluide en une seule étape [15]

### 1.4.3 Les applications des nano-fluides

Les différentes applications des nano-fluides sont présentées comme suit :

- Transport (gestion de refroidissement /véhicule moteur thermique).
- Refroidissement électronique, espace, refroidissement des systèmes nucléaires, l'échangeur de chaleur.
- Biomédecine.
- Le chauffage solaire de l'eau, réfrigérateur domestiques, forage, lubrifiants, stockage thermique, etc.

### ✓ **Les avantages des nano-fluides**

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominance du mouvement brownien des particules.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux boues conventionnelles, favorisant ainsi la minimisation du système.

### ✓ **Les inconvénients des nano-fluides**

- Stabilité des nanoparticules dispersion.
- Chute de pression accrue et la puissance de pompage.
- Viscosité supérieure, chaleur spécifique basse.
- Le coût élevé des nano-fluides.
- Difficultés dans le processus de production. [13]

## **1.5 Propriétés thermo-physiques des nanoparticules**

Les propriétés thermo-physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, l'expansion thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermo-physiques du nano-fluide obtenus (la nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique, la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu, etc.). De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées, lors de ces deux dernières décennies, en vue de mieux caractériser les propriétés physiques des nano-fluides.

### **1.5.1 La densité**

La densité du nano-fluide est une mesure de la masse des particules de nanoparticules suspendues dans un liquide.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \rho_s \quad (1.1)$$

### 1.5.2 La capacité calorifique

La capacité calorifique des nano-fluides est une mesure de leur capacité à stocker et à transférer la chaleur, elle dépend à la fois du liquide de base et de nanoparticules dispersées.

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (1.2)$$

### 1.5.3 Le coefficient d'expansion thermique

Le coefficient d'expansion thermique est la mesure de la variation de volume d'un nano-fluide en fonction de sa température.

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (1.3)$$

### 1.5.4 Viscosité dynamique

La viscosité de nano-fluide est la mesure de sa résistance à l'écoulement du mélange de nanoparticule et de liquide de base.

#### ✓ Version de Brinkman (1952)

La formule de Brinkman (1952) complète le modèle d'Einstein pour des concentrations volumétriques inférieures à 4%

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (1.4)$$

Il est à noter que cette relation décrit une évolution non linéaire de la viscosité dynamique avec la concentration volumique mais ignore l'impact des particules.

### 1.5.5 Conductivité thermique des nano-fluides

Selon Maxwell, la conductivité thermique est calculée en prenant en compte les conductivités thermiques du liquide de base et de nanoparticules ainsi que leur fraction volumique.

#### ✓ Modèles de type Maxwell

Ces modèles s'appliquent aux environnements où l'éjection de particules est régulière.

La formule de Maxwell est donnée comme suit :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\phi} \quad (1.5)$$

$k_{nf}, k_f, k_s$  Désignent, respectivement, les conductivités thermiques des nano-fluides, des fluides de base et des particules solides. [16]

## 1.6 Synthèses Bibliographique :

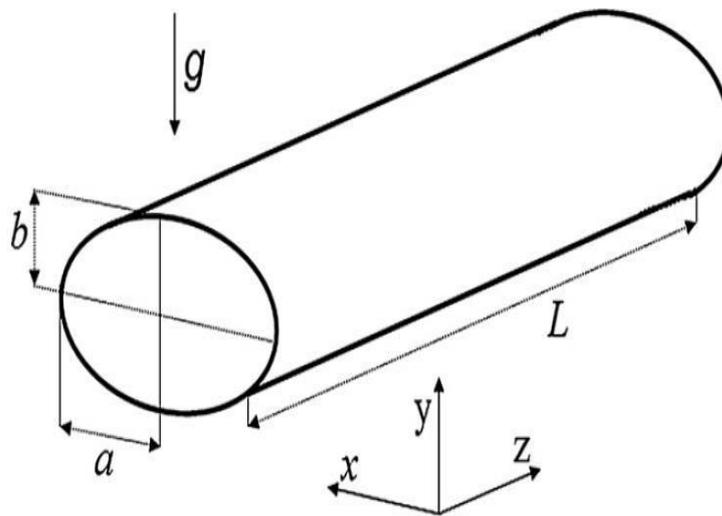
Le refroidissement des composants électroniques par convection (naturelle, forcée ou mixte) est l'un des facteurs clés permettant de préserver le bon fonctionnement et la durée de vie des équipements électroniques. Bien que la technologie de l'industrie électronique ait progressé grâce à l'alignement des composants et à l'amélioration de leurs propriétés, le refroidissement reste l'un des principaux problèmes rencontrés. Les chercheurs et les développeurs ont mené un grand nombre d'études numériques et expérimentales afin de trouver les meilleures méthodes pour refroidir efficacement les composants électroniques. Parmi ces études, on peut citer les suivantes :

**Adel Hamouche, Rachide Bessaih [17]** ce travail étudié numériquement le refroidissement par convection mixte des composants électroniques montés dans un canal rectangulaire horizontal. La méthode des volumes finis et l'algorithme simple ont été utilisées pour résoudre les équations de l'écoulement en régime stationnaire les résultats obtenus montrent que pour  $Pr=0.71$ ,  $0 \leq Ri \leq 40$  et  $Re=20$ , l'effet de  $Ri$ , du blocage partiel, des dimensions et la position de l'élément de blocage, ont des effets considérables sur l'amélioration du transfert de chaleur à l'intérieur du canal.

**D.Menacer, M.Khammar [18]** Ont étudié le refroidissement des cartes électroniques en s'intéressant à la convection mixte dans une cavité. Leur recherche vise à explorer la structure de l'évaporation d'un fluide non-newtonien contenu dans une cavité 2D remplie d'air, ou les panneaux latéraux isolés thermiquement ont positionné une source de chaleur au centre du surface inférieure et l'ont soumise à un flux de chaleur constant. Le déplacement vers le côté gauche est supérieur avec une vitesse constante  $U_0$ , tandis que la partie supérieure est maintenue à une vitesse de température froide. Les résultats ont montré un impact significatif du nombre Richardson et de la surface en mouvement sur la structure de l'écoulement dans l'enclosure.

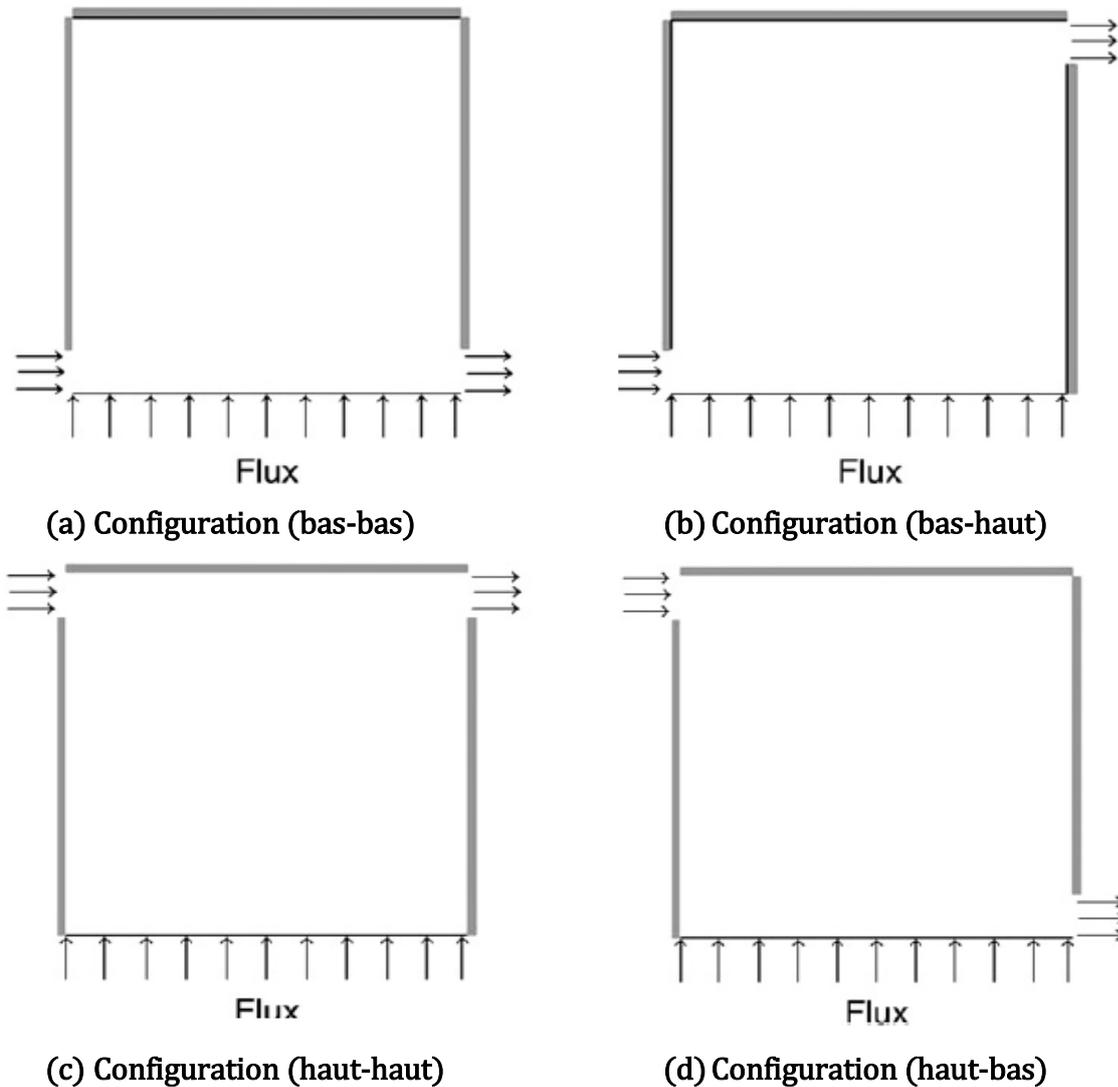
**Shariat et al [19]** ont analysé les caractéristiques de l'écoulement et du transfert thermique en convection mixte laminaire d'un nano-fluide ( $Al_2O_3$ -eau) dans les

conduites elliptiques avec un flux de chaleur constant. Des mouvements browniens de nanoparticules ont été considérés pour déterminer la conductivité thermique et la viscosité dynamique du nano-fluide. Les résultats révèlent que pour un nombre de Reynolds ( $Re$ ) et un nombre de Richardson ( $Ri$ ) donnés, l'augmentation de la fraction volumique solide des nanoparticules augmente le nombre de Nusselt ( $Nu$ ), tandis que le coefficient de frottement diminue. L'augmentation de rapport d'aspect ( $AR=B/a$ ) dans les tubes elliptiques réduit le coefficient de frottement local, alors qu'il n'a aucun effet spécifique sur le nombre total de Nusselt.



**Figure (1.8):** géométrie du problème et système de coordonnées pour un conduit elliptique, **Shariat et al [19]**.

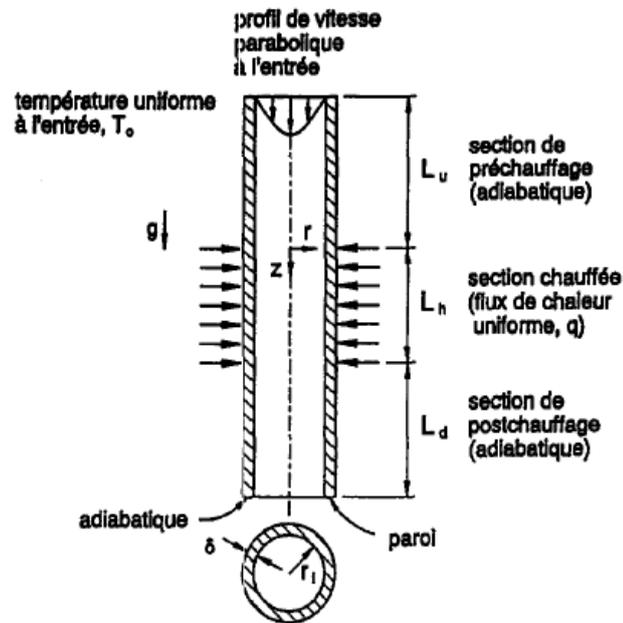
**Mahmoudi et Al [20]** ont présenté une analyse numérique sur l'effet des emplacements d'entrée et de sortie sur le refroidissement par convection mixte dans une enceinte remplie d'un nano-fluide (Cu-eau). L'effet de la convection naturelle est obtenu par le chauffage à partir de la source de chaleur à flux constant sur la paroi du fond et un refroidissement à partir de débit injecté. L'étude a été réalisée pour un nombre de Reynolds varie entre  $50 \leq Re \leq 1000$ , avec des nombres de Richardson  $0 \leq Ri \leq 10$ , et pour la fraction volumique solide du nano-fluide  $0 \leq \phi \leq 0.01$ . Les auteurs ont noté que la présence de la nanoparticule est plus efficace dans la configuration (Haut-Bas), cependant l'augmentation de la concentration de la nanoparticule a la moins effet dans la configuration (Haut-Haut).



**Figure(1.9)** :Configuration schématique des problèmes étudiés par **Mahmoudi et Al [20]**.

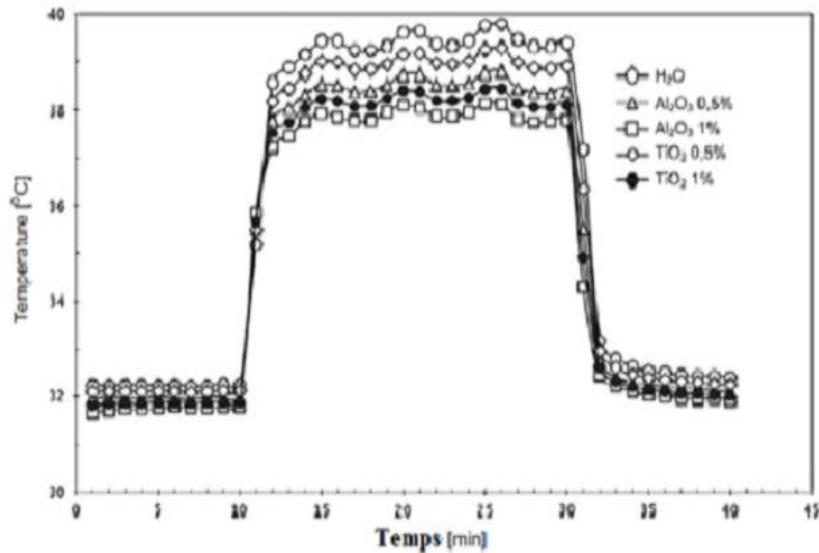
**G.LAPLANTE et M.A.BERNIER [21]** ont présenté les résultats d'une étude numérique sur la convection laminaire mixte dans le cas d'un écoulement descendant verticalement dans un conduit circulaire où la conduction de paroi est importante. Les résultats sont présentés pour l'eau ( $Pr = 5$ ) et deux valeurs de rapport  $Gr_q/Re^2$  (50 et 5000). Cette étude montre que lorsque les valeurs de  $K$  (rapport des conductivités thermiques solide-fluide) et/ou  $\Delta$  (rapport entre l'épaisseur et le diamètre de tube) sont élevés, une quantité importante de chaleur fournie à la partie chauffée à l'extérieur et à l'intérieur de celle-ci. Dans certains cas, les effets de chauffage peuvent être ressentis jusqu'à 25 diamètres de la section chauffée. Les résultats montrent également qu'avec un rapport  $Gr/Re^2 = 5000$ , une cellule de recirculation s'étend au-dessus de la section coupée. Cette cellule fonctionne comme un

isolateur entre le fluide et la conduite, de sorte que la chaleur est transférée dans la conduite juste avant le début de la cellule avant d'atteindre le fluide.



**Figure(1.10)** : Représentation schématique du cas de convection mixte étudié[21].

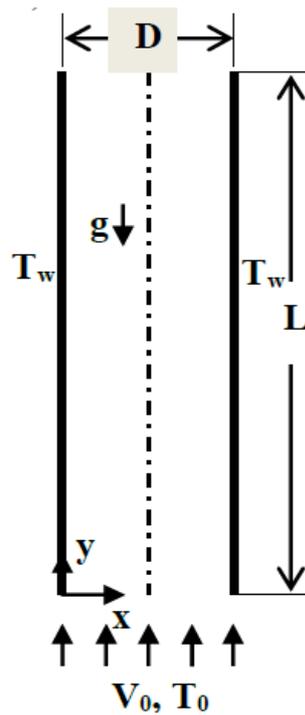
En 2011 une étude était menée par **Putra et Al [22]** sur l'efficacité des nano-fluides par rapport à l'eau pure, dans les blocs liquides utilisés dans le refroidissement des composants électroniques, différents nano-fluides à différentes concentrations ont été analysés. Une comparaison portant sur les résultats obtenus de l'étude a montré une amélioration importante dans les performances de refroidissements pour tous les nano-fluides utilisés en les comparant aux fluides conventionnelles. (La figure suivante montre le taux d'évacuation de chaleur de CPU de l'ordinateur par les nano-fluides à différentes concentrations et par l'eau pure).



**Figure (1.11):** effet de la concentration volumique de nano-fluides sur la température du processeur du PC à vide et à pleine charge[22].

**E.Belhamadi et R.Bessaih [23]** ont étudié numériquement la convection mixte laminaire dans un canal vertical remplie du nano-fluide Cu-eau. Les parois du canal sont maintenues à une température uniforme et relativement élevée. Un courant ascendant de nano-fluide Cu-eau pénètre dans le canal à une température constante relativement faible, et une vitesse uniforme. Les résultats obtenus (par le logiciel Ansys-Fluent) sont validés avec des données trouvées dans la littérature. Les résultats sont présentés sous forme de lignes de courant, des isothermes, du nombre de Nusselt local et moyen pour différentes valeurs des nombres de Reynolds  $Re$  et du Grashof  $Gr$ , et de la fraction volumique solide de nanoparticules  $\phi$ .

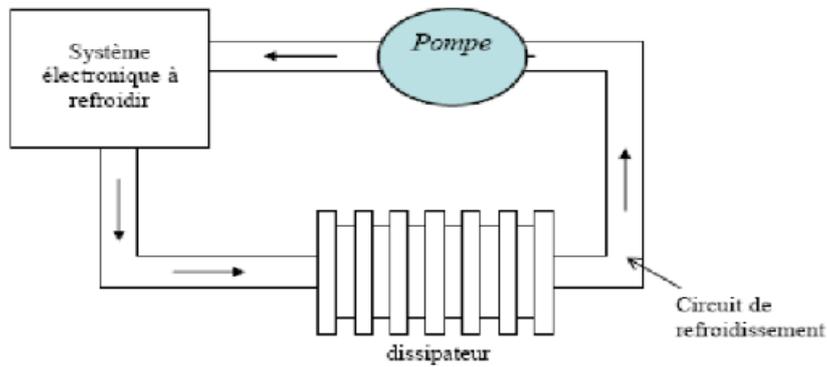
Les résultats montrent que les paramètres précédents ont des effets considérables sur les champs d'écoulement et thermiques. Il a été constaté que l'augmentation de  $Re$ ,  $Gr$  et  $\phi$  améliore le transfert de chaleur.



**Figure (1.12):** Le schéma du modèle physique et les conditions aux limites[23].

**Estelle Piquer et Al [24]** ont étudié la convection mixte en fluide binaire avec effet Soret en canal rectangulaire chauffé par le bas. Ont intéressé plus particulièrement à la transition vers les rouleaux transversaux 2D qui apparaissent pour de faibles nombres de Reynolds et Rayleigh. L'analyse de stabilité linéaire de l'écoulement de Poiseuille, stratifié linéairement en température et concentration, montre l'influence de facteur de séparation sur le nombre de Rayleigh critique de la transition vers les rouleaux transversaux. A faible nombre de Reynolds, ils ont mis en évidence la présence de rouleaux se propageant dans le même sens ou en sens inverse de l'écoulement moyen. Ils ont montré également que dans ces conditions, la fréquence de propagation des rouleaux correspond à la somme des fréquences obtenues en convection mixte thermique et en convection naturelle thermosolutale.

**M.Tawk et Al [25]** ont développé une étude sur le refroidissement des composants électronique de puissance avec un fluide métallique (alliage de Gallium). Ils ont présenté les systèmes de pompage existants ainsi que les avantages et les inconvénients d'utiliser un fluide métallique. Ensuite ils ont présenté l'étude et la réalisation expérimentale d'une boucle de teste. Les résultats obtenus expérimentalement sont comparés à ceux obtenus par simulation numérique de refroidisseur (logiciel FloTHERM). Enfin ils ont présenté la potentialité des boucles de refroidissement par métal liquide.



**Figure (1.13) :** principe d'un système de refroidissement avec fluide caloporteur intermédiaire[25].

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a généralement parlé sur les différents types de composantes électroniques, les différents systèmes de refroidissement et les nano-fluides, leur préparation, applications et avantages et puis leurs propriétés thermo-physiques et leur intérêt dans ce transfert thermique afin de refroidir ces composantes. Nous avons soutenu nos recherches avec une synthèse bibliographique de différentes études concernant le même cas de notre étude.

# **CHAPITRE 2**

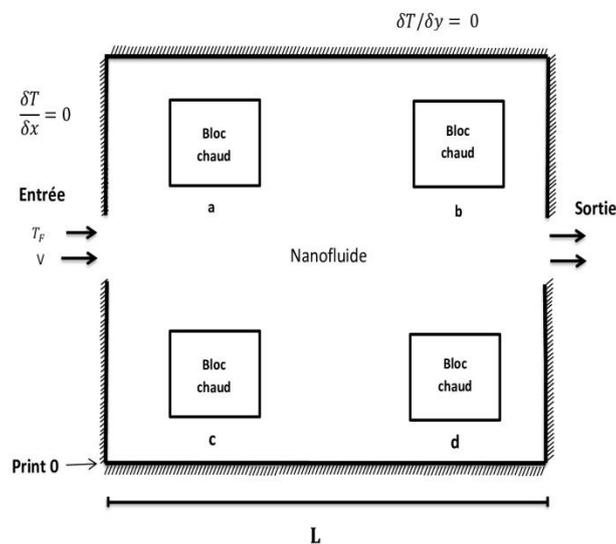
## **Modélisation mathématique**

## CHAPITRE 2 : Modélisation mathématique

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la configuration considérée dans cette étude. On commence par la description de la géométrie et la présentation de système d'équations gouvernantes, les conditions aux limites ainsi que la transformation des équations gouvernantes aux équations adimensionnelles.

### 2.2 Géométrie et modèle physique



**Figure (2.1) :** Géométrie du problème considéré

La géométrie du problème considéré est schématisée sur la figure (2.1) ; il s'agit d'une cavité carrée de longueur ( $L$ ) remplie d'un nano-fluide  $Al_2O_3$ , dont toutes les parois sont supposées adiabatiques, l'entrée est soumise à une température froide  $T_f$  (l'entrée et la sortie sont sur les deux parois verticales de la cavité). Simulant quatre blocs (a, b, c, d) supposés à l'état chaud.

L'air à l'entrée s'écoule avec une vitesse  $U_0$  et une température  $T_f$  afin de refroidir les blocs électroniques.

## 2.3 Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices servent à éviter un alourdissement inutile du problème d'une part et d'autre part, elles rendent l'application des conditions aux limites plus simples, ces hypothèses sont :

- Le fluide est Newtonien, incompressible et visqueux.
- Écoulement bidimensionnel (suivant les coordonnées cartésiennes  $x$  et  $y$ ).
- Les propriétés physiques du fluide sont constantes.
- L'écoulement est stationnaire.
- Milieu continu.
- Régime laminaire.
- La dissipation visqueuse est négligeable ( $\mu\Phi=0$ ), pas de sources de chaleur ( $q=0$ ).

L'approximation de Boussinesq est valide, elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables au niveau de tous les termes des équations de quantité de mouvement ( $\rho=\rho_0$ ), sauf au niveau de terme de gravité. La variation de  $\rho$  en fonction de température est donnée comme suit :

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (2.1)$$

$T_0$ : Température de référence.

$\beta$ : Le coefficient d'expansion thermique.

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)$$

$\rho_0$ : Masse volumique du fluide à  $T_0$ .

## 2.4 Formulation mathématique

### ✓ Equations gouvernantes dimensionnelles

Les équations régissant l'écoulement sont les équations de continuité, de Navier Stokes et d'énergie, qui expriment la conservation de masse, de quantité de mouvement et de l'énergie.

### ✓ Equation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot V) = 0 \quad (2.2)$$

Ou  $V$  : c'est le vecteur de vitesse.

Après la simplification l'équation devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

### ✓ Equation de quantité de mouvement (Navier Stokes)

Les équations de conservation de la quantité de mouvement sont données par les équations de Navier stokes ;

Suivant  $x$  :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.2)$$

Suivant  $y$  :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} g(T - T_0) \quad (5.2)$$

### ✓ Équation d'énergie

L'équation de l'énergie est obtenue par l'application de premier principe de la thermodynamique ;

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k_{nf}}{\rho c p_{nf}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6.2)$$

### ✓ Conditions aux limites

- À  $x=0$   $0 < y < L \rightarrow u = U_0, v = 0, T = T_f \rightarrow$  à l'entrée
- À  $x=L$   $0 < y < L \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \rightarrow$  à la sortie
- À  $y=0$  et  $y=L, 0 < x < L \rightarrow u=0, v=0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \rightarrow$  paroi adiabatique

## 2.4.1 Equations adimensionnels

❖ variables caractéristiques adimensionnels

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{u}{U_0}, \quad V = \frac{v}{U_0}$$

$$P^* = \frac{p - p_0}{\rho_{nf} U_0^2}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_s - T_0},$$

$$Re = \frac{\rho_f U_0 L}{\mu_f}, \quad Ri = \frac{g \beta_f \Delta T L}{U_0^2} = \frac{Gr}{Re^2}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Gr = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\mu_f^2}$$

✓ **Equation de continuité adimensionnelle**

$$\left( \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = 0 \quad (7.2)$$

✓ **Equation de quantité de mouvement adimensionnelle**

$$\left( U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\rho_f \mu_{nf}}{\rho_{nf} \mu_f} \frac{1}{Re} \left[ \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \right] \quad (8.2)$$

$$\left( U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{1}{Re} \left[ \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \right] + \frac{\rho_{nf} \beta_{nf}}{\rho_f \beta_f} Pr \frac{Gr}{Re^2} \theta \quad (9.2)$$

✓ **Equation d'énergie adimensionnelle**

$$\left( U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] \quad (10.2)$$

## 2.5 Méthodes numériques

### 2.5.1 Généralités sur les méthodes numériques

Les méthodes numériques sont des techniques mathématiques utilisées pour résoudre des problèmes numériques. Elles sont largement utilisées dans les domaines de l'ingénierie, de la physique, de la finance, de l'informatique et de nombreux autres domaines où il est nécessaire de résoudre des problèmes mathématiques complexes.

Il existe de nombreuses méthodes numériques différentes pour résoudre des problèmes mathématiques, notamment :

- Méthodes de résolution d'équations : tels que les méthodes de Newton-Raphson et de dichotomie.
- Méthodes d'optimisation : sont utilisées pour trouver la valeur maximale ou minimale d'une fonction donnée tels que la méthodes du gradient et la méthode de la recherche tabou.
- Méthodes de résolution d'équation différentielles : ces méthodes sont utilisées pour résoudre les équations différentielles qui sont utilisées pour décrire les phénomènes dynamiques dans de nombreux domaines. Les exemples incluent la méthodes d'Euler et la méthodes de Runge-Kutta .

Les méthodes numériques sont essentiellement utilisées pour résoudre de nombreux problèmes complexes dans divers domaines, sont souvent utilisées en conjonction avec des logiciels de calcul scientifique pour automatiser les calculs et améliorer l'efficacité de processus de résolution de problèmes.

### 2.5.2 Choix de la méthode numérique (méthode des volumes finis)

La méthode des volumes finis est une méthode numérique utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles qui modélisent des phénomènes physiques ou naturels tels que la convection, la diffusion, la réaction chimique, etc. Cette méthode a plusieurs avantages qui la rendent attrayante pour les ingénieurs et les scientifiques.

Voici quelques raisons pour lesquelles on pourrait choisir la méthode des volumes finis :

**Conservation** : la méthode des volumes finis est basée sur le principe de conservation, ce qui signifie que les quantités physiques comme la masse, l'énergie et la quantité de mouvement sont conservées dans chaque volume de contrôle. Cela permet de garantir une solution numérique précise et cohérente.

**Géométrie arbitraire** : la méthode des volumes finis peut être utilisée pour résoudre des problèmes dans des géométries arbitraires, ce qui est souvent le cas en ingénierie et en science. Elle permet également de prendre en compte les variations spatiales de la géométrie, ce qui est important pour de nombreux problèmes physiques.

**Flexibilité** : la méthode des volumes finis peut être utilisée avec différents types de maillages, y compris des maillages structurés et non structurés. Cela permet de choisir le type de maillage qui convient le mieux à la géométrie et à la complexité du problème.

**Adaptabilité :** la méthode peut être adaptée à différentes conditions aux limites et à différentes équations aux dérivées partielles. Elle peut également être utilisée pour résoudre des problèmes à une, deux ou trois dimensions.

**Stabilité numérique :** la méthode des volumes finis est une méthode numérique stable qui permet de résoudre des problèmes en mécanique des fluides sans risque d'instabilité numérique.

En résumé, la méthode des volumes finis est un outil puissant pour la résolution numérique de problèmes en ingénierie et en science. Elle est choisie pour sa précision, sa flexibilité et son adaptabilité aux différentes conditions et équations.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a défini le problème physique, représenté l'équation gouvernantes sous leurs formes dimensionnelles et adimensionnelles, avec les conditions aux limites appropriées. Les équations trouvées sont simples à résoudre numériquement en appliquerons la méthode des volumes finis, ce qui nous permettra d'analyser les changements de divers paramètres du problème.

# **CHAPITRE 3**

## **Résultats et discussions**

## CHAPITRE 3 : Résultats et discussions

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus à partir de la simulation numérique de la convection mixte dans une cavité carré mené de quatre blocs, pour cela une validation du code numérique a été effectué par rapport aux travaux de références, ainsi qu'une examinations de l'effet de la variations de certains paramètres (fraction volumique, nombre de Reynolds, nombre de Grashof ) sur les caractéristiques de transfert de chaleur.

Nous présentons dans le tableau suivant des propriétés thermo-physiques du fluide de base (eau) et de nanoparticules ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) :

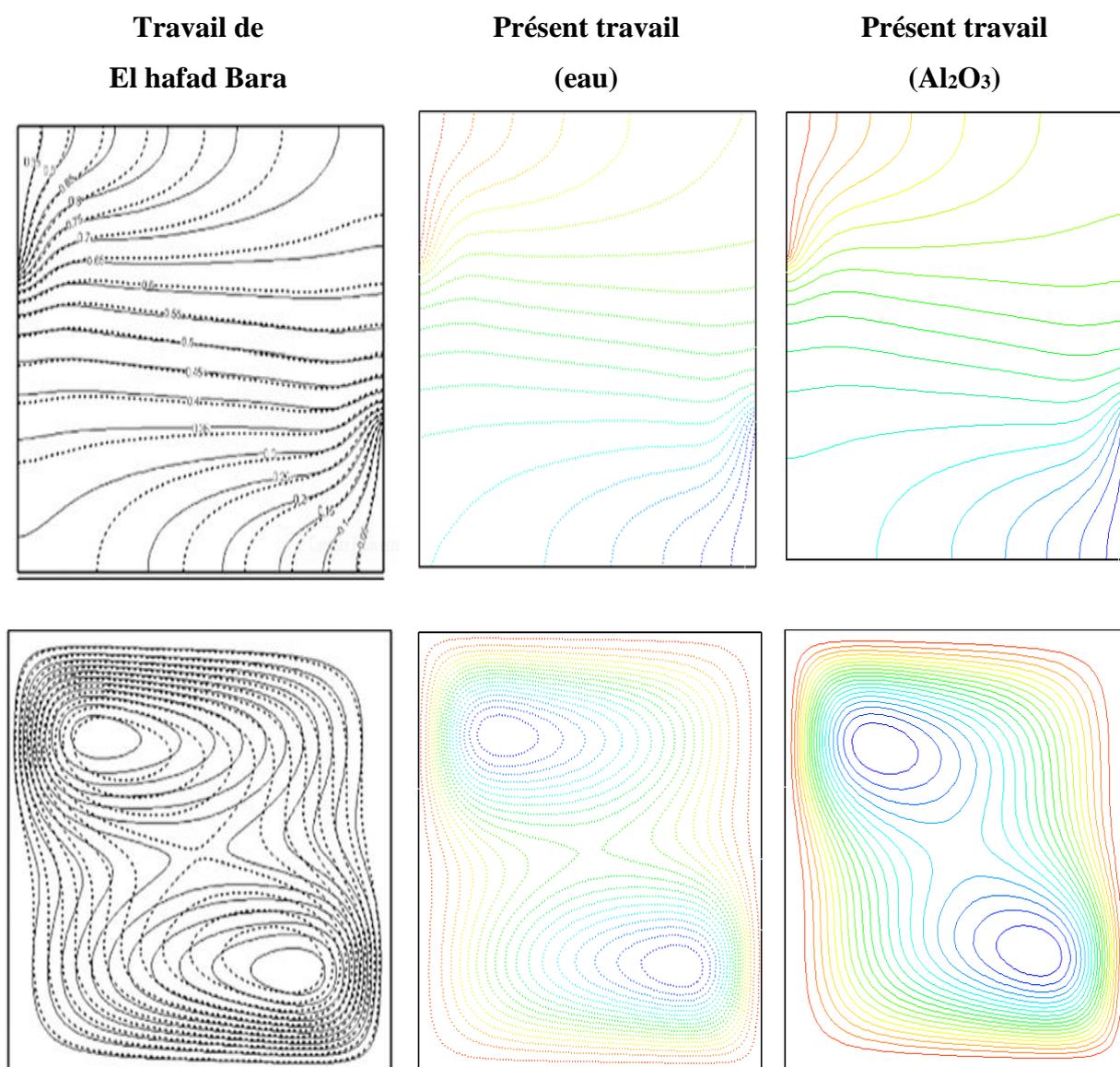
	<b>Eau</b>	<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>
<b><math>\rho</math> (kg /m<sup>3</sup>)</b>	997.1	3970
<b><math>C_p</math> (J/kg.K)</b>	4179	765
<b><math>k</math> (W/m.K)</b>	0.613	0.0257
<b><math>\beta</math> (K<sup>-1</sup>)</b>	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$0.85 \cdot 10^{-5}$

**Tableau 3.1 :** Propriétés thermo-physiques du fluide de base et de la nanoparticule [25]

### 3.2 Validation

Pour vérifier l'exactitude des résultats numériques obtenus dans le présent travail, on a validé le code de **El hafad Bara et al [26]** qui ont étudié les paramètres de la convection naturelle de nano-fluides dans une cavité carré de longueur (H) remplie d'un mélange homogènes d'eau et de nanoparticules  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les résultats validés sont obtenus pour l'eau en tant que fluide pur  $Pr= 6.2$  et la nanoparticule  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Les lignes de courant et isothermes de l'eau pur et la nanoparticule sont pour  $\varphi = 0.06$  et  $Ra= 10^5$ . D'après la figure (3.1), nos résultats concordent à souhait avec les résultats correspondants, ce qui permet de valider notre code de calcul et donner plus de crédibilité à nos résultats.

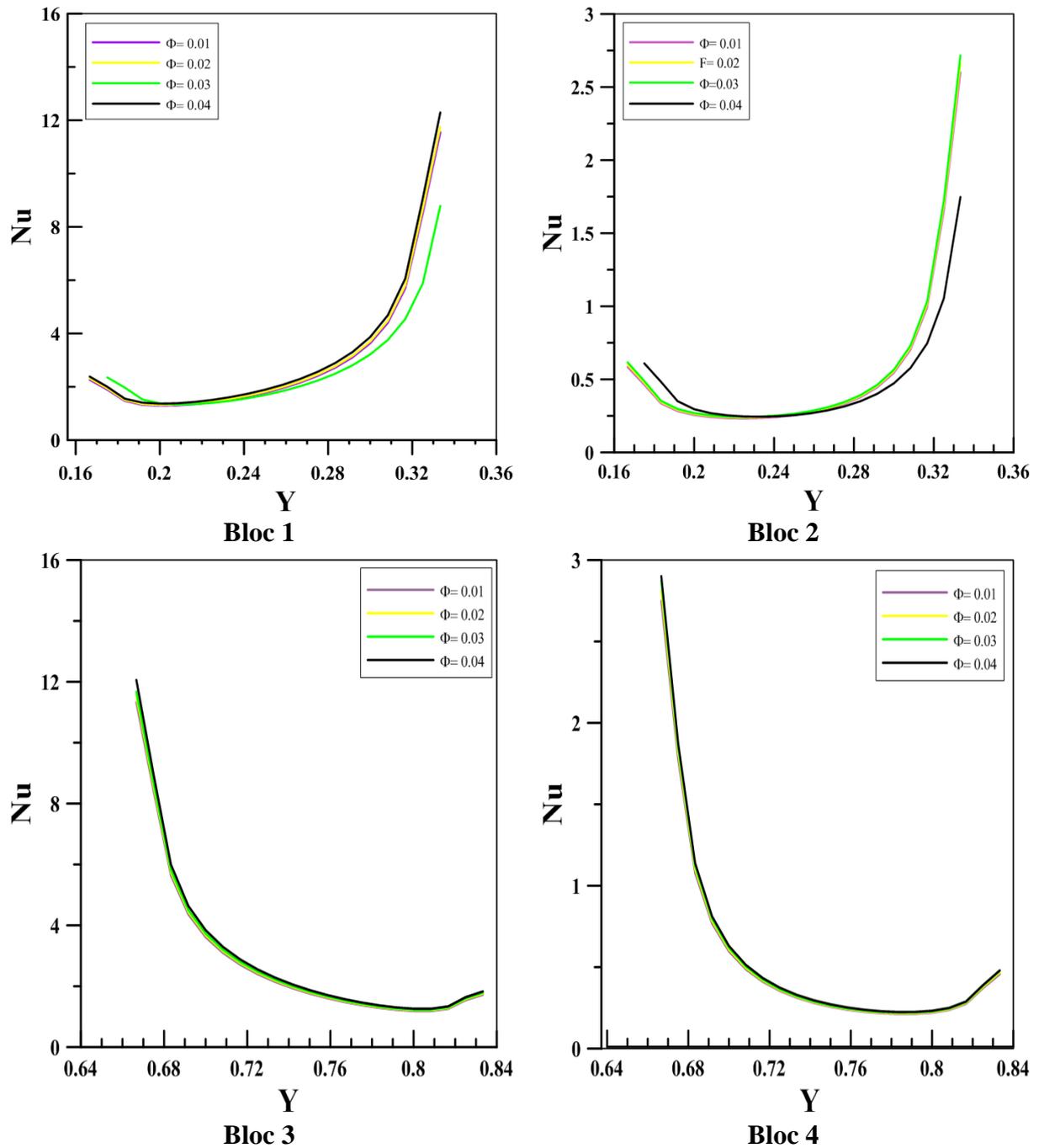


**Figure (3.1) :** Comparaison des lignes de courants et isothermes entre nos résultats et ceux de **El hafad Bara** pour  $Ra= 10^5$  et  $\varphi = 0,06$ .

### 3.3 Résultats

#### 3.3.1 Effet de la fraction volumique et du nombre de Reynolds et Grashof

##### a) Profil du nombre de Nusselt

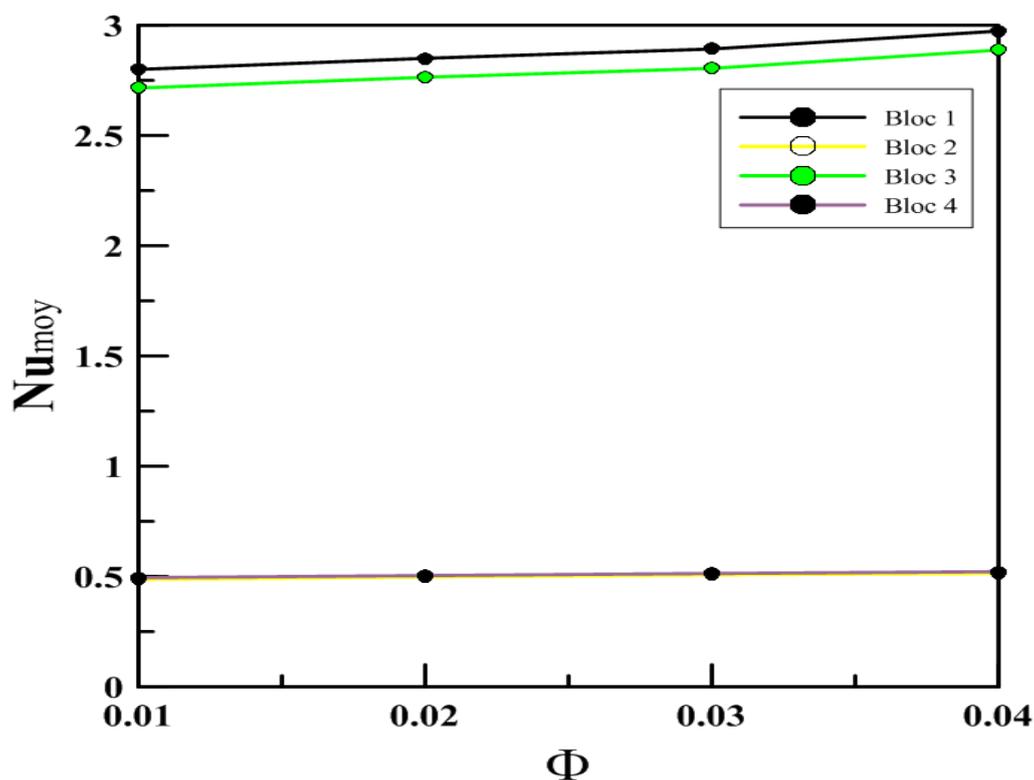


**Figure (3.2) :** Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différentes fractions volumiques ( $Re=10$  et  $Gr = 10^3$ )

La figure (3.2) représente le profil de nombre de Nusselt des quatre blocs tout au long de Y, pour différentes fractions volumiques à  $Re=10$  et  $Gr=10^3$ .

Le profil de Nu augmente dans les blocs 1 et 2, et diminue dans les blocs 3 et 4 à mesure d'augmenter la valeur de la fraction volumique, tout en remarquant que cette augmentation a un effet inversé sur les blocs 3 et 4 par rapport aux autres blocs. Cette augmentation peut intensifier les effets de convection mixte et bien améliorer le transfert de chaleur.

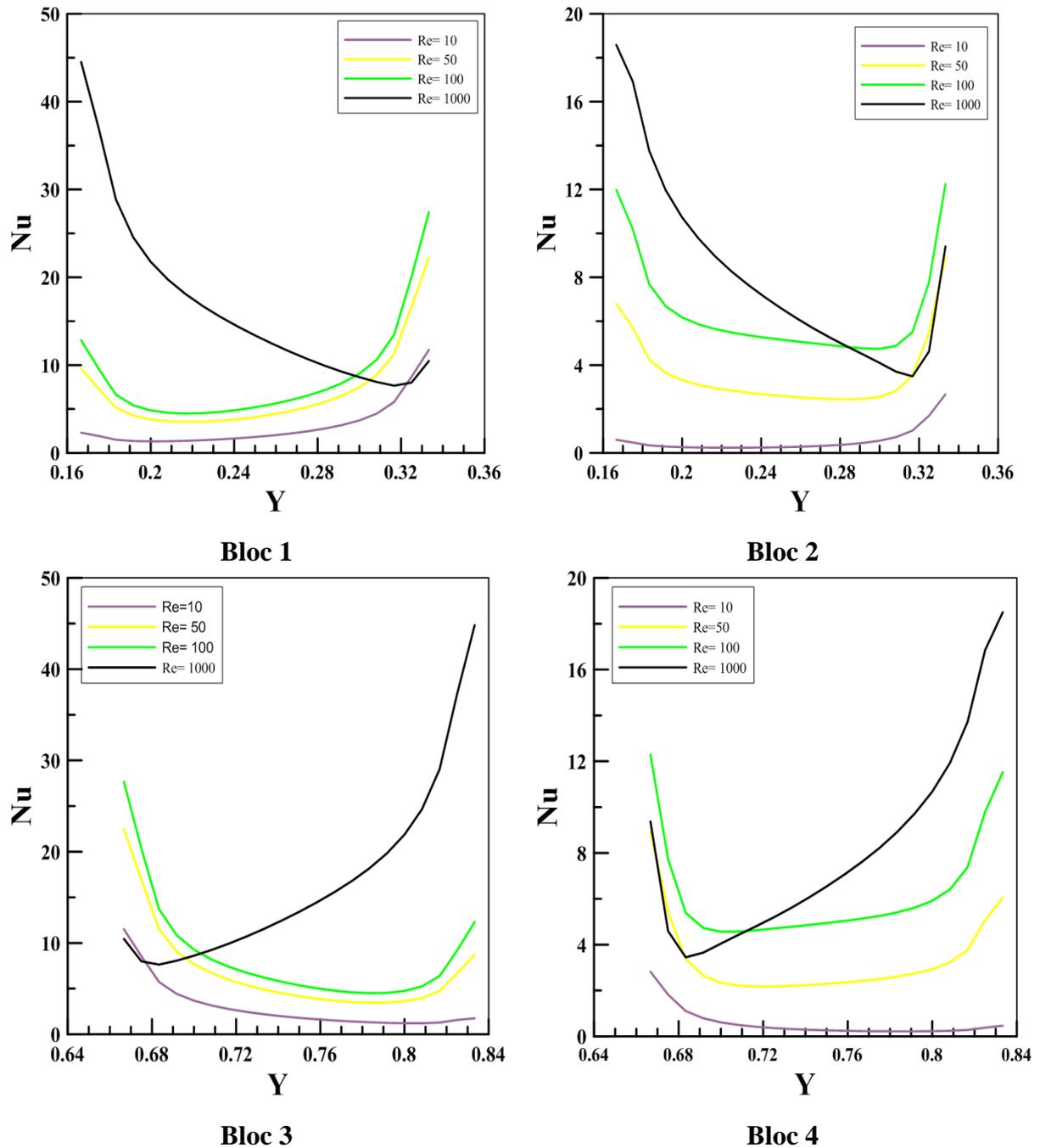
La présence de blocs chauds peut créer des gradients de concentration de nanoparticules, ce qui peut modifier les propriétés thermiques locales du fluide et donc le transfert de chaleur. Cela peut entraîner des variations du profil de nombre de Nusselt dans différentes régions de la cavité.



**Figure (3.3) :** Profil de Nusselt moyen en fonction de fraction volumique ( $Re=10$ ,  $Gr=10^3$ )

La variation du profil de **Nu moyen** en fonction de  $\Phi$  ; tout en fixant le nombre de Reynolds  $Re=10$  et le nombre de Grashof  $Gr=10^3$ , est illustré sur la figure (3.2).

A partir de la figure, nous observons que le profil de Nu augmente, avec l'augmentation des fractions volumique, ce qui est conséquence que la fraction volumique sert à améliorer la conductivité thermique des nanoparticules, et que les blocs 1 et 3 sont les mieux refroidis par rapport aux autres blocs (2 et 4) en raison de sa proximité avec l'entrée.



**Figure (3.4) :** Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différents nombres de Reynolds ( $\phi=0.02$ ,  $Gr= 10^3$ )

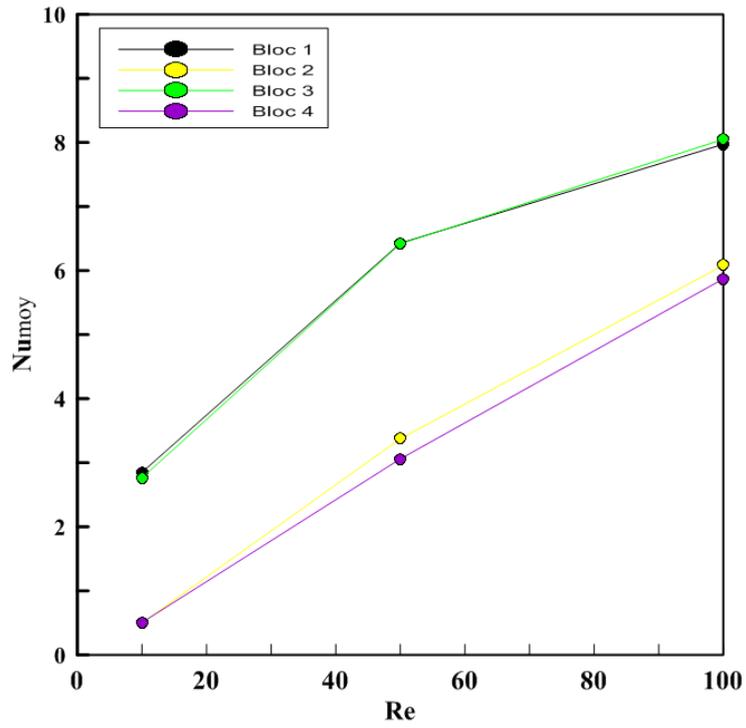
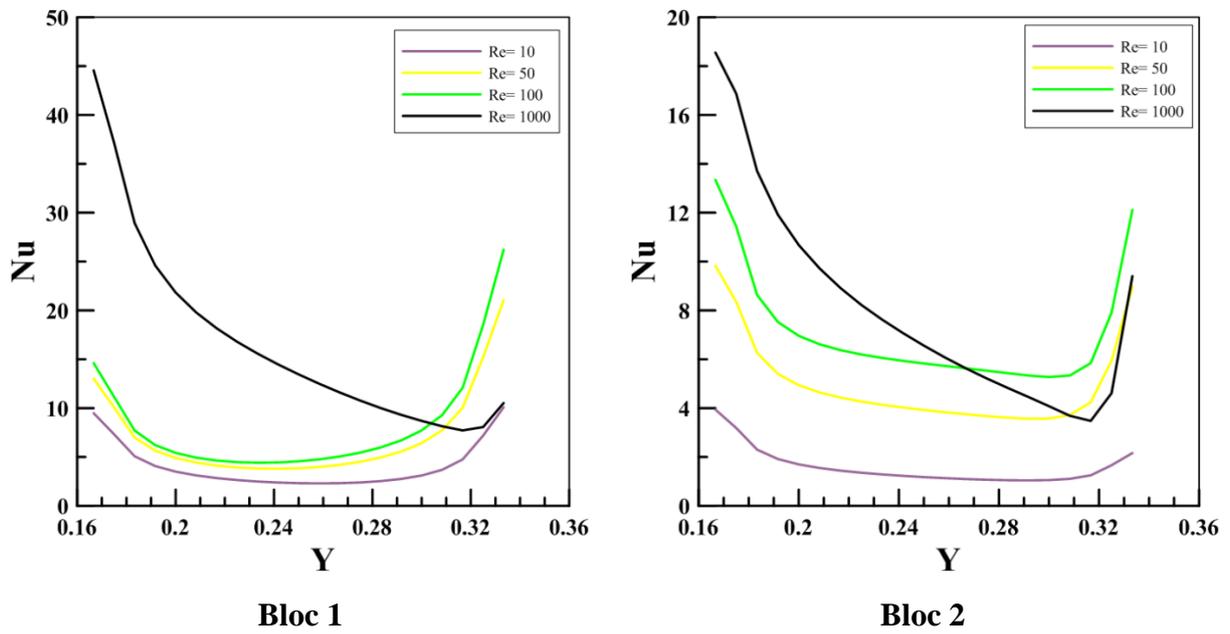


Figure (3.5) : Profil de nombre de Nusselt moyen en fonction de Re pour ( $\phi=0.02$ ,  $Gr=10^3$ )



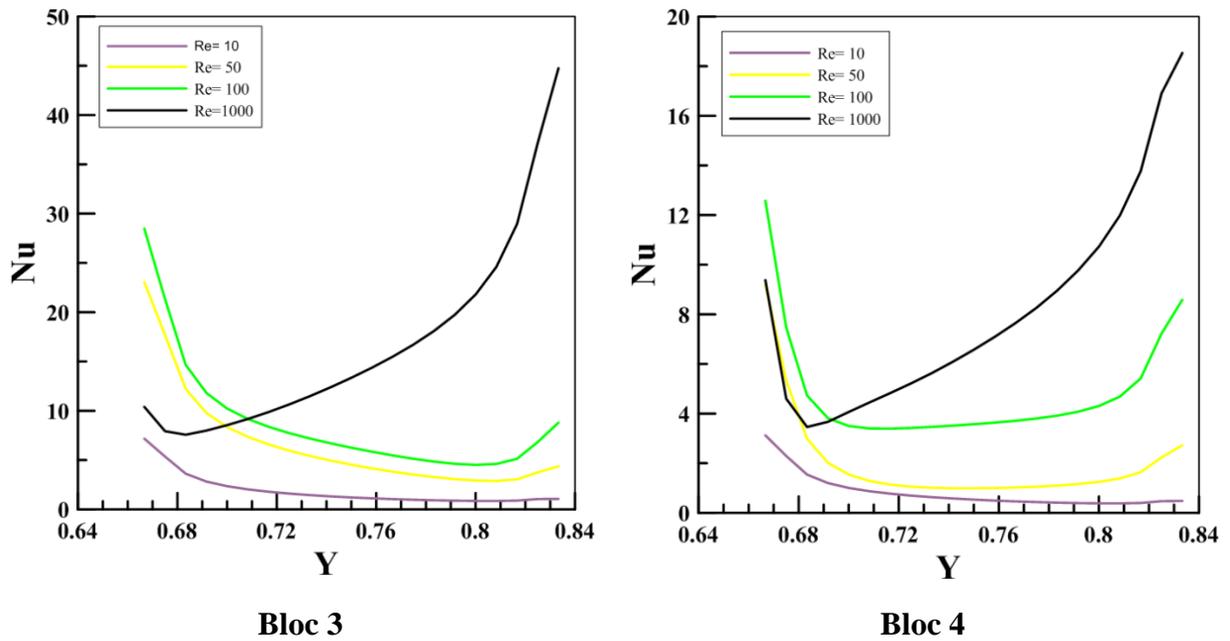


Figure (3.6) : Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différents nombres de Reynolds ( $\phi=0.02$ ,  $Gr= 10^4$ )

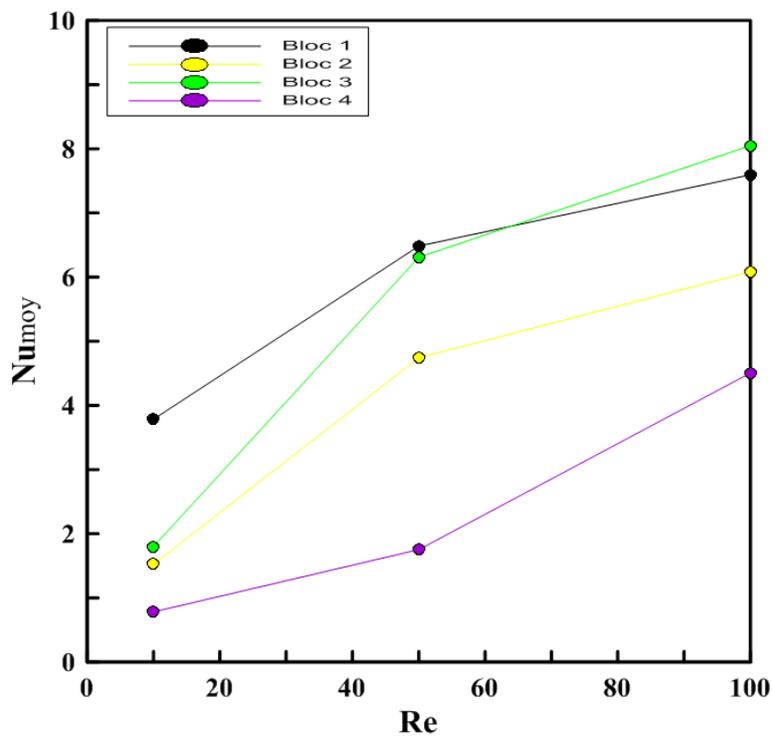
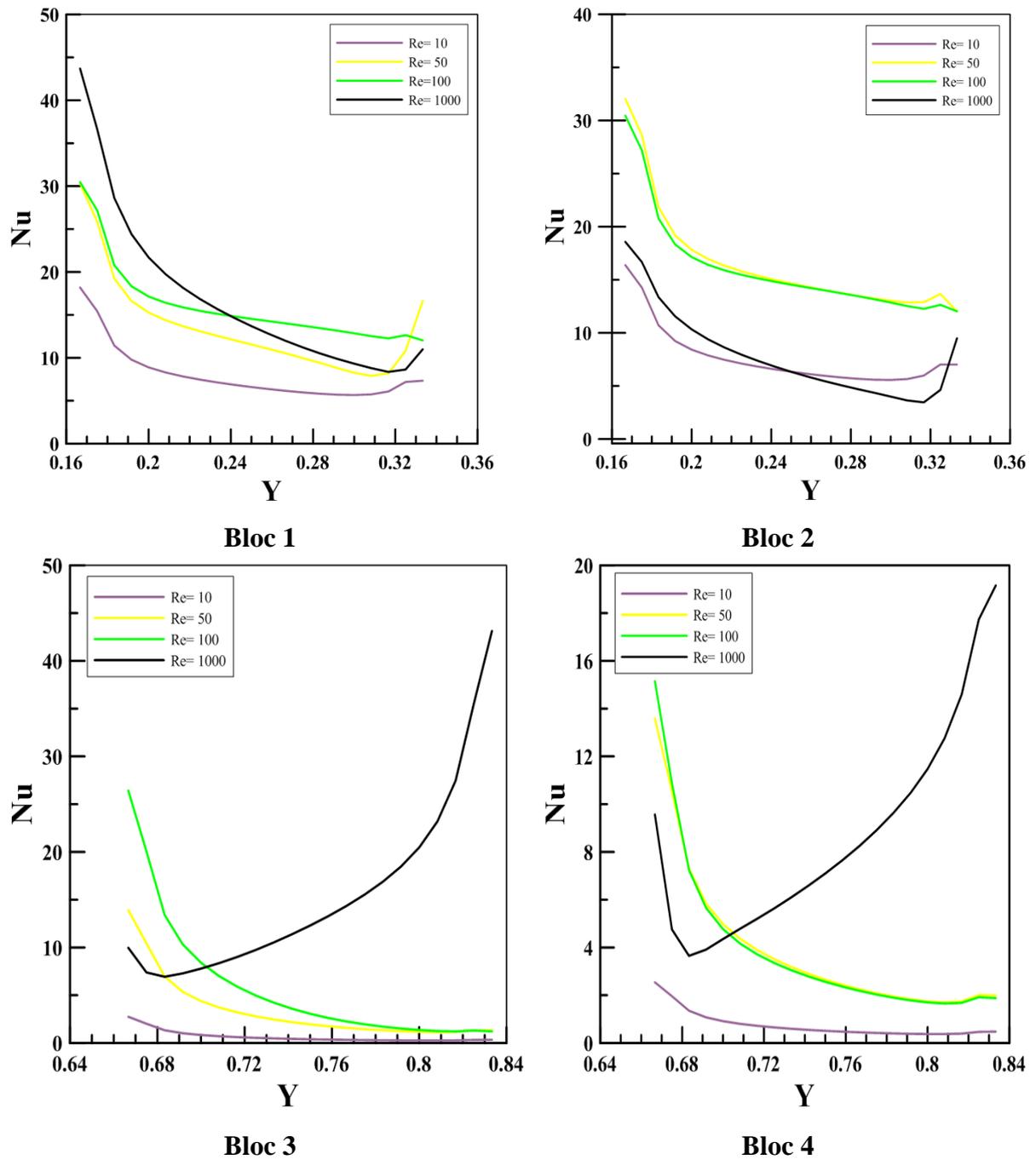


Figure (3.7) : Profil de nombre de Nusselt en fonction de Re pour ( $\phi=0.02$ ,  $Gr= 10^4$ )



**Figure (3.8) :** Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différents valeurs de nombre de Reynolds ( $\phi=0.02$ ,  $Gr= 10^5$ )

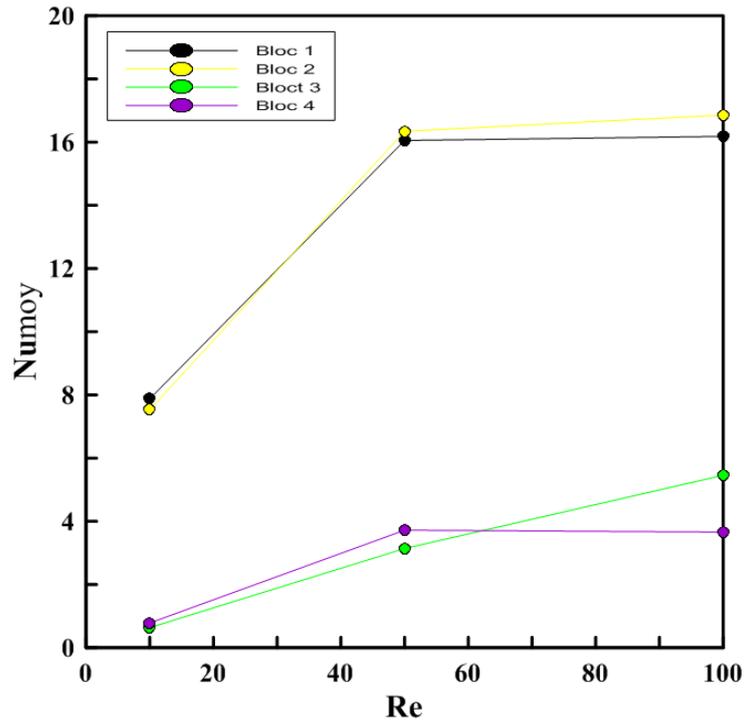
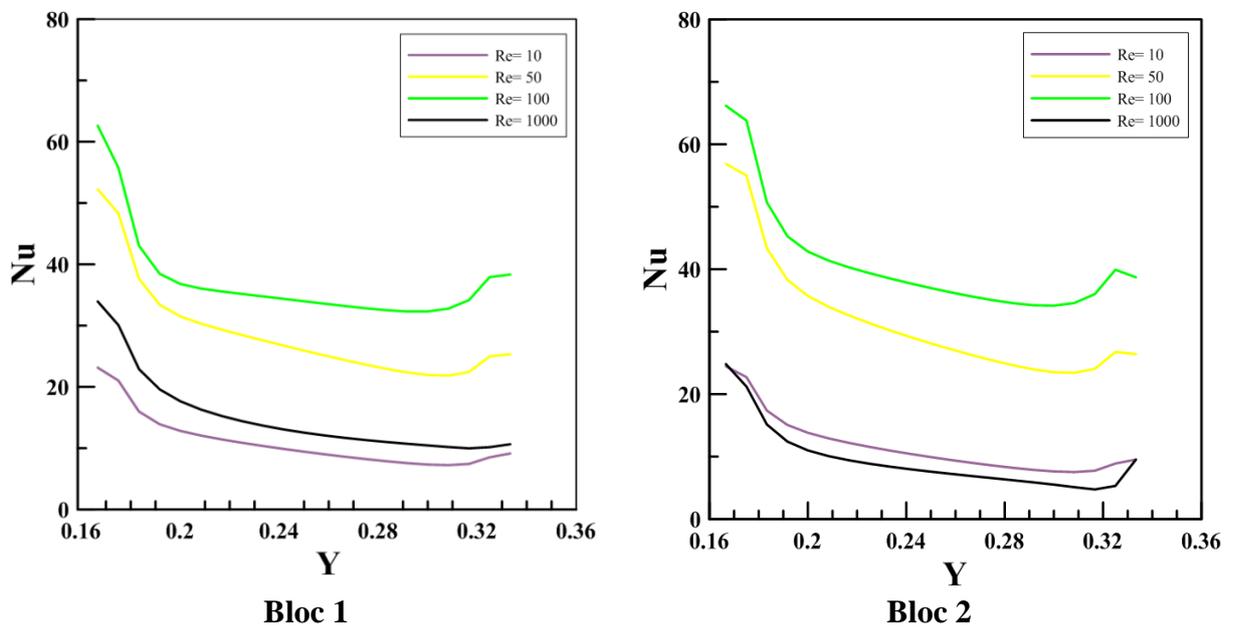


Figure (3.9) : Profil de nombre de Nusselt en fonction de Re pour ( $\phi=0.02$ ,  $Gr=10^5$ )



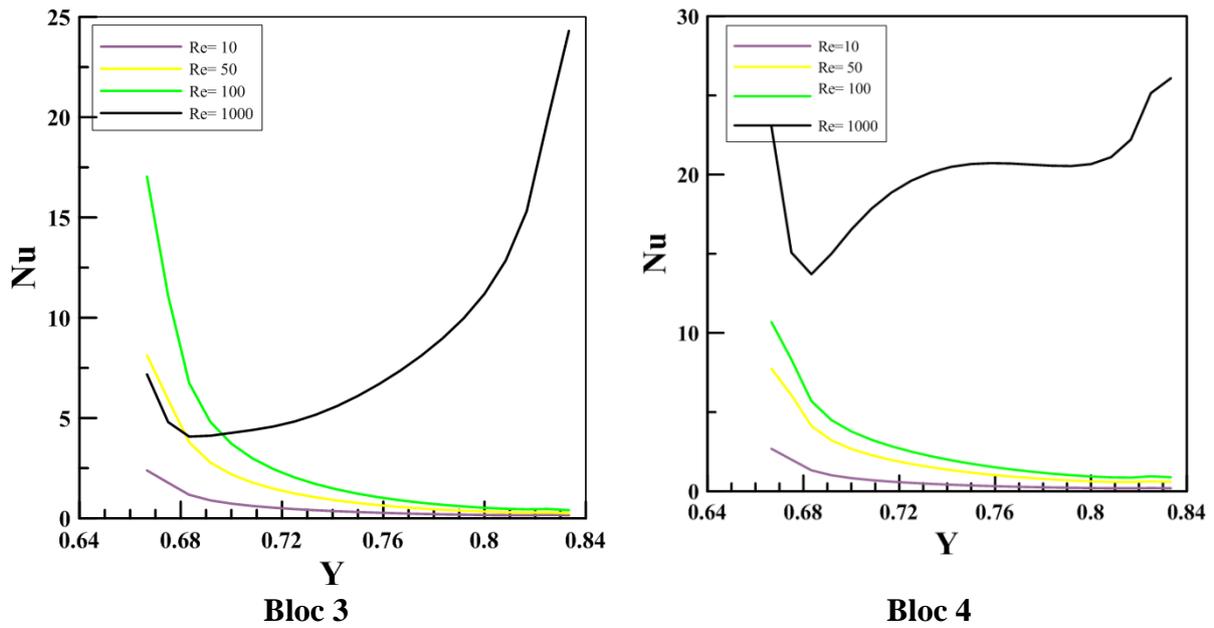


Figure (3.10) : Etude de nombre de Nusselt des quatre blocs pour différents valeurs de nombre de Reynolds et ( $\phi=0.02$ ,  $Gr=10^6$ )

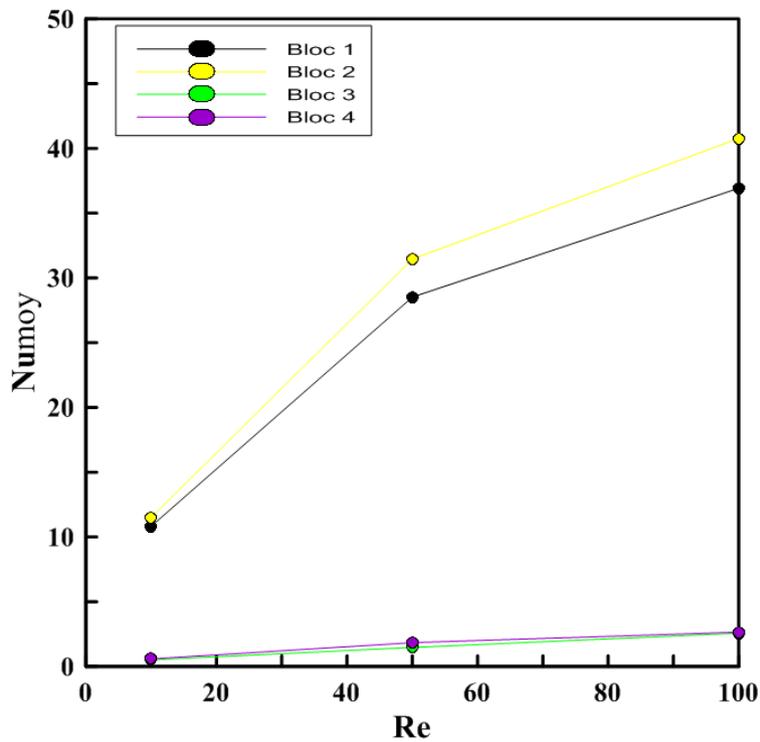


Figure (3.11) : Profil de nombre de Nusselt en fonction de Re pour ( $\phi=0.02$ ,  $Gr=10^6$ )

Dans ce cas nous varions le nombre de Grashof ( $10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ ), et pour chaque valeur de Gr le nombre de Reynolds est varié (10, 50, 100) à une fraction volumique de nanoparticule  $\Phi=0.02$ .

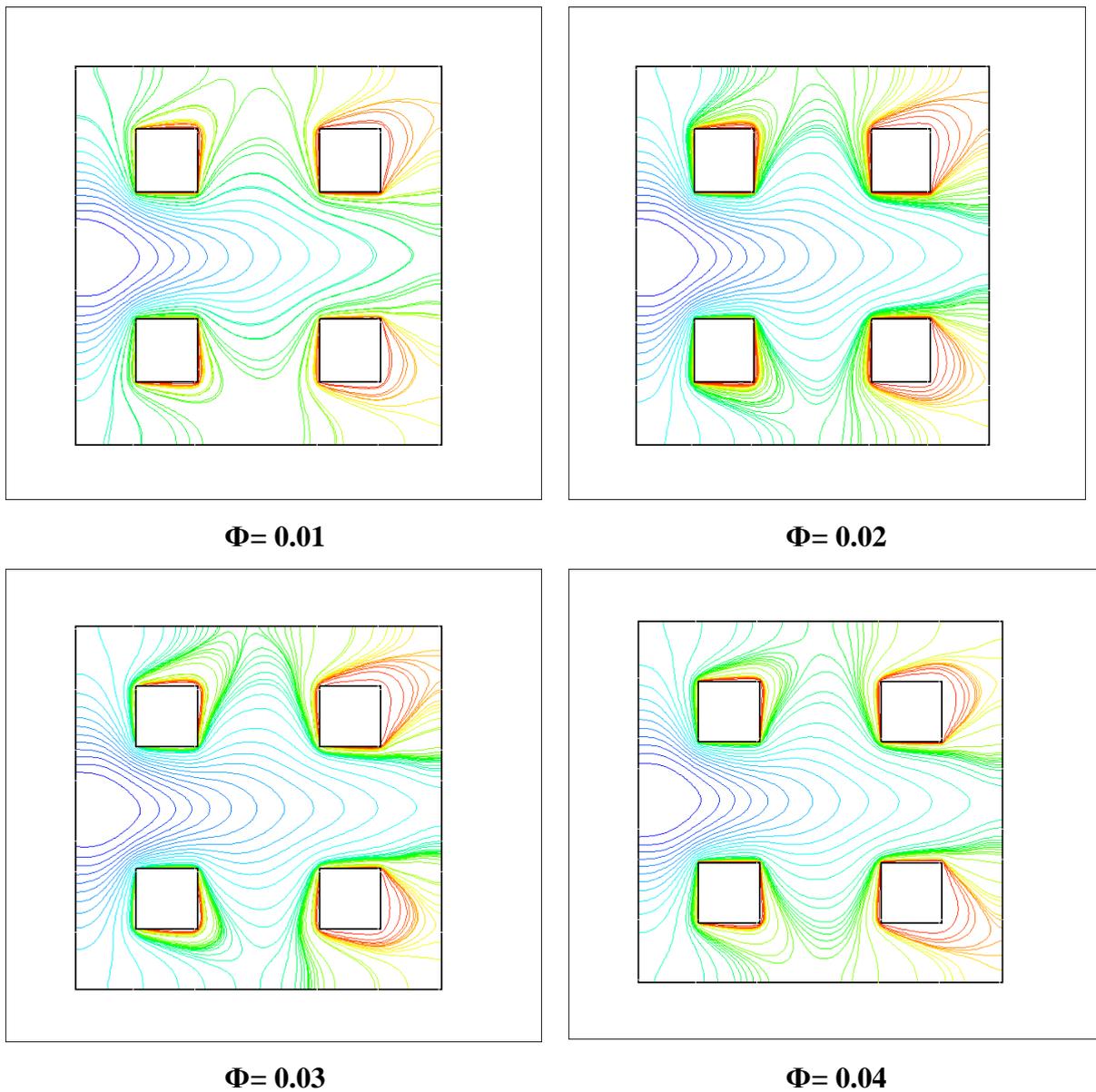
Les figures (3.4), (3.6), (3.8) et (3.10) représentent la variation de profil du nombre de Nusselt tout au long de  $Y$  des quatre blocs, pour différentes valeurs de  $Re$  et  $Gr$ , ou nous observons que le profil de  $Nu$  augmente tout en augmentant le nombre de Reynolds et de Grashof, ce qui est le résultat d'une favorisation des effets de convection naturelle en augmentant le nombre de Grashof d'une part. D'autre part l'augmentation du nombre de Reynolds favorise l'agitation du nanofluide et améliore le transfert de chaleur dans l'ensemble des parois de la cavité.

Les figures (3.5), (3.7), (3.9) et (3.11) représentent les résultats obtenus de la variation du nombre adimensionnelle  **$Nu$  moyen** en fonction de nombre adimensionnelle  **$Re$** .

A partir des figures nous observons que le profil de nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation de nombre de Reynolds et de Grashof. Ceci pour les raisons suivantes :

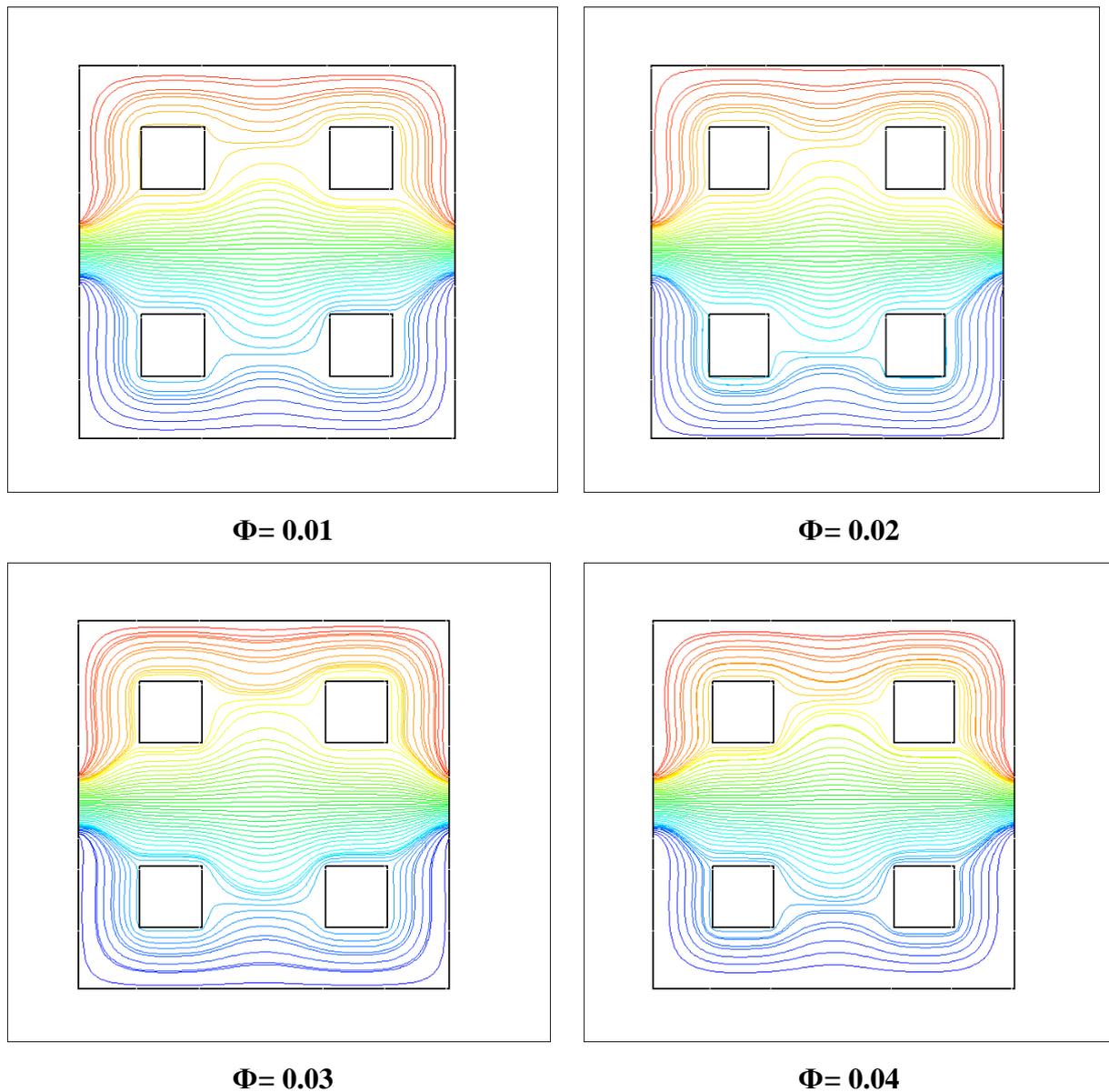
Pour augmenter le transfert de chaleur au niveau de la cavité et par conséquent améliorer le refroidissement des blocs, on a augmenté la vitesse de l'écoulement à l'entrée de la cavité, ce qui provoqué l'augmentation du nombre de Reynolds.

Lorsque le nombre de Reynolds augmente, le nombre de Nusselt augmente ce qui engendre donc un bon refroidissement.

**b) Lignes isothermes :**

**Figure (3.12) :** Lignes isothermes pour différentes valeurs de fraction volumique à  $Re = 10$  et  $Gr = 10^3$

## c) Lignes de courants



**Figure (3.13) :** Lignes de courants pour différents valeurs de fraction volumique à  $Re= 10$  et

$$Gr= 10^3$$

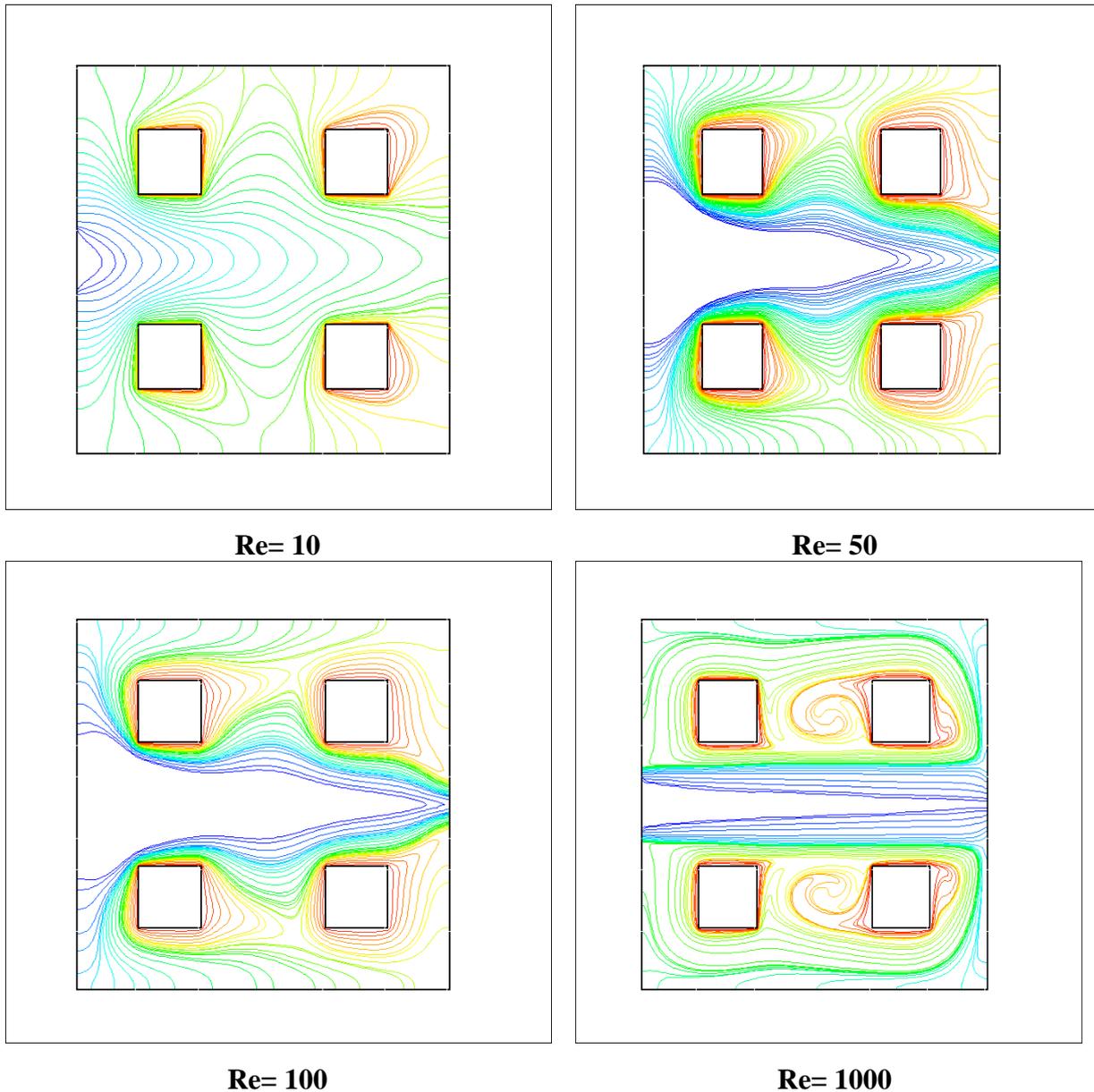
Dans notre simulation nous avons utilisé différentes concentrations de nanoparticules ( $\Phi= 0.01$ ,  $\Phi= 0.02$ ,  $\Phi= 0.03$ ,  $\Phi= 0.04$ ), en fixant le nombre de Reynolds  $Re= 10$  et le nombre de Grashof  $Gr= 10^3$ , les résultats des lignes isothermes et les lignes de courant obtenus sont représentés sur les figures (3.13) et (3.14).

Les isothermes sont plus prononcées autour des blocs spécifiquement ceux qui sont près de la sortie, avec des gradients de température plus élevés par rapport au centre de la cavité. Ceci

Est conséquence que les nano-fluides ajoutés sont à basse température par rapport à l'intérieur de la cavité ce qui influence la manière dont la chaleur est distribuée dans la cavité.

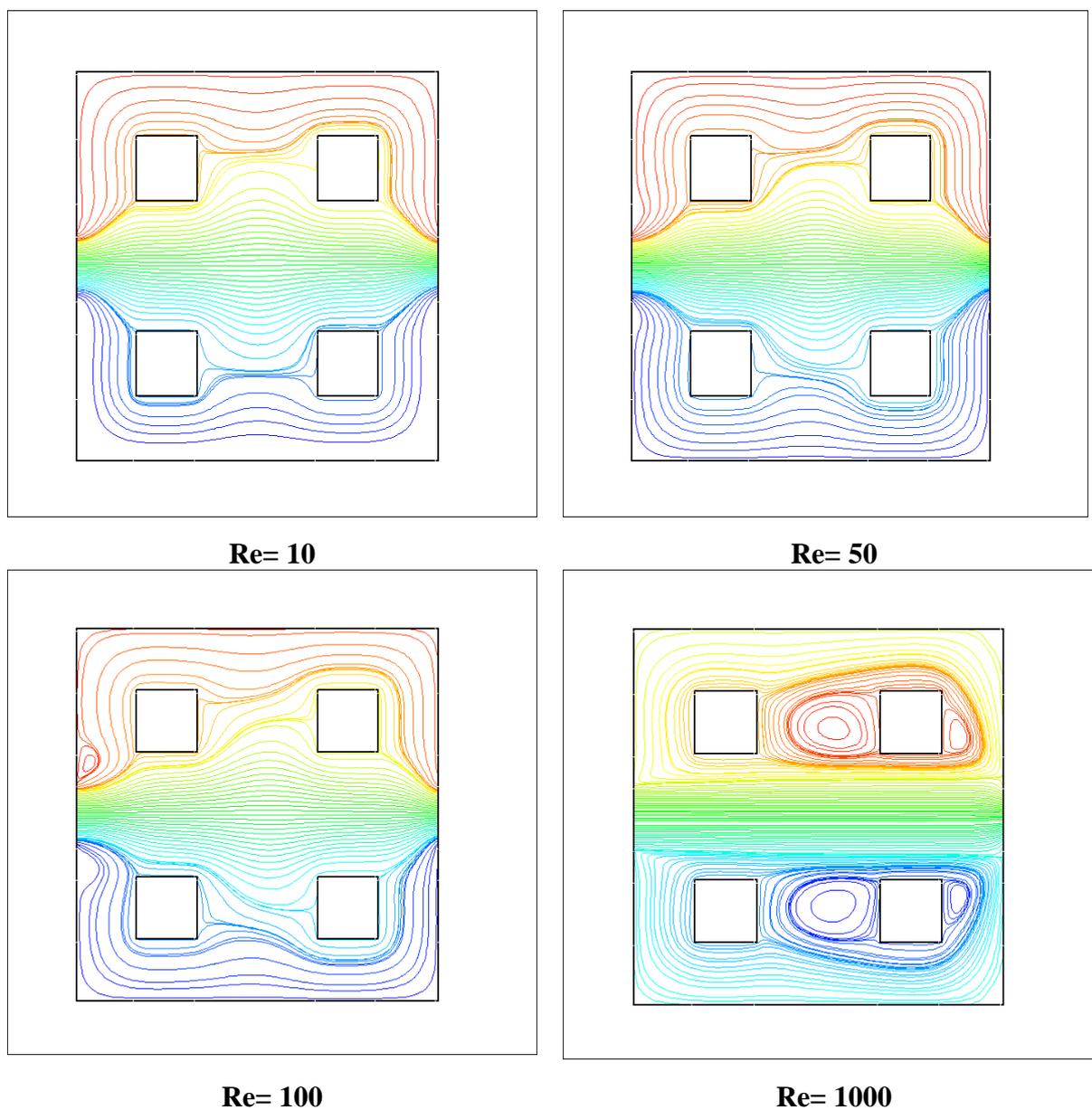
Les contours de courant sont presque parallèles aux parois horizontales de la cavité.

**d) Lignes isothermes :**



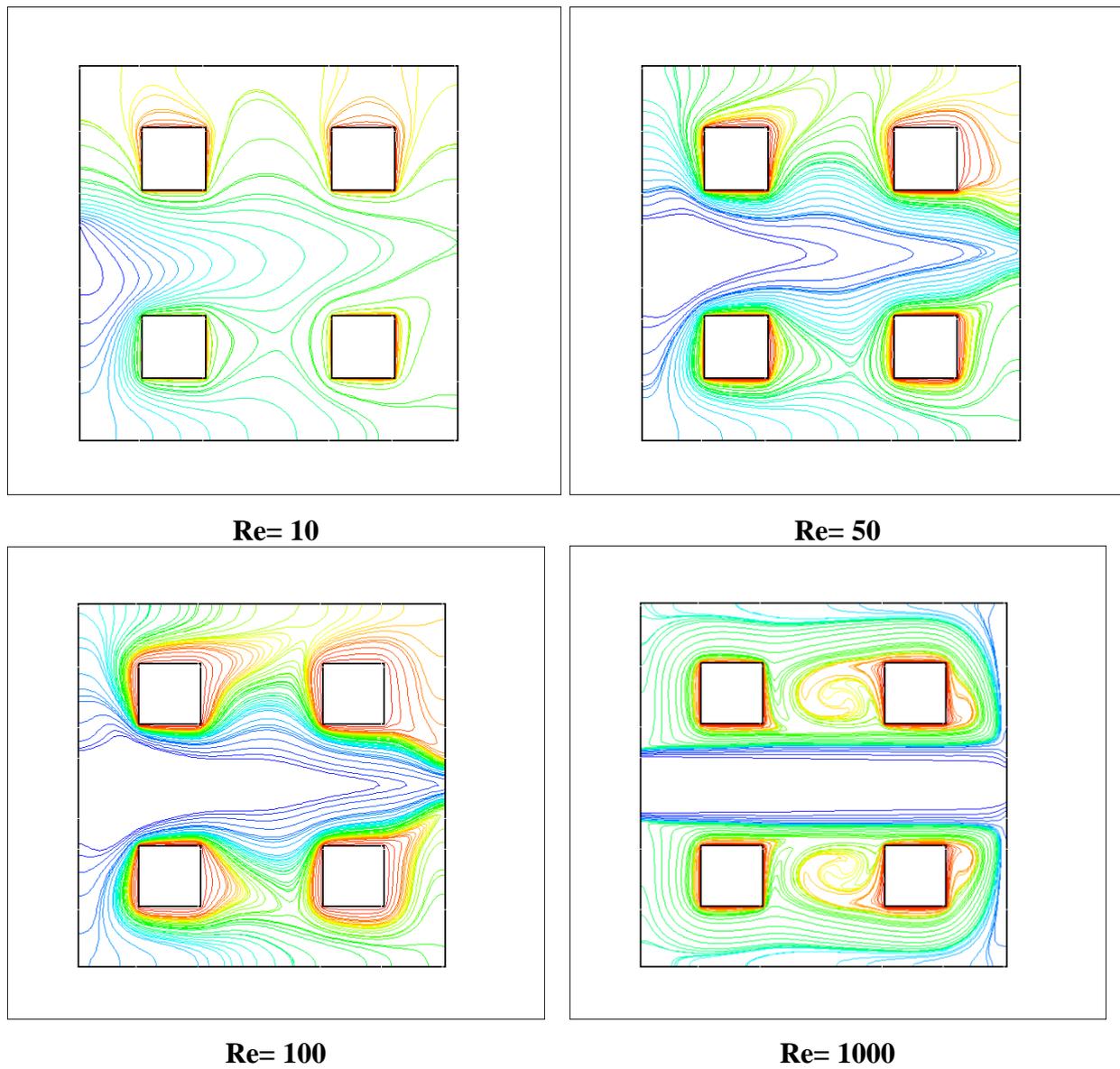
**Figure (3.14) :** Lignes isothermes pour différents valeurs de nombre de Reynolds à une fraction volumique  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^3$

## e) Lignes de courants :



**Figure (3.15)** : Lignes de courant pour différents valeurs de nombres de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^3$

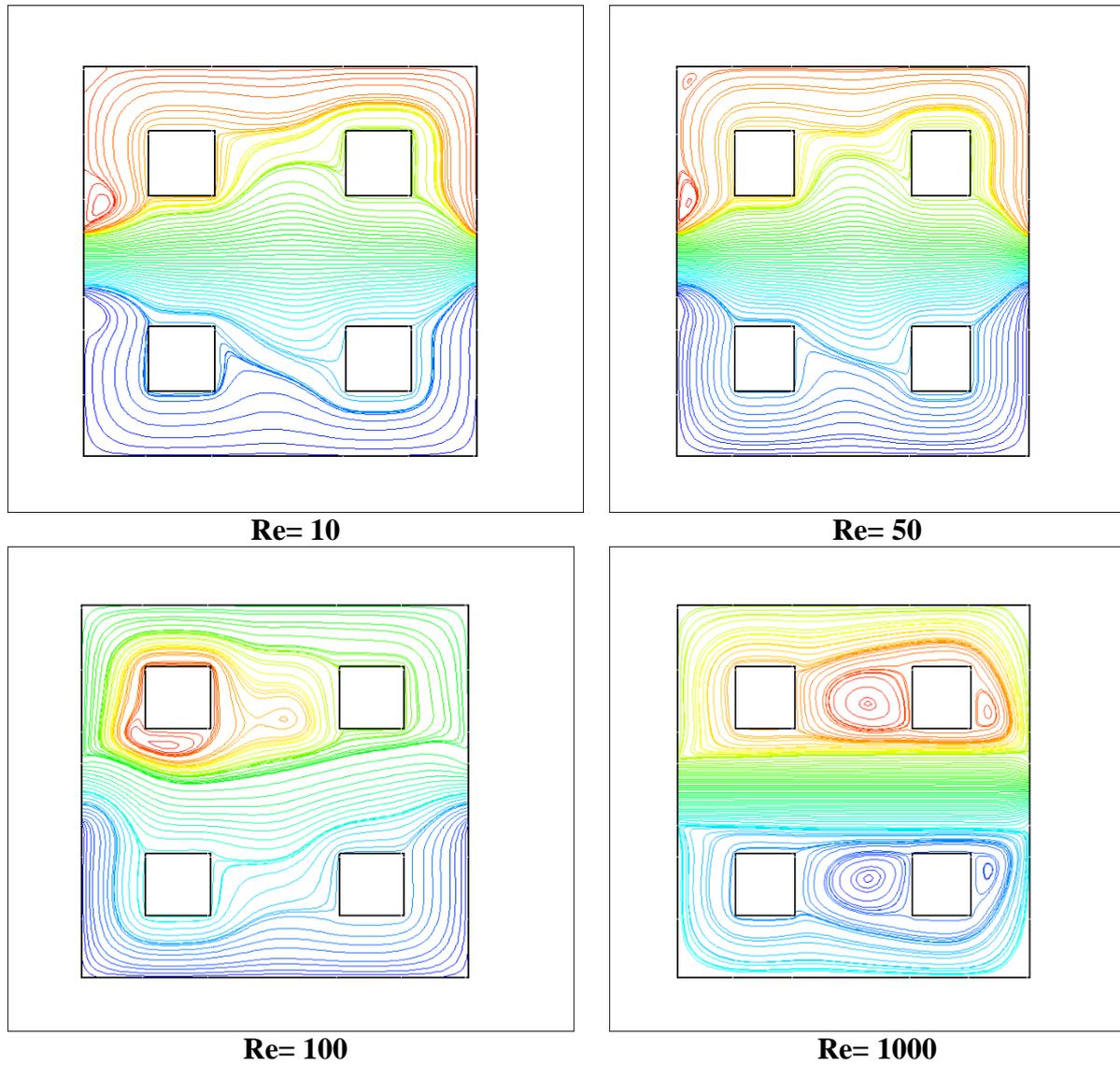
## f) Lignes isothermes



**Figure (3.16) :** Lignes isothermes pour différents valeurs de nombre de Reynolds à

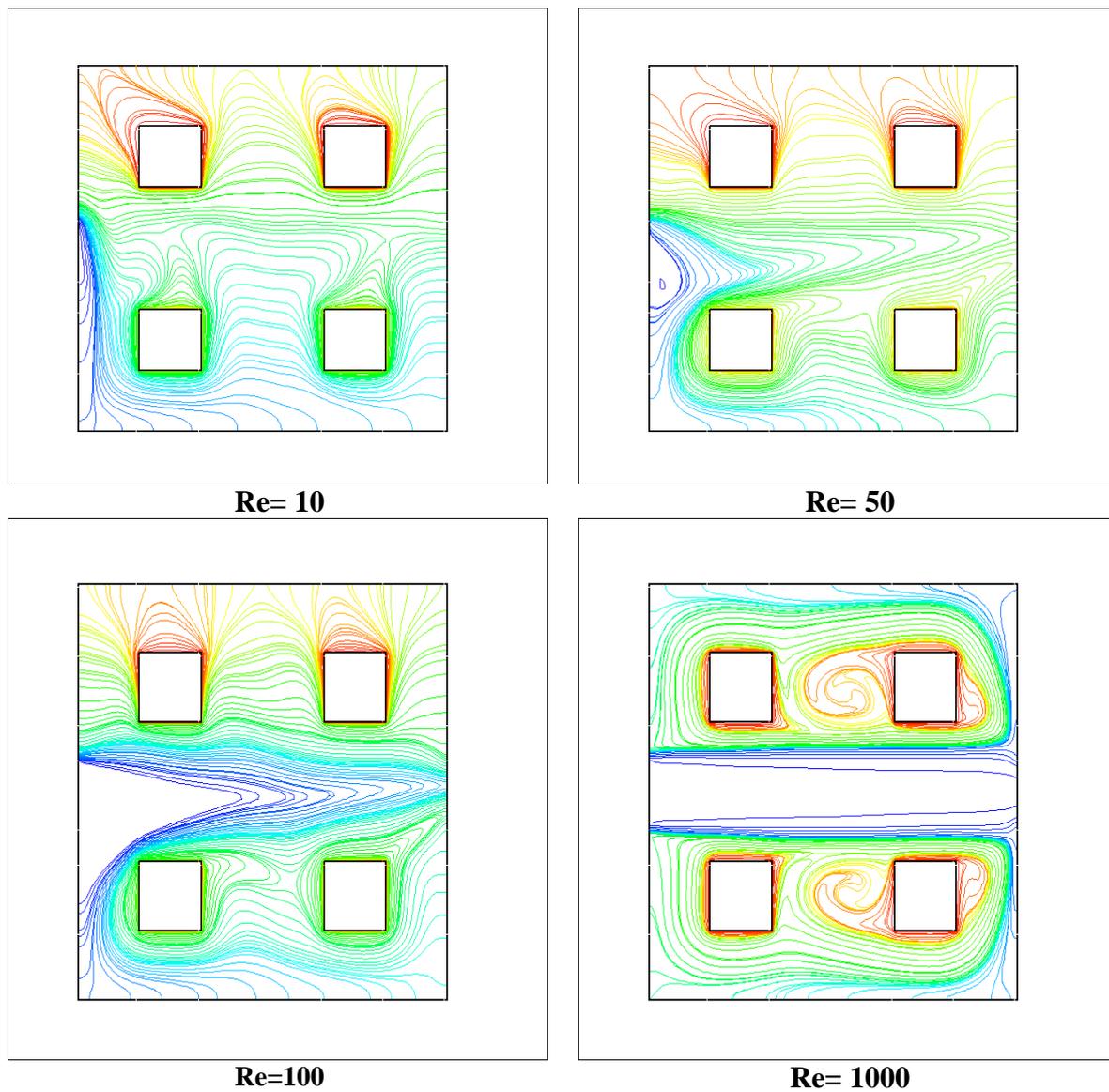
$$\Phi = 0.02 \quad Gr = 10^4$$

## g) Lignes de courant



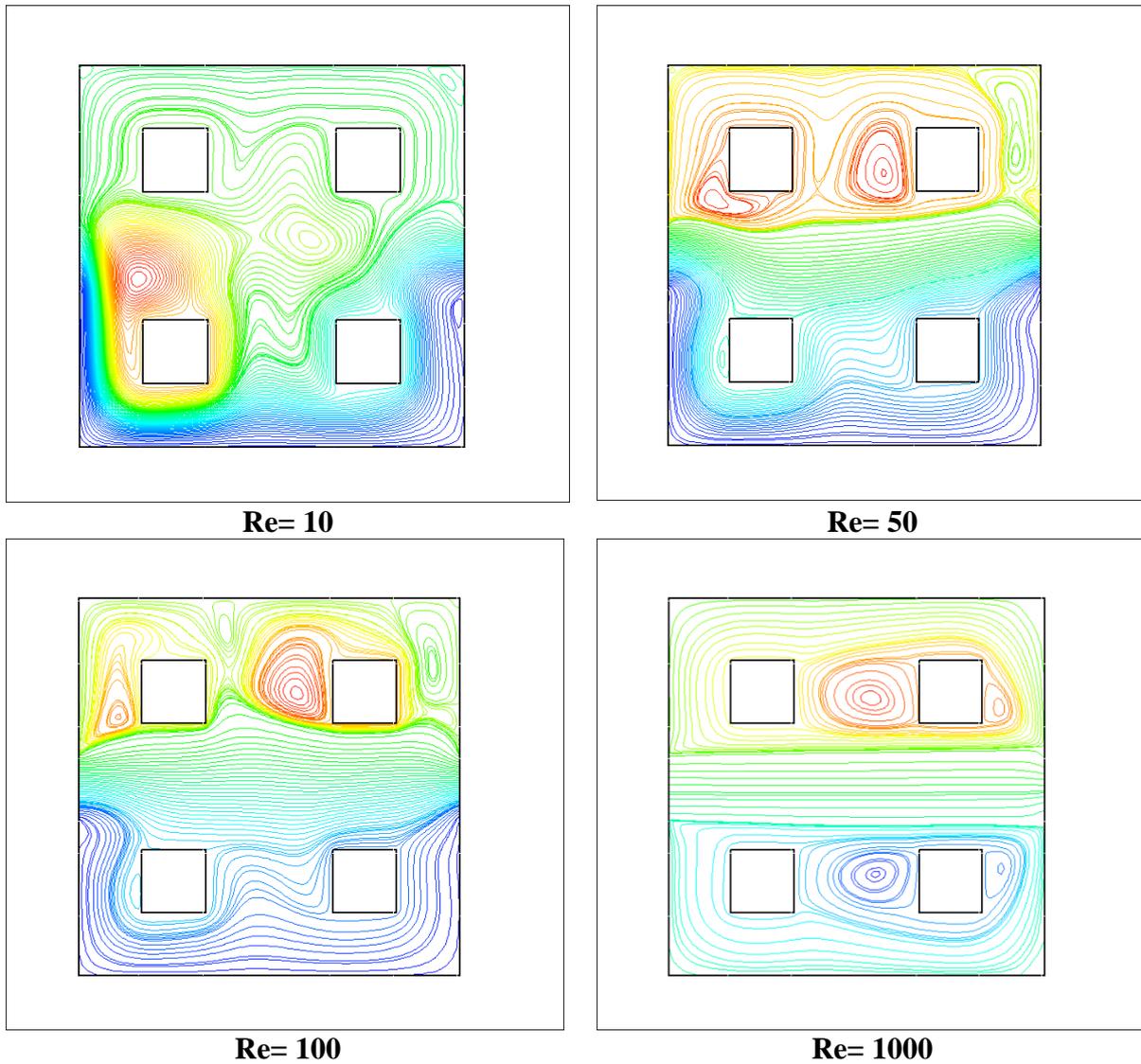
**Figure (3.17) :** Lignes de courant pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et

$Gr= 10^4$

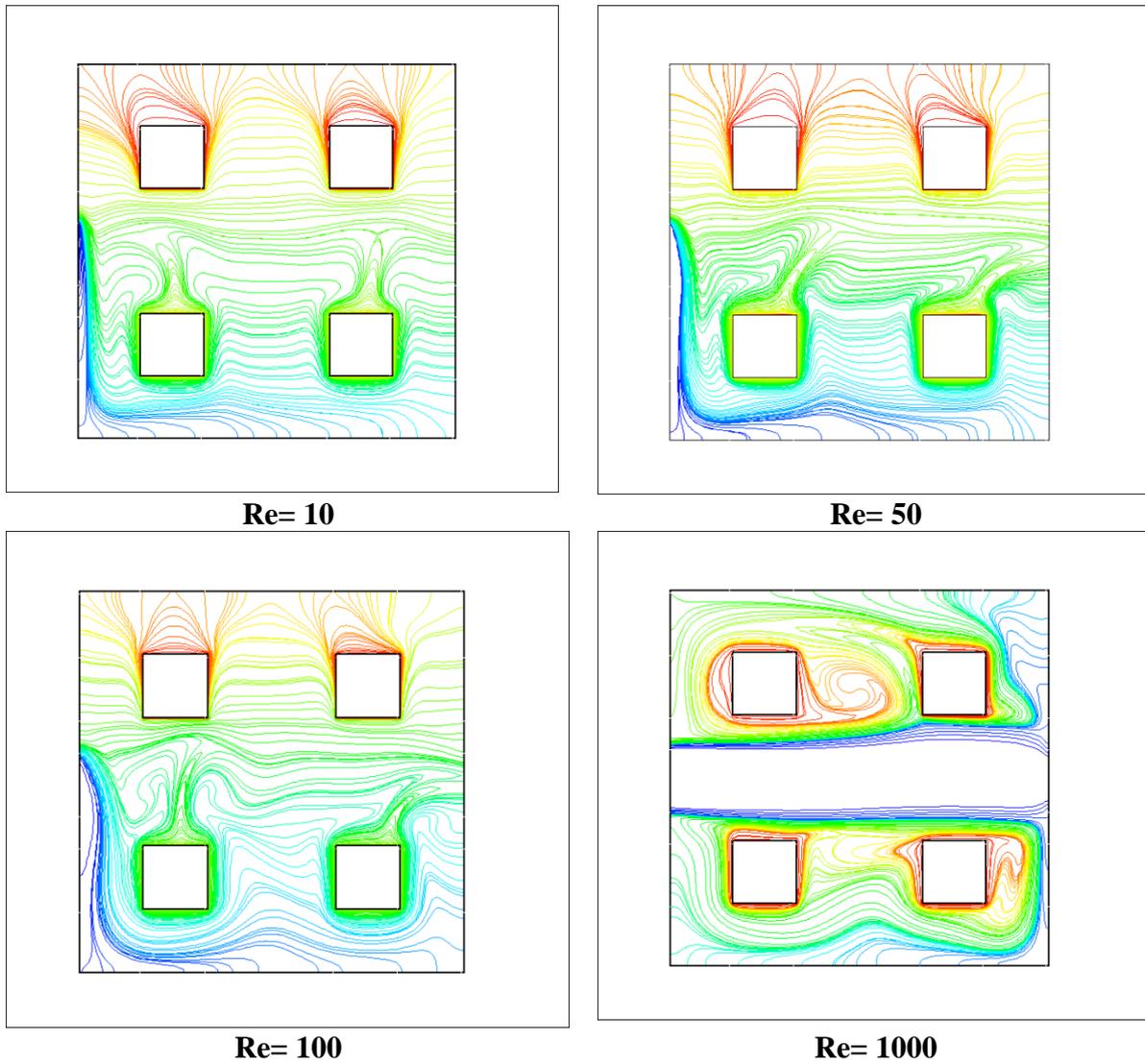
**h) Lignes isothermes**

**Figure (3.18)** : Lignes isothermes pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^5$

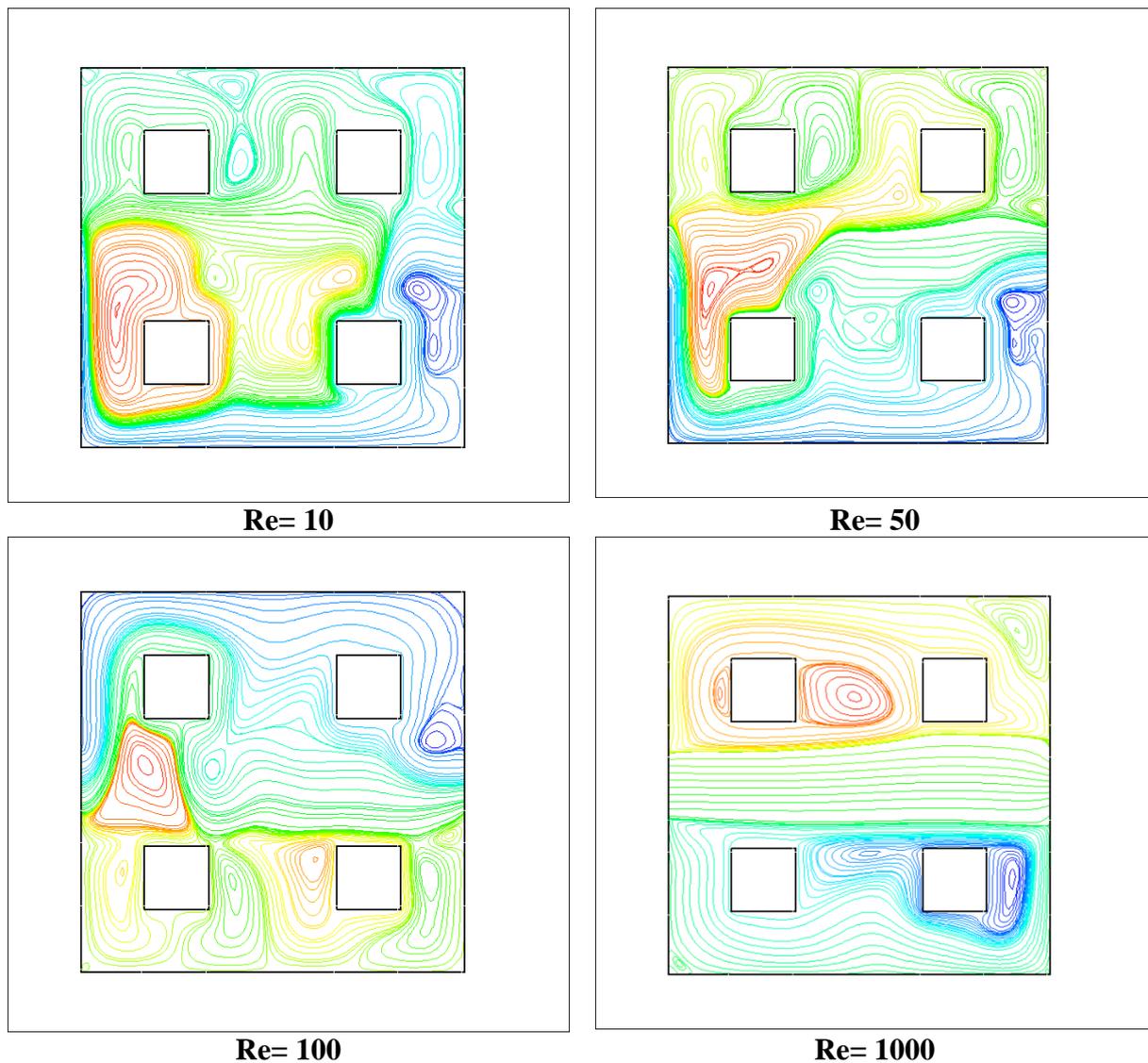
## i) Lignes de courant :



**Figure (3.19) :** Lignes de courant pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^5$

**j) Lignes isothermes**

**Figure (3.20)** : lignes isothermes pour différentes valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^6$

**k) Lignes de courant**

**Figure (3.21) :** Lignes de courant pour différents valeurs de nombre de Reynolds à  $\Phi= 0.02$  et  $Gr= 10^6$

Dans ce cas de simulation nous varions le nombre de Grashof de  $10^3$  à  $10^6$  et pour chaque nombre de Grashof nous varions le nombre de Reynolds (10, 50, 100, 1000) pour cela, les résultats trouvés sont illustrés dans les figures précédentes :

A  $Gr=10^3$  nous observons des petits tourbillons au niveau des lignes isothermes autour des blocs près de la sortie dans les nombres de Reynolds les plus élevés, en augmentant le nombre de Grashof et Reynolds les destructions deviennent encore plus importantes autour de tous les blocs. Cette augmentation peut entraîner des turbulences et des mouvements convectifs ce qui conduit à des déformations au niveau des lignes isothermes.

Dans les lignes de courants, pour les faibles nombre de Reynolds nous observons des petits vortex qui sont formé à l'entrée, qui se déplacent et s'amplifient à différents endroits de la cavité, de l'entrée vers la sortie à mesure que les nombres de Reynolds et de Grashof augmentent, cette dernière signifie la dominance des forces de flottabilité ainsi qu'une augmentation de la vitesse d'écoulement de nano-fluide, ce qui a potentiellement crée des vortex au niveau des lignes de courants.

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'effet de concentration des nanoparticules dans un fluide de base, le nombre de Reynolds et le nombre de Grashof sur la variation du profil de nombre de Nusselt, ainsi que les lignes isothermes et de courants.

L'étude nous a amenés aux résultats suivants :

- L'augmentation des fractions volumiques augmente le profil du nombre de Nusselt en raison de l'amélioration de la conductivité thermique lors du transfert de chaleur dans la cavité.
- L'augmentation du nombre de Reynolds et de Grashof favorise les effets de convection mixte et améliore le transfert de chaleur.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique sur le refroidissement des composantes électroniques par convection mixte avec le nano-fluide  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - eau, dans une cavité carrée à une entrée froide munie de quatre blocs à l'état chaud, dont tous les parois de la cavité sont adiabatiques. On a effectué des simulations numériques pour différentes fractions volumiques de nan-fluide ( $\Phi = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ ), et pour différents nombres de Grashof

( $\text{Gr} = 10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ ) variant le nombre de Reynolds ( $\text{Re} = 10, 50, 100, 1000$ ) pour chaque nombre de Grashof.

Notre procédure de simulation a été validée en comparant nos résultats à ceux de **El hafad Bara et al[ 26]**.

D'après les résultats obtenus on conclut que :

- L'augmentation de fraction volumique augmente le profil de nombre de Nusselt moyen en raison de l'amélioration de la conductivité thermique des nanoparticules.
- La présence de blocs chauds peut créer des gradients de concentration de nanoparticules, ce qui peut entraîner des variations du profil de nombre de Nusselt dans différentes régions de la cavité.
- D'après nos simulations, l'augmentation du nombre de Reynolds et de Grashof augmente le nombre du Nusselt.
- La convection mixte joue un rôle très important dans le processus de refroidissement.

En fin on peut conclure que la combinaison entre la fraction volumique et le nombre de Reynolds et de Grashof a amélioré le transfert thermique et a assuré un bon refroidissement des composantes électroniques.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] Kessi.F ,Yahiaoui.M , thèse Master (Refroidissement des composants électronique par convection forcée : Simulation numérique.) Année : 2014-2015.
- [2] Adel HAMOUCH, Refroidissement à air des composants électroniques par convection mixte, mémoire de magister de l'université de frères Mentouriconstantine, 2007.
- [3] D. Aoudia , B. Oumelil . Etude numérique du refroidissement des sources de chaleur par convection mixte dans un canal horizontal par jet de nanofluide. Université de Béjaia. 2019.
- [4] AREELIS Technologies : dissipation thermique dans les composantes électroniques ; un enjeu pour la fiabilité des composants/système électroniques quelles solution technologiques. Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg, 2015.
- [5] Moualak Imane et ZerguineBelqassim Simulation numérique de la convection mixte dans une nouvelle conception de dissipateur de chaleur rotatif utilisé pour le refroidissement d'un CPU mémoire de master université de Mohamed Boudiaf M'sila, 2019.
- [6] AREELIS Technologies :(Laboratoire Universitaire des science Appliquées de Cherbourg) , dissipation thermique dans les composantes électroniques : un enjeu pour la fiabilité des composants/système électroniques quelles solutions technologiques. Laboratoire universitaire sciences appliquées de cherbourg.2015.
- [7] M.Tawk, (Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique). L'université de Grenoble. GRENOBLE, 2006.
- [8] M.VahabzadehBozorgetM.Siavashi. (Two-phase mixed convection heat transfer and entropy generation analysis of a non- Newtonian nanofluid inside a cavity with internal rotating heater and cooler). International Journal of Mechanical Science, vol. 151. P. 842-857, févr.2019.doi: 10.2016/j.ijmecsci.2018.12.036.
- [9] S.Middleman, Modeling axisymmetric flows: dynamics of films, jets, and drops. San Diego:AcademicPress, 1995.

- [10] A Bennis, S Rahal, la convection naturelle dans une cavité stimulant un thermosiphon, Edition, Universitaires Européennes, Saarbiicken (Allemagne), p.1-124, (2014).
- [11] M. Chaour, Interaction des structures tourbillonnaires avec la couche limite dans une cavité différentiellement chauffée, mémoire de magistre, université Mentouri-Constantine (2010).
- [12] Mouassi, A.( 2012) : Intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nanofluides, Thèse de Magister en Génie Mécanique, Mécanique des fluides et Transfert de chaleur, Université M'Hamed BougaraBoumerdes.
- [13] Soufi, E, H, (2013) : Application des nanofluides pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple, Thèse de Master en Génie Chimique, Université KasdiMerbah d'Ouargla.
- [14] Lebihi, S. (2014) : Refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nanofluide, Thèse de Master en Génie Mécanique, Option : Systèmes Energétique et Développement Durable, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [15] Ribeiro, J , P, Gruss J, A. (2009) : Nanofluides pour les applications thermiques, Technique de l'ingénieur, 42514/2<sup>ème</sup> édition.
- [16] E. Piquer, M. Mojtabi, M. Azaiez, A. Mojtabi : Convexion mixte en fluide binaire avec effet Soret : Etude analytique de la transition vers les rouleaux transversaux 2D, Laboratoire d'énergétique (LESETH), Université Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, France.
- [17] Refroidissement par convection naturelle des composants électroniques montés sur une canal horizontal, Laboratoire d'Energétique Appliquée et de Pollution. Département de Génie Mécanique, Université Mentouri-Constantine Route de Ain El. Bey. Constantine 25000. Algérie PP1-6.

- [18] Conférence international sur l'énergie verte et l'ingénierie environnementale (GEEE-2017). Journal internationale de la recherche scientifique et des technologies d'ingénierie IJSET Vol.5 pp1-4.
- [19] Shariat, M ,Akbarinia, A , Nezhad, A , H, Behzadmehr, A, Laur, R. (2011): Numerical study of two phase laminar mixed convection nanofluid in elliptic ducts, Applied Thermal Engineering, vol. 31, pp.3248-2359.
- [20] Mahmoudi, A, H, Shahi, M, Talebi, F. (2010) : Effect of inlet and outlet location on the mixed convective cooling inside the ventilated cavity subjected to an external nanofluid, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 37, pp. 1158-1173.
- [21] G. Laplante, M.A. Bernier, convection mixte défavorable et conjuguée dans un tube vertical, Ecole polytechnique de Montréal, Département de génie mécanique, Québec, Canada, Vol. 40, N°. 15, pp. 3527-3536, 1997
- [22] N. Putra, Yanuar, et F. N. Iskandar, (Application of nanofluids to a heat pipe liquid-block and the thermoelectric cooling of electronic equipment), Experimental Thermal and fluid Science, vol. 35, n° 7, p. 1274-1281, oct. 2011, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.04.015.
- [23] E.Belahmadi, R. Bessaih, (Etude numérique de la convection mixte dans un canal vertical rempli d'un nanofluide, Laboratoire LEAP , Département de Génie Mécanique, Université Mentouri-Constantine Route de Ain El. Bey. Constantine 25000. Algérie PP1-6.
- [24] MansourTawk, Yvan Avenas, AfefKedous-Lebouc, David Charalampous, Emanuelle Dubois, et al.( Etude d'un système de refroidissement de composants électroniques de puissance par métal liquide),13ème édition de la Conférence "Électronique de Puissance du Futur" (EPF), Jun 2010, Saint-Nazaire, France.

[25] M. A. Hssain, R. Mir, et Y. El Hammami, (Numerical Simulation of the Cooling of Heated Electronic Blocks in Horizontal Channel by Mixed Convection of Nanofluids), journal of Nanomaterials , vol. 2020, p. 1-11, févr. 2020, doi: 10.1155/2020/4187074.

[26] El hafa. B, El hamdani. S, A. Bendou, K. Limam, (Parametric study on natural convection of nanofluids in a heated chamber), International Conference on Materials and Energy, May 2016, France.

## **Résumé :**

Dans ce travail, nous avons étudié numériquement le transfert de chaleur par convection mixte pour le refroidissement des composantes électronique, l'étude a été effectuée dans une cavité carrée de longueur (L) remplie de nano-fluide, en présence de quatre blocs chauds à l'intérieur de la cavité. Notre étude a été menée en fonction de fraction volumique des nanoparticules, le nombre de Grashof et le nombre de Reynolds. Les résultats indiquent que l'augmentation de fraction volumique et de nombre de Reynolds améliore le transfert de chaleur, cela est dû à l'amélioration de la conductivité thermique ainsi que l'augmentation de la vitesse d'écoulement de nano-fluide.

## **Abstract:**

In this work, we have numerically investigated mixed convection heat transfer for the cooling of electronic components, the study was carried out in a square cavity of length (L) filled with nanofluid, in the presence of four hot blocks inside the cavity. Our study was carry out according to nanoparticle volume fraction, Grashof number and Reynolds number. The results indicate that increasing the volume fraction and Reynolds number enhances heat transfer, due to improved thermal conductivity and increased nanofluid flow velocity.