

**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 :

**ALOUACHE Larbi**

**MADOUI Karim**

# Thème

---

**Simulation numérique de la convection dans une cavité carrée  
remplie de ferrofluide**

---

Soutenu le 28 septembre 2022 devant le jury composé de:

Mr. <b>ALI AGHA Hamza</b>	Président
Mr. <b>ADNANI Massinissa</b>	Rapporteur
Mr. <b>LAUCHE Nassim</b>	Examineur

**Année Universitaire 2021-2022**



**Déclarations sur l'honneur**  
**Engagement pour respecter les**  
**règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un**  
**travail de recherche**

Arrêté ministériel n°1082 du 27 Décembre 2020(\*)  
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : .....

Prénom: .....

Matricule: .....

Spécialité et/ou Option: .....

Département: .....

Faculté: .....

Année universitaire : ...../.....

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*): .....

Intitulé: .....

.....

.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait

à Béjaïa ...../...../.....

Signature de l'intéressé

(\*) Lu et approuvé

.....

## Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Je remercie notre promoteur, Monsieur Massinissa ADNANI, pour la confiance qu'il a accordée, et son soutien sans faille durant la réalisation de ce mémoire.

Ces remerciements erraient incomplets si je n'en adressais pas à l'ensemble des enseignants de l'université ABDERRAHMANE MIRA – BEJAIA, pour leur soutien logistique et morale ainsi que pour la très bonne ambiance qu'on a toujours trouvée à l'université.

Enfin, ma reconnaissance va à ce qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail

## Dédicaces

Grace à l'abonné volonté, l'acharnement, dieu tout puissant m'a donné  
la force et le courage pour la réalisation de ce travail que je dédie :

A mes très chers parents

A mes chères sœurs

A mes chers frères

A toute ma famille

A tous mes ami(e)s

A tous ceux qui me sont chers

Que ce travail soit une part de ma reconnaissance envers eux.

Karim et Larbi

# Sommaire

Remerciements .....	i
Dédicaces .....	ii
Sommaire .....	iii
Liste des figures .....	v
Liste des tableaux .....	vi
NOMENCLATURE .....	vii
Introduction Générale.....	1
[Généralité].....	4
I.1. Introduction .....	4
I.2. Les ferrofluides .....	5
I.3. Pourquoi la transition vers un ferrofluide ?.....	5
I.3.1. Comportement thermique et rhéologique des ferrofluides.....	6
a. Conductivité thermique des ferrofluides .....	6
I.4. Comportement rhéologique des ferrofluides.....	8
I.5. Domaine d'application des ferrofluides .....	10
I.6. Mode de transfert de chaleur des ferrofluides .....	11
I.7. Recherche bibliographique.....	15
[Position du problème et formulation mathématique].....	18
II.1. Introduction .....	18
II.2. Position du problème .....	18
II.3. Equations gouvernantes dimensionnelles dans le cas d'un ferrofluide .....	19
II.4. Hypothèses et variables sans dimensions .....	20
II.5. Équations sans dimensions .....	21
II.6. Conditions aux limites .....	22
II.7. Méthode et Simulation numérique.....	22

---

[Simulation Numérique].....	24
III. 1. Introduction .....	24
III.2. Etude de maillage : .....	25
III.3. Représentation graphique des tableaux ( III.3, III.4 et III.5 ): .....	27
III.4. Effet de Nombre de Rayleigh :.....	28
III.5. Discussion : .....	32
Conclusion Générale .....	34
Références Bibliographiques.....	37
Résumé .....	39
Abstract .....	39

## Liste des figures

Figure I.1 : Représentation d'un ferrofluide [5].....	5
Figure I.2 : Conductivité thermique d'un Ferrofluide sous champ magnétique [6].....	7
Figure I.3 : Conductivité thermique d'un Ferrofluide en fonction du temps [6].....	7
Figure I.4 : Rhéologie du ferrofluide sous Champ magnétique [4].....	9
Figure I.5 : Évolution du coefficient de convection d'un ferrofluide sous champ. [6].....	10
Figure I.6 : La conduction [5] .....	12
Figure I.7 : La convection naturelle [5].....	12
Figure I.8 : La convection forcée [5].....	13
Figure I.9 : La convection mixte [5].....	14
Figure I.10 : Transfert de chaleur par rayonnement [5] .....	14
Figure I.11 : Les piques des ferrofluide [5].....	16
Figure II.1 : Géométrie de la cavité carrée fermée.....	19

[Times New Roman, Justifier, Normal, Police 12, Interligne de 1,5ligne]

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Matériaux et fluides porteurs utilisés dans les ferrofluide [6] .....	16
Tableau III.3 : Caractéristiques de nombre de Nusselt pour différents maillages ( $\Phi=0.04$ , $Pr=6.1$ ).....	26
Tableau III.4 : Caractéristiques de nombre de Nusselt pour différents maillages ( $\Phi=0.06$ , $Pr=6.1$ ).....	26
Tableau III.5 : Caractéristiques de nombre de Nusselt pour différents maillages ( $\Phi=0.08$ , $Pr=6.1$ ).....	26

# NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
$B_o$	: Intensité du champ magnétique (Induction magnétique)	T
$C$	: Chaleur spécifique	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$G$	: Accélération de la pesanteur	$m\ s^{-2}$
$K$	: Conductivité thermique	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
$p$	: Pression	Pa
$Pr$	: Nombre de Prandtl, $Pr = \nu / \alpha$	-
$Ra$	: Nombre de Rayleigh, $Ra = g\beta(T_H - T_C)L^3 / \nu\alpha$	-
$Nu$	: Nombre de Nusselt moyen.	
$t$	: temps (s)	
$T$	: température	(K)
$T_0$	: La température de référence.	(K)
$T_c$	: La température de la paroi chaude.	(K)
$T_p$	: La température de paroi froide.	(K)
$\frac{dT}{dx}$	: Gradient de température.	$(K\ mm^{-1})$
$U$	: Composante de la vitesse suivant x.	$(mm/ss)$
$V$	: Composante de la vitesse suivant y.	$(mm/ss)$
$\nabla T = \nabla T_{1-2}$	: Gradient de température	(°K)

## Symboles grecs

$\alpha$	: Diffusivité thermique	$m^2\ s^{-1}$
$\mu$	: La viscosité dynamique.	
$L$	: Longueur de la cavité.	(m)
$\eta_f$	: Viscosité dynamique du ferrofluide.	$Kg / ms$
$\rho_0$	: Masse volumique du ferrofluide	$(kg/m^3)$

$\mu_m$	: Perméabilité magnétique	$V A^{-1} s m^{-3}$
$\nu$	: Viscosité cinématique	$m^2 s^{-1}$
$\rho$	: Masse volumique	
$\beta_0$	Le coefficient d'expansion volumique thermique.	.
$\sigma$	: Constante de Stefan-Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$
$\Phi$	: Flux de chaleur ( $Kgg. mm^{-3}$ )	(m)
$L$	: Longueur de la cavité	

### Indices

$i, j$	: $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ composantes.
$H, C$	: Surface chaude, surface froide

### Abréviations

MHD	: Magnétohydrodynamiques
-----	--------------------------

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

Le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies. Il s'effectue spontanément dès qu'il existe une différence de température entre deux points ou deux systèmes. Le mécanisme de cette transmission de chaleur s'effectue suivant trois modes qui peuvent également coexister et qui sont : La conduction, la convection et le rayonnement.

L'un des mécanismes de transfert de l'énergie est la convection qui se produit entre une surface et un fluide en mouvement lorsque ceux-ci sont portés à des températures différentes. On distingue trois types de ce mécanisme qui sont la convection naturelle, la convection forcée et la convection mixte.

La convection naturelle ou parfois dite libre est le processus de transfert thermique résultant du mouvement des particules élémentaires d'un fluide entre les zones ayant des températures différentes, provoquant ainsi une distribution non uniforme de la densité du fluide, ce qui produit un mouvement convectif sous l'effet de la pousse d'Archimède et la force de gravité.

Au cours de ces dernières années, le transfert de chaleur par la convection naturelle dans les cavités fermées, présente un intérêt important dans de divers domaines de la technologie comme par exemple : Capteurs solaires, double vitrage pour les habitations, refroidissement des instruments électroniques, la conception des fours, des réacteurs nucléaires et chimiques, l'extraction de l'énergie géothermique, le traitement des matériaux, fours et chaudières, tours de refroidissement, l'isolation des canalisations, la thermique du bâtiment et le confort humain, la thermique de l'atmosphère et des océans...etc.

La conductivité thermique d'un liquide non métallique étant très faible, il faut trouver un moyen de l'augmenter artificiellement.

Or, quoi de plus simple que d'ajouter des particules d'un matériau, doté d'une bonne conductivité thermique, dans le liquide de base pour prévoir augmenter la valeur moyenne de la conductivité thermique du mélange (nanofluide).

Il est avéré qu'un bon nanofluide apporte un coup de pouce à l'efficacité d'un système de refroidissement liquide quelconque sans avoir plus de bruit et sans consommer plus. Au

contraire, l'efficacité générale étant améliorée, on peut penser à réduire la ventilation ou à prendre une pompe moins puissante, tout en gardant un palier de performance identique si le silence de fonctionnement est la priorité.

L'objectif de notre travail est l'étude numérique du phénomène de la convection naturelle bidimensionnelle, laminaire et permanente, dans une cavité carrée fermée remplie de ferrofluide. Les parois verticales sont maintenues adiabatiques, tandis que les parois horizontales sont maintenues à deux températures différentes. L'écoulement de fluide dans cette cavité est régi par les lois, de conservation de masse, de la quantité de mouvement et la conservation d'énergie qui ont été résolues par la méthode des volumes finis.

Notre étude est présentée en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les modes de transfert de chaleur ainsi que les ferrofluides. On a également exposé une revue bibliographique sur les différents domaines d'applications concernant la configuration physique étudiée.

Le deuxième chapitre concerne la formulation mathématique ou nous avons présentée, les équations gouvernantes, les hypothèses simplificatrices et les conditions aux limites associés.

Ensuite, nous avons établi les équations adimensionnelles avec leurs principales grandeurs adimensionnelles caractérisant le transfert de chaleur.

Dans le troisième chapitre nous avons exposé la méthode des volumes finis d'une façon détaillée, utilisé pour la discrétisation du système d'équations adimensionnel régissant le phénomène physique. Nous rassemblerons dans ce chapitre les principaux résultats numériques de cette simulation ou nous avons étudié l'effet du maillage ainsi que leurs interprétations et analyse.

Finalement nous terminerons avec une conclusion qui récapitule les principaux résultats issus de cette simulation numérique.

# **Chapitre I**

## **[Généralité]**

# [Généralité]

## I.1. Introduction

L'idée d'introduire des particules dans un liquide est très ancienne. Les travaux de Maxwell(1881) [1] montrent l'intérêt d'une telle démarche sur l'amélioration de la conductivité thermique équivalente du mélange fluide-particules. Les premières manipulations dans ce genre consistaient donc à suspendre des particules dans des liquides. Le diamètre de ces particules variait du micromètre à quelques millimètres (échelle mésoscopique). Cependant, il est bien clair qu'une telle démarche engendre majoritairement des conséquences négatives d'un point de vue des écoulements. En effet, les problèmes de sédimentation liés à l'agglomération des particules, les fortes pertes de charges générées et les moyens technologiques de l'époque, n'ont pas permis le développement de ces fluides.

C'est au début des années 1990, grâce à l'essor du domaine des nanotechnologies qu'est apparue la possibilité d'utiliser des particules de taille nanométrique pour améliorer les propriétés thermo- hydrauliques des fluides caloporteurs. En effet, l'appellation de nanofluides a été proposée par la première fois par Choi [2] pour désigner une suspension de nanoparticules dans un liquide. À travers cette publication, Choi s'est constitué une solide argumentation sur le potentiel des nanofluides dans l'intensification des transferts de chaleur et sur leur éligibilité en tant que fluides caloporteurs. Cette argumentation est basée principalement sur les progrès effectués dans le domaine de la fabrication des nanoparticules.

Une nouvelle discipline de recherche est ainsi née. Depuis, les recherches sur les nanofluides sont menées sur plusieurs fronts à savoir : la mécanique des fluides, la thermique, la rhéologie et la chimie (procédés de fabrication).

Les nanofluides sont des solutions colloïdales stables contenant des nanoparticules en suspension dans un liquide nommé fluide de base. Cette stabilité est procurée grâce au surfactant enrobant les nanoparticules. Ce dernier a pour rôle de prévenir l'agglomération des nanoparticules. La taille des nanoparticules peut varier de 1 à une centaine de nanomètres.

La fraction volumique d'un nanofluide est généralement inférieure à 5%. Les matériaux constituant les nanoparticules peuvent être différents d'un nanofluide à un autre.

On peut citer les principaux : l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), l'oxyde de cuivre ( $\text{CuO}$ ), l'argent, le diamant, l'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ), l'oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ) et enfin les nanotubes de carbone (CNT). De la même manière que les nanoparticules, les fluides de base utilisés sont nombreux : eau, éthylène glycol, huiles...[3]

## I.2. Les ferrofluides

Les ferrofluides sont des suspensions colloïdales de nanoparticules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques de taille d'ordre de 10 nanomètres dans un solvant ou de l'eau.

Ces liquides deviennent magnétiques lors de l'application d'un champ magnétique extérieur tout en conservant leur stabilité colloïdale.

Les ferrofluides sont composés plus fréquemment de nanoparticules de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ou de maghémite ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), qui sont tous deux des oxydes de fer.[4]



**Figure I.1** : Représentation d'un ferrofluide[5]

## I.3. Pourquoi la transition vers un ferrofluide ?

Comme dans le cas d'un nano fluide, la stabilité du ferrofluide est assurée par le surfactant enrobant la nanoparticule. Par ailleurs, une différence se présente sur la taille des nanoparticules. Les nanoparticules magnétiques possèdent généralement un diamètre de 10nm (valeur moyenne), et présentent une dispersion allant de 3à20nm.

Sous l'influence d'un champ magnétique, le ferrofluide présente des propriétés thermo physiques étonnantes. Ceci s'explique par la forte interaction entre les nanoparticules

magnétiques et le fluide de base. Ainsi, Le comportement magnétique des nanoparticules acquiert alors un comportement magnétique.

De ce fait, La valeur ajoutée des ferrofluides par rapport aux nanofluides pourrait être intéressante. En l'absence du champ magnétique, les ferrofluides présentes des propriétés similaires aux nanofluides. Lorsqu'un champ est appliqué, Le comportement du ferrofluide est modifié. Ceci nous amène à nous interroger sur l'apport du champ magnétique sur le comportement thermique et rhéologique des ferrofluides.

Dans ce qui suit, nous allons présenter des résultats relatifs à la conductivité thermique, au coefficient d'échange convectif et à la rhéologie des ferrofluides. Par la suite, nous présenterons quelques domaines d'application des ferrofluides. [4]

### **I.3.1.Comportement thermique et rhéologique des ferrofluides**

#### **a. Conductivité thermique des ferrofluides**

Comme le cas des nano fluides, la conductivité thermique d'un ferrofluide dépend de plusieurs paramètres à savoir : la fraction volumique des nanoparticules, leur taille, la nature du fluide de base, la nature surfactant et l'intensité du champ magnétique. De récentes études ont montrés une amélioration significative du coefficient de conductivité thermique des ferrofluides lorsqu'un champ magnétique est appliqué.

Les résultats du travail de Phillip et Al. Sont représentés sur (**Figure I.2**). Cette dernière représente le rapport entre la conductivité thermique du ferrofluide et celle du fluide de base. En augmentant l'intensité du champ magnétique, la conductivité thermique augmente. Le même raisonnement est valable pour la fraction volumique. L'amélioration ainsi obtenue atteint les 130% par rapport au

Fluide de base. Par ailleurs, Gavili et al. Ont mesuré la conductivité d'un ferrofluide avec un fluide porteur à base d'eau contenant 5% de nanoparticules de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Leurs résultats (**Figure I.2**)montrent une augmentation de 200% du coefficient de conductivité thermique.

Néanmoins, les mesures effectuées par ces auteurs indiquent une évolution de la conductivité thermique en fonction du temps. En effet, après la saturation du ferrofluide, la conductivité commence à chuter, ce phénomène n'est pas expliqué par les auteurs.

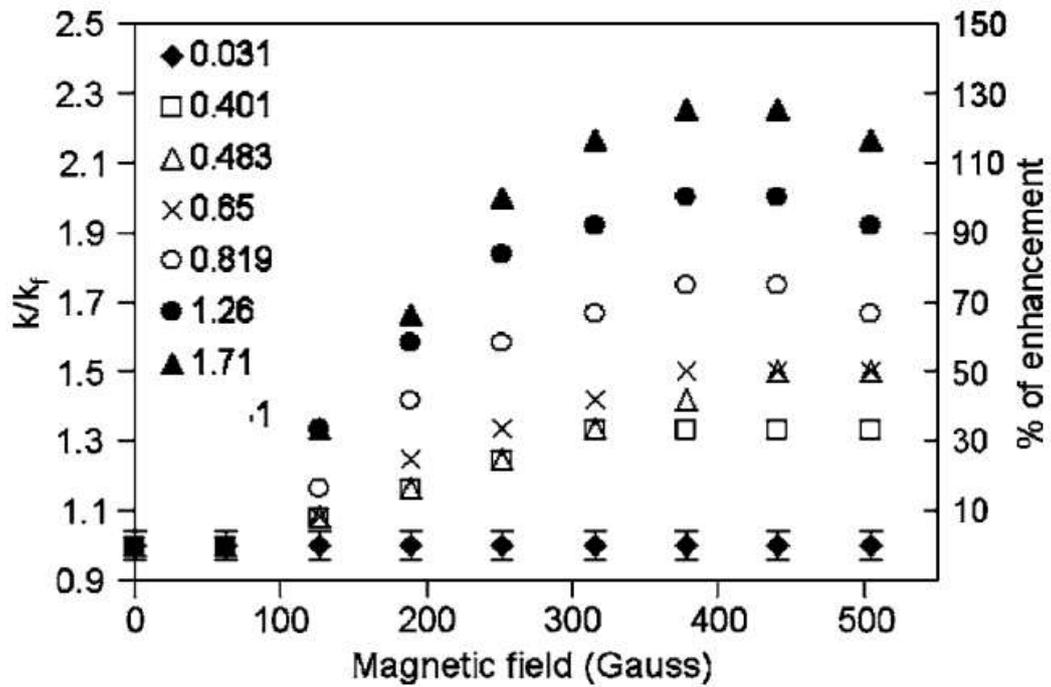


Figure II.2 : Conductivité thermique d'un Ferrofluide sous champ magnétique[6]

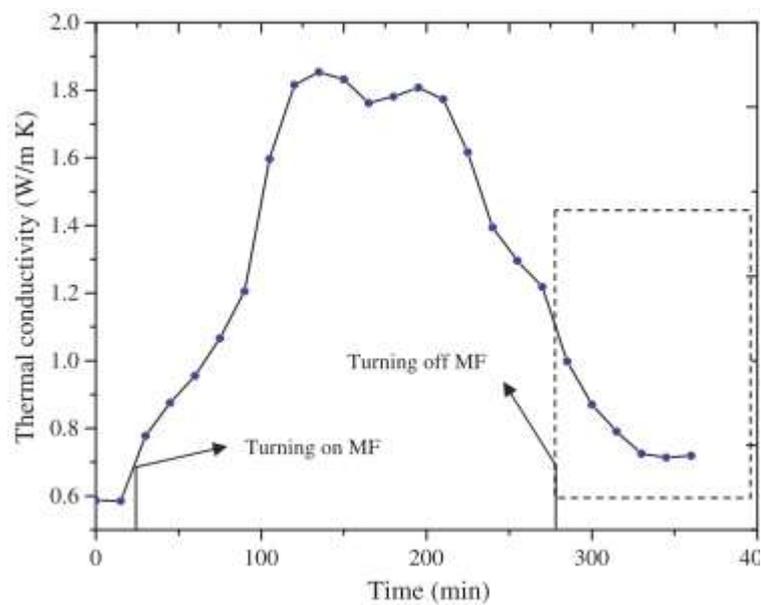


Figure III.3 : Conductivité thermique d'un Ferrofluide en fonction du temps[6]

## I.4. Comportement rhéologique des ferrofluides

### 1.4.1 Rhéologie des ferrofluides en l'absence de champ magnétique

Le comportement rhéologique et l'évolution de la viscosité dans les suspensions colloïdales sont connus depuis le début du siècle dernier. Lorsque le champ magnétique n'est pas appliqué, les ferrofluides présentent un comportement rhéologique similaire aux nano fluides. Les mesures effectuées sur les nanofluides et en particulier les ferrofluides ne permettent toutefois pas d'établir une loi de comportement commune pour tous ces fluides. Certaines Mesures montrent que le comportement suit une loi Newtonienne (viscosité qui ne varie pas avec le taux de cisaillement), tandis que d'autres, présentent des comportements non-Newtoniens.

Au sein de notre équipe de recherche, l'étude du comportement rhéologique des ferrofluides a été amorcée par la thèse de M. Petit Anton.

### 1.4.2 Rhéologie des ferrofluides sous champ magnétique

Dans le domaine de la rhéologie, une cellule magnétique a été construite et adaptée à un rhéomètre afin d'étudier le comportement rhéologique du ferrofluide sous un champ magnétique allant jusqu'à 0,8 T.

Cette démarche met en évidence l'influence du champ magnétique et de son intensité sur les forces de cisaillement. Dans le domaine des transferts de chaleur, une boucle thermo hydraulique pour l'étude de l'échange de chaleur en convection forcée avec une paroi à flux imposée sous champ magnétique a été mise au point.

Ce type de dispositif permet l'étude de plusieurs paramètres liés à la configuration spatiale du champ magnétique appliqué, à l'effet de l'uniformité du champ sur l'intensification des échanges de chaleur.

La compréhension et l'analyse de ces résultats sont consolidées par l'étude de la conductivité thermique du Ferrofluide sous champ magnétique. Un banc a été mis en place et a permis de mettre en évidence l'influence de la température ainsi que de l'intensité du champ magnétique sur cette grandeur.

À l'issue de ces caractérisations, l'application des Ferrofluides pour le refroidissement de composants électroniques de puissance est discutée par une mise en œuvre expérimentale. Ces essais ouvrent la voie pour de nouvelles recherches et permettent de mener des réflexions relatives aux domaines d'application des Ferrofluides.

### 1.4.3 Coefficient d'échange convectif et comportement rhéologique d'un ferrofluide

Le comportement rhéologique des ferrofluides est connu depuis longtemps.

Ces dernières années, des mesures expérimentales ont été réalisées avec des rhéomètres magnétiques. Les résultats montrent une augmentation de la viscosité dynamique sous champ magnétique uniforme et stationnaire.

La viscosité du ferrofluide est aussi dépendante de la température ainsi que de la fraction volumique.

De plus, l'augmentation de l'intensité de champ magnétique provoque une élévation de la viscosité. Les mesures effectuées par Odenbach (Figure I.4) sur un ferrofluide produit par Ferrotec présentant une fraction volumique de 7,2% et des nanoparticules en magnétite avec un diamètre moyen de 10nm, montrent des élévations de la viscosité dynamique allant jusqu'à 25% par rapport au cas sans champ magnétique. De plus, il est intéressant de voir que la viscosité diminue en fonction du taux de cisaillement, ce qui traduit un comportement non-newtonien de type rhéofluidifiant qui peut être intéressant pour des écoulements turbulents.

Le comportement rhéologique des ferrofluides peut donc changer

En présence de champ magnétique.

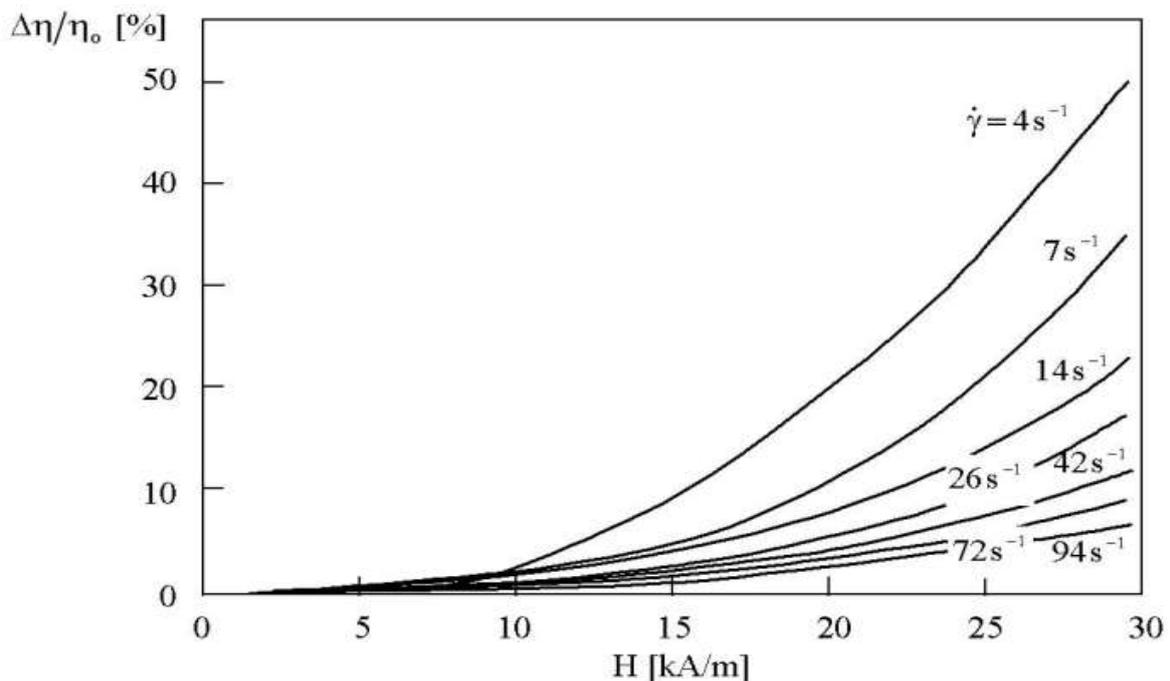
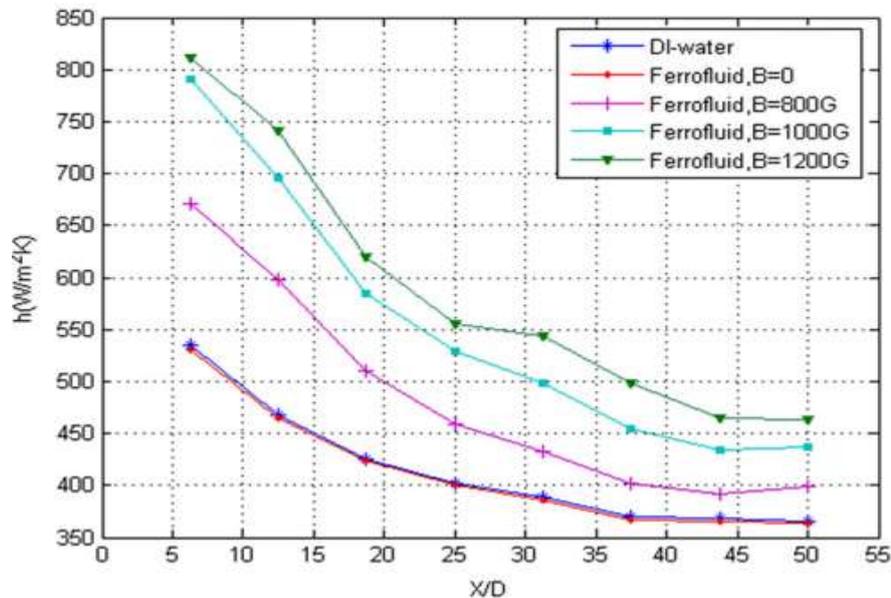


Figure IV.4 : Rhéologie du ferrofluide sous Champ magnétique [4]

Les études menées sur le coefficient d'échange convectif des ferrofluides sont prometteuses. Lajavardi et al. Présentent une étude expérimentale sur le coefficient d'échange convectif pour un ferrofluide à différentes concentrations résultats illustrés sur (**la Figure 1.5**).

Ils concluent que, grâce à l'augmentation de la concentration et du champ magnétique, la capacité thermique massique et la conductivité thermique du ferrofluide sont augmentées et par conséquent les échanges thermiques sont meilleurs



**Figure V.5 :** Évolution du coefficient de convection d'un ferrofluide sous champ. [6]

Avec :

X : la distance par rapport l'entrée

D : le diamètre de la section de test.

### I.5. Domaine d'application des ferrofluides

Une des principales applications des Ferrofluides ou des fluides magnétiques en général est la réalisation de joints sustentés magnétiquement. En effet, un fluide magnétique maintenu en place sous l'action d'un champ magnétique assure à la fois une bonne lubrification et une parfaite étanchéité, en particulier aux gaz. Ces joints magnétiques sont pratiquement inusables et peuvent prendre toutes les formes géométriques que sont capables de leur conférer un aimant permanent.

Les fluides magnétiques sont également largement utilisés dans l'électronique pour protéger les disques durs des ordinateurs ou encore dans les haut-parleurs pour amortir les vibrations.

Les fluides magnétiques organiques préparés dans un solvant volatil entrent également dans la composition des peintures magnétiques et dans certaines encres à très haute valeur ajoutée.

Les encres magnétiques sont par exemple utilisées pour marquer les billets de banque (pour détecter les faux billets), la bande magnétique des cartes bancaires, des badges et également la bande magnétique des billets de voyages (bus, trains, avions...).

Les propriétés optiques de biréfringence (différence d'indice optique selon l'intensité du champ magnétique) particulières aux fluides magnétiques peuvent être mises à profit pour mesurer la viscosité d'un liquide ou encore pour moduler un faisceau de lumière.

Les ferrofluides possèdent des propriétés rhéologiques qui dépendent de l'intensité du champ magnétique appliqué (fluides magnéto-rhéologiques).

Cette propriété offre des applications en particulier dans le secteur automobile où l'on met au point des amortisseurs capables de s'adapter automatiquement à la nature du terrain.

## 1.6. Mode de transfert de chaleur des ferrofluides

Les transferts thermiques sont d'une importance capitale dans la vie quotidienne et dans la « vie » de la planète. Il est nécessaire donc de décrire les modes de transfert de chaleur ; cette description est essentiellement basée sur une approche phénoménologique en utilisant les énoncés suivants :

- Un système non isotherme sera toujours le siège de transferts de chaleur internes.
- La chaleur passe spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

Les modes fondamentaux qui permettent le transfert de chaleur d'un endroit à une température donnée, à un autre endroit à une température différente, sont les suivants [7] :

### 1.6.1. La conduction

La conduction représente le processus de diffusion de la chaleur par le contact direct entre les particules du corps dont les différentes parties ne sont pas isothermes.

Autrement dit, la chaleur se propage au sein d'un même corps ou passe d'un corps à un autre sous l'influence d'un gradient de température bien qu'il n'y ait pas de transfert de matière. Dans les gaz en l'absence de la convection, la conduction s'effectue par la diffusion moléculaire : l'énergie se propage par contact direct entre molécules au gré de chocs aléatoires à l'échelle microscopique.

Dans un solide ou un fluide stationnaire, la vibration des atomes autour de leur position d'équilibre, se transmet de proche en proche permettant donc un transfert de chaleur.

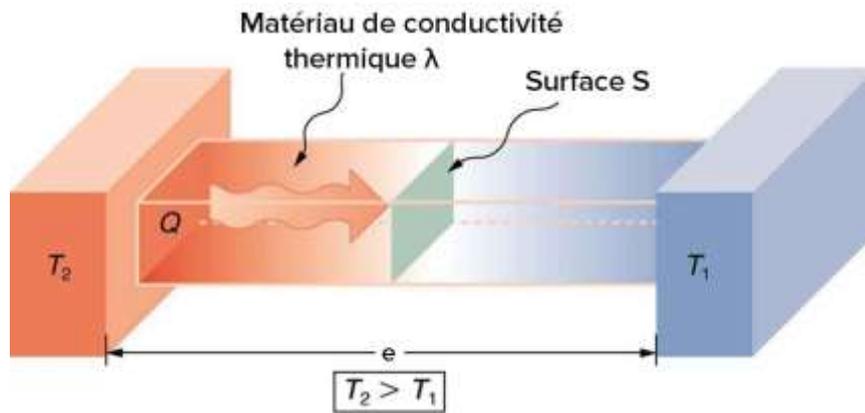


Figure VI.6 : La conduction[5]

### 1.6.2. La convection

La convection se réfère aux transferts thermiques qui ont lieu dans les fluides en mouvement macroscopique. Le transfert est déterminé par le mouvement des particules élémentaires du fluide, entre les zones ayant des températures différentes. Ce mouvement entraîne un mélange intense de particules qui échangent de l'énergie sous forme de chaleur et de quantité de mouvement entre elles. On en distingue trois types :

### 1.6.3. La convection

#### a- La convection naturelle

Contrairement à la convection forcée, le mouvement de fluide en convection naturelle n'est pas dû à un apport d'énergie mécanique extérieure, mais qu'il trouve sa source au sein même du fluide, sous l'effet conjugué de gradients de masse volumique et d'un champ de pesanteur. Les variations de masse volumique sont généralement dues à des gradients de températures ou à des gradients de concentration

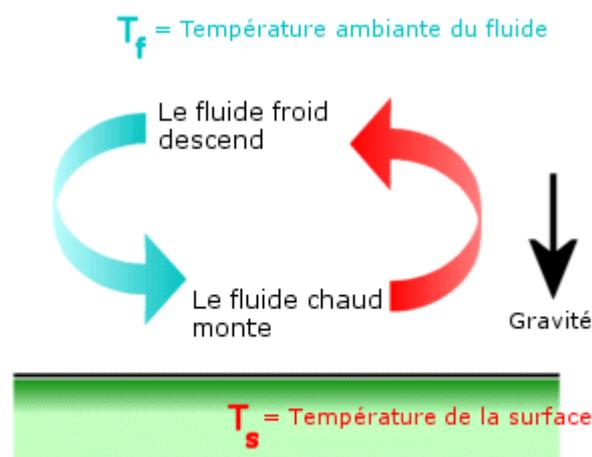
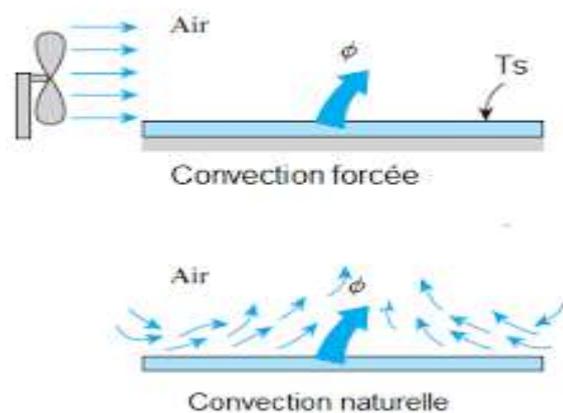


Figure VII.7 : La convection naturelle [5]

### b- La convection forcée

Pour laquelle le mouvement de fluide est dû à un apport externe d'énergie mécanique, sous l'action des forces extérieures créées par exemple par une pompe ou un ventilateur. Les gradients de densité se produisent aussi en convection forcée mais leurs effets sont à peu près nuls. Dans ce cas, le mouvement du fluide accélère le transfert de chaleur ; il est trouvé que pour une même surface d'échange et pour un même écart de température, la valeur de l'échange thermique est notablement améliorée dans le cas de la convection forcée que dans celui de la convection naturelle.

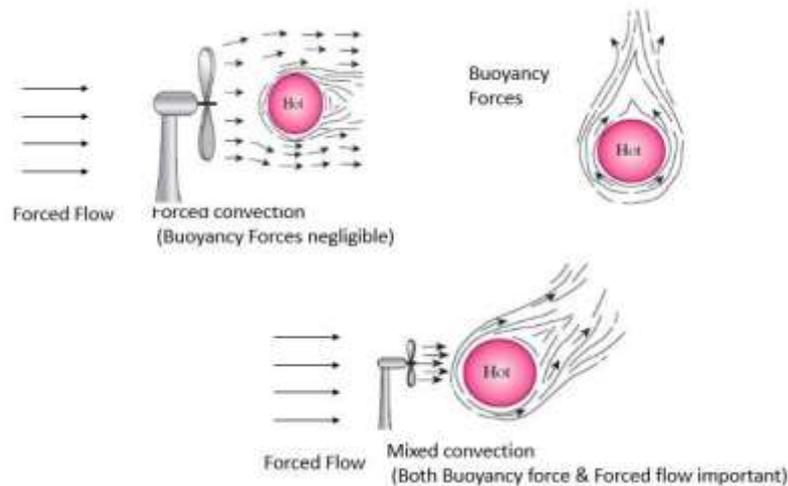


**Figure VIII.8 : La convection forcée [5]**

### c- La convection forcée

Le cas général de la convection présente un grand nombre de situations intermédiaires où les mécanismes de la convection naturelle et de la convection forcée coexistent avec des ordres de grandeur comparables ; les deux mécanismes vont s'aider ou se contrarier selon le sens relatif du mouvement forcé par rapport au mouvement dû aux effets de la pesanteur ; trois cas peuvent se présenter :

- Si l'écoulement forcé s'oppose aux forces de pesanteur, l'écoulement sera freiné, le transfert thermique diminue et on parle de la convection mixte « contrariée ».
- Si l'écoulement forcé est de même sens que les forces de pesanteur, les transferts thermiques s'amplifient alors et on parle de la convection mixte « aidée ».
- Si l'écoulement forcé est perpendiculaire à la direction des forces de pesanteur, il y aura une amélioration des échanges thermiques.



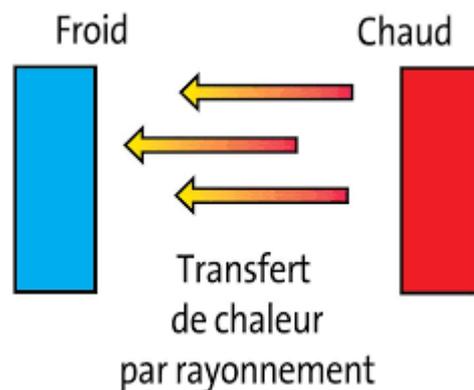
**Figure IX.9 :** La convection mixte [5]

#### 1.6.4. Le rayonnement

Par définition, le transfert d'énergie se fait par rayonnement électromagnétique.

Quelle que soit sa température (à partir de  $0^{\circ}\text{K}$ ), un corps émet un rayonnement thermique qui est plus ou moins intense selon la température de ce corps. Ce transfert de chaleur est le seul à se réaliser dans le vide tel est le cas du rayonnement solaire arrivant sur terre.

Néanmoins, celui-ci se réalise aussi dans les fluides (l'air par exemple) et dans certains solides (comme le verre) ; dans ce mode de transfert, l'échange de chaleur peut avoir lieu entre deux surfaces ou une surface et le fluide qui l'entoure par le moyen de longues ondes électromagnétiques.



**Figure X.10 :** Transfert de chaleur par rayonnement [5]

## I.7. Recherche bibliographique

- 1- L'écoulement de ferrofluide à travers un tube circulaire dans un régime laminaire est examiné en fonction de l'amplitude, de la direction et de la fréquence du champ magnétique appliqué.

Des expériences d'écoulement de ferrofluide à travers un canal rectangulaire avec une surface libre lorsqu'il est entraîné par un champ magnétique rotatif uniforme dans l'espace présentent un profil d'écoulement antisymétrique à travers.[8]

- 2- Le champ magnétique agissant sur les ferrofluides provoque des conversions microstructurales qui se traduisent par une modification de leur perméabilité.

Une méthode expérimentale est décrite pour les ferrofluides dans cet état afin d'examiner leur tenseur de perméabilité.

Nous appelons cela l'anisotropie diélectrique induite par le champ.

La contribution décrit la méthode de mesure du tenseur de permittivité.[9]

- 3- La propriété du ferrofluide de changer de forme sous un champ magnétique externe permet de créer de nouveaux produits ou d'améliorer des produits existants.

L'article étudie l'influence du ferrofluide sur le déplacement de la latte de support lorsqu'elle est exposée à une force magnétique d'intensité variable.[10]

- 4- Le comportement d'écoulement et les caractéristiques de transfert de chaleur du ferrofluide avec l'intensité du champ magnétique, les viscosités du ferrofluide et les conditions aux limites ont été analysés à travers les isothermes, les profils de vitesse et les nombres de Nusselt moyens et locaux. De plus, les nombres moyens de Nusselt ont augmenté avec l'augmentation des fractions volumiques de magnétite à toutes les intensités de champ magnétique en raison des effets combinés de la conduction thermique par la magnétite et de la force volumique magnétique.[11]

- 5- La dépendance de cette structure formation sur l'intensité du champ magnétique et la contrainte de cisaillement appliquée au fluide conduit à de fortes variations de viscosité et à l'apparition d'effets viscoélastiques dans les fluides.[12]

- 6- Les ferrofluides conservent leur état (liquide) sous l'action d'un champ magnétique même après saturation grâce à la taille nanoscopique (3 à 20 nm) des particules qui favorise le mouvement Brownien. Les ferrofluides sont donc des solutions colloïdales stables composées de nanoparticules magnétiques en suspension dans un liquide porteur.[3] [13]

- 7- Le matériau magnétique des nanoparticules et le fluide porteur des ferrofluides peuvent être de différentes natures. Nous présentons sur le tableau

Matériaux magnétiques		Fluides porteurs	
Métallique	Oxyde magnétique	Solvants organiques	Solvants polaires
Fe : fer	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> : magnétite	Kérosène	Eau
Co : cobalt	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : maghémite	Diester carboxylique	Méthanol
Ni : nickel	Fe <sub>2</sub> CoO <sub>4</sub> : ferrite cobalt	Huile de silicone	Ethanol
Fe-Co	Fe <sub>2</sub> MnO <sub>4</sub> : ferrite manganèse	Polyphényléthers	Ethylène glycol

**Tableau I.1 :** Matériaux et fluides porteurs utilisés dans les ferrofluide[6]

- 8- Le pique est dû au fait que les nanoparticules magnétiques s'alignent suivant les lignes de champ produites par les aimants à proximité. La hauteur et le nombre de pique dépend principalement de 3 paramètres : le gradient de champ magnétique, la tension superficielle du fluide et sa densité. Le deuxième et le troisième paramètre sont des caractéristiques propres des ferrofluide utilisé. On ne peut agir dessus mais ce sont bien ces forces qui assurent la cohésion du fluide et limitent la taille des piques.
- 9- Le premier paramètre dépend de l'aimantation de l'aimant et de la distance avec le ferrofluide. On remarque que plus l'aimant est porté près du ferrofluide, plus le nombre de piques est important. Il croise un nombre maximum de ligne de champ. Par contre la taille des piques en est diminuée. Il faut être à une certaine distance pour que celle-ci soit maximum.



**Figure XI.11 :** Les piques des ferrofluide[5]

- 10- À l'instar des fluides classiques (non chargés en particules : eau, huiles...), la viscosité des Ferrofluides sous champ magnétique est influencée par différents facteurs qui peuvent agir simultanément. On peut noter à titre d'exemple : la température, la fraction volumique, la nature du champ magnétique appliqué et son orientation, le type de particules utilisées, la nature du fluide de base...

# **Chapitre II**

**[Position du problème et  
formulation mathématique]**

# [Position du problème et formulation mathématique]

## II.1. Introduction

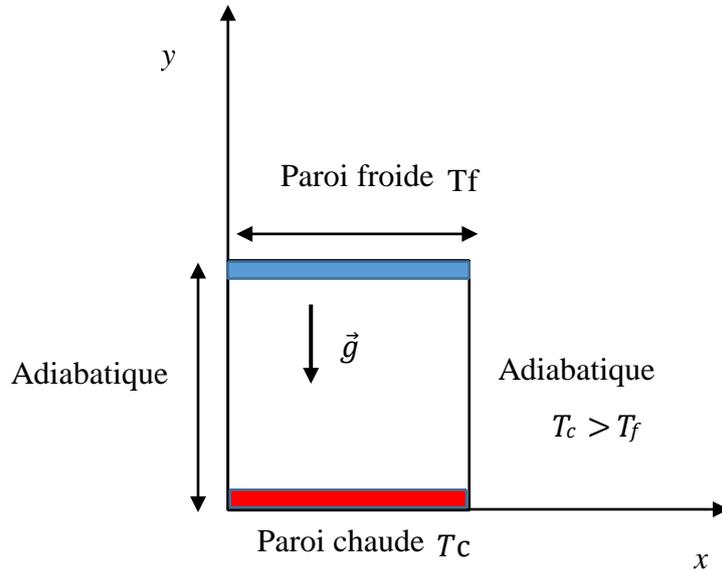
Le phénomène de la convection naturelle dans les cavités fermées occupe toujours une place importante dans les activités de recherche dans ces dernières années, cette importance est due essentiellement à la présence de ce phénomène dans différentes applications industrielles et plus particulièrement dans les processus de refroidissement des composants électroniques.

## II.2. Position du problème

Dans ce travail nous avons mené une étude numérique portant sur un problème de convection naturelle en cavité fermée de forme carrée. Notre géométrie est représentée en coordonnées cartésiennes remplie d'un fluide newtonien et incompressible. Cette cavité est soumise à un gradient de température horizontal ( $T_c$  est la température de la paroi chaude et  $T_f$  est la température de la paroi froide). Cet écart de température génère la force de poussé d'Archimède qui contribue avec la force de gravité à générer la convection naturelle.

Le transfert de chaleur s'effectue dans cette cavité par la convection naturelle où l'écoulement du fluide est régi par les lois, de conservation de masse, de la quantité de mouvement et la conservation d'énergie. La solution de cet ensemble des équations gouvernantes dépend des valeurs de plusieurs nombres adimensionnels tels que le nombre de Rayleigh et le nombre de Prandtl.

Le domaine physique considéré est schématisé sur **la figure II.1**. Il s'agit d'une cavité carrée de longueur caractéristique «  $c$  », formée de deux parois verticales qui sont portées respectivement à deux différentes températures chaude et froide, et deux parois verticales qui sont adiabatiques.



**Figure XII.1:** Géométrie de la cavité carrée fermée.

### II.3. Equations gouvernantes dimensionnelles dans le cas d'un ferrofluide

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

La formulation de ces équations sous la forme vectorielle est la suivante :

#### II.3.1. 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 :

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = \sigma \quad (\text{I.1})$$

Où  $\rho$  est la masse volumique et  $\vec{v}$  est le vecteur de vitesse.

#### II.3.2. Equation de quantité de mouvement

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\Delta\vec{V} \quad (\text{II.2})$$

#### II.3.3. Equation de conservation d'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\vec{F}_v = \rho\vec{y} + \vec{F}_x = \rho\vec{y} - \frac{v_{ff}\beta_0^2}{\rho_{ff}}\vec{v} \quad (\text{II.3})$$

Selon X :

$$U \frac{du}{dx} + V \frac{du}{dy} = -\frac{dp}{dx} + \nu_{ff} \left( \frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} \right) + 0 \quad (\text{II.4})$$

Selon Y :

$$U \frac{dv}{dx} + V \frac{dv}{dy} = -\frac{dp}{dy} + \nu_{ff} \left( \frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} \right) + \beta_{ff} g \Delta T - \frac{\nu_{ff} \beta_0^2}{\rho_{ff}} v \quad (\text{II.5})$$

## II.4. Hypothèses et variables sans dimensions

Afin de simplifier notre problème, nous avons retenues quelques hypothèses simplificatrices qui sont les suivantes :

- Le fluide (air) est newtonien et incompressible.
- Nous admettons que l'écoulement est bidimensionnel, permanent et laminaire.
- La dissipation visqueuse et le travail des forces de pression sont négligeables dans l'équation de l'énergie.
- Pas source de chaleur et absence d'échange par rayonnement au sein du fluide.
- La densité du fluide dans le terme des forces de volume varie linéairement avec la température  $T$  selon l'approximation de **J. Boussinesq**
- Les propriétés physiques du fluide dans les autres termes des équations sont constantes et déterminées à partir de la température de référence  $T_0$

L'hypothèse de Boussinesq suppose que la densité du fluide dans le terme des forces de volume varie linéairement avec la température, ce qui amène à la relation suivante :

$$\rho(T) = \rho_0(1 - \beta_t(T - T_0)) \quad (\text{II.6})$$

Où  $\rho_0$  est la densité à la température  $T_0$  de référence,  $\beta_t$  est le coefficient d'expansion volumique thermique exprimé ci-dessous :

$$\beta_t = \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{d\rho}{dT} \right)_{p,c}$$

## II.5.Équations sans dimensions

Les équations dimensionnelles sous la forme vectorielle sont exprimées dans les coordonnées cartésiennes avec la considération des hypothèses simplificatrices.

### . Variables adimensionnelles :

$$X = \frac{x}{H}; Y = \frac{y}{H}; \theta = \frac{T-T_f}{T_f-T_c}; U = u \frac{H}{\alpha_f};$$
$$V = v \frac{H}{\alpha_f}; \sigma_f = \frac{\mu_f}{\rho_f}; P = p \frac{H^2}{\rho_f \alpha_f^2}; P_r = \frac{v_f}{\alpha_f}; Ra = \frac{\beta_f g (T_c - T_f) H^3}{v_f \alpha_f}$$
$$Nu = \frac{\text{flux totale}}{K \frac{\Delta T}{L}}$$

### II.5.1.Équation de continuité

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

### II.5.2.Équation de quantité de mouvement

La projection de l'équation (II.2) sur les axes (x) et (y) avec l'introduction de l'approximation de Boussinesq nous donne les deux équations suivantes :

Selon x :

$$U \frac{du}{dx} + V \frac{du}{dy} = -\frac{\rho_f}{\rho_{ff}} \frac{dp}{dx} + \frac{v_{ff}}{v_f} P_r \left( \frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

Selon y:

$$U \frac{dv}{dx} + V \frac{dv}{dy} = -\frac{\rho_f}{\rho_{ff}} \frac{dp}{dy} + \frac{v_{ff}}{v_f} P_r \left( \frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{d^2 v}{dy^2} \right) \quad (\text{II.9})$$

### II.5.3.Équation d'Energie

$$U \frac{dT}{dx} + V \frac{dT}{dy} = \alpha_{nf} \left( \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

## II.6. Conditions aux limites

	$x_+$ [0,1]	$x_+$ [0,1]	conditions
Paroi inférieure	$0 \leq x_+ \leq 1$	$y_+ = 0$	$T=0 ; U=V=0$
Paroi supérieure	$0 \leq x_+ \leq 1$	$y_+ = 1$	$\alpha=0 ; U=V=0$
Paroi gauche	$x_+ = 0$	$0 \leq y_+ \leq 1$	$U=V=0 ; T=T_f$
Paroi droite	$x_+ = 1$	$0 \leq y_+ \leq 1$	$U=V=0 ; T=T_C$

## II.7. Méthode et Simulation numérique

La méthode numérique relativement récente et originale. Il est important de connaître ses performances et l'étendue de son application dans le domaine de la modélisation et la simulation des écoulements thermo-fluides, en la comparant avec l'une des méthodes numériques classiques utilisées c'est la méthode des volumes finis (MVF)

Dans la simulation par la méthode des volumes finis, le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés le volume de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles, décrites au chapitre précédent, sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers (volume de contrôle) contenant un nœud appelé le nœud principal.

Dans notre travail, nous avons effectué une simulation numérique, qui acquiesce la résolution des équations de transport par la méthode des volumes finis. Des paramètres adaptés d'écoulement et des conditions aux limites adéquates sont utilisés. Nous avons réalisé le maillage par le pré-logiciel.

# **Chapitre III**

**[Simulation Numérique]**

# [Simulation Numérique]

## III. 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté nos résultats de simulation numérique obtenus à l'aide de la programmation direct d'un code de calcul en langage Fortran qui est basé sur la méthode des volumes finis. En premier lieu, nous avons effectué une étude de maillage pour choisir le maillage le mieux adapté pour notre étude.

Une validation numérique est effectuée pour comparer nos résultats avec d'autres travaux similaires est qui représentent une référence dans ce domaine. Pour toutes les simulations réalisées, nous avons adopté un nombre de Prandtl( $Pr$ ) = **6.1** (Ferrofluide), un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^5$  pour un écoulement bidimensionnel, laminaire et permanent.

Propriété	eau ( $H_2O$ )	magnétite ( $Fe_3O_4$ )
$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	997.1	5180
$C_p$ , J/(kg. K)	4179	670
$K$ , W/(m. K)	0.613	6
$\beta \cdot 10^{-5}$ , $K^{-1}$	21	1.3
$\sigma$ , S/m	0.05	25,000
$N$	$9.09 \times 10^{-4}$	–

**Tableau III.1** : propriétés thermophysiques du fluide de base et des nanoparticules de magnétite[14]

Pour $\Phi$	0.04	0.06	0.08
L(m)	0.01	0.01	0.01
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	30	30	30
$\beta_{ff}(1/\text{k})$	0.00017488	1248.074	1228.132
$\rho_{ff}(\text{kg}/\text{m}^3)$	1164.416	1248.074	1228.132
$C_{pff}$	3553.34	3305.13299	3347.1853
$k_{ff}(\text{w}/\text{m}\cdot\text{k})$	0.66952	0.69911046	0.7296344

**Tableau III.2:** Propriétés du ferrofluide en différents  $\Phi$

### III.2. Etude de maillage :

Dans notre étude, nous avons choisi un maillage carré uniforme de dimension  $m \times m$  nœuds dans tout l'espace de calcul. Nous avons exécuté le code de calcul pour différent nombre de nœuds variant de  $60 \times 60$  jusqu'à  $200 \times 200$  et les différents résultats sont montrés sur les tableaux (III.3, III.4 et III.5)

Donc nous mettons en évidence par cette étude de maillage, l'indépendance des résultats obtenus des maillages considérés pour un choix bien optimisé entre temps de calcul et précision. A partir de ces résultats nous avons opté pour un maillage de dimension  $140 \times 140$  qui représente un bon rapport précision et temps de calcul.

Ra	60X60	80X80	100X10	120X12	140X14	160X16	180X18	200X20
			0	0	0	0	0	0
$10^3$	0.03614 53							
$10^4$	0.03614 538	0.03614 532	0.03614 531	0.03614 53	0.03614 53	0.03614 53	0.03614 53	0.03614 53
$10^5$	0.03616 152	0.03614 725	0.03614 625	0.03614 589	0.03614 567	0.03614 551	0.03614 543	0.03614 538

**Tableau II.3 :** Caractéristiques de nombre de Nusselt pour différents maillages ( $\Phi=0.04$ ,  $Pr= 6.1$ )

Ra	60X60	80X80	100X100	120X120	140x140	160X16	180X18	200X20
						0	0	0
$10^3$	0.03461 542							
$10^4$	0.03461 551	0.03461 545	0.034615 43	0.03461 542	0.03461 542	0.03461 542	0.03461 542	0.03461 542
$10^5$	0.03465 541	0.03461 755	0.034616 46	0.03461 606	0.03461 584	0.03461 565	0.03461 557	0.03461 551

**Tableau III.4 :** Caractéristiques de nombre de Nusselt pour différents maillages ( $\Phi=0.06$ ,  $Pr= 6.1$ )

Ra	60X60	80X80	100X10	120X120	140X140	160X160	180X180	200X200
			0					
$10^3$	0.03316 73	0.03316 73	0.03316 73	0.03316 73	0.03316 73	0.03316 73	0.03316 73	0.03316 73
$10^4$	0.03316 738	0.03316 732	0.03316 731	0.03316 73	0.03316 7299	0.03316 7295	0.03316 7295	0.03316 7295
$10^5$	0.03320 0201	0.03316 9277	0.03316 826	0.03316 7891	0.03316 7683	0.03316 7511	0.03316 7429	0.03316 7373

**Tableau IV.5 :** Caractéristiques de nombre de Nusselt pour différents maillages ( $\Phi=0.08$ ,  $Pr= 6.1$ )

### III.3. Représentation graphique des tableaux (III.3, III.4 et III.5) :

Pour une meilleure visibilité de la variation des résultats obtenus en fonction du maillage nous avons représenté graphiquement les différentes valeurs qui sont, la variation de la fonction de courant  $|\psi_{max}|$ , celle du nombre de Nusselt moyen

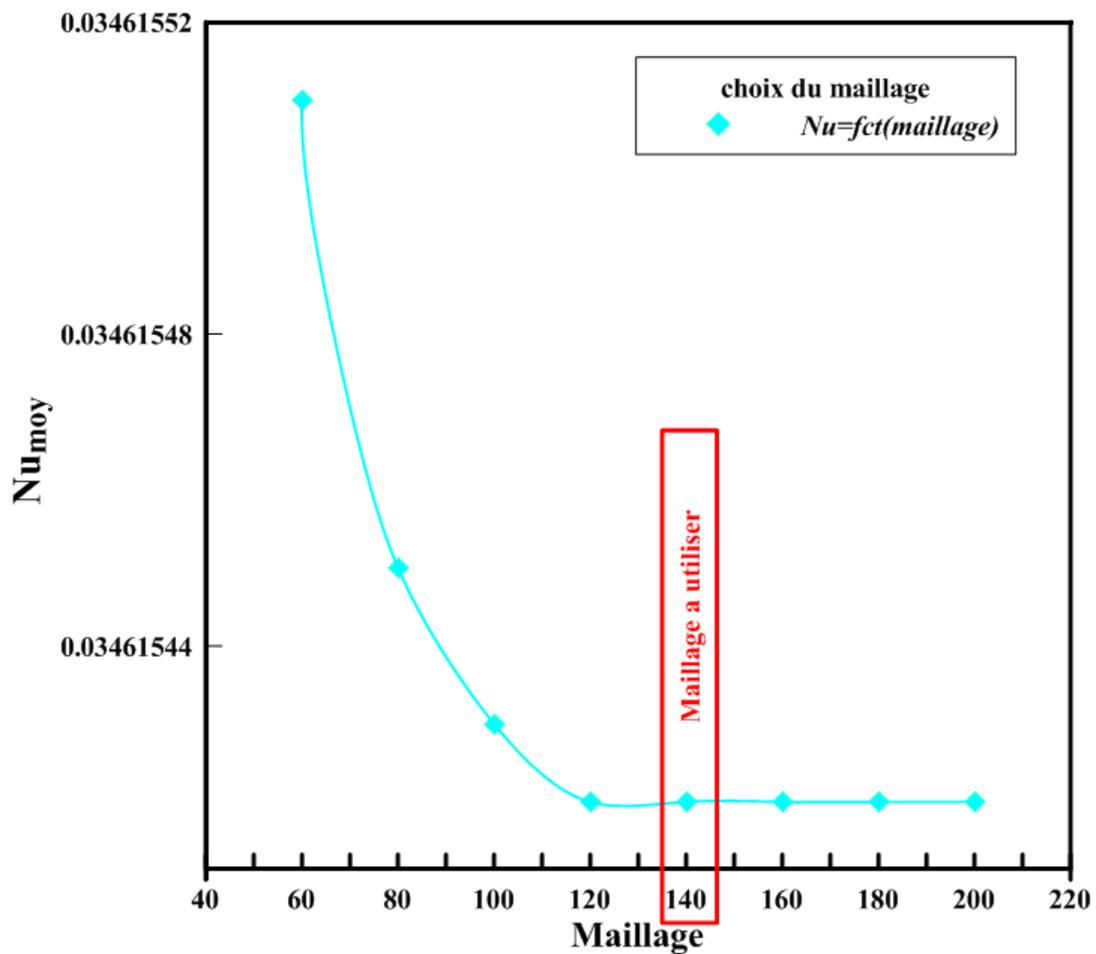


Figure III.1 : Variation du nombre de Nusselt moyen pour  $\Phi=0.06$ ,  $Ra=10^4$

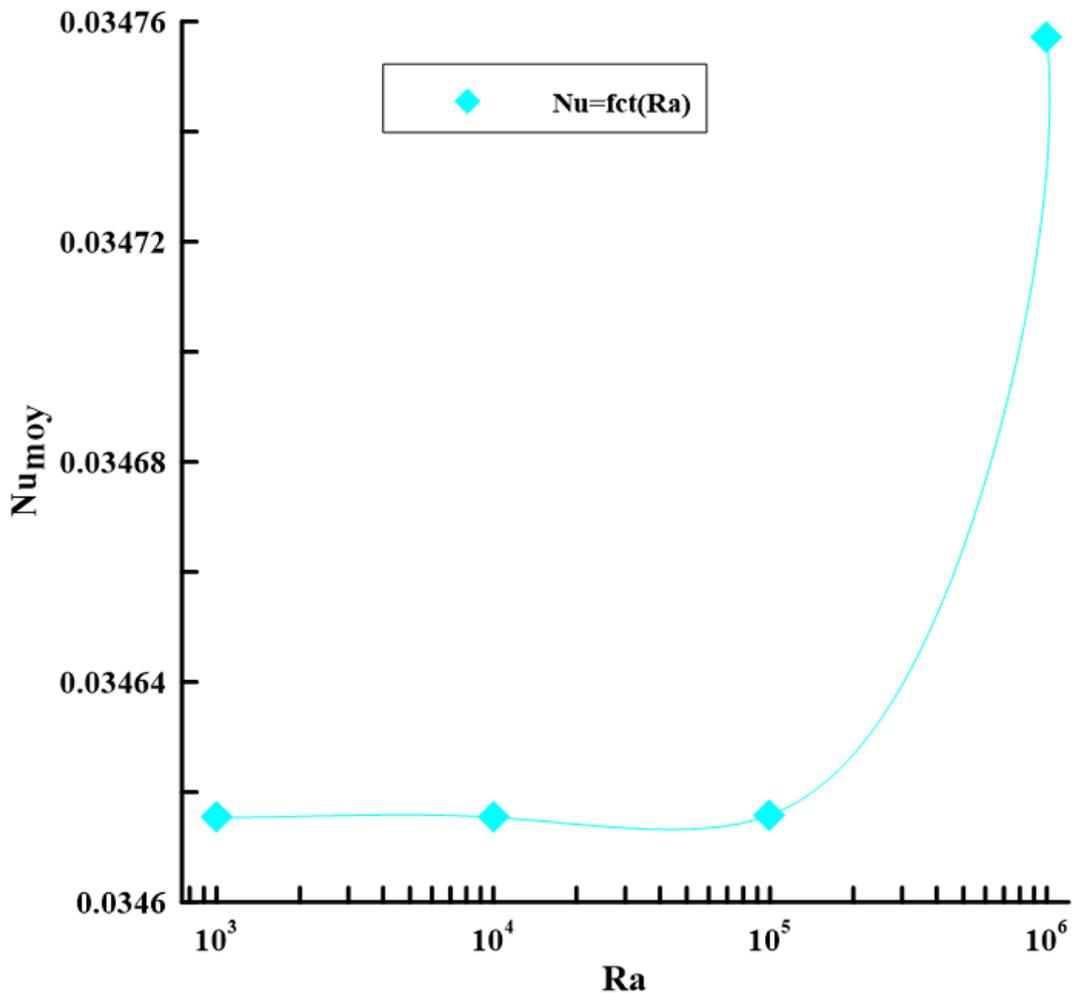
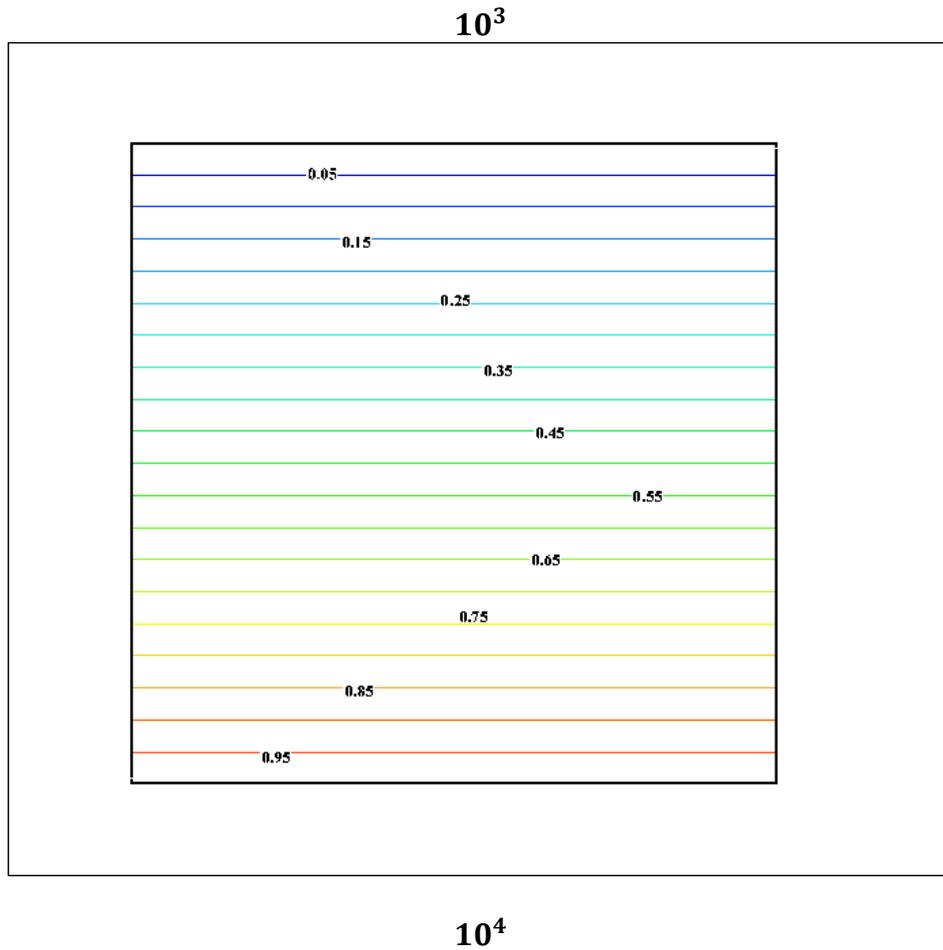
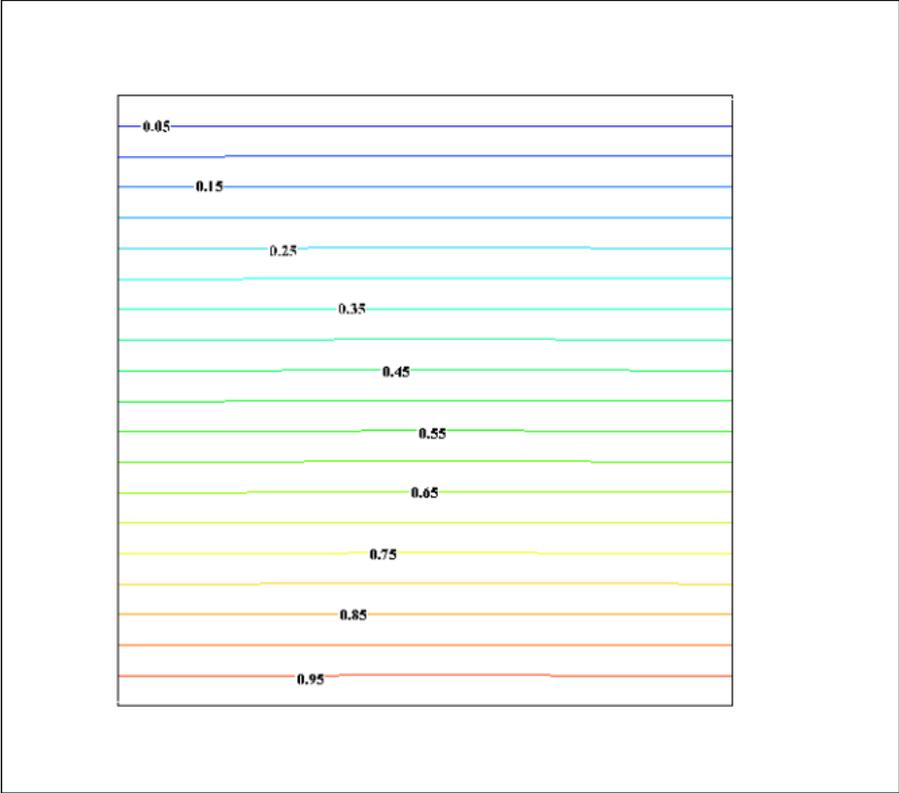


Figure III.2 : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de Ra

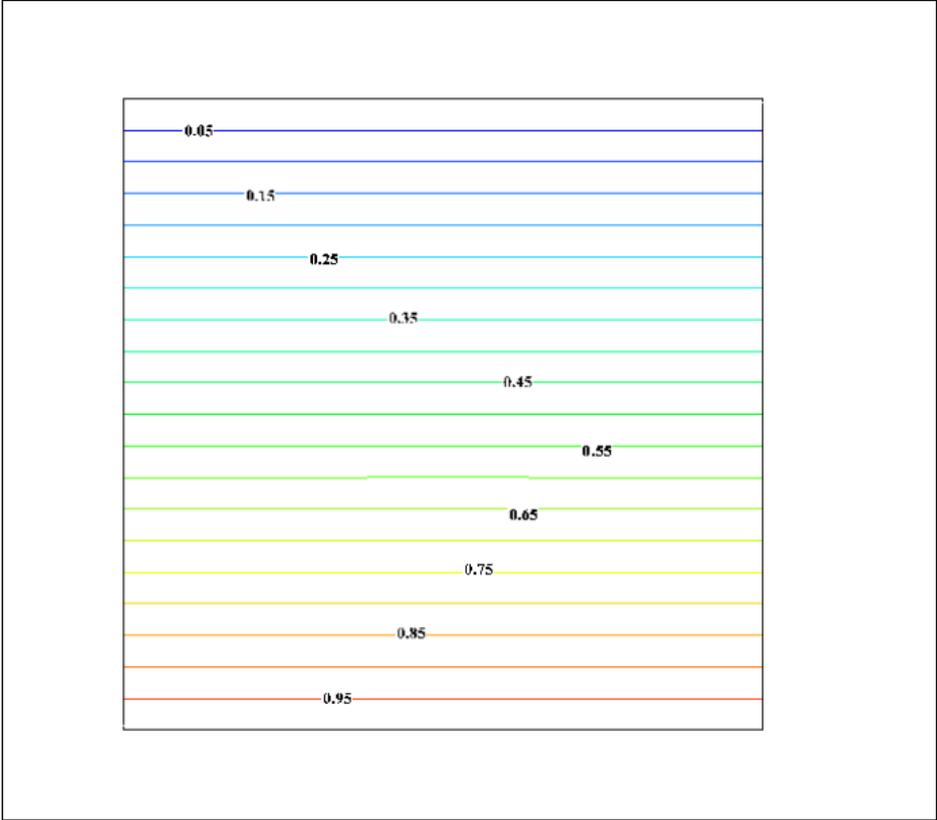
#### III.4.Effet de Nombre de Rayleigh :

Pour examiner l'effet de nombre de Rayleigh sur la convection naturelle dans une cavité carrée remplie de ferrofluide, nous avons exécuté le programme de calcul avec les paramètres suivants :  $Pr=6.1$ ,  $Ra$  : varie de  $10^3$  à  $10^6$ , et l'écoulement est laminaire et permanent.

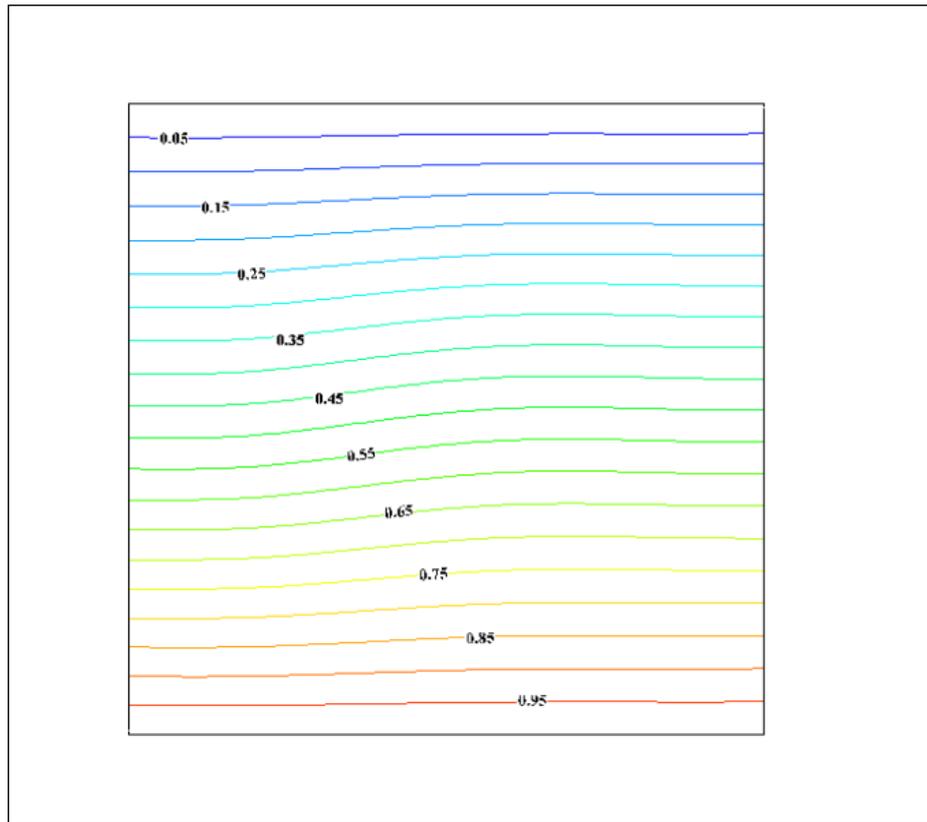
**III.4.1 Sur les isothermes, les lignes de courant :**



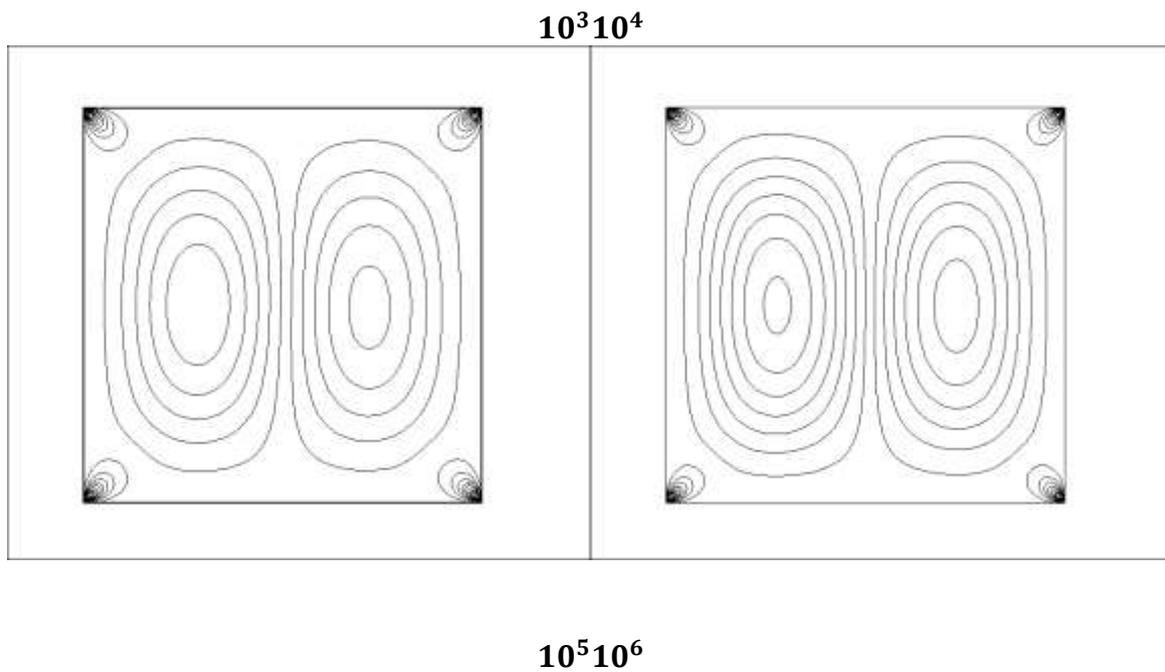
$10^5$

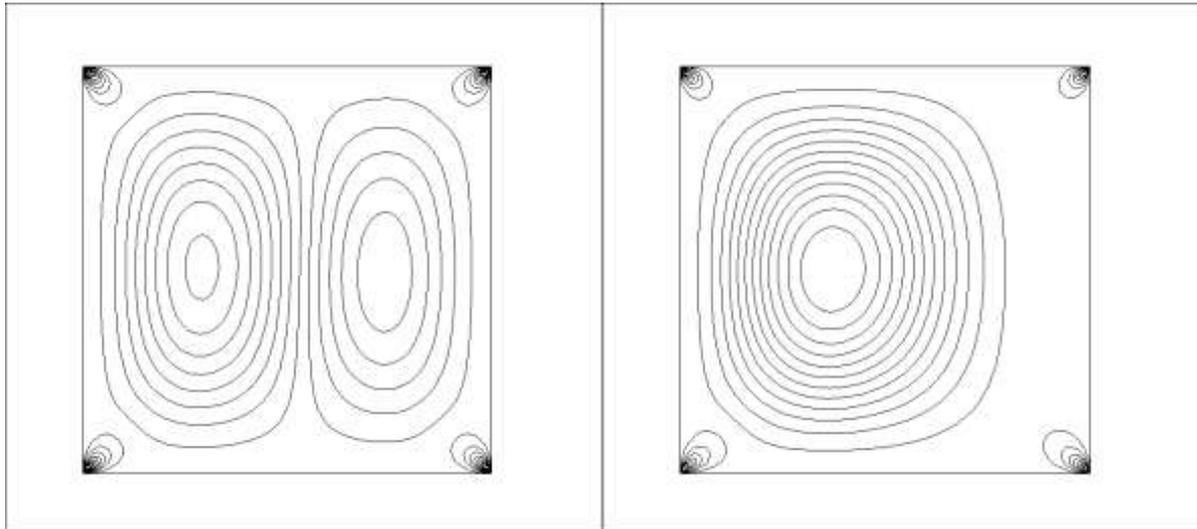


$10^6$



**Figure III.3 :**Les isothermes pour  $\Phi=0.06$  et Ra de  $10^4$  à  $10^6$





**Figure III.5 :** Les lignes de courant pour  $\Phi=0.06$  et  $Ra$  de  $10^3$  à  $10^6$

### III.5.Discussion :

Nous avons représenté, respectivement, pour les cavités verticale et horizontale, les champs des isocourants, des isothermes pour un nombre de Rayleigh magnétique varié dans une gamme de valeur comprise entre  $10^3$  et  $10^6$

L'analyse des figures montre qu'il y a une intensification de l'écoulement du ferrofluide lorsque le nombre de Rayleigh magnétique augmente.

On constate que l'écoulement est d'abord structuré en une cellule, puis pour un nombre de Rayleigh supérieur à  $10^5$ , l'écoulement devient bicellulaire.

Dans le domaine  $[10^3, 10^4]$ , l'évolution des isothermes, montre une atténuation de l'intensité de l'écoulement.

Les isothermes sont des droites horizontales parallèles aux parois isothermes traduisant, ainsi, un mode de transfert de la chaleur par diffusion thermique uniquement et ce, quelle que soit la valeur de  $Ra \geq 10^5$

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle laminaire et permanente dans une cavité fermée. La configuration géométrique du modèle physique étudiée représente une cavité carrée avec des conditions aux limites de type Dirichlet (température constante) pour les parois verticales et de type Newman (flux de chaleurs nuls) pour les parois horizontales.

Le modèle mathématique est représenté par les équations de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie dans les coordonnées cartésiennes pour le cas bidimensionnel. On a l'approximation de Boussinesq et des hypothèses simplificatrices sont adoptées afin de simplifier le système d'équations. La discrétisation des équations est réalisée par la méthode des volumes finis où le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés le volume de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles.

Dans notre travail, nous avons effectué une simulation numérique, qui acquiesce la résolution des équations de transport par la méthode des volumes finis. Des paramètres adaptés d'écoulement et des conditions aux limites adéquates sont utilisés. Nous avons réalisé le maillage par le pré-logiciel.

Les résultats obtenus représentent l'influence du nombre de Rayleigh sur la structure de l'écoulement généré par la convection naturelle ainsi que sur le transfert thermique et interprétés respectivement par la fonction de courant  $\psi$  en fonction des nombres de Nusselt moyen et local.

On a fait varier le nombre de Rayleigh de  $10^3$  jusqu'à  $10^5$ , ou nous avons constaté que au-delà de cette dernière valeur notre code présente une instabilité pendant le calcul. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du nombre de Rayleigh, fait accélérer l'écoulement dans la cavité et le transfert de chaleur passe d'un mode conductif pour les faibles valeurs de  $Ra \leq 10^3$  à un mode convectif sous l'effet de l'intensification de la convection naturelle et par conséquent le taux d'échange de la chaleur entre la paroi et le fluide augmente ce qui se traduit par la diminution des nombres de Nusselt moyen.

Comme suites futures de notre travail et afin de rendre le code de calcul élaborer en fortran plus stable il est recommandé de faire des améliorations sur le maillage, la sous-relaxation ainsi que le choix des schémas de discrétisation.

Il est possible également d'étendre cette étude à d'autres formes et configurations plus complexes, d'élargir le domaine de simulation en trois dimensions et d'étudier le problème dans le cas d'écoulement instationnaire en régime turbulent

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

[1] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, 2nd éd., vol. 1. Oxford: Clarendon press, 1881.

[2] S. U. S. Choi et J. A. Eastman, « Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles », *ASME-Publ.-Fed*, vol. 231, p. 99–106, 1995.

[3] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman et A.S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer* sixième édition (2006).

[4] Etudes des ferrofluides et leurs applications à l'intensification des transferts de chaleur par convection forcée, de WahidCherief 7 aout 2006 universitegrenoblealpes.

[5] <https://google.com>

[6] WahidCherief. Etude des ferrofluides et de leurs applications à l'intensification des transferts de chaleur par convection forcée. Energie électrique. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. ffNNT:2015GREAT102ff. Fftel-01259168ff

[7] A.Bejan et A. Krauss, *Heattransferhandbook*, chapter 7 naturalNconvection, (2003)525-556

[8] Thomas A.Franklin , Marcus Zahn , Arthur C.SMITH *Ferrofluid Flow Phenomena* 2003 Submitted to the Department of Electrical Engineering and Computer Science in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering and Computer Science at the MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY .

[9] An Approach to measurement of permeability/permittivity tensor of ferrofluides. Daniel Mayer, published on line 10 novembre 2015 Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology.

[10] Research of physical properties of ferrofluid Klevinskis, Andrius; Bučinskas, Vytautas  
7th International conference &quot;Mechatronic Systems and Materials&quot; (MSM 2011),  
7-9 July 2011, Kaunas, Lithuania

[11] Thermophysical Characteristics of the Ferrofluid in a Vertical Rectangle  
Jae-Hyeong Seo, Byoung-Hee You, Sang-Seuk Kwon, Dong-Yeon Lee, and Moo-Yeon Lee  
Received: 7 November 2014 / Accepted: 13 February 2015 / Published: 16 February 2015

[12] Recent progress in magnetic fluid research, S Odenbach ZARM, University of Bremen,  
Am Fallturm, D-28359 Bremen, Germany Received 5 February 2004 Published 30 July 2004

[13] R. Gowda, H. Sun, P. Wang, M. Charmchi, F. Gao, Z. Gu, et B. Budhlall, « Effects of  
Particle Surface Charge, Species, Concentration, and Dispersion Method on the Thermal  
Conductivity of Nanofluids », *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2010, p. e807610, janv. 2010.

[14] Hydromagnetic flow of ferrofluid in an enclosed partially heated trapezoidal  
cavity filled with a porous medium Z.H. Khan, O.D. Makinde, M. Hamid, Rizwan Ul-Haq,  
W.A. Khanf , *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 499 (2020) 166241.

## Résumé

Ce travail concerne une étude numérique de la convection naturelle bidimensionnelle, laminaire et permanente dans une cavité carrée fermée remplie de ferrofluide. Le modèle mathématique est représenté par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie. Ce modèle est discrétisé par la méthode des volumes finis. Le code de calcul élaboré en utilisant un logiciel de la simulation numérique. Les résultats obtenus montrent un fort couplage entre le nombre de Rayleigh et l'intensité de l'écoulement ainsi le taux de transfert de chaleur.

**Mots clés :** convection naturelle, cavité carrée, simulation numérique, ferrofluide,

---

## Abstract

This work concerns a numerical study of two-dimensional, laminar and permanent natural convection in a closed square cavity filled with ferrofluid. The mathematical model is represented by the equations of continuity, momentum and energy. This model is discretized by the finite volume method. The computer code developed using digital simulation software.

The results obtained show a strong coupling between the Rayleigh number and the intensity of the flow as well as the rate of heat transfer.

**Keywords:** natural convection, square cavity, numerical simulation, ferrofluid

## Résumé

Ce travail concerne une étude numérique de la convection naturelle bidimensionnelle, laminaire et permanente dans une cavité carrée fermée remplie de ferrofluide. Le modèle mathématique est représenté par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie. Ce modèle est discrétisé par la méthode des volumes finis. Le code de calcul élaboré en utilisant un logiciel de la simulation numérique. Les résultats obtenus montrent un fort couplage entre le nombre de Rayleigh et l'intensité de l'écoulement ainsi le taux de transfert de chaleur.

**Mots clés :** Mots clés : convection naturelle, cavité carrée, simulation numérique, ferrofluide,

---

## Abstract

This work concerns a numerical study of two-dimensional, laminar and permanent natural convection in a closed square cavity filled with ferrofluid. The mathematical model is represented by the equations of continuity, momentum and energy. This model is discretized by the finite volume method. The computer code developed using digital simulation software. The results obtained show a strong coupling between the Rayleigh number and the intensity of the flow as well as the rate of heat transfer.

**Keywords:** natural convection, square cavity, numerical simulation, ferrofluid,