

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : **Energétique**

Par :

BENKERROU Nadia

IKHERBOUCHEN Damia

Thème

Contribution à l'étude du comportement des Ferrofluides sous un champ magnétique uniforme : Modélisation et simulation.

Soutenu le 20/06/2023 devant le jury composé de :

Mr. M'HAMDI

Président

Mr. ADNANI

Rapporteur

Mr. MENDIL

Examineur

Année Universitaire 2022-2023

REMERCIEMENT

Toute la gratitude et le merci à Dieu de nous avoir donné la force, le courage et la patience de mener à bien ce modeste travail. Notre profonde gratitude et nos remerciements les plus chaleureux vont particulièrement à notre encadreur **Mr ADNANI Massinissa** enseignant à l'université Abderrahmane Mira de Bejaia, de nous avoir suivi et dirigé tout au long de la réalisation de ce travail. Nous le remercions pour sa disponibilité permanente, pour son encouragement, son orientation efficace et pour ses précieux conseils qui ont servi à enrichir ce mémoire. Notre gratitude et nos profondes reconnaissances à l'égard de nos parents pour leurs soutiens durant tout notre cursus, Mes remerciements s'adressent aussi aux membres de jury pour avoir accepté d'évaluer le présent mémoire.

Nous remercions toutes personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à la finalisation de ce travail, enfin nos remerciements à tous les enseignants du département génie mécanique qui ont contribué à notre formation.

DEDICACE

Nous dédions ce modeste travail :

A nos parents qui ont toujours été là pour nous

A nos frères et nos familles pour leur soutien

A notre ami proche Elhocine BACHA qui nous a beaucoup aidé à la réalisation de ce travail

A tous nos amis et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail

Nadía & Damía

Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
NOMENCLATURE.....	vii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les ferrofluides et synthèse bibliographique.....	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Généralités sur les ferrofluides.....	4
I.3. La composition des ferrofluides.....	8
I.4. Propriétés thermophysiques	9
I.4.1. La masse volumique.....	9
I.4.2. La chaleur spécifique.....	9
I.4.3. Le coefficient d'expansion thermique.....	10
I.4.4. Conductivité thermique.....	10
I.4.5. La viscosité dynamique.....	11
I.5. La magnétohydrodynamique.....	11
I.6. Synthèse bibliographique.....	12
I.7. Conclusion	19
Chapitre II : Formulation Mathématique.....	21
II.1. Introduction.....	21
II.2. Formulation Physique.....	21
II.3. Formulation Mathématique	22
II.3.1. Equations gouvernantes.....	22
II.3.2. Les hypothèses simplificatrices du problème.....	23
II.3.3. Équations dimensionnelles.....	23
II.3.4. Equations adimensionnelles.....	24

Sommaire

II.3.5. Groupement Adimensionnel.....	25
II.3.6. Conditions aux limites.....	26
II.4. Méthode Numérique.....	27
II.5. Conclusion.....	27
Chapitre III : Résultats et discussion.....	29
III.1. Introduction.....	29
III.2. Choix du maillage.....	29
III.3. Les propriétés thermophysiques du fluide de base et des nanoparticules de magnétite.....	30
III.4. Validation des résultats.....	30
III.5. Résultats et Discussions.....	33
III.5.1. Effet de l'intensité du champ magnétique.....	33
a. Les lignes de courant.....	33
b. Les lignes isothermes.....	34
c. Nombre du Nusselt local.....	36
d. Profil de vitesse.....	36
III.5.2. L'effet de la variation du nombre de Rayleigh.....	37
III.5.3. Influence de la concentration des nanoparticules ϕ	38
III.5.4. L'effet du rapport de forme.....	38
a. Les lignes de courant.....	39
b. Les lignes isothermes.....	39
c. Nombre du Nusselt local.....	40
III.6. Conclusion.....	42
Conclusion Générale.....	44

Liste des figures

Figure I-1 : Instabilité magnétique de pic lors de l'approche d'un aimant dans le cas du ferrofluide organique surfacé.....	4
Figure I-2 : Stephen Papell développant un ferrofluide pour la NASA en 1963.....	5
Figure I-3 : une figure qui représente les joints de ferrofluide dans un haut-parleur.....	6
Figure I-4 : Schéma du principe de la délivrance de médicaments en utilisant les nanoparticules magnétiques.....	7
Figure I-5 : représentation artistique de l'effet labyrinthe.....	7
Figure I.6 : la magnétite.....	8
Figure I-7 : Schéma de principe du système physique.....	12
Figure I-8 : Section de la géométrie à l'étude et la position de l'aimant.....	13
Figure I- 9 : Schéma de principe d'une cavité en forme de C remplie d'un ferrofluide cobalt-kérosène.....	13
Figure I-10 : Représentation typique de modèles physiques avec : (a) des gradients de champ magnétique négatifs et (b) positifs, et (c) une section transversale annulaire.....	14
Figure I-11 : Mise en œuvre du champ magnétique dans le système PVT.....	15
Figure I-12 : Feuille d'étirement ($\alpha > 0$).....	16
Figure I-13 : Schéma de principe du dispositif expérimental utilisé pour mesurer la Conductivité thermique du ferrofluide.....	17
Figure I-14 : Schéma de principe du PTSC et du ruban torsadé rotatif.....	18
Figure II.1 : Schémas de la géométrie considérée et les conditions aux limites associées.....	21
Figure III.1 : nombre de Nusselt moyen en fonction de la Grille.....	29
Figure III.2 : Comparaison des lignes de courant pour $Ri=1$ et différentes valeurs de Hartmann...31	
Figure III.3 : Comparaison des lignes isothermes pour $Ri=1$ et différentes valeurs de Hartmann.....	32
Figure III.4 : lignes de courant pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^4$ et $\phi=0.01$	33

Liste des figures

Figure III.5 : lignes de courant pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^5$ et $\phi=0.01$	34
Figure III.6 : lignes isothermes pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^4$ et $\phi=0.01$	35
Figure III.7: lignes isothermes pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^5$ et $\phi=0.01$	35
Figure III.8 : Effet du nombre de Hartmann (Ha) sur le nombre de Nusselt local (Nu) avec $\phi=0.01$ (a) $Ra=10^4$ (b) $Ra=10^5$	36
Figure III.9: Profil de la Vitesse Horizontale à $Y=1$ avec $\phi=0.01$ $Ra=10^4$	37
Figure III .10 : Effet de la variation du nombre de Rayleigh sur Nusselt local avec $\phi=0.01$, (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$	37
Figure III .11 : Effet de la fraction volumiques (ϕ) sur le nombre de Nusselt local (Nu), le long de la paroi chaude inférieure avec $Ha=10$ et $Ra=10^4$	38
Figure III.12 : Lignes de courant pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^4$, $\phi=0.01$ et $A=2$	39
Figure III.13 : Lignes isothermes pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^4$, $\phi=0.01$ et $A=2$	40
Figure III.14 : Effet du nombre de Hartmann (Ha) sur le nombre de Nusselt local (Nu) avec $\phi=0.01$, $Ra=10^4$ et $A=2$	41
Figure III.15 : Comparaison de l'effet du nombre de Hartmann (Ha) sur le nombre de Nusselt local (Nu) avec $\phi=0.01$ $Ra=10^4$ entre les 2 cas ($A=0.5$ et $A=2$).....	42

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Les conditions aux limites appliquées.....	26
Tableau III-1 : les propriétés thermophysiques du fluide de base d'eau et de nanoparticules de magnétite.....	30
Tableau III.2 : comparaison des différents nombres de Nusselt à la paroi inférieure pour différentes valeurs de Hartmann avec $Re=100$, $Gr=10^4$	30

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
A	: Rapport de forme	-
B_0	: Intensité du champ magnétique (Induction magnétique)	T
C_p	: Chaleur spécifique	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
H	: Hauteur de la cavité	m
g	: Accélération de la pesanteur	$m\ s^{-2}$
k	: Conductivité thermique	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
P	: Pression	Pa
Pr	: Nombre de Prandtl	-
Ra	: Nombre de Rayleigh	-
Nu	: Nombre de Nusselt	-

Symboles grecs

α	: Diffusivité thermique	$m^2\ s^{-1}$
φ	: Fraction volumique des nanoparticules	-
β	: Coefficient d'expansion thermique des particules solides	K^{-1}
μ	: Viscosité dynamique	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
σ	: Conductivité électrique	$S\ m^{-1}$
ϑ	: Viscosité cinématique	$m^2\ s^{-1}$
ρ	: Masse volumique	$kg\ m^{-3}$

Indices

ff	: ferrofluide
f	: fluide
s	: Solide

Abréviations

MHD	: Magnétohydrodynamique
-----	-------------------------

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, l'un des objectifs de la recherche scientifique dans les industries c'est d'améliorer les transferts thermiques des fluides. Les recherches théoriques et expérimentales dans le domaine du transfert thermique ont donné naissance au développement d'une nouvelle classe, dite les ferrofluides. Les ferrofluides sont des liquides contenant des très petites quantités d'éléments ferromagnétiques, les nanoparticules ajoutées au liquide lui permettent de se déformer lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, ils se comportent comme un aimant d'où elle vient l'appellation "liquide magnétique" pour un ferrofluide.

Dans le cas de la convection thermique au sein des ferrofluides, qui sont des bons conducteurs en présence d'un champ magnétique, le ferrofluide est soumis à deux forces de volume à savoir : la force de flottabilité et celle de Lorentz. Cette dernière peut induire de la magnétohydrodynamique (MHD).

Aujourd'hui, ces liquides particuliers Grâce à leurs propriétés magnétiques qui permettent d'améliorer les performances thermiques, ils peuvent être utilisés dans divers domaines : médecine, technologie, hydraulique, etc. Les nanoparticules représentent aujourd'hui un enjeu technologique et économique majeur.

Vu l'importance de ce dernier et leur implication dans le transfert thermique, cela nous a permis de mener une étude numérique sur le transfert thermique d'un fluide newtonien dans un espace remplie de nanoparticules magnétiques, cela s'est fait pour une cavité rectangulaire chauffée par la paroi inférieure, refroidie par la paroi supérieure et le reste des parois sont supposées adiabatiques, ceci en utilisant un ferrofluide à base d'eau et de Fe_3O_4 en présence d'un champ magnétique. Les simulations numériques ont été réalisées en utilisant un code de calcul pour prédire l'effet du rapport de forme, du nombre de Rayleigh, Hartmann et de la fraction volumique des nanoparticules sur le transfert de chaleur.

Ce type de cavités, on les rencontre dans de nombreux domaines industriels, notamment au cours de la maintenance des équipements et composés électroniques.

Notre travail est organisé en trois chapitres ;

- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les ferrofluides, la magnétohydrodynamique et une synthèse bibliographique.

Introduction Générale

- Le deuxième chapitre présente la configuration géométrique du problème à étudier, ainsi que le modèle mathématique contenant les équations qui régissent sur le problème
- Le dernier chapitre, nous l'avons consacré à la simulation numérique et la présentation de nos résultats, et nos différentes remarques soustraites.

Enfin, notre mémoire est clôturé par une conclusion générale, qui résume les principaux résultats de simulation.

Chapitre I
Généralités sur les ferrofluides
et synthèse bibliographique

Généralités sur les ferrofluides et synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter des connaissances liées au ferrofluides : sa définition, son historique, ses applications dans l'industrie, sa composition, ses propriétés thermo-physiques et des informations sur la magnétohydrodynamique. A cet effet, pour mieux comprendre les avancées et les différentes problématiques liées aux études ultérieures menées sur les ferrofluides, nous avons mené une recherche bibliographique pour comprendre d'avantage le comportement de ces fluides.

I.2. Généralités sur les ferrofluide

I.2.1. Définition

Les ferrofluides sont des solutions qui contiennent des nanoparticules (taille de l'ordre de 10 nanomètres) magnétiques en suspension dans un liquide porteur, la suspension est donc dite colloïdale, pour que la suspension soit un ferrofluide, il est de plus nécessaire qu'elle interagisse plus au moins fortement avec un champ magnétique, tout en conservant sa stabilité colloïdale si le champ n'est pas trop intense [1].



Figure I-1 : Instabilité magnétique de pic lors de l'approche d'un aimant dans le cas d'un ferrofluide organique surfacé [1].

2.2. Historique

Les ferrofluides ne sont pas présents dans la nature, sont donc des objets de synthèse. En 1779 Wilson a réalisé la première approche en préparant un liquide constitué de fines particules de fer dans l'eau. Dans les années 1930, Bitter et Ellmore ont tenté d'utiliser des particules microniques de magnétite. Les solutions obtenues étaient peu stables, les particules s'agrègent en présence d'un champ magnétique. En 1963, un scientifique de la NASA « Stephen Papell » a effectué la réelle synthèse de ferrofluide en mélangeant de la poudre de magnétite à du kérosène en présence d'un acide oléique, il a broyé pendant 10 mois le liquide pour obtenir des nanoparticules, c'est comme ça qu'un ferrofluide stable était créé. Peu après, Rosenweig, en collaboration avec les chercheurs d'Aveco Corp, améliora le fluide de Papell et synthétisa un ferrofluide bien plus concentré et magnétique, comparable aux ferrofluides exploités aujourd'hui. Il examina une grande variété de particules magnétiques, d'agents dispersants et de fluides porteurs. Parallèlement, il analysa les principes physiques qui régissent les propriétés micro et macroscopiques de ces fluides [2].

Les travaux de Rosenweig ont amené à une amélioration du procédé et ils ont permis d'avoir un ferrofluide plus concentré et magnétique. La recherche scientifique apporte régulièrement des avancées dans la synthèse des ferrofluides. En 2019, des chercheurs de l'université du Massachusetts et de l'université de technologie chimique de Beijing ont créé un ferrofluide magnétique permanent qui conserve son magnétisme lorsque le champ magnétique extérieur est retiré [3].

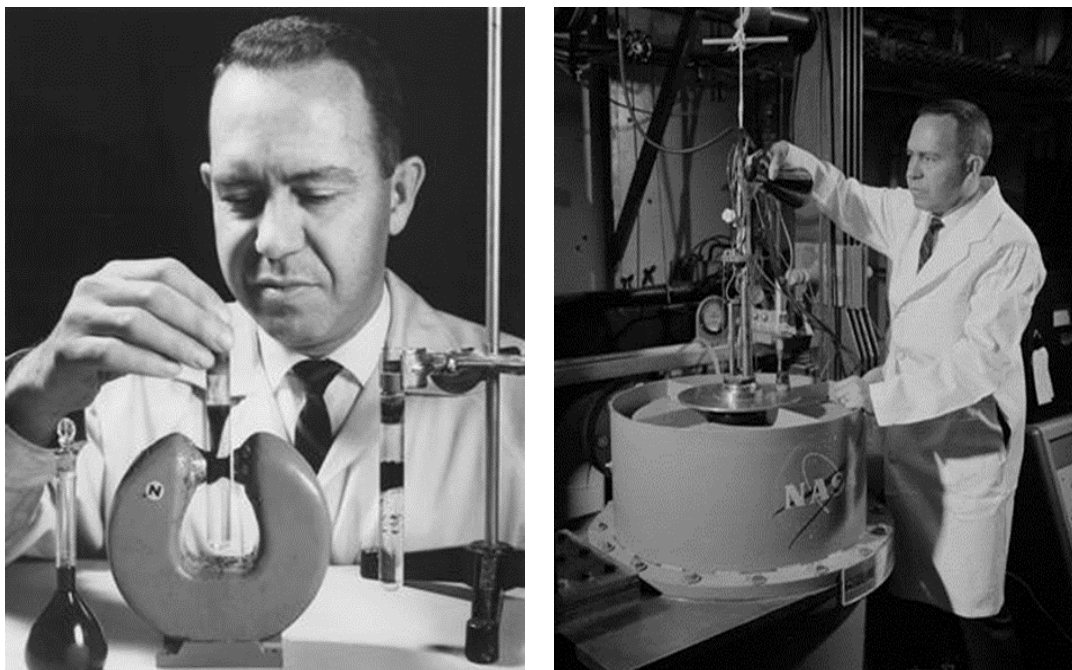
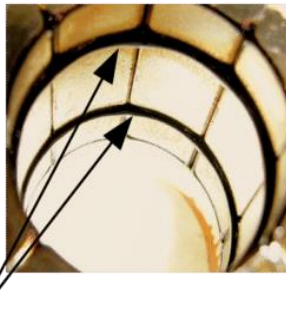


Figure I-2 : Stephen Papell développant un ferrofluide pour la NASA en 1963[1].

I.2.3. Application en industrie

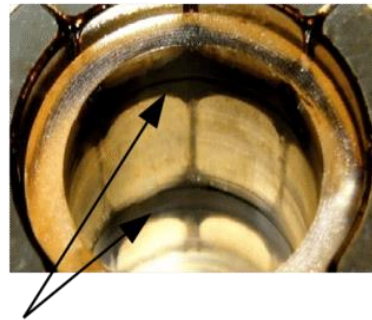
Même si les ferrofluides sont des nanomatériaux découverts assez récemment, ils sont très utilisés pour de nombreuses applications dans divers domaines :

- ♣ **L'électronique** : par exemple il existe plusieurs disques durs qui utilisent un arbre d'entraînement en rotation. Le ferrofluide est utilisé comme un joint liquide pour empêcher les débris de pénétrer dans le disque dur.
- ♣ **Haut-parleurs** : des aimants en ferrofluides sont utilisés à l'intérieur des haut-parleurs pour éliminer la chaleur des bobines mobiles.



joints de ferrofluide

a)



joints de ferrofluide

b)

Figure I-3 : une figure qui représente les joints de ferrofluide dans haut-parleur [4].

- ♣ **Ingénierie mécanique** : le ferrofluide est utilisé comme une sorte de lubrifiant pour les aimants, aussi dans les amortisseurs pour les applications mécaniques et aérospatiales.
- ♣ **L'optique** : les chercheurs sont convaincus qu'ils pourront créer des surfaces réfléchissantes de haute qualité à l'intérieur des télescopes pour mieux observer les corps astronomiques, en mettant le ferrofluide en suspension dans l'éthylène glycol.
- ♣ **L'énergie** : Il y a quelques scientifiques qui pensent que à l'avenir les ferrofluides peuvent être utilisés comme un moyen pour la production de l'électricité en captant les vibrations de basse.

- ▲ **Médecine** : En IRM les ferrofluides sont utilisés comme agent de contraste, en modifiant les temps de relaxation du proton, les ferrofluides pourraient être utilisés en cancérologie pour diriger les médicaments directement vers les cellules cancéreuses sans endommager le reste du corps, un groupe de chercheurs a déjà mis au point un modèle d'un cœur artificiel qui repose sur les ferrofluides et des électroaimants au lieu de moteurs ou de pièces mécaniques.

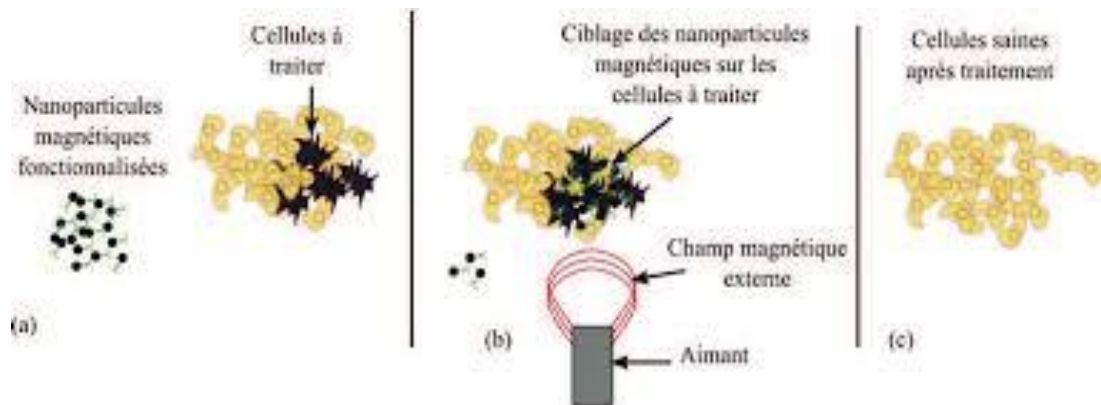


Figure I-4 : Schéma du principe de la délivrance de médicaments en utilisant les nanoparticules magnétiques [5].

- ▲ **Art** : lorsque quelques gouttes de ces fluides sont déposées dans une solution alcoolique à laquelle elles ne peuvent se mélanger ou bien enfermées entre deux plaques de verres puis exposées à un champ magnétique normal, celle-ci forment une structure labyrinthe, une instabilité est créée entre les tensions de surface et les forces magnétiques et voilà la représentation artistique de cet effet mélangé avec des colorants [6].



Figure I-5 : Représentation artistique de l'effet labyrinthe [6].

Les ferrofluides sont utilisées dans le domaine de l'amélioration du transfert de chaleur par exemple : l'augmentation de la concentration et de la taille des particules solides cause plus d'améliorations dans le taux de transfert de chaleur.

Récemment, les ferrofluides sont appliqués même dans le domaine de traitement des eaux usées nucléaires. L'utilisation des ferrofluides fournit une stratégie pratique et efficace de traitement des eaux usées radioactives, et éclaire le développement de matériaux pour d'autres applications confrontées au dilemme de la stabilité et de la recyclabilité incompatibles.

I.3. La composition des ferrofluides

Un ferrofluide se constitue des particules magnétiques solides et d'un liquide porteur.

- ▲ **Les particules solides :** Les oxydes magnétiques, on trouve généralement des particules de magnétite (Fe_3O_4), ferrite (MFe_2O_4) ou de maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), comme ces particules peuvent être de type métallique comme le Nickel, le cobalt, le fer.



Figure I.6 : La magnétite .

- ▲ **Le liquide porteur :** il existe deux types

Les solvants organiques : ils doivent avoir une grande stabilité à la température, par exemple : hydrocarbure aliphatique, diester carboxylique, huile de silicone.

Les solvant polaires : les plus utilisés sont l'eau et les alcools qui sont employés dans les applications médicales.

I.4. Propriétés thermo-physiques

Les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le

matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu) [7].

I.4.1. La masse volumique

Pour calculer la masse volumique d'un ferrofluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique φ à une température T donnée, on applique la loi ci-dessous :

$$\rho_{ff} = \left(\frac{m}{V}\right)_{ff} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (I.1)$$

La fraction volumique des nanoparticules, notée φ désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide).

$$\varphi = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume totale du ferrofluide}} = \frac{V_s}{V_s + V_f}$$

On en déduit alors la masse volumique du ferrofluide :

$$\rho_{ff} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (I.2)$$

Ou ρ_{ff} : La masse volumique du ferrofluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solides.

I.4.2. La chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène ($C_p = dQ/mdT$). La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un ferrofluide on utilise généralement le modèle de Xuan et Roetzel (2000) :

$$(\rho C_p)_{ff} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (I.3)$$

$(C_p)_{ff}$, $(C_p)_s$, $(C_p)_f$ désignent respectivement les chaleurs spécifiques du ferrofluide, du fluide de base et des nanoparticules.

I.4.3. Le coefficient d'expansion thermique

Pour calculer la valeur de ce coefficient pour les ferrofluides de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les ferrofluides, par analogie avec la relation (I.3), on déduit l'expression suivante :

$$(\rho\beta)_{ff} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (I.4)$$

I.4.4. Conductivité thermique

Les chercheurs ont développé plusieurs modèles pour prédire l'estimation de la conductivité du ferrofluide et nous présenterons dans cette partie le modèle le plus utilisé dans le cas des ferrofluides :

Modèle maxwell (1881)

Maxwell fait partie des chercheurs qui se sont intéressés au calcul de la conductivité thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension. Pour aboutir à l'estimation de cette dernière, il a supposé que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre D_p . La formule de Maxwell est donnée par :

$$k_{ff} = \frac{k_s + 2k_f + 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f + k_s)} k_f \quad (I.5)$$

k_{ff} , k_f , k_s désignent respectivement les conductivités thermiques du ferrofluide, du fluide de base et des particules solides.

Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle.

I.4.5. La viscosité dynamique

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du ferrofluide, mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'estimer ou de mesurer la viscosité dynamique des

ferrofluides, et de quantifier l'importance des principaux paramètres qui l'influencent. Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions. Dans cette partie, nous présentons le modèle le plus utilisé dans le cas des ferrofluides.

Modèle de Brinkman

La formule de Brinkman complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4%,

$$\mu_{ff} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (I.6)$$

On remarque que cette relation décrit une évolution non linéaire de la viscosité dynamique avec la concentration volumique mais ne tient pas compte de la collision entre les particules.

I.5. La magnétohydrodynamique

La magnétohydrodynamique est une discipline, au même titre que la thermodynamique, c'est-à-dire un ensemble d'équations et de modèles. La MHD constitue l'exemple le plus spectaculaire et le plus récent de fluides conducteurs, c'est l'étude du mouvement d'un fluide conducteur en présence d'un champ magnétique.

Le mouvement des particules du métal à travers des lignes de champ magnétique produit un courant électrique qui agit réciproquement avec le champ magnétique pour produire une force motrice électromagnétique (EM), qui s'oppose au mouvement du liquide. Le taux d'amortissement dépend de la force du champ magnétique appliqué aussi bien que son orientation en ce qui concerne la circulation convective.

Il est important de noter que la force centrale à la compréhension des phénomènes MHD est la force de Lorentz :

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} \times \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (I.7)$$

Où :

F : est la force subie par une particule de charge q

V : la vitesse de mouvement de la particule

E : Champ électrique

B : Champ magnétique

I.6. Synthèse bibliographique

M. Sathiyamoorthy et al [8] ont fait une étude qui consiste à remplir une enceinte carrée de gallium liquide en appliquant un champ magnétique incliné pour différentes conditions aux limites thermiques. Dans la cavité, la paroi inférieure est uniformément chauffée et la paroi verticale gauche est chauffée linéairement, la paroi verticale droite est chauffée ou refroidie linéairement tandis que la paroi supérieure est maintenue thermiquement isolée. Ils ont conclu que l'application du champ magnétique réduit le taux de transfert de chaleur convectif dans la cavité pour tout angle incliné. Le nombre de Nusselt moyen diminue de manière non linéaire en augmentant le nombre de Hartman pour toute angle incliné.

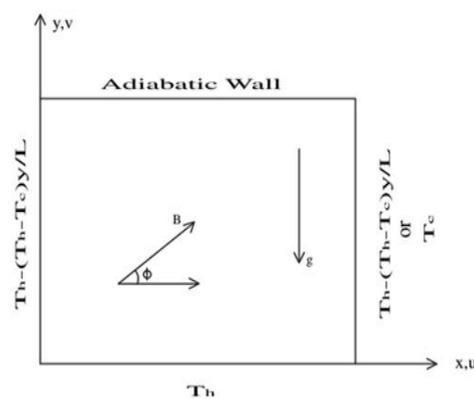


Figure I-7 : Schéma de principe du système physique [8].

Mehdi Bahiraiea et al [9] ont fait circuler dans un canal carré un ferrofluide eau- Fe_3O_4 en présence d'un champ magnétique produit par des aimants. L'application d'un tel champ magnétique conduit à une amélioration locale de transfert de chaleur par convection. Augmenter la concentration et la taille des particules cause plus d'améliorations dans le taux de transfert de chaleur. Augmenter le nombre de Reynolds à une force d'aimant donnée diminue l'efficacité du champ magnétique appliqué sur le flux et le transfert de chaleur. De plus, en utilisant plus fort les aimants on remarque une amélioration dans le taux de transfert de chaleur, alors il est possible de créer un mélange plus efficace dans le flux et la perturbation dans le développement de la couche limite lorsque plusieurs aimants sont utilisés à différentes positions.

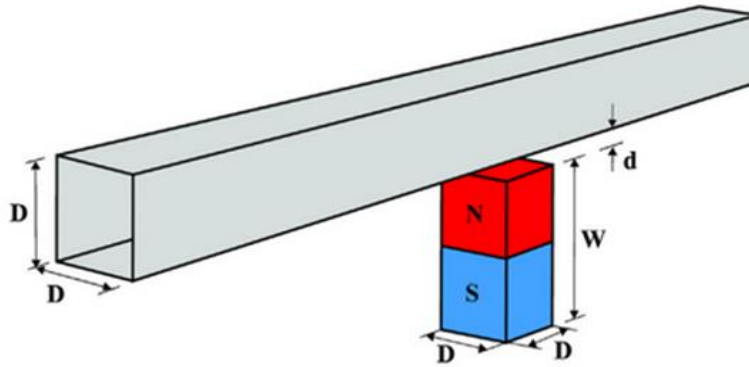


Figure I-8 : Section de la géométrie à l'étude et la position de l'aimant [9].

Satyajit Mojumder et al [10], dans cet article, ont étudié le transfert de chaleur par convection naturelle pour une cavité en forme de C remplie de ferrofluide (cobalt-kérosène) pour des nombres de Rayleigh, de Hartmann variables et pour différentes fractions volumiques solides. Cette étude a permis de constater qu'un nombre de Rayleigh plus élevé améliore de manière significative le taux de transfert de chaleur. La présence d'un champ magnétique tente de retarder la convection. De plus, l'ajout d'une fraction volumique augmente le taux de transfert de chaleur.

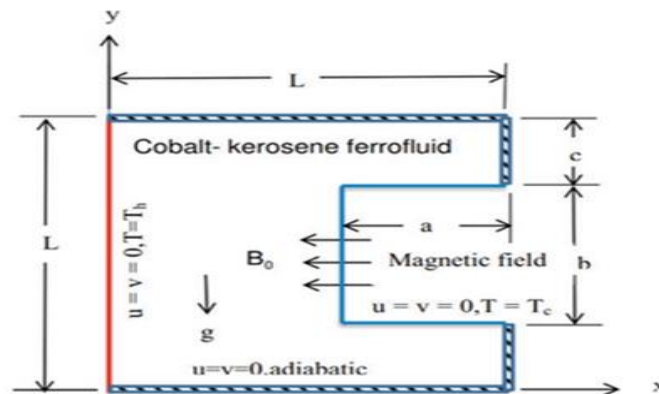


Figure I-9: Schéma de principe d'une cavité en forme de C remplie d'un ferrofluide cobalt-kérosène [10].

P. Hounsoua et al [11] dans ce travail, ils ont effectué l'analyse de la stabilité linéaire d'une couche horizontale en rotation d'un fluide magnétique en présence de la force hélicoïdale et soumise à un gradient vertical de température aux conditions limites libres. L'expression analytique du Rayleigh est déterminée et l'effet de chaque paramètre sans dimension est étudié. La force hélicoïdale, le paramètre binaire ψ et les paramètres magnétiques $M1$, $M3$ et ψ_m rendent le système instable en accélérant le début de la convection stationnaire, tandis que la rotation et le paramètre magnétique $M2$ stabilisent le système en retardant le début de la convection stationnaire. En outre, tous les

paramètres magnétiques et la rotation réduisent la taille des rouleaux de convection alors que seule la force hélicoïdale augmente la taille de ces structures.

Mohamad Hamed Hekmata et al [12] Dans cet article, la convection thermomagnétique du ferrofluide magnétite-eau est étudiée numériquement dans l'espace tridimensionnel entre deux cylindres concentriques verticaux sous l'influence d'un aimant externe. L'objectif principal est d'étudier l'effet de la fraction volumique des nanoparticules magnétiques d'un diamètre de 10 nm et des gradients positifs et négatifs du champ magnétique sur le comportement hydrothermique du ferroporteur. Les résultats numériques indiquent que la force de Kelvin augmente avec la fraction volumique, en diminuant la température du ferrofluide et en augmentant le gradient de champ magnétique. En présence d'un champ magnétique externe à gradient négatif, le coefficient de frottement de la peau sur la paroi interne augmente en augmentant la fraction de volume et le gradient de champ magnétique, mais sur la paroi extérieure, il diminue en les augmentant. Le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de la fraction volumique. En outre, les champs magnétiques à gradient positif entraînent une réduction du nombre de Nusselt et du coefficient de friction sur la paroi interne, tandis qu'ils augmentent le nombre de Nusselt sur la paroi externe.

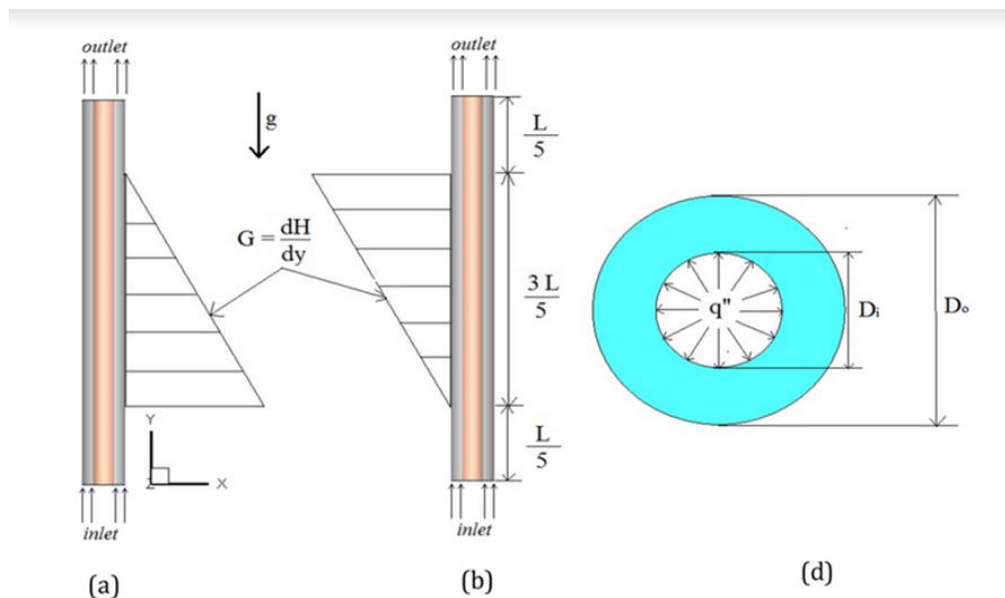


Figure I-10 : Représentation typique de modèles physiques avec : (a) des gradients de champ magnétique négatifs et (b) positifs, et (c) une section transversale annulaire [12].

Abuzar Abid Siddiquia et al [13] ont étudié dans cette recherche le transfert thermique dans le ferrofluide à base d'eau enfermé dans une cavité poreuse attachée à une nouvelle chambre perméable (aspiration/injection). Ils ont conclu que le nombre de Nusselt est augmenté sur la paroi gauche mais il est réduit sur la paroi droite s'ils augmentent soit la concentration des particules

ferroparticules ou la force de Lorentz. La force de Kelvin affecte le nombre de Nusselt, elle diminue au niveau de la paroi gauche mais s'intensifie au niveau de la paroi droite, si nous augmentons la force de Lorentz (nombre de Hartmann).

Anupam Bhandari [14] a présenté une étude qui décrit les résultats théoriques de la viscosité sous un champ magnétique en raison de la variation du diamètre du noyau magnétique et de l'épaisseur de la couche de tensioactif. Les résultats de ce travail montrent que l'augmentation du diamètre du noyau magnétique réduit la Viscosité du ferrofluide et que l'augmentation de l'épaisseur de la couche de surfactant augmente la viscosité. Il a également constaté qu'un champ magnétique stationnaire augmente toujours la viscosité des ferrofluides et dans le cas d'un champ magnétique alternatif, la viscosité des ferrofluides dépend non seulement de l'intensité mais aussi de la fréquence du champ.

M. Jafaryar et al [15] ont fait une étude sur les deux approches qui ont été mises en œuvre pour l'amélioration des performances électriques de l'unité photovoltaïque. Ces approches sont : la température de la couche PV doit être réduite et l'utilisation d'un système de refroidissement avec l'implication du flux de liquide a été suggéré par les chercheurs. Ils ont remplacé l'eau par le ferrofluide (mélange de H₂O et d'oxyde de fer) dans ce système avec un champ magnétique appliqué verticalement. Ils ont conclu que ces approches utilisées aident l'unité à atteindre une température plus basse et une plus grande quantité de chaleur utile peut être obtenue dans le tube.

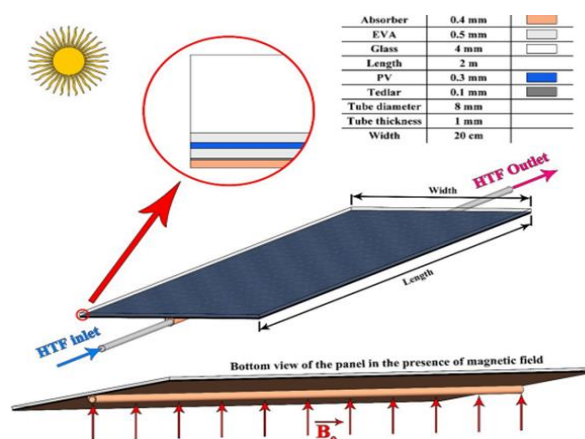


Figure I-11 : Mise en œuvre du champ magnétique dans le système PVT [15].

Bahram Jalilia et al [16] ont réalisé un travail sur la microstructure et les caractéristiques inertielles d'un ferrofluide magnétique sur une feuille d'étirage en utilisant le modèle de conductivité thermique effective avec deux méthodes semi-analytiques. Il est supposé que le Fe₃O₄

comme nanoparticules et l'eau comme fluide de base. L'effet des paramètres connexes sur le flux, la fonction de vitesse, la vitesse de micro-rotation et la température a été obtenu pour un écoulement à transfert de masse positif et négatif. Ils ont trouvé que la vitesse du fluide à proximité de la feuille est maximisée et diminue en s'éloignant de la feuille. Une variation significative dans le comportement de la fonction de flux entre le flux de transfert de masse positif et négatif sur une feuille. Cependant, ce comportement s'atténue après une certaine distance de la feuille et la fonction de flux est alors uniforme.

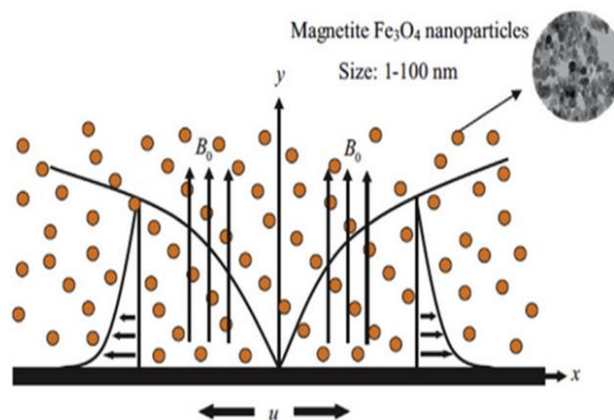


Figure I-12 : Feuille d'étirement ($\alpha > 0$) [16].

Sajad Rasaee et al [17] ont fait une étude consacrée à l'évaluation expérimentale de l'impact d'un champ magnétique tournant (RMF) sur les caractéristiques thermohydrauliques de la convection forcée laminaire du ferrofluide magnétite aqueux à travers un tube rayé. Les résultats ont été déterminés pour différentes valeurs du nombre de Reynolds (Re), concentration des nanoparticules (ϕ) et pas rayé (P). Le nombre de Nusselt (Nu), facteur de frottement et critère d'évaluation des performances (PEC) ont été considérés comme des paramètres de performance. L'analyse du paramètre PEC a montré que l'utilisation de tube rayé et RMF est souhaitable.

Anwar Gavili et al [18] ont fait une étude expérimentale sur la conductivité thermique d'un ferrofluide contenant des nanoparticules de Fe_3O_4 en suspension dans de l'eau déionisée sous champ magnétique qui a été créé par les bobines de Helmholtz et l'intensité de champ a été contrôlée par le courant électrique. Ils ont constaté que à l'absence de champ magnétique, aucune amélioration n'est perceptible dans la conductivité thermique de Fe_3O_4 . L'application d'un champ magnétique sur les ferrofluides augmente la conductivité thermique. L'augmentation de l'intensité du champ magnétique améliore la conductivité thermique des ferrofluides alors que le temps pour atteindre une valeur maximale est plus court. La conductivité thermique du ferrofluide ne revient

pas immédiatement à sa valeur initiale avant l'application d'un champ magnétique mais se comporte comme une décroissance exponentielle.

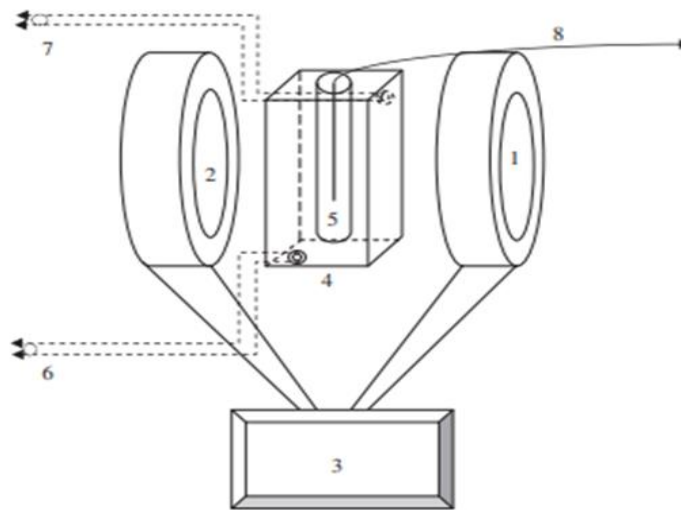


Figure I-13 : Schéma de principe du dispositif expérimental utilisé pour mesurer la Conductivité thermique du ferrofluide [18].

Mustafa Alsaady et al [19] ont fait un travail pour objectif d'étudier l'influence de l'application d'un champ magnétique externe sur les propriétés thermophysiques d'un ferrofluide. Il a été signalé que la conductivité thermique d'un ferrofluide pouvait être jusqu'à 300 fois supérieure à celle du fluide de base et que la viscosité pouvait également être augmentée en raison de la formation d'un assemblage de particules en chaîne dans le champ magnétique selon la direction du gradient thermique.

Danyil Azarkh et al [20] ont fait ce travail, pour Caractériser le comportement rhéologique transitoire des matériaux mous à l'aide de gouttelettes de ferrofluide, ils ont développé une configuration de mesure magnétique basée sur un arrangement d'électro-aimants de Helmholtz. En appliquant des champs magnétiques homogènes à des gouttelettes de ferrofluide à l'intérieur d'un matériau mou d'intérêt, les déformations des gouttelettes déformées ellipsoïdales ont été mesurées. En outre, les tensions interfaciales ont été calculées par rapport au nombre de liaisons magnétiques. Le comportement rhéologique transitoire d'un matériau viscoélastique a été mesuré et il a montré un fort comportement viscoélastique dépendant du temps pendant plusieurs minutes. le module d'Young a augmenté jusqu'à la valeur du comportement élastique, tandis que les valeurs de la viscosité ont diminué jusqu'à une ligne de base.

Xiao-Dong Niua et al [21] ont fait une recherche sur l'analyse numérique de l'instabilité du champ normal pour une couche initialement plate de ferrofluide sous l'influence d'un champ magnétique. Un aimant permanent à dipôle unique est défini au lieu de dipôles ponctuels multiples, ce qui rend cette méthode beaucoup plus simple et plus efficace. Ils ont fait une comparaison entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux pour vérifier la validité de leur méthode. Un critère pour la prédiction des pointes est présenté pour les champs magnétiques uniformes. Ils ont examiné également les effets de différents types de champs magnétiques, leurs forces et l'effet du fluide non magnétique environnant sur les pointes et ils ont fourni la description des lignes de champ magnétique, de la distribution de l'induction magnétique et de l'estimation de l'énergie ce qui donne un aperçu utile du comportement hydrodynamique et magnétostatique des ferrofluides.

Mohammad Javad Pour Razzaghi et al [22] ont étudié l'écoulement du ferrofluide sous un champ magnétique dipôle linéaire et une bande torsadée dans le capteur solaire LS-30. Les caractéristiques des irréversibilités sont étudiées. Un ferrofluide commercial sensible à la température est choisi comme fluide de travail. L'effet de vitesse de rotation, du rapport de torsion et du champ magnétique dipolaire linéaire sont comparés à ceux d'un tube ordinaire. La méthode d'ajustement des courbes est utilisée pour obtenir la fonction mathématique du profil du flux thermique. Le coefficient de transfert de chaleur plus convectif se produit par champ magnétique dipolaire. De plus, le ruban torsadé peut augmenter le transfert de chaleur de 305 % à un rapport de torsion = 2,5 et une vitesse de rotation = 200 tr/min. De plus, si le ruban torsadé a une vitesse de rotation, la génération d'entropie thermique diminue.

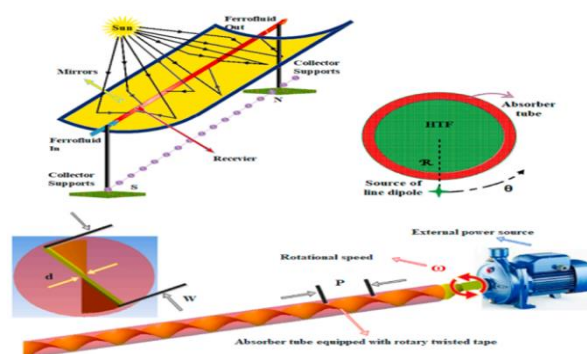


Figure I-14 : Schéma de principe du PTSC et du ruban torsadé rotatif [22].

I.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour définir les ferrofluides, pour expliquer ses différentes caractéristiques et leurs intérêts dans le domaine de transfert de chaleur. Suite à une recherche bibliographique on a constaté que beaucoup de travaux de recherche ont été effectués dernièrement sur les ferrofluides, le chapitre suivant sera consacré à la formulation mathématique des équations gouvernantes du notre problème.

Chapitre II

Formulation mathématique

Chapitre II

Formulation mathématique

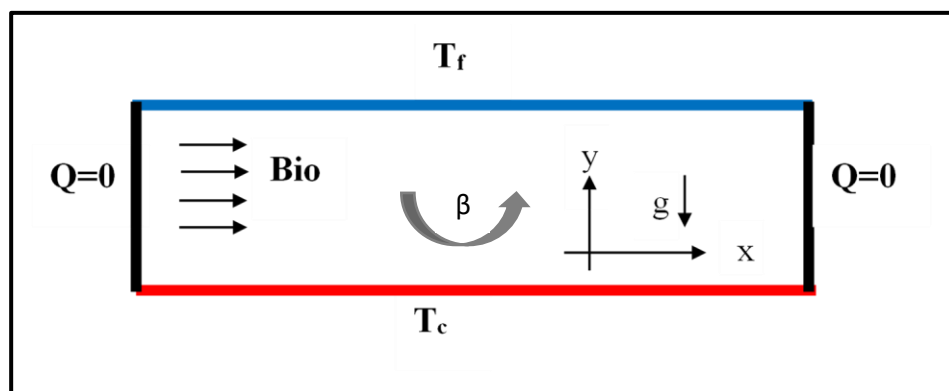
II.1. Introduction

L'étude du comportement des ferrofluides sous un champ magnétique c'est un sujet qui occupe une place dans les activités de recherche ces dernières années.

Dans ce chapitre nous allons décrire et formuler le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées pour notre modèle d'études qui est une cavité rectangulaire remplie d'un ferrofluide sous un champ magnétique uniforme, cette dernière est soumise à des équations gouvernantes qui seront présentées sous leurs formes dimensionnels et adimensionnels.

II.2. Formulation physique

Le domaine physique est une cavité rectangulaire fermée bidimensionnelle de longueur L remplie de ferrofluide Fe_3O_4 -eau. Cette cavité est soumise à un gradient de température vertical, la paroi inférieure est maintenue à une température chaude T_c , tandis que la paroi supérieure est maintenue à une température froide T_f . Les parois latérales sont maintenues adiabatique ($Q = 0$), cette cavité est sous un champ magnétique, comme le montre la Figure suivante :



FigureII.1 : Schémas de la géométrie considérée et les conditions aux limites associées

II.3. Formulation mathématique

II.3.1. Equation gouvernantes

❖ 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 [23] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad (\text{II.1})$$

ρ : c'est la masse volumique.

V : c'est le vecteur de vitesse.

❖ Equation de quantité de mouvement (ou Navier Stokes)

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Il s'exprime sous la forme suivante :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{\mu_0} (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) \vec{B} \quad (\text{II.2})$$

❖ 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 :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \text{div} T \right) = -\text{div}(k \vec{\nabla} T) \quad (\text{II.3})$$

II.3.2. Les hypothèses simplificatrices du problème

Il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses afin d'établir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème, donc on adopte les hypothèses suivantes :

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

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{II.4})$$

ρ_0 : Est la masse volumique de référence du fluide à la température de référence.

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

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

II.3.3. Équations dimensionnelles

❖ Equation de continuité

Après l'utilisation des hypothèses précédentes on a obtenu

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

u et v étant les composantes du champ de vitesse $V(u, v)$ dans la direction x et y respectivement

❖ **Equation de quantité de mouvement (ou Navier Stokes)**

La forme de l'équation de quantité de mouvement est comme suit :

Suivant x :

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

Suivant y:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{ff}} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{ff} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho_{ff} g \beta (T - T_f) - \sigma B^2 v \quad (\text{II.6b})$$

❖ **Equation de l'énergie**

En appliquant le principe de la conservation de l'énergie dans la direction x et y on aura l'équation de l'énergie comme suit :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{ff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

II.3.4. Equations adimensionnelles

L'adimensionnalisation consiste à transformer les variables dépendantes et indépendantes en variables sans dimensions. Cela permet de spécifier les conditions d'écoulement avec un nombre restreint de paramètres pour rendre la solution plus générale.

Pour rendre les équations précédentes sous forme adimensionnelle, on introduit les variables caractéristiques suivantes

$$X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{uL}{\alpha_f}, \quad V = \frac{vL}{\alpha_f}, \quad \theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f}, \quad P = \frac{pL^2}{\rho \alpha^2}$$

En substituant ces variables adimensionnelles dans les équations établies précédemment, nous allons obtenir le système d'équations adimensionnelles suivant :

❖ **Equation de continuité**

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (\text{II.8})$$

❖ Equation de quantité de mouvement

Suivant x :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \left(\frac{\mu_{ff} \rho_f}{\mu_f \rho_{ff}} \right) Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.9a})$$

Suivant y :

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{ff} \rho_f}{\mu_f \rho_{ff}} Pr \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \left(\frac{(\rho\beta)_{ff}}{\rho_{ff}\beta_f} \right) Ra Pr \theta_{ff} - \frac{\sigma_{ff} \rho_f}{\sigma_f \rho_{ff}} Ha^2 Pr v \quad (\text{II.9b})$$

❖ Equation d'énergie

$$\left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \frac{\alpha_{ff}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

II.3.5. Groupement Adimensionnelle**Nombre de Nusselt**

Il représente le rapport entre le transfert thermique convectif et le transfert thermique conductif à travers une surface. On le définit comme suit :

$$Nu = \frac{hL}{K}$$

Où h : Le coefficient d'échange thermique [W.m⁻². K⁻¹].

Nombre de Prandtl

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

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

Nombre d’Hartmann

Utilisé en magnétohydrodynamique pour traiter, caractériser le mouvement des fluides conducteurs en présence d’un champ magnétique. Sa formule est la suivante :

$$Ha = B_0 H \sqrt{\frac{\sigma_f}{\mu_f}}$$

Nombre de Rayleigh

C’est un nombre sans dimension, caractérisant aussi le transfert de chaleur au sein d’un fluide. Ce nombre est utilisé en mécanique des fluides. Inférieur à une valeur critique de 2000, le transfert s’opère par conduction, au-delà de cette valeur, c’est la convection libre qui devient importante. On le définit de la manière suivante :

$$Ra = \frac{g\beta_f \Delta T L^3}{\nu_f \alpha_f}$$

II.3.6. Conditions aux limites

Limites	Dimensionnelle		Limites	Adimensionnelle	
	u=0	T=T _c		U=0	θ = 1
y=0, 0 < x < L	u=0 v=0	T=T _c	Y=0, 0 < X < 1	U=0 V=0	θ = 1
y=H, 0 < x < L	u=0 v=0	T=T _f	Y= $\frac{H}{L}$, 0 < X < 1	U=0 V=0	θ = 0
x=0, x=L, 0 < y < H	u=0 v=0	q=0	X=0, X=1, 0 < Y < A (A= $\frac{H}{L}$)	U=0 V=0	θ = 0

Tableau II.1 : Les conditions aux limites appliquées

II.4. Méthodes Numérique

Les méthodes numériques sont utilisées pour la résolution des équations de conservation d'un phénomène physique, de nombreuses méthodes numériques existent, on peut citer à titre d'exemples :

- ✓ La méthode des éléments finis.
- ✓ La méthode des différences finies.
- ✓ La méthode des volumes finis.

Dans notre étude on va travailler avec la méthode des volumes finies, notre choix est porté sur la méthode des volumes finis grâce aux avantages qu'elle nous offre pour notre étude telle que la stabilité, la convergence, et principalement elle assure la conservation de masse et de quantité de mouvement sur chaque volume de contrôle [24].

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons établi le modèle mathématique correspondant à l'étude du comportement du ferrofluide dans une cavité soumise à un champ magnétique uniforme. Après différentes simplifications en utilisant les hypothèses simplificatrices, nous avons fait apparaître les équations dimensionnelle et adimensionnelle simplifiés du problème. On a précisé les conditions aux limites et on a expliqué la raison du choix de la méthode des volumes finies dans notre travail.

Chapitre III

Résultats et discussion

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on a commencé par une validation du code de calcul par rapport aux travaux de références. Puis, on a effectué une étude concernant l'influence du champ magnétique sur le transfert de chaleur, on a examiné l'influence de la variation des paramètres (rapport de forme, nombre de Hartmann, concentration des nanoparticules, nombre de Rayleigh) sur les caractéristiques du transfert de chaleur.

III.2. Choix du maillage

Pour examiner notre maillage et sa fiabilité, nous avons calculer le nombre de Nusselt moyen en utilisant plusieurs maillages (50x100 ; 60x120 ; 80x160 ; 100x200 ; 120x240) pour un ferrofluide Fe₃O₄-eau à une fraction volumique $\phi=0.01$, un nombre de Rayleigh $Ra=10^5$ et un nombre de Hartman $Ha=0$. Les résultats du maillage en fonction du nombre de Nusselt moyen sont présentés sur la Figure III.1. On voit que les valeurs du nombre de Nusselt moyen sont presque constantes à partir du maillage 80x160 et l'erreur ne dépasse pas 2%.

$$\varepsilon\% = \frac{Nu(80)-Nu(100)}{Nu(80)} = 0.14\% < 2\%$$

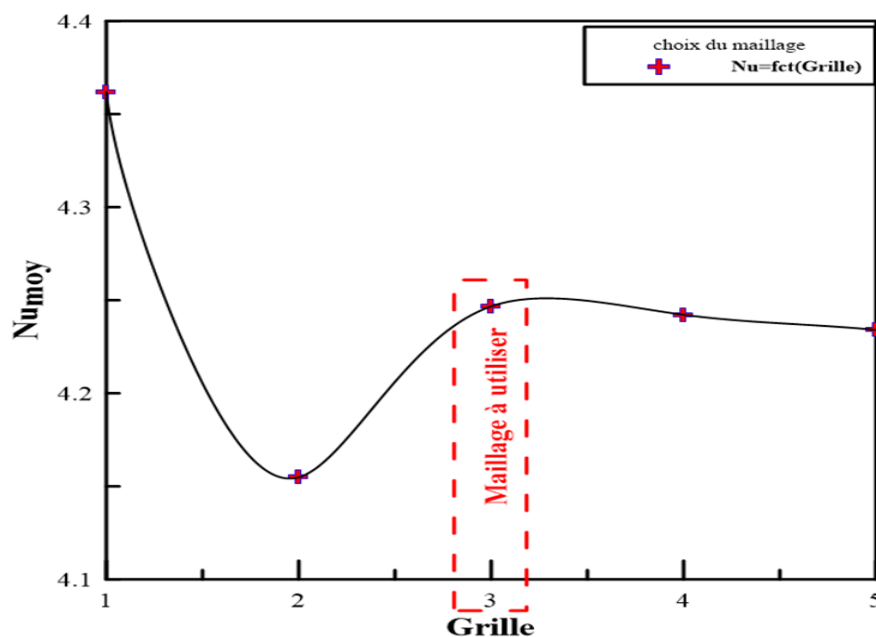


Figure III.1 : nombre de Nusselt moyen en fonction de la Grille.

III.3. Les propriétés thermophysiques du fluide de base et des nanoparticules de magnétite

Propriétés thermophysiques	Fluide de base Eau (H ₂ O)	Ferro-nanoparticule Magnétite (Fe ₃ O ₄)
C_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	4179	670
ρ [kg m ⁻³]	997.1	5200
K [W m ⁻¹ s ⁻¹]	0.613	6
σ [S m ⁻¹]	0.05	25000
$\beta \times 10^{-5}$ [K ⁻¹]	20.7	1.18
μ [kg m ⁻¹ s ⁻¹]	0.001003	-

Tableau III.1 : Les propriétés thermophysiques du fluide de base (Eau) et de nanoparticule de magnétite [23]

III.4. Validation des résultats

Dans le but d'attribuer plus de confiance aux résultats de nos simulations numériques, on compare nos résultats obtenus aux résultats de **N. A.Bakar et al** [25] qui ont étudié la convection mixte dans une cavité carrée de hauteur (H) remplie d'eau, les parois gauche et droite étaient adiabatiques tandis que la paroi supérieure est maintenue à une température froide et la paroi inférieure est maintenue à une température chaude, sous l'effet d'un champ magnétique avec $Ri=1$, $Re=100$ et $Gr=10^4$. La comparaison concerne le nombre de Nusselt moyen, les isothermes et les lignes de courant pour différents nombres de Hartmann (0, 10, 30, 60).

Comme nous pouvons le constater sur le tableau ci-dessous (Tableau III.1), les résultats de Nusselt moyen trouvés sont très rapprochés des résultats de **N. A.Bakar et al** [25].

Ha	0	10	30	60
N.A.Bakar et al	4.45	3.33	2.2	1.40
Etude Actuelle	4.415838	3.412141	2.234201	1.45078

Tableau III.2 : comparaison des différents nombres de Nusselt moyen à la paroi inférieure pour différentes valeurs de Hartmann avec $Re=100$, $Gr=10^4$

D'après les figures III.2 et III.3, nous constatons la similitude entre les lignes de courants et d'isothermes qu'on a trouvé et celle de **N. A.Bakar et al [25]**

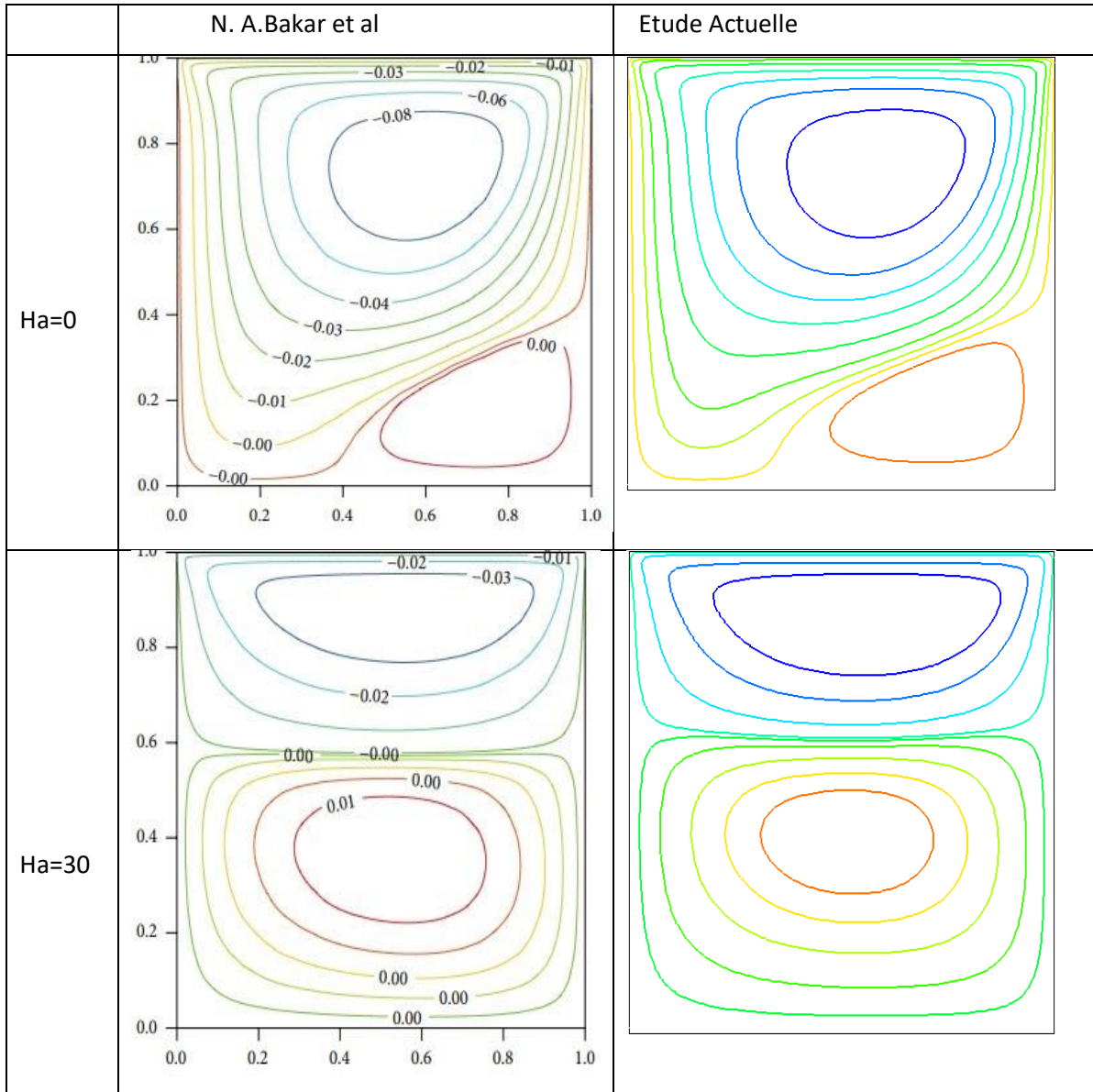


Figure III.2 : Comparaison des lignes de courant pour $Ri=1$ et différentes valeurs de Hartmann

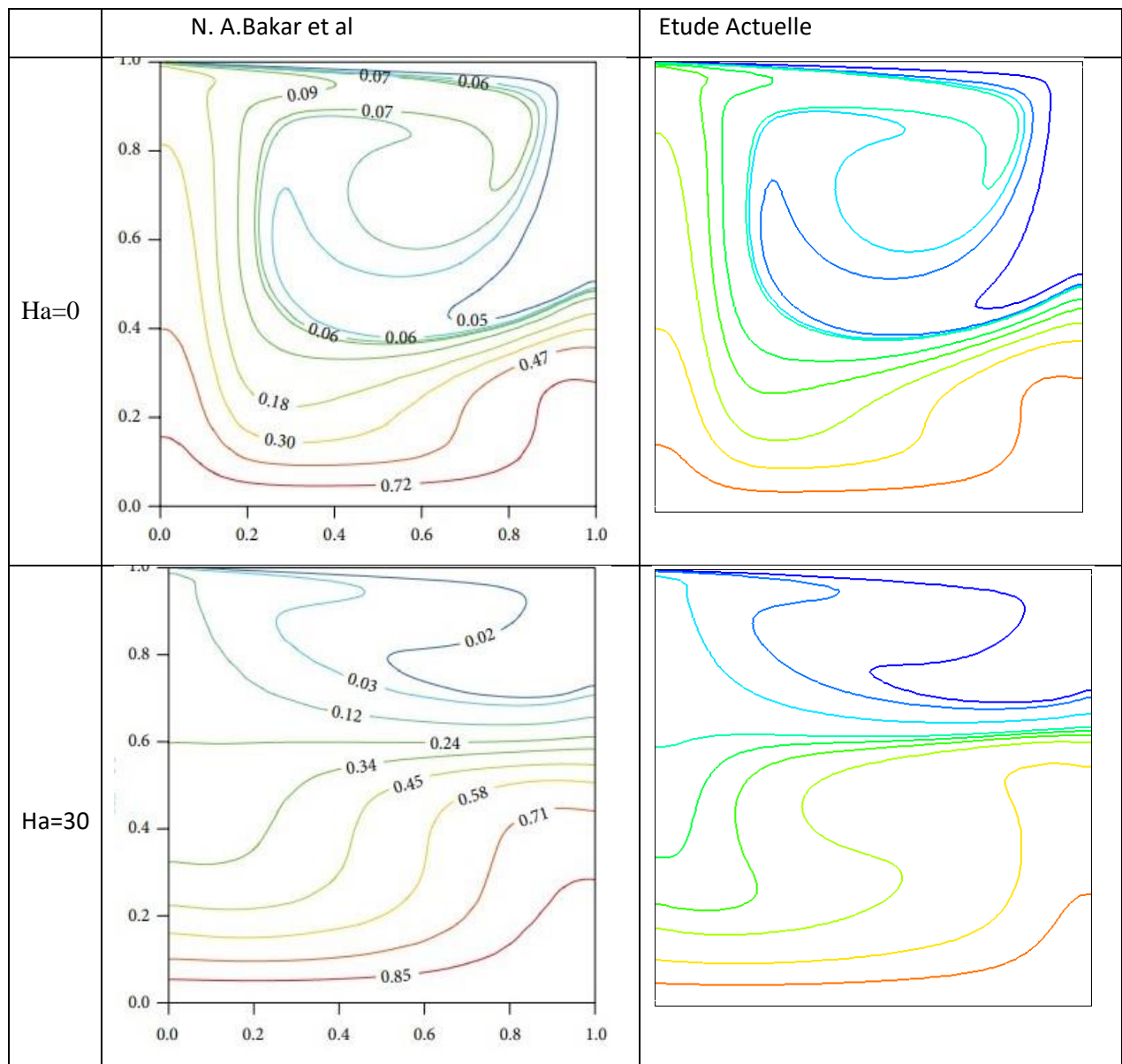


Figure III.3 : Comparaison des lignes isothermes pour $Ri=1$ et différentes valeurs de Hartmann

D'après les figures, nos résultats concordent à souhait avec les résultats correspondants, ce qui nous a permis de valider notre procédure de simulation numérique.

III.5. Résultats et discussion

III.5.1. Effet de l'intensité du champ magnétique

Les figures (III.4) et (III.5) représentent respectivement les trajectoires des lignes de courant pour différentes valeurs du nombre de Hartmann ($Ha=0, 5$ et 10), avec $\varphi = 0.01$ et $Ra=10^4$ puis avec $Ra=10^5$.

Pour $Ra=10^4$, à $Ha=0$ on remarque que l'écoulement au sein de la cavité est bicellulaire, symétrique par rapport au parois verticaux, quand le nombre de Hartmann augmente les deux cellules commencent à se rapprocher entre eux. Ce phénomène est lié à l'effet de la force de Lorentz (force électromagnétique).

Pour $Ra=10^5$, à $Ha=0$ on remarque que l'écoulement au sein de la cavité est bicellulaire, symétrique par rapport au parois verticaux, quand le nombre de Hartmann augmente $Ha=5$, l'écoulement tend à devenir monocellulaire. La cellule à droite tend à se développer pour enfin la cellule de gauche tend à se disparaître. Alors on peut dire que les courants de convection diminuent en intensité au fur et à mesure qu'on augmente l'intensité du champ magnétique.

a. Les lignes de courant

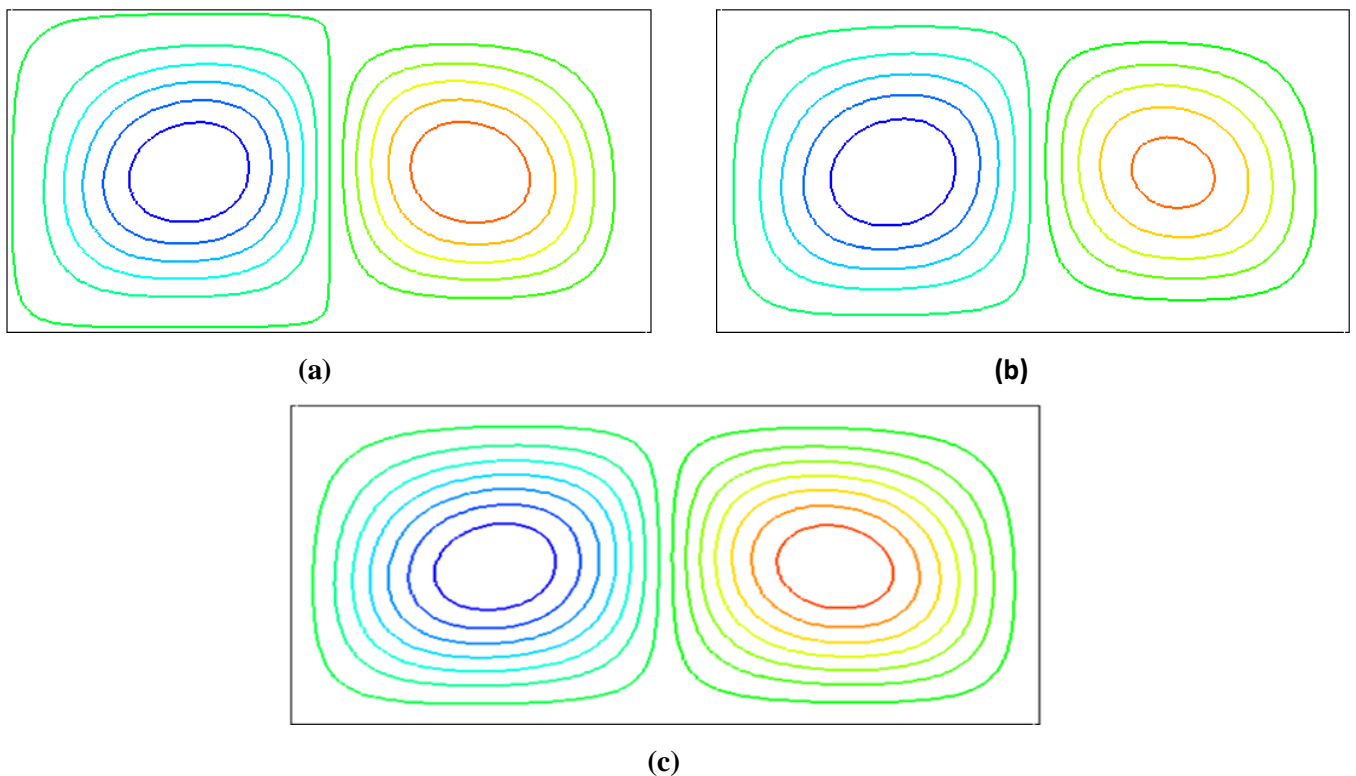


Figure III.4 : lignes de courant pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^4$ et $\varphi=0.01$

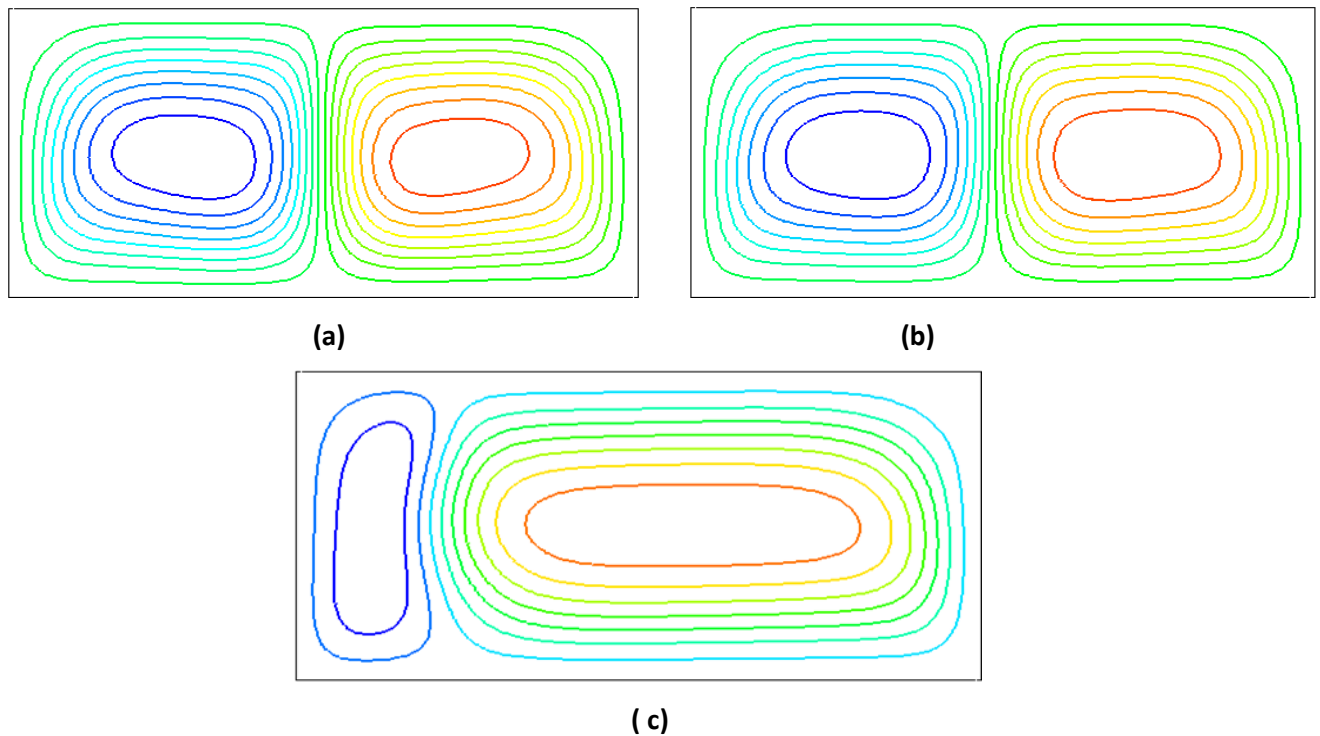


Figure III.5 : Lignes de courant pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^5$ et $\varphi=0.01$

b. Les isothermes

Les Figures (III.6) et (III.7) représentent respectivement les lignes isothermes pour différentes valeurs du nombre de Hartmann ($Ha=0, 5$ et 10) avec $\varphi = 0.01$ et $Ra=10^4$ puis avec $Ra=10^5$.

Pour $Ra=10^4$, à $Ha=0$ on remarque la distorsion et la déformation des lignes isothermes, aussi l'apparition d'un panache thermique symétrique dirigé vers le bas de la cavité qui s'affaiblit en augmentant le nombre de Hartmann puisque l'augmentation de l'intensité du champ magnétique réduit le transfert de chaleur dans l'écoulement. On remarque que c'est le cas aussi pour $Ra=10^5$, juste que pour des nombres de Hartmann ($Ha > 0$) le panache thermique se dirige vers la gauche en augmentant le nombre de Hartmann comme on peut voir clairement sur la figure (c), ceci est à cause de la force électromagnétique (Force de Lorenz).

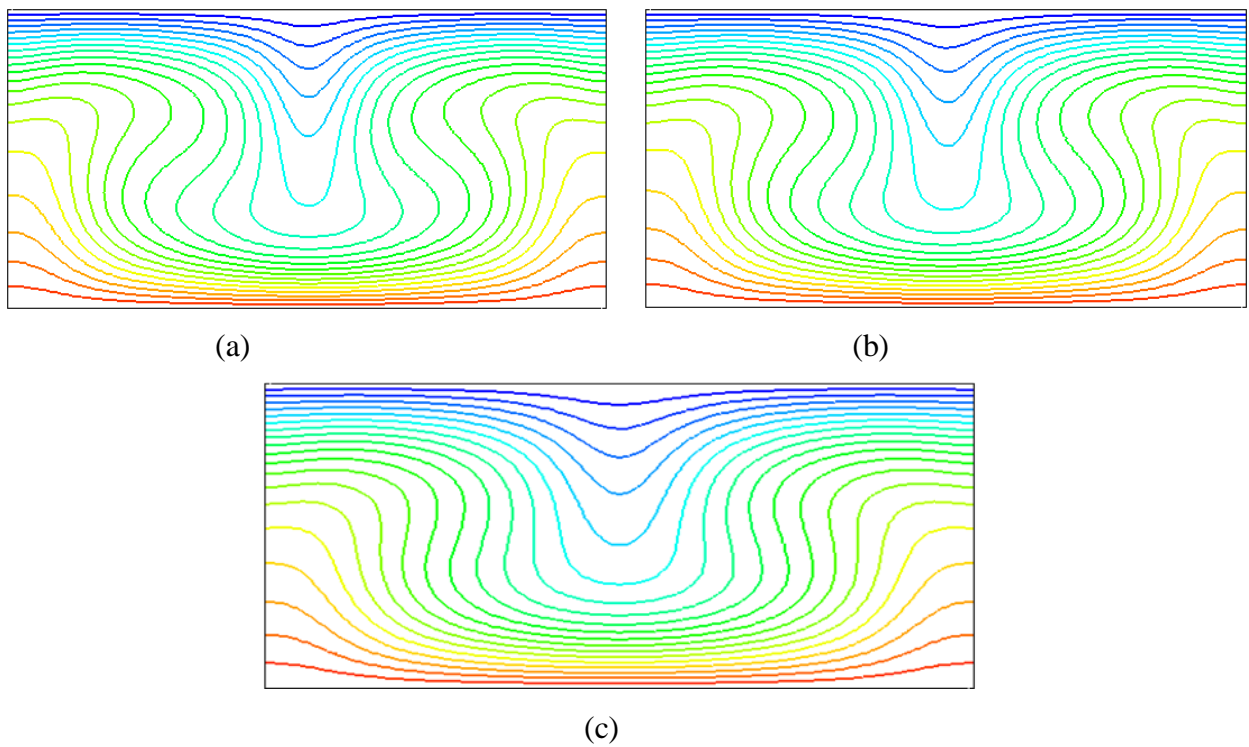


Figure III.6 : lignes isothermes pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^4$ et $\varphi=0.01$.

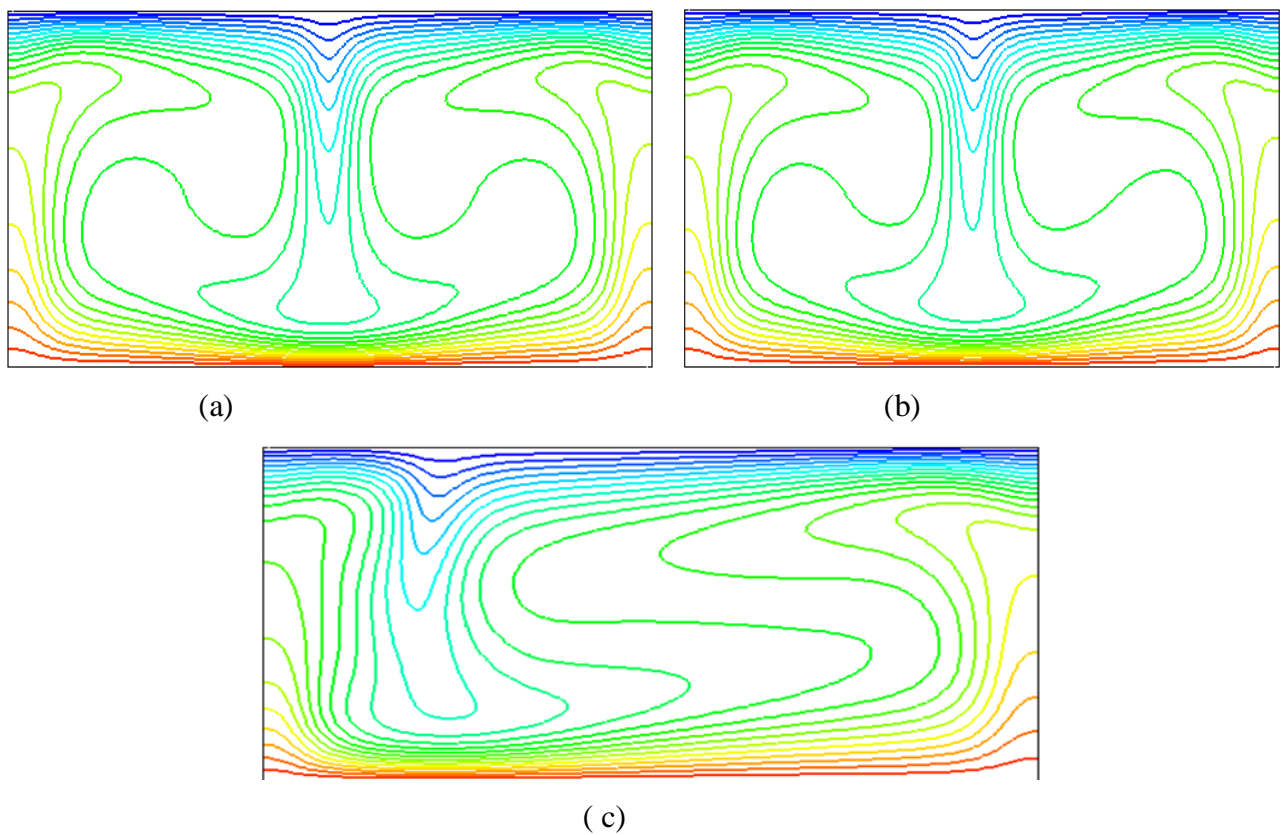


Figure III.7 : lignes isothermes pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^5$ et $\varphi=0.01$.

c. Nombre de Nusselt local

La variation du nombre de Nusselt local pour différents nombres de Hartmann ($Ha=0, 5$ et 10) avec $\varphi = 0.01$ et $Ra=10^4$ puis avec $Ra=10^5$ est présentée sur la figure (III.8). D'après cette figure, on remarque que pour $Ha=0$ le taux de transfert de chaleur est important. L'application d'un champ magnétique ($Ha > 0$) conduit à une diminution de taux de transfert de chaleur dans la cavité. Donc on peut déduire que le transfert de chaleur diminue avec l'augmentation de l'intensité du champ magnétique.

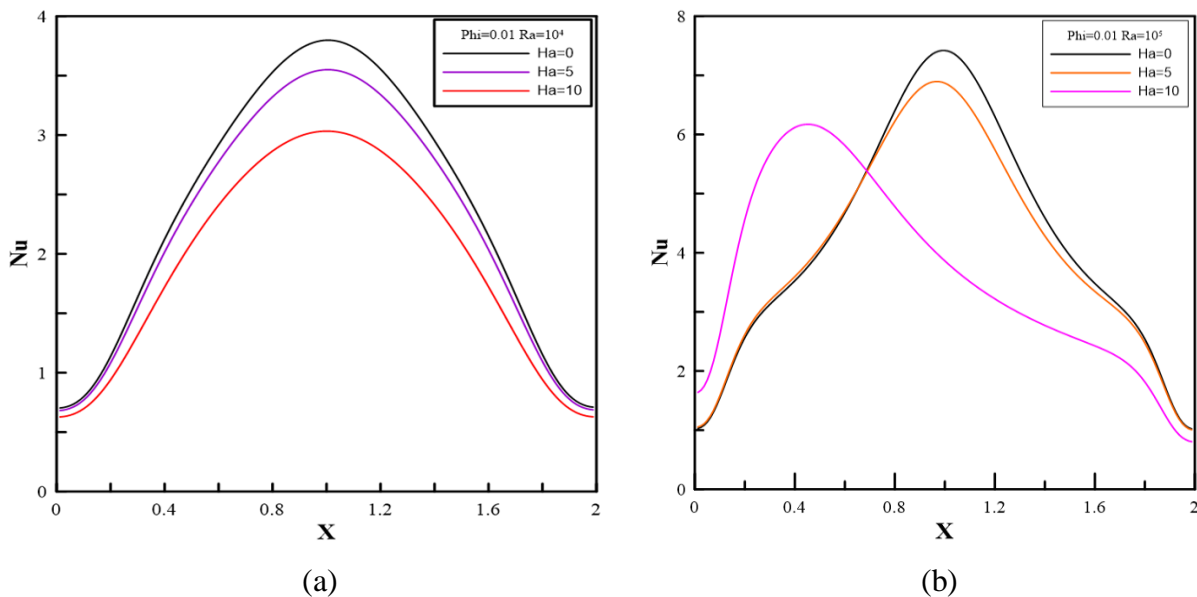


Figure III.8 : Effet du nombre de Hartmann (Ha) sur le nombre de Nusselt local (Nu) avec $\varphi = 0.01$
(a) $Ra=10^4$ (b) $Ra=10^5$

d. Profil de vitesse

La Figure (III.9) représente le profil de vitesse pour différents nombres de Hartmann ($Ha=0, 5$ et 10) avec $\varphi = 0.01$ et $Ra=10^4$. La figure montre que les vitesses diminuent progressivement avec l'augmentation du nombre de Hartmann c'est à dire l'accroissement de l'intensité du champ magnétique. On peut dire que à la présence d'un champ magnétique, il y a une force magnétique qui s'exerce sur les particules fluides et dévie constamment leur direction. Cette force agit selon Y, elle augmente avec l'intensité du champ magnétique.

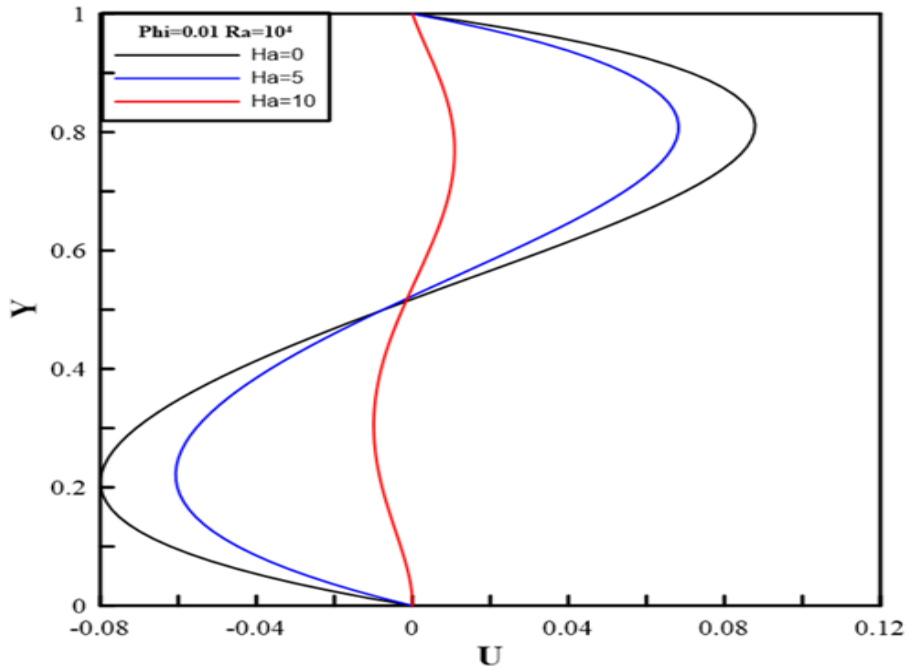


Figure III.9: Profil de la Vitesse Horizontale à $Y=1$ avec $\varphi = 0.01$ $Ra=10^4$

III.5.2. L'effet de la variation du nombre de Rayleigh

La figure III.10 représente la variation du nombre de Nusselt local pour différents nombres de Rayleigh ($Ra=10^4$ et 10^5) avec $\varphi = 0.01$ et ($Ha=0, 5, 10$). On constate que le nombre du Nusselt local augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, donc on peut déduire que l'augmentation du nombre de Rayleigh augmente le transfert de chaleur.

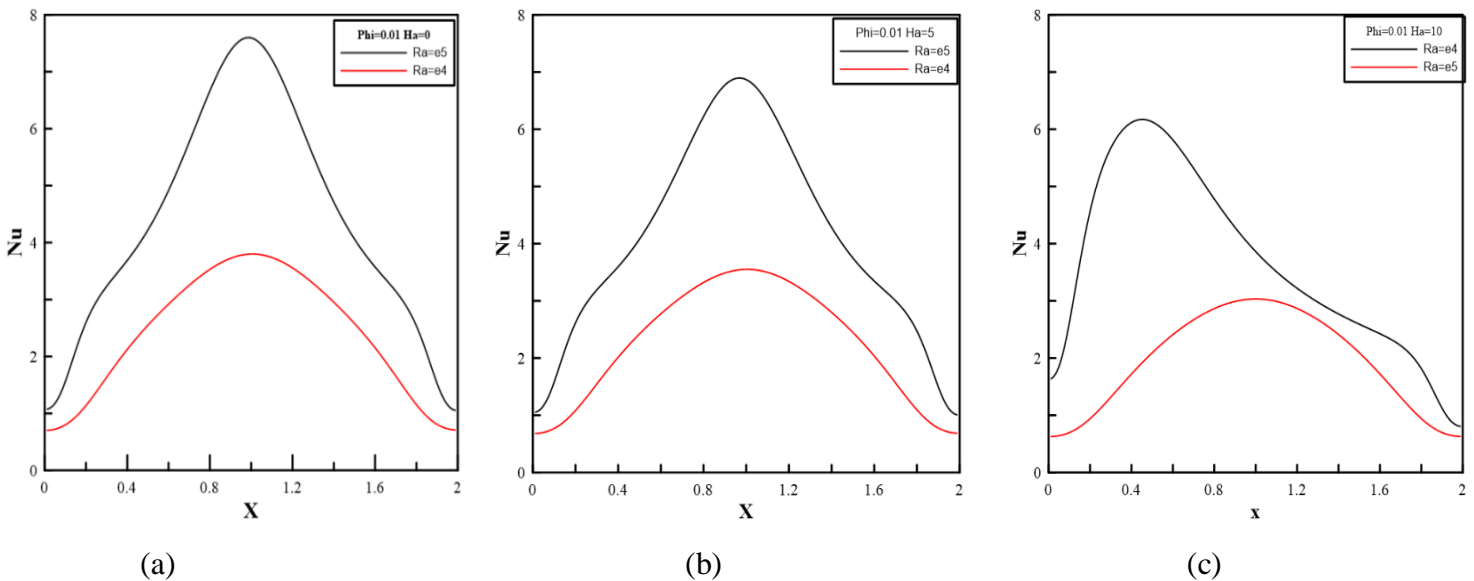


Figure III .10 : Effet de la variation du nombre de Rayleigh sur Nusselt local avec $\varphi = 0.01$, (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$

III.5.3. Influence de la concentration de nanoparticules ϕ

La figure (III.11) représente l'effet de la fraction volumique des nanoparticules ϕ sur les profils du nombre de Nusselt local le long de la paroi inférieure chaude, avec $Ra=10^4$ et $Ha=10$. On remarque de ces résultats que l'augmentation de la concentration des nanoparticules a un impact direct sur l'échange de chaleur, plus la concentration est importante plus le coefficient de transfert de chaleur est grand. Notamment, la figure montre que le profil de Nusselt local augmente au milieu de la paroi et demeure presque constant aux extrémités des parois.

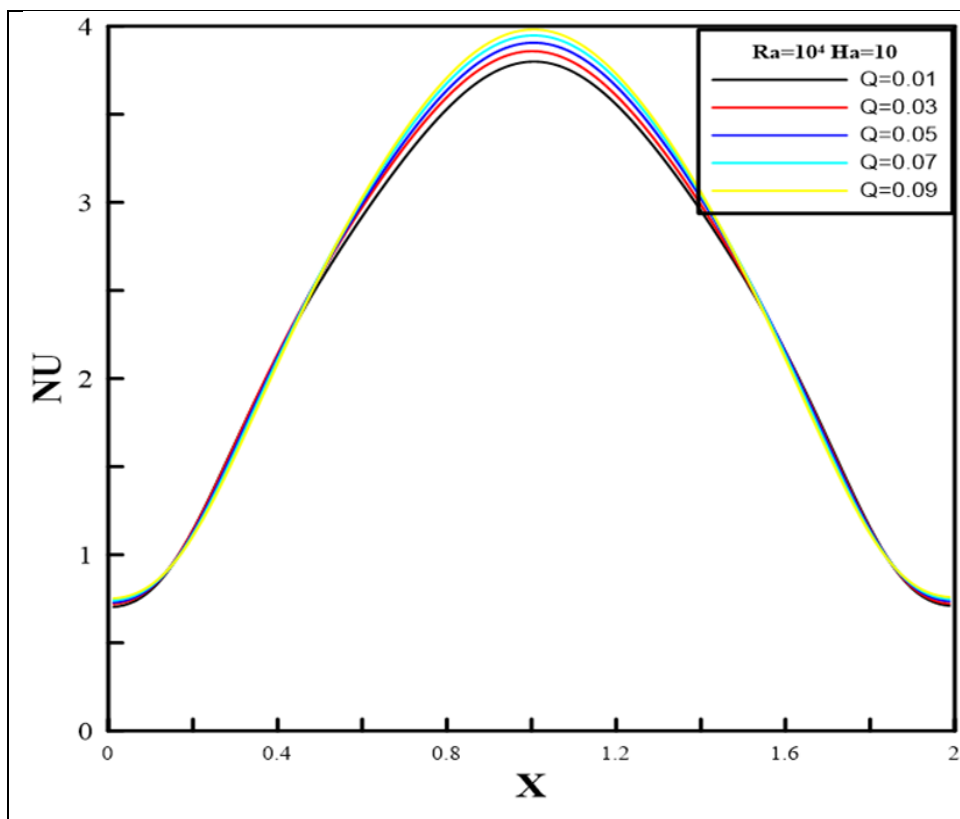


Figure III .11 : Effet de la fraction volumiques (ϕ) sur le nombre de Nusselt local (Nu), le long de la paroi chaude inférieure avec $Ha=10$ $Ra=10^4$

III.5.4. L'effet du rapport de forme

Pour voir l'effet du rapport de forme de la géométrie, représenté par la formule $A = (H/L)$ sur l'écoulement, on va le varier ($A=2$) et faire une comparaison concernant les lignes de courant, les isothermes et le nombre de Nusselt local.

a. Les lignes de courant

La figure (III.12) représente la trajectoire des lignes de courant pour différentes valeurs du nombre de Hartmann ($Ha=0, 5$ et 10), avec $\varphi = 0.01$, $Ra=10^4$ et $A=2$.

A $Ha=0$, on remarque que l'écoulement au sein de la cavité est unicellulaire, la cellule est inclinée vers la gauche, l'augmentation du nombre de Hartmann ($Ha > 0$) tend à disparaître l'inclinaison.

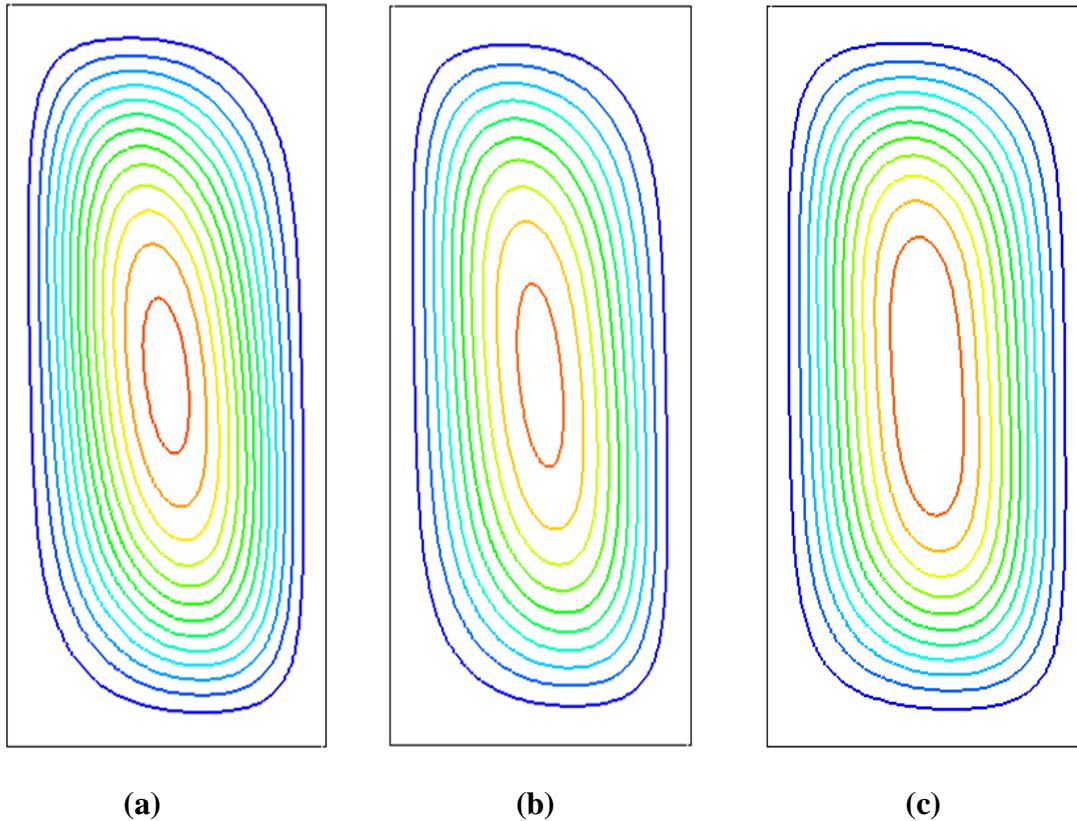


Figure III.12 : Lignes de courant pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^4$, $\varphi=0.01$ et $A=2$

b. Les isothermes

La Figure (III.13) représente les lignes isothermes pour différentes valeurs du nombre de Hartmann ($Ha=0, 5$ et 10), avec $\varphi = 0.01$, $Ra=10^4$ et $A=2$.

A $Ha=0$, on remarque la distorsion et la déformation des lignes isothermes, l'augmentation du nombre de Hartmann ramène les lignes isothermes à devenir sur une forme stratifiée puisque l'augmentation de l'intensité du champ magnétique réduit le transfert de chaleur dans l'écoulement.

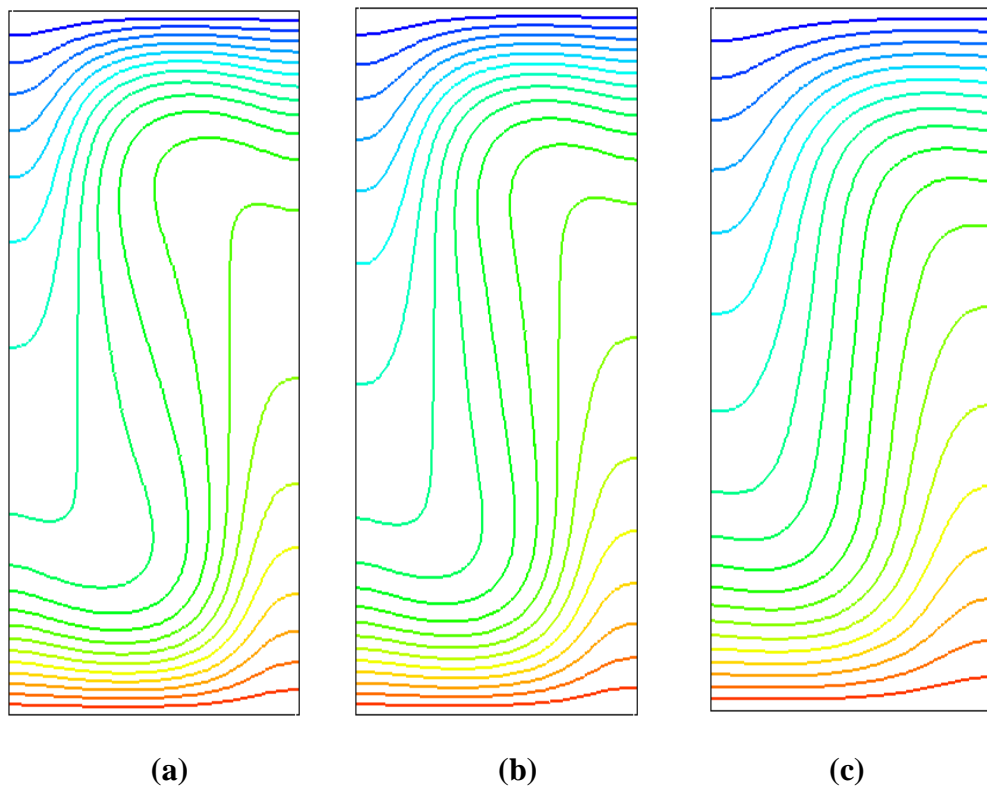


Figure III.13 : Lignes isothermes pour différents Hartmann (a) $Ha=0$, (b) $Ha=5$, (c) $Ha=10$ avec $Ra=10^4$, $\varphi=0.01$ et $A=2$

c. Nombre de Nusselt local

La figure (III.14) représente la variation du nombre de Nusselt local pour différents nombres de Hartmann ($Ha=0, 5, 10$) avec $\varphi=0.01$, $Ra=10^4$ et $A=2$. D'après cette figure, pour $Ha=0$ le taux de transfert de chaleur est important, après l'augmentation du nombre de Hartmann on remarque la diminution de taux de transfert de chaleur dans la cavité. Alors on peut dire que le transfert de chaleur diminue avec l'augmentation de l'intensité du champ magnétique.

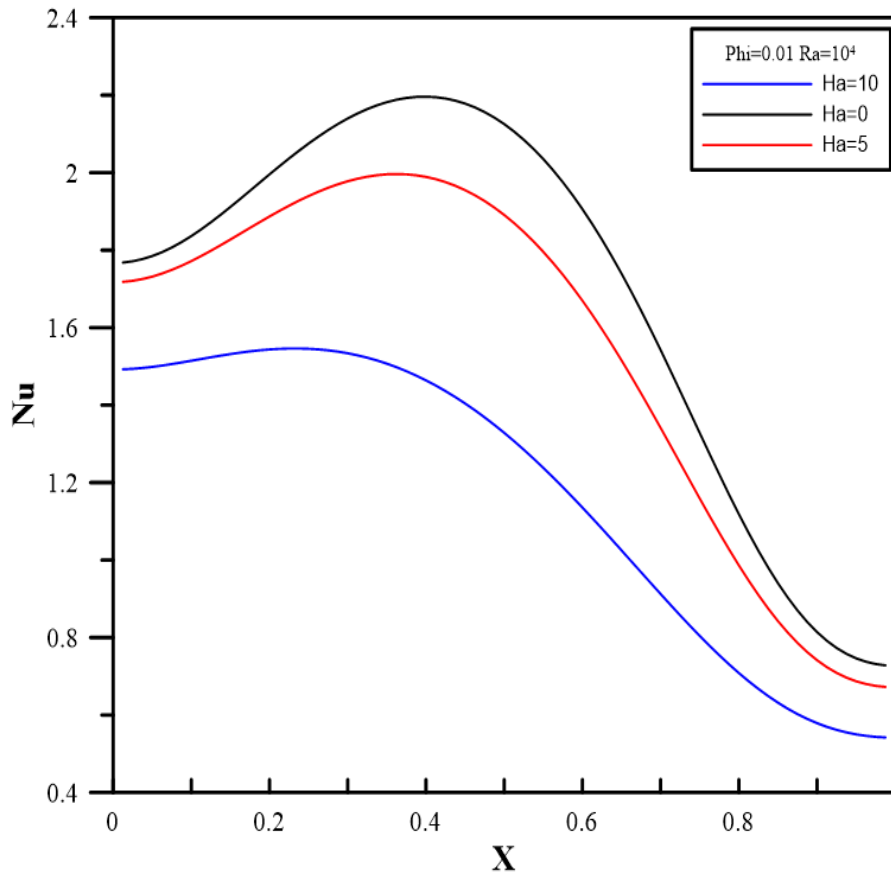


Figure III.14 : Effet du nombre de Hartmann (Ha) sur le nombre de Nusselt local (Nu) avec $\varphi=0.01$, $Ra=10^4$ et $A=2$

Pour le premier cas quand $A=0.5$, les profils de Nusselt local sont symétriques contrairement au deuxième cas quand $A=2$, la symétrie a été disparue. De plus, le taux de transfert de chaleur enregistré quand $A=0.5$ est plus important par rapport à celui enregistré quand $A=2$ (Figure III.14). Cette importance de transfert de chaleur a été confirmée par l'apparition d'un panache thermique donné par les lignes isothermes, on peut voir aussi que les lignes de courants étaient bicellulaires quand $A=0.5$ et elles sont devenues unicellulaire quand $A=2$.

On peut conclure que dans toutes les configurations, l'augmentation du rapport de forme et l'intensité du champ magnétique ont tendance de réduire les transferts de chaleur. Donc on peut contrôler le transfert de chaleur en variant l'intensité du champ magnétique et la valeur du rapport de forme.

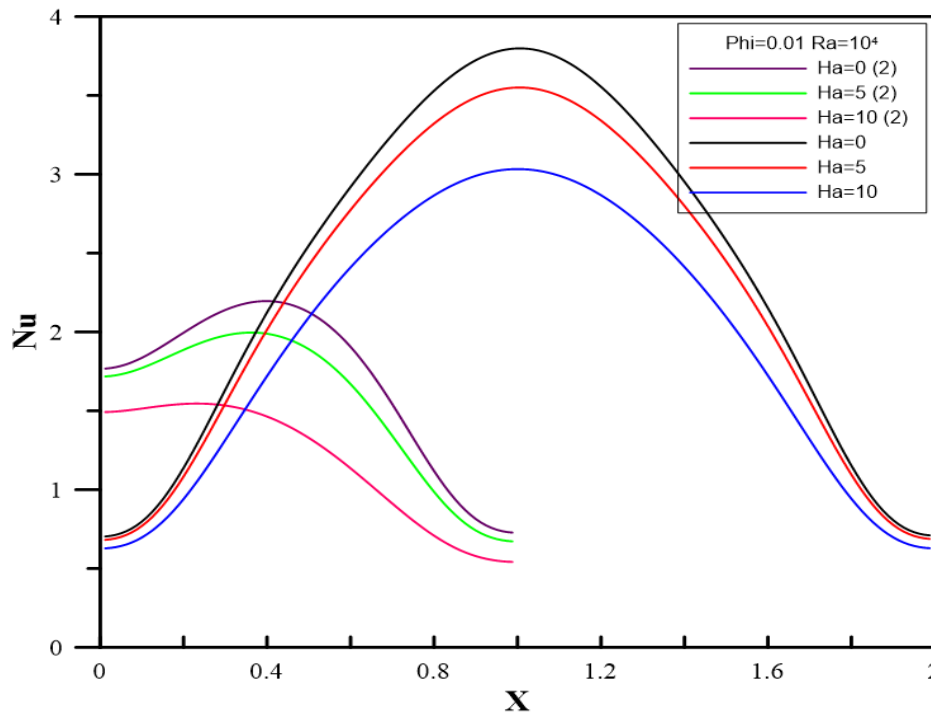


Figure III.15 : Comparaison de l'effet du nombre de Hartmann (Ha) sur le nombre de Nusselt local (Nu) avec $\phi=0.01$ $Ra=10^4$ entre les 2 cas ($A=0.5$ et ($A=2$).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié numériquement le transfert de chaleur dans une cavité rectangulaire soumise à un champ magnétique en présence d'un ferrofluide pour un maillage 80×160 .

On a analysé les effets du rapport de forme, des nombres de Hartmann, Rayleigh et de la fraction volumique des nanoparticules sur le transfert thermique dans la cavité.

Les résultats de la simulation numérique ont mené aux conclusions suivantes :

- ❖ L'augmentation du nombre de Rayleigh augmente le taux de transfert de chaleur.
- ❖ Le transfert de chaleur diminue en augmentant le nombre de Hartmann.
- ❖ Le profil de vitesse diminue en augmentant le nombre de Hartmann.
- ❖ L'augmentation de la concentration volumique du ferrofluide améliore le taux de transfert de chaleur.
- ❖ L'augmentation du rapport de forme réduit le transfert de chaleur.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, on s'est concentré sur l'étude numérique de l'effet du champ magnétique sur le transfert de chaleur dans une cavité rectangulaire remplie d'un ferrofluide ($\text{H}_2\text{O}-\text{Fe}_3\text{O}_4$). La paroi inférieure est maintenue à une température chaude, la paroi supérieure à une température froide tandis que les parois gauche et droite sont supposées adiabatiques. La cavité est soumise à un champ magnétique selon X.

Les équations gouvernantes sont les équations de continuité, Navier Stocks et de l'énergie établies avec l'hypothèse de l'approximation de Boussinesq. Un programme basé sur la méthode des volumes finis et d'algorithme SIMPLE, a été utilisé pour résoudre les équations du modèle mathématique. Les effets des nombres de Hartmann, Rayleigh, de la fraction volumique du ferrofluide et l'effet du rapport du forme de la géométrie sur le transfert thermique ont été examinés en détail. Grâce à notre étude nous pouvons conclure que :

- ❖ L'augmentation du nombre de Hartmann réduit le taux de transfert de chaleur.
- ❖ Le profil de vitesse diminue en augmentant le nombre de Hartmann.
- ❖ L'augmentation du nombre de Rayleigh améliore le taux de transfert de chaleur.
- ❖ L'accroissement de la concentration volumique des nanoparticules améliore le taux de transfert de chaleur.
- ❖ L'augmentation du rapport de forme réduit le transfert de chaleur.

Nous espérons mener prochainement des études plus approfondies dans notre domaine d'étude, qui concerne les cavités rectangulaires remplies d'un ferrofluide sous l'effet d'un champ magnétique, nous recommandons :

- D'étendre cette étude à d'autres formes et configurations plus complexes ;
- D'élargir le domaine de simulation en trois dimensions ;
- Etude du problème dans le cas de l'écoulement instationnaire et le régime turbulent ;
- Introduire le mode de transfert de chaleur par rayonnement, ainsi que le mouvement des parois.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. Deleporte, E. Partie 1 : définition, histoire, propriétés magnétiques et applications (1). 115, (2021).
- [2]. Browaeys, J. Les ferrofluides : ondes de surface, résistance de vague et simulation de la convection dans le manteau terrestre.
- [3]. Lawrence Berkeley National Laboratory. New laws of attraction : Scientists print magnetic liquid droplets. (2019).
- [4]. Pinho, M. Comportement statique et dynamique d'une suspension de haut-parleur à joint de ferrofluide. (école doctorale de l'université du maine le mans, France, 2011).
- [5]. Fodil, K. De la détection à l'imagerie de nanoparticules magnétiques. (L'université de Caen Basse-Normandie, 2014).
- [6] LALLET, G. & VERDIER, P. Introduction aux ferrofluides & suspensions magnétorhéologiques.
- [7]. Moussa, K. Étude Numérique de la Convection Mixte dans un Canal Horizontal Contenant des Ailettes. (UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI - CONSTANTINE, 2016).
- [8]. Sathiyamoorthy, M. & Chamkha, A. Effect of magnetic field on natural convection flow in a liquid gallium filled square cavity for linearly heated side wall(s). *Int. J. Therm. Sci.* 49, 1856–1865 (2010).
- [9]. Bahiraei, M., Hangi, M. & Rahbari, A. A two-phase simulation of convective heat transfer characteristics of water–Fe₃O₄ ferrofluid in a square channel under the effect of permanent magnet. *Appl. Therm. Eng.* 147, 991–997 (2019).
- [10]. Mojumder, S., Saha, S., Saha, S. & Mamun, M. A. H. Effect of Magnetic Field on Natural Convection in a C-shaped Cavity Filled with Ferrofluid. *Procedia Eng.* 105, 96–104 (2015).
- [11]. Mojumder, S., Saha, S., Saha, S. & Mamun, M. A. H. Effect of Magnetic Field on Natural Convection in a C-shaped Cavity Filled with Ferrofluid. *Procedia Eng.* 105, 96–104 (2015).
- [12]. Hekmat, M. H. & Ziarati, K. K. Effects of nanoparticles volume fraction and magnetic field gradient on the mixed convection of a ferrofluid in the annulus between vertical concentric cylinders. *Appl. Therm. Eng.* 152, 844–857 (2019).
- [13]. Siddiqui, A. A. & Turkyilmazoglu, M. Natural convection in the ferrofluid enclosed in a porous and permeable cavity. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 113, 104499 (2020).

Références bibliographiques

- [14]. Bhandari, A. Effect of the diameter of magnetic core and surfactant thickness on the viscosity of ferrofluid. *J. Magn. Magn. Mater.* 548, 168975 (2022).
- [15]. Jafaryar, M. & Sheikholeslami, M. Efficacy of magnetic field on performance of photovoltaic solar system utilizing ferrofluid. *J. Magn. Magn. Mater.* 562, 169798 (2022).
- [16]. Jalili, B., Sadighi, S., Jalili, P. & Ganji, D. D. Characteristics of ferrofluid flow over a stretching sheet with suction and injection. *Case Stud. Therm. Eng.* 14, 100470 (2019).
- [17]. Rasaee, S., Shahsavari, A. & Niazi, K. Experimental assessment on convection heat transfer characteristics of aqueous magnetite ferrofluid in a rifled tube under a rotating magnetic field. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 129, 105673 (2021).
- [18]. Gavili, A., Zabihi, F., Isfahani, T. D. & Sabbaghzadeh, J. The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 41, 94–98 (2012).
- [19]. Alsaady, M., Fu, R., Li, B., Boukhanouf, R. & Yan, Y. Thermo-physical properties and thermo-magnetic convection of ferrofluid. *Appl. Therm. Eng.* 88, 14–21 (2015).
- [20]. Azarkh, D. et al. Characterization of transient rheological behavior of soft materials using ferrofluid droplets. *Sens. Actuators Phys.* 344, 113756 (2022).
- [21]. Niu, X.-D. et al. A simplified phase-field lattice Boltzmann method with a self-corrected magnetic field for the evolution of spike structures in ferrofluids. *Appl. Math. Comput.* 436, 127503 (2023).
- [22]. Pour Razzaghi, M. J. et al. Investigation of a temperature-sensitive ferrofluid to predict heat transfer and irreversibilities in LS-3 solar collector under line dipole magnetic field and a rotary twisted tape. *Int. J. Therm. Sci.* 185, 108104 (2023).
- [23]. Priyadharsini, S. & Sivaraj, C. Numerical simulation of thermo-magnetic convection and entropy production in a ferrofluid filled square chamber with effects of heat generating solid body. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 131, 105753 (2022).
- [24]. S.V.Patankar, Patankar Numerical Heat Transfert and Fluid Flow. 1980.
- [25]. Bakar, N. A., Karimipour, A., & Roslan, R. Effect of magnetic field on mixed convection heat transfer in a lid-driven square cavity. *Journal of Thermodynamics*, 2016.

Résumé

Ce mémoire représente une étude numérique sur l'effet du champ magnétique sur la convection naturelle dans une cavité rectangulaire et remplie d'un ferrofluide (Fe_3O_4 -eau). La paroi inférieure est maintenue à une température chaude, la paroi supérieure est maintenue à une température froide tandis que les parois gauche et droite sont supposées adiabatiques. Les équations qui régissent ce phénomène ont été résolues par une approche numérique, basée sur la méthode des volumes finis. L'étude a été réalisée pour différents nombres de Hartmann, de Rayleigh, différentes concentrations du ferrofluide (φ) aussi le rapport de forme et leurs effets sur le taux de transfert de chaleur a été examiné. Les résultats démontrent que l'augmentation du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique améliorent le taux de transfert de chaleur, tandis que l'augmentation du nombre d'Hartmann et de rapport de forme réduit le transfert de chaleur.

Mot clés : Ferrofluide, Convection naturelle, Magnétohydrodynamique, Cavité rectangulaire.

Abstract

This work presents a numerical study of the effect of the magnetic field on natural convection in a rectangular cavity filled with a ferrofluid (Fe_3O_4 -water). The bottom wall is kept hot, the top wall cold, and the left and right walls considered adiabatic. The equations governing this phenomenon were solved using a numerical approach based on the finite volume method. The study was carried out for different Hartmann and Rayleigh numbers, different ferrofluid concentrations (φ) as well as the aspect ratio, and their effects on the heat transfer rate were examined. The results show that increasing the Rayleigh number and volume fraction improves the heat transfer rate, while increasing the Hartmann number and aspect ratio reduces heat transfer.

Keywords : Ferrofluid, Natural convection, Magnetohydrodynamics, Rectangular cavity.