



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

N° d'ordre :/Master/2016.

Série :/GM/2016.

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de master en Génie Mécanique

OPTION :

Mécanique Energétique

Par:

MEFTI Mohamed

Bousiga Rabah

THEME

**ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU CHAMP MAGNÉTIQUE
SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES
ÉCOULEMENTS ROTATIFS**

Soutenu le : 27 / 06 /2016

Devant le jury composé de :

Président :	Dr. DJELLAL.Slimane	MCB	Université de Bouira
Rapporteur :	Dr. ABARKANE Sofiane	MAB	Université de Bouira
Examineurs :	Mr.MOUSSAOUI.Mohamed	MAA	Université de Bouira
	Mr.BOUREGBI.Lakhdar	MAB	Université de Bouira

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu tout Puissant qui nous a donné la force de continuer et de terminer nos

Études et ce travail

Nous remercions en première ligne à

***Dr ABERKANE Sofiane docteur** à l'Université de bouira*

Pour encadrer et diriger ce travail avec patience

Nous remercions vivement aux membres de jury

Nous remercions tous les enseignants du département Génie mécanique

Pour tout le savoir que nous avons acquis grâce à eux durant notre formation.

Nous remercions nos famille surtout nos parentes et nos frères et proches amis qui ont été si présents, et n'ont jamais cessé de nous encourager. et nous

Souhaitant beaucoup de réussite dans leurs vies et un bon avenir.

Dédicace



J'offre ce modeste travail :

*A ceux qui m'ont mis au monde, que je respect et qui
m'honorent, ma mère et mon père*

A mes chers frères et sœurs,

*A tout mes amis, ils sont nombreux ils se reconnaîtront
sûrement*

*A tous ceux qui m'ont encouragé tout au long de mes
études.*

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclatures	
Résumé	
Introduction générale	1

Chapitre I

Généralités et Revue Bibliographique

I.1. Introduction	3
I.2. Définition de La Convection.....	3
I.2.1. Convection naturelle	3
I.2.2. Convection forcée	4
I.2.3. Convection mixte.....	4
I.3. Définition de La magnétohydrodynamique (MHD)	4
I.3. Les Fluides conducteurs d'électricité	5
I.3.1 Métaux liquides	5
I.3.2 Plasma	5
I.3.3 Définition d'un ferrofluide	6
I.4. Revue bibliographique	6
I.4 Conclusion	15

Chapitre II

Modélisation mathématique

II.1. Introduction	16
--------------------------	----

II.2. Description du problème physique	16
II.3. Equations générales	17
II.3.1 Equations régissant le milieu fluide	17
II.3.2 Equations du champ électromagnétique	18
II.4. Les Hypothèses simplificatrices	19
II.5. Equations gouvernantes simplifiées	20
II.5.1 Les équations de conservation	20
II.5.2 Les Conditions aux limites	21
II.5.3 Les équations adimensionnelles	21
II.5.4 Les Condition aux limites adimensionnelles.....	22
II.6. Conclusion	22

Chapitre III

Etude numérique

III.1. Introduction	23
III.2. Modélisation CFD des écoulements	23
III.3. Présentation du logiciel ANSYS Workbench	24
III.3.1 Création de la géométrie	24
III.3.2 Discrétisation des domaines de calcul (le maillage).....	25
III.3.3 ANSYS FLUENT	26
III.3.3.1 Procédure sous "Fluent"	27
III.3.3.2 Choix de Simple précision ou double précision ?	27
III.4. Modèle Magnétohydrodynamique	28
III.5. Propriétés de fluide	28
III.6. Conditions aux limites	28
III.7. Les schémas numériques	29
III.7.1. Résolution du couplage vitesse-pression	29

III.7.2. Schémas de discrétisation spatiale	29
III.7.3. Choix du schéma d'interpolation de la pression	30
III.8. Facteurs de relaxation	30
III.9. Schéma de convergence	31
III.10. Conclusion	32

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1. Introduction	33
IV.2. Paramètres du contrôle physique de système	33
IV.3. Etude de densité de maillage.....	34
IV.4. Validation des modèles numérique.....	36
IV.5. Influence du nombre de Prandtl.....	37
IV.6. L'effet du champ magnétique sur le champ thermique et dynamique	40
IV.6.1 L'effet du nombre de Hartmann sur les lignes de courants et les contours de température	40
IV.6.2 Effet du nombre de Hartmann sur le profil de vitesse azimutale	43
IV.6.3 L'effet du nombre de Hartmann sur le profil de température.....	44
IV.6.4 L'effet de nombre de Hartmann sur la distribution du nombre de Nusselt local.....	45
IV.7 Conclusion	46
Conclusion générale	47

Référence bibliographique

ANNEX

Liste des figures

Chapitre II

Figure II.1: Configuration du problème.....	16
---	----

Chapitre III

Figure III.1 : l'interface de logiciel ANSYS Workbench.....	24
---	----

Figure III.2 : l'interface de Le logiciel ANSYS DesignModeler	25
---	----

Figure III. 3: Maillage de la cavité d'espace annulaire.....	26
--	----

Figure III.4: Fenêtre de démarrage de fluent.....	27
---	----

Figure III.5 : Schéma de convergence pour $Re=100$ et $Ha= 0$	31
---	----

Figure III.6 : Schéma de convergence pour $Re= 100$ et $Ha= 50$	31
---	----

Chapitre IV

FigureIV.1: Influence du maillage sur le profil radial de la vitesse azimuthal pour $Re=100$, $Ha=30$, $Ra=10000$ et $Pr=0.023$	35
---	----

Figure IV.2: Influence du maillage sur le profil radial de la température pour $Re=100$, $Ha=30$, $Ra=10000$ et $Pr=0.023$	35
--	----

Figure IV.3 : Configuration des lignes de courants, pour $Pr= 0,7$, $Re=100$, $Ra=10000$	36
--	----

Figure IV.4 : Configuration de température Isothermes Pour ($Pr= 0,7$, $Re=100$, $Ra=10000$)	37
--	----

Figure IV.5 : Lignes de courant pour (a) gallium, (b) air, (c) eau, pour $Re=100$, $Ra=10000$	38
--	----

Figure IV.6 : champ de température pour (a) gallium, (b) air, (c) eau, pour $Re=100$, $Ra=10000$	39
---	----

Figure IV.7 : l'effet du nombre de Hartmann sur les lignes de courants, pour $Re= 100$, $Ra=10000$ et $Pr=0.023$	41
---	----

Figure IV.8 : l'effet du nombre de Hartmann sur les contours de température, pour $Re= 100$, $Ra= 10000$ et $Pr=0.023$	42
---	----

Figure IV.9. Le profil de vitesse azimuthale à différents nombres de Hartmann, pour, $\theta=0$, $Ra=10000$, $Re =100$, $Pr=0.023$	43
---	----

Figure IV.10. Le profil de température à différents nombres de Hartmann, pour, $\theta=0$, $Ra=10000$, $Re =100$, $Pr=0.023$	44
---	----

Liste des figures

Figure IV.11 : L'effet de nombre de Hartmann sur la distribution du nombre de Nusselt local sur le cylindre intérieur, pour $Pr = 0.023$, $Re=100$, $Ra=10000$	45
Figure IV.12 : L'effet de nombre de Hartmann sur la distribution du nombre de Nusselt local sur le cylindre extérieur, pour $Pr = 0.023$, $Re=100$, $Ra=10000$	45

Liste des tableaux

Chapitre I

Table I.1 : Présentez les propriétés physiques thermiques de quelques métaux liquides5

Chapitre III

Table III 1 : Les résultats de maillage26

Tableau III.2 Propriétés thermo-physiques du Gallium métaux liquides28

Tableau III.3. Conditions aux limites de l'étude29

Tableau III.4. Facteur de sous-relaxation30

Nomenclature

Lettres latines

B	Champ magnétique (tesla)
E	Champ électrique
C _p	Chaleur spécifique à pression constante ($J.kg^{-1}.k^{-1}$).
\vec{j}	Densité de courant ($A. m^{-3}$)
d	Epaisseur de l'espace annulaire entre les deux cylindres
Ha	Nombre de Hartmann
Re	Nombre de Reynolds
Ra	Nombre de Rayleigh
Ri	Nombre de Richardson
k	Conductivité thermique, ($W.m^{-1}.k^{-1}$)
Nu	Nombre de Nusselt
P	Pression
Pr	Nombre de Prandtl
R_i	Rayon du cylindre intérieur (mm)
R_0	Rayon du cylindre extérieur (mm)
T	Température (k)
U_r	Composante radiale de la vitesse
U_θ	Composante tangentielle de la vitesse
r	Coordonnée radiale
θ	Coordonné azimuthale

Symboles Grecs:

α	Diffusivité thermique ($m^2. s^{-1}$)
Θ	Température adimensionnel
ϵ_0	Perméabilité électrique.
η	Rapport des rayons $\eta = R_1 / R_2$
μ	Viscosité dynamique ($kg. m^{-1}. s^{-1}$)
μ_m	Perméabilité magnétique ($H.m^{-1}$)
ν	Viscosité cinématique ($m^2. s^{-1}$)
ρ	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)
g	Gravités ($m.s^{-2}$)

Nomenclature

σ	Conductivité électrique ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)
θ	Coordonné azimutale (rad)
Ω_2	Vitesse angulaire de rotation du cylindre extérieur ($rad \cdot s^{-1}$)

Indices

i	Indice du cylindre intérieur
0	Indice du cylindre extérieur
(*)	Variable dimensionnelle utilisée pour (r, U_r , U_θ , P)

Nomenclature

Résumé

Résumé

Dans ce travail nous avons réalisé une simulation numérique de la convection mixte et laminaire, dans un espace annulaire entre deux cylindres horizontaux concentriques, rempli par un métal liquide, en présence d'un champ magnétique constant. La simulation numérique du problème, en 2D, a été menée en utilisant le code ANSYS Fluent 16.0 qui se base sur la méthode des volumes fins. On a montré l'influence de nombre de Prandtl sur les écoulements convectifs, qui montrent que le métal liquide a un comportement assez différents de ceux observés dans les fluides à haut nombre de Prandtl. Les résultats obtenus montrent aussi que l'application du champ magnétique a pour effet de stabiliser l'écoulement. La vitesse et la température entre les deux cylindres décroissent d'avantage au fur et à mesure que le nombre de Hartmann augmente. En augmentant le nombre de Hartmann, on constate une nette décroissance du nombre de Nusselt sur la surface des cylindres.

Mots clés: *convection mixte, Cylindres concentriques, espace annulaire, champ magnétique, ANSYS Fluent.*

Résumé

Abstract

In this work we performed a numerical simulation of laminar mixed convection and, in an annular space between two concentric horizontal cylinders, filled with a liquid metal in the presence of a constant magnetic field. A numerical simulation of the problem, in 2D, was carried out by using the ANSYS Fluent code which is based on the finite volume method. The influence of the Prandtl number on the convective flows for different fluids was studied. The results show that fluids characterized with a low Prandtl number (liquid metals) have a rather different behavior from those with a high Prandtl number. The results show that for different values of the Hartmann number, the velocity and temperature between the two cylinders decreases as the Hartmann number increases. Also, it is found that by increasing the Hartmann number, the Nusselt number decrease.

Keywords: *Mixed convection , Concentric cylinders , Annulus, magnetic field, ANSYS Fluent.*

Résumé

ملخص

قمنا بدراسة ظاهرة الحمل المختلط و بصفة دائمة في الفضاء الحلقي داخل اسطوانتين متمركزتين أفقياً، هذا الفضاء الحلقي مملوء بسائل معدني، في وجود حقل مغناطيسي مفروض يعتبر متجانساً وثابتاً. وقد أجريت المحاكاة العددية للمشكلة 2D باستخدام برنامج ANSYS Fluent 16.0 التي تعتمد على طريقة الأحجام المتناهية الصغرى. ولقد ثبت تأثير عدد Prandtl على التدفقات الحمل الحراري، والتي تظهر أن المعدن السائل لديه سلوك مختلفة تماماً عن تلك التي لوحظت في سوائل عدد كبير Prandtl. بيّنت النتائج أيضاً أن القيم المتوسطة لشدة الحقل المغناطيسي تنقص قيم السرعة و الحرارة. عندما تبلغ شدة الحقل المغناطيسي قيمة كبرى فإن ذلك يتسبب في تناقص واضح لأعداد Nusselt.

الكلمات المفتاحية : الحمل المختلط ، اسطوانتين متمركزتين أفقياً، الفضاء الحلقي ،الحقل المغناطيسي، ANSYS

Fluent

L'étude de l'écoulement en rotation des fluides électriquement conducteurs tels que les métaux liquide et le plasma en présence du champ magnétique, appelée magnétohydrodynamique (MHD) a beaucoup été analysé ces dernières années en raison de son importance dans la mécanique des fluides moderne et ses diverses applications.

La magnétohydrodynamique décrit le comportement d'un fluide conducteur du courant électrique (ce fluide peut être un liquide, un gaz ionisé, un plasma). C'est une généralisation de la mécanique des fluides, qui est la magnétohydrodynamique dans le cas particulier où il n'y a pas de champ électromagnétique. Or la mécanique des fluides est déjà très compliquée, la magnétohydrodynamique est donc mal maîtrisée. Entre la mécanique des fluides et la magnétohydrodynamique, une version intermédiaire est l'électrohydrodynamique en présence d'un champ électrique (électrostatique). La magnétohydrodynamique (MHD) est un domaine très vaste de la physique qui concerne l'interaction entre un champ électromagnétique et un fluide conducteur de l'électricité. Ainsi, on conçoit aisément que, suivant le type d'interaction, on puisse trouver la MHD liée aux problèmes apparemment disjoints de la couronne solaire, de la magnétosphère, de la conversion d'énergie fossile en énergie électrique, de la fusion thermonucléaire de la propulsion ou encore aux techniques industrielles de la métallurgie et la stabilité des écoulements convectifs.

L'utilisation des logiciels commerciaux tels que Ansys-fluent, basé sur la méthode des volumes finis permet de représenter le couplage entre les équations qui régissent le système à étudier et qui sont les trois équations de base de la physique des milieux continus : équations de Maxwell, équations de Navier Stokes et l'équation de diffusion de la chaleur, en tenant compte du mouvement du fluide.

➤ **Objectifs de l'étude:**

Le présent travail concerne l'étude de l'écoulement d'un fluide incompressible conducteur d'électricité dans un espace annulaire cylindrique. Cet écoulement résulte de la rotation du cylindre extérieur en présence d'un gradient de température et un champ magnétique uniforme et externe.

L'objectif de ce mémoire est de déterminer l'influence du champ magnétique sur la convection mixte dans l'espace annulaire, et Analyser l'influence de différents paramètres caractéristiques du problème tels que le nombre de Reynolds et le nombre de Hartmann sur les champs dynamique et thermique.

Les résultats de simulation développés à base de la méthode des volumes finis en 2D, simulant le problème physique étudié seront présentés et validés par le logiciel de calcul ANSYS-Fluent

➤ **Contenu du mémoire**

Le présent travail comporte quatre chapitres. Le premier est consacré à une revue bibliographique sur les écoulements MHD et les principaux résultats sur l'effet du champ magnétique sur le transfert de chaleur dans les écoulements rotatifs.

Dans le deuxième chapitre, nous développerons la formulation mathématique du problème étudié.

La technique numérique adoptée dans notre travail en précisant le schéma d'interpolation, le maillage et les conditions aux limites seront exposés dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre sera consacré aux résultats de l'approche numérique, nous présenterons les résultats de l'influence du champ magnétique sur la convection mixte dans un espace confiné rotatif.

Enfin, une synthèse des résultats obtenus est présentée en conclusion et sur cette base des perspectives sont proposées.

Finalement nous concluons ce travail par un récapitulatif sur les principaux résultats et une conclusion, ainsi que ses perspectives ultérieures.

I.1. Introduction

L'étude de l'écoulement des fluides conducteurs de l'électricité tels que les métaux liquide et le plasma en présence du champ magnétique, appelée magnétohydrodynamique (MHD) a été beaucoup investigué ces dernières années en raison de son importance dans la mécanique des liquides moderne et de ses diverses applications. En astrophysique et géophysique, il est appliqué à l'étude des structures stellaires, des noyaux terrestres et plasma solaire. La magnétohydrodynamique est aussi directement au cœur d'applications technologiques sous forme de machines électromagnétiques sans pièce mobile, appelées des convertisseurs MHD, qui agissent sur le fluide au moyen de la force de Laplace et qui peuvent être utilisées soit pour la génération d'électricité (générateur MHD), l'accélération de fluides (accélérateur MHD) ou encore leur freinage, il trouve aussi son application, dans la métallurgie et la croissance cristalline dans le domaine des semi-conducteurs, le contrôle du comportement et de la stabilité des écoulements convectifs. Dans le cas particulier d'un plasma créé dans de l'air atmosphérique pour des applications aéronautiques, on parlera alors de magnéto-aérodynamique (MAD).

I.2. Définition de La Convection

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

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre, convection forcée et par la combinaison des deux (convection mixte). [24]

I.2.1. Convection naturelle : Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultantes des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

I.2.2. Convection forcée : Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur,).

I.2.3. Convection mixte : La convection mixte est le résultat de la superposition d'un écoulement de convection forcée et d'un écoulement de convection naturelle. Lorsque les écoulements de convection forcée et de convection naturelle vont dans le même sens, on est en présence d'un écoulement de convection mixte favorable. Dans le cas contraire, on assiste à un écoulement de convection mixte défavorable.

Le nombre adimensionnel qui détermine laquelle de ces deux convections est dominante est le nombre de Richardson, (Ri). C'est le rapport du nombre de Grashof, (Gr), au carré du nombre de Reynolds, (Re)

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$

Pour $Ri = \frac{Gr}{Re^2} \leq 0.1$ la convection forcée qui domine

Pour $Ri = \frac{Gr}{Re^2} \geq 10$ la convection naturelle qui domine

Pour $Ri = \frac{Gr}{Re^2} \cong 1$ la convection est mixte (forcée et naturelle)

I.3. Définition de La magnétohydrodynamique (MHD)

La magnétohydrodynamique (MHD) est appelée aussi hydromagnétique, est une branche de la physique permettant d'étudier les propriétés aussi bien des conducteurs fluides que des plasmas avec toutefois des approximations différentes lorsqu'ils sont sujets à un champ magnétique.

La magnétohydrodynamique (MHD) est à la frontière de deux sciences, l'électromagnétisme et la mécanique des fluides. Elle consiste en l'étude de l'interaction entre un écoulement de fluide conducteurs et des champs magnétiques. La conversion MHD est l'une des applications de cette discipline. Elle concerne la conversion de l'énergie mécanique du mouvement d'un fluide en énergie électrique. Ce mécanisme permet de transformer directement la chaleur en électricité sans passer par des turbines comme dans les centrales classiques. Ceci est un avantage par rapport aux machines classiques connues. La conversion peut également s'effectuer en sens inverse ; on utilise l'énergie électrique pour mettre un fluide en mouvement, on obtient ainsi des pompes électromagnétiques. Ces pompes ont l'avantage par rapport aux pompes mécaniques de n'avoir aucune pièce mobile et aucun contact avec le fluide.

I.4. Les Fluides conducteurs d'électricité

Les fluides conducteurs possèdent typiquement une conductivité électrique $> 20 \mu\text{S}/\text{cm}$. Ils peuvent être détectés par tous les types de détecteurs, avec ou sans électrode GND. Avec les fluides conducteurs, la constante diélectrique ne joue aucun rôle dans la portée de commutation. Celle-ci est influencée par les dimensions de l'objet et par sa mise à la terre.

I.4.1 Métaux liquides

Les métaux liquides tels que Gallium - Sodium- Mercure, et leurs alliages sont utilisés dans de nombreux secteurs de l'industrie : énergie, aéronautique, métallurgie. Leurs propriétés thermiques rendent leur utilisation très intéressante comme fluides caloporteurs, par exemple, de réacteurs nucléaires. Cependant, ces métaux liquides sont corrosifs au contact de matériaux solides, et cela d'autant plus que leur température d'utilisation est élevée. Préserver les matériaux de structure en contact avec ces métaux liquides requiert la connaissance.

Propriétés	L'unité	Gallium	Mercure	Sodium
Densité	Kg/m^3	6.09×10^3	13.59×10^3	0.93×10^3
Viscosité cinématique	m^2/s	3.1×10^{-7}	1.14×10^{-7}	7.75×10^{-7}
Conductivité électrique	$(\text{m}\Omega)^{-1}$	6.78×10^6	1.04×10^6	10.35×10^6
Conductivité thermique	$\text{W}/(\text{km})$	31	8.3	142
Point fondant	$^{\circ}\text{C}$	29	-39	98
Point d'ébullition	$^{\circ}\text{C}$	2227	356	881
Coefficient d'expansion thermique	K^{-1}	1.27×10^{-4}	/	/
Glacé tension	N/m	0.735	/	/

Table I.1 : Présentez les propriétés physiques thermiques de quelques métaux liquides [24]

I.4.2 Plasma

Le plasma d'une décharge se comporte comme un conducteur de l'électricité sous l'effet des courant parcourant la vaine gazeuse et des forces électromagnétiques qui en découlent, ce qui va provoquer une forte évaluation de la température. La température du plasma utilisé dans l'industrie varie entre 6000 et 20000K ; la luminosité du jet de plasma est donc très intense et il faut s'en protéger. Le plasma est plus sensible aux effets de paroi, il a tendance à se contracter s'il rencontre une paroi froide. Les parois des générateurs de plasma qui doivent être refroidie pour avoir une durée de vie suffisante renforcent donc l'effet de striction des

Forces électromagnétiques. Les plasmas peuvent donc permettre d'améliorer les performances de certains processus thermique de fabrication, mais surtout rendent possible des applications délicates ou impossibles à réaliser avec d'autres méthodes telles que :

- application nécessitant de très hautes températures comme par exemple, la fusion de matériaux très réfractaires, métallurgie
- Réaction très endothermique.
- Réaction présentant de l'excitation trop lente aux températures usuelles.
- Réaction résultante de l'excitation des molécules et atomes, ce qui peut conduire à de nouveaux produits.
- métallurgie : découpage, soudure, production de nouveaux matériaux
- dans l'environnement ; destruction des déchets, stérilisation et dépollution.
- Production des nanotubes de carbone.

I.4.3 Définition d'un ferrofluide

Les ferrofluides, matériaux relativement récents, ont fait leur apparition vers 1966 (Papell, Rosensweig). Les fluides magnétiques, encore appelés ferrofluides, sont des solutions colloïdales très stables constituées de nanoparticules solides ferromagnétiques en suspension dans un liquide porteur. Par opposition, par exemple, aux suspensions magnétiques utilisées dans les embrayages qui ont la propriété de se structurer sous l'action d'un champ magnétique, un bon ferrofluide doit conserver ses propriétés de fluide en champ magnétique élevé et les particules ne doivent pas se séparer du liquide porteur. L'énergie d'agitation thermique de ces particules, de taille nanoscopique, les maintient en suspension et donne à la solution un comportement de paramagnétisme géant. La réponse magnétique d'un ferrofluide est due à l'interaction des particules magnétiques avec les molécules de solvant qui les entourent. Ces interactions sont suffisamment fortes pour que le comportement magnétique des particules se transmette à l'ensemble du liquide : celui-ci acquiert donc ainsi un comportement magnétique global et peut se déplacer et se déformer sous l'action d'un champ magnétique tout en restant monophasique.

I.5. Revue bibliographique

Conformément au sujet de ce mémoire, cette recherche bibliographique présente une revue synthétisée des études analytiques et numériques, ainsi qu'expérimentale sur l'influence du champ magnétique sur le transfert de chaleur, dans des conduits cylindriques annulaires rotatifs. En suivant globalement un ordre chronologique on a résumé ces différentes études avec leurs auteurs.

Tatsuo Sawada et al (1993) [1] Ont étudié expérimentalement la convection naturelle d'un ferrofluide entre deux cylindres concentriques horizontaux et isothermes. Ils ont observé que la convection naturelle pourrait être contrôlée par l'application d'un champ magnétique. La température du cylindre extérieur est maintenue à 15 °C, alors que le cylindre intérieur a été rapidement chauffé de 15 °C jusqu'à 25 °C. Un liquide cristallin thermosensible a été utilisé pour la visualisation de la température à la place de la visualisation de l'écoulement; les températures sur la section centrale transversale ont également été mesurées par des thermocouples. Un champ magnétique a été appliqué pour les cylindres à l'aide d'un aimant permanent. Plusieurs types d'expériences ont été menés pour étudier l'influence de la direction et de l'intensité du champ magnétique sur la convection naturelle. En absence du champ magnétique, la convection naturelle ordinaire a été observée. Lorsque le gradient du champ magnétique a été appliqué dans la même direction que la gravité, la gravité apparente a augmenté; Cependant, seule une petite variation du champ de température a été observée. Lorsque le gradient du champ magnétique a été appliqué dans le sens inverse de la gravité, ils ont observé une influence significative sur la distribution de la température sur la paroi. Il a été vérifié que la convection naturelle pourrait être contrôlée par l'intensité et la direction champ magnétique.

Ben Hadid et al (1997) [2] Ont employé une méthode numérique spectrale afin de résoudre directement les équations de Navier-stokes de l'écoulement tridimensionnel oscillatoire d'un métal liquide conducteur confiné dans une cavité cylindrique horizontal de longueur modérée, ainsi, ils examinaient les signaux temporels, les propriétés de symétrie et les bilans d'énergie caractérisant les oscillatoires de l'écoulement, et l'amortissement des écoulements oscillatoires par un champ magnétique vertical jusqu'à la stabilisation de cet écoulement.

L'écoulement incité par un champ magnétique tournant, d'un métal liquide remplissant une enceinte cylindrique avait sa part dans le champ des études des procédés de stabilisations des écoulements industriels.

JOO-SIK YOO et al (1997) [3] Ont étudié numériquement la convection mixte d'air avec $Pr = 0.7$ entre deux cylindres concentriques horizontaux qui sont tenu aux différentes températures uniformes. L'écoulement obligatoire est induit par le cylindre externe froid qui tourne lentement avec la vitesse angulaire constante avec son axe au centre de l'anneau.

Des investigations sont faites pour différentes combinaisons de Ra , de Re et σ (= diamètre de largeur intérieure de cylindre/gap) dans la gamme du $Ra < 5.10^4$, $Re < 1500$, et $0.5 < \sigma < 5$. Les modèles d'écoulement peuvent être classés par catégorie dans trois types de base selon le nombre de tourbillons : deux- tourbillons, un- tourbillons, et écoulements son tourbillons.

Une carte des trois des régimes d'écoulement est construite sur le plan Ra-Re. Des caractéristiques des modèles d'écoulement et le transfert thermique sont élucidés.

Talmage et al (2000) [4] Ont publié un article présentant une étude plus approfondie du mouvement de rotation du métal liquide pendant la production de cristaux de silicium par le Procédé de Czochralski avec un champ magnétique élevé, uniforme et vertical. Cet article traitait spécialement les effets d'inertie dans la couche limite avec la résolution numérique des Équations non-linéaires gouvernantes, et les équations de transport pour la vitesse primaire azimutale et pour la verticité de l'écoulement secondaire avec la méthode de prédiction correction d'Adams-Bashforth-Moulton de quatrième ordre. Ils ont discuté les effets d'inertie sur le mouvement de métal liquide, et ont prévu une compréhension plus claire du mouvement du liquide (silicium fondu), sans laquelle des cristaux plus propres seront difficiles de se produire sur une base cohérente.

Bessaïh et al (2003) [5] Ont dirigé une étude numérique et analytique d'un écoulement laminaire stable engendré par un disque tournant au sommet d'un cylindre ayant un rapport d'aspect $H/R = 1$, rempli d'un métal liquide et soumis à un champ magnétique axial, en résolvant les équations régissant l'écoulement par la méthode des volumes finis. Ils donnaient différentes formules analytiques de vitesse et avaient montré qu'en présence d'un champ magnétique, les profils analytiques de vitesse proches des disques aux extrémités obtenus pour une valeur élevée du paramètre d'interaction magnétique N , présentant un excellent accord avec ceux obtenus par des simulations numériques. Ainsi, ils ont mis en évidence l'importance de la conductivité électrique des parois du conducteur (les deux disques et la paroi latérale) dans le contrôle de l'écoulement.

Bessaïh et al (2003) [6] Ont effectué une étude combinée numérique et analytique du même écoulement déjà mentionné. Ils ont montré la forte dépendance de structure de l'écoulement et le transfert de chaleur avec le champ magnétique et la conductivité électrique des parois constituant l'enceinte cylindrique, pour des écoulements à Pr élevé, afin de montrer l'analogie avec le problème du transfert de masse. En absence du champ magnétique, le nombre de Nusselt suit une dépendance semblable à celle trouvée pour un réservoir cylindrique mélangé avec une turbine à aubes. En présence du champ magnétique, un amortissement important du transfert de chaleur était observé. La méthode alternative d'amortir la convection en cultivant les cristaux en présence d'un champ magnétique reste largement utilisée et la plus récemment discutée en matière d'expérience et simulations numériques.

M.F. El-Amin(2003) [7] L'étude de M.F. El-Amin peut être divisé en deux catégories: dans la première classe, les champs électromagnétiques sont utilisés pour contrôler le transfert de

chaleur dans le flux de convection et le chauffage aérodynamique; tandis que dans la seconde classe, le chauffage est produit par électromagnétique domaines tels que générateurs MHD, pompes, etc. Venant dans le cadre du problème actuel est la première classe. Le MHD phénomène se caractérise par une mutuelle l'interaction entre le champ de vitesse de fluide (hydrodynamique la couche limite) et le électromagnétique champ. Satisfaire les lois de Faraday, le mouvement du fluide affecte le champ magnétique et le champ magnétique affecte le mouvement du fluide. Transfert de chaleur par convection dans les milieux poreux à applications dans un large éventail de domaines. Le de nombreuses applications d'ingénierie rencontrés, dans lequel un milieu poreux est présent, sont champs géothermiques, l'extraction du pétrole, de la chaleur de matrice solide échangeurs, isolation thermique, stockage des déchets nucléaires matériaux, etc.

Kharicha et al (2004) [8] Ont utilisé le code commercial Fluent V. 5 pour avoir une solution numérique du modèle de l'écoulement MHD laminaire, permanent conduit par un disque tournant au sommet d'une cavité cylindrique remplie d'un métal liquide. Les effets du champ magnétique, des conductivités électriques des parois et l'épaisseur pariétale sont examinées. Les paramètres appropriés par ce type d'écoulements ont été variés comme $Re \geq 100$ et le nombre de Hartmann $0 \leq Ha \leq 100$, ce qui correspond à une gamme de paramètre d'interaction $0 \leq Ha^2/Re \leq 100$. Malgré la supposition d'un très petit nombre de Reynolds magnétique Rm , le champ magnétique incité par ce petit Rm a été tenu en compte dans la formulation de leur problème. Leur étude est destinée à prédire l'influence d'un champ magnétique sur le taux de corrosion d'un métal liquide sur une paroi métallique. Ils ont résolu l'équation de concentration pour le produit de corrosion et ont montré que le transfert de masse évolue avec le Hartmann Ha , et pour une valeur de Ha fixe, le transfert de matière est plus élevé pour des parois électriquement conductrice que des parois isolantes.

Kharicha et al (2005) [9] Ont effectué une autre investigation expérimentale de l'écoulement MHD laminaire dans le cas permanent induit par la rotation d'un disque au sommet d'une cavité cylindrique remplie d'eau ou de mercure. Ils ont analysé les distributions de vitesse en employant la technique de mesure par ultrasons (UPV). Leurs mesures ont été comparées avec des résultats obtenus par un modèle numérique.

Asghar et al (2005) [10] Ont étudié l'effet de transfert de chaleur et l'effet Hall sur un écoulement MHD d'un fluide non Newtonien de modèle Oldroyd-B entre deux disques excentriques infinis et rotatifs. Ils ont obtenu des solutions exactes pour la vitesse, la force et le couple exercé par le fluide. Sur la base de leur solution théorique, ils ont prouvé que

l'épaisseur de la couche limite de Hartmann diminue avec le nombre de Hartmann par contre elle augmente avec le paramètre de l'effet Hall; ils ont remarqué aussi que lorsque le nombre de Reynolds magnétique est très faible, la configuration de l'écoulement qui tient compte de l'effet Hall est remarquablement similaire à celle de l'écoulement non conducteur.

Sankar, M. Venkatachalappa, M. and Shivakumara, I.S. (2006) [11] Ont étudié numériquement l'influence d'un champ magnétique axial et radial sur la convection naturelle d'un fluide conducteur de l'électricité avec un faible nombre de Prandtl ($Pr = 0,054$) dans un espace annulaire cylindrique vertical. Les cylindres intérieurs et extérieurs sont maintenus à des températures uniformes et les parois horizontales supérieure et inférieure sont thermiquement isolées. Un schéma aux différences finies constitué de la méthode implicite aux directions alternées (ADI) et la méthode de lignes successives sur relaxation (SLOR) sont utilisées pour résoudre les équations régissant le problème qui sont formulées sous la forme vorticité- fonction de courant. Les Résultats numériques de taux de transfert de chaleur, la température et la vitesse ont été présentées pour des valeurs de Hartmann radial $0 \leq Ha_r$ et axial $Ha_x \leq 100$, un nombre de Rayleigh $10^3 \leq Ra \leq 10^6$, un rapport de rayon $1 \leq R \leq 10$ et un rapport d'aspect $0 \leq \Gamma \leq 100$. Les résultats numériques montrent que dans des cavités de faibles profondeurs le transfert de chaleur et l'écoulement sont supprimées de façon plus efficace par un champ magnétique axial, tandis que, dans les cavités de grande taille un champ magnétique radial est plus efficace. Il est également constaté que les oscillations de l'écoulement peuvent être supprimées de manière efficace en imposant un champ magnétique externe. Le nombre de Nusselt moyen augmente avec le rapport des rayons, mais diminue avec le nombre de Hartmann.

A. Barletta, S. Lazzari, E. Magyari, I. Pop (2008) [12] Ont étudié un écoulement parallèle entièrement développé dans une zone annulaire remplie d'un milieu poreux entourant un électrique câble. Les effets de la flottabilité et de la force MHD ainsi que la génération de chaleur due à Joule le chauffage et la dissipation visqueuse sont pris en compte. Le débit d'infiltration de la convection mixte est analysé selon la loi de Darcy et de Boussinesq approximation. Effet de flottabilité est modélisée par le réglage du iso flux température de la paroi lorsque la température de référence. En conséquence de ce choix, la dynamique locale et les équations de bilan énergétique et les conditions aux limites peuvent être écrites sous une forme sans dimension qui définit un problème de valeur initiale au lieu d'un problème de valeur limite. Le problème de la valeur initiale est résolu à la fois par une méthode d'analyse en série et par intégration numérique. L'effet de la variation magnétique radialement terrain

sur les distributions de vitesse et de température des fluides est analysée. Il est montré que significativement force magnétique forte tendance à inhiber le flux même pour un gradient de pression hydrodynamique élevé.

Bessaïh et al (2009) [13] Ont étudié la stabilité magnétohydrodynamique d'un écoulement tournant dans un cylindre qui contient du métal liquide ($Pr=0.015$) ayant un rapport d'aspect égal à 2 et soumis à un gradient vertical de température et un champ magnétique. La méthode des volumes finis a été utilisée afin de résoudre les équations de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie et du potentiel électrique. Ils ont trouvé qu'en' absence de champ magnétique, le nombre de Reynolds critique est une fonction décroissante du nombre de Richardson (pour les valeurs du nombre de Reynolds critiques ($Re_{cr}= 2575, 924, 802$ et 606), correspondant respectivement aux valeurs du nombre de Richardson ($Ri=0, 0.5, 1.0$ et 2.0). Ils ont trouvé aussi en présence d'un champ magnétique vertical, la stabilité de l'écoulement est conservée pour des valeurs supérieures du nombre de Reynolds. Ils ont établi un diagramme de stabilité d'après les résultats numériques de cette investigation. Ce diagramme met en évidence la dépendance du nombre de Reynolds critique avec l'augmentation du nombre de Hartmann, Ha , pour différentes valeurs du nombre de Richardson. En conclusion, cette étude confirme la possibilité de stabilisation d'écoulement du métal liquide en convection mixte par application d'un champ magnétique axial.

Kakarantzas et al. (2009) [14] Ont effectué une série de simulations numériques afin d'étudier la convection naturelle d'un écoulement MHD pour des métaux liquides dans un récipient cylindrique vertical avec un fond tournant et une distribution sinusoïdale de la température à la paroi supérieure, tandis que la paroi latérale est adiabatique. À partir du cas hydrodynamique de base, ils ont évalué l'effet des champs magnétiques verticaux et horizontaux. Ils ont observé des écoulements à l'aide des paramètres (nombres de Rayleigh et Hartmann, axisymétrie), ils prouvent que l'augmentation du nombre de Rayleigh favorise le transfert thermique par la convection tandis que l'augmentation du nombre de Hartmann favorise la conduction de la chaleur. Le champ magnétique vertical diminue le nombre de Nusselt local. Les modèles de circulation pour les cas les plus convectifs sont confinés près du coin supérieur du récipient avec la formation simultanée d'un d'écoulement secondaire au coin inférieur, alors que pour les cas plus conducteurs seulement un modèle de circulation existe couvrant le domaine entier.

M. Venkatachalappa, Younghae Do, M. Sankar (2010) [15] Cet article présente l'effet du champ magnétique axial ou radial sur le naturel double diffusive convection dans une cavité annulaire cylindrique verticale. Les conditions aux limites sur le côté les murs sont imposés

d'une manière telle que les effets thermiques et soluté flottabilité sont soit coopérant ou opposées, résultant en un gradient coopérant ou opposés gradients de flux configuration. Les parois supérieure et inférieure sont isolées et imperméables. La gouvernance équations de ce système de fluide est résolue par la Direction alternatif implicite et successive Ligne Plus de méthodes de relaxation. Total des taux de transfert de chaleur et de masse à travers la cavité sont calculés en évaluant le nombre moyen de Nusselt et de Sherwood. L'objectif principal de l'étude numérique présente est de comprendre l'effet du champ magnétique sur la double convection diffusive dans la cavité annulaire. D'après les résultats numériques, on constate que le champ magnétique supprime la convection à double diffusion uniquement pour petite flottabilité ratios. Mais, pour agrandir le rapport de la flottabilité, le champ magnétique est efficace dans la suppression du thermique flux convectif. En outre, le champ magnétique est efficace quand elle est appliquée perpendiculairement à l'écoulement principal.

S.C. Kakarantzas, I.E. Sarris, N.S. Vlachos. (2011) [16] Ont étudié la convection libre MHD d'un métal liquide est dans un annulus vertical fermé dans qui le supérieur et inférieur les murs sont des adiabatiques pendant que les murs cylindriques sont gardés à températures différentes. Le courant est conduit par deux mécanismes; la différence de la température entre les deux murs cylindriques et les volumétriques chauffer. Un champ aimanté horizontal constant est imposé résister aussi au mouvement fluide. La laminaire et les régimes turbulents du courant sont répartis en exécutant des simulations numériques directes à trois dimensions. Les résultats montrent que dans l'absence du champ aimanté, le courant turbulent est développé dans la plupart des cas, pendant que comme les augmentations de champ aimantées le courant devient laminaire. La plus haute température est a trouvé dans la partie du supérieur-central de la cavité annulaire quand le fluide est chauffé de façon volumétrique, en résultant dans la création de deux courants de la convection comme le fluide chaud monte dans la partie centrale et descend la fin aux deux murs plus froids. Le Hartmann et Roberts pose en couches développer près des murs normaux et place parallèlement à le champ aimanté, respectivement, est trouvé pour être responsable pour la perte d'axis symétrie du présent courant.

Yaqing Liu et al (2011) [17] Ont étudié analytiquement un écoulement de Couette MHD in stationnaire d'un fluide incompressible non Newtonien de modèle Oldroyd-B due à une accélération d'une plaque infinie. Les solutions exactes pour le champ de vitesse et la contrainte de cisaillement sont obtenues en utilisant la technique de transformation de Laplace.

H.R. Mozayyeni, A.B. Rahimi (2012) [18] Dans cette étude, la convection mixte d'un fluide dans la région entièrement développée dans un plan horizontal l'espace annulaire cylindrique concentrique à différentes températures de paroi uniforme, est numériquement étudiée en les deux états stables et instables en présence de la force de MHD radiale, ainsi que dans l'examen de la chaleur génération en raison de la dissipation visqueuse. En outre, la longueur du cylindre est supposée infinie. Par ailleurs, le rayonnement le transfert de la surface chaude de la chaleur est supposé être négligeable. Effets de flottabilité sont également considérés, avec Boussinesq approximation. La circulation forcée est induite par le cylindre extérieur en rotation à froid à une vitesse angulaire constante lente, avec son axe au centre de l'espace annulaire.

Les calculs sont faits pour diverses combinaisons de numéros de groupe non-dimensionnelles; nombre de Reynolds (Re), nombre de Rayleigh (Ra), nombre de Hartmann (Ha), le numéro Eckert (Eck) et l'écart de l'anneau rapport largeur (σ_0). Ces adimensionnel paramètres utilisés dans la présente étude seront étudiées sur une large gamme de présenter le flux de base motifs et isothermes dans un anneau cylindrique concentrique. Un schéma de volumes finis, composé du Tri-Diagonal Matrice Algorithme (TDMA), est utilisé pour résoudre des équations régissant, qui sont la continuité, bidimensionnel l'élan et de l'énergie, par l'algorithme SIMPLE. Les résultats numériques montrent que le flux et le transfert de chaleur sont supprimés de manière plus efficace en imposant un champ magnétique externe. En outre, il On constate que le champ magnétique externe provoque la vitesse du fluide et la température à supprimer plus efficacement. De plus, il sera montré que les termes de dissipation visqueux ont des effets significatifs dans les situations avec des valeurs élevées d'Eckert et Prandtl nombre et de faibles valeurs de nombre de Reynolds.

Jenn-Shyang Kuo, Jik Chang Leong (2012) [19] Ce travail considère un fluide électriquement conducteur rempli entre deux cylindriques concentriques des parois relativement proches les unes des autres. Une solution théorique de la constante de Taylor-Couette écouler entre ces deux cylindres rotatifs électriquement isolées sous l'influence d'un champ magnétique radial est prévu dans ce travail. En résolvant l'ensemble approprié de gouverner équations simultanément, les profils de composante de vitesse tangentielle du fluide et Indice champ magnétique ont été obtenus sous forme de fonctions complexes impliquant les fonctions de Bessel modifiées des premier et second types de premier ordre en termes de coordonnées radiales et Numéro Hartmann. Une étude de calcul a également été réalisée pour valider le présent théorique Solution. Les résultats d'analyse et de calcul sont

identiques lorsque $Ha = 1$, tandis que Ces résultats dévient légèrement les uns des autres Ha augmente. Les résultats actuels montrent que la présence du champ magnétique externe provoque l'écoulement à proximité du cylindre lent d'accélérer tandis que près de cylindre plus rapide à décélérer. Cela a manifestement implicite du fait qu'un champ magnétique extérieur a tendance à rendre la distribution de vitesse entre les cylindres intérieur et extérieur plus uniforme.

LAOUAR Salima(2012) [20] a étudié l'influence de champ magnétique axial externe et d'un gradient de température radial sur la stabilité de l'écoulement de Taylor-Couette, par une simulation numériquement en trois dimensions, à l'aide du Logiciel Fluent. IL s'agit précisément de l'étude de l'écoulement du gallium liquide dans le système de Taylor-Couette cylindrique coaxial. Le cylindre interne est en rotation, le cylindre externe est au repos et ils sont isolés électriquement.

ABERRKANE Sofiane et al (2014) [21] Ont étudié l'effet d'un champ magnétique axial imposé sur un écoulement incompressible d'un fluide électriquement conducteur entre deux cylindres coaxiaux horizontaux en rotation. Le champ magnétique imposé est supposé uniforme et constant, la génération de la chaleur due à la dissipation visqueuse est prise en considération dans la présente étude. Les parois du cylindre intérieur et extérieur sont maintenues à des températures et concentration constantes mais différentes. Le mouvement du fluide est dû à la rotation de cylindre intérieur avec une vitesse constante. Une solution exacte des équations régissant l'écoulement a été obtenu sous forme de fonctions de Bessel. Un schéma implicite de différences finies a été utilisé pour la résolution numérique. Les distributions de vitesse et de températures ont été obtenues aussi bien avec que sans l'influence du champ magnétique.

Les résultats obtenus montrent que l'application du champ magnétique a pour effet de stabiliser l'écoulement. La vitesse et la concentration entre les deux cylindres décroissent d'avantage au fur et à mesure que le nombre de Hartmann augmente, en revanche, ce dernier n'affecte pas la température. En augmentant le nombre de Hartmann, on constate une nette décroissance du nombre de Nusselt sur la surface des cylindres. L'Application du champ magnétique a pour effet de diminuer le nombre de Sherwood sur le cylindre extérieur fixe. Par contre l'augmentation du nombre de Hartmann améliore le transfert de matière sur le cylindre intérieur rotatif.

Bouchendouka Faïçal et amiar farid (2015) [22] Ont étudié numériquement un écoulement engendré par deux disques tournants, à l'intérieur d'une enceinte cylindrique, dont le rapport

d'aspect $H/R=0.5$, 1 et 2, rempli d'un métal liquide, soumis à un champ magnétique orienté verticalement. Les résultats numériques de l'écoulement ont été obtenus par le code CFD Fluent 6.3, basé sur la méthode des volumes finis pour résoudre numériquement les équations gouvernant le phénomène étudié. L'écoulement est présenté par la fonction de courant et les courbes des vitesses. Nos simulations numériques ont été présentées pour différentes valeurs du nombre de Hartmann ($Ha=0, 10, 20$ et 30), nous présentons leurs effets sur la vitesse axiale et la fonction de courant. Des diagrammes paramétriques ($\Psi_{max}-Ha$) et ($V_{max}-Ha$), ont été établis.

I.6. Conclusion

La majorité des travaux référentiels de ce chapitre porte sur l'effet du champ magnétique sur les transferts thermiques en écoulement rotatif. Les différents résultats ont été confirmés soit analytiquement, numériquement ou expérimentalement par les différents auteurs. Vu que la plupart des études numériques ont utilisé un code numérique, notre contribution portera sur l'utilisation d'un logiciel commercial Ansys fluent pour étudier numériquement l'influence du champ magnétique sur le mécanisme de transfert de chaleur entre deux cylindres chauffés en rotation et un écoulement d'un liquide métal (gallium) confiné dans un espace annulaire, suivi par un traitement numérique dans le but de valider les résultats obtenus.

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous exposons les équations mathématiques modélisant le problème traité dans notre étude. Les équations sur lesquelles est fondée la théorie MHD sont les équations de l'hydrodynamique auxquelles il faut toutefois ajouter les équations d'évolution du champ électromagnétique (les équations de Maxwell). Mais la caractéristique majeure de la MHD a trait à l'importance du couplage entre le fluide et le champ, ce couplage est plus au moins fort à travers la loi d'Ohm et la force de Lorentz. Pour la dynamique du système, on écrit classiquement les équations de Navier-Stokes auxquelles on ajoute la force \mathbf{f} comme simple force volumique supplémentaire.

II.2. Description du problème physique

Le dispositif physique étudié est représenté sur la figure (II-1). L'écoulement est confiné dans l'entrefer, entre deux cylindres d'axe commun horizontal ($z=0$). L'espace annulaire $d = R_0 - R_i$ est délimité par un cylindre interne de rayon $R_i = 50$ mm et de vitesse angulaire nulle, $\Omega_i=0$, le cylindre externe a un rayon $R_0 = 100$ mm et une vitesse angulaire Ω_0 , le Rapport des rayons est $\eta = 0.5$. Les surfaces des parois du cylindre intérieur et extérieur sont maintenues à des températures constantes T_i et T_0 respectivement.

L'écoulement est soumis à l'action d'un champ magnétique B_y de magnitude constante uniforme et orienté dans la direction transversale (Oy).

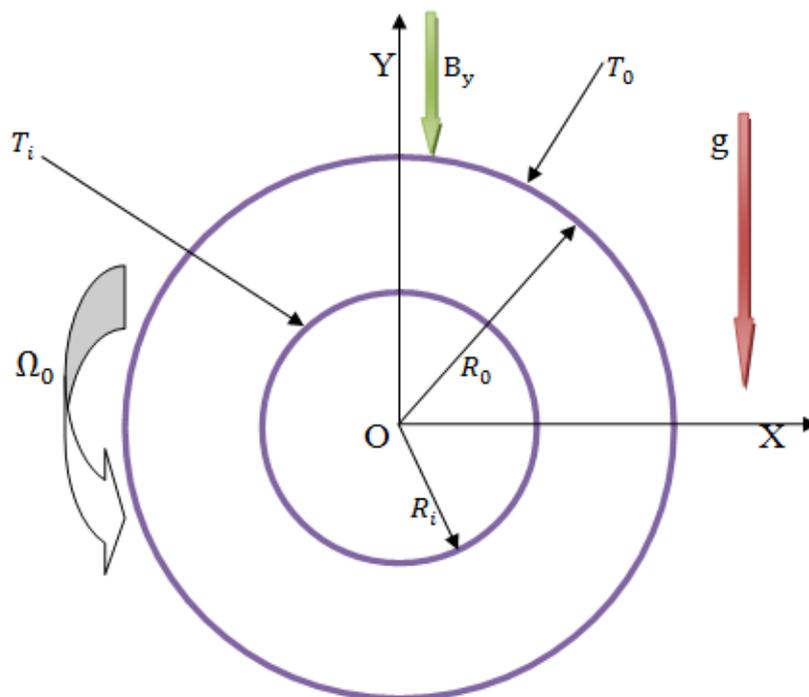


Figure II. 1. Configuration du problème

II.3. Les Equations générales

La magnétohydrodynamique est l'étude des interactions entre les fluides conducteurs et les champs magnétiques dans lesquels ils sont soumis.

Les équations de la MHD régissant le problème magnétohydrodynamique sont fortement complexes, elles se décomposent essentiellement en deux familles couplées entre elles : les équations régissant le mouvement du fluide conducteur d'électricité et les équations régissant le champ électromagnétique.

II.3.1 Equations régissant le milieu fluide

➤ **Conservation de la masse (équation de continuité)**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (\text{II.1})$$

➤ **Conservation la quantité de mouvement**

Il s'agit de l'équation de Navier-Stokes

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \mathbf{f}_{\text{vol}} + \mathbf{j} \wedge \mathbf{B} \quad (\text{II.2})$$

Où :

\mathbf{U} : le champ de vitesse,

τ : tenseur de contrainte

\mathbf{f}_{vol} : représente les forces volumiques

$\mathbf{j} \wedge \mathbf{B}$ est le produit vectoriel de la densité de courant \mathbf{j} et le champ magnétique \mathbf{B} . Il représente la force de Lorentz exercée par le champ magnétique sur les particules. Ce terme va être à l'origine du couplage avec les équations de Maxwell présentées par la suite.

➤ **Equation d'énergie**

$$\rho C_p \left(\frac{dT}{dt} + \mathbf{U} \cdot \nabla T \right) = \left(\frac{dP}{dt} + \mathbf{U} \cdot \nabla P \right) + \text{div}(k \nabla T) + \Phi + Q_r - \frac{j^2}{\sigma} \quad (\text{II.3})$$

Où :

k : tenseur de conductivité thermique,

Φ : L'échauffement par dissipation visqueuse,

Q_r : la perte d'énergie radiative.

$\frac{j^2}{\sigma}$: Perte de chaleur due à l'effet joule

II.3.2 Equations du champ électromagnétique

Les équations régissant l'électromagnétisme sont les équations de Maxwell et la loi d'Ohm

➤ Equations de Maxwell

$$\text{Loi de Gauss} \quad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{No magnétique monopoles} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Loi de Faraday} \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \wedge \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\text{La loi d'Ampère-Maxwell} \quad \nabla \wedge \vec{B} = \mu_m \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.7})$$

Où : \vec{E} est le champ électrique, \vec{B} le champ magnétique, μ la perméabilité magnétique du milieu considéré, ρ_e la densité de charge totale, \vec{j} la densité de courant électrique et ϵ_0 est la perméabilité électrique.

➤ Loi d'Ohm

En général, la loi d'Ohm qui définit la densité du courant est donnée par:

$$\vec{j} = \sigma \left(\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B} \right) \quad (\text{II.8})$$

Où σ est la conductivité électrique du fluide

En étudiant l'interaction entre le champ dynamique et le champ électromagnétique, il est essentiel de connaître la densité de courant j . En général, deux approches peuvent être utilisées pour évaluer la densité de courant, le premier est à travers la solution d'une équation d'induction magnétique; l'autre est en résolvant une équation de potentiel électrique.

Dans notre étude on a utilisé la première méthode.

➤ Equation d'induction magnétique

L'équation d'induction magnétique est dérivée de la loi d'Ohm et l'équation de Maxwell. L'équation donne le couplage entre l'écoulement du fluide conducteur d'électricité et le champ magnétique.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{B} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{U} + \frac{1}{\sigma \mu_m} \nabla^2 \mathbf{B} \quad (\text{II.9})$$

Où $\frac{1}{\sigma \mu_m}$ est appelée diffusivité magnétique

II.4. Les hypothèses simplificatrices

Afin d'aborder la résolution des équations régissant la convection mixte MHD d'un métal liquide, relatif à la géométrie déjà montrée, on fait appel aux simplifications suivantes :

- L'écoulement engendré est supposé laminaire et bidimensionnel.
- Le fluide considéré est supposé newtonien et incompressible
- On néglige l'effet de la dissipation visqueuse, l'effet joule dans le fluide et la perte de chaleur par rayonnement.
- Le fluide est non-magnétisé puisque la perméabilité magnétique $\mu_m=1$
- Le nombre de Reynolds magnétique, qui caractérise la convection par rapport à la diffusion du champ magnétique est supposé négligeable.
- Les propriétés physiques du métal liquide sont supposés constantes
- L'approximation Boussinesq est valide, Si la variation de densité n'est pas large, on peut considérer la densité comme constante dans les termes transitoire et convectif, et la traiter comme variable seulement dans le terme gravitationnel Les perturbations thermiques sont provoquées par un écart de température $T - T_0$.

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta_T (T - T_0)] \quad (\text{II.10})$$

II.5. Equations gouvernantes simplifiées

Dans le cadre de ces hypothèses et en coordonnées cylindriques à symétrie axiale, les équations projetées suivant les directions radiale, azimutale et axiale s'écrivent alors :

II.5.1 Les équations de conservation

- Conservation de la masse:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rU_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (\text{II.11})$$

- Conservation de la quantité de mouvement radial:

$$\begin{aligned} \rho_0 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU_r U_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (U_r U_\theta) - \frac{U_\theta^2}{r} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \rho_0 g \beta (T - T_f) \cos \theta + \\ \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} \right) - \frac{U_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} \right) + \mathbf{j} \wedge \frac{\mathbf{r}}{B} \right) & \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

- Conservation de la quantité de mouvement azimutale:

$$\begin{aligned} \rho_0 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU_r U_\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (U_\theta U_\theta) + \frac{U_r U_\theta}{r} \right) &= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \rho_0 g \beta (T - T_f) \sin \theta + \\ \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} \right) - \frac{U_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} \right) + \mathbf{j} \wedge \frac{\mathbf{r}}{B} \right) & \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

- Equation de conservation d'énergie

$$U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right] \quad (\text{II.14})$$

- Equation d'induction magnétique

$$(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{B} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{U} + \frac{1}{\sigma \mu_m} \nabla^2 \mathbf{B} \quad (\text{II.15})$$

II.5.2 Les Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont comme suit :

$$\text{A } r=R_i \quad U_r=0, \quad U_\theta=0, \quad T=T_i \quad (\text{II.16})$$

$$\text{A } r=R_0 \quad U_r=0, \quad U_\theta=\Omega R_0, \quad T=T_0 \quad (\text{II.17})$$

II.5.3 Les équations adimensionnelles

Pour obtenir la forme adimensionnelle des équations de modélisation, on définit les variables dépendantes adimensionnelles suivantes :

$$U_r^* = \frac{U_r}{\Omega R_0}; \quad U_\theta^* = \frac{U_\theta}{\Omega R_0}; \quad \Theta = \frac{T-T_0}{T_i-T_0}; \quad r^* = \frac{r}{d}; \quad P^* = \frac{P}{\rho(\Omega R_0)^2}$$

En introduisant les variables adimensionnelles dans les équations et en supprimant l'indice (*) les équations de conservations se réduisent alors à :

$$\overset{r}{\nabla} \cdot \overset{r}{U} = 0 \quad (\text{II.18})$$

$$(\overset{r}{U}_r \cdot \overset{r}{\nabla}) \overset{r}{U}_r = -\overset{r}{\nabla} P + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \overset{r}{U}_r + \frac{\text{Ra}}{\text{Pr Re}^2} \Theta \cos \theta - U_r \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}} \cos \theta \quad (\text{II.19})$$

$$(\overset{r}{U}_\theta \cdot \overset{r}{\nabla}) \overset{r}{U}_\theta = -\overset{r}{\nabla} P + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \overset{r}{U}_\theta - \frac{\text{Ra}}{\text{Pr Re}^2} \Theta \sin \theta - U_\theta \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}} \sin \theta \quad (\text{II.20})$$

$$(\overset{r}{U} \cdot \overset{r}{\nabla}) \Theta = \frac{1}{\text{Re Pr}} \nabla^2 \Theta \quad (\text{II.21})$$

Les nombres adimensionnels qui gouvernent notre problème sont alors :

- $\text{Re} = \frac{\Omega R_0 d}{\nu}$: Nombre de Reynolds,
- $\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$: Nombre de Prandtl,

- $\sigma_0 = 2R_i / (R_0 - R_i)$: le rapport des rayons,
- $d = R_0 - R_i$ épaisseur de l'espace annulaire
- $Ra = \frac{g \beta (T_i - T_0) D^3}{\nu \alpha}$ Nombre de Rayleigh
- $Ha = Bd \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$: nombre de Hartmann

II.5.4 Les Conditions aux limites adimensionnelles

Les conditions aux limites sont comme suit :

$$\text{A } r = R_i \quad U_r = 0, \quad U_\theta = 0, \quad \Theta = 1 \quad (\text{II.22})$$

$$\text{A } r = R_0 \quad U_r = 0, \quad U_\theta = 1, \quad \Theta = 0 \quad (\text{II.23})$$

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a cité Les équations de la MHD régissant le problème magnétohydrodynamique qui sont décomposent essentiellement en deux familles couplées entre elles d'une part les équations régissant le mouvement du fluide conducteur d'électricité et d'autre part les équations régissant le champ électromagnétique.

III.1. Introduction

L'étude du transfert de chaleur dans un écoulement magnétohydrodynamique (MHD) est régit par les équations de transport non linéaires et couplées, faisant intervenir plusieurs variables. En général, c'est un problème très complexe et l'expression de la solution à partir d'une formule analytique est en général impossible à mettre en évidence.

Les équations du modèle mathématique doivent être résolues avec des méthodes numériques.

La modélisation numérique est basée sur la reformulation des équations de conservation sur chaque élément du maillage, Il est nécessaire de passer par une approximation du problème, c'est-à-dire de le remplacer par plusieurs problèmes discrets représentant localement le problème continu de façon approchée. Cette procédure, appelée discrétisation ou approximation, permet notamment une résolution numérique discrète des équations continues.

Il existe de nombreuses méthodes pour représenter les problèmes continus de façon discrète comme par exemple les approximations par différences finis, par éléments finis, par volumes finis, ou par des méthodes spectrales.

La méthode de discrétisation utilisée dans la présente étude est la méthode des volumes finis, nous rappelons dans ce qui suit les principes sur lesquels elle repose.

III.2. Modélisation CFD des écoulements

La modélisation des écoulements fluides, utilisant les codes de simulation numérique CFD (Computational Fluid Dynamics), a connu un véritable succès ces dernières décennies. L'apparition de grands moyens de calcul a favorisé l'émergence des codes commerciaux, utilisant la méthode des volumes finis pour la résolution des écoulements 2D, à l'instar des codes comme ANSYS Fluent, ANSYS CFX, etc. Ils sont utilisés pour les calculs des phénomènes de mécanique des fluides simples et complexes. Les logiciels CFD sont destinés à faire une analyse numérique des écoulements de fluide, des transferts de chaleur, MHD et des phénomènes qui leurs sont liés.

Cet outil de calcul ne nécessite que la connaissance de la géométrie, l'étude des conditions aux limites. Il permet de représenter les écoulements tridimensionnels (champ de vitesse, vorticité,...). Dans la présente étude, nous avons utilisé le code CFD ANSYS FLUENT. [20]

III.3. Présentation du logiciel ANSYS Workbench

Le Workbench permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique. C'est à partir de la fenêtre principale du Workbench que vont être créés les fichiers, lancés les logiciels et gérés les interactions entre les différents logiciels utilisés pour la géométrie, le maillage, la simulation proprement dite et le post-traitement.

Pour réaliser notre simulation numérique par ANSYS FLUENT, On a suivi les étapes suivantes :

- Création de la géométrie sous le logiciel Design Modeler.
- Création du maillage avec le logiciel ANSYS Meshing.
- Définition du problème sous le logiciel ANSYS FLUENT.
- Calcul avec ANSYS FLUENT pour les différents cas retenus.
- Analyse des résultats obtenus.

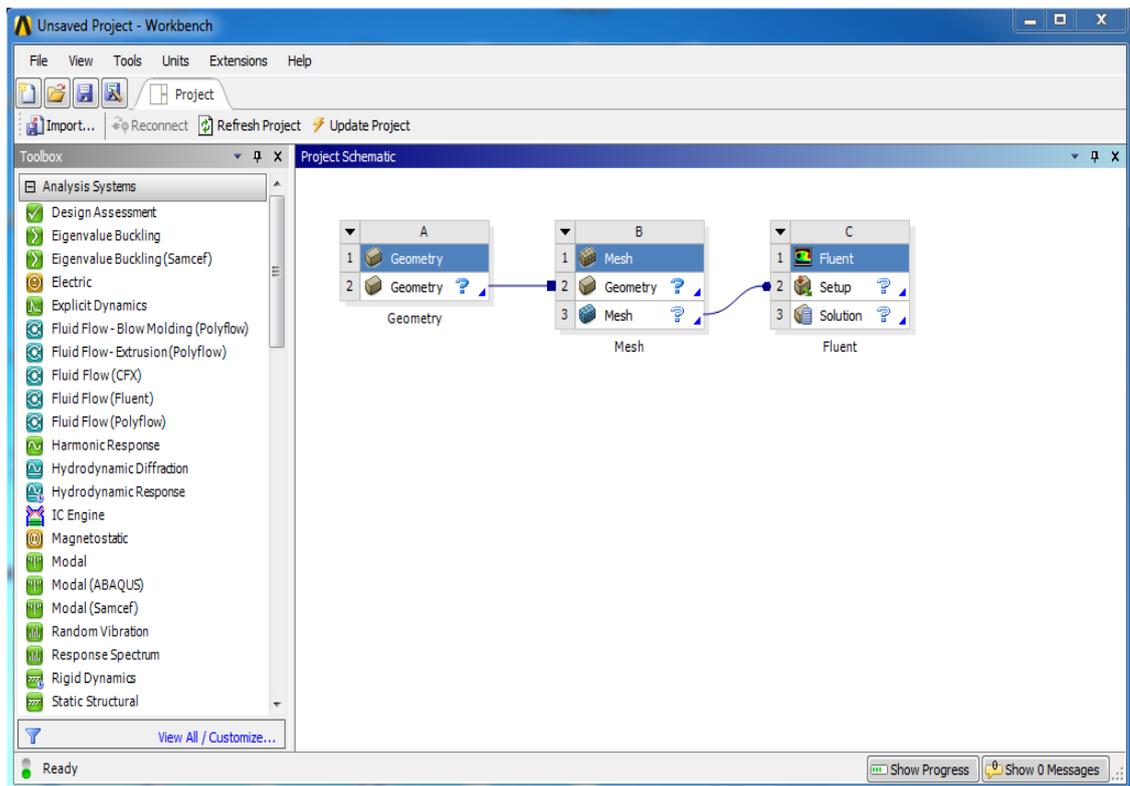


Figure III.1 : l'interface de logiciel ANSYS Workbench

III.3.1 Création de la géométrie

On a créé la géométrie avec Le logiciel ANSYS DesignModeler, qui permet de réaliser des tracés 2d (Sketch), de créer à partir des sketches des objets 3d (par extrusion etc...) et de

manipuler les objets 3d. Dans notre cas, on va travailler en 2d dans le plan XY pour créer la géométrie du problème.

Tout d'abord, le logiciel demande de choisir l'unité caractéristique du système, dans ce cas il s'agit du millimètre.

Pour créer une géométrie, il faut :

- commencé par tracer l'esquisse (juste les formes),
- préciser les côtes,
- transformer le dessin en edge (bord de la géométrie pour le maillage),
- préciser les zones et leur nature (fluide ou solide).

Pour cela il faut choisir le plan dans lequel on travaille ; ici ce sera le plan XY ; pour le sélectionner, cliquer sur XY Plane dans Tree Outline (au milieu de la colonne de gauche). Le repère apparaît. Pour le mettre perpendiculaire à un plan, il faut cliquer sur le plan en question et sur dans la barre d'outils. Vous devez obtenir cela:

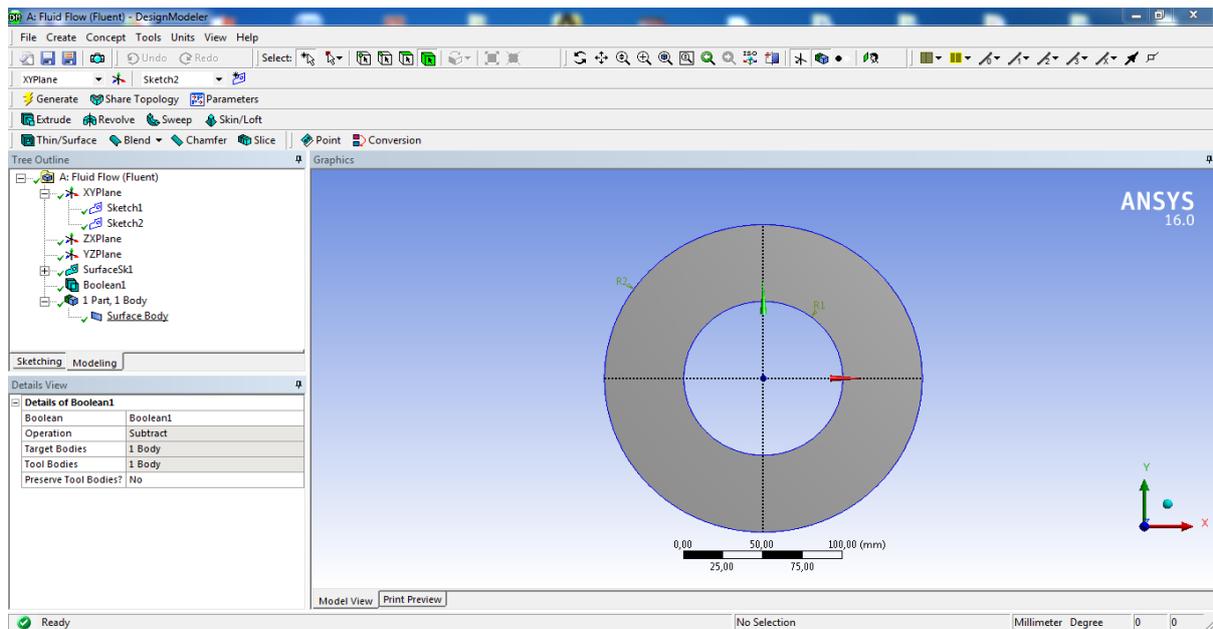


Figure III.2 : l'interface de Le logiciel ANSYS DesignModeler

III.3.2 Discrétisation des domaines de calcul (le maillage)

Pour créer le maillage, on lance ANSYS Meshing en double cliquant sur Maillage dans la boîte Workbench. Le choix du maillage est une étape essentielle de la simulation numérique. Il est donc important de bien choisir un maillage qui s'adapte au mieux aux problèmes considérés.

Dans cette étude, nous avons choisi un maillage quadratique structuré uniforme raffiné au niveau des parois.

Les résultats de maillage générés sont présentés dans le tableau suivant :

Cellules	faces	nœuds	Partitions
3100	6300	3200	1

Table III 1 : Les résultats de maillage

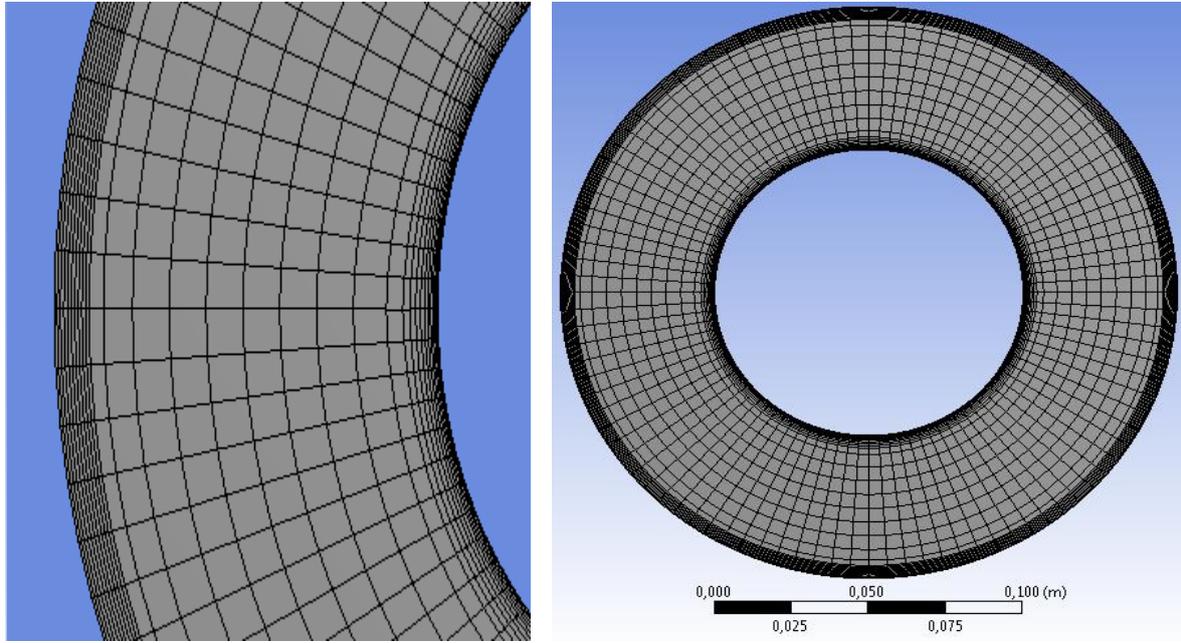


Figure III. 3: Maillage de la cavité d'espace annulaire

III.3.3 ANSYS FLUENT :

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques à l'intérieur ou autour des géométries complexes. Ce logiciel très répandu au sein de l'industrie (aérospatiale, automobile, nucléaire, chimique, biomédicales, environnement, météo, etc...), permet de résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, pour des géométries complexes, avec une relative facilité.

Les types de mailles supportées sont :

- Mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales,
- Mailles en 3D, tétraédriques/hexaédriques/pyramidales,
- Mailles (hybrides) mixtes.

Le logiciel FLUENT est basé sur la méthode de modélisation numérique connue pour sa puissance de calcul et facilité de mise en œuvre ; méthode des volumes finis. Cette méthode est décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding.

Le principe de cette méthode est basé sur une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques. Ces dernières sont

résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste à l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle. FLUENT est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage (allocation de la mémoire dynamique).

III.3.3.1 Procédure sous "Fluent"

Au chargement du maillage sous "Fluent", avant tout, nous devons mettre la géométrie à l'échelle, (millimètre, pour notre cas). Le logiciel permet aussi de réordonner les nœuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire, pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité de l'accès à la mémoire.

III.3.3.2 Choix de Simple précision ou double précision ?

"Fluent" offre deux modes de calcul: le mode "double précision" et le mode "simple précision".

Dans le mode "double précision", les nombres à virgule flottante sont représentés en utilisant 64 bits, alors que le mode "simple précision" utilise une représentation à 32 bits. Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. En outre, Le mode "double précision" est préconisé, entre autres, pour les écoulements impliquant des longueurs d'échelles très disparates, comme dans notre cas (très long canal mince). Donc, c'est le mode que l'on va utiliser.

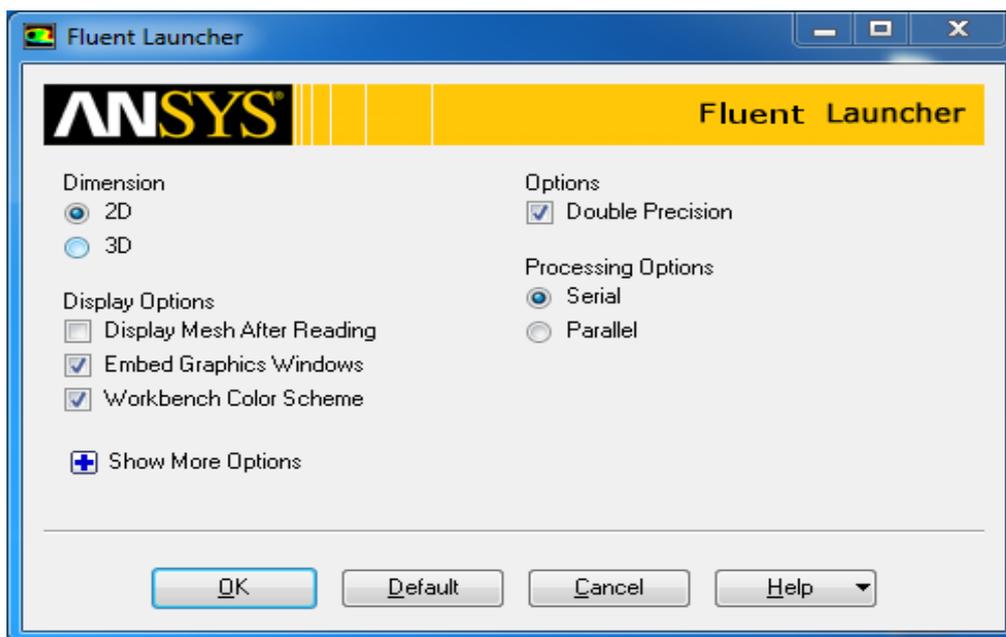


Figure III.4:Fenêtre de démarrage de fluent

III.4. Modèle Magnétohydrodynamique

Le phénomène de la MHD, avec transfert de chaleur, se manifeste par un couplage entre le champ de l'écoulement du fluide, du transfert de chaleur et du champ magnétique. Deux effets fondamentaux se manifestent : induction du champ magnétique, en raison du mouvement du fluide conducteur dans un champ magnétique, l'effet de la force de Lorentz. Sous FLUENT, la MHD est mise en œuvre en utilisant les fonctions utilisateur (UDF) en tant que module complémentaire. [20]

III.5. Propriétés de fluide

Le Gallium est un métal liquide qui a un bas nombre Prandtl ($Pr = 0,025$ à $300K$) et a un point de fusion de $29,78^{\circ} C$.

Le fluide utilisé est le gallium et ses propriétés thermo-physiques sont présentées dans le tableau III.2

Propriété	Symbole	Valeur	Unité
Densité volumique	ρ (303 K)	6.094×10^3	$kg.m^{-3}$
Viscosité cinématique	ν	3.1×10^{-7}	$m^2.s^{-1}$
Conductivité électrique	σ	6.78×10^6	$(m\Omega)^{-1}$
Conductivité thermique	k (303 K)	31	$w(mK)^{-1}$
Chaleur spécifique	C_p	384.7	$J (kg K)^{-1}$
Coefficient d'expansion thermique	β (373 K)	1.3×10^{-4}	K^{-1}
Perméabilité Magnétique		1.25×10^{-6}	(h/m)

Tableau III.2 Propriétés thermo-physiques du Gallium métaux liquides [20]

III.6. Conditions aux limites

En fonction du problème physique traité, les conditions aux limites sont différentes et leur compatibilité avec les modèles numériques associés, à un impact direct sur la convergence et le réalisme des résultats des simulations numériques. Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés en CFD. Nous regroupons dans le tableau III.3 les conditions aux limites imposées dans cette étude.

Paroi	Conditions aux limites dynamiques	Conditions aux limites thermiques	Conditions aux limites magnétiques
cylindre intérieur	$\Omega_i = 0 \text{ rad/s}$	$T_i = 305.5 \text{ k}$	électriquement isolé
cylindre extérieur	$\Omega_0 = 0.0062 \text{ rad/s}$	$T_0 = 303 \text{ k}$	électriquement isolé

Tableau III.3. Conditions aux limites de l'étude.

III.7. Les schémas numériques

III.7.1. Résolution du couplage vitesse-pression

Les équations de Navier-Stokes se composent de l'équation de conservation de la masse et des équations de conservation de la quantité de mouvement. Leur résolution nécessite l'obtention, à chaque instant, d'un champ de pression et d'un champ de vitesse cohérents. Sous la contrainte d'incompressibilité de l'écoulement, l'équation de continuité se réduit à l'obtention d'un champ de vitesse à divergence nulle. Le couplage vitesse-pression est délicat à traiter pour les écoulements incompressibles car la pression n'apparaît pas explicitement dans l'équation de conservation de la masse. Plusieurs voies sont utilisées pour aborder ce problème et correspondent à des classes de méthodes différentes.

FLUENT offre la possibilité de choisir parmi quatre algorithmes de couplage pression-vitesse: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, COUPLE tous sont basés sur l'approche : prédiction-corrrection.

Le schéma de couplage pression-vitesse est réalisé dans notre étude par l'algorithme "Coupled", ou couplée soit implicite ou explicite: Cette option permet aux équations gouvernantes d'être résolues simultanément, c'est-à-dire couplées les unes avec les autres.. Initialement, ce mode a été conçu pour les écoulements compressibles à grandes vitesses. Ce qui lui donne un avantage pour le traitement des écoulements hautement couplés (forte interdépendance entre la densité, l'énergie et les moments) avec des forces de volumes (ex. flottabilité et forces de rotation). [20]

III.7.2. Schémas de discrétisation spatiale

Dans FLUENT, toutes les variables sont calculées au centre des mailles (colocate). Le calcul des flux sur les faces nécessite toutefois de connaître la valeur de la variable sur cette face. On doit donc interpoler entre les valeurs voisines connues.

Dans la présente étude, nous avons utilisé le schéma power-law ce schéma est mieux placé pour capter les phénomènes physiques de transfert de chaleur.

III.7.3. Choix du schéma d'interpolation de la pression

Nous avons utilisé le schéma "Second Order" pour calculer les valeurs des pressions aux faces des cellules, nécessaires pour la résolution de l'équation de quantité de mouvement.

III.8. Facteurs de relaxation

En raison de la non-linéarité des équations discrétisées, il est impératif de contrôler la variation de la quantité Φ , ceci est possible en introduisant un facteur de sous-relaxation qui limite les variations de Φ pendant chaque itération. En d'autres termes, la valeur de Φ_{n+1} correspondant à chaque centre de maille, calculée pendant une itération donnée, dépend de sa valeur calculée durant l'itération précédente Φ_n et du coefficient de sous-relaxation α , cela peut s'exprimer par la relation:

$$\Phi = \Phi + \Delta\Phi$$

$$\phi_{n+1} = \phi_n + \alpha(\phi_{cal} - \phi_n)$$

Où ϕ_n Valeur de la variable ϕ à l'itération n.

ϕ_{n+1} Valeur de la variable ϕ à l'itération (n+1).

ϕ_{cal} Valeur de la variable calculée au cours de l'itération (n+1).

α Facteur de sous relaxation, sa valeur est comprise entre 0 et 1. Les valeurs choisies dans notre cas sont indiquées par le tableau III. 4. [20]

Variables	Facteur de sous relaxation α
Pression	0.3
Densité	0.6
Force de volume	1
Quantité de mouvement	0.3
Energie	1
Induction magnétique	0.9

Tableau III. 4. Facteur de sous-relaxation.

III.9. Schéma de convergence

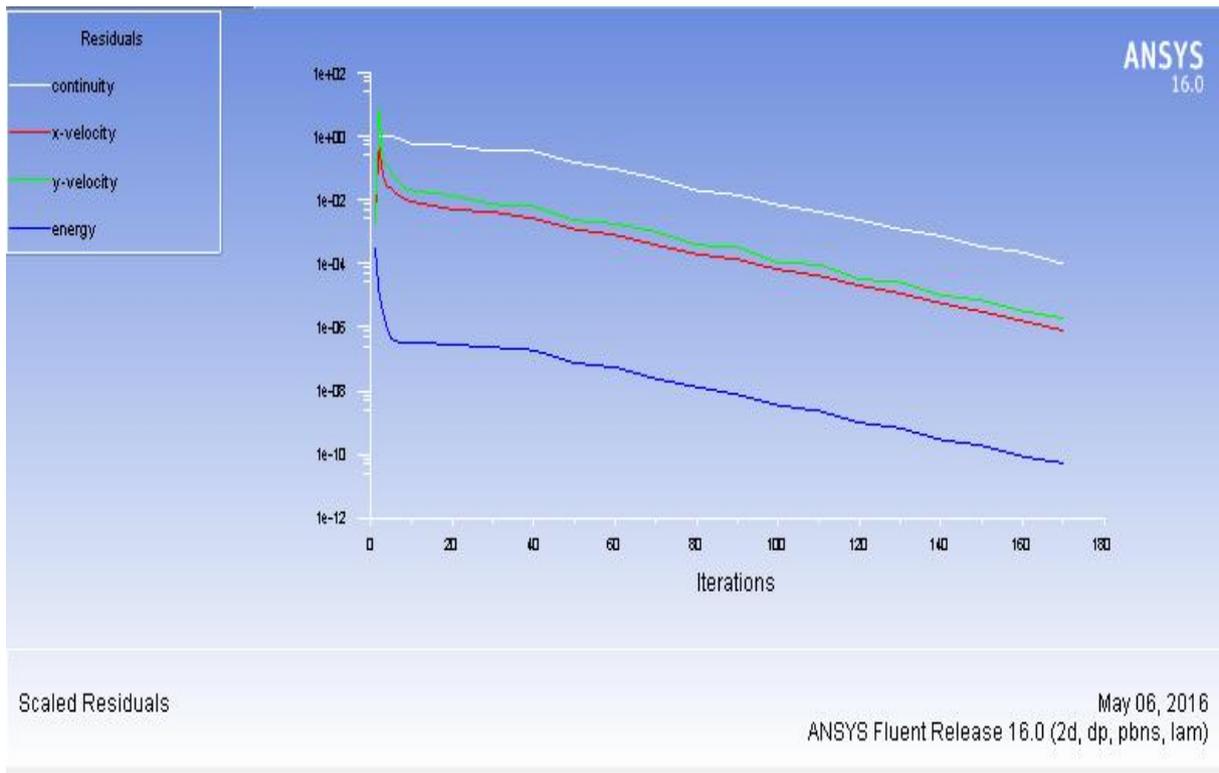


Figure III.5 : Schéma de convergence pour $Re=100$ et $Ha= 0$

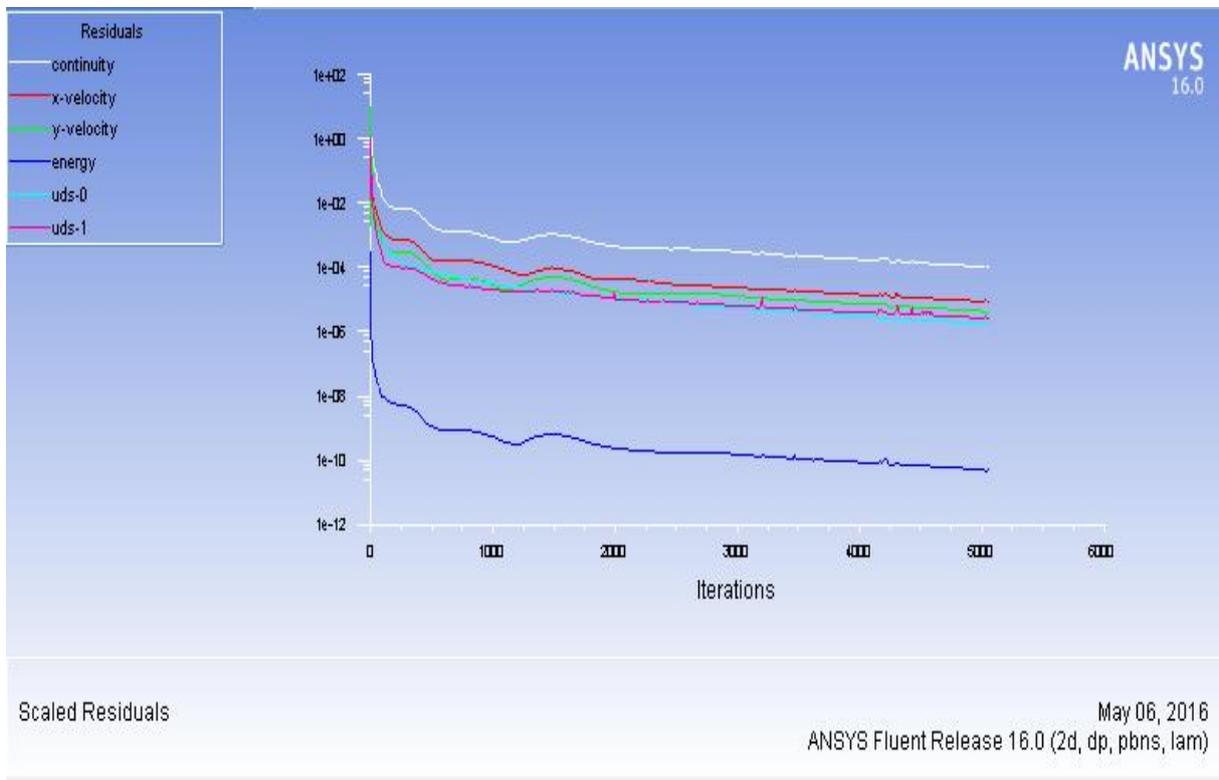


Figure III.6 : Schéma de convergence pour $Re= 100$ et $Ha= 50$

III.10.Conclusion

Dans ce chapitre on a cités les différentes étapes de la simulation numérique, tels que la création de la géométrie utilisant ANSYS DesignModeler, génération de maillage utilisant ANSYS Meshing avec la mise en données utilisant le code calcul Fluent, avec un régime l'écoulement laminaire.

IV.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus numériquement, sur l'influence d'un champ magnétique externe sur la convection mixte dans la géométrie considérée. Le fluide est caractérisé par un nombre de Prandtl, $Pr=0.023$, (cas des métaux liquides). Nous verrons en premier lieu, l'influence du maillage sur les résultats, puis nous procédons à la validation des résultats de la simulation obtenus à l'aide du logiciel FLUENT en comparant avec ceux obtenus par [18] et [3]. Les effets des paramètres de contrôle du problème, à savoir le nombre de Hartmann Ha et le nombre et Prandtl sur la structure de l'écoulement ont été aussi discutés.

IV.2. Paramètres du contrôle physiques de système :

Nombre de Préndlt : qui est le rapport de la viscosité cinématique ν et la diffusivité thermique α , il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux, Ce nombre porte le nom de Ludwig Prandtl, physicien allemand.

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un nombre de Prandtl faible indique que la conduction thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température. On le définit de la manière suivante :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Nombre de Grashof : est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection naturelle dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. Ce nombre porte le nom de Franz Grashof, ingénieur allemand. On le définit de la manière suivante :

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T D^3}{\nu^2}$$

Nombre de Rayleigh: est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides et caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide : inférieur à une valeur critique de 2000, le transfert s'opère essentiellement par conduction, tandis qu'au-delà de cette valeur c'est la convection naturelle qui devient importante. On peut le définir comme le produit du nombre de Grashof, reliant les effets de la force gravifique à la viscosité du fluide, et du

nombre de Prandtl. Ce nombre porte le nom de Lord Rayleigh, physicien anglais. On le définit de la manière suivante :

$$Ra = Gr.pr = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\nu \alpha}$$

Nombre de Hartmann :

Le nombre de Hartmann (Ha) est un nombre sans dimension utilisé en magnétohydrodynamique pour traiter caractérisé le mouvement de fluides conducteurs en présence d'un champ magnétique. Il représente le rapport entre la force de Laplace et les forces visqueuses. Ce nombre porte le nom de Julius Frederick Georg Poul Hartmann, ingénieur danois. Une autre source indique toutefois que ce nombre aurait été nommé en l'honneur de R. A. Hartmann. On le définit de la manière suivante :

$$Ha = B d \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}$$

Nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les équations de Navier-Stokes.

On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{\Omega D}{\nu}$$

IV. 3. Etude de densité de maillage

Pour assurer des résultats numériques plus fiables, on commence par examiner l'effet du maillage sur la solution numérique, et déduire la qualité de l'approximation de la solution. Pour étudier l'influence du maillage sur les résultats numériques, on a procédé aux choix de la maille indépendante qui a été obtenu en utilisant quatre mailles de taille différentes tel que : (32x9) ; (56x17) ; (100x31) ; (180x55) suivant les directions θ et r .

Les figures (IV.1) et (IV.2) montrent l'effet du maillage sur les profils radiaux de la composante azimutale de la vitesse et la température. Les résultats indiquent que pour un maillage d'ordre 100x31 la solution a convergé vers des résultats à peu près constants. Augmenter le maillage jusqu'à 180x55 ne change pratiquement pas les résultats obtenus pour la température et la vitesse, mais par contre augmente le temps de calcul. En plus ce maillage permet l'utilisation du schéma numérique pour des valeurs du nombre de Hartmann élevées.

On a constaté que la taille de la maille (100x31) est suffisante pour assurer une bonne résolution du problème étudié. Ce qui nous a conduits à l'utiliser pour notre étude.

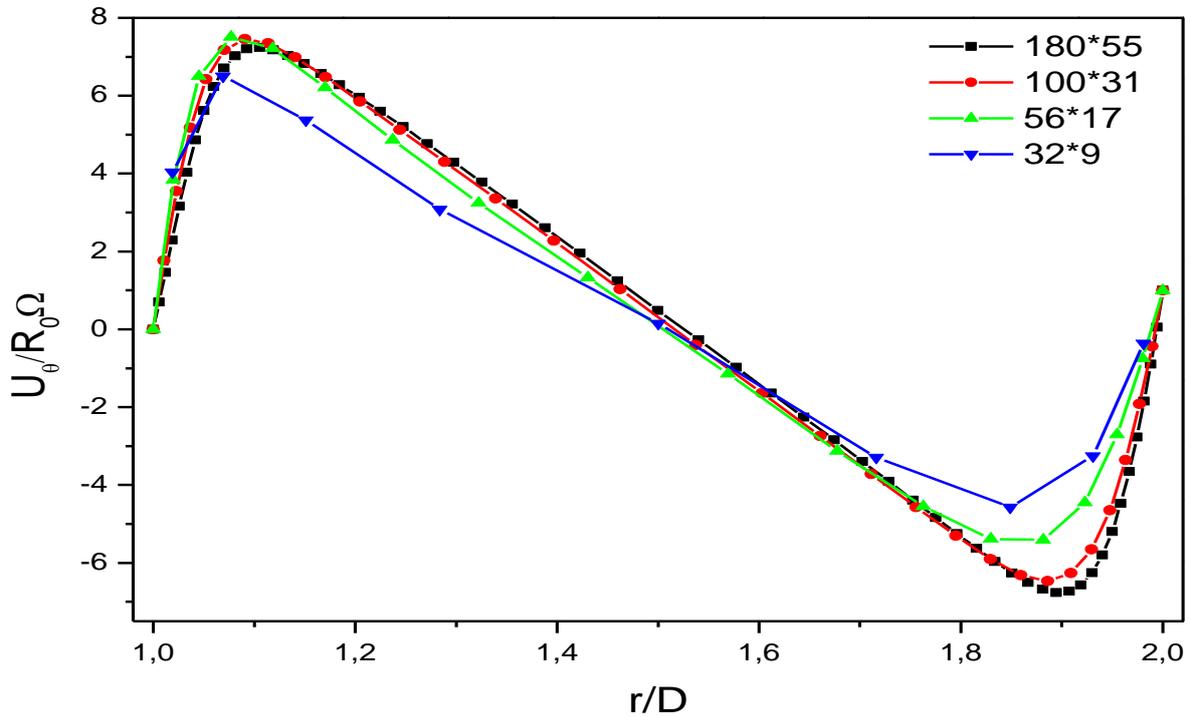


Figure. IV.1: Influence du maillage sur le profil radial de la vitesse azimutale pour $Re=100$, $Ha=30$, $Ra=10000$ et $Pr=0.023$

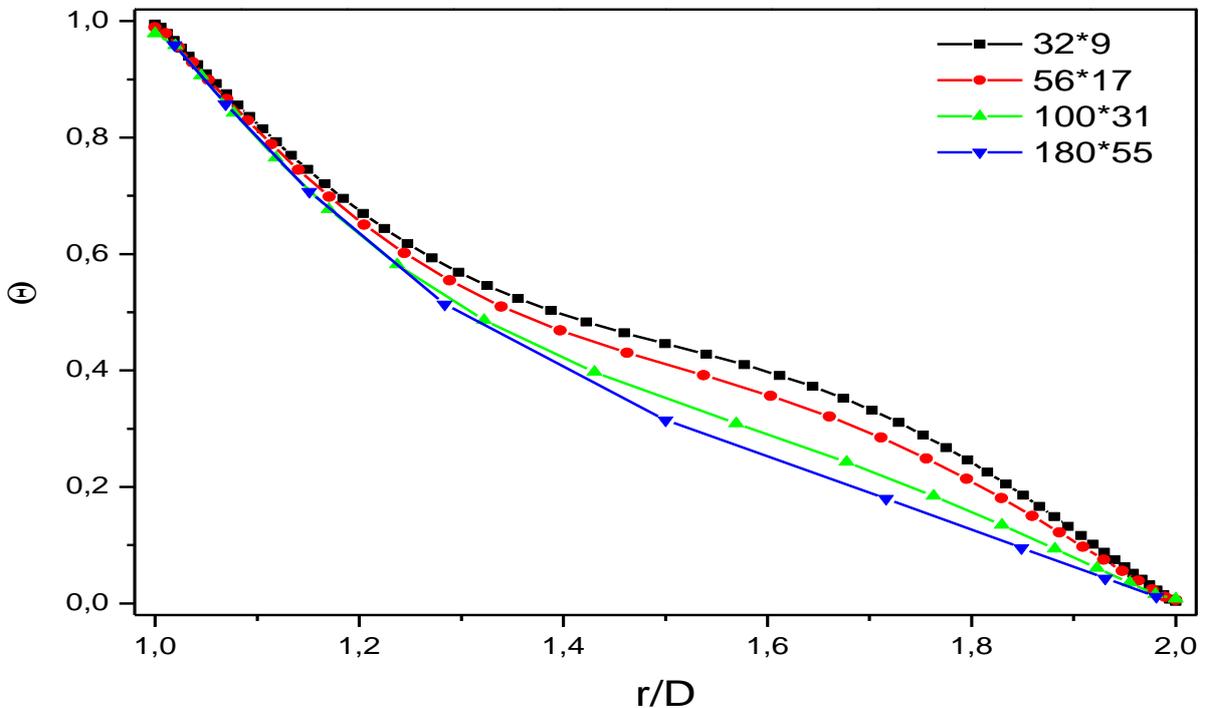
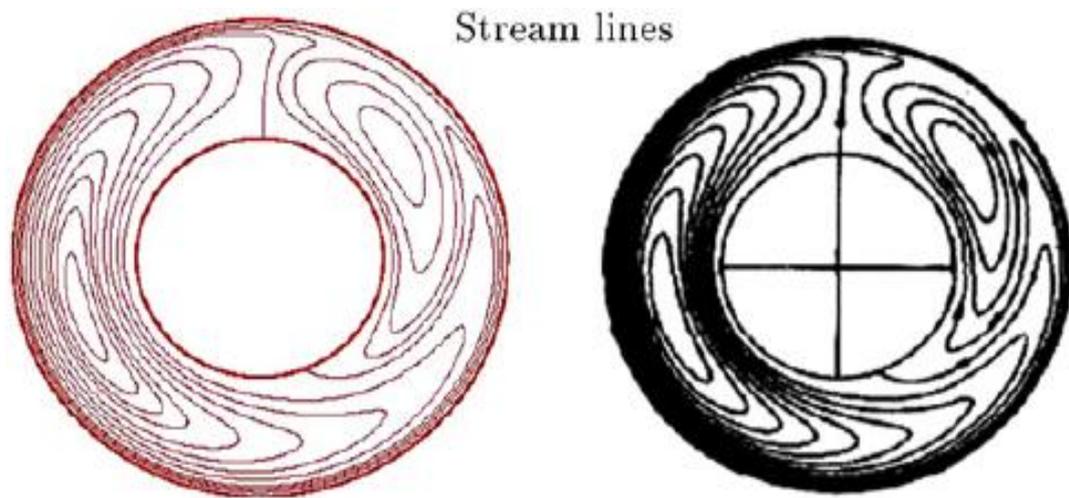


Figure. IV.2: Influence du maillage sur le profil radial de la température pour $Re=100$, $Ha=30$, $Ra=10000$ et $Pr=0.023$

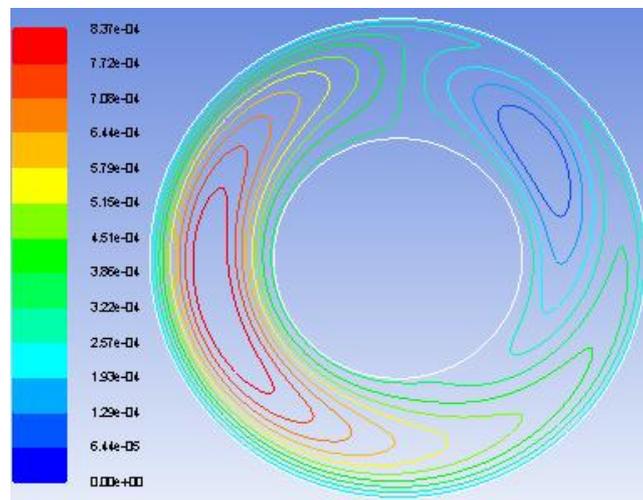
IV.4. Validation des modèles numériques :

Afin de démontrer la validation de nos résultats numérique, nous avons fait une comparaison avec les résultats obtenus avec deux figures de (H.R. Mozayyeni, A.B. Rahimi) et (JOO-SIK YOO) [18] et [3]. Pour cela nous nous sommes conformés aux mêmes conditions de leurs études [18] et [3].



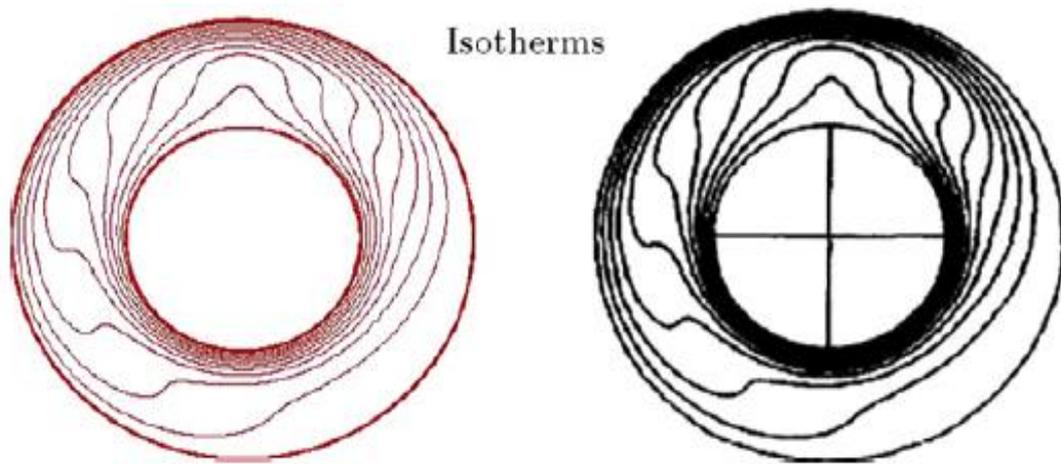
(a) Résultat de H.R. Mozayyeni [18]

(b) Résultat de JOO-SIK YOO [3]



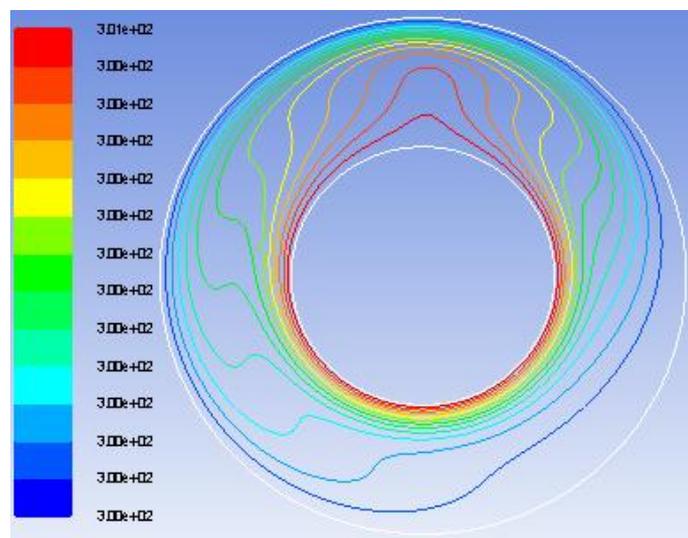
(c) Présente étude

Figure IV.3. Configuration des lignes de courants, pour ($Pr= 0,7$, $Re=100$, $Ra=10000$)



(a) Résultat H.R. Mozayyeni [18]

(b) Résultat de JOO-SIK YOO [3]



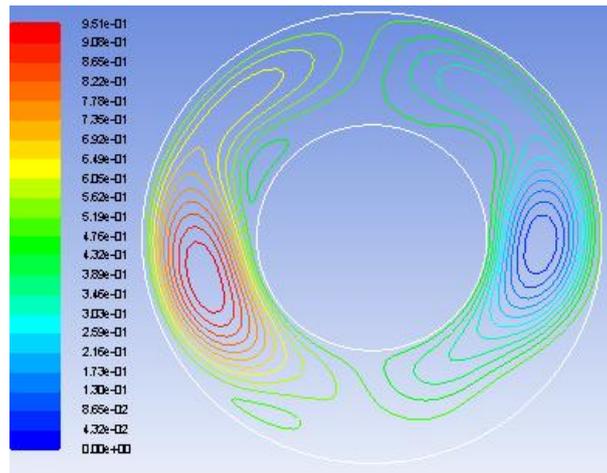
(c) Présente étude

Figure IV.4 Configuration de Isothermes, pour ($Pr= 0,7$, $Re=100$, $Ra=10000$)

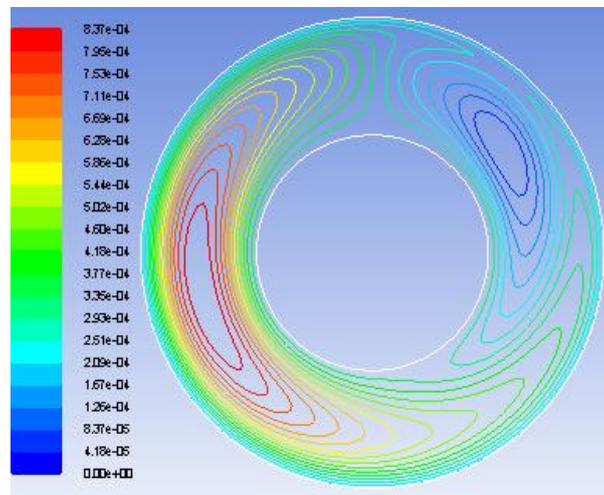
La comparaison a porté sur les résultats de l'évolution des lignes de courant et les isothermes sur les Figures IV.3 et IV.4 respectivement, à $Pr=0.7$, $Re=100$ et $Ra= 10000$, sans la présence du champ magnétique. Ces figures montrent une bonne concordance entre nos résultats et ceux de (a) H.R. Mozayyeni, A.B. Rahimi [18] et (b) JOO-SIK YOO [3]. Ceci permet donc de valider notre code numérique.

IV.5. Influence du nombre de Prandtl

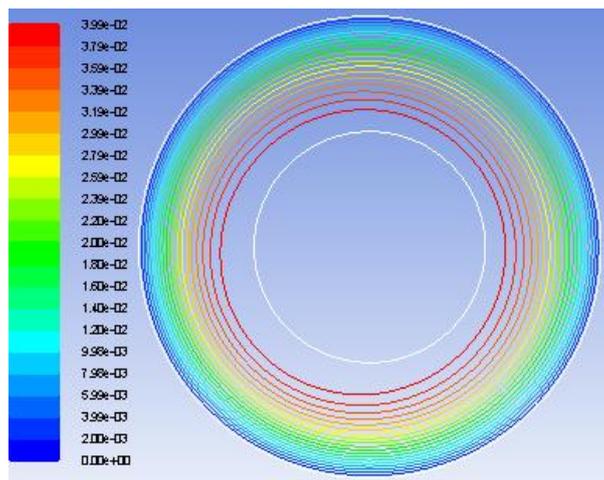
Pour voir l'influence du nombre de Prandtl, on a comparé le gallium qui est un métal liquide ($Pr = 0,023$) avec l'eau ($Pr = 7$) et l'air ($Pr = 0,7$). Pour les mêmes dimensions de la géométrie et les mêmes nombres de Rayleigh et de Reynolds, et sans la présence du champ magnétique.



(a)

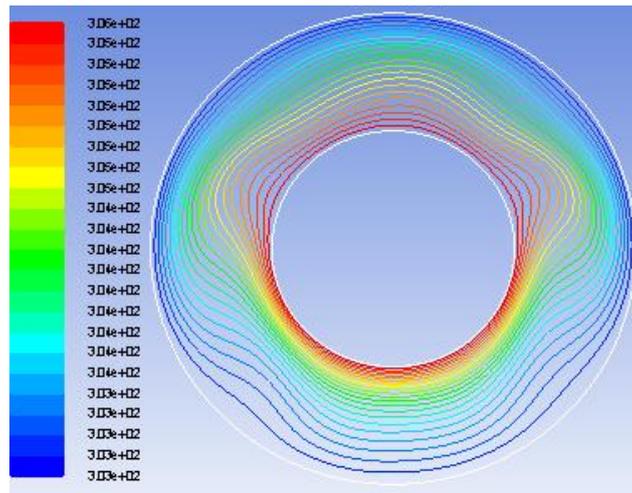


(b)

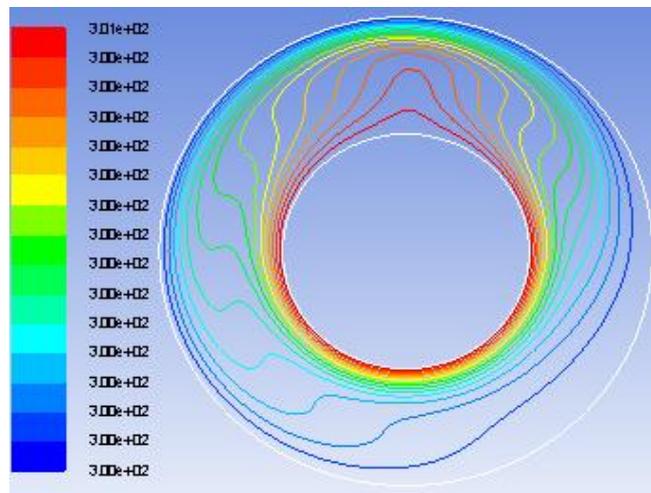


(c)

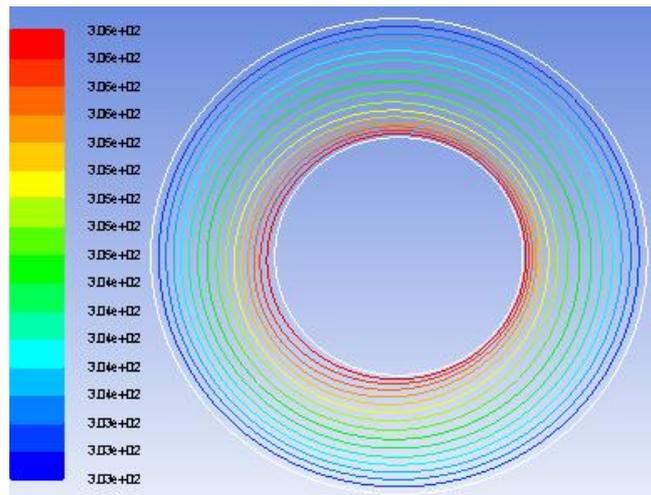
Figure IV.5 : Lignes de courant pour (a) gallium, (b) air, (c) eau, pour $Re=100$, $Ra=10000$



(a)



(b)



(c)

Figure IV.6 : champ de température pour (a) gallium, (b) air, (c) eau, pour $Re=100$,
 $Ra=10000$

L'effet du nombre de Prandtl sur les lignes de courant et les contours de température pour $Re = 100$, $Ra = 10000$ et $Ha = 0$ sont présentés dans les figures IV.5 et IV.6 respectivement. En utilisant les paramètres de contrôle non-dimensionnelles cités ci-dessus et pour une valeur fixe de nombre de Rayleigh Ra , le rapport du nombre de Grashof sur Re^2 pour des faibles valeurs du Prandtl est remarquable. Par conséquent, l'écoulement induit par la force flottabilité joue un rôle plus important dans ce cas, ce qui provoque l'existence de deux tourbillons qui sont symétriques par rapport à l'axe vertical pour $Pr = 0,023$. Lorsque la vitesse de rotation du cylindre extérieur va augmenter, la symétrie est va être rompue.

Comme la valeur du nombre Pr augmente, le rapport du nombre de Grashof à Re^2 diminue, avec le nombre de Ra restant à une valeur fixe. Cela tend à accroître l'influence de l'écoulement induit par la convection forcée.

Ainsi que l'écoulement forcé induit par la rotation du cylindre extérieur dans le sens contraire des aiguilles de la montre, étant opposés par l'écoulement induit par la force flottabilité, entraîne une réduction de l'intensité du tourbillon, qui commence dans la région droite au sein de l'espace annulaire et, éventuellement, la disparition du tourbillon au $Pr=7$.

D'une manière similaire, l'effet du nombre Pr sur la stratification du champ de température dans la direction radiale peut être simplement observé sur la figure IV.6.

IV.6. L'effet du champ magnétique sur le champ thermique et dynamique

L'application d'un champ magnétique constant dans la direction radiale du système permet d'agir sur la dynamique et le transfert de chaleur de l'écoulement entre deux cylindres horizontaux d'un fluide visqueux électriquement conducteur avec faible nombre de Prandtl.

IV.6.1 L'effet du nombre de Hartmann sur les lignes de courants et les contours de température

Comme nous le savons, le nombre Hartmann adimensionnel représente l'intensité du champ magnétique appliqué. Ici, l'effet du nombre Hartmann sur les lignes de courant et le champ de température, pour $Ra = 10000$, $Pr = 0.023$ et $Re = 100$ est présenté sur les figures (IV.7) et (IV.8).

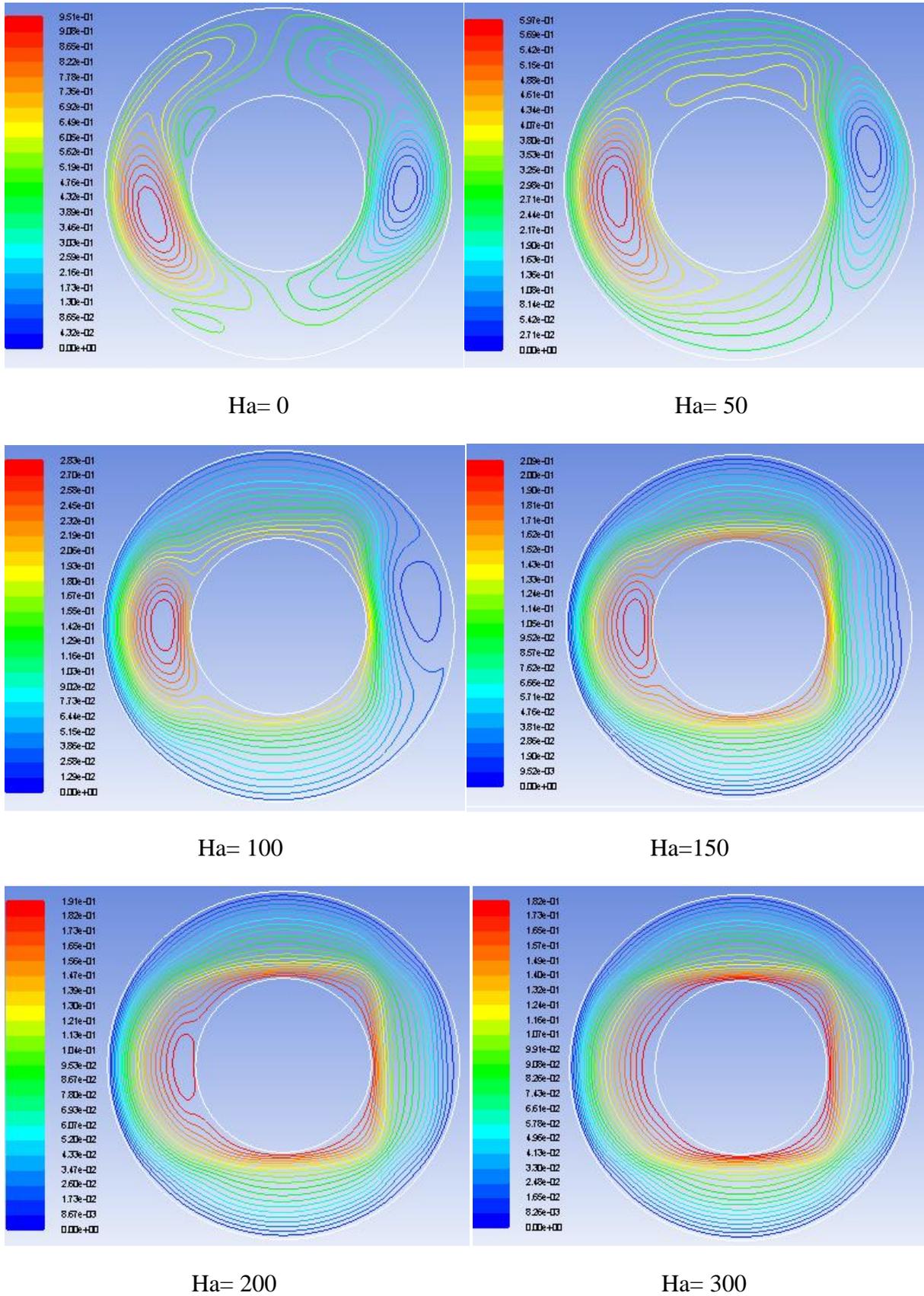


Figure IV.7 : l'effet du nombre de Hartmann sur les lignes de courants, pour $Re=100$, $Ra=10000$ et $Pr=0.023$

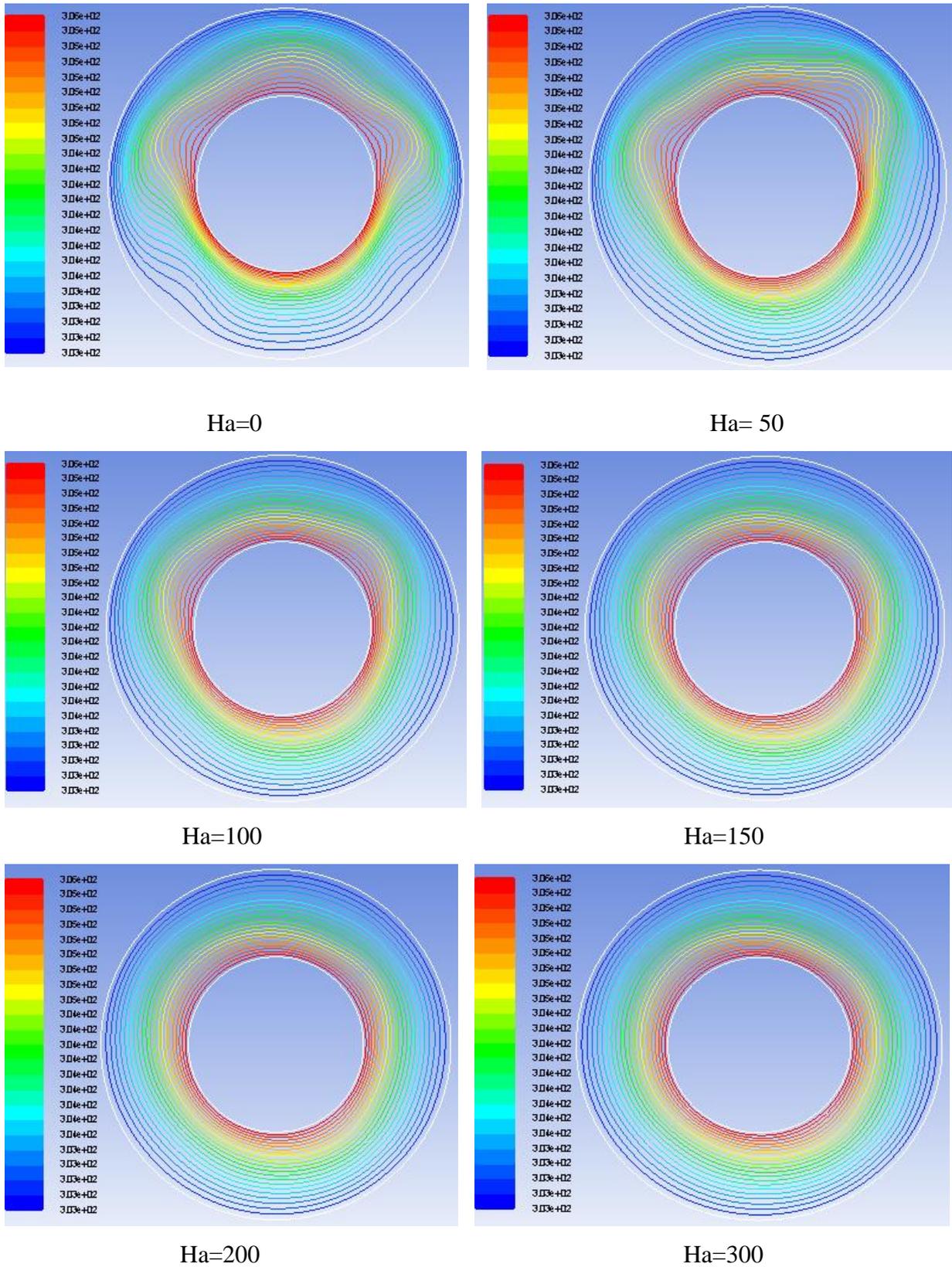


Figure IV.8 : l'effet du nombre de Hartmann sur les contours de température, pour $Re=100$, $Ra=10000$ et $Pr=0.023$

En l'absence d'un champ magnétique, la présence des forces de flottabilité et de la convection forcée gouverne l'écoulement de fluide dans l'espace annulaire, on observe la formation de deux tourbillons symétrique par rapport à l'axe vertical dans la figure IV.7 et l'apparition de structure en forme de champignon dans le champ de température, qui est dus à la dominance de la force de flottabilité. Mais l'application d'un champ magnétique externe modifie l'équilibre de ces forces dans l'écoulement de fluide.

Lorsque le nombre de Reynolds augmente, le champ de température est marqué par l'apparition de structures en forme de champignons,

Lorsque le champ magnétique est appliqué faible, on observe un changement sur les lignes de courant et les contours de température. Ces changements sont plus accentués pour $Ha = 150$, de sorte que, dans cette situation, les tourbillons existant à la droite de l'espace annulaire disparaissent et l'intensité des forces de flottabilité sur les contours de la température est réduite considérablement. Au fur et à mesure que l'intensité du champ magnétique augmente, jusqu'à la valeur maximale considérée dans cette étude $Ha=300$, les tourbillons sont détruits, ce qui a pour effet de stabiliser l'écoulement. Dans ce cas, la rotation du cylindre externe est la seule cause de l'écoulement du fluide.

IV.6.2 Effet du nombre de Hartmann sur le profil de vitesse azimuthale

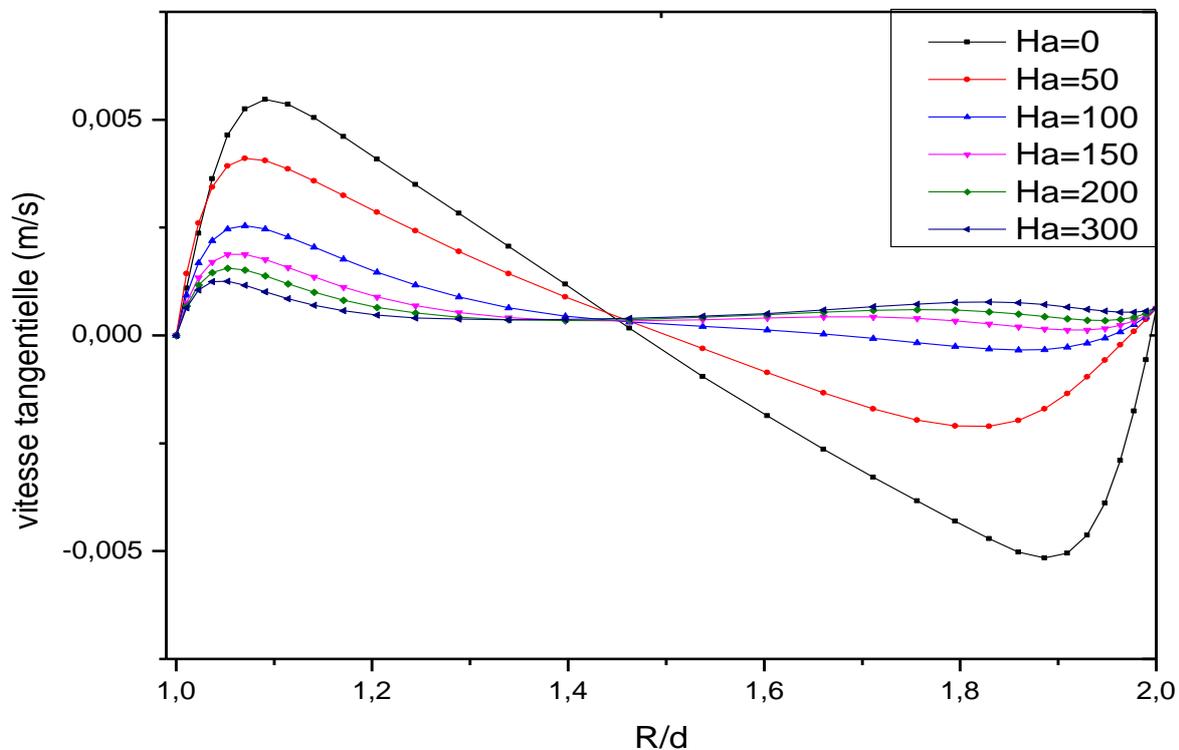


Figure IV.9. Le profil de vitesse azimuthale à différents nombres de Hartmann, pour, $\theta=0$, $Ra=10000$, $Re =100$, $Pr=0.023$

Sur la Figure IV.9, on présente un profil radial de la vitesse azimutale en fonction de nombre de Hartmann, mesuré à l'apparition des tourbillons dans l'espace annulaire pour $Re = 100$, $Pr = 0.023$ et $Ra = 10,000$ à $\theta = 0$. La vitesse moyenne azimutale est caractérisée par une distribution de type sinusoïdal sur l'espace annulaire. On observe que les maxima et les minima de la vitesse azimutale diminuent avec le nombre de Hartmann où la force de Lorentz joue le rôle d'amortisseur dans l'écoulement et aplatit le profil de vitesse, ceci est en accord avec la suppression progressive des cellules dans l'entrefer au fur et à mesure que l'intensité du champ augmente.

IV.6.3 L'effet du nombre de Hartmann sur le profil de température

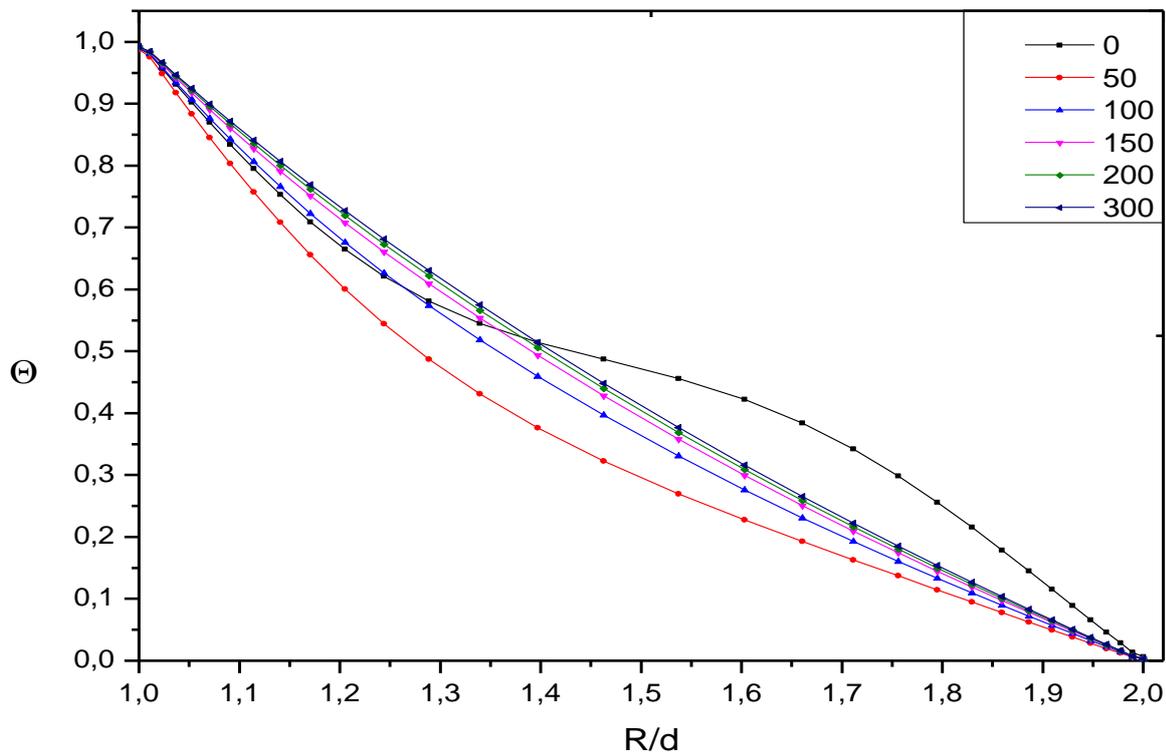


Figure IV.10 Le profil de température à différents nombres de Hartmann, pour, $\theta=0$,
 $Ra=10000$, $Re = 100$, $Pr=0.023$

La figure (IV. 10) décrit le profil de température radial obtenu pour différentes valeurs du nombre de Hartmann, pour un Rayleigh donné. En absence du champ magnétique le profil de température présente un point d'inflexion au milieu de l'espace annulaire. Lorsque le nombre de Hartmann augmente, la variation de température devient plus uniforme qu'auparavant, et cela est dû à la suppression de la convection par le champ magnétique.

IV.6.4 L'effet de nombre de Hartmann sur la distribution du nombre de Nusselt local

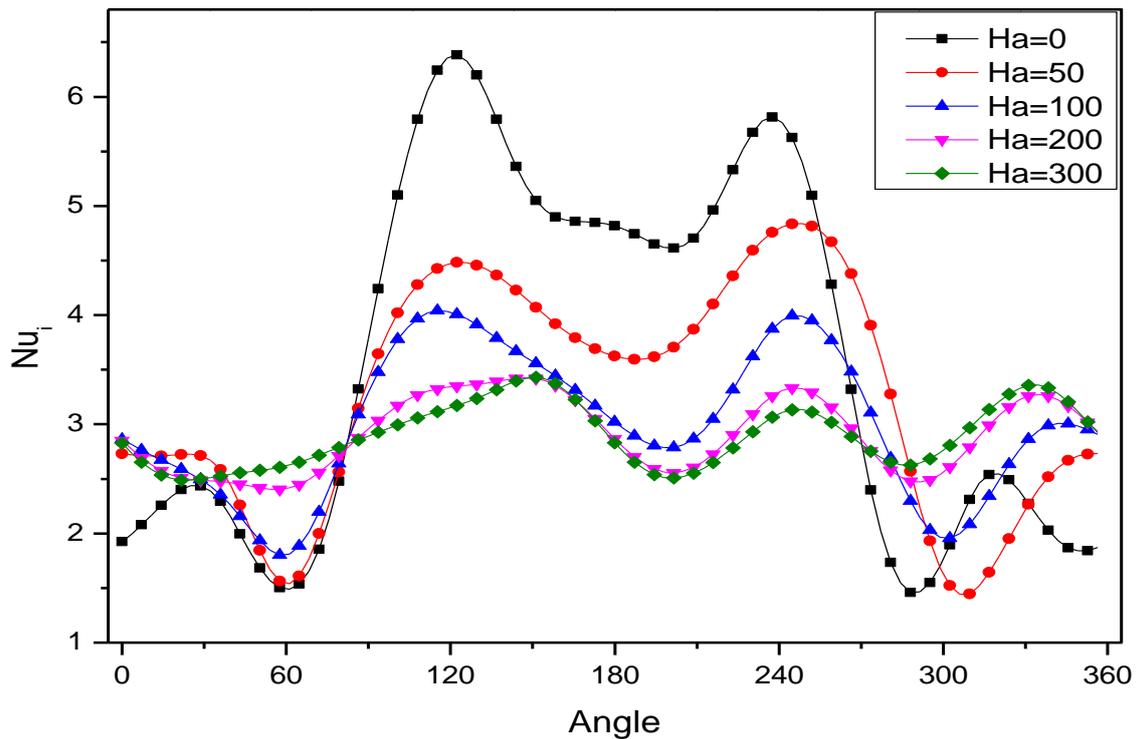


Figure IV.11 : L'effet de nombre de Hartmann sur la distribution du nombre de Nusselt local sur le cylindre intérieur, pour $Pr = 0.023$, $Re=100$, $Ra=10000$

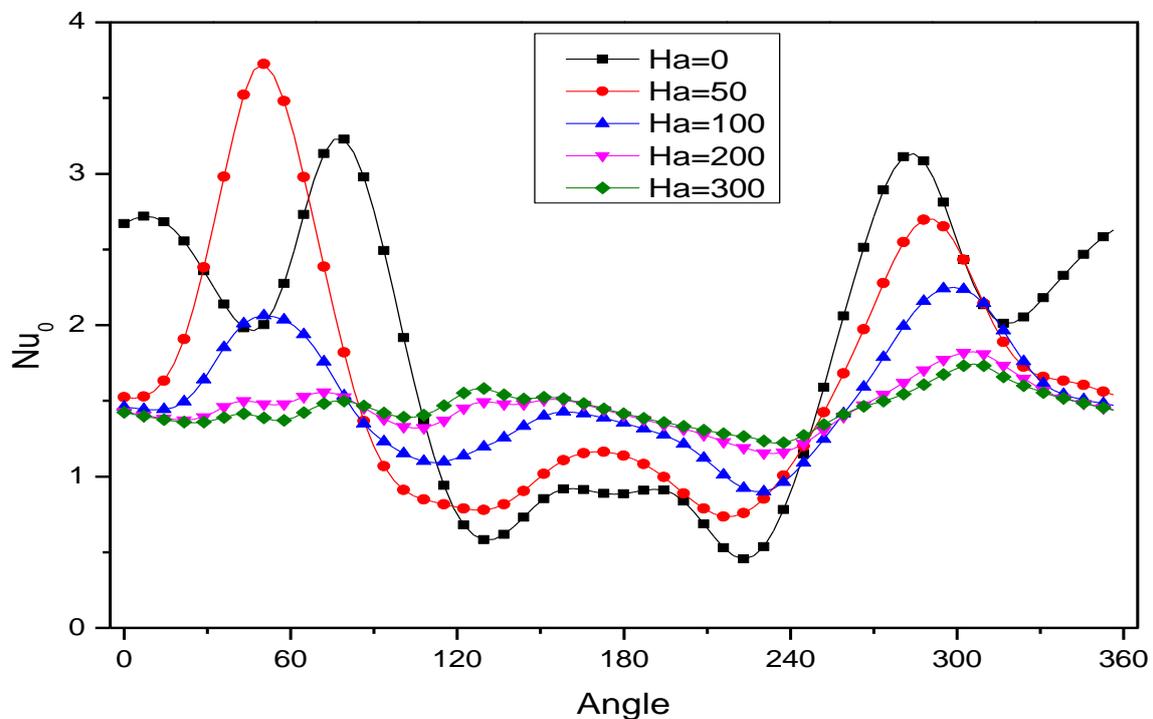


Figure IV.12 : L'effet de nombre de Hartmann sur la distribution du nombre de Nusselt local sur le cylindre extérieur, pour $Pr = 0.023$, $Re=100$, $Ra=10000$

Les figures IV.11 et IV.12 montrent l'influence du nombre de Hartmann sur la distribution du nombre de Nusselt sur les surfaces du cylindre intérieure et extérieure pour un nombre de $Re=100$, $Ra=10000$ et $Pr=0.023$.

Avec l'augmentation du nombre de Hartmann, ce qui entraîne une réduction des forces de flottabilité, se traduit par une diminution progressive du nombre de Nusselt sur les deux surfaces du cylindre, Il est intéressant de souligner que, dans cette situation où la convection forcée est dominant sur l'écoulement de fluide, le nombre de Nusselt sur les deux surfaces de cylindre, peut atteindre des valeurs inférieures pour des grandes valeurs de Hartmann. Comme nous le savons, en imposant un champ magnétique provoque un changement dans la structure dynamique et thermique de l'écoulement, de façon à ce que l'augmentation du nombre Hartmann provoque non seulement la destruction des tourbillons existants dans l'écoulement, mais rend les lignes de courant des cercles concentriques.

IV.7.Conclusion

Dans ce chapitre une étude numérique a été faite avec une présentation des résultats obtenues par cette simulation numérique, une validation de model numérique a été faite avec un teste de maillage. Plusieurs résultats concluent d'après nos résultats tels que l'effet de nombre de Hartmann sur les contours de températures et les lignes de courants.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a mené une étude numérique de la convection mixte dans un espace annulaire entre deux cylindres coaxiaux horizontaux dont le cylindre extérieur est en rotation, sous l'influence d'un champ magnétique externe et uniforme. Une modélisation du problème en 2D a été menée en utilisant le code ANSYS FLUENT, qui se base sur la méthode des volumes finis.

Une validation du modèle numérique a été faite pour le champ dynamique et thermique sans champ magnétique, ensuite généralisée pour le modèle MHD.

Pour montrer l'influence du nombre de Prandtl sur les écoulements convectifs, des fluides, à haute nombres de Prandtl (tel que l'eau et l'air) et le gallium à faible nombre de Prandtl, ont été utilisés. On a obtenu des résultats qui montrent que le gallium (métal liquide), a un comportement assez différent de ceux observés dans les fluides à haut nombre de Prandtl comme l'eau.

Par la suite, On a étudié l'influence du champ magnétique sur la structure de l'écoulement, avec le gallium comme fluide de convection. L'application d'un champ magnétique engendre quelques changements intéressants sur le mouvement du fluide et le transfert de chaleur, notamment un fort freinage de tout l'écoulement au sein du système.

Les résultats montrent que l'application du champ magnétique change l'équilibre entre la force de flottabilité (convection naturelle) et la convection forcée, cette influence se manifeste par la suppression de l'écoulement secondaire où les tourbillons sont détruits, et la diminution du champ de vitesse et de température dans l'espace annulaire. L'augmentation de l'intensité du champ magnétique provoque une diminution progressive du nombre de Nusselt local sur les deux surfaces des cylindres.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Tatsuo Sawada, Hiroshige Kikura, Atsushi Saito et Takahiko Tanahashi** “Convection of a Magnetic Fluid in Concentric Horizontal Annuli under Nonuniform Magnetic Fields”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 7:212-220. (1993)
- [2] **Ben Hadid, H., Henry, D. et Touihri, R** “Unsteady three-dimensional buoyancy-driven Convection in a circular cylindrical cavity and its damping by magnetic field”, *Journal of Crystal Growth*, vol. 180, pp. 433-441. (1997)
- [3] **JOO-SIK YOO** “Mixed convection of air between two horizontal concentric cylinders with a cooled rotating outer cylinder” Andong National University, 388 Songchundong, Andong, Kyungpuk, 760-749, Korea. (1997)
- [4] **Talmage, G., Shyu, S. H., Lopez, J. M. et Walker, J. S** ”Inertial effects in the rotationally driven melt motion during the Czochralski growth of silicon crystals with a strong axial magnetic field”, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, vol. 51, pp. 267-289.(2000)
- [5] **Bessaïh, R., Kadja, M., Eckert, K. et Marty. Ph** “Numerical and analytical study of Rotating flow in an enclosed cylinder under an axial magnetic field”, *Acta Mechanica*, vol. 164, pp.175-188. (2003)
- [6] **Bessaïh, R., Marty, Ph. et Kadja, M.** “Hydrodynamics and heat transfer in disk driven Rotating flow under axial magnetic field”, *International Journal of Transport Phenomena*, vol. 5, pp. 259-278. (2003)
- [7] **M.F. El-Amin** “Combined effect of viscous dissipation and Joule heating on MHD forced convection over a non-isothermal horizontal cylinder embedded in a fluid saturated porous medium” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 263 - 337–343.(2003)
- [8] **Kharicha, A, Alemany, A. et Bornas. D** “Influence of the magnetic field and the Conductance ratio on the mass transfer rotating lid driven flow”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 1997–2014. (2004)
- [9] **Kharicha, A., Alemany, A. et Bornas, D** “Hydrodynamic study of a rotating MHD flow in a cylindrical cavity by ultrasound Doppler shift method», *International Journal of Engineering Science*, vol. 43, pp. 589–615. (2005)
- [10] **S. Asghar, M.R. Mohyuddin, T. Hayat,** “Effects of Hall current and heat transfer on flow due to a pull of eccentric rotating disks”, *Int. J. Heat Mass Transf.* 48 599–607.(2005)
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [11] **Sankar, M., Venkatachalappa, M. and Shivakumara, I.S.** “Effect of magnetic field on natural convection in a vertical cylindrical annulus” *International Journal of Engineering Science*. (2006)
- [12] **A. Barletta et al** “Mixed convection with heating effects in a vertical porous annulus With a radially varying magnetic field” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 5777–5784. (2008)
- [13] **Bessaïh ,R., Boukhari, A. et Marty, Ph** ” Magneto hydrodynamics stability of a rotating flow with heat transfer”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol 36, pp. 893-901.(2009)
- [14] **Kakarantzas, S.C, Sarris, I.E., Grecos, A.P. et Vlachos, N.S**” Magneto hydrodynamic natural convection in a vertical cylindrical cavity with sinusoidal upper wall temperature” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp.250–259. (2009)
- [15] **M. Venkatachalappa, Younghae Do, M. Sankar** “Effect of magnetic field on the heat and mass transfer in a vertical annulus” *International Journal of Engineering Science* 49 - 262–278.(2010)
- [16] **S.C. Kakarantzas, I.E. Sarris, N.S. Vlachos** “Natural convection of liquid metal in a vertical annulus with lateral and volumetric heating in the presence of a horizontal magnetic field” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 - 3347–3356. (2011)
- [17] **Yaqing Liu, Liancun Zheng, Xinxin Zhang** “Unsteady MHD Couette flow of a generalized Oldroyd-B fluid with fractional derivative”, *Computers and Mathematics with Applications* 61 443–450. (2011)
- [18] **H.R. Mozayyeni, A.B. Rahimi** “Mixed convection in cylindrical annulus with rotating outer cylinder and constant magnetic field with an effect in the radial direction”, *Sharif University of Technology*. (2012)
- [19] **Jenn-Shyang Kuo, Jik Chang Leong**, “Analysis of a conducting fluid in a thin annulus with rotating insulated walls under radial magnetic effect”, *Volume 37, Issue 5, 1 March*, 3021–3035. (2012)
- [20] **LAOUAR Salima** ”influence d’un champ magnétique sur le transfert de chaleur dans les écoulements rotatifs” *UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE USTHB/ ALGER*. (2012)
- [21] **ABERRKANE Sofiane et al** ” Etude l’influence du champ magnétique sur le transfert de chaleur et de masse dans les écoulements rotatifs” *NIVERSIT M’HAMMED BOUGGARA – BOUMERDES*. (2014)
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [22] **Bouchendouka Faïçal et amiar farid** ''stabilité magnétohydrodynamique d'un écoulement tournant axisymétrique'' Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira. (2015)
- [23] **LALAOUA Adel** ''Simulation numérique de l'influence de la vibration radiale du cylindre extérieur sur l'évolution de l'écoulement dans le système Taylor-Couette ''Ecole militaire polytechnique. (2010)
- [24] **Daniel Brito et al** ''Experimental study of a geostrophic vortex of gallium in a transverse magnetic field''département Terre atmosphere Océan, école Normale Supérieure. (1995)
-

ANNEXE

Propriétés de l'eau à saturation						
θ	ρ	c_p	λ	$10^4 \cdot \mu$	$10^7 \cdot \alpha$	Pr
(°C)	(kg/m ³)	(J/kg.°C)	(W/m.°C)	(Pa.s)	(m ² /s)	
0	1002	4218	0,552	17,90	1,31	13,06
20	1001	4182	0,597	10,10	1,43	7,02
40	995	4178	0,628	6,55	1,51	4,34
60	985	4184	0,651	4,71	1,55	3,02
80	974	4196	0,668	3,55	1,64	2,22
100	960	4216	0,680	2,82	1,68	1,74
120	945	4250	0,685	2,33	1,71	1,45
140	928	4283	0,684	1,99	1,72	1,24
160	910	4342	0,680	1,73	1,73	1,10
180	889	4417	0,675	1,54	1,72	1,00
200	867	4505	0,665	1,39	1,71	0,94
220	842	4610	0,652	1,26	1,68	0,89
240	816	4756	0,635	1,17	1,64	0,88
260	786	4949	0,611	1,08	1,58	0,87
280	753	5208	0,580	1,02	1,48	0,91
300	714	5728	0,540	0,96	1,32	1,02

Table : les propriétés de l'eau à saturation

Propriétés de l'air à 1 atm						
θ	ρ	c_p	λ	$10^5 \cdot \mu$	$10^5 \cdot \alpha$	Pr
(°C)	(kg/m ³)	(J/kg.°C)	(W/m.°C)	(Pa.s)	(m ² /s)	
0	1,292	1006	0,0242	1,72	1,86	0,72
20	1,204	1006	0,0257	1,81	2,12	0,71
40	1,127	1007	0,0272	1,90	2,40	0,70
60	1,059	1008	0,0287	1,99	2,69	0,70
80	0,999	1010	0,0302	2,09	3,00	0,70
100	0,946	1012	0,0318	2,18	3,32	0,69
120	0,898	1014	0,0333	2,27	3,66	0,69
140	0,854	1016	0,0345	2,34	3,98	0,69
160	0,815	1019	0,0359	2,42	4,32	0,69
180	0,779	1022	0,0372	2,50	4,67	0,69
200	0,746	1025	0,0386	2,57	5,05	0,68
220	0,700	1028	0,0399	2,64	5,43	0,68
240	0,688	1032	0,0412	2,72	5,80	0,68
260	0,662	1036	0,0425	2,79	6,20	0,68
280	0,638	1040	0,0437	2,86	6,59	0,68
300	0,616	1045	0,0450	2,93	6,99	0,68

Table : les propriétés de l'air à 1 atm