

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines électriques
Présenté par :

Boutera Marwa

Thème:

**Etude du phénomène de couplage
hydrodynamique- thermique dans la pompe
magnétohydrodynamique MHD à conduction
par COMSOL**

Soutenu publiquement

Le :.././....

Devant le jury :

M^{me}BelkbirAmel

MAA

Président

UKM Ouargla

M^{me}Naceur Sonia

MCA

Encadreur

UKM Ouargla

M^{me}BoualiKhadidja

MCA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2019/2020

REMERCIEMENT

Remerciements

On remercie d'abord le Dieu, le tout grand et puissant, qui nous a donné la volonté et la force d'entamer et de terminer ce travail

Avant de commencer ce travail, je profite à l'occasion d'exprimer mon vif remerciements pour mes enseignants, et l'encadreur Dr. Mme. NACEUR Sonia d'avoir accepté de me encadré de ce modeste travaille , ainsi que pour ses précieux conseils nous prodiguer durant l'évolution de mon projet et son aide tout au long de ce travail.

Je tiens par ailleurs à remercier vivement tous les enseignants de l'université de KasdiMerbah et en particulier ceux du département d'électrotechnique pour ces encouragements ainsi qu'aux membres de jury, à Mme. BOUALI Khadidja et Mme BELKBIR Amel, qui mon fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail et d'avoir pris sur eux la charge d'examiner et de noter le fruit de mon effort.

Je voudrais associer à ces remerciements toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail premièrement à mes parents pour mon père Boutera Abdellah (Dieu bénisse son âme) et ma mère Boutera Radhia, pour leurs encouragements et soutien, et tout l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes années d'études.

Aussi à mes chère sœurs (Ghalia) et (Sara) et (Leila) et (Amel) et (Majda) mon cher frère (mohamedcherif) et ma Ma nièce chérie (Meriem) et mes chères amies (Chaima, Souad, Kamilia, Mona,).

Que Dieu leur apporte le bonheur Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin afin d'arriver à finaliser ce mémoire.

Marwa

Lise de Symboles

Symboles	Définition	Unités
\vec{j}	Densité de courant électrique	[A]
\vec{D}	L'induction électrique	[C/m]
\vec{B}	Induction magnétique	[T]
\vec{E}	Champ électrique	[V/m]
\vec{F}	La force électromagnétique	[N/m ³]
\vec{V}	La vitesse d'écoulement de fluide	[m/s]
ν	La viscosité cinématique	[m ² /s]
ρ	La densité de fluide	[Kg/m ³]
μ	Coefficient de viscosité dynamique	[N.s/m ²]
τ	Contrainte de cisaillement	[N.s/m ²]
P	La pression	[Pa]
σ	La conductivité électrique	[S/m]
P	Densité de charge volumique	[C/m]
K	Conducivité thermique	[kJ/ms ^{°K}]
C_p	Chaleur spécifique à pression constante	[KJ Kg-1K-1]
T	Température	[K [°]]
Q	Source de flux à constant thermique	[W/m ³]
Q_r	Pertes radiatives	[W/m ³]
P_s	Densité de puissance dissipé	[W/m ³]
Q	Charge électrique	[C]
t	Temps	[s]

Introduction générale

✚ Généralités	1
✚ Problématique	2
✚ Présentation de mémoire	2

Chapitre I : Etat de l'art du phénomène Hydrodynamique - thermique

I.1. Introduction	5
I.2. L'état de l'art de la mécanique des fluides	5
I.2.1 Domaines d'applications de la mécanique des fluides	6
I.2.2 Condition de non glissement	6
I.3. Classification des écoulements des fluides	7
I.3.1 Domaines visqueux ou non visqueux	7
I.3.2 Écoulement interne ou externe	7
I.3.3 Écoulement compressible et incompressible	8
I.3.4 Écoulement laminaire ou turbulent	9
I.3.5 Écoulement naturel (non forcé) ou forcé	10
I.3.6 Écoulement stationnaire ou non stationnaire	10
I.4. Le phénomène hydrodynamique	11
I.4.1 Définition de l'hydrodynamique	11
I.4.1.1 Hydrodynamique des liquides réel	12
I.4.1.2 Hydrodynamique de la couche limite	12
I.4.1.3 Hydrodynamique des liquides parfaits	12
I.4.2 les propriétés des fluides	12
I.4.2.1 La viscosité	13

I.4.2.2 La conductivité électrique	13
I.4.2.3 La conductivité thermique	13
I.4.2.4 La masse volumique	14
I.5 Le phénomène thermique	14
I.5.1 Transfert de chaleur par conduction	14
I.5.2 Transfert de chaleur par convection	15
I.5.3 Transfert de chaleur par rayonnement	16
I.6 Conclusion	16

Chapitre II : Généralité et Formulation mathématique des phénomènes Hydrodynamique- thermique dans la pompe MHD à conduction

II.1 Introduction	18
II.2 Les pompes magnétohydrodynamique (MHD)	18
II.2.1 La magnétohydrodynamique (MHD)	18
II.2.1.1 Les applications industrielles de la MHD	19
II.2.2 Les pompes MHD	20
II.2.2.1 Le principe physique du pompage MHD	20
II.2.3 Les applications de la MHD	21
II.2.4 Classification des pompes MHD	21
II.2.4.1 Les pompes MHD à conduction	22
II.2.4.2 Classification des pompes MHD à conduction	23
II.2.4.3 Les pompes à induction	24
II.2.5 les fluides conducteurs	25
II.3 Etude mathématique	25

II.3.1 Equation de conservation dans un fluide incompressible	25
II.3.2 Equation générale de MAXWELL	26
II.3.3 Problème thermique	27
II.4 Méthode de résolution	28
II.4.1 Méthode des différences finis (MDF)	29
II.4.2 Méthode des éléments finis	29
II.4.3 Méthode des volumes finis	30
II.4.4 Méthode des intégrales de frontières	30
II.5 Méthode de discrétisation	31
II.6 Conclusion	32

Chapitre III : Applications et résultats

III.1 Introduction	34
III.2. Plateforme	34
III.2.1 La définition de la CAO	34
III.2.2 Logiciel COMSOL	34
III.2.3 L'algorithme de l'étude hydrodynamique-thermique	35
III.3 Description générale de la pompe MHD à courant continu à conduction	36
III.4 Mise en équations dans l'hypothèse bidimensionnelle	36
III.5 La simulation sous le COMSOL	37
III.6. Résultats et discussions	39
III.6.2. Représentation de la température et la vitesse pour Mercure	40
III.7 Le couplage hydrodynamique-thermique	42

III-8 Conclusion	45
✚ Conclusion générale	47
✚ Référence bibliographie	48

Introduction générale

Généralité

L'un des premiers problèmes techniques auxquels l'humanité a été confrontée pendant le développement des villes a été l'approvisionnement en eau pour l'usage domestique et l'irrigation des cultures. Nos modes de vie urbains ne peuvent être conservés qu'avec une eau abondante, et il ressort clairement de l'archéologie que toute civilisation réussie de la préhistoire a investi dans la construction et l'entretien des systèmes d'eau. La plus ancienne contribution reconnue à la théorie de la mécanique des fluides a été faite par le mathématicien grec Archimède (285-212). Sir Isaac Newton (1643–1727) a appliqué ses lois aux fluides et a exploré l'inertie et la résistance des fluides, les jets libres et la viscosité. Cet effort a été développé par le Suisse Daniel Bernoulli (1700–1782) et son associé Leonard Euler (1707–1783) ensemble, leurs travaux ont défini les équations d'énergie et d'élan.

Le traité classique (Hydrodynamica) de Bernoulli en 1738 peut être considéré comme le premier texte de mécanique des fluides. Enfin, Jean d'Alembert (1717–1789) a développé l'idée des composantes de vitesse et d'accélération, l'expression différentielle de la continuité, et son «paradoxe» de résistance nulle au mouvement uniforme et régulier.

La mécanique est la science physique qui traite à la fois des corps stationnaires et en mouvement sous l'influence des forces. La dynamique des fluides s'occupe en deux l'hydrodynamique et l'aérodynamique, l'hydrodynamique étudie les mouvements des liquides et aérodynamiques étudie les mouvements des gazes ionisés ou plasma.

La magnétohydrodynamique est l'interaction entre deux phénomènes la dynamique des fluides (hydrodynamique) et la magnétique (électromagnétique). L'application de MHD en plusieurs domaines, le pompage MHD ou la pompe magnétohydrodynamique utilise le principe de fonctionnement du phénomène MHD.

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles, Ces méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) en des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différents points du milieu. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, ainsi que la méthode des intégrales de frontières.

Objectif

L'objectif de ce travail est une étude hydrodynamique thermique d'une pompe MHD à conduction par la méthode des éléments finis, la simulation de la pompe de notre étude sera réalisée au moyen du logiciel professionnel COMSOL Multiphysique.

Présentation de mémoire

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de trois principaux chapitres :

- Dans le premier chapitre, l'état de l'art de la mécanique des fluides l'hydrodynamique et les différents écoulements des liquides
- Le deuxième chapitre est présenté les pompes MHD et les leur classification et applications et aussi consacré à la formulation mathématique des phénomènes magnétohydrodynamique thermique.
- Le troisième chapitre est consacré à présentation des résultats de simulation hydrodynamique thermique par la méthode des éléments finis sous logiciel COMSOL

Chapitre I :

L'état de l'art de la phénomène
Hydrodynamique - thermique

I1 Introduction

La dynamique des fluides ou le phénomène hydrodynamique est la science physique liées aux l'étude de mouvement des fluides par conséquence l'hydrostatique est l'inverse dans le domaine de la dynamique des liquides pour atteindre l'objectif souhaité .Il faut de connaître les propriétés physique de liquide utilisé (viscosité,conductivité...etc) . Ce chapitre est concecrée à la présentationdes phénomènes hydrodynamique et thermique

I-2 L'état de l'art de la mécanique des fluides

Le mécanique est l'un des sciences physique anciennes qui est l'étude de mouvement des corps à l'état stationnaire ou non stationnaire.soumis des forces exterieures le catégorie général en divise par deux **Statique et Dynamique:**

figure (I-1) présente un schéma de sous classification de chaque étape

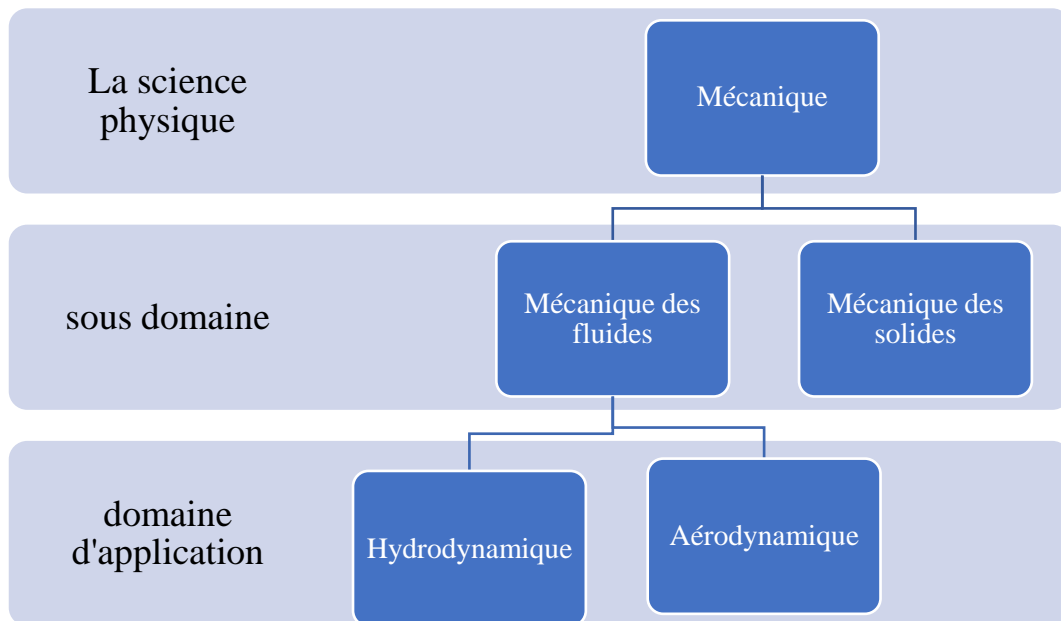


Figure (I-1)

la **mécanique des fluides** est la science qui traite le comportement des fluide au repos (le statique des fluides $\Sigma Fi=0$) et au mouvement (dynamique des fluides $\Sigma Fi>0$) ainsi qu'aux interactions des fluides aux interfaces avec des solides ou d'autre fluides.[1][2]

Un autre sous-catégorie de mécanique des fluides est l'**hydrodynamique** qui étudies des fluides pratiquement incompressible (les liquides particulièrement à l'eau ,ou les gaz à faible vitesse.) et traite le flux des liquides dans des tuyaux et des conduites ouvertes et autre sous-catégorie

est l'aérodynamique quant à elle traite de l'écoulement des gaz (essentiellement l'air) sur des surfaces telsque les avions, les fusées ou les automobiles à grande ou petite vitesse. D'autres

catégories spécialisées telles que la métrologie, l'océanographie, et l'hydrologie traitent des écoulements naturels.[1][3]

Les lois fondamentales de l'hydrodynamique les suivantes: conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement, conservation de l'énergie. La résolution d'un problème de la phénomène hydrodynamique demande normalement de calculer diverses propriétés des fluides comme la vitesse, la viscosité, la densité, la pression et la température en tant que fonctions de l'espace et du temps.[4]

I-2-1 Domaine d'applications de la mécanique des fluides

La mécanique des fluides est largement utilisée à la fois dans les activités quotidiennes ,et dans le design des systèmes modernes d'ingénierie allant des aspirateurs aux avions supersoniques, la mécanique des fluides joue un rôle vital au sein du corps humain commes les respirateurs et les systèmes de dialyse sont élaborés à partir de la dynamique des fluides.et quotidiennes comme les systèmes de canalisation pour l'eau froide, le gaz naturel et l'évacuation des maisons individuelles sont conçus sur les bases de la mécanique des fluides et aussi les canalisations et réseaux de conduits de chauffage ou d'air conditionné un nombre important d'applications de mécanique des fluides dans l'automobile. Tous les composés en lien avec le transport de combustible du réservoir au cylindre – aux tuyaux d'alimentation, à la pompe d'alimentation, à l'injecteur, au carburateur – tout comme le mélange du combustible avec. l'air dans les cylindres et la purge de combustion des gaz dans les tuyaux d'échappement sont analysés grâce à la mécanique des fluides.

À plus large échelle, la mécanique des fluides joue un rôle majeur dans la conception et l'analyse des avions, bateaux, sous-marins, fusées, réacteurs, éoliennes, appareils biomédicaux, le refroidissement des composants électroniques, le transport de l'eau, du pétrole brut et du gaz naturel.[1]

I-2-2 Condition de non glissement

Considérons l'écoulement d'un fluide dans une canalisation stationnaire ou sur une surface solide non poreuse (i.e. imperméable au fluide). Toutes les observations expérimentales indiquent que le fluide en mouvement est à l'arrêt complet sur la surface, ce qui suppose que la vitesse relative par rapport à la surface est nulle. Ainsi, un fluide en contact direct avec un solide adhère à la surface à cause des effets de frottements qui l'empêchent de glisser. Ce phénomène

est connu sous le nom de condition de non glissement. La propriété du fluide responsable de la condition de non glissement et du développement de la couche limite est la viscosité.[1]

I-3 Classification des écoulement des fluides

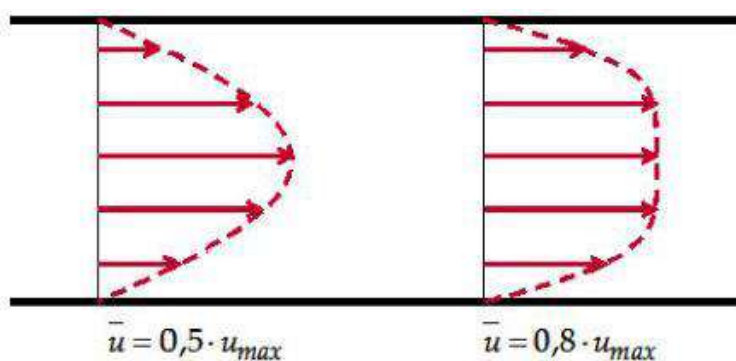
Par définition de la mécanique des fluides qu'est l'interaction des fluides avec les solides ou autre fluides au repos ou au mouvement , on trouve plusieurs problèmes en pratique .On classe de ces problèmes selon les caractéristiques des fluides par des catégories .

I-3-1 Domaines visqueux ou non visqueux

Le mouvement de deux couches de fluides résulte lorsque on applique une force de friction ou une résistance interne à l'écoulement ,la viscosité est due aux forces de cohésion entre les molécules pour les liquides et aux collisions moléculaires dans les gaz, il n'existe pas de fluides contenant une viscosité nulle et les écoulements dus à un frottement important sont les écoulements visqueux, et le contraire où les forces de viscosité sont négligeables par rapport aux forces d'inertie ou de pression dans telle zone les écoulements non visqueux.[1]

I-3-2 Écoulement interne ou externe

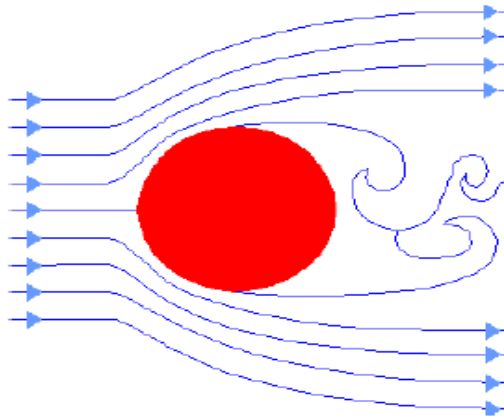
On dit qu'un écoulement interne lorsque est forcé dans un tunnel ou un canalisation ou une conduite par exemple écoulement d'eau dans une canalisation,ou un écoulement sur une large surface ou écoulement d'un fluide non borné comme c'est le cas sur une surface telle qu'une plaque, un fil ou un tube est un écoulement externe .



Figure(I-2) écoulement dans une conduite (écoulement interne)

- La force de viscosité est supérieure sur tout le champ de l'écoulement.

- Le suggestionne de la viscosité (force de viscosité) s'étend du premier point jusqu'au dernier point de l'écoulement.
- Gradient de vitesse sur tout le champ de l'écoulement.



Figure(I-2) écoulement autour d'un cylindre (écoulement externe)

on diviser l'écoulement externe en zones :

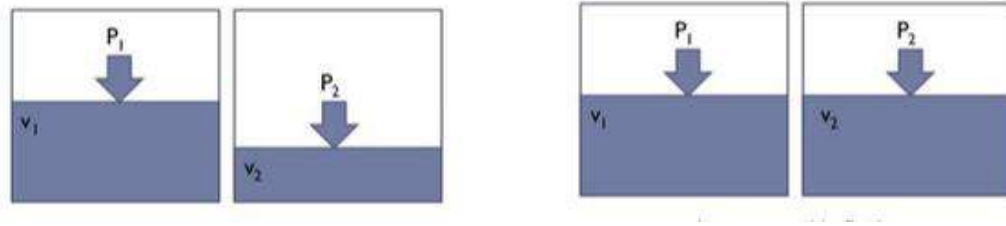
Zone 1 : Couche limite (influence de la viscosité).

Zone 2 : Région invicidé (les forces de viscosité sont négligeables).

I-3-3 Ecoulement compressible ou incompressible

La compressibilité et l'incompressibilité des fluides dépend de la variation de la masse volumique des fluides si la masse volumique reste constante tous le temps on dit que le fluide est incompressible et le contraire si la masse volumique changé dans chaque instant on définis que le fluide est compressible.

Les masses volumiques des liquides sont généralement constantes et donc l'écoulement d'un liquide est incompressible. Pour cette raison, les liquides sont généralement considérés comme des composés incompressibles. À titre d'exemple, la masse volumique de l'eau ne varie que de 1 pourcent lors d'une variation de pression de 1 à 210 atm. A contraire, les gaz sont très compressibles. Par exemple, la pression atmosphérique et la masse volumique de l'air varient de 1 pourcent pour une variation de pression de pression de seulement 0,01 atm.



Figure(I-3) fluide compressible (à gauche) et fluide incompressible (à droite)

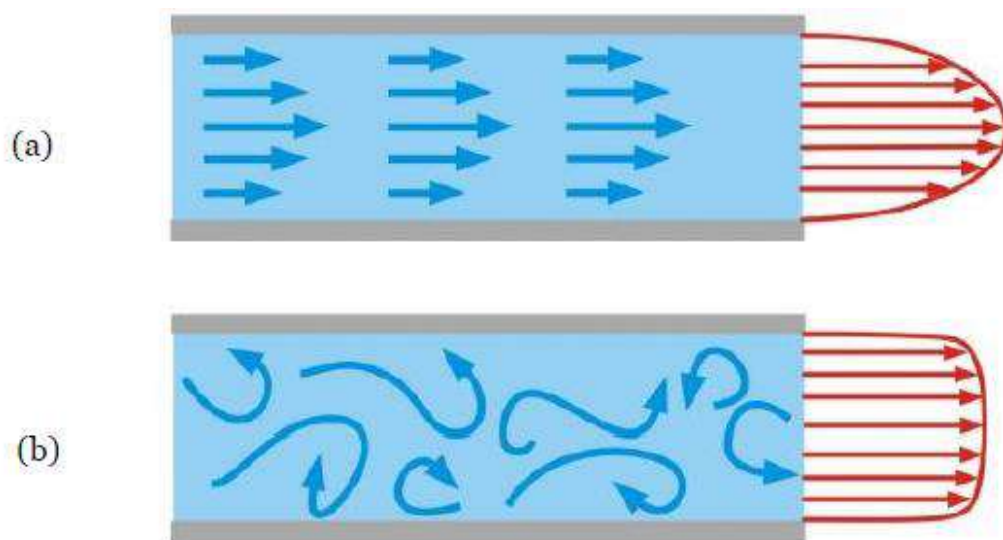
P1 est pression appliqué au premier instant et P2 au deuxième instant et V1 et V2 les volumes dans les deux instats .Il y'a le nombre de Mach d'expression :

$$MA = \frac{v}{c} = \frac{\text{Vitesse de l'écoulement}}{\text{vitesse de son}}$$

Où c est la vitesse du son dont la valeur est de 346 m/s dans l'air à température ambiante au niveau de la mer , cette nombre caractérisé si le fluides est compressible ou non ,lorsque on dit que les liquides en général porter incompressible donc $MA < 0.3$.[1]

I-3-4 Ecoulement laminaire ou turbulent

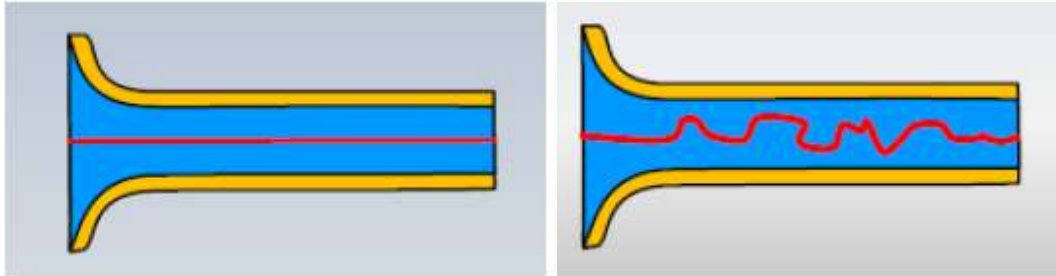
On dit que un écoulement laminaire si le mouvement du fluide très ordonné dont les couches qui le caractérisent sont lisses comme les fluides de grande viscosité tels que les huiles, à faible vitesse est laminaire , par rapport le déplacement très désordonné d'un fluide, observé généralement à vitesse élevée et caractérisé par des fluctuations de vitesse, est appelé turbulent comme des fluides de faible viscosité tel que l'air, à grande vitesse. Les expériences conduites par Osborne Reynolds dans les années 1880 ont abouti à l'établissement du nombre adimensionnel de Reynolds, Re, paramètre clef dans la détermination des régimes d'écoulement dans les canalisations.[1]



Figure(I-3) (a) écoulement laminaire et (b) écoulement turbulent

Le nombre de Reynolds montré le rapport entre les forces d'inertie et la viscosité si le nombre de *Reynolds* $Re < 2300$, l'écoulement est considéré laminaire, et $Re > 4000$ il devient facilement turbulent.[2][5]

Comme suit :



$Re < 2300$ écoulement laminaire

$Re > 4000$ écoulement turbulent

I-3-5 Ecoulement naturel (non forcé) ou forcé

Un écoulement naturel ou non forcé c'est-à-dire tout les déplacements du fluide est naturel comme par exemple Par exemple pour les systèmes solaires fournissant de l'eau chaude, l'effet de thermosiphonage est généralement utilisé en remplacement des pompes grâce à un réservoir d'eau suffisant, placé au dessus des panneaux solaires par contre les écoulements forcé ou non naturel une action extérieure telle qu'une pompe ou un ventilateur est nécessaire pour obligé le fluide à s'écouler sur une surface ou dans une canalisation .[1]

I-3-6 Ecoulement stationnaire et non stationnaire

Les termes stationnaire et uniforme sont souvent utilisés en ingénierie. Pour cette raison il est important de bien comprendre leur sens. Le terme stationnaire implique qu'il n'y a aucune variation des propriétés, de vitesse, de température, etc., dans le temps. Le contraire de stationnaire est non stationnaire. Le terme uniforme signifie qu'il n'y a pas de changement de position sur un domaine spécifique. Ces définitions sont également utilisées dans la vie courante avec le même sens (une relation sentimentale stable, une distribution uniforme, etc.).[1]

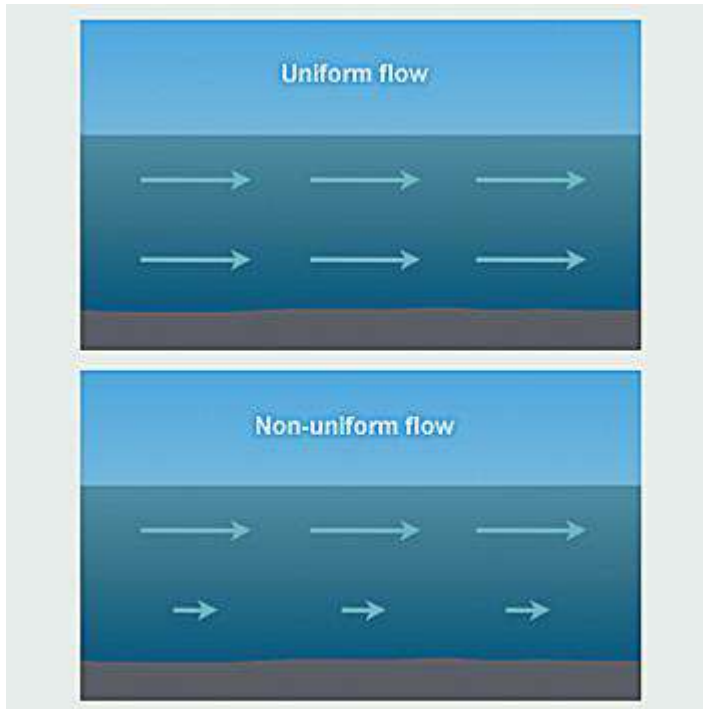


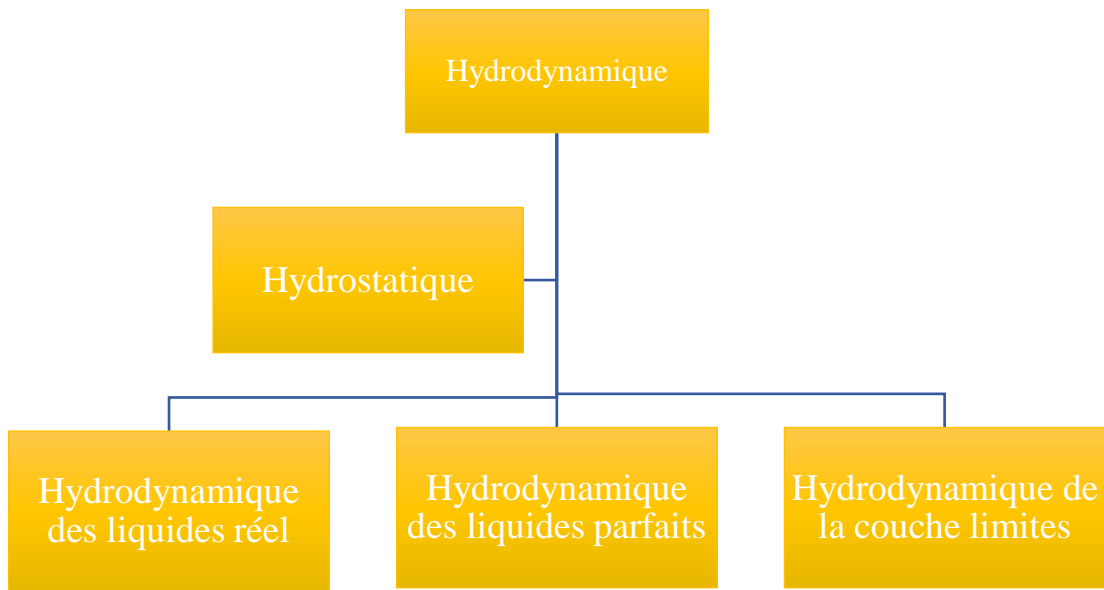
Figure (I-3) Un exemple des écoulements stationnaire (uniforme flow) et non stationnaire(non-uniforme flow)

I-4 Phénomène Hydodynamique

I-4-1 la définition de l'hydrodynamique

L'hydrodynamique ou le dynamique des fluides c'est la science qui traite les propriétés physiques d'un fluide en mouvement et de repos (on appelle aussi l'hydrostatique) sur notre étude. Au même titre que l'anatomie, la neurologie, la pharmacologie . . . , elle contribue à la compréhension de la physiologie du transport de l'urine, même si l'application de ses principes à un phénomène naturel aussi complexe impose des hypothèses ou des modélisations simplificatrices. [6]

On divise les types des liquides par trois classifications :



I-4-1-1 Hydrodynamique des liquides réel

L'étude du mouvement des liquides réel c'est-à-dire accompagne les particuliers suivants :

- Dépend de la viscosité du fluide
- Des pertes due aux frottements
- Frottements contre les parois
- Frottements intermoléculaire (interne)

I-4-1-2 Hydrodynamique de la couche limite

hydrodynamique de la couche limite, lorsque l'écoulement peut être divisé en deux régions : une zone de faible épaisseur, dite couche limite, qui se situe près d'une surface solide où l'influence de la viscosité est importante et une zone au dessus de la couche limite, dite fluide libre, où l'influence de la viscosité est négligeable.

I-4-1-3 Hydrodynamique des liquides parfaits

Hydrodynamique des liquides parfaits lorsque l'écoulement sans prise en compte la viscosité du fluides et les pertes d'énergie et les propriétés physique de fluide (viscosité,conductivité thermique) et en général il n'ya pas un fluide parfait dans la nature.

Dans le dynamique des fluides en générale les axiomes fondamentaux sont les lois de conservations comme la conservation de la masse (aussi appelée équation de continuité), la conservation de la quantité de mouvement (plus connue sous le nom de seconde loi de Newton),

et la conservation de l'énergie. Ils constituent la base de la mécanique newtonienne et sont aussi importants en mécanique relativiste.

I-4-2 Les propriétés physique des fluides

Tous les fluides possèdent des caractéristiques permettant de décrire leurs conditions physiques dans un état donné. On essaie d'exprimer ces caractéristiques, qu'on appelle propriétés du fluide, au moyen d'un nombre limité d'unités de base.

I-4-2-1 La viscosité

La viscosité d'un fluide est la mesure de sa résistance à l'écoulement. La viscosité est une propriété qui permet de distinguer un fluide parfait (viscosité nulle) d'un fluide réel.

Dans un fluide, la force de frottement (force tangentielle) par unité de surface ou tension de frottement, est proportionnelle au gradient de vitesse de l'écoulement, du/dz . [2]

➤ Viscosité dynamique (μ)

-Résistance d'un fluide à l'écoulement

$$\text{Formule : } \tau = \mu \frac{du}{dy} \text{ en } N \cdot s/m^2$$

μ : Coefficient de viscosité ou viscosité dynamique.

du/dy : Taux de cisaillement.

τ : Contrainte de cisaillement

➤ Viscosité cinématique (ν)

-viscosité dynamique par unité de densité

$$\text{Formule : } \nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ en } m^2/s$$

I-4-2-2 La conductivité électrique

C'est la capacité qu'a une substance de conduire l'électricité ,les matériaux qui conduisent l'électricité sont des conducteurs électriques (le cuivre,l'or,l'Aluminium..) et l'inverse qui ils ne conduisent pas l'électricité sont des isolants on σ électrique l'unité du la conductivité électrique est (S/m). [9]

I-4-2-3 La conductivité thermique

C'est la capacité qu'a une substance de transmettre la chaleur plus ou moins rapidement , le fer et le cuivre sont des bons conducteurs thermique par contre le bois et le verre sont des mauvais conductivité thermique car ils sont des isolant on λ L'unité de la conductivité thermique est ($W m^{-1}K^{-1}$). [9]

Tableaux (I-3) : la conducvité thermique et élecrique des métaux liquides

Métaux liquide	Conductivité thermique $\lambda(W m^{-1}K^{-1})$	Conductivité électrique $\sigma(S/m)$
Nickel	100	1.44 e7
Carbone	173	1.85 e7
Tungstène	80-240	7.2 e4
Carburedesilicium	180	1 e5

I-4-2-4 La masse volumique

C'est le rapport de la masse (m) sur le volume (∇) du corps considéré :

$$\rho = m/\nabla$$

Unité SI : g/m^3

Comme les solides et liquides sont incompressibles, le volume peu dépendre de la température et pas du tout de la pression. ρ diminue un peu si la température augmente.

Les gaz sont compressibles : ∇ augmente si T augmente et ∇ diminue si P augmente. ρ varie d'un fluide à un autre.[2]

Exemple :

$$\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg}/m^3$$

$$\rho_{Air} = 1.225 \text{ kg}/m^3$$

I-5Phénomène thermique (Transfert de chaleur)

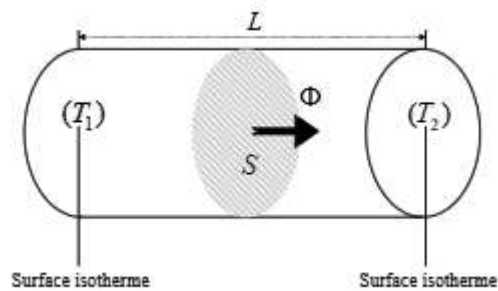
Le cas de obtenus.

Dans une charge de brassagions de la métallurgie sous la domaine MHD et le même principe des pompes MHD (ne pas posséder de partie mobile). Mais ils entraînent l'élimination de bulles de saletés et aussi mélange (par turbulence) lors de réactions métallurgiques e électromagnétisme est comme les pompes électromagnétique selon les applicat (fabrication d'alliages).pour le but d'une amélioration importante de la finesse de grain des produits conductivité thermique λ et de capacité calorifique C_p Les modes de transfert de chaleur comme les pompes MHD il y'a trois mécanismes de transfert de chaleur par conduction et convection et rayonnement .[9]

I-5-1 Transfert de chaleur par conduction

C'est un mode de transfert de chaleur entre deux points d'un solide ou d'un liquide. dans notre étude il y'a un transfert entre les électrodes et le bareau de fer Pour illustrer ce

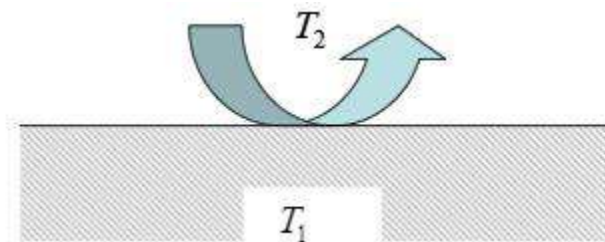
phénomène de transfert de chaleur, prenons l'exemple de la Figure I.11 d'un barreau soumis à deux températures T_1 et T_2 à ses extrémités. [9]



Figure(I-11) la conduction de chaleur d'un barreau

I-5-2 Transfert de chaleur par convection

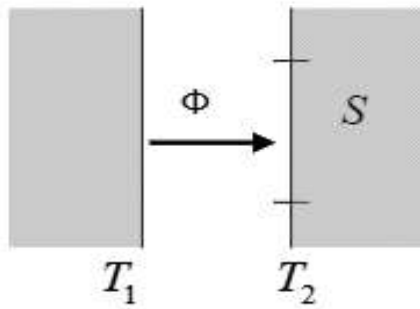
C'est le mode de transfert de chaleur dans un fluide en mouvement. Du point de vue ingénierie, le principale problème réside dans le calcul de la puissance thermique qui peut être échangée entre le fluide en mouvement et la surface solide. La Figure (I.12) montre le schéma de principe de la convection entre un solide dont la température est T_1 et l'extérieur (fluide en mouvement) dont la température est T_2 . [9]



Figure(I-12) Le principe de la convection

I-5-3 Transfert de chaleur par rayonnement

Tous les corps solides, liquides ou gaz Eux émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne ,il s'agit donc d'un flux de chaleur émis par le corps considéré. En conséquence, contrairement à la convection et à la conduction, le transfert d'énergie par rayonnement ne nécessite pas obligatoirement la présence d'un milieu matériel. Dans le cas des transferts thermiques, le rayonnement consiste en un échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent comme montre la Figure (I-13) défini l'opération du transfert de chaleur par le rayonnement . [9]



Figure(I-13) le principe du transfert de chaleur par rayonnement

I-6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le mécanique des fluides et le phénomène hydrodynamique (mécanique des liquides)ainsi lespropriétés générale des liquides(métaux liquides,l'eau...etc)comme (viscosité,masse volumique , conductivité) Le phénomène hydrodynamique est une partie de la magnétohydrodynamique (MHD), MHD est domaine de l'interaction des phénomène magnétique et le dynamique des fluides (hydrodynamique) qui est l'objet de chapitre 2 ..

Chapitre II :
Généralité et Formulation
mathématique des phénomènes
Hydrodynamique- thermique dans
la pompe MHD à conduction

II-1 Introduction

Le domaine MHD est un domaine de physique vaste car on trouve dans la nature et dans l'industrie comme les phénomènes naturelle la forme MHD ou la magnétohydrodynamique couplé en deux partie la magnétique et l'hydrodynamique donc on peut définir par c'est l'interaction entre les champs magnétique et les fluides conducteurs d'électricité.

Le pompage MHD est la plus connu dans les 20^{XXI}es premiers exigences du domaine MHD sont des pompes MHD pour le refroidissement des réacteurs nucléaire et la propulsion navale et après la génération d'électricité.

On a besoin de connaitre les propriétés des métaux liquides pour atteindre le but souhaité (refroidir,brasser..) et aussi les phénomènes résultent (électromagnétique, la chaleur, dynamique du fluide) de ce processus (pompage MHD) et pour étudier ces phénomène ou le couplage magnétique hydrodynamique et thermique on a obligé de connaitre les quelque généralités sur la phénomène hydrodynamique et la phénomène thermique.

L'intérêt de ce chapitre est de présenté les pompes MHD ainsi la traduction mathématique des phénomènes thermique et hydrodynamique dans la pompe MHD à conduction.

II-2 Les pompes magnétohydrodynamique (MHD)

Le pompage électromagnétique est une procédure de génération de pression dans les circuits des fluides électro conducteurs au moyen de dispositifs appelés pompes électromagnétiques (PEM). Les PEM sont de types constructifs différents et de tailles différentes, mais tous sont basés sur le principe de la génération de force électromagnétique en raison de l'interaction densité de courant et densité de flux magnétique dans le canal de pompage. Le pompage électromagnétique fait à partie de la discipline MHD. Avant d'approfondir l'étude du pompage électromagnétique, quelques informations générales sur le MHD sont données.[1]

II-2-1 La Magnétohydrodynamique MHD

La magnétohydrodynamique (MHD) est un domaine de la physique de la Terre et de l'astrophysique [1] partant il existe trois types de champs magnétiques naturelle, le champ magnétique terrestre maintenu par un mouvement de fluide dans le noyau terrestre, un champ magnétique solaire, qui génère des taches solaires et des éruptions solaires et un champ galactique qui influent.

Chapitre II :Généralité et Formulation mathématique des phénomènes Hydrodynamique- thermique dans la pompe MHD à conduction

Les premières expériences sur les effets du champ magnétique sur les systèmes électrochimiques remontent à plus d'un siècle et ont été attribuées à M. Faraday. Cependant, le développement du MHD en tant que discipline scientifique indépendante a commencé dans la première moitié du 20e siècle lorsque les astrophysiciens ont réalisé à quel point les champs magnétiques et les plasmas étaient omniprésents dans tout l'univers. En 1940, Hannes Alfvén a formulé les grands principes du MHD, et en 1970 a reçu le prix Nobel pour son travail de pionnier dans le MHD. Des scientifiques de plusieurs domaines s'intéressent au MHD, notamment pour la physique des plasmas, la géophysique ou l'ingénierie des écoulements de métaux liquides.[2]

Le principe de phénomène MHD est un fluide conducteur est en mouvement dans un champ magnétique \mathbf{B}_0 , il crée alors par l'intermédiaire de la loi d'Ohm un courant électrique \mathbf{J} induit. Ces courants induits génèrent à leur tour un champ induit qui modifie le champ magnétique initial \mathbf{B} induit. On voit ici comment l'hydrodynamique va modifier le champ électromagnétique.

— Par ailleurs la force de Laplace ($d\mathbf{F} = \mathbf{J}_{\text{induit}} \times \mathbf{B}_0$) va agir sur le fluide pour s'opposer au mouvement initial. On voit ici comment les champs électromagnétiques vont modifier l'hydrodynamique.[3] Figure (II-1) représente le principe de la phénomène MHD selon l'axe $yOxz$.

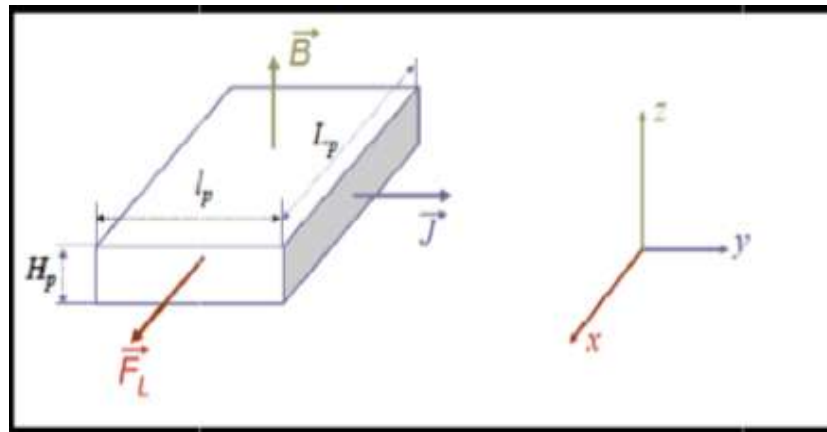


Figure (II-1) Le principe de la phénomènes MHD

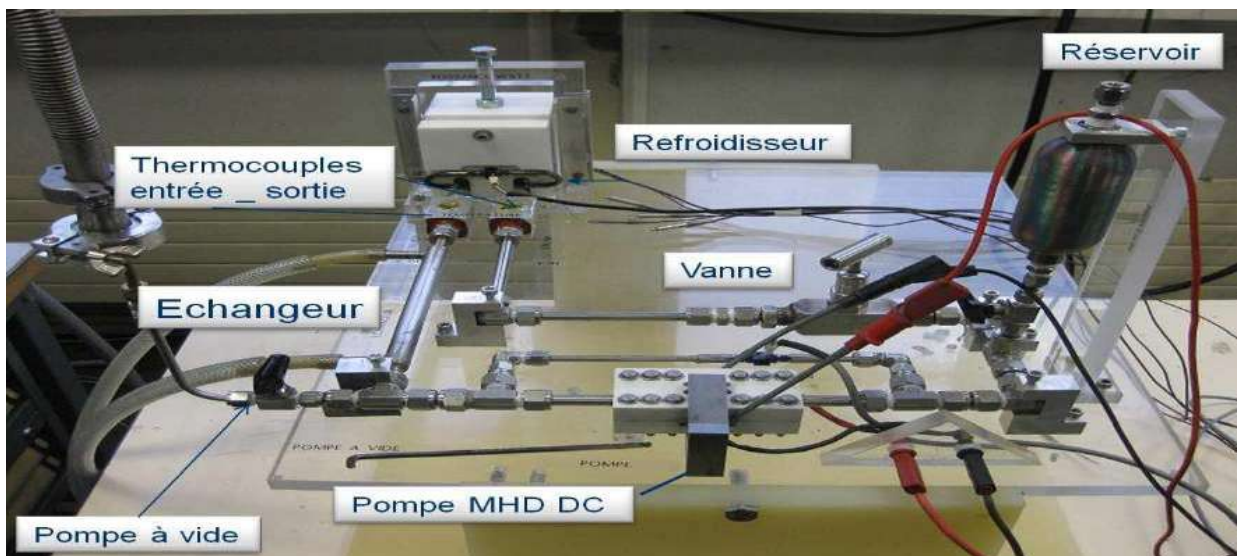
II-2-1-1 Les applications industrielles de la MHD

Chapitre II :Généralité et Formulation mathématique des phénomènes Hydrodynamique- thermique dans la pompe MHD à conduction

Le champ magnétique qui a été créé par l'homme couramment utilisés dans l'industrie pour chauffer, pomper, remuer et léviter les métaux liquides. Les applications industrielles du MHD sont généralement liées aux pompes électromagnétiques, aux agitateurs électromagnétiques, aux générateurs MHD, à la propulsion MHD et aux débitmètres électromagnétiques. Les fluides électro conducteurs qui font généralement l'objet du MHD industriel sont: les métaux ou alliages fondus et les plasmas. Certains des métaux appropriés sont: le mercure, le gallium, le bismuth, l'étain, le plomb, l'aluminium, le sodium, le potassium, les alliages sodium-potassium. Les plasmas sont des fluides obtenus par ionisation des gaz à des températures de 2000 à 3000 K. Le MHD du plasma développé dans l'industrie en relation avec la génération d'énergie électrique par conversion MHD. La conversion MHD est la technologie par laquelle l'énergie électrique est directement produite à partir de l'énergie cinétique d'un fluide électro conducteur à haute température se déplaçant dans un champ électromagnétique.[3]

II-2-2 Les pompes MHD

Un prototype de pompe MHD a été construit en 1907, l'une des inventions les plus utiles de la collaboration Einstein – Szilard a été la pompe électromagnétique pour la circulation des métaux liquides comme réfrigérants, Plus tard dans les années 1950 ces pompes a été utilisée dans l'industrie nucléaire pour le refroidissement des réacteurs surgénérateurs expérimentaux. Sont utilisés les mécanismes de pompage dans lesquels un champ électromagnétique interagit directement avec le fluide de travail pour produire une pression et un écoulement.[3]. la Fig (I-2) représente un exemple expérimentale de un système du refroidissement à l'aide d'une pompe MHD à conduction DC .



Figure(II-2) Un exemple expérimental du système de refroidissement

II-2-2-1 Le principe physique du pompage MHD

Le principe de l'opération de pompage sous domaine MHD , appliquer une induction B et de courant électrique I et le l'interaction entre les dernier résulte la force de laplace F qui entraine la circulation de fluide .Fig (I-3) représente le principe basique de fonctionnement des pompes MHD.

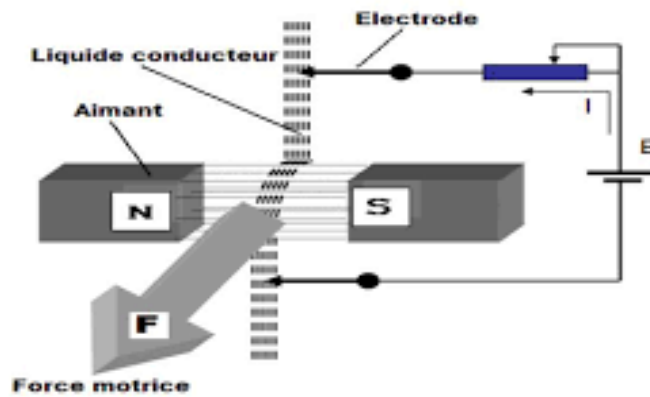


Figure (II-3) le principe de fonctionnement la pompe MHD

II-2-3 Les applications des pompes MHD

L'une des applications les plus importantes est le pompage de matériaux (liquides, gaz ionisé plasmas) il sont difficiles à pomper à l'aide de pompes conventionnelles. Dans ce travail, les progrès réalisés dans ce domaine sont recensés et organisés selon le type de candidature. Les propulseurs à eau de mer MHD sont prometteurs pour une variété d'applications nécessitant des débits et des vitesses élevés. La pompe à métal fondu MHD est un remplacement important des pompes conventionnelles parce que leurs pièces mobiles ne peuvent pas supporter la température du métal fondu. La pompe à sel fondu MHD est utilisée pour les réfrigérants des réacteurs nucléaires en raison de sa fonction sans pièces mobiles. Le pompage MHD Nanofluide est une technologie prometteuse en particulier pour les bio applications. Les avantages du MHD incluent le silence dû à la propulsion sans pièces mobiles.[4]

II-2-4 Classification des pompes MHD

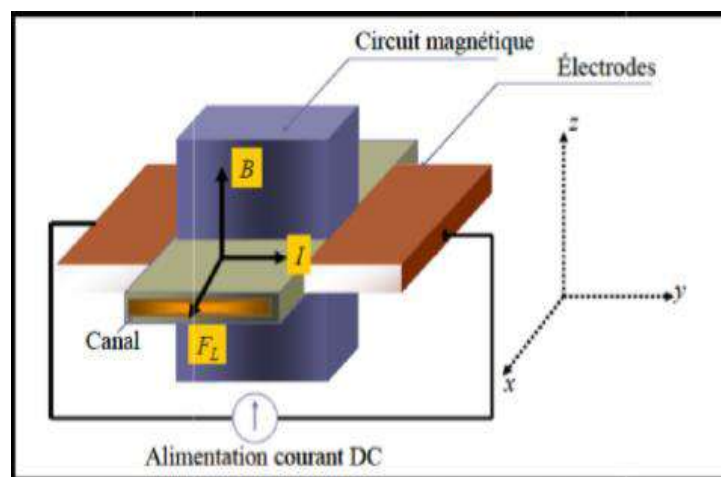
Les principales classifications des pompes électromagnétiques peuvent être faites en fonction du principe de fonctionnement et de la forme.

Selon le mode de génération, la densité de courant J dans le canal de pompage des pompes électromagnétiques est de

- ✚ Pompes MHD à conduction
- ✚ Pompes MHD à induction

II-2-4-1 Les pompes MHD à conduction

Les pompes à conduction (également connu sous le nom de pompes Faraday) sont construites avec des canaux rectangulaires en raison de la facilité avec laquelle les directions de la densité de flux magnétique et des vecteurs de densité de courant peuvent être corrélées avec la géométrie du canal, ainsi la force de pompage pour aboutir dans la direction souhaitée, comme sur la Fig(I.4). L'imposition de la direction de densité de courant I_y se fait en plaçant deux électrodes des deux côtés de la pompe parallèlement au plan xOz , Fig(II.4). Les électrodes sont en contact électrique avec le fluide électro conducteur et connectées à une alimentation en tension de type DC ou AC. Courant continu pour les pompes MHD à conduction et courant alternatif pour les pompes MHD à induction. L'amplitude du courant circulant entre les deux électrodes dépend de la tension d'alimentation et de la conductivité électrique du fluide.



Figure(II-4) : Un schéma du pompe MHD à conduction

A partir de la figure (II-4) les pompes MHD en générale constituent:

- ◆ **Les électrodes** : le contact direct avec le fluide permet de transporter le courant électrique au milieu d'étude .
- ◆ **Le circuit magnétique** : le canalisation des champs par l'interaction de circuit magnétique avec le courant induit

Et pour avoir un bon rendement il doit être choisi parmi des critères importants des circuits magnétiques :

- ✓ Une faible réluctance pour réduire les pertes et les fuites
- ✓ Une bonne résistivité des matériaux
- ✓ Un cycle d'hystérésis importante pour limiter les pertes.
- ✓ Un bon coefficient de perméabilité du matériau pour minimiser le courant de foucault
- ◆ **Le canal** : l'écoulement de fluide avec une vitesse V .
- ◆ **Le fluide** : le milieu d'étude ou le métal liquide qui porte une bonne conductivité

Les pompes hydrodynamiques magnétiques à conduction sont destinées au transport de métaux liquides non ferreux et d'alliages légers (aluminium, magnésium, plumbum, natrium et autres) ainsi qu'au contrôle de l'approvisionnement en métaux liquides des fours et au maintien de leur température appropriée via la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et thermique.

L'utilisation de pompes MHD à conduction pour le transport et le dosage des métaux en fusion aide à fournir les éléments suivants:

- Réduction significative de la perte de métal fondu en raison de l'absence de contact direct du métal avec l'environnement extérieur et de la livraison des parties métalliques puristes sous une surface de fusion.
- Du fait qu'il n'y a pas de pièces mobiles, l'agitation de tout le volume de métal fondu du bain n'est pas générée, ce qui entraîne une réduction de la contamination du métal en fusion par des gaz dangereux et des crasses.
- Automatisation du processus de production des lingots via un contrôle précis du dosage du métal en fusion à partir d'une pompe MHD.
- Réduction des émissions dangereuses dans l'environnement [4]

II-2-4-2 Classification des pompes MHD à conduction

On doit être classifié les pompes MHD à conduction selon la densité du courant J qui traversant le canal par des pompe MHD à conduction à courant continu DC et des pompe MHD à conduction à courant alternatif AC .Figures (I,5) donne une étude préliminaire de ces pompes et leur différence de la forme et de la construction. Figure (I,4) à gauche pompe MHD à conduction DC mono zone et à droite un pompe MHD à conduction AC double zone

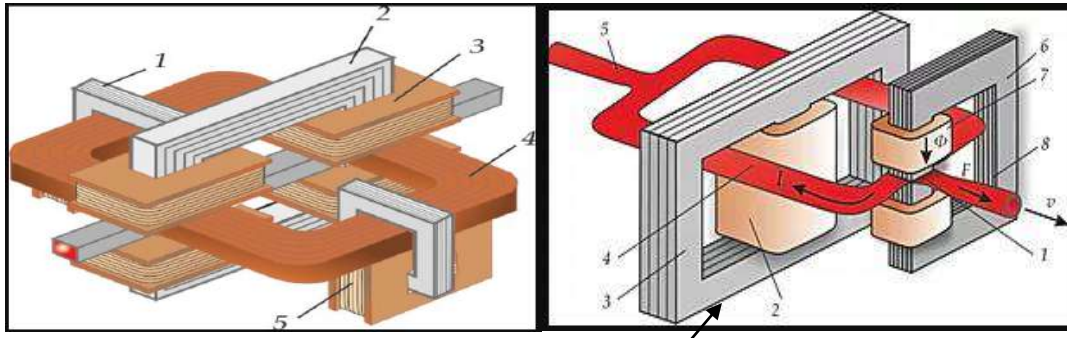


Figure (II-4) :Pompe MHD à conduction monozone (DC) double zone(AC)

II-2-5 Les pompes à Induction

Un autre critère de classification de la pompe électromagnétique est la forme de la section transversale du canal. Outre les canaux rectangulaires, il existe des canaux cylindriques et annulaires. Les pompes cylindriques et annulaires sont de type à induction, donc avec alimentation AC et la particularité est que les bobines de champ sont à la fois la source de densité de courant et de champ magnétique. Dans la littérature scientifique, les deux types de pompes sont appelé pompe à induction linéaire cylindrique (**PILC**) et pompe à induction linéaire annulaire (**PILA**). La configuration de la pompe à induction à canal rectangulaire est appelée pompe à induction linéaire plate (**PILP**).Figure (I-8) à gauche donne la configuration du pompe MHD à induction annulaire et la configuration du pompe MHD à induction plate.

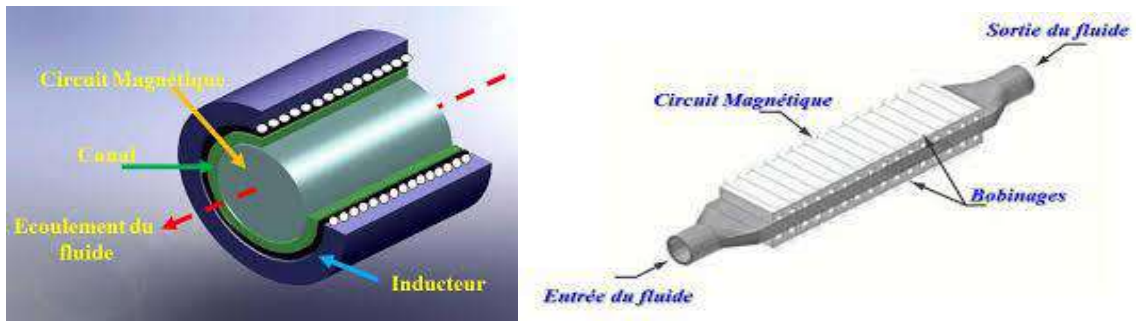


Figure (II-8) Un pompe MHD à induction annulaire(à gauche).un pompe MHD à induction configuration plate (à droite)

II-2-6 Les fluides conducteurs

Les liquides qui ont la résistivité électrique la plus basse et a un bon conductivité comme les métaux liquides (mercure déjà à température ambiante, sodium ou potassium fondus, eau de mer, galium). Sont des métaux liquides parfaites pour le pompage MHD à cause de ses avantages .et la plus utilisés dans (les générateur d'électricité MHD ,pompage pour refroidissement des réacteurs nucléaire).

Tableau(II-2) : les fluides plus utilisées

Fluides	Conductivité σ [S/m]
Eau de mer	4 à 10
Mercure	$1.66 \cdot 10^6$
Galium	$3.3 \cdot 10^6$
Mélange de sodium et potassium	$2.7 \cdot 10^6$

II.3 Etude mathématique

II-3-1 Equations de conservation dans un fluide incompressible

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent de nombreux phénomènes d'écoulement de fluide. La présence d'un champ magnétique au sein d'un conducteur parcouru par des courants, entraine

l'existence d'une force de Lorentz qui doit être prise en compte dans l'équation de Navier-Stokes .

✓ Equation de Navier Stokes :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{grad} P + \nu \Delta \vec{V} + \vec{F} \quad (\text{II.1})$$

✓ Equation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{II.2})$$

Dans le cas des fluides incompressibles, elle s'écrit :

$$\text{div} \vec{V} = 0 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

\vec{V} : La vitesse du fluide (m/s)

P : La pression du fluide (Pa)

ν : La viscosité cinématique du fluide (m²/s)

\vec{F} : La force électromagnétique par unité de volume (N/m³)

ρ : La densité du fluide (kg/m³)

$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$: l'accélération du fluide due à la variation de la vitesse

$-\frac{1}{\rho} \overrightarrow{grad} P$:représente le terme de pression par unité de volume

$\nu \Delta \vec{V}$: représente les forces de frottement visqueux.

II-3-2 Equations générale de Maxwell

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell celle-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques électriques unifiant ainsi tous les principes de l'électromagnétisme.

Les équations de Maxwell représentent la base de l'électromagnétisme : c'est-à-dire que ces équations permettent de décrire les évolutions spatio-temporelles du champ électrique et du champ magnétique ces équations locales relient le champ électrique \mathbf{E} et le champ magnétique \mathbf{H} à leurs sources : densité de charge σ et densité de courant électrique \mathbf{J} .

$$\text{Div}\vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

✓ **Equation de Maxwell – Faraday :**

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

✓ **Equation de Maxwell-Ampère**

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

Le terme $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$ dans (II.6) exprime la densité de courant de déplacement, ces quatre équations locales expriment les relations entre divers champs en tout point de l'espace et à chaque instant.

Sous forme intégrale , elles peuvent être décrites comme suit l'équation s'écrit dans ce cas :

$$\int_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (\text{II.7})$$

Où que la charge totale contenue dans un volume délimité par la surface **S**.

La relation de Faraday devient :

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = - \iint \frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{dS} \quad (\text{II.8})$$

L'équation (II.8) pour laquelle le flux est conservatif est donnée par :

$$\oint_S^0 \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0 \quad (\text{II.9})$$

La dernière équation (II.9) est donnée par :

$$\oint_C^0 \vec{H} \cdot \vec{dl} = I \quad (\text{II.10})$$

Où I est le courant continu à l'intérieur du contour fermé **C**

II-3.3. Problème thermique

Le transfert d'énergie aura lieu à chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieure d'un système. Ou lorsque deux systèmes à température différentes sont mis en contact .

Le transfert de chaleur reconnaît généralement trois modes de transmission de la chaleur .

Il s'agit des transmissions par conduction, par convection et par rayonnement. Ces modes de transfert de la chaleur peuvent être présentés dans un procédé d'une manière séparée, combinée deux à deux ou ensemble à la fois.

L'équation générale de propagation de la chaleur dans le cas d'un fluide, solide ou gaz s'écrit :

Chapitre II :Généralité et Formulation mathématique des phénomènes Hydrodynamique- thermique dans la pompe MHD à conduction

$$\rho_m C_p \frac{dT}{dt} + \frac{T}{\rho_m} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) P \frac{d\rho}{dt} = -Div(Q) + P_s + Q_r \quad (II.11)$$

C_p : chaleur spécifique à pression constante [$J/K^\circ \cdot Kg$]

T : Température [K°]

Q : sources des flux de conduction thermique [W/m^2]

P_s : terme source de chaleur correspondant , d'une part au travail des forces appliquées au fluide, d'autre part a la dissipation visqueuse [W/m^3]

Q_r : pertes radiatives [W/m^3]

Avec :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + V \overrightarrow{grad} T \quad (II.12)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + V \overrightarrow{grad} P \quad (II.13)$$

Si les vitesses sont suffisamment faibles pour considérer les termes de pression P comme négligeables ,on obtient l'équation classique en régime permanent.

$$\rho_m C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = -Div(Q) + P_s \quad (II.14)$$

Dans l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local,les transferts de chaleur par conduction peuvent etre exprimes à l'aide d'une conductivité thermique totale K.

$$Q = -K \overrightarrow{grad}(T) \quad (II.15)$$

Donc l'équation (II.15) devient :

$$\rho_m C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = Div \left(K \overrightarrow{grad}(T) \right) \quad (II.16)$$

Les phénomènes de surfaces sont pris en compte en explicitant aux interfaces les conditions aux limites ou de passage naturelles, soit sur la valeur de l'inconnue température, soit sur la valeur du flux thermique. Les conditions aux limites de cette équation sont les suivantes :

- ◆ Les conditions de Dirichlet dans son cas général :T connu la frotière.
- ◆ Les conditions de Neumann (homogène) dans son particulier :dans le cas ou il n'ya pas d'échange thermique avec l'extérieur notamment sur les axes de symétrie.

Le développement de l'équation de la chaleur en coordonnées cartésiennes donne :

$$Div \left(K \overrightarrow{grad}(T) \right) + P_s = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + P_s \quad (II.17)$$

Donc l'équation (II.57) devient :

$$\rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + P_s \quad (II.18)$$

II-4 Méthode de résolution

Les équations adimensionnelles régissant le transfert de chaleur par conduction dans plusieurs référence, pour résoudre les équations Fourier avec les équations des conditions de Dirichlet et les condition de Neumann sont résolues numériquement en utilisant la méthode des volumes finis et méthode des élément finis ou la méthode d'élément finis.

II-4-1 Méthode des différences finies (MDF)

La MDF est basée sur la discrétisation du domaine d'étude et le développement limité en séries de Taylor de la fonction à déterminer en chacun des nœuds du maillage.ainsi,l'équation différentielle est transformée en équations algébrique en chacun des nœuds.

L'écriture de cette transformation pour tous les nœuds du maillage conduit à un système algébrique dont a solution permet d'obtenir la distribution de l'inconnue dans le domaine d'étude cette méthode s'adapte mal aux objets de géométrie complexe à cause de la rigidité du maillage .d'autre part, la prise en compte des conditions de symétrie, de passage d'un milieu physique à un autre (fer,air,...etc)et des non linéarité (saturation) nécessite un traitement spécifique.

- **Avantages :** grande simplicité d'écriture et faible cout de calcul
- **Inconvénients :** limitation à des géométries simples,difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann.

II-4-2 Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée pour la résolution des équations différentielles dans le domaine des sciences des ingénieurs.le principe de la méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en régions élémentaire (élément finis) et à représente l'inconnue par une approximation polynomiale dans chacune de ces régions ensuite l'erreur due à l'approximation doit etre minimisée.la MEF est une méthode très puissante pour la résolution des équations différentielle surtout dans les géométries complexe.sa mise en œuvre par contre est assez compliquée et demande une place mémoire assez importante

- **Avantage :** traitement possible de géométrie complexes, nombreux résultats théorique sur la convergence
- **Inconvénient :** complexité de mise en œuvre et grand cout en temps de calcul et mémoire.

De nombreux codes de calculs de structure reposent sur les éléments finis :ANSYS,CADDS,CATIA.COMSOL

II-4-3 Méthode des volumes finis (MVF)

La MVF est une méthode de discrétisation. Elle est utilisée en particulier en mécanique des fluides ou elle est apparue il y a une vingtaine d'années, depuis cette méthode a connu un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie scientifique (l'électromagnétisme, hydrodynamique, le thermique, etc...).

L'analyse mathématique de la méthode des volumes finis a permis de développer récemment les principes fondamentaux qui en font une méthode de discrétisation performante. L'idée de base de la formulation des volumes finis est facile à comprendre et permet de donner l'interprétation physique des phénomènes

Le domaine de calcul est subdivisé en un nombre d'éléments finis.

Chaque élément contient quatre nœuds pour le cas bidimensionnel. Un volume fini entoure chaque nœud. L'équation différentielle est projetée sur une fonction de projection bien déterminée et ensuite elle est intégrée dans chacun des volumes élémentaires.

Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide

d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, puissance, exponentielle,

etc....) entre deux nœuds consécutifs. La forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'études.

L'équation discrétisée de cette façon exprime le principe de conservation pour l'inconnue dans l'élément de volume et la solution obtenue est constituée uniquement par les valeurs nodales.

Des méthodes itératives telles que la méthode de Gauss Siedel, Jacobi ou Newton-Raphson peuvent être appliquées pour la résolution du système d'équations. De nombreux codes de simulation numérique en mécanique des fluides reposent sur cette méthode : FLUENT, STARCD, CFX, ANSYS, ...etc.

- **Avantages** : permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque, détermination plus naturelle des conditions aux limites de type Neumann.
- **Inconvénient** : peu de résultats théoriques de convergence

II-4-4 Méthode des intégrales de frontières

Lorsqu'on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La MIF permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. Ainsi, le calcul des

valeurs de l'inconnue sur les fondrières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontière,la MIF utilise le théorème d'Ostrogradski-Green cette méthode peut être intéressante pour l'étude de structure 3D ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude.

Cependant,cette méthode a l'inconvénient de conduire à un système algébrique à matrice pleine (pas de terme nuls).ceci augmente le temps,done le cout de calcul.

II-5 Méthode de discrétisation

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener le résolution du système d'équations différentielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites a celle d'un système d'équations algébrique dont la solution conduit a la détermination des champs(électromagnétisme :potentiel vecteur magnétique,mécanique des fluides , vitesse,pression et thermique ,température...) figure (II-9) présente différences entre les trois méthodes numérique de la solution.

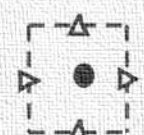
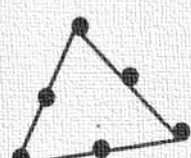

	VOLUMES FINIS	ELEMENTS FINIS	INTEGRALES DE FRONTIERE
éléments de base			
maillage	<i>curviligne orthogonal</i>	<i>quelconque</i>	<i>quelconque</i>
opérateur différentiel	<i>non-linéaire</i>	<i>non-linéaire</i>	<i>linéaire</i>
matrice	<i>bande</i>	<i>creuse</i>	<i>pleine</i>

Figure (II-9): Caractéristiques des principales méthodes numériques

II-6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des pompes magnétohydrodynamiques MHD et les formulations mathématique des phénomènes magnétohydrodynamique thermique ainsi les méthodes de discrétisations

Dans le cadre de notre travail la méthode numérique retenue est la méthode des éléments finis sous logiciel COMSOL .

Chapitre III :

Applications et résultats

III-1 Introduction

Après d'avoir les formulations mathématiques des phénomènes - hydrodynamique-thermique dans les pompes MHD et les différentes méthodes de résolution du problème électromagnétique -hydrodynamique-thermique, dans ce chapitre on a présenté les résultats obtenues par la simulation de ces phénomènes par rapport au temps dans un logiciel numérique COMSOL donc un réalisation du prototype virtuelle donne des caractéristique des pompes MHD à conduction.

III-2 Plat forme CAO

III-2-1 La définition de la CAO

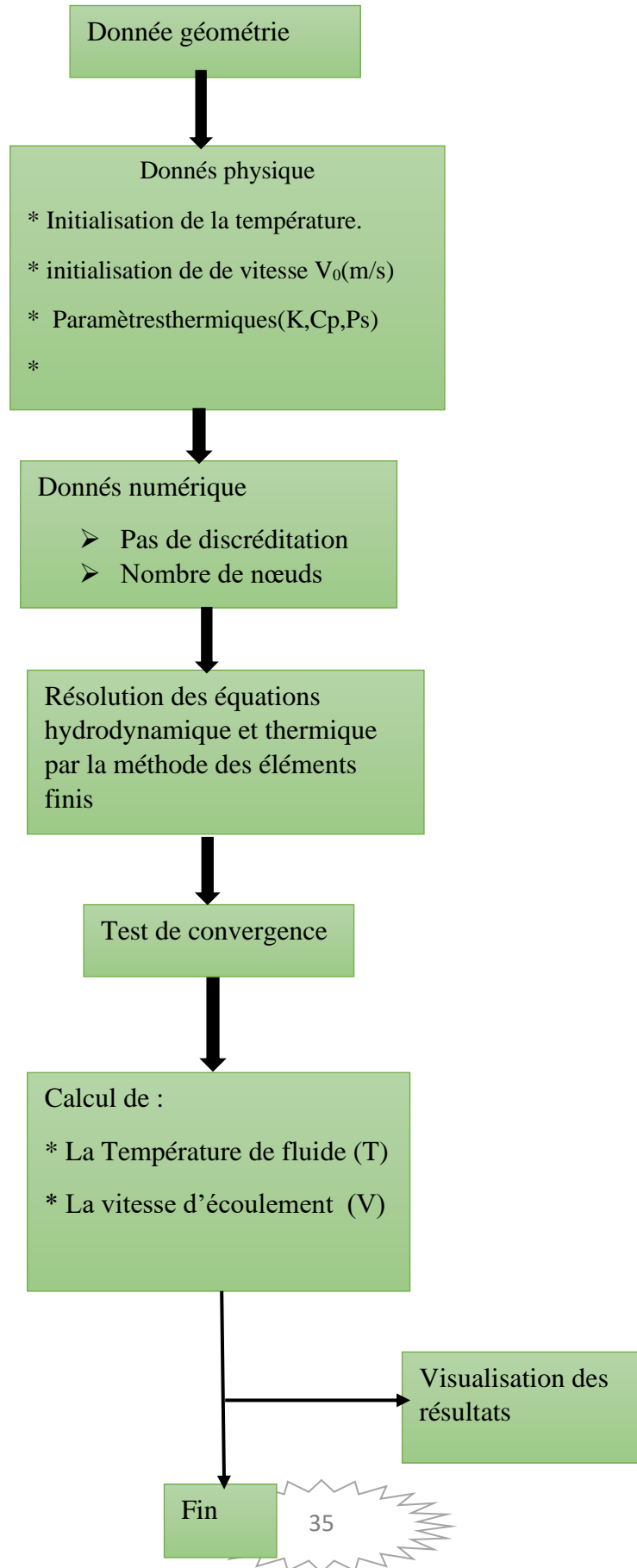
Comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique – et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.

On confond souvent CAO et DAO (dessin assisté par ordinateur) : la CAO n'a pas pour fonction première l'édition du dessin. Il s'agit d'un outil informatique souvent lié à un métier, fonctionnant en langage dit objet, et permettant l'organisation virtuelle de fonctions techniques. Cela permet ensuite la simulation de comportement de l'objet conçu, l'édition éventuelle d'un plan ou d'un schéma étant automatique et accessoire. En DAO, un trait est un trait et le logiciel ne permet pas l'interprétation technique de l'ensemble.

III-2-2 Logiciel COMSOL :

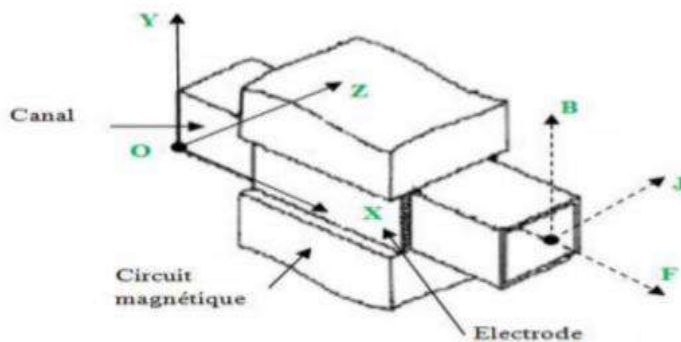
COMSOL Multiphysics est un multi-plateforme éléments finis analyse, solveur et multiphysique logiciel de simulation . Il permet d' interfaces utilisateur classiques basés sur la physique et des systèmes couplés des équations aux dérivées partielles (PDE). COMSOL fournit un flux de travail et IDE unifié électriques, mécaniques, de fluide, et des applications chimiques. Une API pour Java et LiveLink pour MATLAB® peut être utilisé pour contrôler le logiciel externe, et la même API est également utilisée par l'éditeur de méthode.

III-2-3 L'algorithme de l'étude hydrodynamique – Thermique



III-3 Description générale de la pompe MHD à courant continu à conduction

Les pompes magnétohydrodynamiques linéaires à conduction sont constituées d'un canal dans lequel s'écoule un fluide électriquement conducteur à la vitesse V . Le fluide traverse un champ magnétique B qui induit un courant J injecté par des électrodes en contact direct avec le fluide. Le fluide est freiné par la force F . Le schéma du système est représenté ci-dessous.



Figure(III-1) schéma d'un pompe MHD à conduction

Région	Matériaux	Propriétés
canal	Mercure	$\sigma = 1.66 \times 10^6 [s/m]$
		$\mu_r = 1.55$
Circuit magnétique	Fer	$\mu_r = 1000$
Bobines	Cuivre	$\mu_r = 1$
Electrodes	Platine	$\mu_r = 1$

III-4 Mise en équations dans l'hypothèse bidimensionnelle :

Généralement, un dispositif électromagnétique (la pompe MHD) comporte plusieurs matériaux, dont certains ont des caractéristiques non linéaires. Par ailleurs, les phénomènes électromagnétiques varient fortement au sein de la structure et aussi on étudie le phénomène hydrodynamique à l'intérieur de la pompe comme la vitesse d'écoulement et la température en fonction du temps. C'est pourquoi, une analyse de la structure complète en

trois dimensions (3D) s'avère fastidieuse et couteuse en termes de temps de calcul. D'autre part, l'analyse à une dimension (1D) est peu représentative.

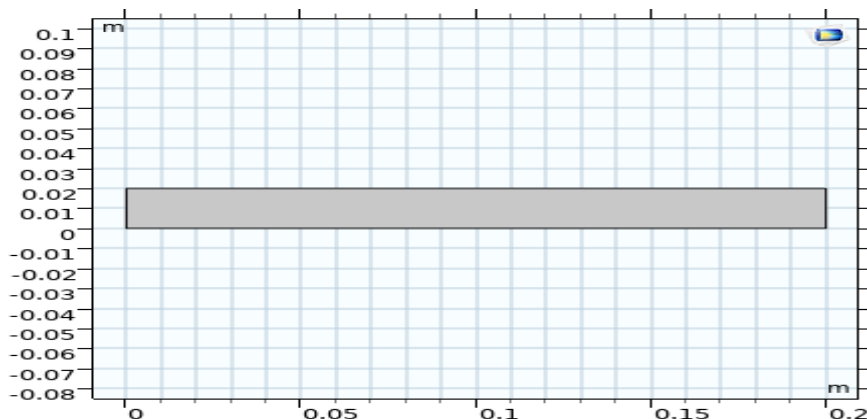
L'emploi des modèles 2D est particulièrement simple et efficace et son choix est réaliste.

III-5 La simulation sous le COMSOL

Lorsque l'on dit précédemment ,on utilise le COMSOL(programme mutiphysique) permet d'étude le couplage hydrodynamique thermique de pompes MHD à conduction ou l'écoulement (la vitesse V_s) avec le transfert de chaleur (la température T_s) dans le canal de matériaux.

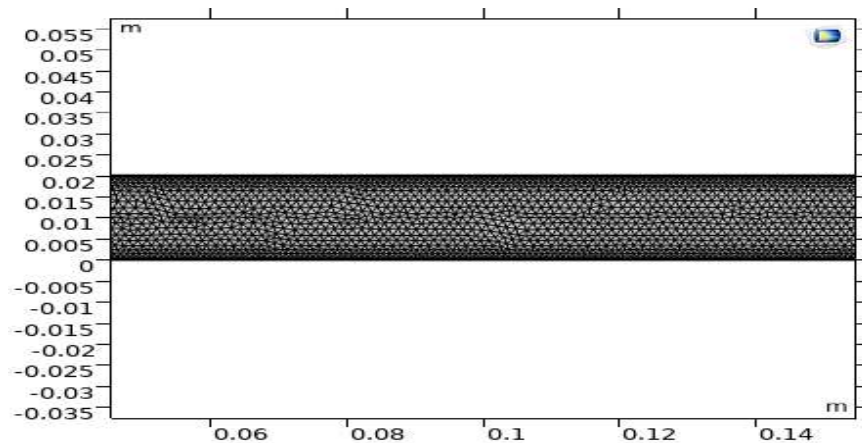
Commencer par démarrer *le ComsolMultiphysique 5.5*. Un nouveau projet s'ouvre automatiquement.

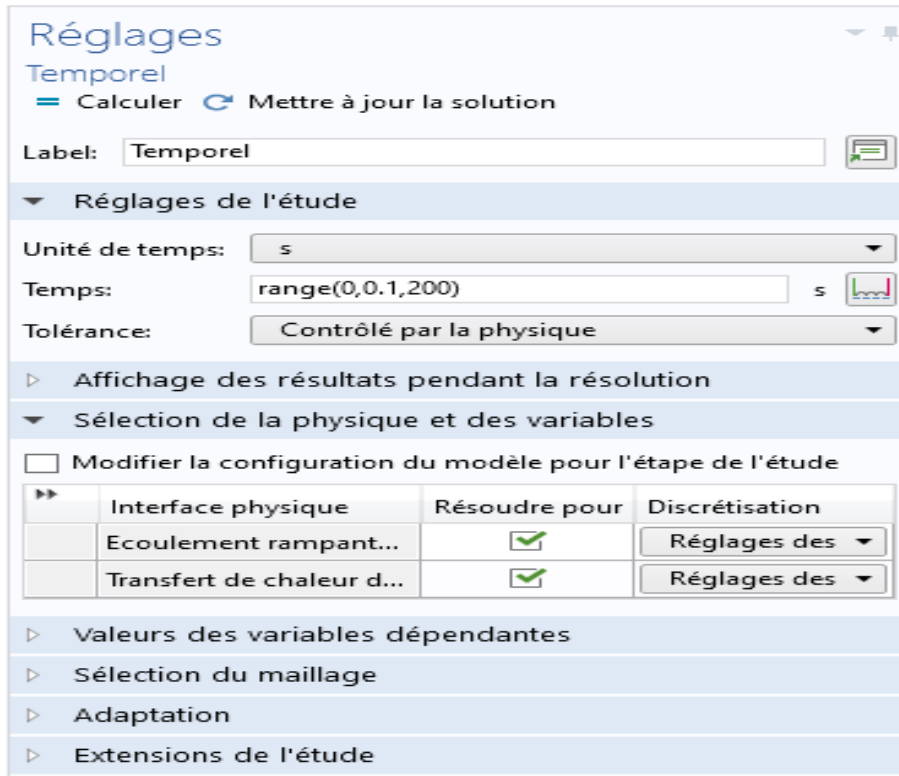
1. Après on doit choisir *Assistant de modélisation* pour faciliter l'opération doit sauvegarder dans un fichier sous forme *.mph*
2. On sélectionner la dimension d'espace 2D.
 - Sélectionné le modèle multiphysique ou la physique d'étude
 - Ecoulement fluide → Ecoulement monophasique → Ecoulement laminaire → Ajouter
 - Transfer de chaleur → Transfer de chaleur dans les fluides
 - Cliquer sur Etude
 - Après on choisit le domaine d'étude → Temporel → Terminé
 - La barre de modèle étudié ou le constructeur de modèle
 - Constructeur de modèle → définition globales → clique adroite → paramètres
 - Composent 1 → géométries 1 → clique adroite → Rectangle → construire tous les objets



Chapitre III : Applications et résultats

- Constructeur de modèle → Matériaux → clique adroite →Ajouter un matériaux à partir de la bibliothèque → rechercher mercure liquide → Ajouter au sélection.
- Constructeur de modèle » Matériaux mercury entré les propriétés de matériaux suivantes la colonne .
- Constructeur de modèle → Ecoulement laminaire → clique a droite → Entrée , condition limite⇒ Pression
- Constructeur de modèle → Ecoulement laminaire → clique a droite → sortie $U_0 = V_{in}$
- Constructeur de modèle → Transfer de chaleur dense des fluide →fluide 1 changé en champ de vitesse (spf)
- Constructeur de modèle → Transfer de chaleur dense des fluide → clique a droite → Température → $T_0 = T_{in}$
- Constructeur de modèle → Transfer de chaleur dense des fluide → clique adroite → Ecoulement sortant
Constructeur de modèle → Transfer de chaleur dense des fluide → clique adroite → source de chaleur, source générale Q_0
- Constructeur de modèle → Maillage1 → construire tous la séquence
- Constructeur de modèle → Etude → Temporel → calculé avec Temps=(0,0.1,200)





III.6. Résultats et discussions :

L'algorithme hydrodynamique et thermique développé pour la modélisation en 2D d'une pompe MHD à conduction sous l'environnement COMSOL. Les résultats de simulation de la pompe MHD à conduction, obtenus par COMSOL, sont représentés ci-dessous (géométrie, conditions aux limites de Dirichlet et le maillage correspondant, la température pour chaque liquide).

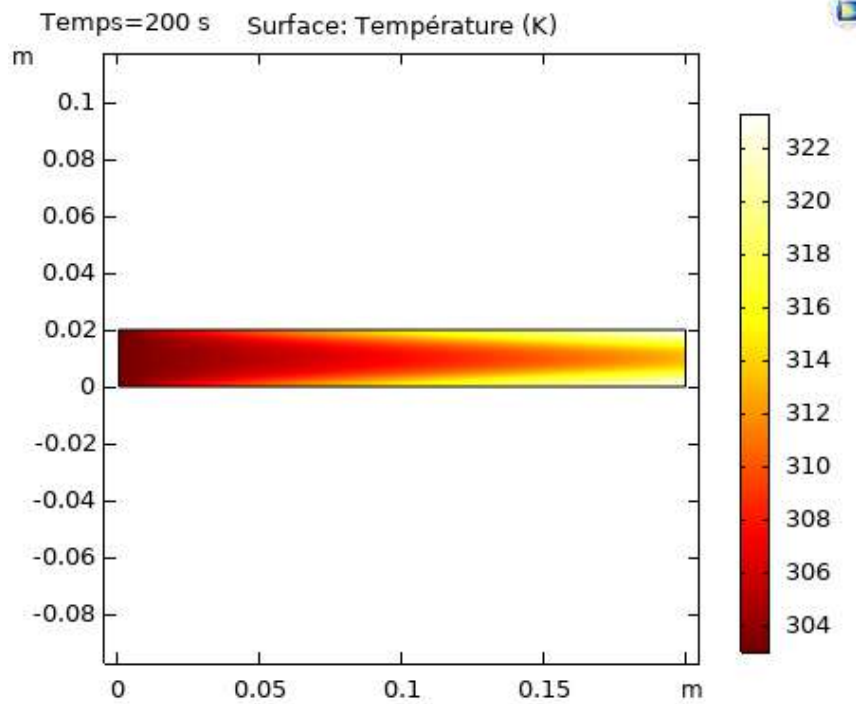


Figure (III.2) Température de surface dans la pompe MHD.

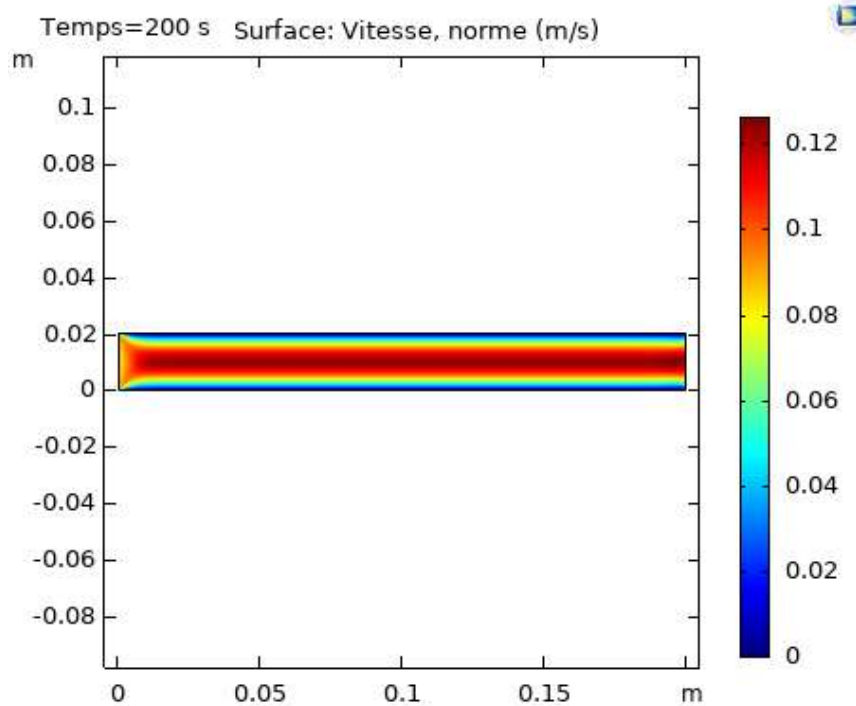


Figure (III.3) La vitesse de surface dans la pompe MHD.

III.6.2. Représentation de la température et la vitesse pour Mercure

Les Figure (III.4),(III.5) représente la variation de la température et la vitesse dans le canal de la pompe magnétohydrodynamique pour le liquide mercure. On remarque que la température passe par un régime transitoire puis elle se stabilise.

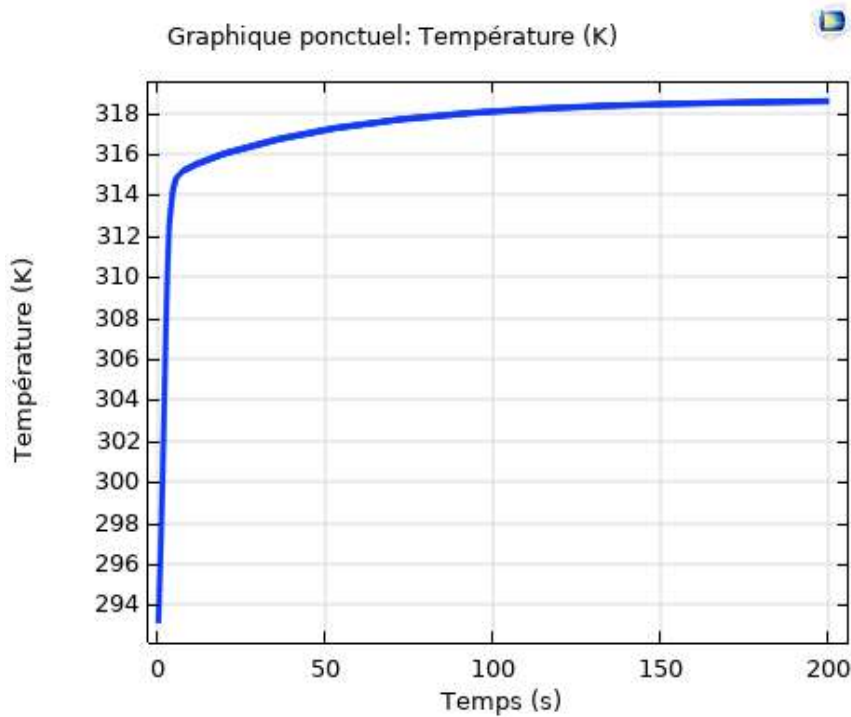
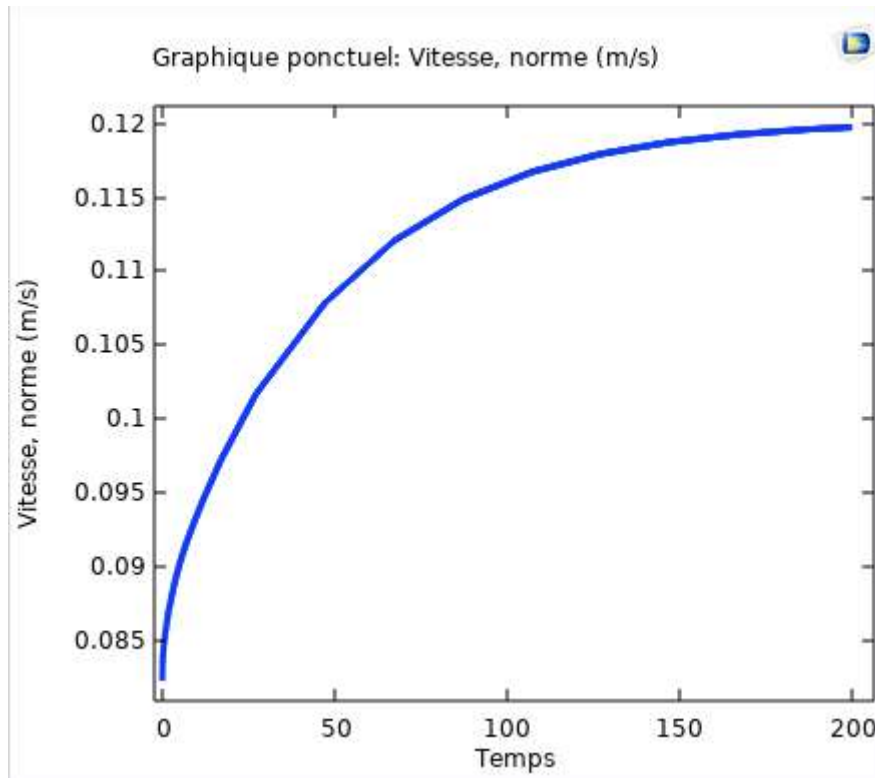


Figure (III-4) Variation de la température pour le mercure dans le canal en fonction de temps
Comme tous les machines la vitesse de pompe magnétohydrodynamique passe par un régime transitoire puis elle se stabilise



Figure(III-5) :Variation de la Vitesse dans le canal de la pompe

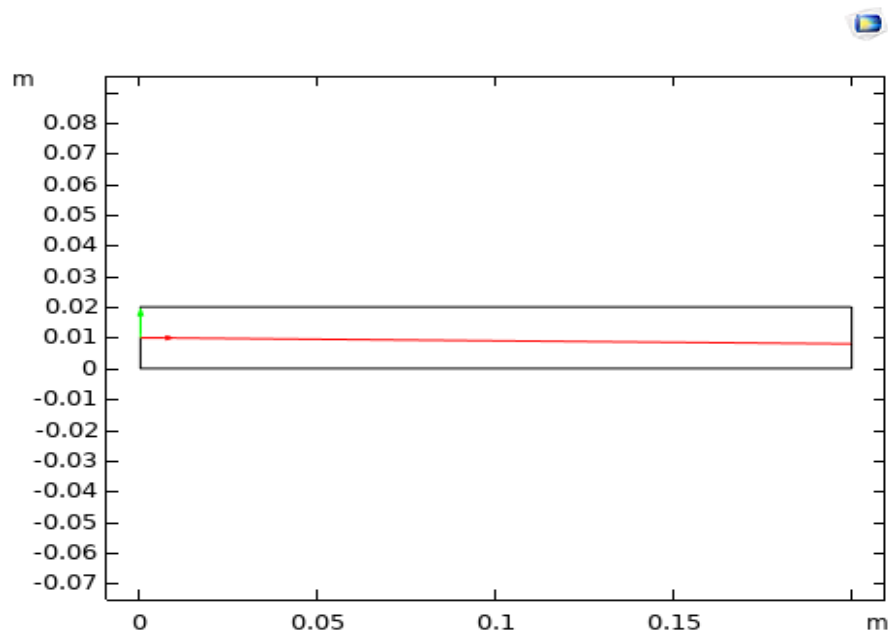
III-7 Le couplage hydrodynamique-thermique

Le couplage hydrodynamique thermique est d'étudier la vitesse d'écoulement en fonction de la température dans le canal de matériaux traité (mercure) pour connaître le fonctionnement de modèle simple d'un pompe MHD à conduction par un programme de simulation (COMSOL).

- *Constructeur de modèle* → *Résultats* → *jeu de données* → *cliquer a droite* → *ligne de coupe 2D* :
 $X_2 = 0.02$, $Y_2 = 0.08$

The screenshot shows the 'Constructeur de modèle' (Model Builder) on the left and the 'Réglages' (Settings) panel on the right. The 'Réglages' panel is titled 'Ligne de coupe 2D' and includes an 'Afficher' button. The 'Données' section shows 'Jeu de données' set to 'Etude 1/Solution 1 (sol1)'. The 'Données de la ligne' section shows 'Méthode de définition de la ligne' set to 'Deux points'. The coordinates for 'Point 1' are x: 0, y: 0 m, and for 'Point 2' are x: 0.08, y: 0.2 m. The 'Délimité par des points' checkbox is checked. The 'Avancé' section is partially visible at the bottom.

➤ Après Afficher



➤ Résultats → cliqué à droite → Groupe graphique en 1D

Chapitre III : Applications et résultats

The screenshot shows the 'Constructeur de modèle' (Model Builder) on the left and the 'Réglages' (Settings) panel on the right. The 'Réglages' panel is titled 'Groupe de graphiques 1D' and includes the following sections:

- Données**: Jeu de données: Ligne de coupe 2D 1; Sélection des instants: Tous.
- Réglages du graphique**: Légende de l'axe x: Température (K); Légende de l'axe y: Vitesse, norme (m/s); Deux axes y; Inverser les axes x et y.
- Axe**: Limites manuelles des axes; x minimum: 300.30683; x maximum: 326.00706; y minimum: -0.00459; y maximum: 0.12368; Conserver le rapport d'aspect.

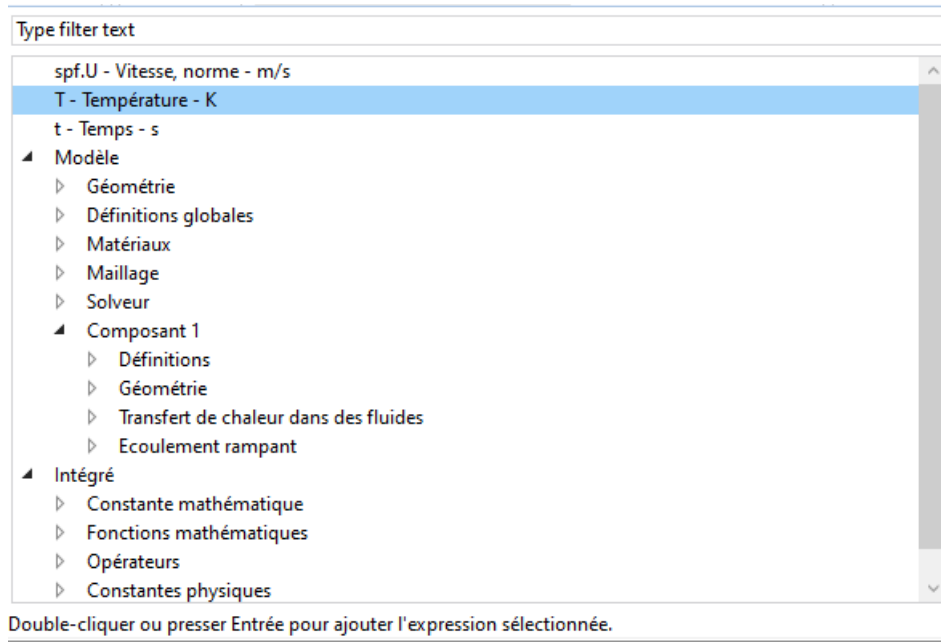
- Groupe graphique en 1D → cliquer à droite → graphique sur ligne

The screenshot shows the 'Constructeur de modèle' (Model Builder) on the left and the 'Réglages' (Settings) panel on the right. The 'Réglages' panel is titled 'Graphique sur ligne' and includes the following sections:

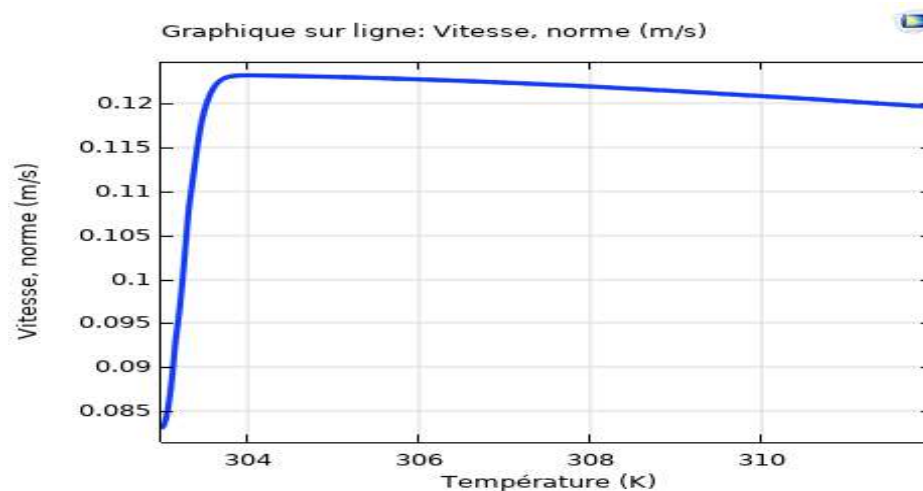
- Données**: Jeu de données: Ligne de coupe 2D 1; Sélection des instants: Dernier.
- Données des axes y**: Expression: spf.U; Unité: m/s; Description: Vitesse, norme.
- Données des axes x**: Valeur des paramètres: Expression; Expression: T; Unité: (empty).

A red circle highlights a small icon in the 'Données des axes x' section, which is used to change the dependent variable.

- Cliquer sur le cercle pour changer la variable dépendent



Après de cliquer sur afficher va simuler, et donné la résultat suivante :



Figure(III-6) Variation de vitesse d'écoulement en fonction de la température dans le canal de mercure. En remarque que la vitesse d'écoulement du fluide varie proportionnellement avec la température dans le canal de la pompe magnétohydrodynamique MHD à conduction.

III-8 Conclusion

Le présent chapitre est consacré à la présentation des différents résultats obtenus par l'application de la méthode des éléments finis au problème thermique et dynamique simulés par le logiciel COMSOL de la pompe MHD à conduction ainsi la variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la température a été également étudiée.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

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 peut trouver la MHD liée aux problèmes apparemment disjoints de la couronne solaire, de la magnétosphère, de la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, de la fusion thermonucléaire de la propulsion ou encore aux techniques industrielles de la métallurgie

Pour la modélisation du couplage phénomène hydrodynamique - thermique de la pompe MHD pour le fluide est abordée par une méthode numérique.

Le choix des méthodes utilisées s'est effectué en fonction des caractéristiques principales des phénomènes physiques.

Nous avons ainsi retenu la méthode des éléments finis sous COMSOL pour traiter les problèmes hydrodynamique - thermiques.

perspectives

Pour la continuité de ce travail, de nombreuses perspectives apparaissent. Nous espérons poursuivre cette étude par:

- l'utilisation d'autres techniques d'étude du problème hydrodynamique-thermique d'un pompe MHD à conduction par la méthode des volumes finis dans un autre programme de simulation (MATLAB, Livelink entre SOLIDWORK et le COMSOL...etc).
- Modélisation numérique en 3D
- Etude expérimentale d'un prototype

Bibliographie

- 1] YUNUS AÇENGEL JOHN M , Cimbalá «Méchanicsfluids :Applications and fondaments», 2006
- [2] SONIA NACEUR, « Contribution à La Modélisation Numérique D'une Pompe MHD En Tenant Compte De La Nature Des Matériaux Des Electrodes Et Du Fluide »,Thèse de MagisterL'Université de Batna, 2007.
- [3] POLAND.O.YONOBÁ. «Hydraulique de charge » Cours d'hydraulique et ingénierie hydraulicien .
- [4] SONIA NACEUR, «Contribution à la Modélisation 2D d'un Convertisseur Magnétohydrodynamique (MHD) à Conduction » Thèse de Doctorat, L'université de Batna,2015.
- [5] BERGOUG NASSIMA, «Contribution a la Modélisation Numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (mhd) annulaire a induction » .L'université de Batna, 2013
- [6] BOUALI KHEDIDJA« Contribution A L'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (mhd) » L'université Hadj Lakhdar Batna ,2015.
- [7] NADJI OTHMANE«Modélisation numérique par éléments finis des phénomènes thermiques de la pompe Magnétohydrodynamique (M H D)» thèse de magistère .Fella .L'université KasdiMerbah .Ouargla .2019
- [8]S.E. BELHENNICHE «Introduction d'hydrodynamique ».Cours et exercices Dynamique des fluides..
- [9] A.PETRENKO «Mécanique des fluides »..Cours
- [10] L. MADDAOUI «Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'Electronique de Puissance Basé sur la Mise en Mouvement d'un Fluide Conducteur Electrique », Thèse de Doctorat, L'université de Grenoble, Mars 2011.
- [11] CRISTIAN ROBERT ROMAN «Study of the electromagnetic pumping systems of molten metals and molten salts» THÈSE docorat de l'université de grenoble .2014
- [12] « Conception assisté par ordinateur ou le CAO » .
- [13] «Logiciel COMSOL».

Résumé :

L'objectif essentiel de ce travail, est étude de des phénomènes couplés hydrodynamique - thermique de la pompe MHD par la méthode des éléments finis sous logiciel de simulation COMSOL. la variation de la vitesse et la température ainsi la variation de la vitesse en fonction de la température dans le canal de la pompe MHD sont présentées.

Mots-clés: Hydrodynamique , Canal, fluide incompressible , Magnétohydrodynamique (MHD), Méthode des éléments finis (MEF), COMSOL.

Abstract :

The main objective of this work is the study of coupled hydrodynamic - thermal phenomena of the MHD pump by the finite element method under COMSOL simulation software. the variation of the speed and the temperature as well as the variation of the speed as a function of the temperature in the channel of the MHD pump are presented.

Keywords: Hydrodynamics, Channel, incompressible fluid, Magneto hydrodynamics (MHD), Finite element method (FEM), COMSOL.

ملخص :

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة ظواهر الهيدروديناميكية الحرارية بمضخة كهرومغناطيسية MHD بطريقة العناصر المنتهية وذلك باستخدام برنامج المحاكاة COMSOL

تم عرض التغير في درجة الحرارة و السرعة بالإضافة إلى دراسة التغير في السرعة بدلالة الحرارة في قناة المضخة

, طريقة العناصر المحدودة الكلمات المفتاحية: الديناميكا المائية ، القناة ، السوائل ، غير القابلة للضغط ، الديناميكا المائية المغناطيسية