

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 :

Bensacia Abderrahmane      Zinai Haidar

**Thème:**

# Etude des performances d'une Pompe magnétohydrodynamique à conduction par COMSOL

Soutenu publiquement

Le :07/07/2019

Devant le jury :

M <sup>me</sup> Belkebir Amel	MAA	Président	UKM Ouargla
M <sup>me</sup> Bouali Khadidja	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>me</sup> Naceur Sonia	MCA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2018/2019



## **REMERCIEMENTS**

*Nous remercions tout d'abord notre Dieu qui nous a donné la force et la puissance pour terminer ce modeste travail.*

*Tout nos vifs remerciements à notre promoteur :*

**M<sup>me</sup>Bouali khadidja**

*qui nous a guidé à réaliser ce travail, pour son suivi, ses conseils judicieux et sa disponibilité.*

*Aussi un spécial remerciement aux membres de jury et à tous les enseignants du département de génie électrique et Mécanique et à tous les enseignants de la faculté des sciences appliquées pour les efforts qu'ils ont fournis à tous les étudiants.*

*Nous profitons de l'occasion pour remercier aussi tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

**Zinai haidar Bensacia abderrahmane**



## DEDICACES

*Je dédie ce fruit de tant d'années d'études :*

*A ceux qui ont consacré toutes leurs vies  
pour la réussite de leurs enfants, mes  
chers parents.*

*A mes chers frères*

*A mes très chères sœurs.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes chers amis*

*A mon binôme qui a été très coopératif et  
compréhensif tout le long de la réalisation  
de ce travail.*

*Et A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

**Zinai haidar Bensacia abderrahmane**





# Sommaire

## Introduction Générale

1. Problématique.....	02
2.Objectif.....	03
3. structure du mémoire.....	03

## Chapitre 1 : Présentation Générale des convertisseurs

### Magnétohydrodynamique (MHD)

I.1 Introduction.....	05
I.2 Principe physique.....	05
I.3 Pompe MHD à conduction .....	06
I.3.1 Classification de la MHD à conduction.....	08
I.3.1.1 Pompes MHD à conduction à courant continu.....	08
I.3.1.2 Les pompes MHD à conduction à courant alternatif.....	09
I.4 Pompe MHD à induction.....	10
I.4.1 Principe physique.....	10
I.4.2 Classification de la MHD à induction.....	11
I.4.2.1 Pompes plates.....	11
I.4.2.2 Pompes annulaires.....	12
I.4.2.3 Pompes hélicoïdales.....	13
I.5 Comparaison entre les pompes à conduction et à induction.....	13
I.6 Applications des pompes magnétohydrodynamiques.....	14
I.6.1 Génération d'électricité.....	14

I.6.2 Propulseurs MHD .....	15
I.6.3 Générateurs à conduction.....	15
I.7 Avantages et inconvénients des pompes MHD.....	15
I.8 Conclusion.....	16

## **Chapitre 2 : formulation mathématique des phénomènes électromagnétiques**

II.1 Introduction .....	18
II.2 Equation de MAXWELL.....	18
a- Equation de MAXWELL-GAUSS.....	18
b-Equation de conservation du flux magnétique.....	18
c- équation de Maxwell-Faraday.....	18
II.3 Formulation du problème électromagnétique.....	20
II.3.1 Modèle Magnétodynamique.....	20
II.4 Méthodes de discrétisation.....	22
• Méthodes des différences finies (MDF).....	22
• Méthode des éléments finis (MEF).....	22
• Méthode des intégrales de frontières (MIF).....	22
• Méthode des volumes finis (MVF).....	22
II.5 Hypothèses simplificatrices.....	23
II.6 Formulation en coordonnées cylindriques axisymétriques .....	23
II.7 Méthodes numériques.....	24
II.7.1 Méthodes des différences finies.....	24
II.7.2 Méthodes des éléments finis.....	24

II.7.3 Méthodes des volumes finis.....	25
--	----

II.8 Conclusion.....	25
----------------------	----

### **Chapitre 3 : simulation et résultants par COMSOL 3.5**

III.1 Introduction.....	27
-------------------------	----

III.2 Description de la pompe MHD à conduction utilisée.....	27
--	----

III.3 Résultats de la simulation par COMSOL.....	28
--	----

III.3.1 Dimensions da la pompe à conduction.....	28
--	----

III.3.2 Paramètres utilisés.....	29
----------------------------------	----

III.4 Méthodologie de COMSOL.....	29
-----------------------------------	----

III.5 Résultats de simulation.....	29
------------------------------------	----

III.5.1 Présentation du Potentiel vecteur magnétique.....	31
---	----

III.5.2 Présentation d'induction magnétique.....	31
--	----

III.5.3 Présentation de la force électromagnétique.....	32
---	----

III.5.4 Présentation de la densité d'énergie.....	32
---	----

III.6 Etude de l'influence des fluides.....	33
---	----

III.7 Etude de l'influence de la position de l'électrode.....	34
---	----

III.8 Eude de l'influence du matériau de l'électrode.....	36
---	----

• Argent ( $63 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ ).....	36
---	----

• Platine ( $9,66 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ ).....	36
--	----

• Aluminium ( $37,7 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ ).....	36
--	----

III.9 Conclusion.....	37
-----------------------	----

### **Conclusion générale**

## ملخص

دراسة الظواهر الكهرومغناطيسية في مضخة التوصيل المغنطيسية الديناميكية مع النمذجة الرقمية في D2 تحت بيئة COMSOL. يتم تحديد ميزات مثل ناقلات المغناطيسية ، الحث المغناطيسي ، والقوة الكهرومغناطيسية COMSOL.

**الكلمات المفتاحية:** كهر وديناميكية , COMSOL (MEF),(MHD)

## Résumé

Une étude des phénomènes électromagnétiques dans une pompe magnétohydrodynamique à conduction avec une modélisation numérique en 2D sous environnement COMSOL. Des caractéristiques telles que le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, et la force électromagnétique sont déterminées COMSOL.

**Mots- clés :** magnétohydrodynamique (MHD) Electrode – Méthode des éléments finis – COMSOL .

## Abstract

A study of electromagnetic phenomena in a magnetohydrodynamic conduction pump with numerical modeling in 2D under COMSOL environment. Features such as magnetic vector potential, magnetic induction, and electromagnetic forces are determined COMSOL.

**Keywords:** Magnetohydrodynamics (MHD) Électrode - Finite Element Method - COMSOL.

## NOMENCLATURE

Symbole	Unité	Description
$\vec{A}$	[Tm]	Potentiel vecteur magnétique
$\vec{B}$	[T]	Induction magnétique
$\vec{U}$	[V/m]	Potentiel scalaire
$\vec{E}$	[V/m]	Champ électrique
$\vec{J}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Densité de courant total
$\vec{J}_{\text{ex}}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Densité de courant d'excitation
$\vec{J}_{\text{a}}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Densité de courant injecté par l'électrode
$\vec{J}_{\text{in}}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Densité de courant induit
$\vec{V}$	[m/s]	Vitesse d'écoulement du fluide
$\vec{D}$	[C/m]	l'induction électrique
$\rho$	[C/m <sup>3</sup> ]	densité volumique de la charge électrique
$\mu$	[H/m]	perméabilité magnétique
$\mu_0$	[H/m]	Perméabilité du vide, $4\pi \cdot 10^{-7}$
$\mu_r$	-	Perméabilité relative
$\sigma$	[S/m]	Conductivité électrique
$\varepsilon$	[F/m]	permittivité électrique
$F_L$	[N/m <sup>3</sup> ]	force de Laplace

Symbole	Definition
MHD	Magnétohydrodynamique
MDF	Méthodes des différences finies
MEF	Méthode des éléments finis
MIF	Méthode des intégrales de frontières
MVF	Méthode des volumes finis
MCC	Moteur à Courant Continu
AC	Courant alternatif
DC	Courant continu
2D	Bidimensionnel

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Les machines électriques rotatives ont occupé une grande place dans l'industrie depuis bien longtemps, mais ces dernières n'ont pas réglé tous les problèmes, comme ceux du transport ou du pompage des métaux liquides. Et à cause de l'accroissement de la demande d'électricité, de la hausse des prix du pétrole et des incidents survenus dans certaines centrales nucléaires, les chercheurs ont recours à d'autres technologies pour répondre à ces besoins telles que la magnétohydrodynamique, [1], [2].

La magnétohydrodynamique (MHD) 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. 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, [3].

Les pompes MHD sont conçues dans le but de n'avoir aucune partie mobile et sont ainsi exemptes de problèmes d'usure et de fatigue provoqués par la basse pression à travers les pièces mécaniques. Comparées à d'autres types de pompes non mécaniques, les pompes magnétohydrodynamiques montrent plusieurs avantages ; à savoir la simplicité de fabrication et des forces continues de pompage, [3].

L'utilisation des méthodes numériques (éléments finis, 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.

## 2. Objectif

Notre objectif c'est de faire une étude des phénomènes électromagnétiques dans une pompe magnétohydrodynamique à conduction avec une modélisation numérique en 2D sous environnement COMSOL. Des caractéristiques telles que le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, et la force électromagnétique sont déterminées.

## 3. structure du mémoire:

Le présent mémoire a été réparti en trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre, consiste en une présentation générale des convertisseurs Magnétohydrodynamiques (MHD) et leurs domaines applications.
- ✓ Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des phénomènes électromagnétiques. Il s'agit de développer un modèle en 2D.
- ✓ Le troisième chapitre est dédié à modélisation des phénomènes électromagnétiques utilisant le logiciel multi physiques COMSOL.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale et des perspectives envisages.

**Chapitre I:**  
**Présentation générale des convertisseurs  
magnétohydrodynamique (MHD)**

## I.1 Introduction

La magnétohydrodynamique (MHD) est un domaine vaste de la physique lié à l'interaction entre un champ magnétique et un fluide conducteur d'électricité. La notion de la conversion MHD remonte à l'époque de FARADAY qui en plaçant des électrodes dans une rivière d'eau, convenablement orientées par rapport au champ magnétique terrestre, recueillit un faible courant électrique induit [1 2 4].

La MHD a étendu son domaine à la métallurgie et d'autres dispositifs industriels (pompes électromagnétiques, propulsion) ; Les applications de la MHD sont très larges et dans des domaines très variées, tels que l'industrie métallurgique, le transport ou le pompage des métaux liquides en fusion, ces pompes ont l'avantage par rapport aux pompes mécaniques de n'avoir aucune pièce mobile et aucun contact avec le fluide puisque ce dernier est simplement connecté par un champ magnétique [1 2 3].

## I.2 Principe physique

Le principe général de fonctionnement des pompes électromagnétiques réside dans l'application d'une induction magnétique  $\mathbf{B}$  non colinéaire à un courant  $I$  traversant le fluide. Ceci donne naissance à une force de Laplace  $F_L$  qui entraîne la circulation du fluide conducteur dans le canal. La figure (I.1) présente le schéma classique et simplifié du principe de fonctionnement d'une pompe magnétohydrodynamique [6].

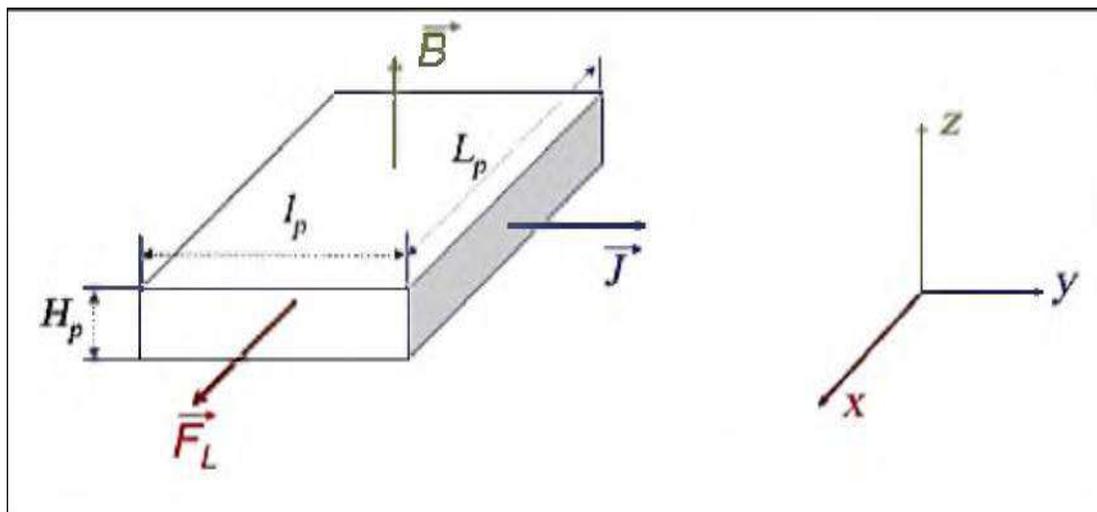


Figure I. 1 : Principe de fonctionnement d'une pompe MHD

Les pompes électromagnétiques peuvent différer par la nature du courant qui les alimente (continu ou alternatif), par la manière dont est créé le champ magnétique continu ou alternatif (aimant ou électro-aimant) et dont est produit le courant (induction ou conduction) [10].

Nous trouvons aujourd'hui deux catégories principales de pompes électromagnétiques, les pompes à conduction et les pompes à induction, Nous parlons de pompes à conduction lorsque le courant est injecté dans le canal de pompage par l'intermédiaire d'électrodes. Dans le cas des pompes à induction, le courant est induit à l'intérieur du canal de pompage par la présence d'un champ magnétique glissant [7].

### I.3 Pompe MHD à conduction

Le métal liquide passe dans l'entrefer d'un circuit magnétique où règne un champ perpendiculaire à la direction d'écoulement du fluide. Le courant est amené par des électrodes. Le courant peut être soit continu, soit alternatif [10].

Dans ce type de pompe, le courant électrique est fourni par une source extérieure et le champ magnétique est imposé. Une limitation essentielle est le manque d'adhérence du métal liquide sur les parois, ce qui augmente les pertes [7].

Les pompes magnétohydrodynamiques à conduction sont constituées d'un canal dans lequel s'écoule un fluide électriquement conducteur à la vitesse. La figure (I.2) représente le schéma d'une telle pompe. L'interaction entre l'induction magnétique  $B$  suivant l'axe  $y$  et le courant  $I$  injecté par les électrodes suivant l'axe  $z$  donne naissance à une force de Laplace suivant l'axe  $x$ .

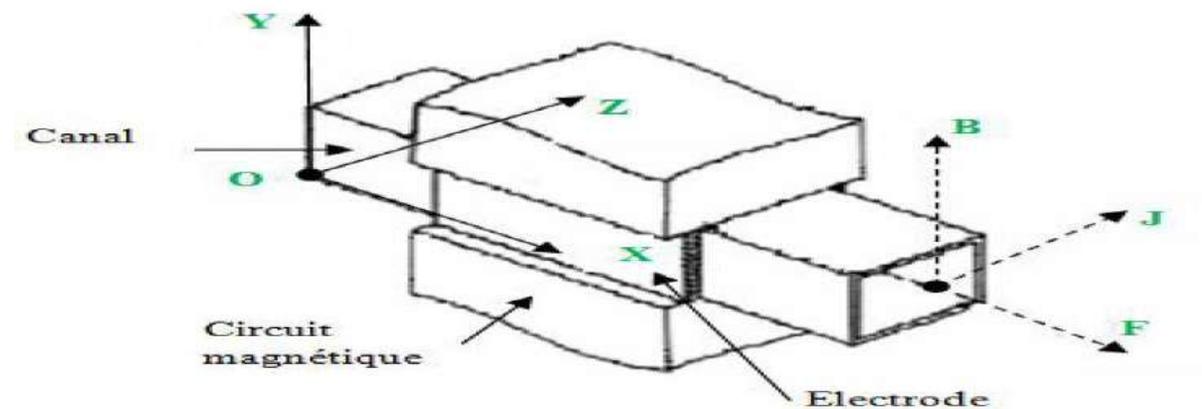


Figure. I.2 Schéma d'une machine MHD à Conduction.

Les différentes parties qui constituent la pompe magnétohydrodynamique à conduction sont :

✚ **le circuit magnétique:** il est destiné à créer et canaliser les lignes de champ magnétique dans le canal [9].

Pour qu'un circuit magnétique soit de bonne qualité il doit :

- Avoir une faible réluctance magnétique afin de réduire les pertes et de minimiser les fuites.
- Etre constitué de matériaux possédant de bonnes qualités magnétiques à savoir:
  - ❖ Un bon coefficient de perméabilité ;
  - ❖ Un cycle d'hystérésis étroit ;
  - ❖ Une bonne résistivité.

Ces qualités permettent de limiter les pertes par hystérésis et par courant de Foucault qui sont fonction de l'induction magnétique [6], [7]

✚ **Canal :** dans lequel s'écoule un fluide électriquement conducteur a la vitesse  $V$ .

✚ **Fluide conducteur:** c'est un métal liquide de très bonne conductivité électrique.

Parmi les fluides les plus utilisés dans ces pompes on trouve [4],[7]

Tableau I.1 1:Les fluides les plus utilisés

Elément	Conductivité électrique $\sigma$ [S/m]
Le mercure	$1.66 * 10^6$
Mélange de sodium et potassium (NaK (22 %Na,78%K)	$2.7 * 10^6$
Eau mer	4 à10
Gallium	$3.3 * 10^6$

❖ L'électrode : une électrode peut être définie comme une partie de circuit électrique en contact avec un milieu à conduction non métallique et qui participe souvent a l'effet désire, comme dans notre cas l'électrode en contact avec le fluide conducteur [8].

L'alimentation électrique généralement avec un fort courant et une basse tension

Il existe deux grandes familles de pompes à conduction :

- ❖ les pompes à conduction à courant continu (MHD DC)
- ❖ les pompes à conduction à courant alternatif (MHD AC) [4].

La différence entre ces deux types de pompes se situe au niveau de l'alimentation du bobinage qui peut être soit en courant continu soit en courant alternatif [8].

### I.3.1 Classification de la MHD à conduction

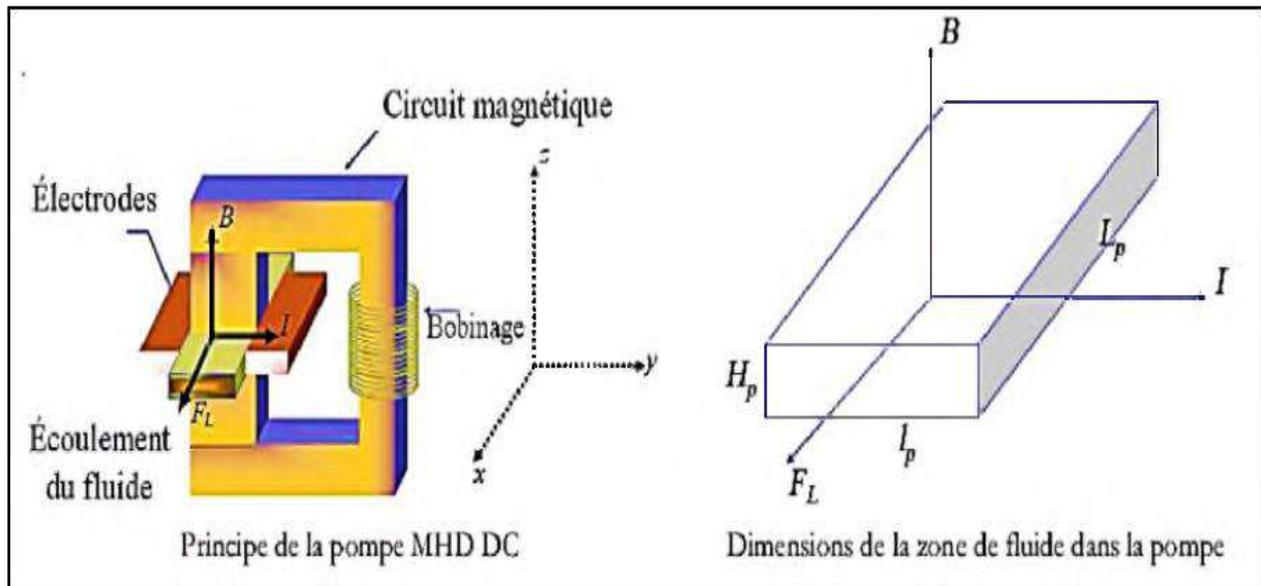
#### I.3.1.1 Pompes MHD à conduction à courant continu

La pompe magnétohydrodynamique à conduction à courant continu (MHD DC) est le modèle le plus simple. Les courants dans le canal et dans le bobinage inducteur (Un aimant permanent ou un électro-aimant créent le champ magnétique) sont continus. Pour créer le champ magnétique, on peut aussi utiliser un aimant permanent [4],[10].

Le circuit magnétique peut être refermé par un barreau de fer pour éviter les fuites magnétiques vers l'extérieur et obtenir une induction élevée [11].

La figure (I.3) représente le schéma d'une pompe (MHD DC) avec un canal rectangulaire et dont l'induction magnétique est créée par des aimants [6].

Nous noterons  $H_p$  la Hauteur du canal,  $L_p$  sa Longueur et  $l_p$  sa largeur (espace comprise entre les deux électrodes)[12].



**Figure I.3.pompe MHD à conduction à courant continu.**

Un des principaux avantages des pompes DC MHD est la simplicité de leur géométrie, leur coût de fabrication est relativement faible devant les autres types de pompes MHD [9].

En effet, les électrodes peuvent subir une érosion à cause du frottement avec le fluide, et les pertes ohmiques peuvent provoquer un échauffement, il peut également exister une résistance de contact non négligeable entre le fluide et les électrodes. Ceci provoque donc des pertes thermiques supplémentaires. Par le passé, de nombreuses pompes MHD à conduction DC ont été fabriquées avec différents types de fluides conducteurs (plasmas, électrolytes, sels fondus et métaux liquides) [4],[6],[9],[11].

Dans ce type des pompes, le courant électrique est fourni par une source extérieure [8].

□ L'analogie entre un moteur à courant continu et une pompe MHD à courant continu peut se résumer comme suit [7].

**Tableaux.1:** Comparaison entre un MCC et une pompe MHD à conduction

Moteur à Courant Continu	Pompe à Courant Continu
<p style="text-align: center;"><b>Schéma</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Schéma</b></p>
<b>Loi d'Ohm</b>	
$U = E' + RI$	$E = E_{ind} + I/\Sigma j$
<b>F.C.E.M</b>	
$E' = k' \omega \Phi$	$E_{ind} = VB$
<b>Puissance</b>	
$P = E'I$	$P = E_{ind} J v_0$
<b>Couple mécanique : <math>C = k'I\Phi</math></b>	<b>Force MHD : <math>F_t = JBv_0</math></b>
<b>Couple résistant : <math>C_r = a\omega^2</math></b>	<b>Force résistante : <math>F_t = ktV^2</math></b>

### I.3.1.2 Les pompes MHD à conduction à courant alternatif

Dans le cas des pompes magnétohydrodynamiques à courant alternatif (MHD AC), les courants dans le fluide et dans le bobinage sont sinusoïdaux. Le courant I traversant le canal de

Le pompage peut donc être fourni en sortie d'un transformateur, et le champ magnétique par un électro-aimant figure (I.4) [9].

L'utilisation d'un transformateur permet d'avoir une alimentation des électrodes très simple car il est assez complexe d'obtenir des alimentations DC à fort courant et faible tension ayant un bon rendement [4]. Par contre, pour des courants élevés un refroidissement des transformateurs est nécessaire [3]. Le champ magnétique et le courant dans le fluide doivent avoir la même fréquence [7]. La force de pompage est maximale si le champ magnétique et le courant sont en phase d'où l'idée d'avoir la même alimentation pour le courant  $I$  et l'induction magnétique  $B$  [6].

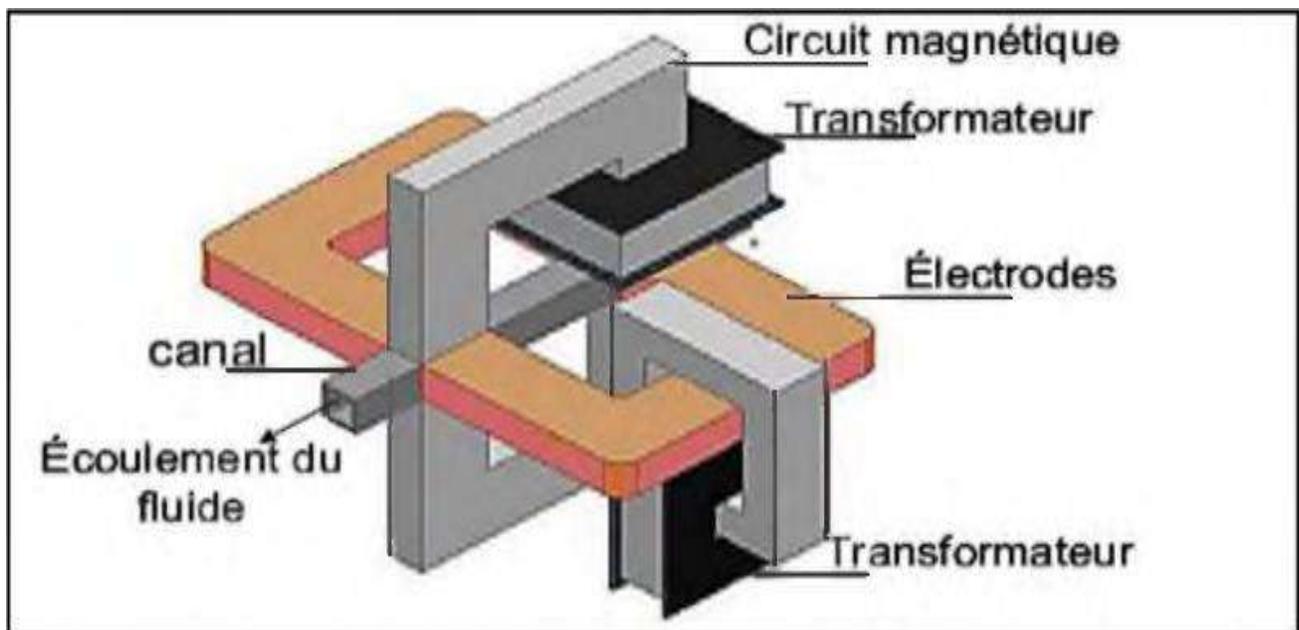


Figure. I.4. Schéma d'une machine MHD à conduction à courant alternatif.

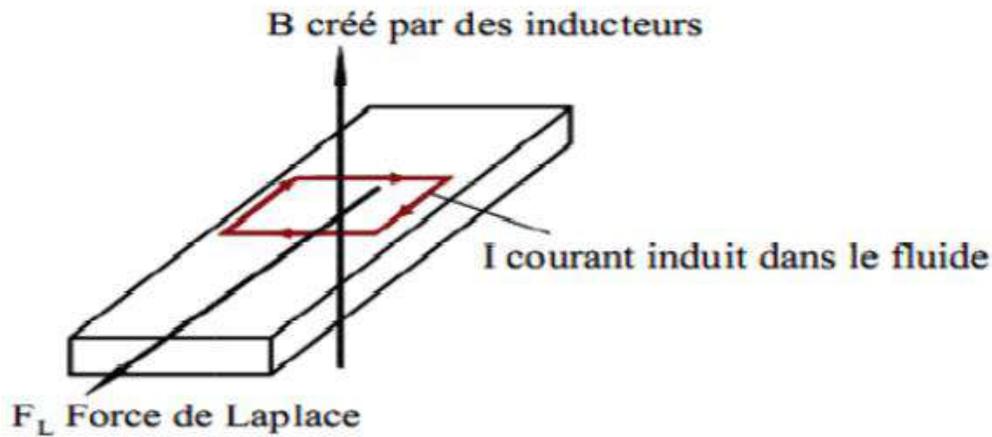
La circulation du fluide est toujours basée sur la force de Laplace où nous avons une variation temporelle du courant et du champ [9].

## I.4 Pompe MHD à induction

### I.4.1 Principe physique

Le principe général d'une pompe à induction consiste à créer un champ magnétique glissant avec des enroulements polyphasés (en général triphasés). Ce dernier induit des courants dans le fluide conducteur qui créent à leur tour une force de Laplace tendant à le mettre en mouvement. Ce fonctionnement est très proche de celui de la machine asynchrone ; cependant, dans ce cas le

champ créé est glissant, et l'induit est constitué par le fluide conducteur. La figure (I.5) montre les courants induits dans les pompes à induction [4].



**Figure (I.5). Lignes de courant dans une pompe MHD à induction**

Les différentes parties d'une pompe à induction sont :

- ✚ **l'inducteur** : il est constitué d'un circuit magnétique créant un champ glissant à un bobinage polyphasé.
- ✚ **l'induit** : il est constitué par le fluide conducteur.
- ✚ **l'entrefer**

Il existe plusieurs types des pompes à induction. Les plus utilisées dans l'industrie sont les pompes plates et les pompes annulaires. La différence entre ces deux types de pompes est leur géométrie [7].

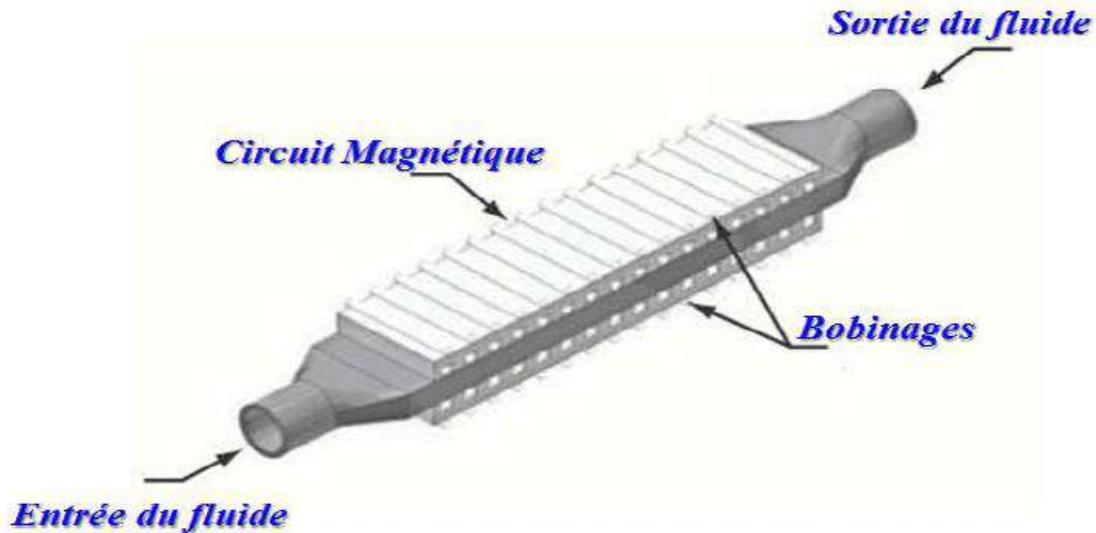
## I.4.2 Classification de la MHD à induction

### I.4.2.1 Pompes plates

Le principe du fonctionnement des pompes plates est la même que précédemment les pompes précédentes.

Elles ressemblent beaucoup au moteur linéaire ; le rail est remplacé par le fluide. Le canal a une section rectangulaire. Des enroulements inducteurs alimentés par des courants alternatifs triphasés génèrent une induction magnétique sinusoïdale glissante,

La figure (I.6) montre le schéma d'une pompe MHD à induction plate. Le liquide circule dans un canal rectangulaire [9] Le refroidissement se fait par circulation forcée d'air dans les inducteurs [6], [9], [11].



**Figure (I.6) pompe MHD à induction plate**

Les problèmes technologiques portent surtout sur la réalisation de conduits en tôle d'acier inox mince (pour diminuer les pertes) résistant à la corrosion et d'une étanchéité absolue [4].

#### **I.4.2.2 Pompes annulaires**

La conception de ces pompes remonte à 1929 (Einstein et Szilard). Le conduit est annulaire entre deux tubes coaxiaux dont l'intérieur contient un noyau de fer doux, et l'extérieur est couvert de bobines triphasées [8].

La figure (I.7) montre le schéma d'une pompe MHD à induction annulaire. Le type annulaire est plus performant que le type rectangulaire car les courants induits sont toujours perpendiculaires à la direction de l'écoulement. Ainsi, la force de Laplace a partout la même direction que celle de l'écoulement. Par contre, dans le cas d'une machine de section rectangulaire, les courants induits se bouclent d'une façon moins favorable aux échanges d'énergie mécanique en énergie électrique et provoquent d'avantage des pertes par effet Joule, Les avantages de ces pompes sont les suivants [3],[7] :

- ❖ Les courants électriques se referment dans la masse du fluide, ce qui rend inutile l'adhérence de celui-ci sur la paroi ;
- ❖ La forme est simple et l'encombrement économique ;
- ❖ Le démontage est facile.
- ❖ Le courant des enroulements primaires produit un champ magnétique de déplacement qui produit à son tour un courant induit dans le métal liquide [4].

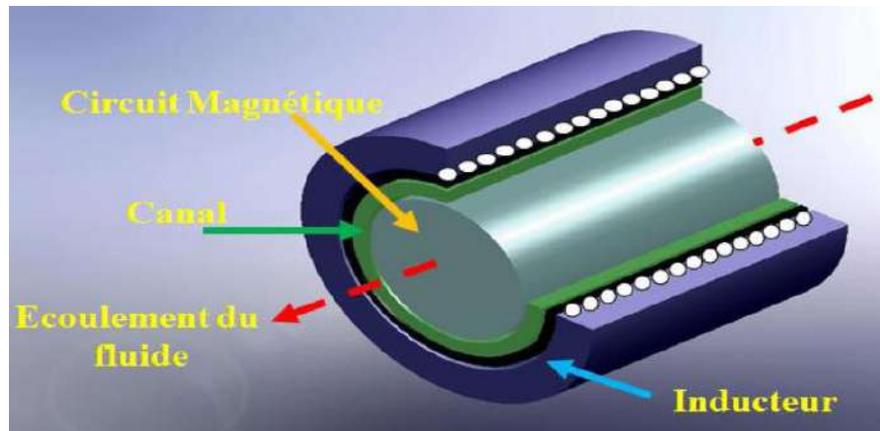


Figure (I.7) Pompe magnétohydrodynamique annulaire

### I.4.2.3 Pompes hélicoïdales

Dans ce type de pompes, le conduit annulaire est hélicoïdal au lieu d'être rectiligne, figure (I.8). Les pertes supplémentaires dues à la composante azimutale de la vitesse et les difficultés de fabrication sont prohibitive [7].

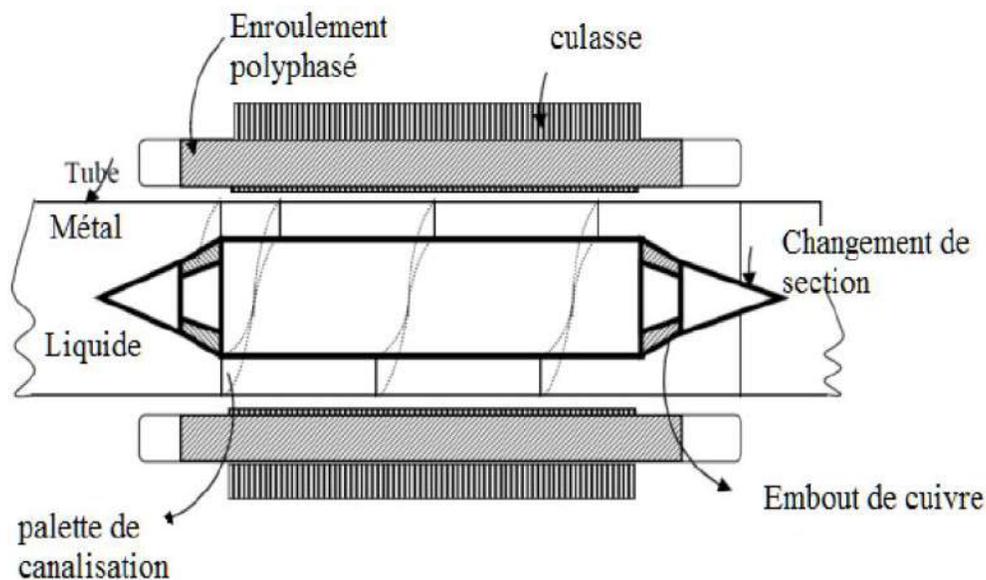


Figure (I.8). Schéma d'une pompe MHD hélicoïdale

## I.5. Comparaison entre les pompes à conduction et à induction

- ✚ Les pompes linéaires à induction sont plus simples et moins coûteuses que celles à conduction et ceci est dû à l'absence d'électrodes et la facilité de travailler à des niveaux de tensions conventionnelles.

- ✚ Par contre, elles possèdent un rendement de conversion d'énergie moins important à cause de l'appel de courant réactif pour la magnétisation du circuit en présence d'un entrefer important.
- ✚ La présence des électrodes dans les machines à conduction est un inconvénient par rapport aux machines à induction, elles subissent une érosion au contact avec le fluide dont la température est généralement élevée [4],[7],[8].
- ✚ la fabrication des pompes MHD DC a un coût relativement faible par rapport aux autres. De plus, elles fonctionnent avec des aimants permanents ce qui simplifie leur réalisation. Les principaux inconvénients sont l'alimentation électrique qui est complexe
- ✚ la pompe MHD à conduction à courant alternatif peut être plus facilement alimentée mais demande la présence d'un électro-aimant. De plus, le courant alternatif entraîne la présence de courants de Foucault [3], [7].

## I.6.Applications des pompes magnétohydrodynamiques

Le principe de la MHD trouve un large secteur d'applications en commençant par les propulseurs des véhicules marins, le freinage électromagnétique, le refroidissement des réacteurs atomiques et jusqu'au domaine des pompes liées aux applications médicales.

Ce même principe peut être exploité dans le cas des fluides gazeux ionisés, figure (I.9). Les gaz dégagés par les moteurs à réaction peuvent être exploités pour augmenter la force de propulsion de ces derniers et ainsi améliorer leur rendement.

La MHD offre un potentiel d'applications industrielles et de recherches considérables [4],[8].

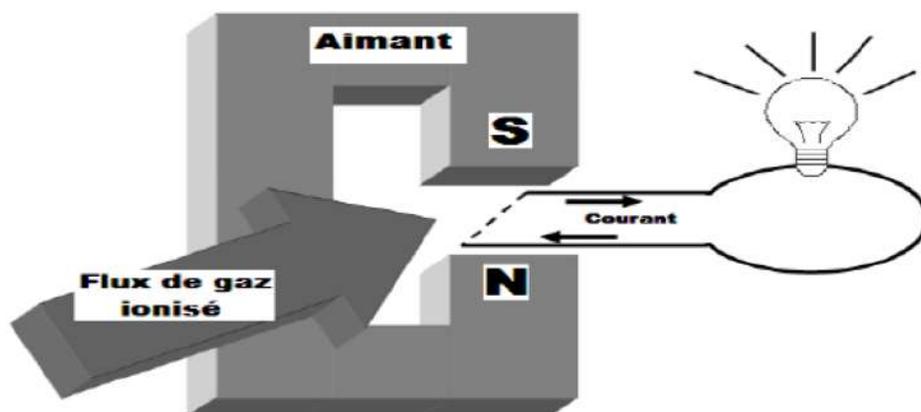


Figure (I.9). Générateur MHD à gaz ionisé.

### I.6.1. Génération d'électricité

Dans ce processus, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique, on peut considérer que le système le plus simple est celui du convertisseur à conduction. Il est constitué d'un organe essentiel qui est le canal placé dans l'entrefer, d'un aimant dans lequel s'écoule un métal liquide qui traverse une induction magnétique  $B$  qui induit un courant  $J$  collecté par des électrodes en contact avec le fluide.

Ce dernier est plus utilisé dans le cas des métaux liquides pour les vaisseaux spatiaux.

□ IL existe plusieurs types de générateurs MHD suivant la forme et le fluide utilisés.

- **Machines circulaires à plasma**

Les générateurs linéaires ont une tuyère rectiligne, par opposition aux machines circulaires.

On distingue quatre types de tuyères :

- ❖ Tuyères à électrodes continues.
- ❖ Tuyères à électrodes segmentées.
- ❖ Tuyères à effet Hall.
- ❖ Tuyères à effet Hall et champ oblique,

### I.6.2 Propulseurs MHD

Propulseurs à plasma

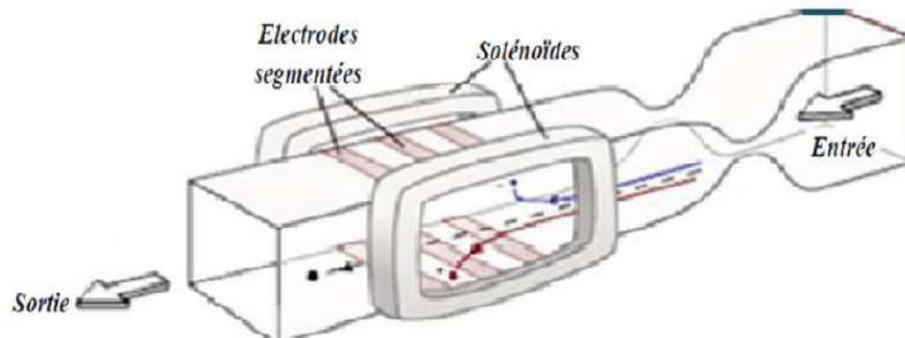
Propulsion MHD navale

### I.6.3 Générateurs à conduction

Un générateur MHD (magnétohydrodynamique) est un convertisseur MHD qui transforme l'énergie cinétique d'un fluide conducteur directement en électricité. Le principe de base est fondamentalement le même que pour n'importe quel générateur électrique. Les deux types de générateurs utilisent un inducteur (électroaimant ou aimant permanent) générant un champ magnétique dans un induit ou canal [8].

- ❖ Dans le cas d'un générateur conventionnel, cet induit est solide : c'est une pièce métallique portant des bobines en cuivre.
- ❖ Dans le cas d'un générateur MHD, cet induit est fluide : liquide conducteur (eau salée, métal liquide) ou gaz ionisé (plasma) [7].
- ❖ Les générateurs MHD n'utilisent donc pas de pièce mécanique mobile, contrairement aux générateurs traditionnels. Le fluide est mis en mouvement dans le champ magnétique, ce

qui génère un courant électrique, recueilli aux bornes d'électrodes immergées et connectées à une charge [8].



**Figure (I.10) Générateur MHD à Conduction (tuyère linéaire).**

### I.7 Avantages et inconvénients des pompes MHD

↳ Les pompes MHD gagnent de l'intérêt car elles rassemblent des critères attractifs tels que:

- Absence totale de pièces mobiles;
- Processus de fabrication simple;
- Problèmes mécaniques nulles;
- Débit continu de fluide;
- Durée de vie prolongée.

Malgré ces avantages, les pompes MHD trouvent quelques difficultés à s'intégrer dans des secteurs spécifiques tels que le médical, le pharmaceutique.

- La formation du phénomène d'électrolyse ;
- L'échauffement dû à la circulation des courants électriques ;
- La présence des courants électriques n'est pas toujours commode ;
- Le pompage MHD n'est possible qu'en présence d'un liquide et qui doit être conducteur [4].

### I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné un aperçu sur la magnétohydrodynamique et leurs applications. Comme notre travail se focalise sur l'étude des performances d'une pompe à conduction, il nous faut un modèle mathématique décrivant le comportement de cette pompe, ce qui sera l'objet du chapitre suivant.

**Chapitre II :**  
**Formulation mathématique des phénomènes  
électromagnétiques**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les formulations mathématiques modélisant la pompe MHD à conduction et qui expriment les phénomènes électromagnétiques dans la pompe (équations de Maxwell) ainsi que certaines hypothèses permettant de simplifier ces équations.

## II.2 Equation de MAXWELL

### a- Equation de MAXWELL-GAUSS

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (2.1)$$

Une charge électrique est source d'un champ électrique ; autrement dit, les lignes de champs électriques commencent et se terminent autour des charges électriques [6]

### b-Equation de conservation du flux magnétique

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

Cette relation traduit mathématiquement le fait que les seules sources de champ magnétique sont les courants électriques, et il n'existe pas de charge magnétique ; c'est pourquoi les lignes du champ sont toujours fermées sur elles-mêmes. Elles forment des boucles. Ces boucles n'ont ni point de départ, ni point d'arrivée, ni point de convergence, d'où la nomination d'induction conservative (champ conservatif). [5]

### c- équation de Maxwell-Faraday

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Cette équation exprime le couplage électrique- magnétique en régime dynamique et la variation temporelle de  $\vec{B}$ .

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Équation de Maxwell-Ampère}) \quad (2.4)$$

En tenant compte des relations constitutives de milieu  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  et  $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$  dans ces équations, nous pouvons leur ajouter la loi d'Ohm:

$$\vec{J} = \vec{J}_{in} + \vec{J}_{ex} \quad (2.5)$$

avec :

$$\vec{J}_{in} = \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{V} \wedge \vec{B}) \quad (2.6)$$

Dans cette dernière équation, le premier terme représente la densité de courant induit par conduction tandis que le second terme représente la densité de courant induit par les vitesses dans la décharge.

avec :

$\vec{J}_{in}$  : la densité de courant induit et  $\vec{J}_{ex}$  la densité de courant source [A/m<sup>2</sup>];

$\vec{B}$  : l'induction magnétique [T];

$\rho$  : la densité volumique de la charge électrique [C/m<sup>3</sup>];

$\vec{D}$  : le déplacement électrique ou l'induction électrique [A.s/m<sup>2</sup>];

$\mu$  : la perméabilité magnétique (dans le vide  $\mu=\mu_0=4\pi.10^{-7}$ [H/m]);

$\epsilon$  : la permittivité électrique (dans le vide  $\epsilon=\epsilon_0= 8.8544*10^{-12}$ [F/m]);

$\vec{V}$  : le vecteur vitesse aux points considérés [m/s];

$\sigma \vec{E}$  : la densité des courants induits par variation du champ électrique [A/m<sup>2</sup>];

$\sigma(\vec{V} \wedge \vec{B})$  : la densité des courants induits par mouvement [A/m<sup>2</sup>].

Dans l'équation (2.4), le terme  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  est appelé terme des courants de déplacement.

L'équation (2.4) peut ainsi se simplifier pour donner le théorème d'Ampère :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (2.7)$$

L'équation (2.7) exprime que la circulation du champ magnétique sur un contour fermé sur lequel s'appuie une surface est égale à la somme des courants qui traversent cette même surface.

On déduit de l'équation (2.7) que la densité de courant  $\vec{J}$  est à flux conservatif :

$$\text{div } \vec{J} = 0 \quad (2.8)$$

### II.3 Formulation du problème électromagnétique

La résolution du problème électromagnétique quasi stationnaire, dans le domaine  $\Omega$ , nécessite le choix d'une formulation basée sur une grandeur caractéristique et en association avec les relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge.

Ainsi, de nombreuses formulations ont déjà été développées en deux ou en trois dimensions. En trois dimensions, il n'existe pas de formulation idéale. Les formulations associent le potentiel vecteur  $\vec{A}$  et le potentiel scalaire  $U$ . En deux dimensions, la formulation adéquate est donnée en potentiel vecteur  $\vec{A}$  à cause de réduction de nombre d'inconnues.

#### II.3.1 Modèle Magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électrotechniques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient en fonction du temps. Le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  n'est plus nul, les champs électriques et magnétiques sont alors couplés par la présence des courants induits [06].

Pour représenter l'état électromagnétique en un point, on doit alors faire recours au potentiel vecteur  $\vec{A}$  car  $\text{div } \vec{B} = 0$  ; les avantages présentés par ce type de formulation sont nombreux :

- c'est la plus utilisée et elle réduit le nombre d'inconnues ;
- elle permet d'imposer des sources électriques par les bobines ;
- la connaissance de toute autre grandeur physique peut être déduite.

Ecrivons les deux équations de Maxwell qui se présentent sans terme source :

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.9)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.10)$$

La première équation indique que l'induction magnétique  $\vec{B}$  est un champ rotationnel. Ceci implique qu'il existe un potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$ , tel que :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (2.11)$$

La substitution de (2.10) dans (2.11) donne :

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial(\text{rot } \vec{A})}{\partial t} = -\text{rot}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad \text{Ce qui implique que :}$$

$$\text{rot}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (2.12)$$

Le champ  $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$  de l'équation (2.12) est conservatif, donc il dérive d'un potentiel scalaire U

donné par :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad } U \quad (2.13)$$

Par conséquent, le champ magnétique et le champ électrique peuvent s'écrire en termes de ces deux potentiels  $\vec{A}$  et U en utilisant la relation du milieu comme suit :

$$\begin{cases} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } U \\ \vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} \end{cases} \quad (2.14)$$

A partir de l'équation  $\text{rot } \vec{H} = \vec{J}$  et  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ , nous avons :

$$\vec{J} = \text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \vec{B}\right) = \text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A}\right) \quad (2.15)$$

En remplaçant (2.14) et (2,15) dans (2,5) et (2,6), on obtient:

$$\vec{J} = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{V} \wedge \vec{B}) \quad (2.16)$$

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A}\right) + \sigma\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad } U\right) - \sigma(\vec{V} \wedge \vec{B}) = \vec{J}_{ex} \quad (2.17)$$

Les termes  $\sigma(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t})$  et  $\sigma(\vec{V} \wedge \vec{B})$  représentent les densités des courants induits. Ils traduisent le caractère dynamique dans le temps et dans l'espace des phénomènes électromagnétiques ; pour la pompe MHD à conduction proposée, le champ magnétique imposé est constant ; donc le premier terme s'annule.

Le terme  $\sigma(\overrightarrow{grad}U)$  décrit la densité du courant imposée à travers les électrodes.  $U$  représente le potentiel scalaire électrique en Volts.

Pour pouvoir résoudre l'équation (2.21), on ajoute une autre équation pour que la solution soit unique. On fixe la divergence de  $\vec{A}$  (jauge de Coulomb) :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (2.18)$$

Dans notre configuration bidimensionnelle (2D), la condition de jauge de Coulomb est naturellement vérifiée. Le modèle électromagnétique de la pompe sera comme suit :

$$\begin{cases} \overrightarrow{rot}(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{Rot} \vec{A}) + \sigma \overrightarrow{grad}U - \sigma(\vec{V} \wedge \vec{B}) = \vec{J}_{ex} \\ \text{div} \vec{A} = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

## II.4 Méthodes de discrétisation

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution du système d'équations différentielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la détermination des champs électromagnétiques

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthode des éléments finis (MEF)
- Méthode des intégrales de frontières (MIF)
- Méthode des volumes finis (MVF)

### II.5 Hypothèses simplificatrices

Pour déterminer le modèle mathématique qui régit les phénomènes électromagnétiques dans la pompe MHD à conduction, certaines hypothèses simplificatrices sont à proposer :

- ✓ Pour la perméabilité magnétique, si l'induit ne possède pas des propriétés magnétiques, sa perméabilité magnétique est assimilée à celle du vide;
- ✓ Les courants de déplacement  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  sont négligés devant  $\vec{J}$  et  $rot \vec{H}$  dans le cadre de l'approximation quasi-statique ;

### II.6 Formulation en coordonnées cylindriques axisymétriques

Une grande partie des problèmes magnétiques peut être traitée en bidimensionnel, ce qui est le cas pour notre problème ; l'existence des deux types de systèmes bidimensionnels : ceux infiniment longs alimentés suivant une direction (oz), ceux à symétrie de révolution alimentés selon la direction (oφ). C'est le deuxième cas qui nous intéresse, suivant notre dispositif, les courants  $\vec{J}_{ex}$  sont dirigés suivant l'angle φ du système de coordonnées cylindriques (r, φ, z). Le champ magnétique possède alors deux composantes, l'une suivant la direction (or) et l'autre suivant la direction (oz), imposant ainsi pour le potentiel une seule composante  $A_\phi$ . Les différentes grandeurs ont les composantes suivantes:

$$\vec{J} \begin{bmatrix} 0 \\ J_\phi \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{E} \begin{bmatrix} 0 \\ E_\phi \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{A} \begin{bmatrix} 0 \\ A_\phi \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{B} \begin{bmatrix} B_r \\ 0 \\ B_z \end{bmatrix}; \quad \vec{H} \begin{bmatrix} H_r \\ 0 \\ H_z \end{bmatrix}$$

Rappelons l'équation magnétodynamique (2.19) dans le cas où le terme  $\sigma(\vec{grad}U)$  est remplacé par la densité de courants injectée à travers les électrodes  $\vec{J}_a$ .

$$\begin{cases} rot\left(\frac{1}{\mu} rot \vec{A}\right) - \sigma(\vec{V} \wedge \vec{B}) = \vec{J}_a + \vec{j}_{ex} \\ div \vec{A} = 0 \end{cases} \tag{2.20}$$

Sachant qu'en coordonnées cylindriques, les coordonnées de  $rot \vec{A}$  sont :

$$\begin{bmatrix} -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \\ 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Après développements en coordonnées cylindriques, l'équation (2.21) devient :

$$-\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \right) \right] + \frac{\sigma}{r} v_z \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} = \vec{J}_{ex} + \vec{J}_a \quad (2.22)$$

En introduisant la transformation  $A = rA_\varphi$ , l'équation (2.22) devient :

$$\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) \right] - \frac{\sigma}{r} v_z \frac{\partial(A)}{\partial z} = -J_{ex} - J_a \quad (2.23)$$

C'est une équation aux dérivées partielles, décrivant le comportement d'un dispositif cylindrique axisymétrique. Sous l'hypothèse que les matériaux sont linéaires et que les sources d'alimentation sont constantes.

## II.7 Méthodes numériques

Les méthodes numériques de discrétisation utilisable pour la résolution des équations mathématiques établies, consistent à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des champs (potentiel vecteur magnétique), mécanique des fluides (vitesse, pression,...).

### II.7.1 Méthodes des différences finies

Ces méthodes sont très utilisées car elles allient une grande simplicité à la possibilité d'obtenir plusieurs schémas de discrétisation selon la précision désirée [10].

### II.7.2 Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. Appliquée tout d'abord, il y a environ 50 ans, à des problèmes de mécanique de structure, cette méthode a connu des développements importants dans différents domaines scientifiques et industriels. La méthode des

éléments finis consiste à rechercher une fonction globale représentant les phénomènes étudiés, sur un domaine de résolution préalablement subdivisé en parties finies adjacentes appelées éléments finis [11].

Parmi les avantages de cette méthode, on peut citer le traitement possible des géométries complexes ; cependant elle présente une complexité de mise en œuvre et un grand coût en temps de calcul et en mémoire.

### **II.7.3 Méthodes des volumes finis**

La méthode des volumes finis (MVF) est très appliquée pour les problèmes de la mécanique des fluides. La discrétisation des équations aux dérivées partielles s'opère à partir d'une forme conservative pour chaque volume de contrôle par une technique qui ressemble à la méthode des différences finies. Donc le principe de conservation est imposé au niveau de chaque volume de contrôle contrairement à la méthode des éléments finis où les principes de conservation sont vérifiés uniquement de manière globale. Cette méthode est simple à développer et moins coûteuse que la méthode des éléments finis [10].

Le domaine d'étude dans cette méthode est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage. L'équation est intégrée sur 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 entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Cela conduit à une solution plus précise que la méthode des différences finis [10], [12].

## **II.8 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques présents dans les dispositifs électrotechniques. Des modèles mathématiques ont été établis dans leurs formes générales.

Dans notre travail, nous avons opté pour le modèle électromagnétique avec la formulation en potentiel vecteur magnétique.

Dans le chapitre suivant on présentera les résultats de la modélisation de la pompe à induction par la méthode des éléments finis utilisant le logiciel multiphasiques COMSOL.

**Chapitre III :**  
**Simulation et résultats par COMSOL 3.5**

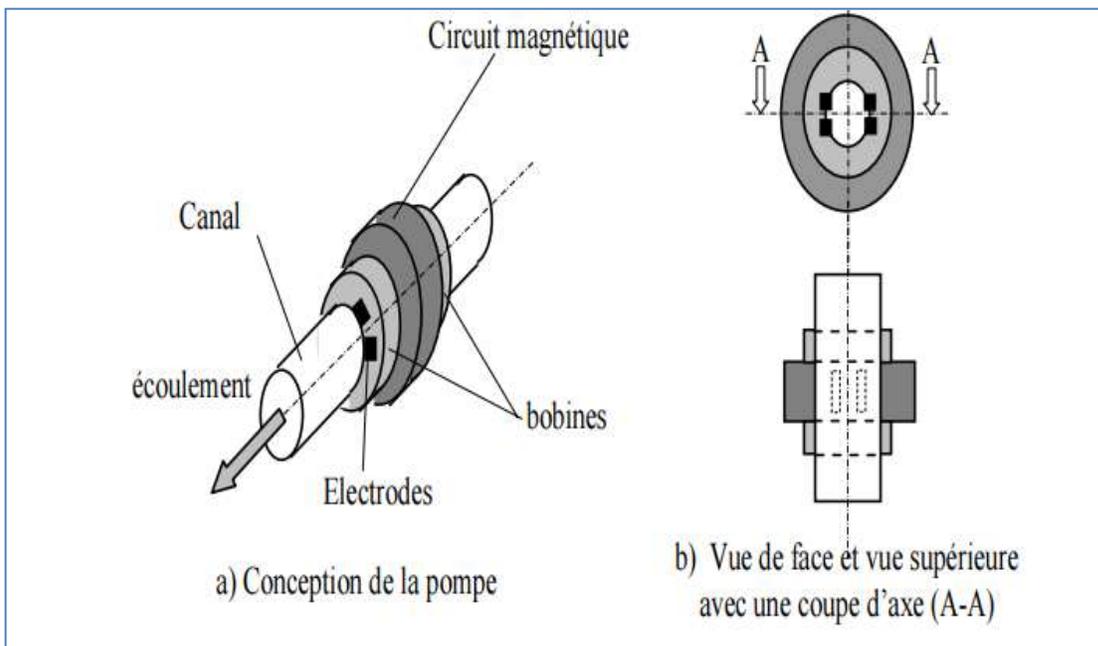
### III.1 Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats de simulation de la pompe MHD à conduction en utilisant le logiciel COMSOL, on présente également une description de cette pompe, sa géométrie et les paramètres utilisés. Le logiciel utilisé c'est le COMSOL 3.5.

### III.2 Description de la pompe MHD à conduction utilisée

Elle est constituée d'un circuit magnétique sous forme de tore, deux bobines, deux électrodes et un canal où circule un fluide supposé incompressible. Dans la pompe les forces de pompage sont les forces de Lorentz induites par l'intermédiaire d'un champ magnétique appliqué et des courants électriques.

Le principe de fonctionnement est basé sur l'application d'un champ magnétique permanent et constant, (produit par un enroulement inducteur), et croisé par un courant continu qui est amené dans le fluide par des électrodes pour créer une force de Lorentz qui assure le pompage et le déplacement du fluide (figure (3.1)).



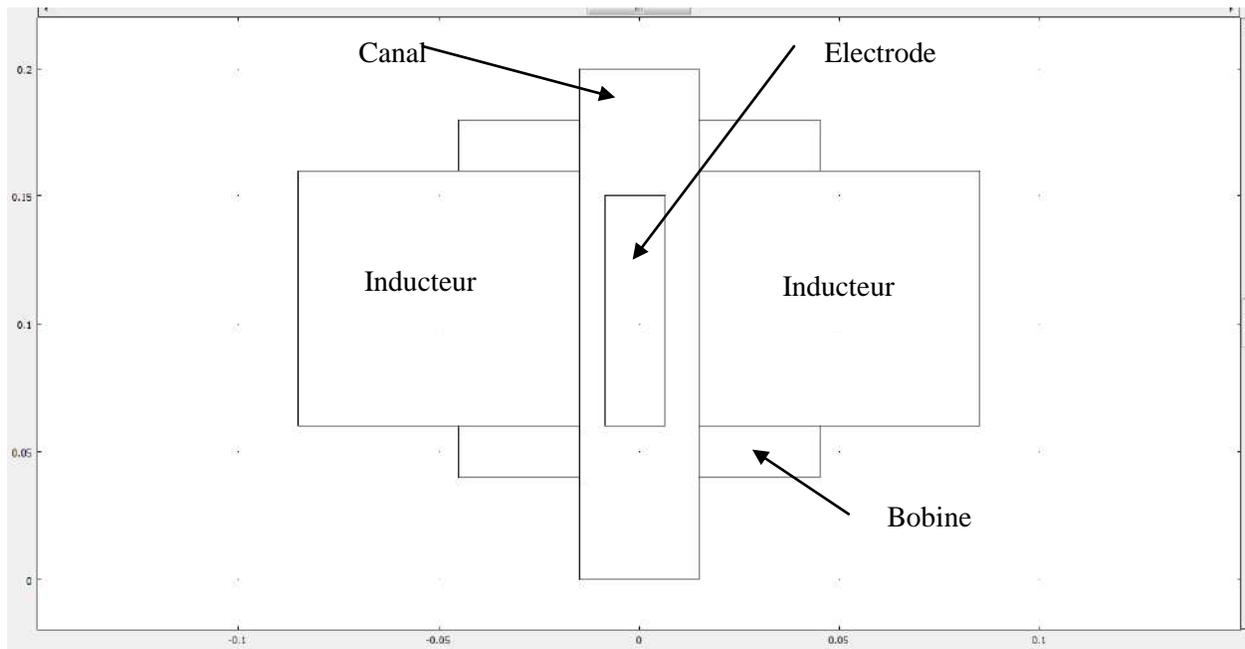
**Fig.3.1 Configuration proposée de pompe MHD à conduction**

### III.3 Résultats de la simulation par COMSOL

Les résultats de la modélisation électromagnétique de la pompe MHD sont donnés par les figures qui suivent.

#### III.3.1 Dimensions da la pompe à conduction

La figure (3.2) et (3.3) représentent respectivement une coupe transversale de la pompe MHD à conduction.



**Fig.3.2 Géométrie de la pompe MHD à conduction**

- La largeur du canal 0.03m
- La longueur du canal 0.2m
- La largeur du circuit magnétique 0.07m
- La longueur du circuit magnétique 0.1m
- La largeur de la bobine 0.03m
- La longueur de la bobine 0.02m
- La largeur de l'électrode 0.01m
- La longueur de l'électrode 0.1m

### III.3.2 Paramètres utilisés

- La densité de courant d'excitation  $J_{ex}=6*10^6 [A/m^2]$ ;
- La densité du courant injectée par les électrodes  $J_a=2*10^6 [A/m^2]$ ;
- Le matériau de l'électrode est le platine de conductivité électrique  $\sigma = 8.9 * 10^6 [S/m]$ ;
- Le fluide dans le canal est le mercure de conductivité électrique  $\sigma = 1.06 * 10^6 [A/m]$ ;
- La perméabilité relative du matériau ferromagnétique  $\mu r = 7000$
- La perméabilité relative de mercure et de  $\mu r = 1$ ;
- La vitesse : 0.03 m/s.

### III.4 Méthodologie de COMSOL

- Le logiciel COMSOL 3.5 est basé sur la méthode des éléments finis. Après avoir introduit la géométrie de la pompe MHD, les propriétés et l'alimentation de chaque partie, les conditions aux limites appropriées, on fait le maillage raffiné et on obtient les différentes caractéristiques.

### III.5 Résultats de simulation

Les figures (3.3), (3.4) et (3.5) représentent respectivement : la géométrie avec les conditions aux limites et les lignes équipotentielles dans la pompe. Le maillage envisagé comporte (2160 élément le temps de calcul 0.155 s).

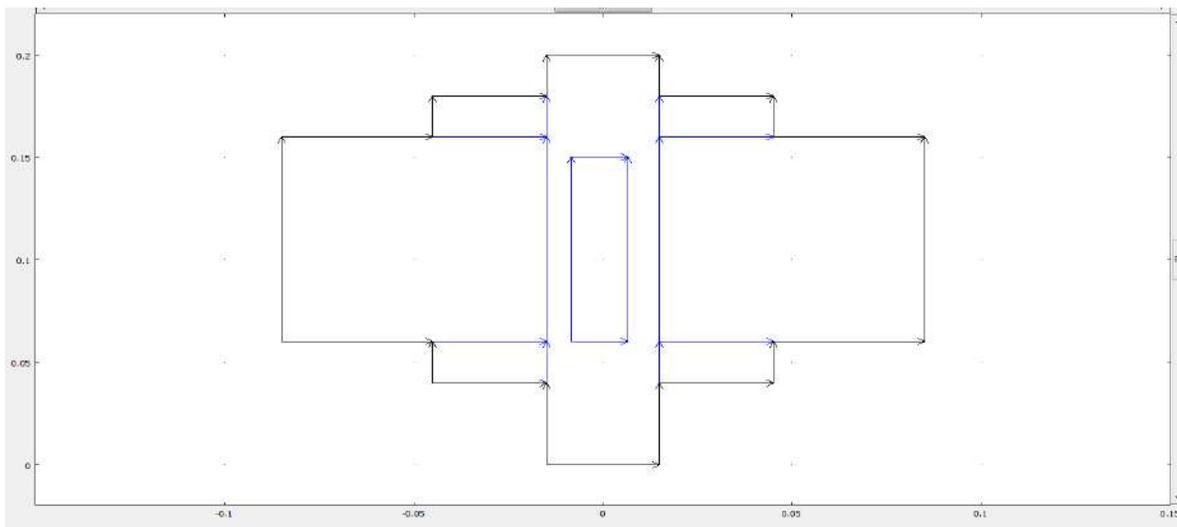
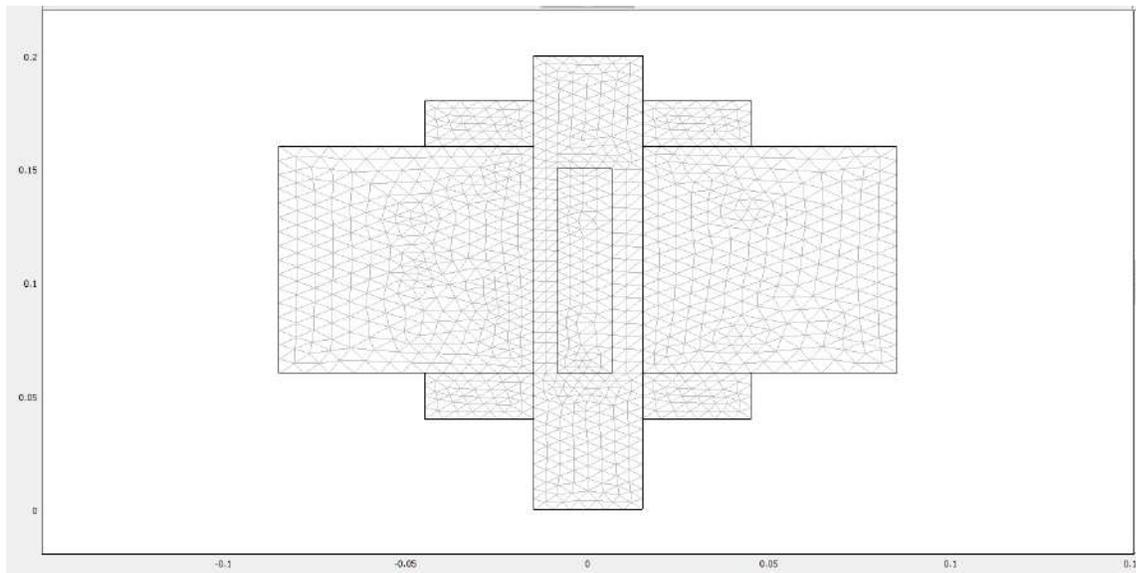
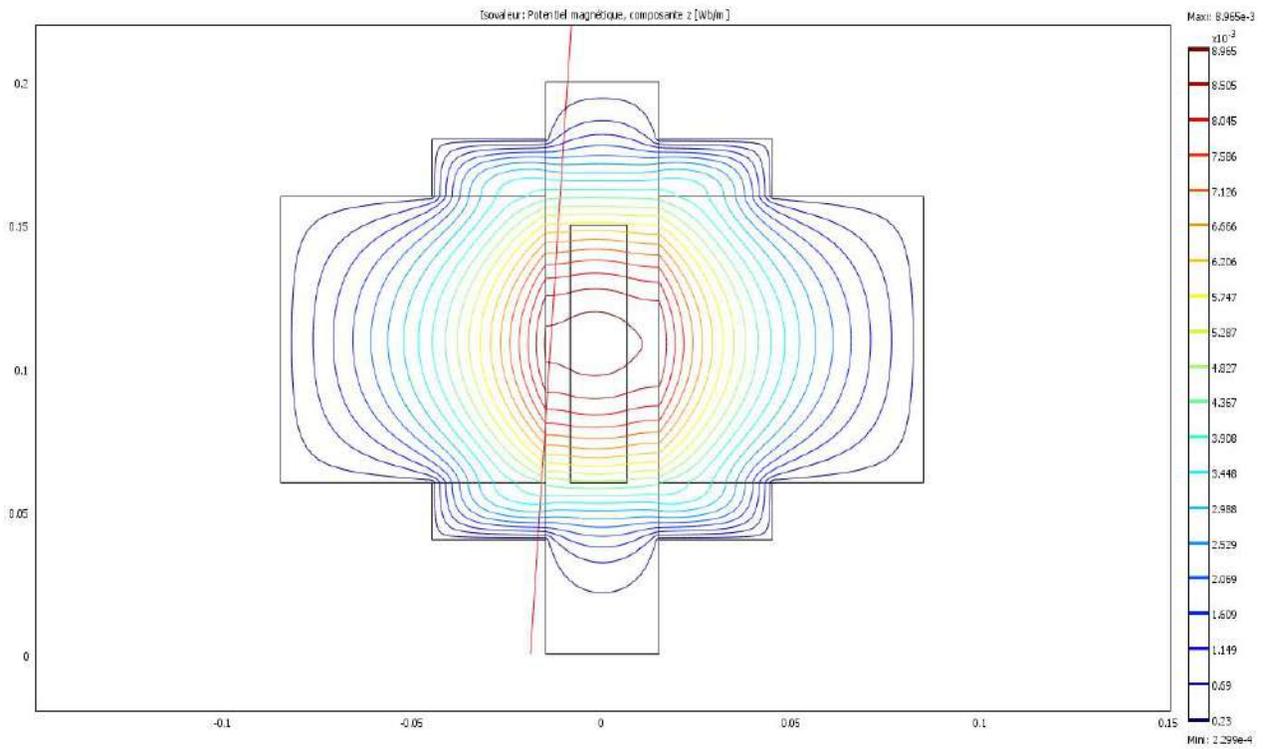


Fig.(3.3) Géométrie avec condition aux limites de type Dirichlet



**Fig.(3.4) Maillage de la pompe MHD**



**Fig.(3.5) Les lignes équipotentiels dans la pompe MHD**

### III.5.1 Présentation du Potentiel vecteur magnétique

La figure (3.6) présente le potentiel magnétique dans la pompe

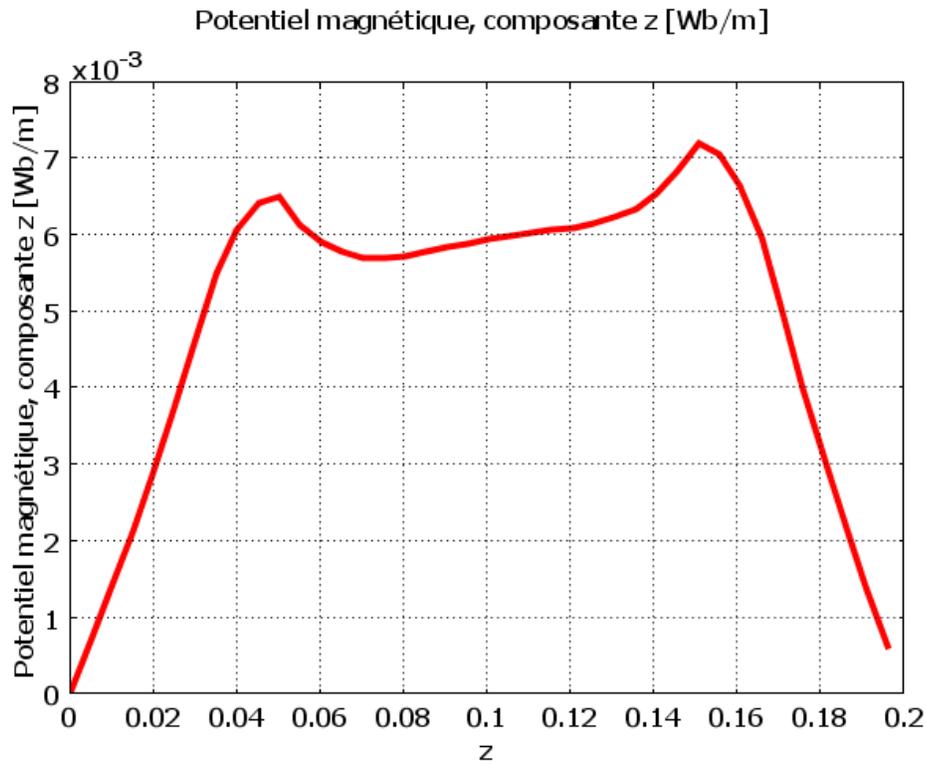


Fig.(3.6) Potentiel magnétique dans la pompe MHD

### III.5.2 Présentation de induction magnétique

La figure (3.7) illustre l'induction magnétique dans la pompe.

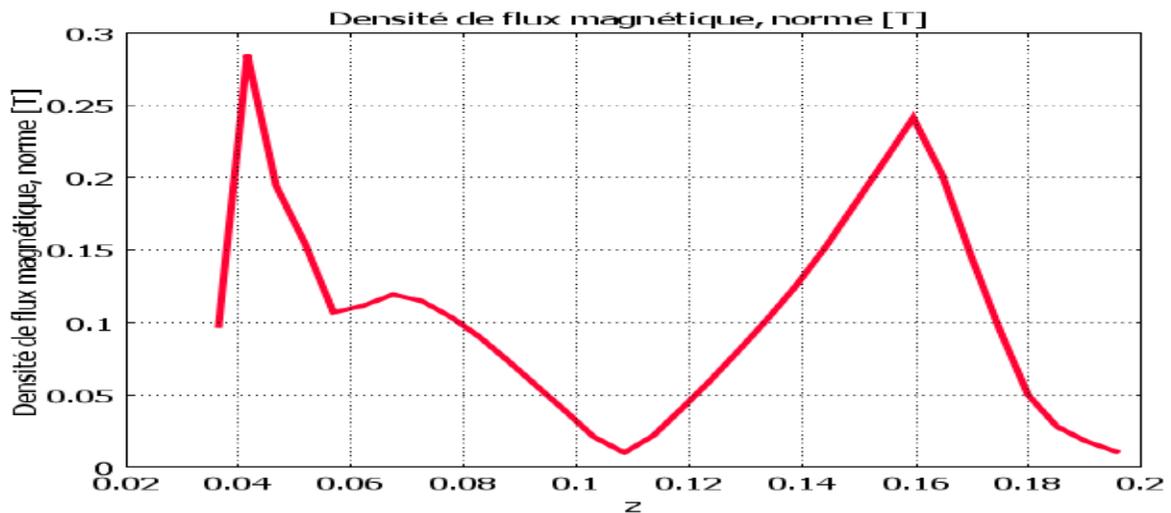


Fig. (3.7) l'induction magnétique dans la pompe

### III.5.3 Présentation de la force électromagnétique

La figure (3.8) présente la force électromagnétique dans la pompe. On remarque que la force atteint son maximum aux lieux de disposition des bobines.

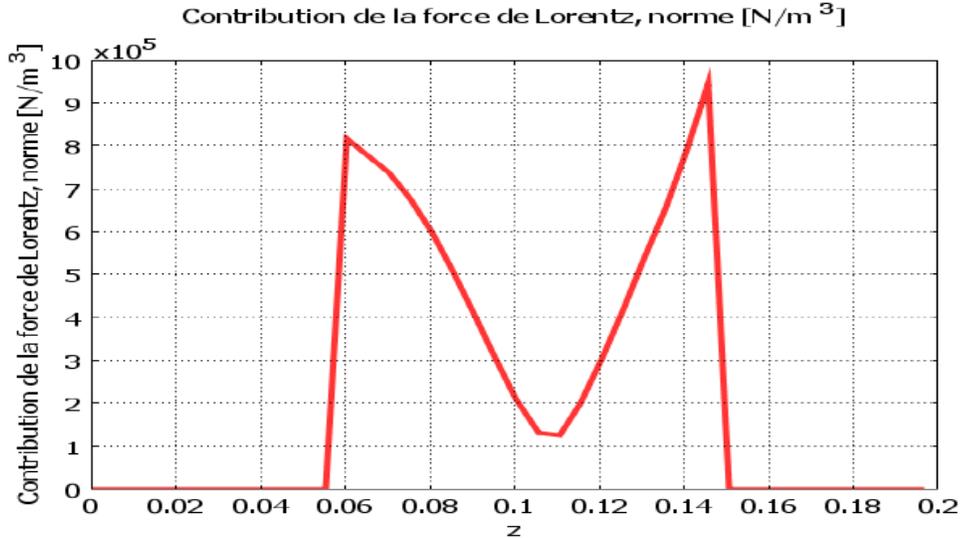


Fig. (3.8) La force électromagnétique dans la pompe

### III.5.4 Présentation de la densité d'énergie

La figure (3.9) présente la densité d'énergie dans le canal de la pompe.

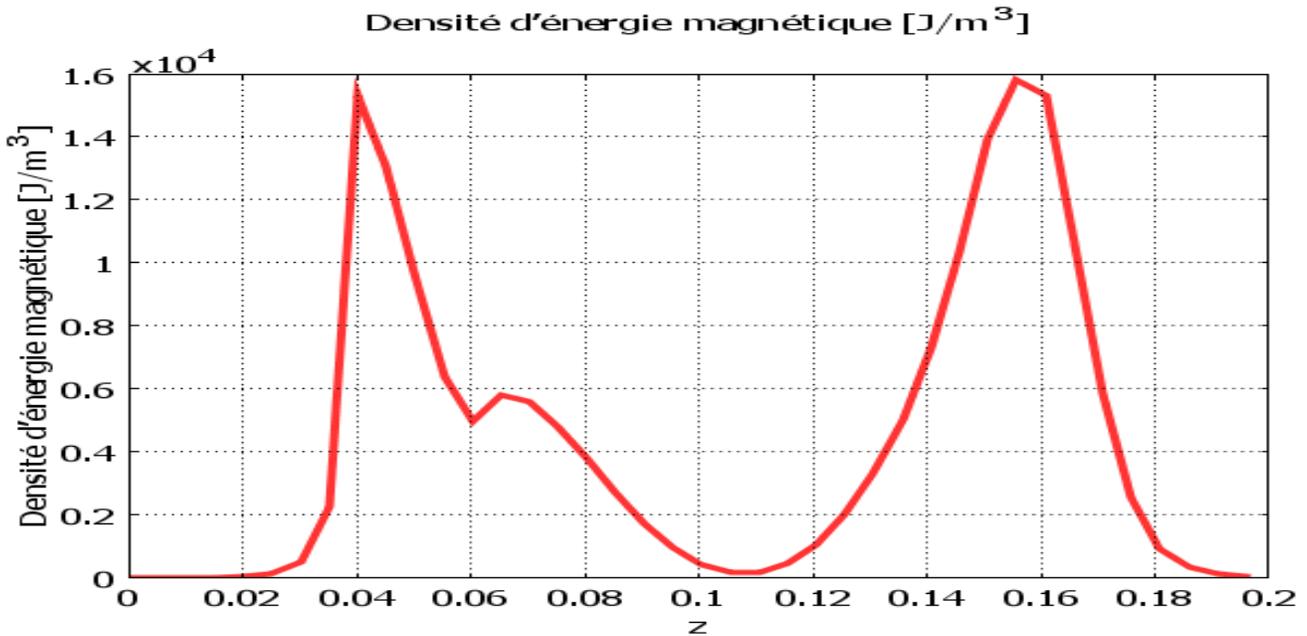


Fig. (3.9) Densité d'énergie dans le canal de la pompe.

### III.6 Etude de l'influence des fluides

Dans cette partie, on va étudier l'influence de certains métaux liquides sur les performances de la pompe MHD, tels que:

- Mercure de conductivité électrique :  $1.06 \cdot 10^6$  [S/m]
- L'eau de mer de conductivité électrique : 50[S/m];

Les figures (3.10), (3.11) et (3.12) présentent respectivement : potentiel magnétique , induction magnétique et la force électromagnétique. Les caractéristiques obtenues sont proportionnelles aux conductivités

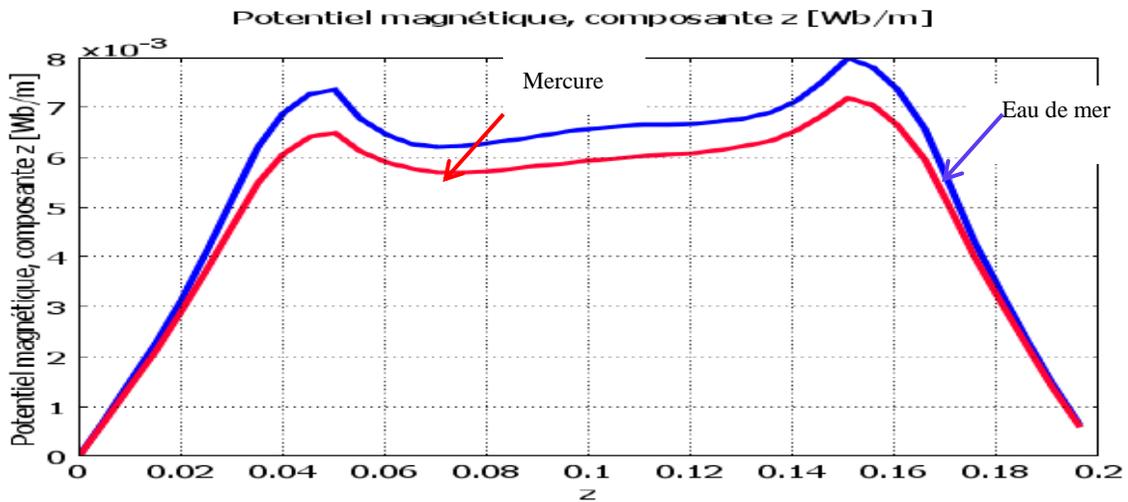


Fig. (3.10) Potentiel magnétique dans la pompe MHD

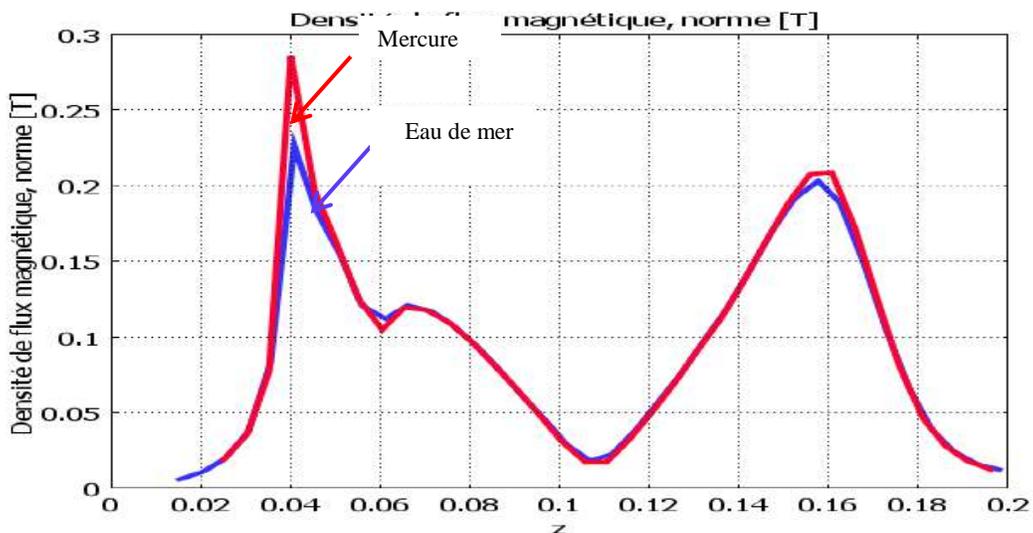


Fig. (3.11) l'induction magnétique dans la pompe

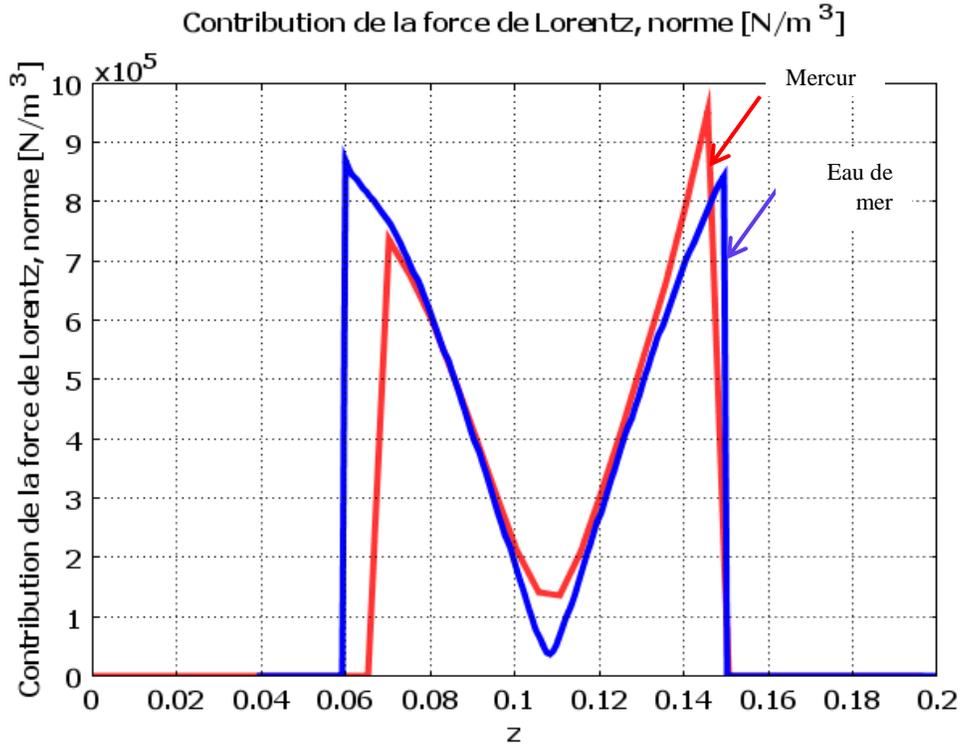


Fig. (3.12) La force électromagnétique dans la pompe

### III.7 Etude de l'influence de la position de l'électrode

La figure (3.13) montre la position de l'électrode repoussée sous la bobine de sortie

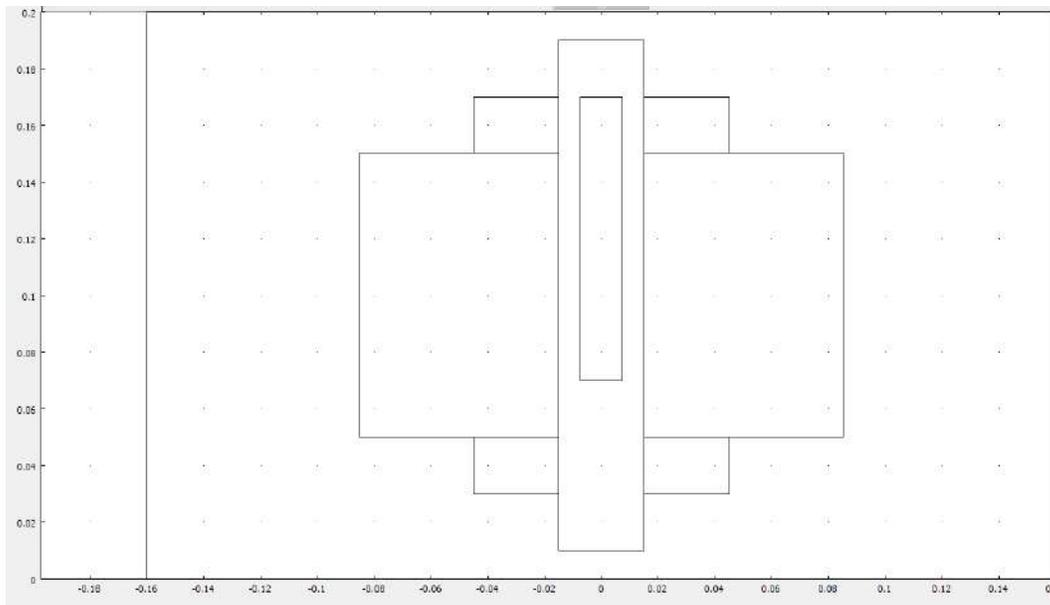


Fig. (3.13) géométrie avec déplacement de l'électrode

Les figures (3.14), (3.15) et (3.16) montrent les performances de la pompe avec les deux fluides utilisés.

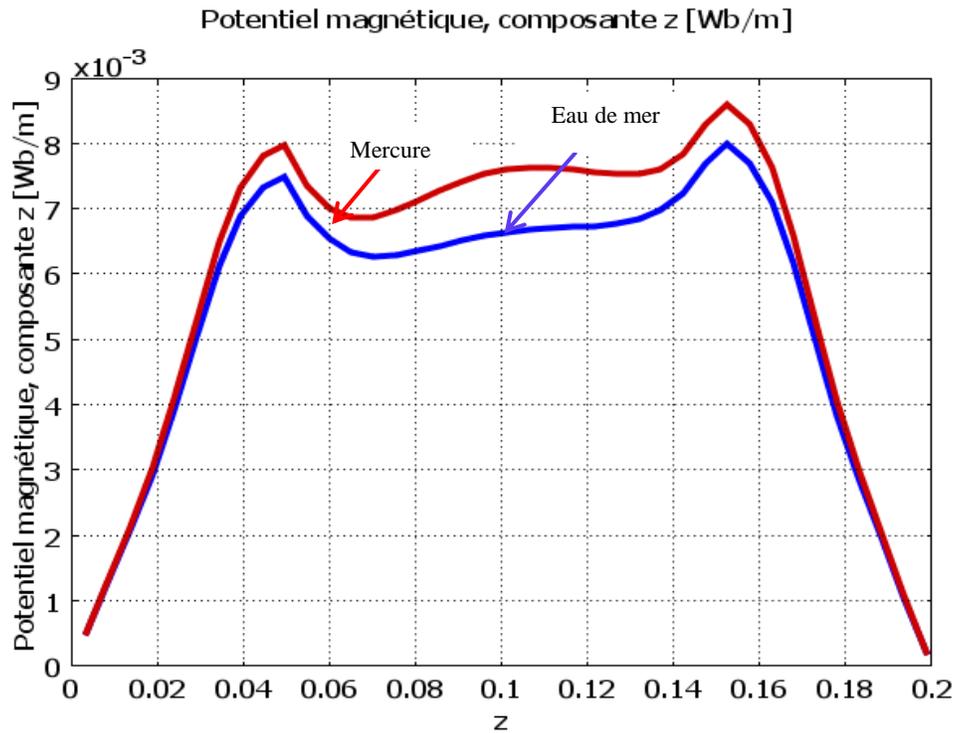


Fig.(3.14) Potentiel magnétique dans la pompe

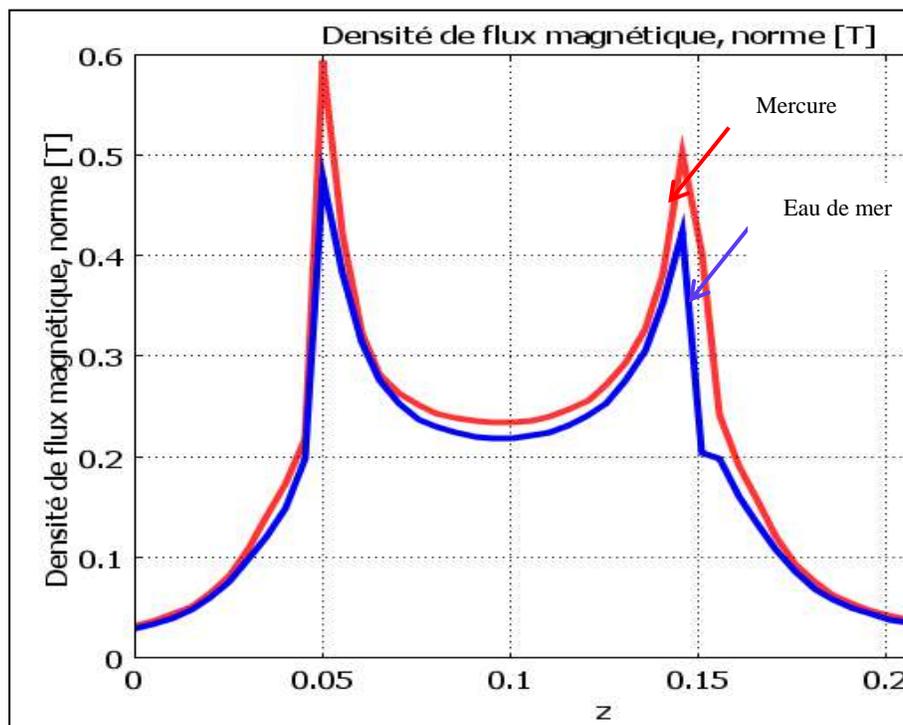
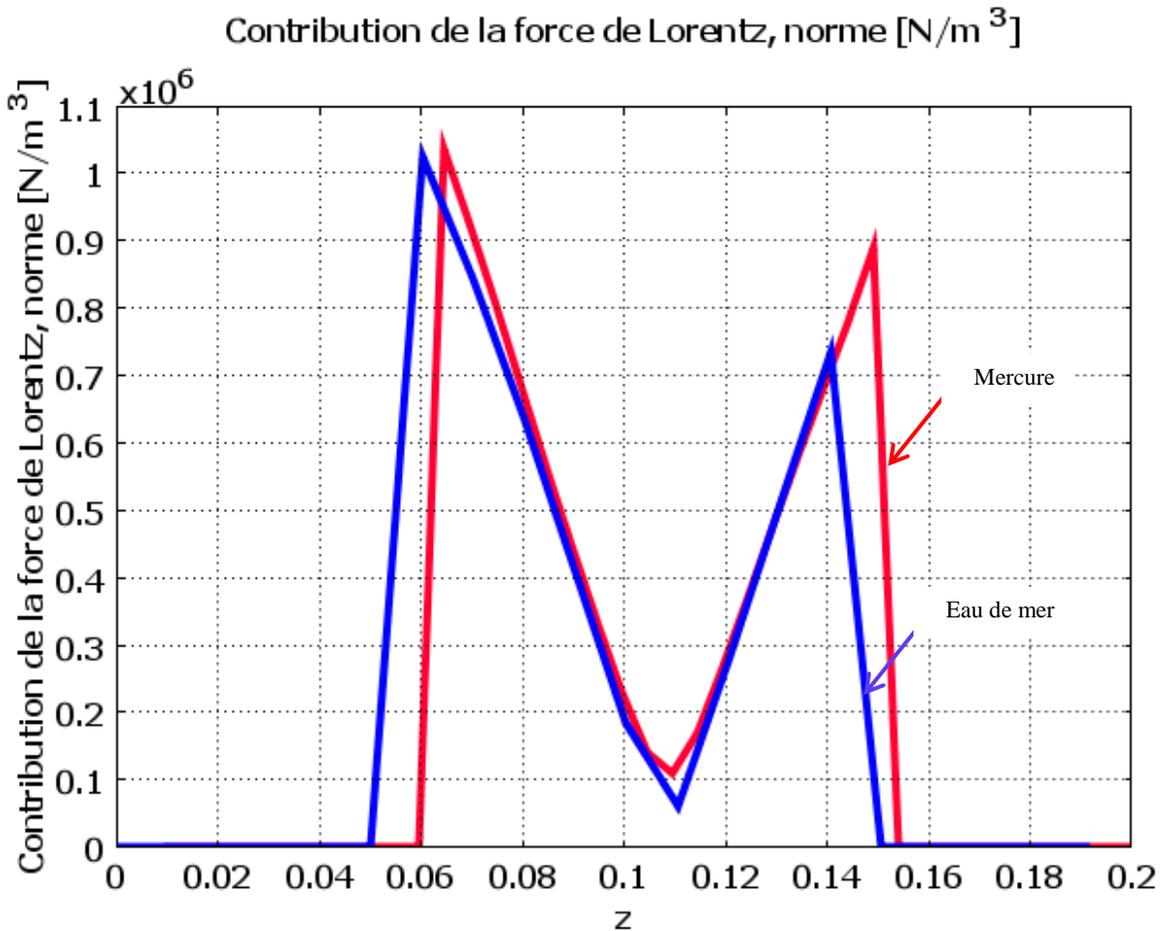


Fig.(3.15) Induction magnétique dans la pompe



**Fig. (3.16) Force électromagnétique dans la pompe**

### III.8 Etude de l'influence du matériau de l'électrode

La conductivité électrique des matériaux des électrodes joue un rôle très important dans les performances de la machine MHD. Dans ce qui suit, on va faire une étude comparative sur l'effet des matériaux des électrodes sur les performances de la pompe MHD à conduction.

Les trois matériaux testés sont :

- Argent ( $63 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
- Platine ( $9,66 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
- Aluminium ( $37,7 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )

La figure (3.17) montre les allures des forces obtenus pour trois matériaux de l'électrode.

D'après les caractéristiques obtenues, on constate que les forces sont proportionnelles aux différentes conductivités électriques.

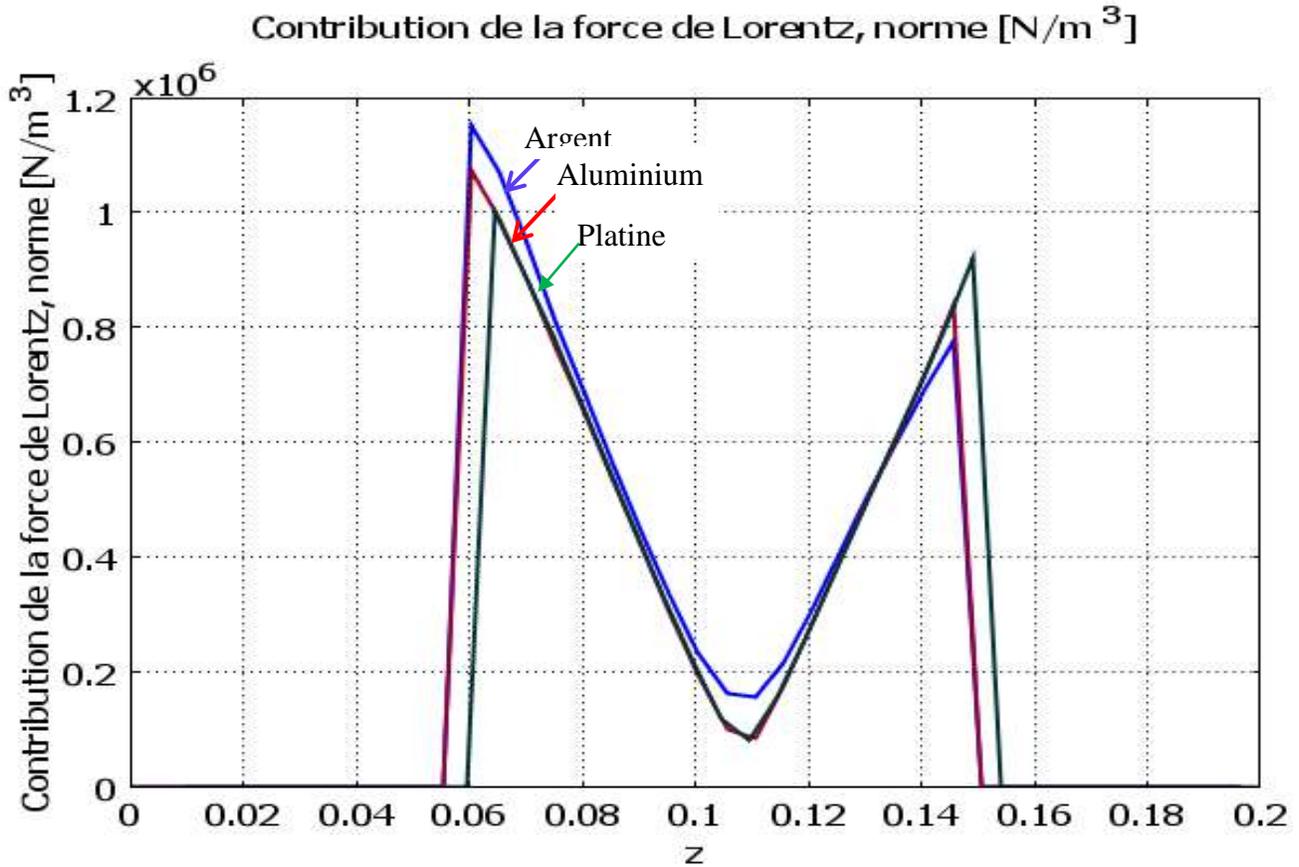


Fig.(3.17) Force électromagnétique pour différents matériaux de l'électrode

### Conclusion:

Dans ce troisième chapitre, et après avoir donné une description sur la pompe MHD à conduction et ces paramètres utilisés, on a présenté des résultats d'une étude comparative de l'influence des fluides utilisés dans cette pompe sur ses performances. On a aussi présenté l'influence des matériaux des électrodes, leurs positions dans le canal

# Conclusion générale

### **Conclusion générale:**

La proche de ce travail est consacrée à la définition des diverses caractéristiques des pompes magnétohydrodynamiques à conduction, ainsi que leur classification et la compréhension de l'action des matériaux liquides sur les performances de ce type de pompe, destinée aux différentes application telles que la génération d'électricité et le pompage des métaux liquides.

La simulation en 2D sur COMSOL nous a permis de déterminer les résultats de potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, ainsi que la force électromagnétique permettant l'écoulement du fluide dans le canal.

Les perspectives d'application pourront être améliorées et poursuivi tant sur le plan théorique que pratique sur les points suivants :

- Une approche numérique en trois dimensions
- L'optimisation de la géométrie de la pompe
- Un couplage des phénomènes magnétohydrodynamique

# Annexe

## Annexe:

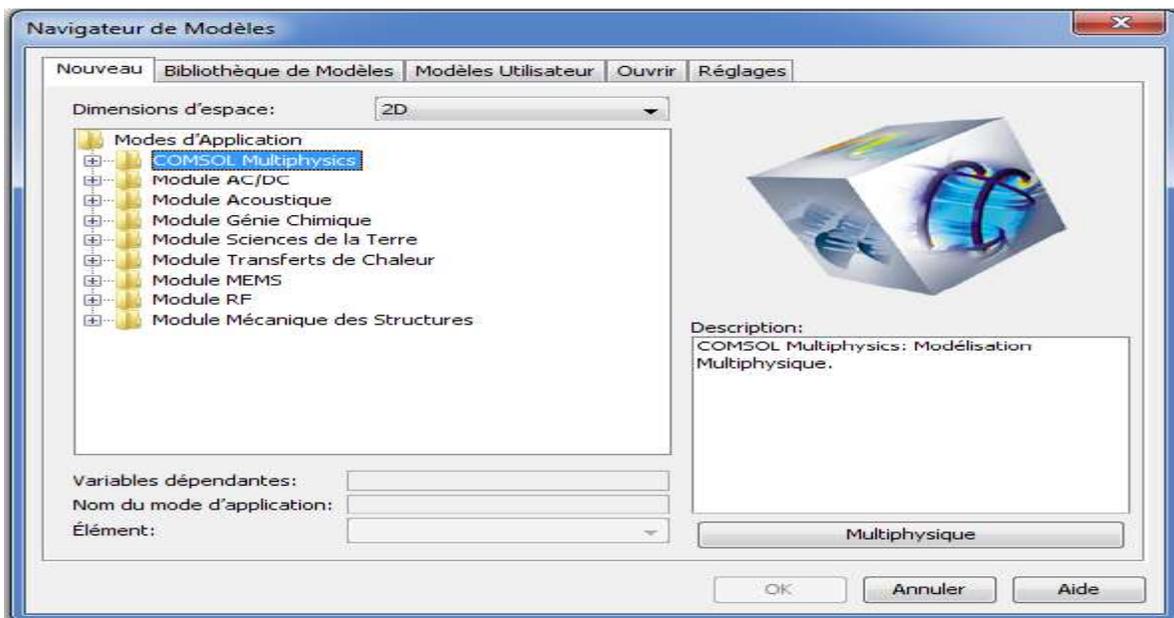
### COMSOL Multiphysics:

Le COMSOL Multiphysics est un **logiciel** de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce **logiciel** permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-

### Utilisation de COMSOL Multiphysics

Lancement du logiciel COMSOL et sur application mode choisir COMSOL Multiphysics > electromagnetics > magnetostatics, cliquez ok pour démarrer.

La fenêtre ci-dessous s'affiche



### Magnétostatique:

La magnétostatique est l'étude des champs magnétiques dans des systèmes où les courants sont stables (ne changent pas avec le temps).



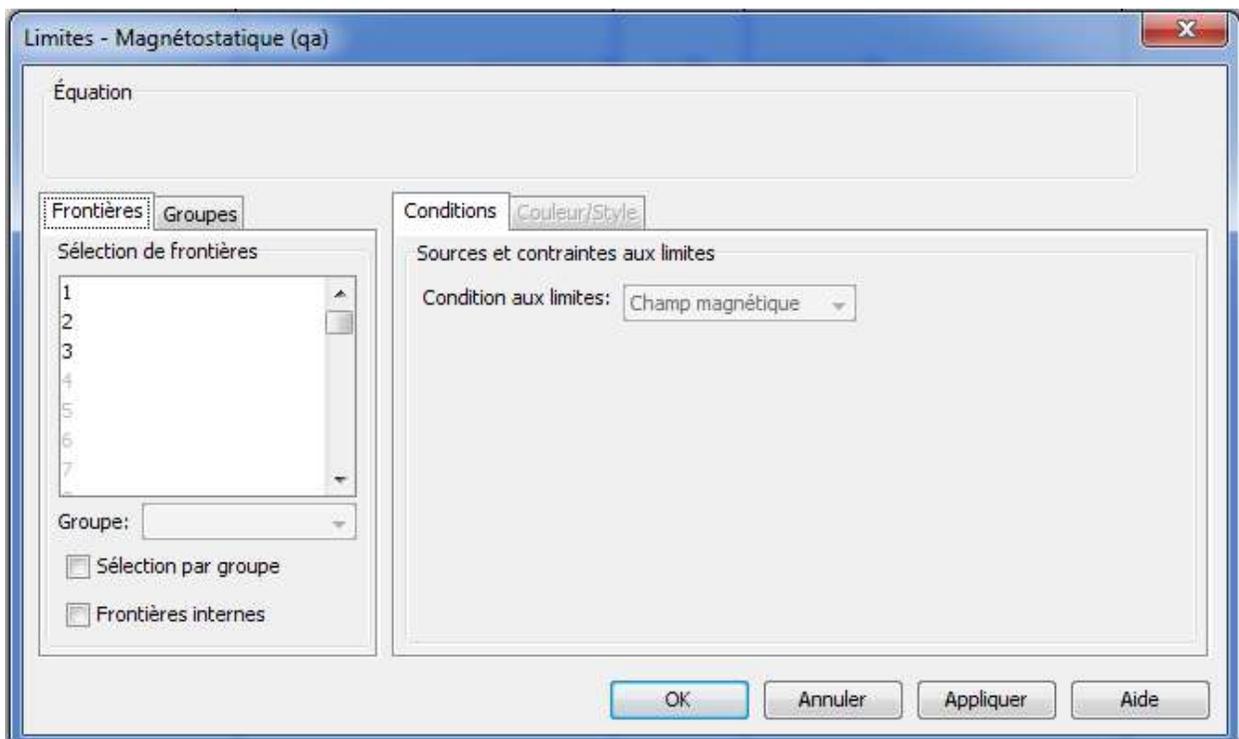
## La géométrie:

- On choisit sur la barre latérale la forme de dessin, dans notre cas ce sont des rectangles
- Double clic sur le rectangle pour faire entrer les dimensions.
- Possibilité de nommer les différents domaines dans la même fenêtre: bobine, circuit magnétique, électrode, canal.
- L'unité est par défaut (mètre)

Ou cliquer dans la barre du dessus sur draw>specify objects>rectangle, puis choisir les dimensions désirées.

## Conditions aux limites:

Dans la même barre cliquer sur physics>boundary settings, sélectionner les limites dans condition.



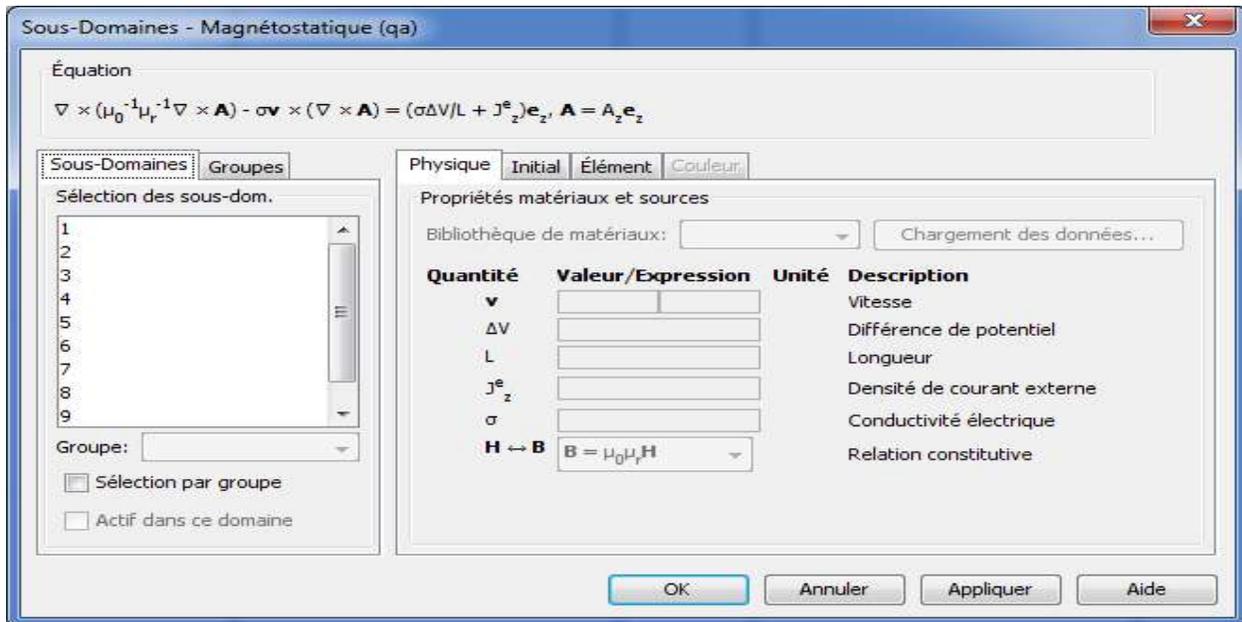
Ou cliquez sur  et sélectionner et même chose

## Introduction des paramètres

Au niveau de la barre transversale choisir physics>subdomain settings pour introduire les paramètres.

Ou cliquer directement sur 

Faire la même chose pour chaque domaine.



## Maillage

Aller sur mesh et choisir le maillage désiré.  

## Solution

Pour avoir la solution du system étudié

Aller sur solve>solve problem ou cliquer directement sur =

## Exploitation des résultats

## **Référence bibliographiques**

- [1] C. A. J. Fletcher et Fletcher « Computational Galerkin Methods: Springer Series in Computational Physics » Janvier 1984
- [2] L. Leboucher, « Optimisation Des Convertisseurs MHD à Induction : Problème Inverse En Electromagnétisme », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, Grenoble, France, 1992.
- [3] N. Bergoug, « Etude de l'influence des Matériaux ferromagnétiques sur les performances d'une machine MHD par la Modélisation Numérique 2D », Thèse de Magister, Université de BATNA, 2006.
- [4] M. Lotfi 'Etude et réalisation d'une diapositive péristaltique pour application médicale', mémoire de Magister en Electrotechnique', Université Hadj Lakhdar Batna, 2010
- [5] L. Maddoui, « Etude et réalisation d'un dispositif péristaltique pour application médicale », Thèse de Magister, Université de BATNA, 2010.
- [6] N. Bergoug,  
« Contribution à l'Etude d'une Machine MHD Annulaire », Thèse de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université de Batna, 2013.
- [7] N. Bennecib, « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2011.
- [8] Nedjoud Bennecib, « Contribution à l'étude des phénomènes d'écoulement dans les générateurs MHD », Thèse de Magister, Université de Batna, 2001
- [9] M. Tawk, « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique » Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011
- [10] N. Piskounov,  
« Calcul différentiel et intégral » Tome 1, Edition MIR, Moscou, 1980.
- [11] G. Daht, G. Touzault,  
« Une Présentation de la méthode des éléments finis », Maloine S.A. Editeur, Paris, 1984.
- [12] F. Shakeri, M. Dehghan, « A finite volume spectral element method for solving magnetohydrodynamic (MHD) equations », Applied Numerical Mathematics 6, pp. 1-23, 2011