

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement



Supérieur Et de La Recherche Scientifique

Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies

Département des Sciences et Technologies

N° d'ordre :

N° de série :

Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique

Thème

*Etude et Simulation d'une Pompe
Electromagnétique*

Par :

MECHERI TAHAR

Jury :

M. Djellouli Tahar

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa

Président

M. Sadouni Redouane

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa

Examineur

M. Bennouna Mohammed Salah

Maître Assistant B

Univ. Ghardaïa

Examineur

M. Arif Mohammed

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2014/2015

REMERCIEMENT

Avant tout louange à ALLAH qui m'a donné

le courage, la détermination,

la volonté et la persévérance d'aller jusqu'au bout.

Je remerciai mon encadreur Mr Arif Mohamed pour la sollicitude avec la quelle il a suivi et Mes remerciements vont également :

*A tous mes enseignants qui ont contribué à mon formation, ainsi que tous les personnels de l'université de Ghardaïa
Spécialement l'encadrement de
Département des Sciences et Technologies.*

A toute ma promotion pour tous les bons moments qu'on a passés ensemble.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à **ma très chère mère**, qui m'a accompagné durant les moments les plus pénibles de ce long parcours de mon éducation, celle qui a fait preuve de ces plus copieux desseins pour me permettre de goûter le fardeau de ce monde et de chercher la voie de ma vie avec ces précieux conseils, donc je devais incessamment être de grande compétence et motivation. Cependant. Je prie ALLAH le Miséricordieux qu'il te portera récompense, car la mienne ne sera guère complète,*

Et te protège et te garde en bonne santé.

*A **mon père** qui a sacrifié sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments rudes de ma vie.*

A ma petite famille chaque un son nom

A mes frères et à mes sœurs

A tous mes oncles et mes tantes

A tous mes amis

A mes professeurs de l'université de Ghardaïa

A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Et a tous ceux qui portent l'Algérie dans leurs cœurs et veulent la construire.

Enfin, à tous ceux qui me reconnaîtront.

Tahar



Résumé

Ce travail présente une étude sur les deux types des pompes électromagnétiques pompe à induction et pompe à conduction.

Après avoir donné un aperçu général sur le principe de fonctionnement pour chaque pompe électromagnétique (conduction, induction) , on donne quelques idées qui concernant la présentation et l'exploitation du logiciel de simulation **FLUX2D**.

Dans le cadre de notre projet on va simuler les paramètres de commande de la pompe qui influent directement sur les variations paramétriques de la pompe en suite on cherche les moyens disponibles pour améliorer ces performances.

Mots clé :

Pompe électromagnétique, induction, conduction, flux2D

Abstract :

This project aims at investigating the study and simulation of the two kinds of electromagnetic pump Induction and Conduction one .

After giving a general idea about the use of the pump and the presentation of the simulation logiciel of FLUX2D.

Our project stand on the simulation of the command parameter pump which effect directly on the pumps parametric variation then we look for the best way to develop the pump performances.

Key words :

electromagnetic pump, Induction, Conduction, flux2D

LISTE DES FIGURES

Figure (1-1) : Coupe Transversale d'une pompe électromagnétique	4
Figure (1-2) : Coupe horizontale d'une pompe électromagnétique	4
Figure (1.3) : Progression de l'onde statorique glissante par rapport au rotor	5
Figure (1-4) : schéma d'un dispositif alimenté en triphasé	7
Figure (1-5) : vue d'une section d'une pompe à induction linéaire (ALIP)	8
Figure (1-6) : la section d'une pompe à induction linéaire (ALIP)	9
Figure (1-7) : schéma de cana rectangulaire	11
Figure (1-8) : schéma du canal annulaire	11
Figure (1-9) : distribution des lignes de champ dans l'induit et l'inducteur de la pompe sans plaques	12
Figure (1-10) : structure d'une pompe électromagnétique annulaire linéaire.	12
Figure (1-11) : la plaque insérée entre les bobines.	12
Figure (1-12) : distribution des lignes de champ dans l'induit et l'inducteur de la pompe avec les plaques.	13
Figure (1-13) : les deux types de laminage.	14
Figure (1-14) : Plaque de circuit primaire	14
Figure (1-15) : culasse développée du circuit primaire.	15
Figure (1-16) : Vu de face de la conduite	15
Figure (2.-1) : Principe de la pompe à conduction	17
Figure (2-2) : pompe à conduction compensée par les membranes de séparation.	17
Figure (2-3) Schémas bloc pour une pompe à conduction	18
Figure (2-4) : pompe à conduction.	19
Figure (2-5) : Pompe électromagnétique à conduction alimentée en courant alternatif	21
Figure (2-6) : Pompe à conduction alimentée en courant continu.	22
Figure(3.1) : Enchaînement des programmes du logiciel FLUX2D	25
Figure (3.2) présentation de la géométrie de la pompe électrique (PREFLU)	26
Figure 3.3 : Présentation des différentes régions de la pompe électromagnétique (PREFLU REGIONS)	26
Figure 3.4 : Présentation du maillage de la pompe électrique (PREFL MAILLAGE)	27
Figure 3.6 : Allure des lignes de champs.	32
Figure 3.7 : présentation des vecteurs du champ dans la conduite.	33
Figure 3.8 : Concentration de l'induction dans le système	33
Figure 3.9 : L'induction magnétique dans l'entrefer.	34

Figure 3.10 : La densité de courant et le déphasage entre les bobines.	34
Figure 3.11 : La densité de courant dans le liquide.	35
Figure 3.12 : La conduite de la pompe à conduction	35
Figure 3.13 : Lignes de courant supposé uniformes	36
Figure 3.14 : Lignes de courant.	37
Figure 3.15 : condition aux limites.	38
Figure 3.16 : La géométrie du système.	39
Figure 3.17: potentiel électrique entre les deux électrodes	40
Figure 3.18 allure de la composante normale du champ électrique	40
Figure 3.19 : Lignes de courant avec la présence de B et la vitesse	42
Figure 3.20 : Circuit équivalent d'une pompe à conduction	42
Figure 4.1 : présentation de la conduite avec le noyau.	43
Figure 4.2: présentation du support des bobines.	44
Figure 4.3 : présentation du déphasage entre les phases.	44
Figure 4.4 : présentation de bobinage	45
Figure 4.5 : présentation de l'électrode.	46
Figure 4.6 : présentation de la conduite	46

SOMMAIRE

RESUME

LISTE DES FIGURES

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I Chapitre I <i>Pompe Electromagnétique à Induction</i>	
I .1 Introduction.....	3
I .2 Principe et Construction.....	3
I .3 Distribution de Flux (Champ Glissant)	5
I .4 Courant Induit Dans Le Liquide	6
I .5 Pompe à Induction Annulaire Linéaire(ALIP)	8
I .6 Les Caractéristiques d'une pompe électromagnétique.....	9
I .6.1 Propriétés Physique de liquide.....	9
I.6.1.1 Revisité.....	9
I.6.1.2 Viscosité	9
I .6.2 le débit volumique	10
I .6.3 La Pression.....	10
I .6.4 Température de métal liquide.....	10
I .7 Les déférant Conduites utilisées dans les pompes.....	10
I.7.1 Canal Rectangulaire à écoulement Axial.....	10
I.7.2 Canal Cylindriques à écoulement Annulaire.....	11
I.8 Concentration de Flux dans les pompes.....	11
I.9 Les Pertes dans la pompe à induction.....	13

I.9.1	Expression de perte dans Stator.....	15
1.9.2	Expression de Perte Dans Conduite.....	15

II *Chapitre II Pompe Electromagnétique à Conduction*

II.1	Introduction.....	16
II.2	Description de la Pompe à Conduction	16
II.3	Principe de fonctionnement	19
II.4	Classification	20
II.4.1	Alimentation en courant alternatif	20
II.4.2	Alimentation en courant contenu	21
II.5	conservation du flux	22

III *Chapitre III Présentation et Exploitation du Logiciel Flux2D*

III.1	Introduction	24
III.2	Présentation De L'architecture Dulongicielflux2D	24
III.3	Domaines d'application.....	24
III.4	Enchaînement Des Programmes De Flux2d	24
III.5	Les Déférents Programmes De Flux2d	25
III.5.1	Construction De La Géométrie Et De Maillage (Preflu)	25
III.5.2	Gestion De La Banque De Matériaux (CSLMAT)	27
III.5.3	Prophy.....	29
III.5.4	Resolution (Resgen)	30
III.5.5	Exploitation Des Resultants (Expgen)	31
III.6	Equations DeCalcul.....	31
III.7	Les Resultats Obtenus Dans L'exploitation DuLogicielFlux2d.....	32

III.7.1 Visualisation Des lignes de champs.....	32
III.7.2 Visualisation Des Vecteurs D'induction Magnetique Dans La Conduite	33
III.7.3 Visualisation De La concentration De L'induction Magnetique Dans La Pompe.....	33
III.8 L'induction Dans L'entrefer.....	34
III.9 La Densité De Courants.....	34
III.9.1 Dans Les Bobines	34
III.9.2 Dans Le Liquide.....	35
III.10 La Pompe À Conduction.....	35
III.10.1 Calcul Analytique.....	35
III.10.1.1 La Resistance.....	36
III.10.1.2 La Conductivité.....	36
III.10.1.3 La Densité De Courant	36
III.10.1.4 L'induction Magnétique.....	36
III.10.1.5 La Force.....	37
III.10.1.6 Les Pertes Dans La Pompe.....	37
III.10.2 Calcul Numérique.....	37
III.10.2.1 Equations Electromagnétiques Regissant Le Systeme.....	38
III.10.2.2 Simulation Sur Flux2d.....	39
III.10.2.3 Calcul De La Résistance Vue Entre Les Deux Electrode.....	41

III.10.2.4 Circuit Equivalent D'une Pompe A Conduction.....	42
---	----

VI *Chapitre IV Simulation et Calcul des Paramètres de Pompe*

VI.1 Introduction.....	43
------------------------	----

VI.2 La Pompe A Induction.....	43
--------------------------------	----

VI.2.1 Les Dimensions De La Pompe.....	43
--	----

VI.2.2 Réalisation De La Conduite.....	43
--	----

VI.2.3 Réalisation De L'inducteur.....	44
--	----

VI.2.4 Le Bobinage.....	44
-------------------------	----

VI.3 La Pompe A Conduction	45
----------------------------------	----

VI.3.1 Les dimensions de la Pompe.....	45
--	----

VI.3.2 Les Electrodes.....	46
----------------------------	----

VI.3.3 La Conduite.....	46
-------------------------	----

VI.4 Essais Sur Les Deux Pompes.....	46
--------------------------------------	----

VI.4.1 La Pompe A Induction.....	46
----------------------------------	----

VI.4.2 La Pompe A Conduction.....	47
-----------------------------------	----

VI.4.3 Comparaison Entre Les Deux Pompes.....	47
---	----

CONCLUSION GENERAL	48
--------------------------	----

ANNEX

BIBLIOGRAPHER

INTRODUCTION GENERALE

L'induction électromagnétique et les forces électrodynamiques permettent de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique ou d'opérer la transformation inverse et de réaliser des générateurs électromagnétiques ou des moteurs.

Les mêmes conversions d'énergie peuvent se faire par l'intermédiaire d'un fluide conducteur qui joue un rôle analogue à celui du rotor des machines ordinaires et elles ont travers un système de tuyauterie. Les pompes à piston donnent alors lieu à la réalisation des pompes électromagnétiques ou des générateurs MHD (magnétohydrodynamique).

Le mot «pompe » est apporté pour un appareil qui force l'eau, l'huile ou autres liquides a travers un système.

Les pompes a piston et les pompes centrifuges sont deux types de pompes bien connues et sont utilisés pour pomper les liquides. Mais pour les métaux liquides, ces pompes rencontrent des difficultés.

Par exemple, les pompes centrifuges sont utilisées pour pomper l'aluminium liquide, mais l'arbre du rotor se dégrade rapidement et doit être remplacé chaque 6 à 10 semaines

Les problèmes rencontrés dans la conception d'une pompe électromagnétique pour transmettre liquide à hautes températures et particulièrement gênant si le métal liquide réagit avec l'air (comme pour le sodium), ou attaque la matière du rotor(comme dans le cas de l'aluminium et l'acier).

Le besoin pour des pompes du métal liquide a augmenté progressivement, il y a deux domaines principaux d'application: L'un est le transport de la chaleur d'une source tel qu'un réacteur nucléaire, l'autre est le transport des métaux fondus.

L'utilisation des pompes pour transporter les métaux liquides a encouragé l'investissement et le développement des pompes électromagnétiques qui n'ont pas de partie en mouvement dans le métal liquide.

La force de pompage dans une pompe électromagnétique ne vient pas d'un piston ni d'un rotor en mouvement dans le liquide. Elle est exercée sur le métal liquide (qui est conducteur d'électricité), par l'interaction d'un champ magnétique et un courant ($F=J\wedge B$), le courant peut être produit dans le métal par une ddp (différence de potentiel) si la pompe à conduction ou induit par un champ variable ($e=-d\phi/dt$).

L'importante caractéristique commune à toutes les pompes électromagnétiques est l'inutilité d'avoir des parties en mouvement dans le métal liquide.

Notre travail consiste à l'étude de la conversion magnétohydrodynamique et cela par la simulation d'une pompe électromagnétique. Il s'agit de réaliser une pompe à induction et une pompe à conduction.

Dans le premier chapitre de notre mémoire nous allons aborder la modélisation de la pompe à induction.

Dans le deuxième chapitre nous allons faire une étude théorique sur la pompe à conduction.

Le troisième chapitre est consacré aux :
Calculs à l'aide d'un logiciel de conception assisté par ordinateur pour la pompe à induction en suite des calculs sur la pompe à conduction.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons les principales étapes de la réalisation des deux types de la pompe électromagnétique.

En fin nous terminerons l'étude par une conclusion et une comparaison entre les deux types de pompe.

Chapitre I

Pompe électromagnétique à Induction

POMPE ELECTROMAGNETIQUE A INDUCTION

I. 1 Introduction :

Une linéaire à induction, utilisée comme convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement, se compose généralement de deux inducteurs plans, comportant des enroulements d'excitation polyphasés et d'un induit constitué soit par une bande métallique solide (moteur linéaire) soit par un conduit véhiculant le métal liquide (pompe ou générateur). Le principe de fonctionnement est celui du couplage magnétique asynchrone, les enroulements d'excitation créent un champ magnétique glissant qui engendre dans l'induit (équivalent à la partie rotorique d'une machine tournante classique) des F.E.M.

L'interaction des courants induits et du champ inducteur se traduit par une poussée qui est motrice lorsque la vitesse de déplacement Y de l'induit est inférieure à celle F_c du champ, et résistante dans le cas contraire.

I. 2 Principe et construction :

En considérant les schémas de la figure (1-1) et figure (1-2) qui représentent une coupe transversale de la pompe électromagnétique.

La pompe électromagnétique (1) comporte un conduit tubulaire (3) destiné à recevoir un matériau conducteur pouvant circuler dans le conduit (3) autour du noyau (4) et un inducteur (2) disposé de manière coaxiale autour du conduit (3). L'inducteur (2) comporte un circuit magnétique (15) formé de peignes (18) en tôles feuilletées et des bobinages (14) disposés dans des encoches (5) annulaires ménagées dans le circuit magnétique (15).

Les encoches (5) sont séparées les unes des autres par des dents (12), les dents (12) de l'inducteur (2) ont des longueurs dans la direction axiale plus faibles dans la partie centrale (2a) de l'inducteur (2) que dans les parties d'extrémité (2b, 2c), les encoches (5) ont des profondeurs plus faibles aux extrémités (2b,2c) que dans la partie centrale (2a) et renferment des bobinages (14) ayant un plus faible nombre de spires, les bobinages (14) sont reliés chacun à une phase d'une source de courant polyphasé.

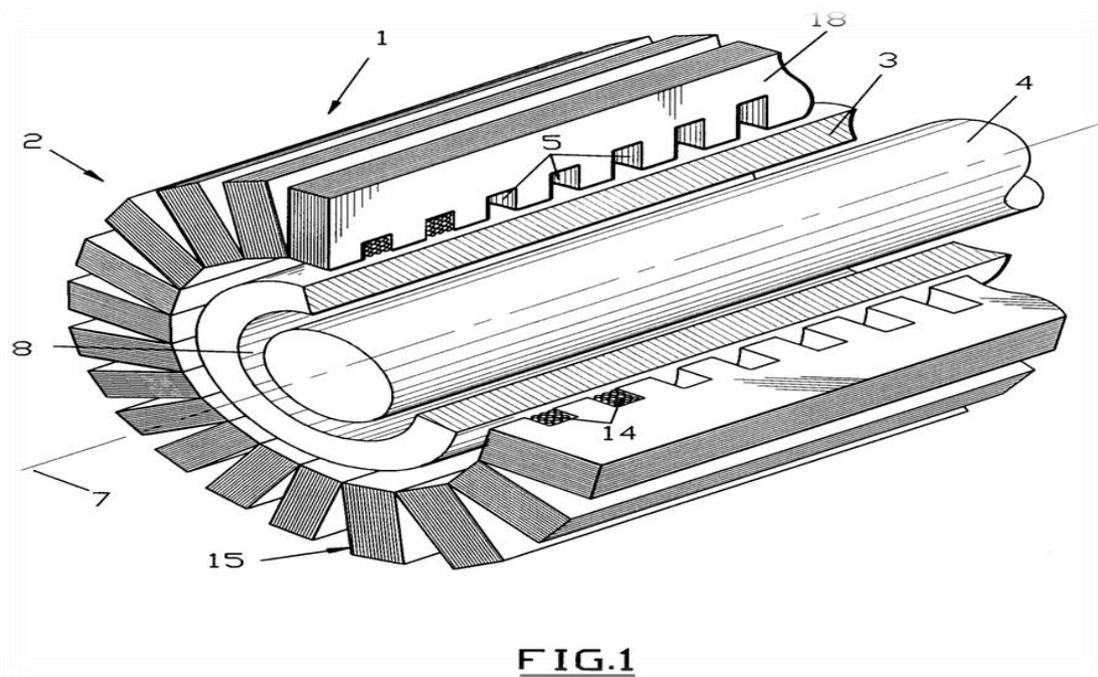


Figure (1-1) : Coupe Transversale d'une pompe électromagnétique

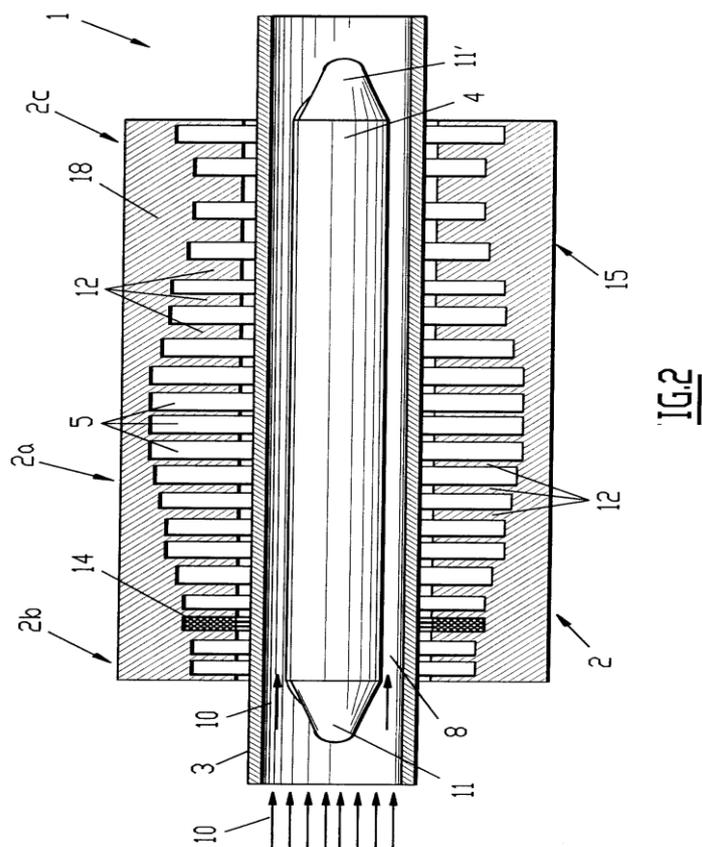


Figure (1-2) : Coupe horizontale d'une pompe électromagnétique

I. 3. Distribution de flux (champ glissant):

Les bobinages qui sont répartis suivant la direction axiale de la pompe électromagnétique sont reliés chacun à une phase d'une source de courant polyphasé, de manière que l'inducteur crée un champ glissant dans la direction axiale, le long du conduit tubulaire.

Les lignes de force des champs créés se referment par l'intermédiaire du noyau magnétique, à l'intérieur du conduit.

L'effet conjugué des courants induits et du champ glissant produit des forces de direction axiale et entraîne le matériau conducteur dans la direction axiale.

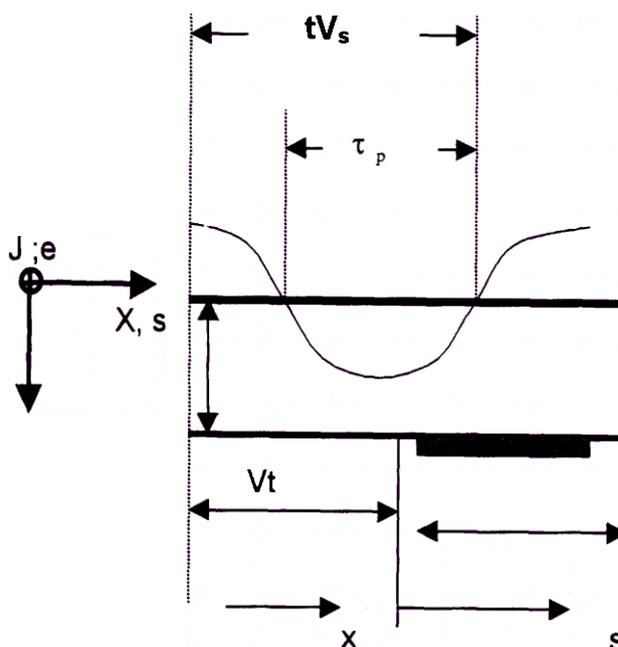


Figure (1.3) : Progression de l'onde statorique glissante par rapport au rotor

L'excitation statorique est assimilée à une nappe de courant [3] définie par : pour un point du rotor situé a une distance s de son excitation et de son extrémité on peut écrire :

$$J_s = J_s \sin [\pi s / P - g \omega t] = \text{IM} \left[J_s \exp j(\pi s / P - g \omega t) \right] \tag{1-1}$$

Pour application du théorème d'ampère :

$$\int (J_S + J_R) d_s = \frac{e}{\mu_0} b d_s \quad (1-2)$$

$$\frac{\delta b}{\delta s} \cdot \frac{e}{\mu_0} = j_R + j_S \quad (1-3)$$

En faisant appel aux équations 1 et 4, nous obtenons une expression en fonction seulement du courant J,

$$\frac{e}{\mu_0} \frac{\partial^2 b}{\partial s^2} = \frac{\partial j_s}{\partial s} + \frac{1}{\rho_r} \left(\frac{\partial b}{\partial t} \right) \quad (1-4)$$

L'induction magnétique best de la forme :

$$b = B \cdot \exp j(-g\omega t - \frac{\pi s}{\tau_p}) \quad (1-5)$$

De (1.6), l'équation (1.5) devient:

$$\left(\frac{e}{\mu_0} \right) \left(\frac{d^2 B}{ds^2} \right) + jg\omega \frac{B}{\rho_r} = j \left(\frac{\pi}{\tau_p} \right) J_s \cdot \exp \left(\frac{\pi \cdot s}{\tau_p} \right) \quad (1-6)$$

I. 4 Courant Induit dans le liquide:

On crée ainsi des courants induits dans le matériau conducteur à l'intérieur du conduit, si bien que le matériau est mis en circulation dans le sens axial, par l'effet conjugué des courants induits et du champ magnétique glissant de l'inducteur, de manière à faciliter la fermeture des lignes de champ à l'intérieur du conduit tubulaire, en particulier dans le cas où la machine électromagnétique est utilisée comme pompe, on a proposé de placer un noyau magnétique dans une disposition concentrique à l'intérieur du conduit.

Chacun des bobinages est relié à une phase d'une source de courant alternatif polyphasée.

Les bobines 1,1',1'',1''' appareil à la phase 1

Les bobines 2,2',2'',2''' appareil à la phase 2

Les bobines 3,3',3'',3''' appareil à la phase 3

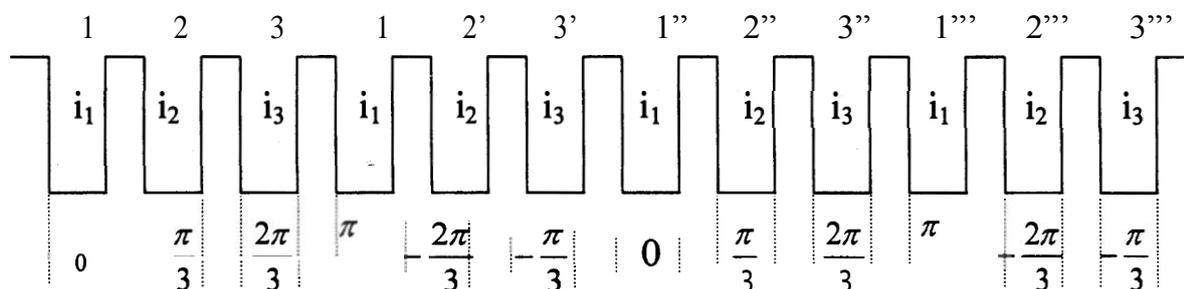


Figure (1-4) :schéma d'un dispositif alimenté en triphasé

De cette manière, Les courants circulent dans les spires des bobinages dans une direction circonférentielle de l'inducteur, autour du conduit.

- Si on a un enroulement linéaire .on a un champ glissant linéaire qui à la vitesse P :

$$\theta_e = p\theta_m \quad (1-7)$$

θ_m : L'angle mécanique.

θ_e : Angle électrique

A cause de la variation de la réluctance on a une variation de champ dans l'espace et dans le temps.

La forme des courants d'alimentation et de l'induction magnétique est :

$$I_1 = I_m \cos wt \quad (1-8)$$

$$I_2 = I_m \cos\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1-9)$$

$$I_3 = I_m \cos\left(wt - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (1-10)$$

$$B_1 = B_m \cos wt \quad (1-11)$$

$$B_2 = B_m \cos\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1-12)$$

$$B_3 = B_m \cos\left(wt - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (1-13)$$

A cause de la variation du champ dans l'espace et dans le temps on aura :

$$B_1 = B_m \cos wt \cos xp \quad (1-14)$$

$$B_2 = B_m \cos\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(px - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1-15)$$

$$B_3 = B_m \cos\left(wt - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(px - \frac{4\pi}{3}\right) \tag{1-16}$$

$$B_T = B_T + B_T + B_T \tag{1-17}$$

$$B_T = b(t, x) = \frac{3}{2} B_m \cos(wt - Px) \tag{1-18}$$

B_T en fonction de la longueur d'onde λ :

$$\lambda = VT = \frac{2\pi}{P} \tag{1-19}$$

$$B_T = b(t, x) = \frac{3}{2} B_m \cos\left(wt - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) \tag{1-20}$$

C'est à dire le champ est fixé dans un repère se déplaçant à la vitesse w/p par rapport aux enroulements.

I. 5 Pompe à Induction Annulaire Linéaire(ALIP):

La Pompe à induction linéaire (ALIP) se présente comme une variante de moteur à induction linéaire dans le quel le stator qui est feuilleté est enroulé sous forme de tube dans l'axe est parallèle à la direction du mouvement.

Les lignes de champ passent à travers la conduite du métal liquide a fin de se fermer (comme il est présenté dans la figure (1-4)).

Les courants induits dans le métal liquide circulent en bande centrée sur l'axe de la pompe. L'action du pompage est produite par l'interaction d'un champ glissant généré par le stator et des courants induits produits par ce dernier dans le métal liquide.

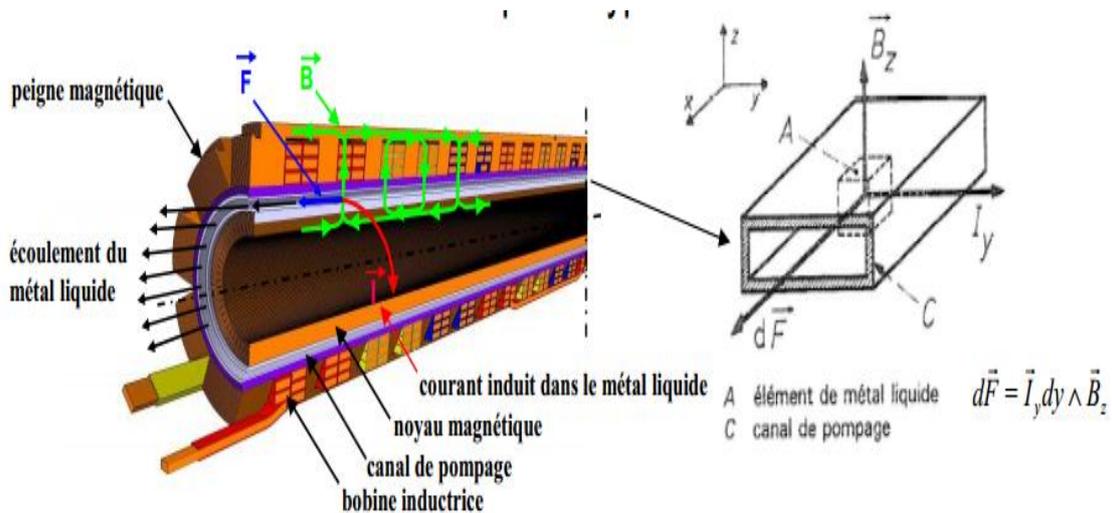


Figure (1-5) : vue d'une section d'une pompe à induction linéaire (ALIP)

La pompe à induction fonctionne sur le même principe que le moteur asynchrone à induction. Les bobines dans chaque section sont connectées et alimentées de telle façon à créer une onde magnétique glissante.

Cette onde glissante générée par des bobines statiques induit des courants dans le fluide. L'interaction entre l'onde glissante et les courants induits produit la force de poussée. Dans la pompe à induction annulaire linéaire, la conduite du métal liquide a une forme annulaire.

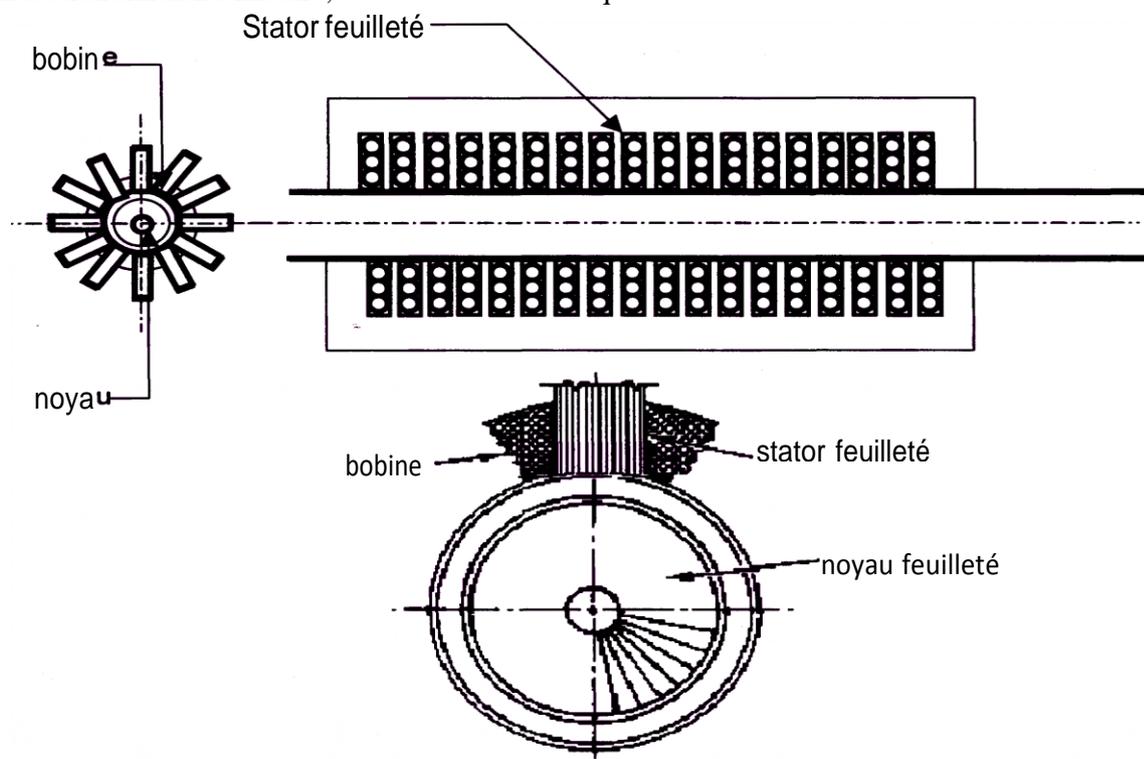


Figure (1-6) : la section d'une pompe à induction linéaire (ALIP)

I. 6 Caractéristiques d'une pompe électromagnétique

I. 6.1 Propriétés physique du liquide :

I-6-1.1 Résistivité

La résistivité d'une substance est définie comme la résistance entre les surfaces opposées d'un cube de la matière. La résistivité d'un conducteur métallique augmente avec la température.

Cette augmentation de la résistance du conducteur nécessite une augmentation dans la tension pour maintenir un courant constant.

I.6.1.2 viscosité

L'effet de la viscosité est très remarquable à des températures du métal liquide jusqu'à approximativement 400°K. La viscosité est maximale à la température fondante qui est la cause des pertes de la pression hydraulique.

I. 6.2 Le débit volumique :

Le débit volumique c'est la quantité de fluide qui s'écoule ou qui est fournie dans une surface par unité de temps. Le débit volumique est un facteur important dans la conception de la conduite d'une pompe électromagnétique.

I. 6.3 La pression :

Les pompes à conduction peuvent produire une pression plus forte que les pompes à induction.

Le courant actif dans une pompe à conduction, par comparaison à une pompe à induction, est fourni d'une source externe qui est densité du courant dans les électrodes de la pompe à conduction que dans une pompe à induction.

I. 6.4 Température du métal liquide :

La température du métal liquide influe sur le choix d'une pompe électromagnétique, la résistance dans le métal liquide varie progressivement en fonction de la température.

Les bobines inductrices doivent être isolées thermiquement du métal liquide et refroidies.

I. 7 Les différentes conduites utilisées dans les pompes :

I. 7.1 Canal rectangulaire à écoulement Axial:

Le métal liquide progresse longitudinalement à une vitesse V dans un canal de section rectangulaire en matériaux isolant, le champ magnétique est produit par des bobines disposées par paires de part et d'autre des deux faces du canal et par phase successive, ces bobines sont reliées à l'extérieur au réseau électrique triphasé.

Le champ magnétique est transversal et constitue une onde progressive qui se déplace axialement à la vitesse V_s .

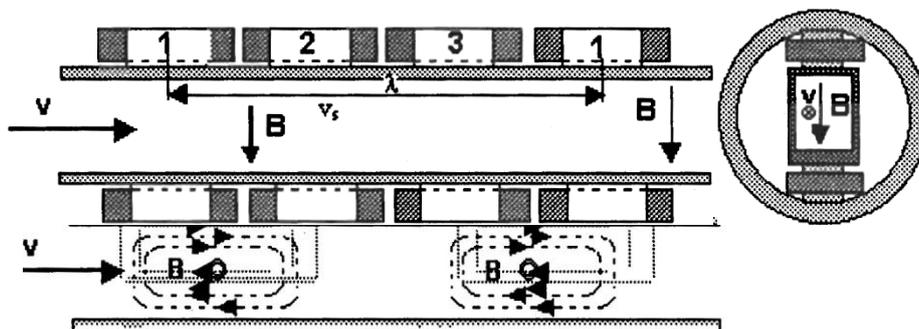


Figure1 7: schéma du canal rectangulaire.

I. 7.2 Canal cylindrique à écoulement annulaire:

Le système se compose de deux pièces magnétiques, un cylindre creux portant à l'intérieur des rainures pleines, le fluide circule longitudinalement dans l'intervalle annulaire, le bobinage est triphasé comme dans le cas précédent, le champ magnétique est sensiblement radial dans l'intervalle annulaire si celui-ci n'est pas trop grand, il progresse dans les directions axial comme le fluide. Les courants induits dans le liquide forment des nappes de révolution.

I. 8 Concentration de flux dans les pompes :

La figure(1-8) montre une pompe électromagnétique de type annulaire–linaire, lorsque la pompe est alimentée en tension triphasée, le champ magnétique se propage dans le canal contenant le métal liquide.

Si nous analysons la distribution des lignes de champ dans l'inducteur nous constatons qu'une grande partie de flux se ferme sans atteindre l'induit, cela se traduit par une faible force de poussée et une réactance de fuite importante (un mauvais facteur de puissance)

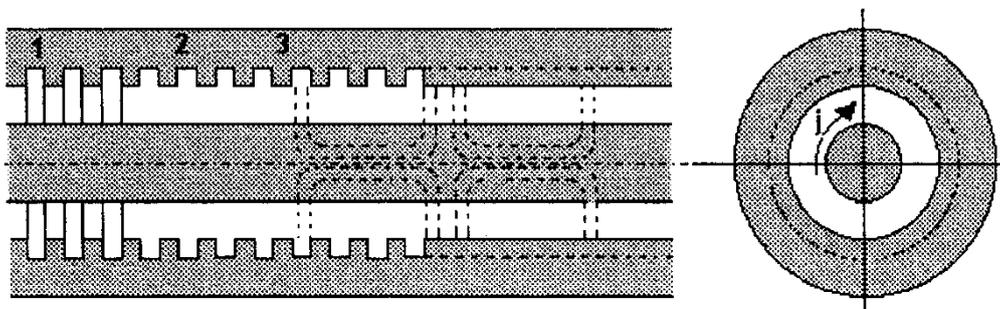


Figure (1-8) : schéma du canal annulaire.

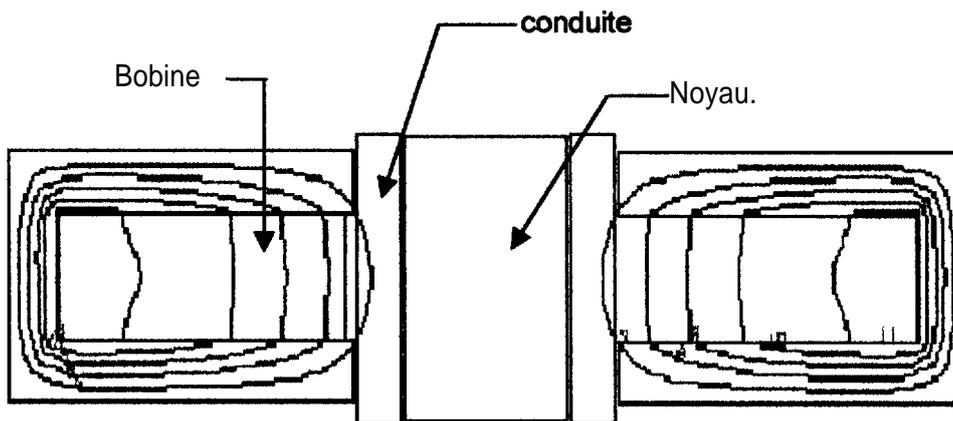


Figure (1-9): distribution des lignes de champ dans l'induit et l'inducteur de la pompe sans plaques.

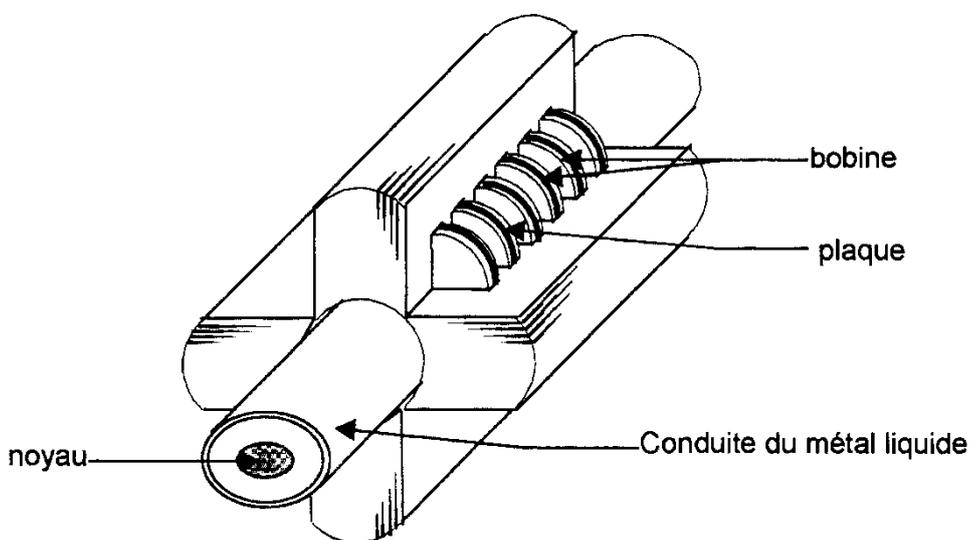


Figure (1-10): structure d'une pompe électromagnétique annulaire linéaire.

Pour remédier à ce problème il faut diminuer la largeur de la conduite, mais ce la se traduit par un faible débit.

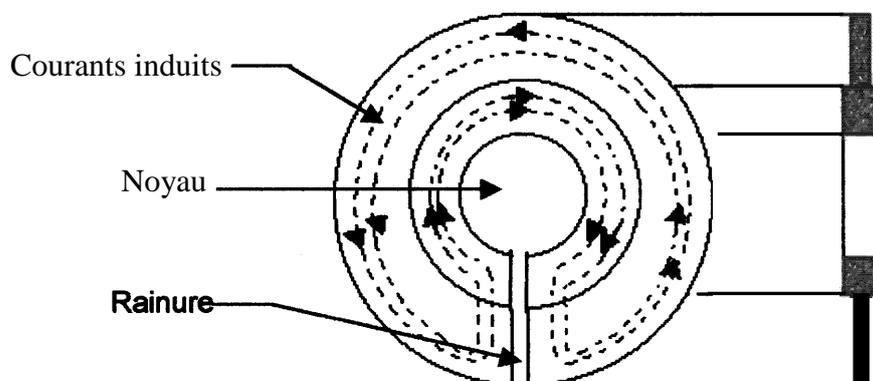


Figure (1-11): la plaque insérée entre les bobines.

Nous pouvons utiliser la technique de concentration de flux, cette technique nécessite l'utilisation des plaques en cuivre entre les bobines d'excitation, la plaque qui est insérée entre les bobines d'excitation dans l'encoche est indiquée dans la figure(1-10).

La plaque en cuivre a une forme annulaire avec une rainure dans la direction radiale pour diminuer les fuites du flux entre les bobines, l'application d'un champ extérieur entre une induction des courants de Foucault, qui sont permis à écouler à travers les trous d'air par les rainures, les courants de Foucault ne laissent pas le champ magnétique passer à travers la plaque conductrice, ce qui induit à repousser le champ dans le rotor (concentration du champ), la densité du courant devient plus grande en s'approchant du noyau (à l'intérieur).

Pour réduire la densité des courants de Foucault et les chutes ohmiques on utilise des plaques en forme de T au lieu des plaques utilisées ci-dessus.

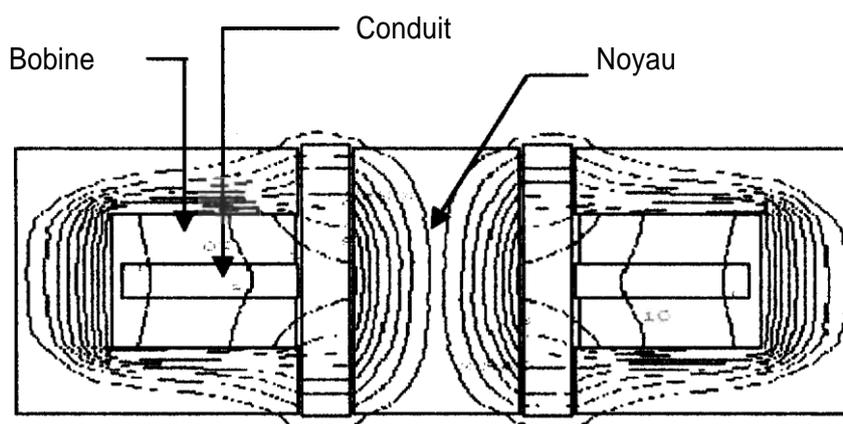
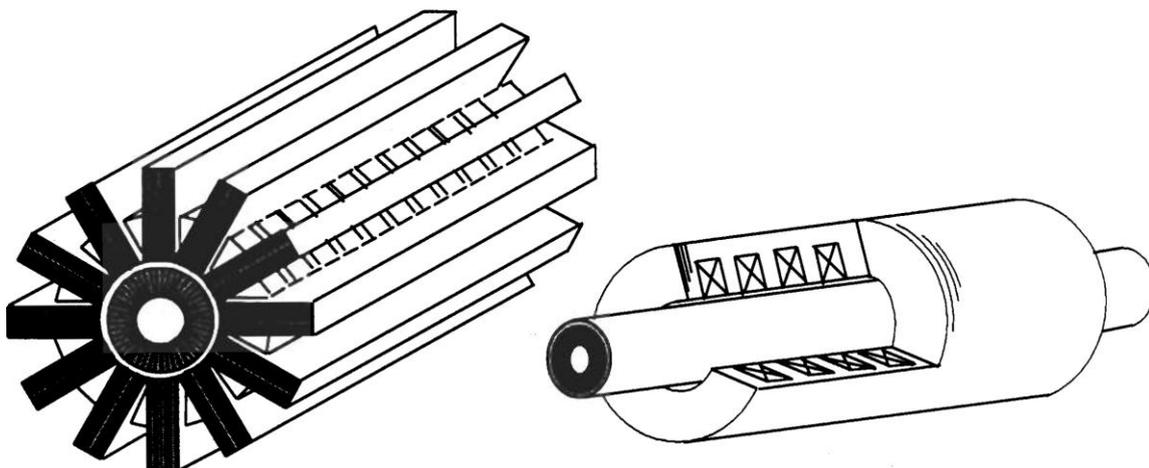


Figure (1-12): distribution des lignes de champ dans l'induit et l'inducteur de la pompe avec les plaques.

I.9 Les pertes dans la pompe à induction :

Les courants induits dans les circuits magnétiques du primaire et secondaire sont déterminés selon une topologie électromagnétique de la pompe, pour tous les systèmes électromagnétiques travaillant à flux variable, le circuit magnétique doit être feuilleté pour réduire les pertes.

On note qu'il existe deux types de laminage (Longitudinal, transversal).



G: Laminage longitudinal.

Q: Laminage transversal.

Figure (1-13): les deux types de laminage.

Avec ce feuilletage qui introduit des entrefers inter plaques nous assisterons à une augmentation de la réluctance.

Les pertes par courant de Foucault peuvent être réduites en utilisant des dents (plaque) avec fente. De cette manière le trajet des courants est augmenté.

Les pertes dans le circuit primaire (plaque et culasse) sont:

$$P_1 = P_p + P_c$$

P_1 : pertes du courant de Foucault dans le circuit magnétique primaire.

P_p : pertes du courant de Foucault dans les plaques formant les dents du stator.

P_c : pertes du courant de Foucault dans la culasse.

Si on tient compte des flux de dispersion magnétique au niveau des bobines du stator, on introduit le coefficient d'Hopkinson ν .

$$\varphi_c = \nu \varphi_e$$

$r_s - r_c$: épaisseur de la culasse.

φ_c : flux dans la culasse.

φ_e : flux dans l'entrefer.

φ_r : flux dans le rotor.

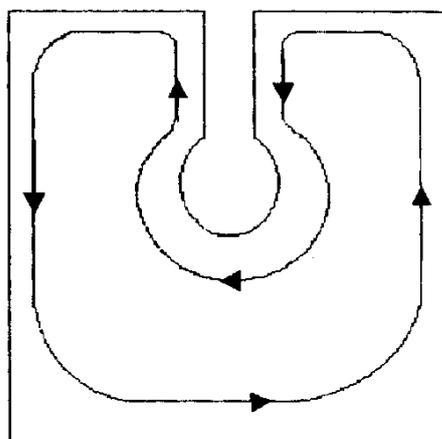


Figure (1-14): Plaque de circuit primaire

I.9.1 Expression de perte dans Stator

Pour le calcul des pertes dans le stator nous limitons les calculs aux pertes par courants induits dans la culasse.

$$P_c = \frac{\pi^3 f^2}{6\rho} (r_s - r_c)(r_s + r_c)^3 B_c l_c \tag{1-21}$$

Avec B_c : l'induction magnétique dans la culasse.

I.9.2 Expression de perte dans Conduite.

$$dP = B^2 \pi^3 f^3 L r^3 dr \text{ Alors } P = B^2 \pi^3 f^2 L \frac{r^4}{4} \tag{1-22}$$

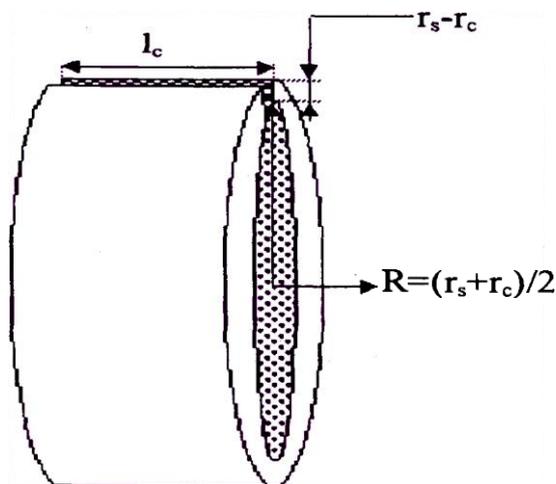


Figure (1-15): culasse développée du circuit primaire.

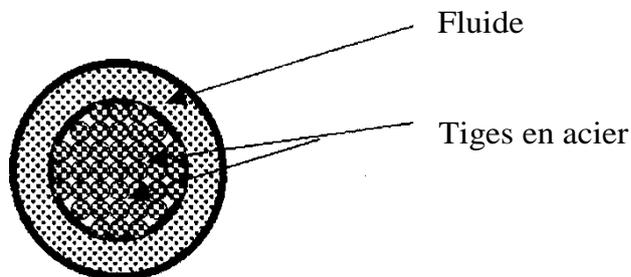


Figure (1-16): Vu de face de la conduite

Pour diminuer les pertes et annuler la force exercée sur le noyau on utilise le noyau feuilleté (voir la figure (1-16)).

Chapitre I I

Pompe

électromagnétique

à conduction

II.1 Introduction:

Une pompe à conduction destinée au pompage de liquides diélectriques, ainsi qu'une adaptation particulière destinée au transport de masse de liquides monophasés, ne requiert aucune injection directe de charges électriques dans le fluide.

II .2 Description de la pompe à conduction

Dans les pompes électromagnétiques à conduction, pour que le métal liquide est mis en circulation sous l'effet d'un champ magnétique et le courant électrique, la force résulte entre eux est perpendiculaire et traverse un canal ascendant de pompage du métal liquide.

Le type le plus simple d'une pompe électromagnétique est illustré en figure(2-1), elle est basée sur le principe de conduction. Le métal liquide coule dans une conduite rectangulaire passant entre deux pôles d'un aimant.

Le courant passe à travers le liquide dans la région du champ grâce à deux électrodes qui sont connecté aux bords de la conduite. Voir la figure (2-2).

Dans ce type de pompe on peut utiliser soit une alimentation en courant continu ou en courant alternatif, mais dans ce dernier le circuit magnétique est feuilleté.

Dans chaque cas il y a des courants d'extrémités qui suivent des trajectoires courbées qui dépasse la région d'application de champ B.

Il est usuel de limiter et utiliser ces courants en étendant le champ magnétique au- de la des électrodes.

Ou bien, dans une pompe plus grande ou la largeur b peut être égale ou plus grand que la largeur de l'électrode c , il serait préférable d'insérer des membranes de séparation de type creux sans gêner la circulation du fluide. Ou bien deviser les régions d'entrée et de sortie en plusieurs canaux indépendants.

Cette méthode pourrait être efficace dans une grande pompe. Mais exige une augmentation appréciable dans la longueur de la conduite.

La largeur b est préférable plus petite ou la moitié de la longueur c de l'électrode (voir la figure(2-2)).

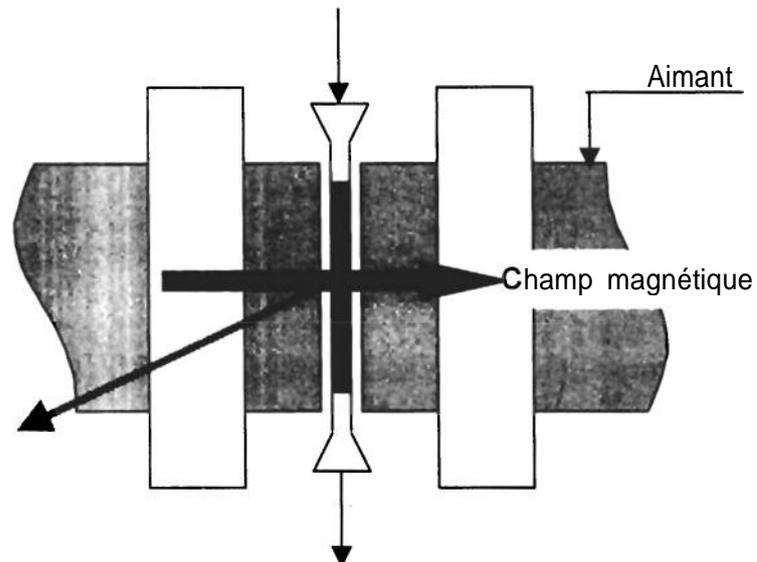


Figure (2.-1): Principe de la pompe à conduction

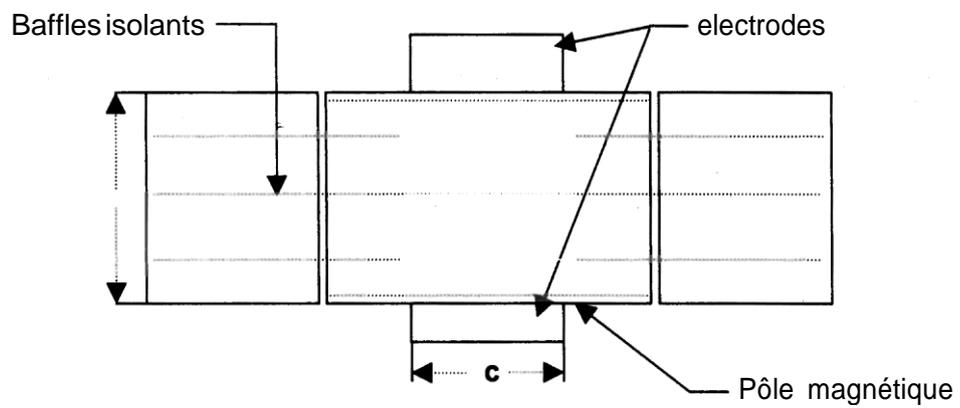


Figure (2-2) :pompe à conduction compensée par les membranes de séparation.

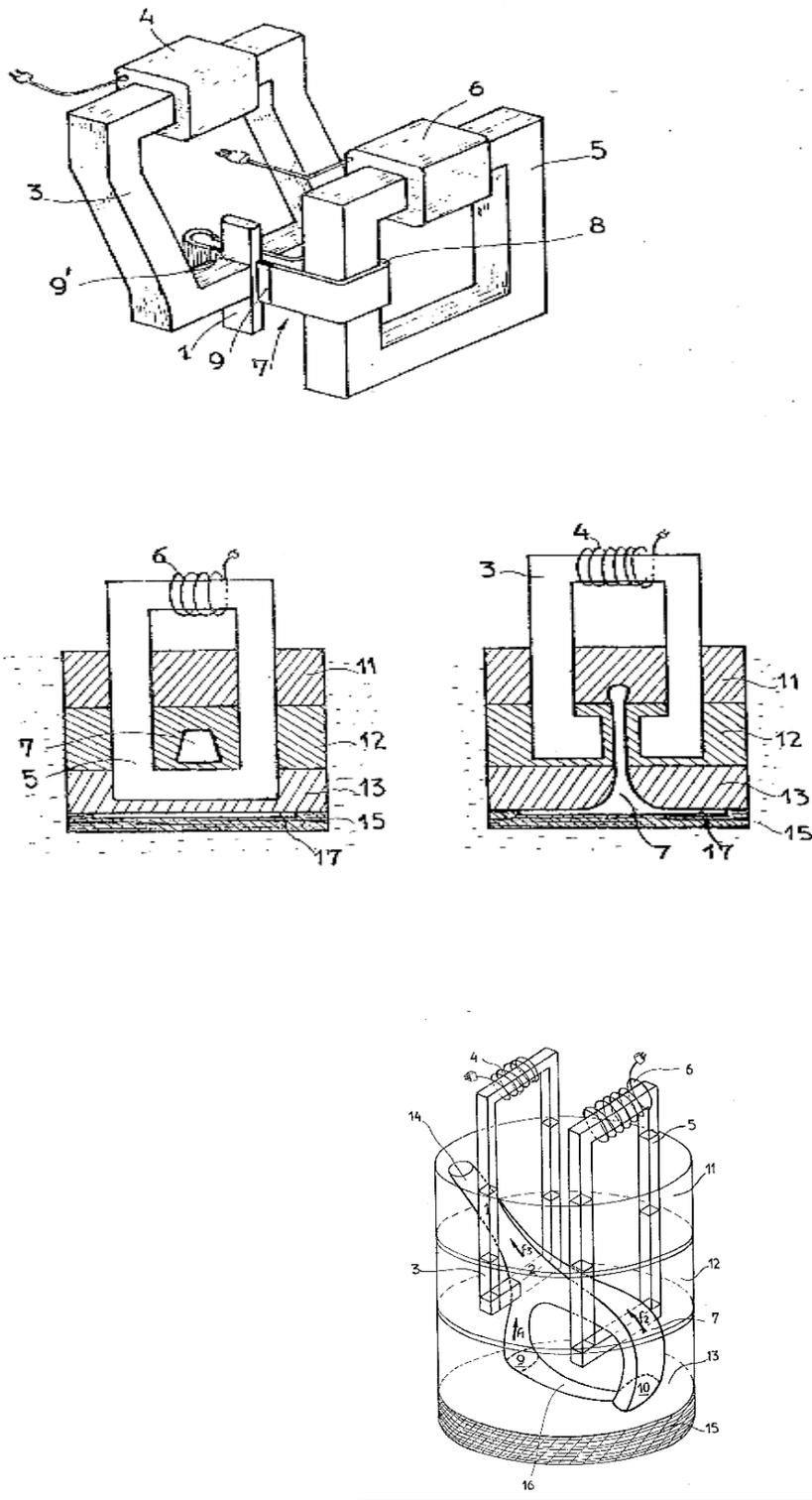


Figure (2-3) Schémas bloc pour une pompe à conduction

Un premier circuit magnétique (3) comportant une branche horizontale noyée dans le matériau réfractaire et dotée d'un entrefer (2).

Un deuxième circuit magnétique fermé (5), doté d'une bobine d'alimentation (6) et comportant une branche horizontale noyée dans le matériau réfractaire ménagée dans le matériau réfractaire, un canal ascendant (1) de pompage du métal liquide traversant l'entrefer (2) du premier circuit magnétique (3) et une spire (7) renfermant du métal liquide et communiquant avec le canal ascendant (1) de pompage à l'endroit où celui-ci traverse l'entrefer (2) et enlaçant l'une des branches du deuxième circuit magnétique (5), caractérisée par le fait que la spire (7) est constituée par un canal en forme de U renversé et dont le plan médian est un plan vertical passant par l'entrefer (2) du premier circuit (3) et que les jambes du U plongent dans le bain de métal, pour fermer la spire, l'une des jambes étant en fait constituée d'un tronçon du canal ascendant (1) et l'autre jambe enlaçant partiellement la branche horizontale du deuxième circuit(5).

II.3 Principe de fonctionnement:

Nous allons étudier le principe de fonctionnement de la pompe à conduction sur un exemple très schématique d'un système particulièrement simple.

Dans une tuyère rectangulaire et horizontale [2], peut circuler un fluide conducteur incompressible, le mouvement d'ensemble ayant lieu parallèlement à (ox). Le rectangle de section droite a des cotés de longueur (a) et (b), parallèle respectivement à (oy) et (oz), dans toute la tuyère règne un fort champ magnétique d'origine extérieur (aimant), uniforme et parallèle à (oy). Les faces normales à (oz) constituent des électrodes reliées à des circuits extérieurs de façon que des courants de densité pratiquement uniforme j parallèle à (oz) circulent dans le fluide. Si le champ magnétique de ces courants est négligeable devant B , le mouvement du fluide (qui, en principe est toujours tourbillonnaire) peut avoir lieu à peu près par tranches planes. La vitesse est alors sensiblement uniforme et parallèle à (ox), mais elle peut dépendre du temps.

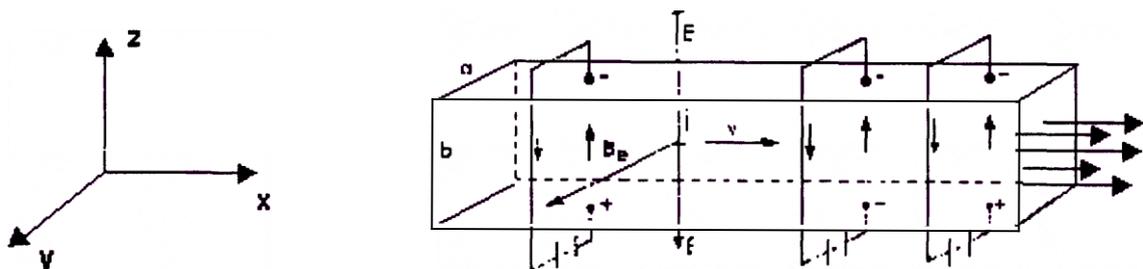


Figure (2-4) : pompe à conduction.

Les circuits extérieurs sont alimentés par des générateurs de courant continu. Ils entretiennent les courants et fournissent de l'énergie au système. Les forces de Laplace font circuler le fluide.

Il règne dans le fluide un champ électrostatique E uniforme, verticale dirigé vers le haut et un champ électromoteur E_m uniforme vertical et dirigé vers le bas. Au champ E_m , qui est inférieur à E , correspondent des forces contre électromotrices qui s'opposent aux forces électromotrices des générateurs.

On alimente la bobine 6 en courant alternatif de façon à induire un courant alternatif dans la boucle 7. Cette boucle 7 est constituée de métal liquide contenu dans une enveloppe réfractaire 8. Cette enveloppe 8 est reliée au canal 1 par deux embouts 9 et 9' comportant chacun une ouverture mettant en communication l'intérieur de l'enveloppe 8 avec l'intérieur du canal 1 si bien que le métal peut circuler entre l'enveloppe 8 et le canal 1. La tranche de métal située entre les deux embouts 9 et 9' est parcourue par le courant alternatif généré dans la boucle 7. (voir la figure (2-3)).

II.4 Classification des pompes à conduction:

II.4.1 Pompe à Conduction Alimentée en Courant Alternatif :

Dans une pompe à conduction (comme elle est présentée dans la figure(2-5), les bobines sont alimentées en courant alternatif, le champ magnétique produit par ces bobines réagit avec le courant alternatif qui traverse le métal liquide.

La relation liant le champ magnétique \vec{B} et l'induction magnétique \vec{H} est :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{J} \quad (2-1)$$

$$(\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \simeq \frac{1}{800000})$$

On note μ_0 la perméabilité du vide et μ_r la perméabilité relative du matériau et \vec{J} représente la polarisation magnétique tel que

$$\vec{J} = \mu_0 \mu_r \vec{M} \quad (2-2)$$

\vec{M} l'aimantation du matériau.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{J} = \mu(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2-3)$$

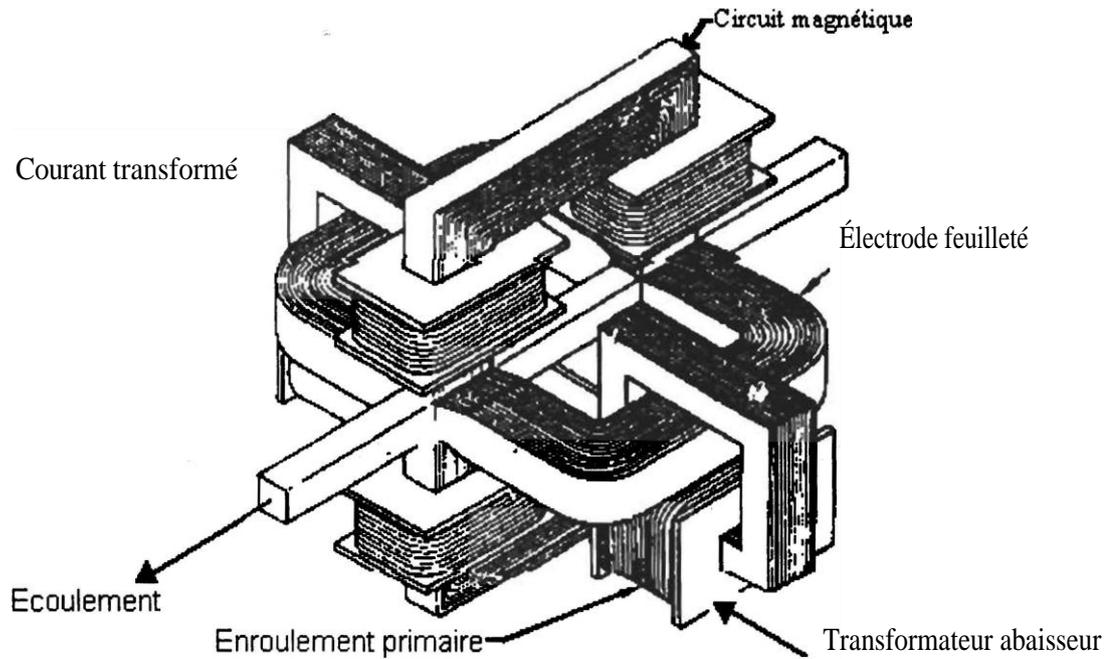


Figure (2-5): Pompe électromagnétique à conduction alimentée en courant alternatif

L'induction magnétique est :

$$B = B_{max} \sin \omega t \quad (2-4)$$

Le courant électrique :

$$i = I_{max} \sin(\omega t \mp \theta) \quad (2-5)$$

Avec

$$\omega = 2\pi f \quad \text{tel que } f : \text{ la fréquence}$$

La Force exercée sur rotor et le liquide

$$F = B_{max} \sin(\omega t) I_{max} \sin(\omega t \mp \theta) l \quad (2-6)$$

$$F = \frac{B_{max} I_{max}}{2} [(1 - \cos 2\omega t) \cos \theta - \sin 2\omega t \sin \theta] l \quad (2-7)$$

Dans ce type de pompe:

- Le circuit magnétique est feuilleté pour éliminer les pertes par effet de joule.
- Les transformateurs abaisseurs sont utilisés pour avoir du fort courant dans les électrodes.

II.4.2 Pompe à conduction alimentée en courant continu:

La pompe à conduction alimentée en courant continu, est le type le plus simple de la pompe électromagnétique, le champ magnétique est assuré par un aimant permanent(voir la figure(2-6)), la conduite est fabriquée en acier inoxydable et l'électrode en nickel ou l'argent.

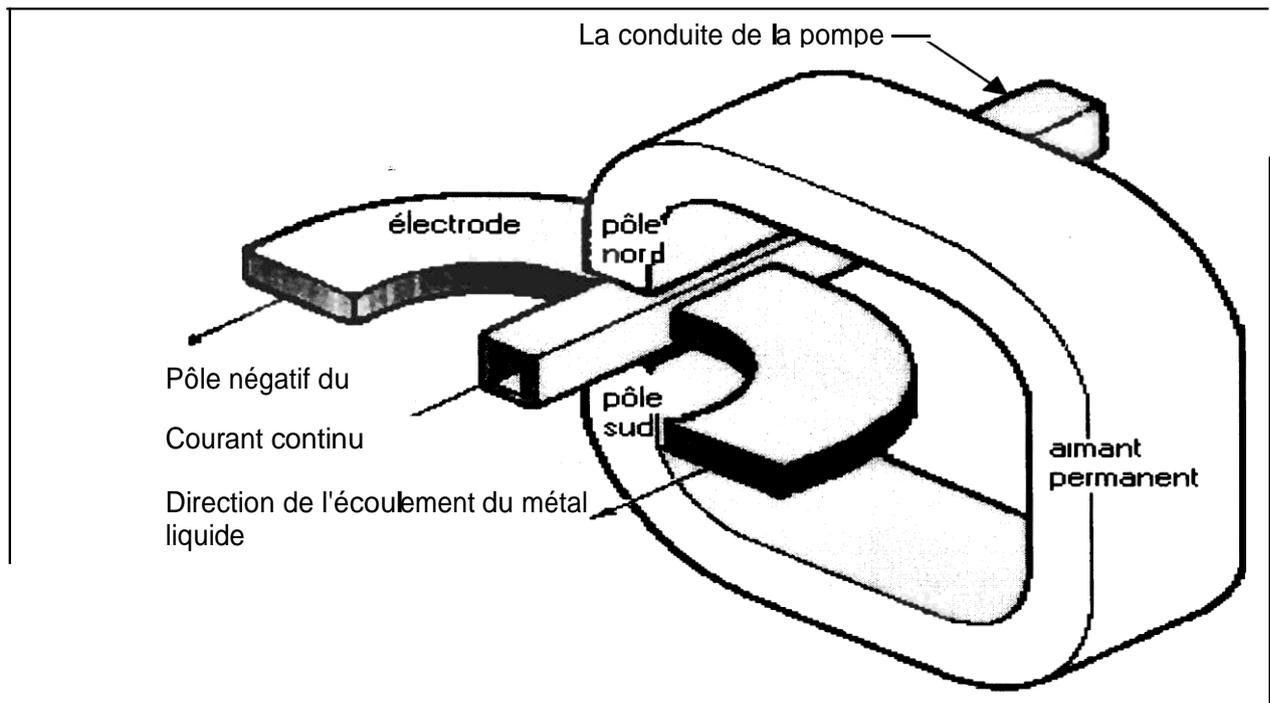


Figure (2-6): Pompe à conduction alimentée en courant continu.

Les pompes électromagnétiques se divisent en quatre grandes catégories :

- 1- pompes à conduction :
 - a- pompes à conduction à courant continu.
 - b- pompes à conduction à courant alternatif monophasé.
- 2- pompes à induction à courants polyphasés :
 - a- pompes à induction plates (à barres de court-circuit, FLIP en anglais).
 - b- pompes à induction annulaires (dites aussi cylindriques, ALIP en anglais)

II.5 Conservation du flux:

La variation du flux du champ magnétique peut avoir deux causes :

- 1- Le circuit est soumis à un champ fixe, mais on déforme ou on fait tourner le circuit, cas des machines à courant continu.
- 2- Le circuit est immobile et l'intensité du champ magnétique varie ou tourne (cas des alternateurs, des moteurs asynchrones).

Inconvénient :

- 1- Les pompes à conduction à courant continu, le grand inconvénient des pompes est qu'il faut mettre en œuvre des intensités très élevées pour des tensions très faibles, d'où des pertes énormes par effet Joule proportionnelles au carré de l'intensité (dans la pompe, dans l'alimentation en courant et dans le système redresseur).

- 2- Les pompes à conduction à courant alternatif, leur principal défaut, sont très faible rendement.
- 3- Les pompes à induction se rapprochent des moteurs asynchrones, le rendement de ces machines est de l'ordre de 15 à 45 % , les causes de limitation du rendement : les métaux liquides sont le plus souvent véhiculés par des conduits eux-mêmes métalliques, qui sont le siège des courants électriques parasites induits et de courants de dérivation dans le cas des pompes plates, l'ensemble provoquant des pertes très importantes par effet Joule.

chapitre III

présentation et

exploitation

du logiciel flux2D

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons fait appel à un outil d'informatique assisté par ordinateur des systèmes électromagnétiques basé sur la méthode des éléments finis.

Il permet d'étudier la configuration magnétique du système et d'extraire des grandeurs physiques et les performances du modèle avant sa conception.

III.2 Présentation De L'architecture Du logiciel flux2D :

L'outil informatique FLUX2D est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur, basé sur la méthode des éléments finis. Il calcule, sur des sections les états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs (champ, potentiel, flux, énergie, force...etc.).

Les grandeurs obtenues seraient difficiles et impossibles de déterminer par d'autres méthodes (calculs analytiques, prototypes, mesures, essais).

III.3 Domaine D'application :

Les phénomènes qui interviennent dans les dispositifs électrotechniques sont décrits par différentes équations: équations de MAXWELL, équations de la chaleur, lois de comportement des matériaux.

La résolution simultanée de ces équations est difficilement réalisable en raison de son complexité et de la quantité de calculs à effectuer.

Pour cette raison, FLUX2D dispose d'un certain nombre de modules d'application physique qui permettent de résoudre chacun un type de problème donné, décrit par une équation et des hypothèses (hypothèses de fonctionnement, hypothèses de comportement des matériaux).

III.4 Enchaînement des programmes de Flux2D:

FLUX2D est divisé en une dizaine de programmes et commandes correspondantes à des fonctions précises suivantes:

La transmission des données d'un problème entre chaque programme s'effectue par l'intermédiaire de fichiers et principalement par le fichier de transmission

- 1- Description de la géométrie et maillage.
- 2- Description des circuits.

- 3- Description des propriétés physiques.
- 4- Résolution, Exploitation des résultats.

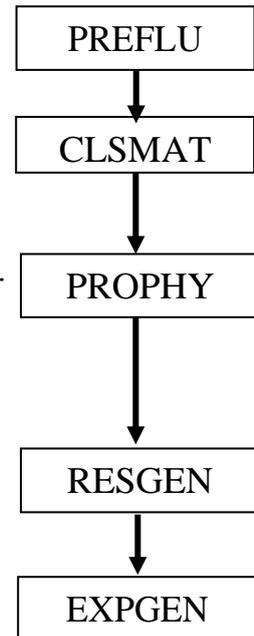
Construction de la géométrie et de maillage.....

Gestion de la banque de matériaux.....

*Affectation des propriétés physiques et conditions ...
aux limites maillage.*

Résolution.....

Exploitation des résultats.....



Figure(3.1): Enchaînement des programmes du logiciel FLUX2D

III.5 Les différents programmes de Flux2D:

III.5.1 Construction de la géométrie et de maillage (PREFLU) :

La géométrie d'un objet est construite à partir des points et lignes. L'utilisateur a accès à des paramètres qui pourront lui servir d'une part dans la construction géométrique et d'autre part à modifier la géométrie.

Tous les points sont donnés par l'utilisateur, soit en utilisant les coordonnées cartésiennes, polaires ou axisymétrique. Pour notre système nous avons choisis les coordonnées axisymétriques, comme il est présenté dans la figure(3- 2).

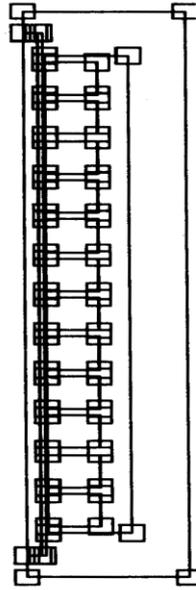


Figure (3.2) présentation de la géométrie de la pompe électrique (PREFLU)

Après la définition des points et les lignes on passe à la création des régions, la distinction entre eux se fait par l'affectation d'une couleur pour chaque région.

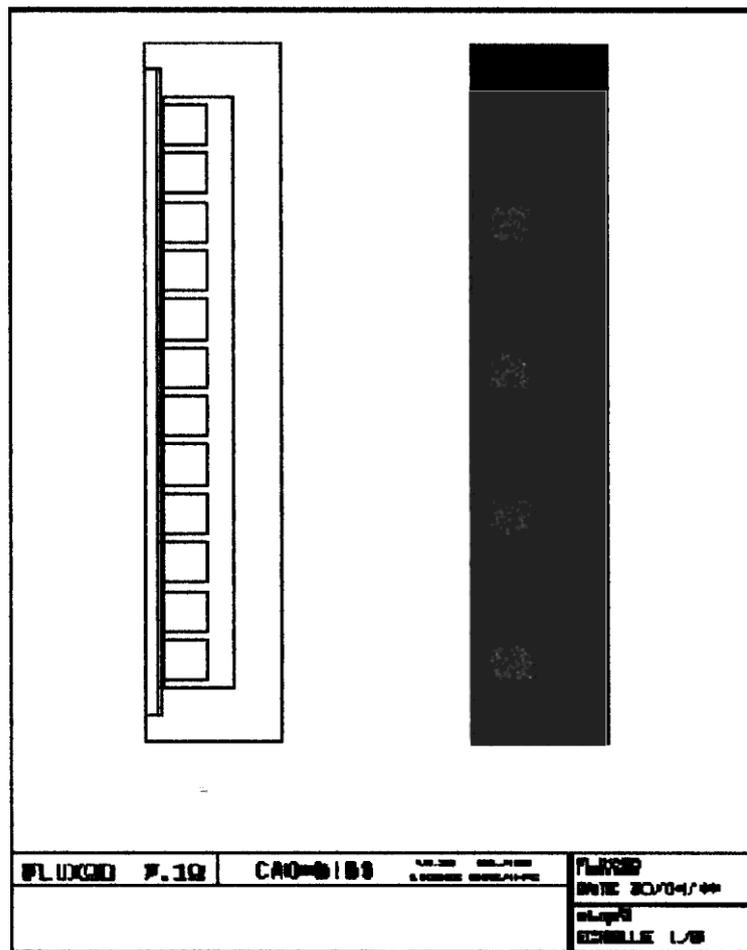


Figure (3.3) : Présentation des différentes régions de la pompe électromagnétique (PREFLU REGIONS)

Le maillage peut être réalisé à l'aide du mailleur automatique ou du mailleur assisté par l'opérateur. L'utilisateur peut augmenter ou diminuer le nombre de subdivisions.

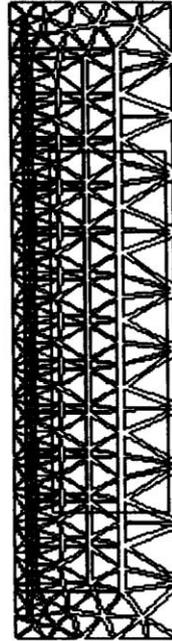


Figure 3.4 : Présentation du maillage de la pompe électrique (PREFL MAILLAGE)

Le maillage est effectué selon le comportement de chaque partie (le maillage est affiné dans les parties pénétrées par le champ magnétique).

- L'entrefer : maillage condensé.
- Tuyau: maillage condensé.
- Bobines : maillage moins condensé.
- L'entourage du système : maillage moins condensé

À l'issue du maillage, FLUX2D contrôle la qualité des mailles, obtenues, et signale celles qui risquent de conduire à des résultats imprécis.

III.5.2 gestion de la banque de matériaux (CSLMAT)

Ce programme permet d'ajouter, de modifier ou de supprimer des matériaux dans la banque des matériaux.

Un matériau peut être comporté plusieurs propriétés décrites chacune par un modèle. Nous pouvons définir pour un matériau (la perméabilité relative, l'inductance rémanente, résistivité,... etc).

Il existe plusieurs modèles pour décrire les propriétés physiques :

- **Constante**

La propriété est constante, suivant qu'elle est isotrope ou anisotrope, elle est définie par une valeur pour le premier cas et par trois valeurs pour le deuxième cas (direction privilégiée, direction transversale et troisième axe).

- **Courbe de saturation analytique simple**

Ce modèle permet de définir très rapidement les courbes B(H). Il respecte bien l'asymptote d'approche de la saturation, mais peut présenter des écarts implorant avec la courbe expérimentale dans la région de courbe. Il résulte de la combinaison d'une droite et d'une courbe en arc tangente :

$$B(H) = \mu_0 H + \frac{J_S}{\pi} \arctg \left(\frac{\pi(\mu_r - 1)\mu_0 H}{2J_S} \right) \quad (3.1)$$

- **Courbe de saturation analytique avec réglage de courbe**

Ce modèle, qui permet de définir très rapidement les courbes B(H), il est plus performant que le précédent. Un coefficient $\langle a \rangle$ permet de régler la forme de courbe pour mieux s'approcher de la courbe expérimentale, plus ce coefficient est petit, plus le coude est pointu, la formule utilisée pour la discrétion est la suivante :

$$B(H) = \mu_0 H + J_S \frac{H_a + 1 - \sqrt{(H_a + 1)^2 - 4H_a(1-a)}}{2(1-a)} \quad (3.2)$$

$$H_a = \mu_0 H \frac{\mu_r - 1}{J_S} \quad (3.3)$$

- **Courbe de saturation spline**

Ce modèle basé sur les fonctions \langle spline cubique \rangle , permet de définir des courbes B(H) à partir des couples de valeur expérimentale (B, H). La définition de ce modèle est peut compliqué que les deux premiers et présente les avantages suivants :

- La courbe expérimentale est bien respectée.
- L'interpolation est rapide et efficace.
- Une courbe de saturation spline comprend trois parties :
 - La première partie est une fonction homographique passant par zéro et décrivant le coude, elle est définie par des couples de valeurs B(H) fournies par l'utilisateur.
 - La deuxième est une fonction homographique de raccordement, tangente à la première partie de la courbe.

- La troisième partie est une droite de pente μ_0 qui a pour ordonnée à l'origine d'aimantation à saturation J_s .

III.5.3 PROPHY

Ce programme permet de décrire les propriétés physiques d'un nouveau problème : choix de l'espace de travail (plan ou axisymétrique), et nature d'application (magnétostatique, magnétodynamique,... etc.), affectation des matériaux et des sources aux différentes régions, affectation des conditions aux limites (Dirichlet, Neumann, cyclique,.. etc.).

Ainsi il est constitué de deux autres programmes :

- MODPRO (modification des propriétés physiques)

Permet pour un problème dont les propriétés physiques ont déjà été définies :

- Changer l'espace de travail
- Modifier l'épaisseur du dispositif, et suivant l'application, le constant de normalisation ou la fréquence.
- Choisir un autre matériau pour une

- COPRO (copie des propriétés physiques)

Ce programme nous a permis de décrire les propriétés physiques de notre système.

- Espace de travail : axisymétrique.
- Nature d'application : magnétodynamique.
- Fréquence: 50 Hz.
- Définition des matériaux de chaque partie du système :
 - Le liquide utilisé est caractérisé par sa résistivité.
 - L'entourage du système est défini par la caractéristique du vide.
 - Les bobines sont définies par les caractéristiques du vide et une valeur de densité de courant de 2 A/mm^2 et pour l'obtention des quatre pôles magnétiques, on respecte le déphasage entre deux bobines successives de 60° .
 - Le fer: on utilise le fer pour canaliser les lignes de champ.
 - Définition des conditions aux limites: nous avons choisi les conditions de DIRICHLET définies le contour du système.

III.5.4 Résolution (RESGEN)

Ce programme effectue la résolution des problèmes, il permet le contrôle des itérations et le contrôle de temps et de la durée d'étude pour les problèmes évolutifs, donc c'est un processus de calcul :

- L'intégration et l'assemblage sont réalisées en même temps. RESGEN analyse les éléments un par un, calcul les intégrales, construit la sous - seconde membre relatif à chaque élément.
- Assemble les sous- matrices élémentaires du système d'équations linéaires à résoudre.
- La résolution du système des équations linéaire est faite par l'algorithme dit ICCG (incomplète choleski conjugated gradients).

III.5.5 Exploitation des résultats (EXPGEN)

Ce programme permet d'exploiter les résultats d'un calcul sous différente forme. Les commandes proposées sont adaptées à l'application traitée.

Dans ce bloc on peut :

- Dessiner sur un papier.
- Imprimer des résultats dans un fichier.
- Faire le traitement des régions sans matériaux et sans sources.

Il peut afficher :

- Des éléments finis.
- Des contours des régions.
- Des conditions aux limites.

Il peut tracer :

- Des lignes isovaleurs.
- Des cartes de couleurs
- Des vecteurs.
- Courbes spatiales et temporelles.

Comme il peut faire le calcul des grandeurs ponctuelles et grandeurs régionales.

On magnétodynamique le valable est le potentiel vecteur A avec l'équation théorique :

$$(j)\omega\sigma A + \text{rot}\left[\frac{1}{\mu}\text{rot}(A)\right] = j \quad (3.4)$$

σ : Conductibilité électrique.

j : Densité de courant normal au plan.

ω : Pulsation.

μ : Perméabilité.

III.6 Equations de calcul:

- Calcul de l'induction

L'induction dans chaque point du domaine est calculée, on utilisant la relation :

$$\vec{B} = \frac{\partial A}{\partial Y} \vec{I} - \frac{\partial A}{\partial X} \vec{J} \quad (3.5)$$

$$d\vec{A}(M) = \frac{\mu_0 i dl}{4\pi r} \quad (3.6)$$

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (3.7)$$

\vec{A} est appelé le vecteur potentiel

- Calcul du champ

B est connue alors on a :

$$H = \frac{1}{\mu} B \quad (3.8)$$

A partir de l'induction on peut calculer le flux

$$\Phi = \int_S B ds \quad (3.9)$$

- Calcul des inductances

Nous avons imposé une densité de courant extérieur, d'où la possibilité de déterminer l'inductance d'une bobine, en utilisant la relation suivant :

$$L = \frac{\Phi}{i} = \frac{n^2 \Phi}{I} \quad (3.10)$$

i : le courant dans une spire.

Φ : Le flux a travers une spire.

I : nombre d'ampères.

n : nombre de spires d'une bobine.

Si plusieurs bobines sont alimentées, l'inductance de la bobine x sera .

$$L_{x1} = L_{x1} + M_{x2} \frac{i2}{ix} + M_{x3} \frac{i3}{ix} + \dots + M_{xn} \frac{in}{ix} \quad (3.11)$$

Calcul d'effort sur un conducteur non magnétique :

La force exercée sur une région conductrice non magnétique peut être calculée par la loi de LAPLACE :

$$F = \iiint \vec{j} \wedge \vec{B} \, dv \quad (3.12)$$

- Calcul de l'énergie

Pour les systèmes électromagnétiques l'énergie mise en jeu est donnée par :

$$f(x) = \iiint \vec{j} \wedge d\vec{B} \, dv \quad (3.13)$$

- Calcul la force et le couple

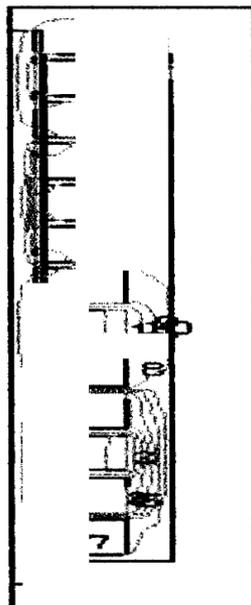
La méthode des travaux virtuels permet de calculer la force et le couple d'origine électromagnétique s'exerçant sur des pièces indéformables, entourées d'air. La force exercée dans une direction donnée s'obtient en dérivant l'énergie magnétique du système W par rapport à un déplacement virtuel S de l'objet dans cette direction (déplacement virtuel angulaire pour le couple)

$$F_S = -\frac{\delta W}{\delta S} \quad (3.14)$$

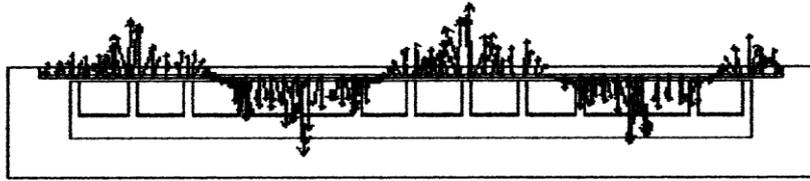
III.7 Les résultats obtenus dans l'exploitation du logiciel Flux2D:

Dans cette partie nous allons présenter les différents résultats obtenus :

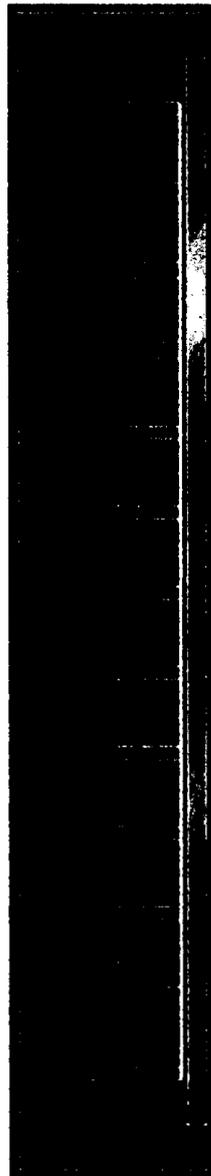
III.7.1 Visualisation Des Lignes De Champs



Figure(3.6):Allure des lignes de champs.

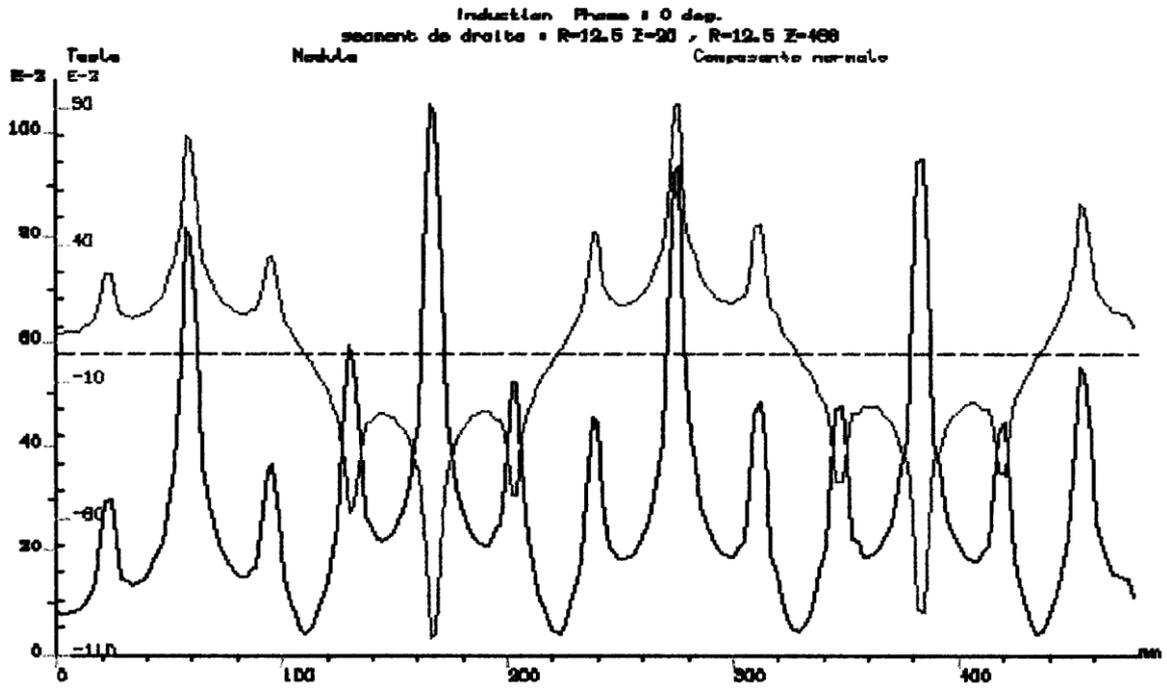
I.7.2 Visualisation des vecteurs d'induction magnétique dans la conduite:

Figure(3.7): présentation des vecteurs du champ dans la conduite.

III.7.3 Visualisation de la concentration de l'induction magnétique dans la pompe

Figure(3.8) : Concentration de l'induction dans le système.

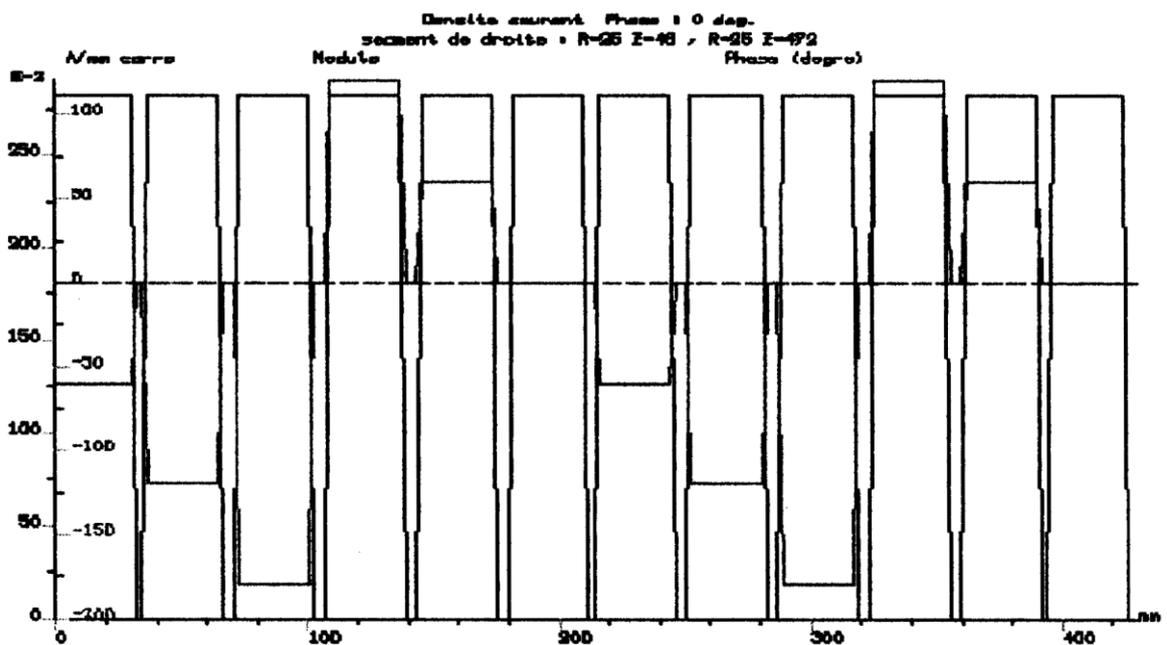
III.8 L'induction dans l'entrefer



Figure(3.9): L'induction magnétique dans l'entrefer.

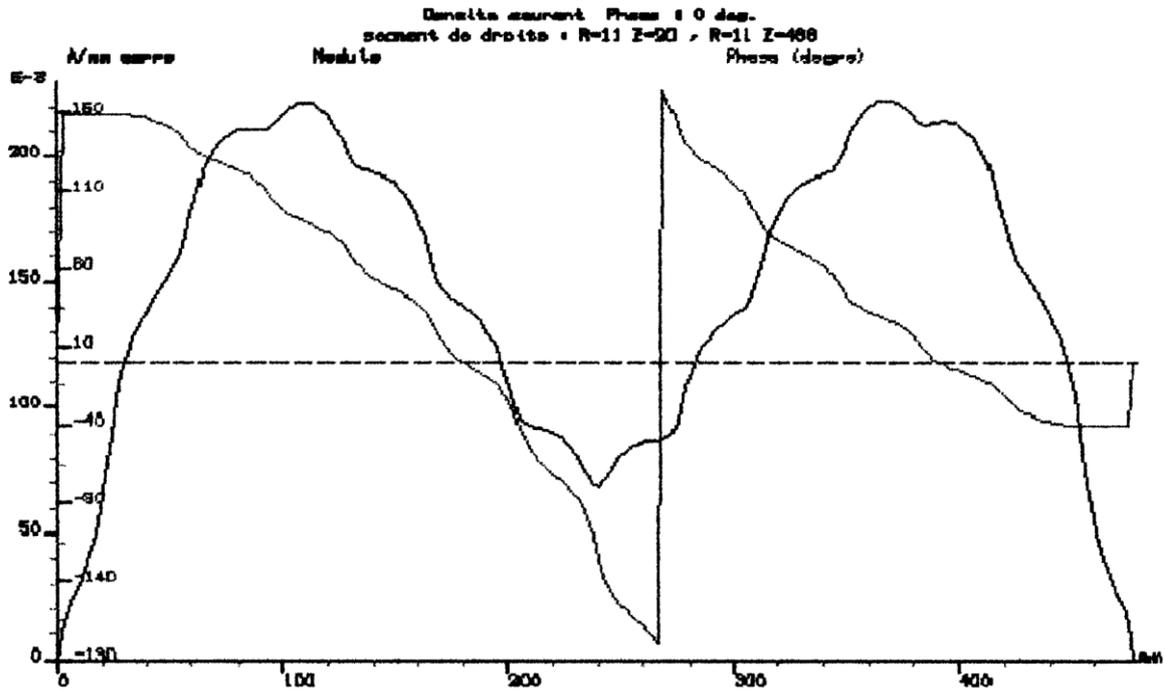
III.9 La densité de courants

III.9.1 Dans les bobines



Figure(3.10) : La densité de courant et le déphasage entre les bobines.

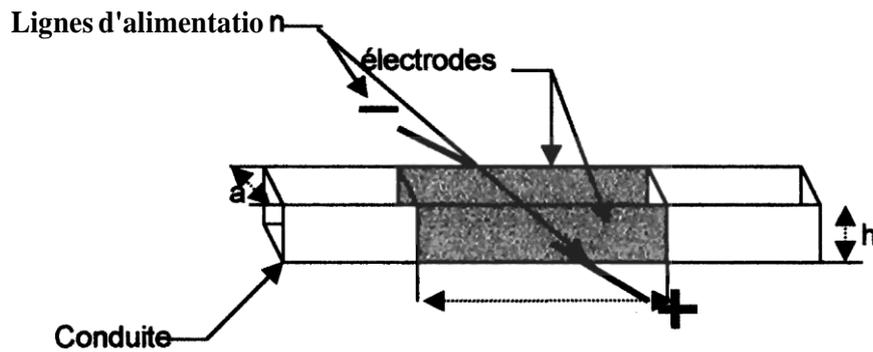
III.9.2 Dans le liquide



Figure(3.11):La densité de courant dans le liquide.

III.10 La pompe à conduction

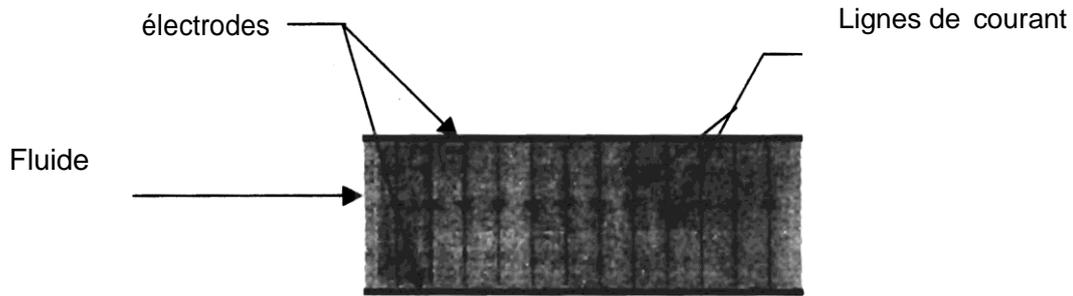
Pour la pompe à conduction nous avons fait deux types de calcul : calcul analytique et calcul numérique de la résistance vu entre les deux électrodes.



Figure(3.12) :La conduite de la pompe à conduction

III.10.1 Calcul analytique

On suppose que les lignes de courant sont uniformes et non pas affecté par le champ magnétique.



Figure(3.13) : Lignes de courant supposé uniformes

III.10.1.1 La résistance

La résistance du liquide entre les deux électrodes, est donnée par la relation suivante :

$$R = \rho \frac{a}{S} \quad (3.15)$$

ρ : la résistivité du liquide.

a : distance entre les deux électrodes.

S : la surface de l'électrode.

III.10.1.2 La conductivité

La conductivité d'un liquide est défini par l'inverse de la résistivité :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.16)$$

Dans nos essais nous avons utilisé une solution de NaCl de résistivité $\rho = 0.046 \Omega \cdot m$

Avec : $a = 10 \text{ mm}$ et $s = 500 \text{ mm}^2$

Donc :

$$R = 0.046 \frac{10}{500} 10^3 \Rightarrow R = 0.92 \Omega \quad (3.17)$$

III.10.1.3 La densité de courant

$$J = \frac{I}{S} \quad (3.18)$$

Avec : S : surface de l'électrode.

III.10.1.4 L'induction magnétique

Pour assurer un champ magnétique constant, nous avons utilisé un aimant permanent d'induction $B = 0.7 \text{ tesla}$

III.10.1.5 La force

La force est donnée par la relation suivante :

$$F = B.J.a.b.h \quad (3.19)$$

Avec

$$J.a.b = I \quad (3.20)$$

Donc

$$F = BIh \quad (3.21)$$

La force magnétique produite dans une conduite d'une pompe à conduction dépend des paramètres suivants

h : hauteur de la conduite.

S : surface de la conduite.

J : densité de courant dans le liquide.

B : induction magnétique.

III.10.1.6 Les pertes dans la pompe

Les pertes sont données par la relation suivante :

$$P = RI^2 \quad (3.22)$$

(P : pertes par effet Joule)

III.10.2 Calcul numérique

On suppose que les lignes de courant ne sont pas affectées par le champ magnétique.

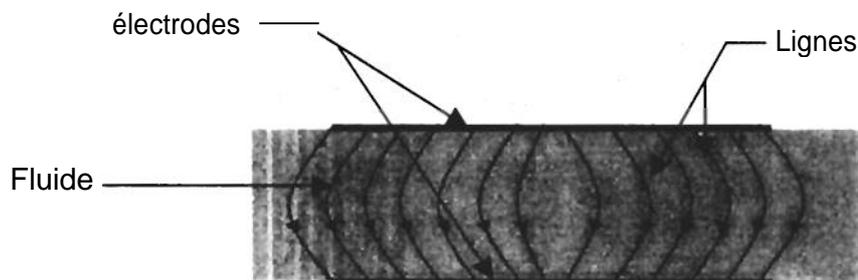


Figure (3-14) : Lignes de courant.

III.10.2.1 Equations électromagnétique régissant le système

Le système dans notre étude comporte (la pompe et le liquide)

On suppose que : l'induction magnétique $B = 0$, La vitesse=0

Tout système électromagnétique est régi par les équations de MAXWELL définissant son comportement magnétique ; notre système est régi par les équations suivantes :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.23)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \vec{j} \quad (3.24)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (3.25)$$

L'équation de continuité : ($\rho=0$)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (3.26)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.27)$$

L'équation (3.22) on trouve :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0 \Rightarrow E = -\vec{\nabla} \cdot V \quad (3.28)$$

V : potentiel scalaire électrique.

De (3.26) et (3.27) on trouve :

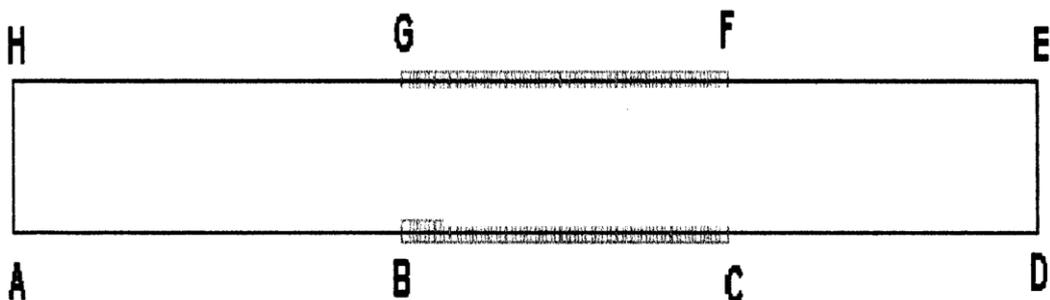
$$\vec{j} = \sigma(-\vec{\nabla} \cdot V) \quad (3.29)$$

De (3.25) et (3.28) on trouve :

$$-\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} \cdot V) = 0 \quad (3.30)$$

Avec V (en volts) : est le potentiel scalaire.

Les conditions aux limites :



Figure(3-15): condition aux limites.

Sur le segment GF une condition de Dirichlet $V = V = 1$.

Sur le segment BC une condition de Dirichlet $V = V = 0$.

Sur les segments AB, CD, DE, EF, GH et HA conditions de Neuman $dV/dn = 0$ La résistance équivalente :

$$R = \frac{V_1 - V_0}{I} \tag{3.31}$$

I est le courant qui traverse les plaques

$$I = \iint \vec{j} \cdot \vec{dS} \tag{3.32}$$

$$\text{Avec } \vec{j} = \sigma \vec{E} \text{ et } \vec{E} = -grad V \tag{3.33}$$

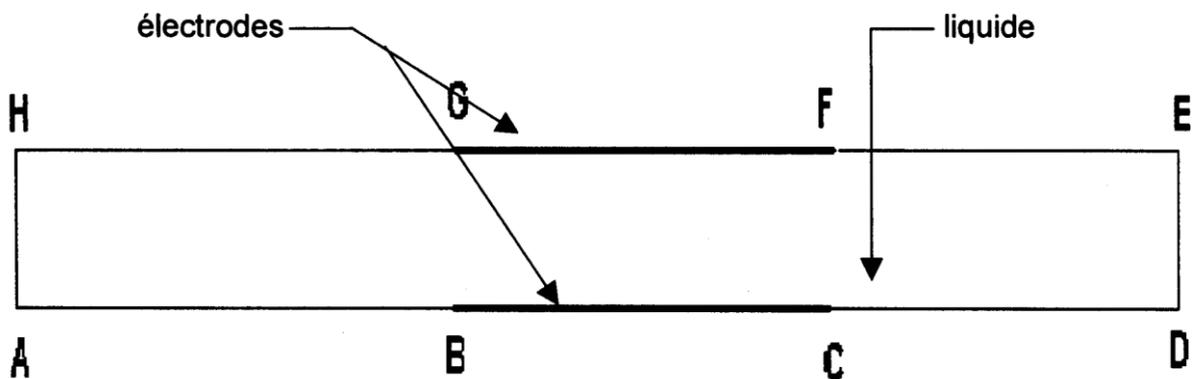
III.10.2.2 Simulation sur Flux2D

Le logiciel Flux2d disponible au laboratoire ne contient pas le module de résolution pour l'électrocinétique mais on peut faire facilement une analogie avec l'électrostatique sans charge.

L'électronique	L'électronique sans charge
$rot \vec{E} = 0$	$rot \vec{E} = 0$
$\vec{E} = -grad V$	$\vec{E} = -grad V$
$\vec{j} = \sigma \vec{E}$	$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$
$div \vec{j} = 0$	$div \vec{D} = 0$
$div(-\sigma grad(V)) = 0$	$div(-\epsilon grad(V)) = 0$

• Introduction de la géométrie

On prend une épaisseur de 1 mm



Figure(3-16) : La géométrie du système.

Dans le liquide $\epsilon = 1$ et $\sigma = 21.7391 (\Omega.m^{-1})$

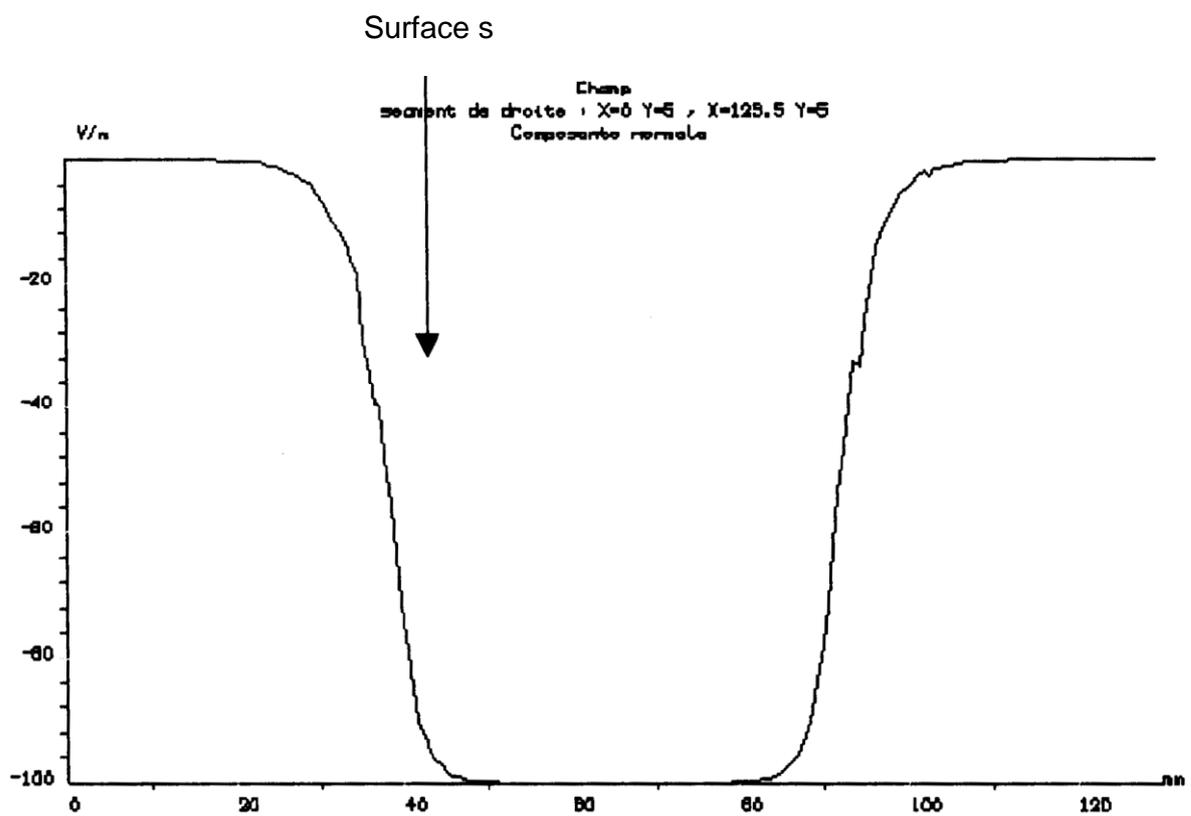
- **Exploitation de résultat**

La figure (1.17) qui montre le trace des équipotentielles d'au le liquide entre les deux électrodes



Figure(1-17): potentiel électrique entre les deux électrodes

Le tracé de la composante normale de E



Figure(3-18) allure de la composante normale du champ électrique.

III.10.2.3 Calcul de la résistance vue entre les deux électrodes

Nous pouvons Calculer la résistance entre deux électrodes par la relation suivante

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.34)$$

Calcul de I

De l'équation (3.29) on peut calculer le courant I On a :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

A l'aide du logiciel FLUX2D nous pouvons obtenir la valeur moyenne du champ électrique:

$$E_{moy} = \frac{1}{b-a} \int_a^b E \, dx. \quad (3.35)$$

Avec $E_{moy}=42.7857 \text{ (v/m)}$

On obtenir :

$$\int E dx = 129.5 \cdot 10^{-3} \cdot (42.7857) \quad (3.36)$$

$$\int E dx = 5.5407 \quad (3.37)$$

$$I = \int J \cdot dS = L \int J dx \quad (3.38)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.39)$$

$$I = \sigma L \int E dx \quad (3.40)$$

Talque :

L : la profondeur du système .

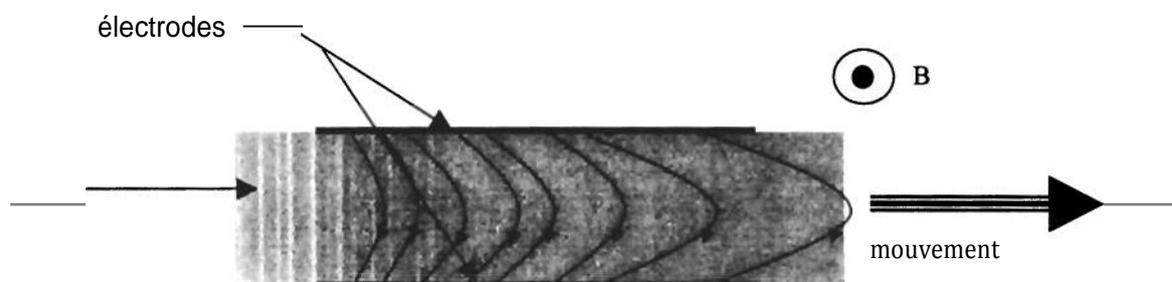
$$I = 1.2045 \text{ (A)}$$

Donc :

$$R = 0.8302 \, \Omega$$

Nous constatons qu'il n'y a pas une grande différence avec le résultat analytique, cela est dû à la petite largeur de la conduite, mais pour une conduite très large la méthode numérique ou la mesure reste le seul moyen pour déterminer la résistance vue par les deux électrodes.

Le problème sera plus compliquer si en veut tenir compte de la déformation des lignes de courant du à l'induction B et le mouvement du liquide (figure 3.19), le phénomène est régit par le modèle électrodynamique.



Figure(3-19): Lignes de courant avec la présence la présence de B et la vitesse.

III.10.2.4 Circuit équivalent d'une Pompe à Conduction

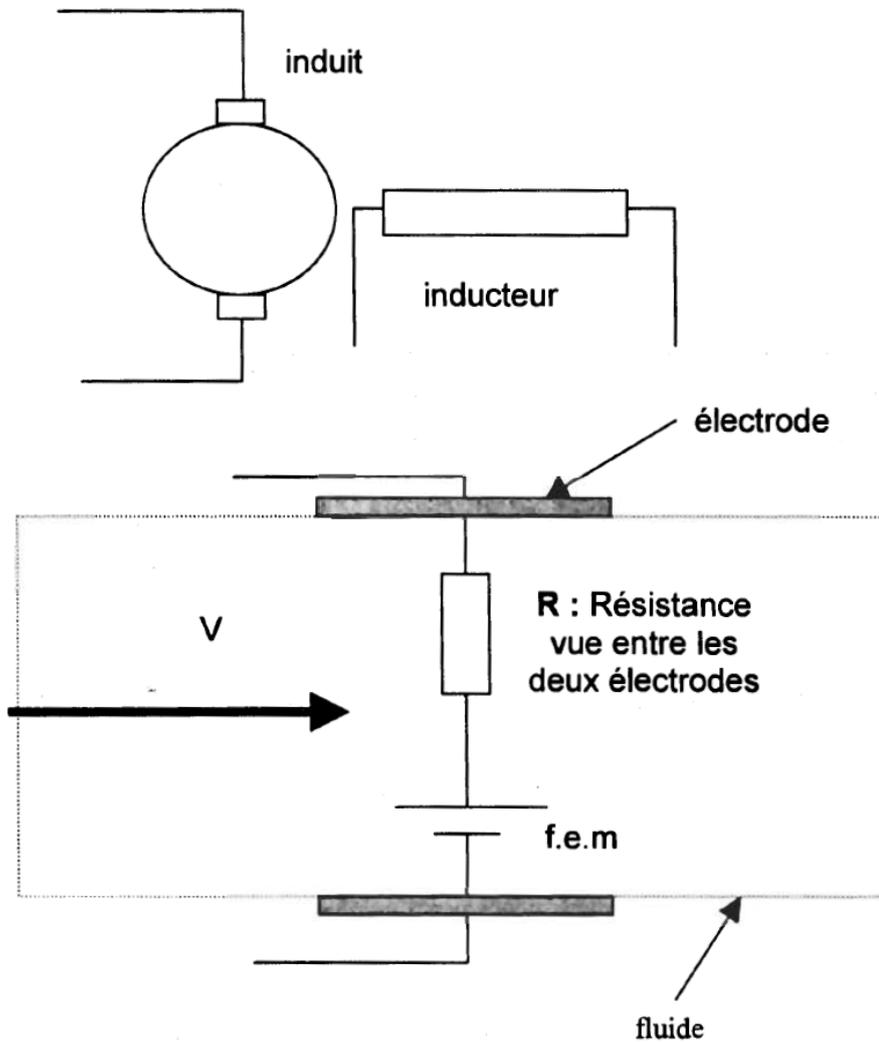
La pompe à conduction peut être représentée comme une machine tournante à courant continue

La fem =BLV.

B:l'induction

L : la largeur de la conduite

V : la vitesse du fluide



Figure(3-20) :Circuit équivalent d'une pompe à conduction

Chapitre VI

Simulation et

calcul

des paramètres

de pompe

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre nous :

- Présenterons les caractéristiques de l'inducteur de la pompe à induction.
- Présenterons de la démarche suivie pour réaliser la pompe à conduction.

VI.2 La Pompe A Induction:

VI.2.1 les dimensions de la pompe

- Diamètre du rotor : **20mm.**
- Diamètre intérieur du stator : **25mm.**
- Diamètre extérieur du stator : **70mm.**
- Largeur d la bobine : **30mm.**
- Largeur de la dent : **6mm.**
- Entrefer : **1.5mm.**
- Nombre de bobine par phase : **4.**
- Nombre de tours par bobine : **300.**
- Pas polaire : **180.**
- Epaisseur de la bande conductrice : **1mm.**
- Longueur de la pompe : **438mm.**

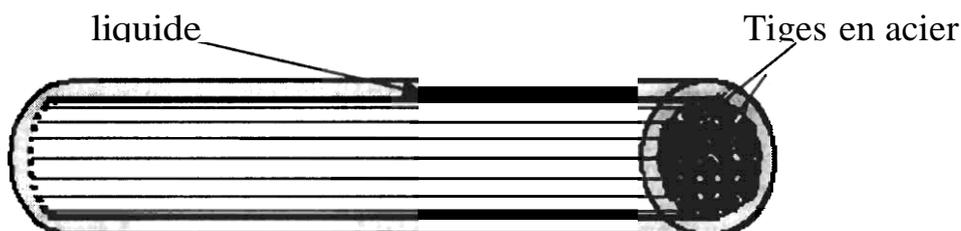
VI.2.2 Réalisation De La Conduite:

La conduite a une forme cylindrique, elle est constitué de deux cylindres creux l'une est remplie des tiges en acier de diamètre 0.8 mm comme il est présenté dans la figure (4.1). On a ajouté une matière isolante entre les tiges pour assurer l'isolement.

Entre les deux cylindres se trouve le liquide qui est la partie dynamique dans la pompe. Ce liquide est caractérisé par sa conductivité.

Le noyau est feuilleté pour :

- Diminuer les pertes.
- Annuler la force exercée sur le noyau.



Figure(4-1) : présentation de la conduite avec le noyau.

VI.2.3 Réalisation De L'inducteur

L'inducteur est la partie statique de la pompe électromagnétique formée d'un ensemble de bobines.

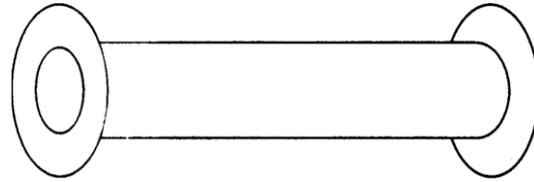


Figure (4-2): présentation du support des bobines.

La matière de ces derniers est amagnétique pour permettre la fermeture de flux à travers le rotor et elle doit être non-conductrice pour éviter le problème d'échauffement excessif.

Les dents sont réalisées par des plaques de matière magnétique (acier xc38) placés entre les bobines. Pour le refroidissement une partie de la surface de ses plaques est dans l'air, avec une rainure au milieu pour diminuer la valeur des courants de FOUCAULT par l'augmentation de leur trajet.

La culasse constituée d'un ensemble de bagues en acier couvrant donc les bobines, pour assurer la fermeture de flux.

VI.2.4 Le Bobinage

Le bobinage est réalisé pour la création des pôles magnétiques (Nord et sud) et généré l'onde magnétique glissante. les phases sont en ordre A, B, C.

- Pour le pôle Nord les connections sont : A, -C, B.
- Pour le pôle sud les connections sont : -A, C, -B.

Ces bobines sont placées sur des supports de la forme suivante :

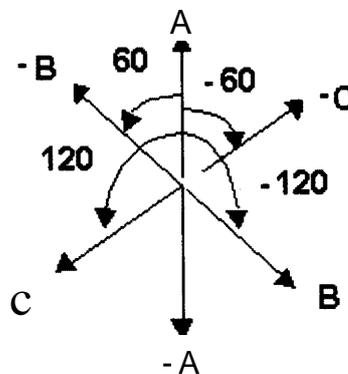


Figure (4-3): présentation du déphasage entre les phases.

La première phase [A] : E1: entrée.

S1: sortie.

La deuxième phase [B] : E2 : entrée.

S2: sortie.

La troisième phase [C] : E3: entrée.

S3: sortie.

Le déphasage entre deux bobines successif est de 60° . Le bobinage qui est présenté dans la figure 4 nous a permis d'obtenir quatre pôles.

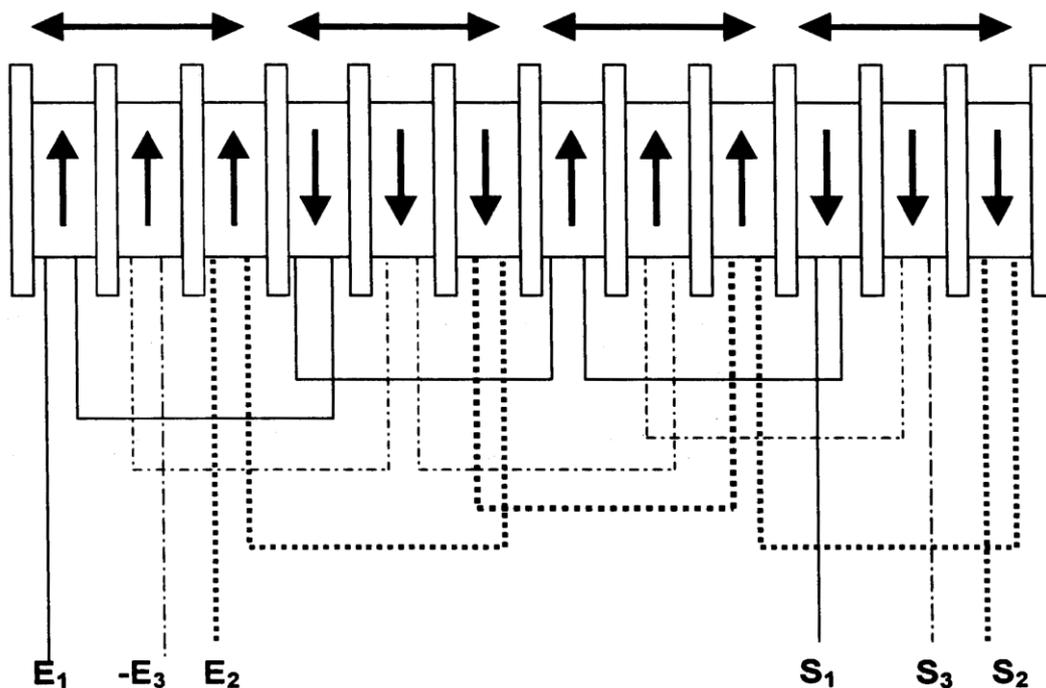


Figure (4-4): présentation de bobinage

VI.3- La Pompe A Conduction :

VI.3.1- Les Dimensions De La Pompe

Les dimensions de la pompe à conduction sont les suivants :

- Longueur des électrodes : 50mm.
- Largeur des électrodes : 10mm.
- Largeur de la conduite : 10mm.

VI.3.2- Les Electrodes

On a utilisé deux électrodes de forme rectangulaire (comme il est présenté dans la figure (4.5), en cuivre

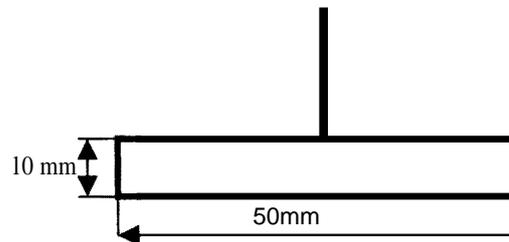


Figure (4-5) : présentation de l'électrode.

VI.3.3 La Conduite

Le liquide circule dans une conduite (présentée dans la figure) qui est fabriquée en matière isolante(verre).

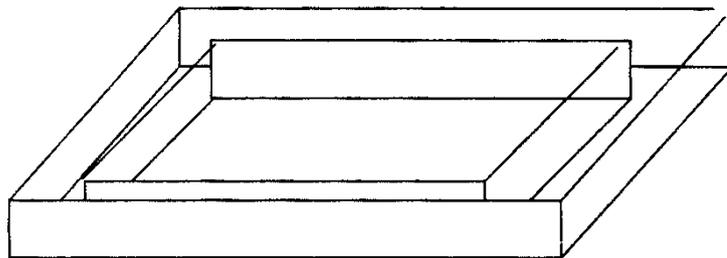


Figure (4-6):présentation de la conduite

VI.4 Essais Sur Les Deux Pompes

VI.4.1 La Pompe A Induction

Pour la pompe à induction on a utilisé le mercure qui a une densité $d=13,55\text{g/cm}^3$, et une résistivité $p=95,8 \cdot 10^{-8}\Omega.m$

Le tableau suivant présente les variations des pertes rotorque et statorique en fonction du courant:

I(Ampère)	3	5	10	15	20	30
Pr (g/m.s ²)	$0.0015 \cdot 10^{-7}$	$0.0041 \cdot 10^{-7}$	$0.0163 \cdot 10^{-7}$	$0.0366 \cdot 10^{-7}$	$0.0651 \cdot 10^{-7}$	$0.1466 \cdot 10^{-7}$
Ps (g/m.s ²)	1.5056	2.5094	5.0188	7.5282	10.0376	15.0564

Le tableau suivant présente les variations des forces exercées sur le liquide en fonction du courant :

I(Ampère)	3	5	10	15	20	30
F (N)	0.0012	0.0019	0.0039	0.0058	0.0078	0.0117

D'après les résultats précédents en remarque que les pertes statorique est plus grand par rapport les pertes rotorique et l'influence de courant remarquable sur les forces.

VI.4.2 La Pompe A Conduction

Pour la pompe à conduction le fluide utilisé est de l'eau salée qui a une masse volumique $\rho_v=1.148$ g/ml, et une conductivité $\sigma=21,739$ $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$

- a = la distance entre les deux cathodes=10 mm
- h = l'épaisseur des cathodes =10 mm
- b = la longueur des cathodes = 50 mm
- B = si l'induction magnétique = 0.7 tesla
- ρ = 0.046 $\Omega \cdot m$ pour NaCl

Les lignes de courant sont uniformes on a trouvé :

$$R = 0.92 \Omega$$

Le tableau suivant présente les variations de la force et de la perte en fonction du courant :

I(Ampère)	3	5	10	15	20	30
F (N)	0.021	0.035	0.07	0.1050	0.14	0.21
P (g/m.s ²)	8.28	23	92	207	368	828

VI.4.3 Comparaison Entre Les Deux Pompes

- 1- les pompes à conduction peuvent produire une grande pression que les pompes à induction, cela pour une raison que le courant actif dans une pompe à conduction est fourni d'une source extérieure qui est indépendante du champ magnétique.
- 2- l'augmentation du nombre des pôles magnétique augmentera la pression dans la conduite de la pompe à conduction, et pour la pompe à induction il faut augmenter le nombre des bobines.
- 3- la pompe à induction à l'avantage de ne pas avoir aucun contact avec le liquide, ce qui évite les problèmes de réaction chimique rencontrés dans la pompe à conduction entre le liquide et les électrodes.

CONCLUSION

Notre travail nous a permis d'aborder le domaine de la magnétohydrodynamique par l'étude des pompes électromagnétiques. Celle-ci avait pour objet essentiellement la réalisation de deux prototypes de la pompe électromagnétique : pompe à induction et pompe à conduction.

Pour la conception, nous avons exploité un outil informatique, de conception assistée par ordinateur, qui est le logiciel FLUX2D.

Ce dernier nous a permis en effet de calculer la force dans la conduite pour des différents liquides (dans le cas de la pompe à induction) et nous a permis de calculer les paramètres électriques (dans le cas de la pompe à conduction).

On a utilisé dans notre traitement une conduite en verre et le métal liquide disponible c'est le mercure qui est liquide à la température ambiante.

Par contre la réalisation de la conduite doit être avec une matière qui résiste à des températures élevées du métal fondu avec une isolation thermique des bobines inductrices.

Ce type de pompe, est serviable à l'industrie là où les pompes ordinaires rencontrent des difficultés pour le pompage ou de transporter les métaux fondus ou bien le transport de la chaleur d'une source (réacteur nucléaire) vers l'utilisation.

Par cette étude nous estimons avoir abordé les éléments essentiels des pompes électromagnétiques- malgré le manque de documentation- pour une meilleure perspective de recherche dans le domaine des convertisseurs magnétohydrodynamique (pompes électromagnétiques et générateurs MHD).

ANNEXE

L'électronique	L'électronique sans charge
$rot \vec{E} = 0$	$rot \vec{E} = 0$
$\vec{E} = -grad V$	$\vec{E} = -grad V$
$\vec{J} = \sigma \vec{E}$	$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$
$div \vec{J} = 0$	$div \vec{D} = 0$
$div(-\sigma grad(V)) = 0$	$div(-\epsilon grad(V)) = 0$

BIBLIOGRAPHIE

1. Richard S. Baker, Manuel J. Tessier, « Handbook of Electromagnetic Pump Technology », Elsevier Science and Technology Publishing 1987.
2. Marc Jouguet, «Traité d'Electricité Théorique » Tome IV Dunod.
3. Sellaoui Ilias « Etude des Performances du Moteur Linéaire Tubulaire par la méthode des éléments finis » Mémoire de fin d'étude ingénieur EMP 1998.
4. CEDRAT « Manuelle d'exploitation FLUX2D version 7.12 »
5. Publications de l'institut français du pétrole « La Production d'Electricité par conversion magnétohydrodynamique ». Editions Techip.
6. YAMADA, H. MAMADA « Flux Concentration Type Electromagnetic Pump. » Laboratory of magnetic field control and applications Faculty of technology, Kanazawa Japan