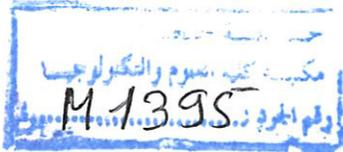


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA
RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE JIJEL
FACULTE DES SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



M/ELEC.M.E
2013/02

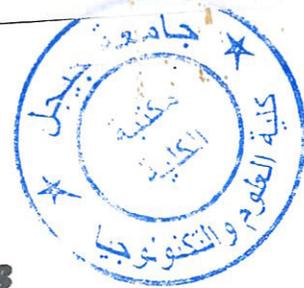
1396

Mémoire de fin d'étu

Pour l'obtention du diplôme de

Magist en *Electrotechnique*

Option : *Machines électriques*



Thème :

**Optimisation d'un actionneur
électromagnétique linéaire et
axisymétrique**

Réalisé par :

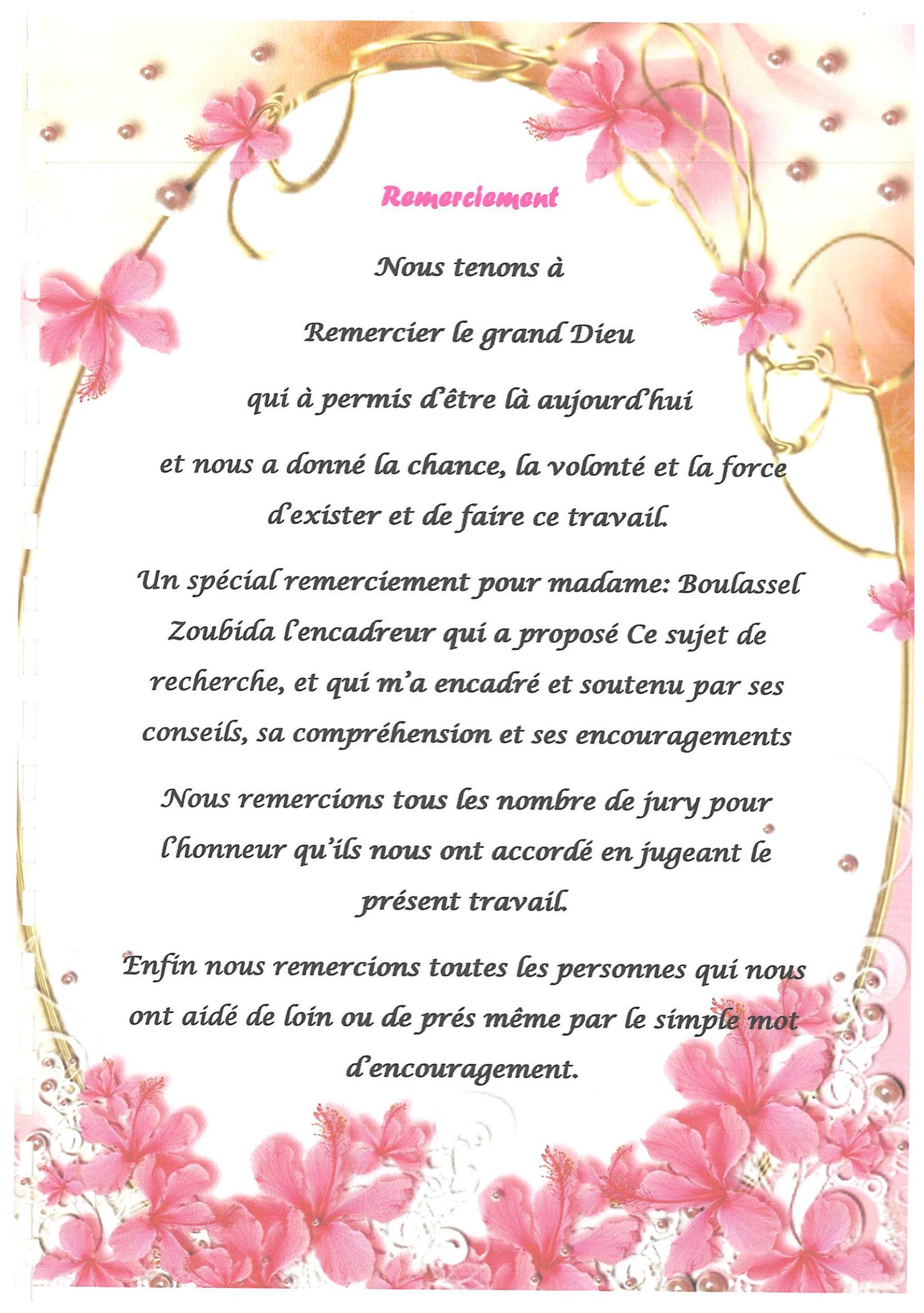
Fanit wafa

Boukrous khiera

Encadré par :

M^{me}. Z. Boulaasel Née Belli

Juin 2013



Remerciement

Nous tenons à

Remercier le grand Dieu

qui à permis d'être là aujourd'hui

*et nous a donné la chance, la volonté et la force
d'exister et de faire ce travail.*

*Un spécial remerciement pour madame: Boulassel
Zoubida l'encadreur qui a proposé Ce sujet de
recherche, et qui m'a encadré et soutenu par ses
conseils, sa compréhension et ses encouragements*

*Nous remercions tous les nombre de jury pour
l'honneur qu'ils nous ont accordé en jugeant le
présent travail.*

*Enfin nous remercions toutes les personnes qui nous
ont aidé de loin ou de près même par le simple mot
d'encouragement.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à,

Ma très chère mère "Akila" pour tout son amour, qui m'a éclairée mon chemin et qui m'a encouragé toute long de mes études

A mon père "Mouhammed" pour Tout son amour, son confiance et pour qu'il m'a donné un magnifique modèle de labour et qu'il m'a donné aussi toutes les besoins pour faire les bons choix dans ma vie

A mes chers frères : Khireddine et Rabah

A mes chers sœurs : Leïle, Soumia, Alima, Sara

A la femme de mon frère Radia

Aux mariés de mes sœurs : Toufik, Adal, Mouhammed

A les filles de mon frère et mon sœur Allae, Kawtar, Assil, Khadidja

A tout ma grande famille « Fanit »

A mon meilleurs amis Warda et Atika qui j'ai passé avec eux mon temps plus belle et le plus difficile dans ces cinq années

A tout mes amis Lamia, Saadia, Wahiba, Meriem, Hayat, Mounira, Dounia, Souhila

A tous mes collègues de notre promo de Master Machine électrique en électrotechnique

Et surtout Kheira, Idriss, Hamza, Rida, Mouhammed, Souhib

Avec lesquels j'ai eu de bons souvenirs

A toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment

Wafa □ Foufa"

Dédicace

Je dédie ce mémoire aux :

Personnes les plus chères au monde.

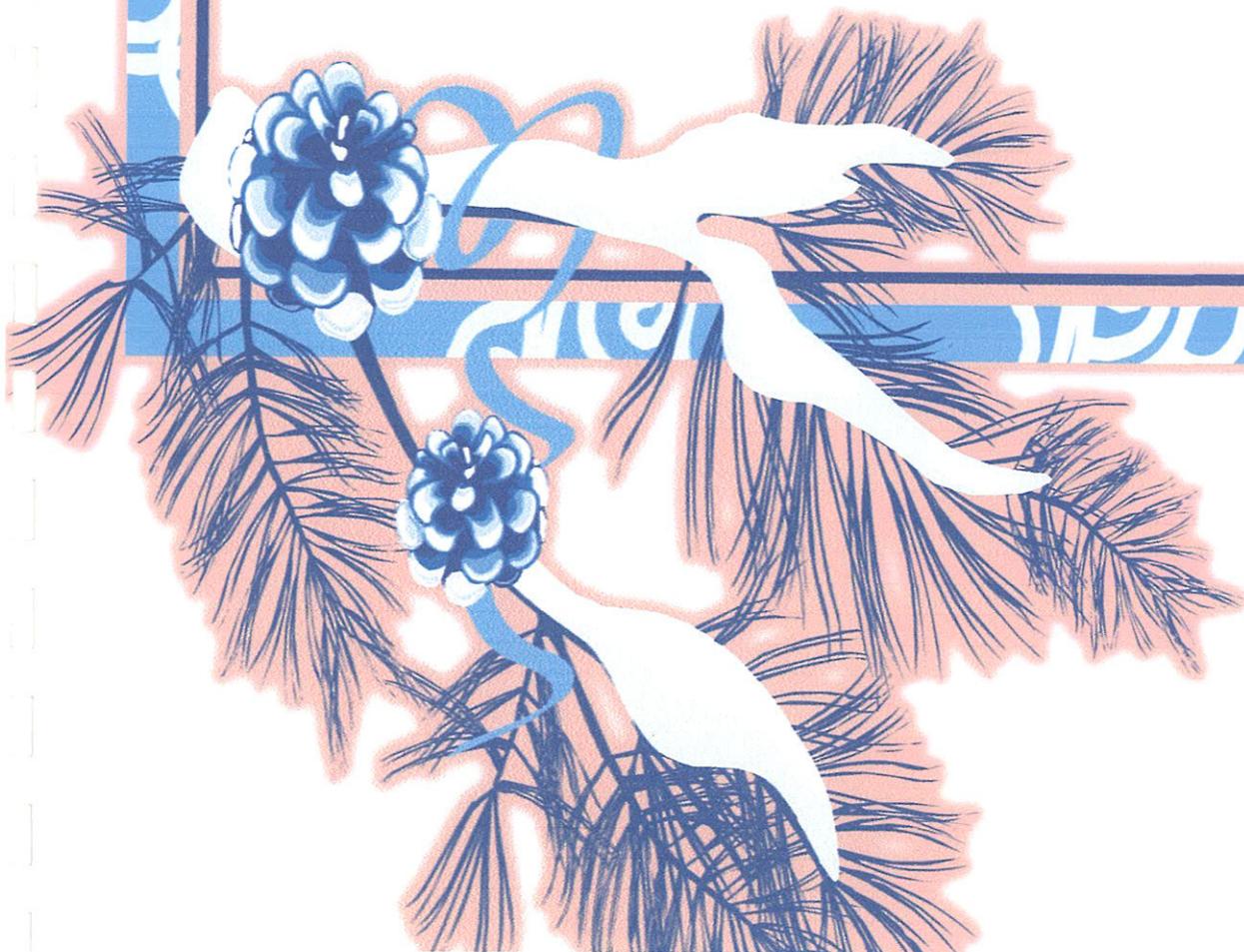
Ma très chère mère et mon père.

A mes sœurs : Amel, Safia, Samira, Khedoudja.

Et a mon frère : Khaled.

A tous mes collègues et mes amies.

Kheira



Sommaire

Sommaire

Introduction générale 1

CHAPITRE 1

Généralités sur les actionneurs électromagnétiques

I.1 Introduction 3

I.2 Définition d'un actionneur électromagnétique 4

I.3 Avantages des actionneurs électromagnétiques 4

I.4 Mécanismes de production de la force dans les actionneurs
électromagnétiques 5

I.5 Quelques types des actionneurs électromagnétiques linéaires 6

I.6 Domaines d'application des actionneurs électromagnétiques..... 7

 I.6.1 Électronique 7

 I.6.2 Automobile 7

 I.6.3 Médical..... 8

 I.6.4 Les photocopieurs 8

 I. 6.5 Electrotechnique 8

I.7 Actionneurs électriques pour l'entraînement à vitesse variable 8

I.8 Introduction des matériaux ferromagnétiques durs dans les actionneurs 14

 I.8.1 Définition d'un aimant permanent 14

I.8.2 caractéristiques des aimants permanents	14
I.8.3 quelques types des aimants permanents	14
I.8.4 Avantages des aimants permanents	16
I.9 Conclusion	16

CHAPITRE II

Modélisation des actionneurs électromagnétiques

II.1 Introduction	17
II.2 Lois d'électromagnétisme	18
II.2.1 Equations de Maxwell	18
II.2.2 Relations des milieux	19
II.2.3 Conditions de passage	20
II.2.4 Hypothèses simplificatrices	21
II.3 Formulation du champ électromagnétique	21
II.3.1 Cas des problèmes bidimensionnels	22
II.4 Formulation en potentiel vecteur magnétique associé au potentiel scalaire électrique : A-V	22
II.5 Résolution de l'EDP du champ électromagnétique	23
II.5.1 Méthodes de résolution	23
II.5.1.1 La méthode des éléments finis MEF	24
II.6 Conclusion	31

CHAPITRE III**Conception optimale d'un actionneur électromagnétique**

III.1 Introduction	32
III.2 Définition de la conception en électrotechnique	33
III.2.1 Formulation Mathématique d'un Problème d'Optimisation	34
III.2.2 Objectif de l'optimisation	34
III.2.3 Méthodes d'optimisation	34
III.2.3.1 Méthodes d'Optimisation Déterministes	35
III.2.3.2 Méthodes d'Optimisation stochastiques	36
III.2.4 Stratégie d'optimisation en électrotechnique	37
III.3 Optimisation d'un actionneur électromagnétique linéaire axisymétrique	38
III.3 .1 Analyse de cahier de charges	39
III.3.2 Formulation de problème d'optimisation.....	39
III.3.4 Résolution du problème	41
III.4 Conclusion.....	41

CHAPITRE IV

Application et résultats

IV.1 Introduction	42
IV.2 Modélisation numérique de l'actionneur électromagnétique axisymétrique à aimant permanent	43
IV.2.1 Modéle géométrique	43
IV.2.2 Caractéristiques physiques et géométrique	44
IV.3 Modélisation de l'actionneur électromagnétique	45
IV.3.1 Effet de la fréquence sur les grandeurs électromagnétiques	50
IV.4 Optimisation de l'actionneur	51
IV.4.1 Résultats d'optimisation	51
IV.4.2 Grandeurs électromagnétique pour la configuration optimale	53
IV.5 conclusion	56
Conclusion générale	57

Introduction Générale

Introduction générale

Dans de nombreux domaines, comme la robotique et, de manière générale, les transports, l'utilisation d'actionneurs électriques se développe. Cela peut s'expliquer, d'une part, par la souplesse d'utilisation que leur confère l'électronique de puissance, d'autre part, la présence de plusieurs types d'actionneurs (hydraulique, pneumatique et électrique) signifie une complexité et un surcoût de fonctionnement important. Toujours dans un esprit de simplification des chaînes de conversion de l'énergie, les actionneurs électriques à entraînement direct présentent beaucoup d'avantages. Il s'agit de supprimer l'étage mécanique souvent placé entre l'actionneur et la charge. La disparition des engrenages permet, entre autres, de diminuer les jeux mécaniques et le bruit, d'augmenter la fiabilité de l'ensemble et d'éliminer une partie des entretiens. Elle permet aussi d'augmenter la dynamique du système et éventuellement de libérer de la place [1].

Dans tous les domaines d'activités industrielles, les ingénieurs sont amenés à concevoir de nouveaux dispositifs. Ce travail de conception, longtemps manuel et basé sur l'expérience et la pratique, devient de plus en plus automatisé, grâce à l'arrivée des ordinateurs. Cette démarche de conception d'un dispositif de grandes performances est grandement facilitée et devient efficace grâce notamment aux méthodes d'optimisation automatiques. Elles doivent permettre l'obtention de la configuration optimale satisfaisant les besoins fonctionnels et économiques. Mais cette tâche est difficile, en effet, son but est de trouver un compromis entre plusieurs facteurs : besoins à satisfaire, choix entre différents concepts possibles sur la base de la faisabilité, des coûts de développement, de fabrication ou de maintenance. Il en résulte qu'une même conception peut être optimisée de différents points de vue [2].

La modélisation a toujours pour but la conception de structures électromagnétiques comme les moteurs électriques, les actionneurs, les transformateurs, etc. Pour ce faire, la méthode des éléments finis est couramment employée. Grâce à la grande capacité de calcul des ordinateurs actuels et l'application des nouvelles technologies de développement de logiciel, cette méthode permet une modélisation plus précise, fiable et à un moindre coût des dispositifs possédant des géométries et des phénomènes physiques assez complexes [3].

L'optimisation à partir d'un calcul numérique par éléments finis du champ électromagnétique n'est pas une tâche facile et la validité du processus dépend à la fois des résultats de l'analyse numérique du champ électromagnétique et de l'algorithme d'optimisation utilisé. En outre, le choix d'un algorithme d'optimisation par rapport à la spécificité du problème traité et aux besoins de concepteur représente un vrai dilemme en électrotechnique [4].

L'objectif de ce travail, consiste en l'utilisation conjointe de la méthode de l'algorithme génétique et la méthode des éléments finis en vue d'une optimisation d'un actionneur électromagnétique axisymétrique. Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation d'une vue générale sur les actionneurs électromagnétiques et leurs applications au domaine de l'électrotechnique.

Dans le deuxième chapitre, on présente la démarche générale de la modélisation des dispositifs électromagnétiques par la méthode des éléments finis.

La conception optimale d'un actionneur électromagnétique axisymétrique ainsi que les méthodes d'optimisation les plus employées pour optimiser les dispositifs électromagnétiques font l'objet du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de la modélisation et l'optimisation de l'actionneur électromagnétique axisymétrique.

chapitre I

Généralises sur les actionneurs électromagnétiques

Généralités sur les actionneurs électromagnétiques

I.1 Introduction

Les actionneurs électromagnétiques occupent toujours, et probablement encore pour longtemps, une place prépondérante dans la conversion réversible électromécanique d'énergie [5].

Dans cette étude on s'intéresse aux actionneurs électromagnétiques, pour cela le premier chapitre est consacré à la présentation d'une vue générale sur ce type d'actionneur et ses applications notamment en électrotechnique.

I.2 Définition d'un actionneur électromagnétique

Les actionneurs électromagnétiques sont massivement présents dans la production d'énergie. Ils sont capables de convertir l'énergie électrique vers l'énergie mécanique via une étape intermédiaire magnétique. Et ils sont constitués généralement de deux parties, une partie fixe par rapport au référentiel choisi dite stator et l'autre mobile suivant le type de déplacement généré dite rotor, entre les deux parties existe une zone d'interface appelée entrefer [1].

La conversion électromécanique est énergiquement schématisée par la figure suivante [1]:

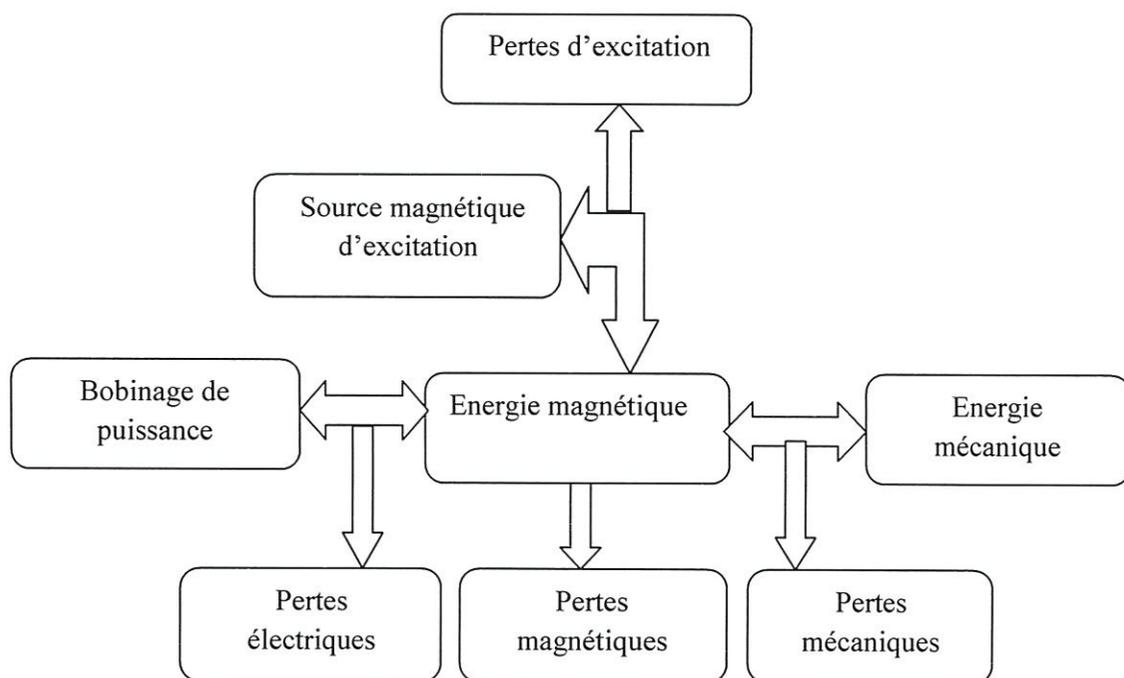


Figure. I.1 : Conversion d'énergie dans les actionneurs électromagnétiques

I.3 Avantages des actionneurs électromagnétiques

Beaucoup de développements futurs sont encore à faire et sont motivés par le fait que l'utilisation des actionneurs électromagnétiques va permettre [5]:

- ⇒ La simplification de la maintenance.
- ⇒ L'amélioration du diagnostic en temps réel.
- ⇒ L'amélioration de la disponibilité et de la fiabilité.

I.4 Mécanismes de production de la force dans les actionneurs électromagnétiques

Un convertisseur électromécanique d'énergie, indépendamment de son architecture, est un système dans lequel le transfert de puissance électrique-mécanique (en fonctionnement moteur) est réalisé à partir d'une conversion intermédiaire électromagnétique [6]. D'une manière schématique (voir figure. I.2), la magnétisation du système, en particulier celle de l'entrefer, est réalisée à travers deux types de sources magnétiques. La première, l'induit, est qualifiée de source de puissance (bobinages permettant le transfert de puissance, la puissance moyenne transitée correspond alors, aux pertes près, à la puissance mécanique). La seconde, l'inducteur, est dit également d'excitation (bobinée, à aimants, ...). Dans le cas d'une excitation bobinée, la puissance absorbée se limite aux pertes par effet Joule dans le bobinage [6].

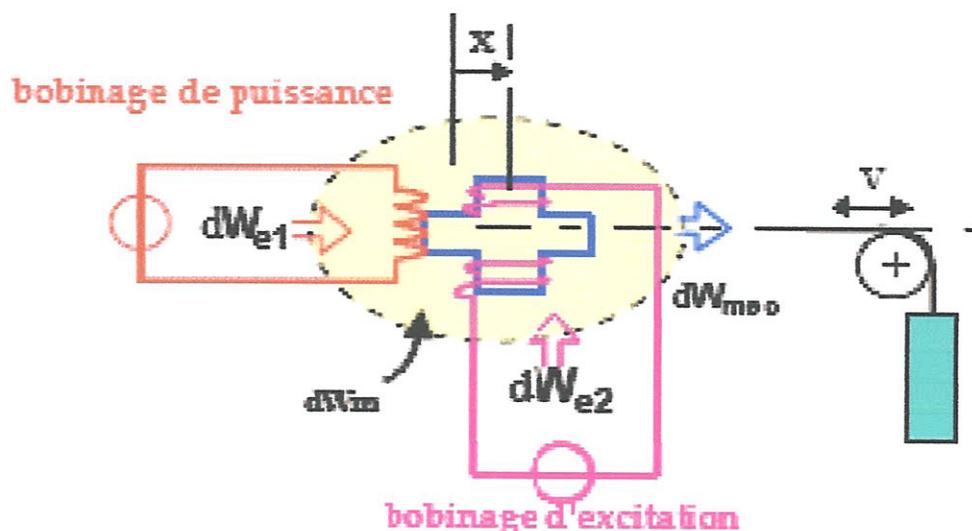


Figure. I.2 : Schéma de principe de conversion électromagnétique à deux sources magnétiques

Le travail correspond à une force qui est dans sa direction (ou via une composante de force projetée) :

$$W = F \times L \quad (\text{I.1})$$

La puissance instantanée est le quotient du travail par unité de temps soit le produit force par la vitesse :

$$P = F \times V \quad (\text{I.2})$$

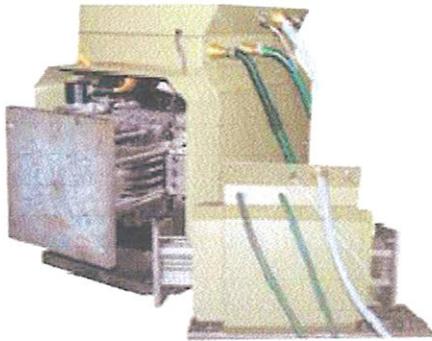
La force générée est à l'origine du déplacement de la partie mobile (x) et liée à la variation de son énergie magnétique par rapport au déplacement.

I.5 Quelques types des actionneurs électromagnétiques linéaires

Selon leur architecture il ya plusieurs types des actionneurs électromagnétiques linéaires :

1. Actionneurs poly entrefer :

- Les actionneurs multi-tiges
- Les actionneurs poly entrefer multi-moteurs
- Les actionneurs à aimants permanents



(a)



(b)

Figure. I.3: Exemples d'actionneurs linéaires poly entrefers (SATIE) (a): architecture multi-plaques (b) : architecture multi-tiges 1000 N

2. Actionneurs synchrones tubulaires
3. Actionneurs polyphasés synchrones plans à bobine mobile
4. L'électroaimant
5. Electrovanne

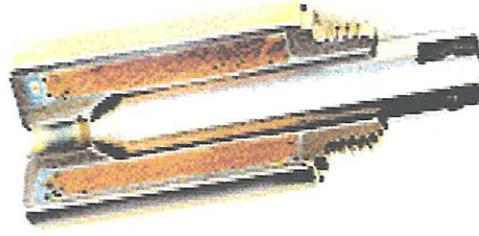


Figure. I.4 : Coupe d'un électroaimant

I.6 Domaines d'application des actionneurs électromagnétiques

Le développement de l'automatisation spécifique dans l'industrie a provoqué une croissance exceptionnelle de l'utilisation des actionneurs et composants d'automatisation, et notamment dans les domaines suivants [7]:

I.6.1 Électronique

Répondre à certaines applications parmi les plus exigeantes (ex : contrôle des mouvements, températures et fluides). Cela avec une vaste gamme de produits standard et spécifiques à l'industrie, exemple : composants à vide poussé et à nettoyage par voie humide, thermo-refroidisseurs, ioniseurs, préparation d'air propre et transfert de salle blanche, et bien d'autres produits spécialisés [7].

I.6.2 Automobile

Dans le domaine de l'automobile, on appelle actionneur le dispositif (vérin par exemple) qui permet de réguler le débit et la pression d'un fluide (air, gasoil, huile) afin de piloter un autre système dans des conditions particulières. L'utilisation la plus courante est en automobile où un actionneur permet notamment d'augmenter la quantité d'essence distribuée à froid. Un type d' actionneur en voie d'apparition commande les soupapes, permettant ainsi de se passer des arbres à cames et implémentant idéalement la distribution variable (technologie *camless*) [7].

I.6.3 Médical

De fabricants de médicaments aux fabricants d'instrumentation avec toujours plus d'intérêt pour les solutions miniaturisées et économes en énergie [7].

I.6.4 Les photocopieurs

Sont équipés d'actionneurs, dont l'activation permet entre autres de déterminer la longueur d'un original à photocopier, ou si la copie passe bien par un endroit déterminé du photocopieur [7].

I. 6.5 Electrotechnique

Ils s'apparentent principalement à des interrupteurs commandés servant à établir (contacteurs), interrompre (rupteurs, disjoncteurs) ou rediriger des courants électriques (relais) [7].

I.7 Actionneurs électriques pour l'entraînement à vitesse variable

Dans un actionneur électrique, l'organe principal est un moteur électrique généralement associé à une alimentation électronique et un dispositif de commande électronique [5].

Les actionneurs les plus utilisés pour les applications industrielles nécessitant un entraînement électromécanique à vitesse variable sont [8]:

- Les machines à courant continu.
- Les machines asynchrones.
- Les moteurs synchrones.
- Les machines à reluctance variable.

a. Machines à courant continu

La machine à courant continu est une machine électrique tournante qui fonctionne comme son nom l'indique, à partir de tensions et de courants continus. Elle est constituée de deux parties principales. Le stator est la partie fixe du système ; il entoure la partie tournante, appelée rotor. Le collecteur et les balais permettent l'alimentation électrique de l'induit. L'ensemble stator plus rotor constitue un circuit magnétique canalisant le champ magnétique créé par l'inducteur.

1. Inducteur

L'inducteur crée un champ magnétique à travers le rotor. Deux types d'excitation sont utilisées, soit :

- à aimants permanents (figure. I.5).
- à enroulements et pièces polaires (figure. I.6).



Figure. I.5 excitation à aimants

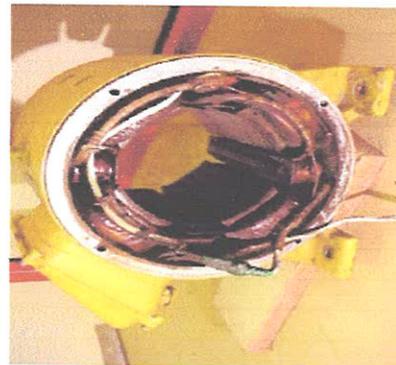


Figure I.6 excitation à enroulements et pièces polaires

2. Induit bobiné

Le champ inducteur vu par l'induit au cours d'un tour est variable. Il faudra feuilletter le rotor afin de réduire les pertes fer de l'induit [9]. Il est donc constitué de tôles circulaires isolées et empilées sur l'arbre de façon à obtenir le cylindre d'induit. Ces tôles sont en aciers au silicium et isolées par vernis (figure. I.7).

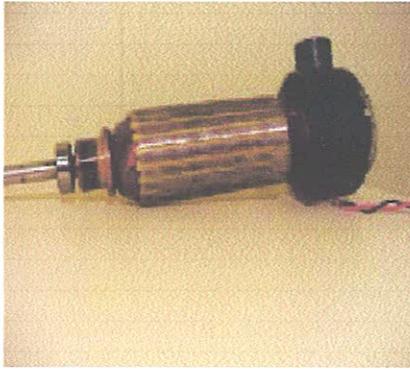


Figure. I.7 induit dans la MCC

3. Balais

Les balais assurent la liaison électrique entre la partie fixe et la partie tournante (figure. I.8).

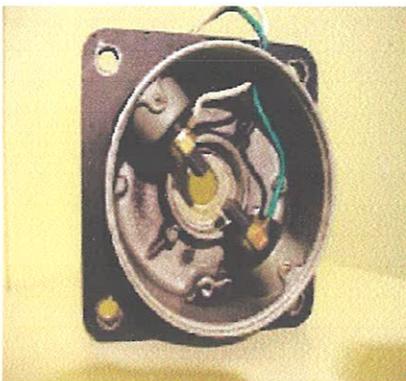


Figure. I.8 les balais dans la MCC



Figure. I.9 le collecteur dans la MCC

4. Collecteur :

Il est constitué par une juxtaposition cylindrique de lames de cuivre séparées par isolants. Chaque lame est reliée électriquement au bobinage induit (figure. I.9).

b. Machine asynchrone

La Machine asynchrone est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor (Figure. I.10). Les machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil. Le terme

asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation du rotor de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent [10].



Figure. I.10 Machine asynchrone



Figure. I.11 Rotor (à gauche) et stator (droite)

La Machine asynchrone est constituée généralement de deux parties, le stator c'est la partie fixe de la machine crée le champ tournant, et l'autre mobile dite rotor (figure. I.11). Le stator est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger le bobinage. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôles feuilletées afin de limiter les courants de Foucault.

Le rotor est un cylindre en matériau ferromagnétique fixé au stator par des paliers. Il comporte un enroulement constitué de conducteurs en court-circuit parcourus par des courants induits dus au champ magnétique créé par les courants statoriques. On développe des rotors à cage ou bobinés.

- ❖ Rotor de machine asynchrone à cage. (figure. I.12 et figure. I.13)
- ❖ machine asynchrone à rotor bobiné(ou à bagues). (figure. I.14)



Figure. I.12 Rotor en cage d'écureuil

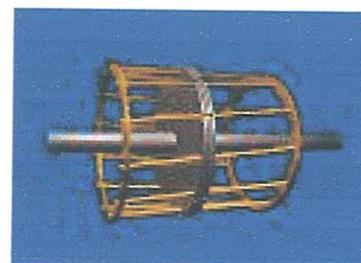


Figure. I.13 structure d'un rotor en cage d'écureuil

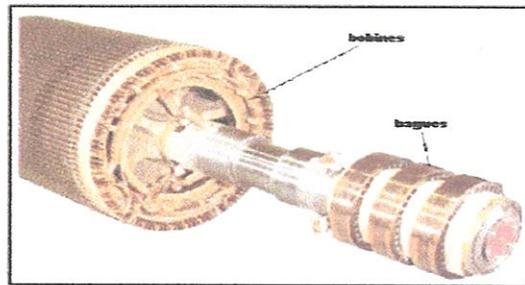


Figure. I.14 Rotor bobiné à bagues

c. Machine synchrone

La machine synchrone est une machine électrique, soit produisant un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor fonctionnement en « génératrice » dans deux quadrants du plan couple-vitesse. L'alternateur est une application particulière de la machine synchrone, fonctionnant en génératrice dans un seul quadrant du plan couple-vitesse, soit absorbant un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du rotor fonctionnement « moteur ». Les machines synchrones sont généralement des machines triphasées. Le rotor, souvent appelé « roue polaire », est alimenté par une source de courant continu ou équipé d'aimants permanents.

Le stator (figure. I.15) est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales [1]. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone.

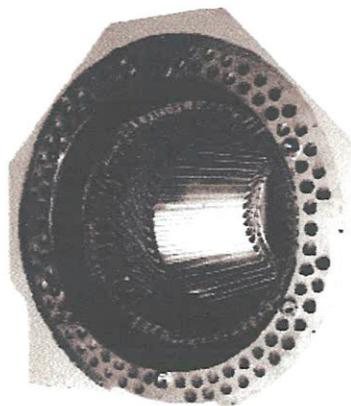
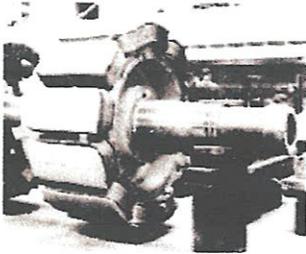
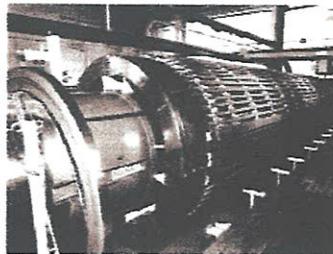


Figure. I.15 description de stator

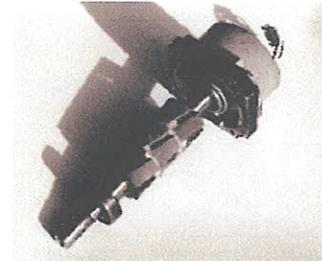
Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles saillants (figure. I.16.a), les rotors bobinés à pôles lisses (figure. I.16.b), ainsi que les rotors à aimants permanents (figure. I.16.c).



a. rotors à pôles saillants



b. rotors bobinés à pôles lisses



c. rotor à aimants

Figure. I.16 description de rotor

d. Machine à réluctance variable

Toute machine à réluctance variable pure, est constituée de deux parties en mouvement relatif dont l'une est électriquement active et l'autre passive. La première comprend un circuit magnétique denté muni de bobinages, la seconde est simplement un circuit ferromagnétique, lui aussi, denté mais sans aucun conducteur ni aimant.



Figure. I.17 photographie des composants d'une MRV

I.8 Introduction des matériaux ferromagnétiques durs dans les actionneurs

I.8.1 Définition d'un aimant permanent

Un aimant permanent dans le langage courant, est un objet fabriqué d'un matériau magnétique dur, c'est-à-dire dont le champ rémanent et l'excitation coercitive sont grands. Cela lui donne des propriétés particulières liées à l'existence du champ magnétique, comme celles d'exercer une force d'attraction sur tout matériau ferromagnétique [7].

I.8.2 caractéristiques des aimants permanents

Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par le deuxième quadrant de ce cycle appelé courbe de désaimantation d'où on peut tirer les propriétés suivantes [11]:

- **l'induction rémanente** B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé; c'est une indication de la polarisation intrinsèque de l'aimant ;
- **le champ coercitif de l'induction** H_{cB} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction ; plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable ;
- **le produit d'énergie volumique** $(BH)_{\max}$, qui définit la valeur énergétique de l'aimant par unité de volume ;
- les valeurs H_m et B_m du **point de fonctionnement optimal** correspondant à $(BH)_{\max}$.
- H_{cJ} est le champ coercitif de la polarisation

On peut classer les différents types d'aimants en fonction de leur champ coercitif de l'aimantation H_{cJ} et de leur énergie volumique $(BH)_{\max}$, qui sont avec la rémanence B_r les paramètres principaux pour l'utilisateur et qui déterminent son choix [11].

I.8.3 quelques types des aimants permanents

a. les terres rares

Comme le *Néodyme-Fer-Bore* (Nd-Fe-B) ont des performances supérieures au *samarium cobalt* et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160°C). Leur champ coercitif très élevé et leur induction rémanente

B_r (0.9T à 1.07T) les a permis d'être en particulier l'élément central des actionneurs (la figure. I.19) [11].

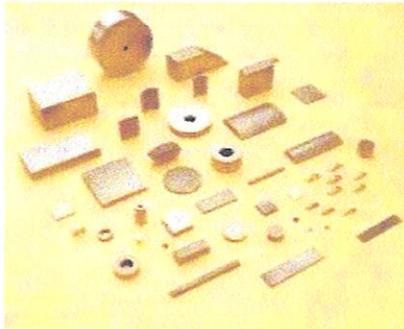


Figure. I.18 Aimants Samarium-cobalt

b. Les ferrites

Ces matériaux possèdent une induction rémanente B_r relativement faible (0.36T à 0.4T) avec un champ coercitif élevé donc une bonne résistance à la désaimantation. Leur prix est relativement bas.

c. Les AlNiCo

Les aimants Alnico sont des aimants métalliques principalement composés d'aluminium, de nickel, de cobalt et de fer. Ils sont caractérisés par une induction rémanente élevée mais un champ coercitif et un BH_{max} faibles (la figure I.19) [11].

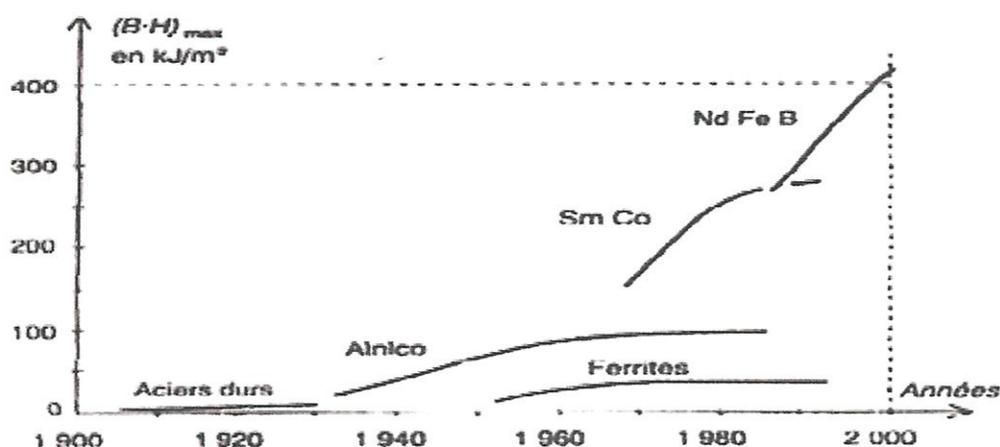


Figure I.19 : Evolution des performances des aimants permanents de fabrication industrielle au cours du XX^e siècle.

I.8.4 Avantages des aimants permanents

Dans la machine à aimant permanent, l'inducteur est remplacé par des aimants, ce qui présente les avantages suivants :

- ❖ l'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor d'où un meilleur rendement.
- ❖ l'absence d'enroulement au rotor permet un gain en volume et en masse conférant à la machine un couple volumique et une puissance massique relativement élevée.
- ❖ suppression des contacts frottant balais collecteurs ou balais bagues.
- ❖ un facteur de puissance plus élevé.

I.9 Conclusion

Les actionneurs sont des convertisseurs électromécaniques conçus pour assurer la commande du mouvement de systèmes mécaniques à partir des grandeurs électriques qu'on impose à leurs accès électriques.

Dans ce chapitre, nous avons tenté de faire une présentation sommaire sur les actionneurs électromagnétiques, où nous avons présenté quelques types et leur applications dans les différents secteurs industriels et aussi médicales.

Actuellement les aimants permanents rentrent dans la fabrication de la plupart des actionneurs électromagnétiques, dans la dernière partie de ce chapitre nous avons fait une brève présentation sur la théorie des aimants permanents et les avantages de leur emploi dans les machines électriques.

chapitre II

Modélisation des actionneurs électromagnétiques

Modélisation des actionneurs électromagnétiques

II.1 Introduction

L'étude et la conception d'un actionneur électromagnétique nécessite la compréhension et la modélisation des différents phénomènes physiques qui régissent son fonctionnement. Pour un tel dispositif, plusieurs phénomènes interviennent à savoir : électromagnétique, mécanique et thermique. Cela révèle la complexité de l'étude des actionneurs électromagnétiques.

Dans le cadre de ce master, on s'intéresse au phénomène électromagnétique où et comme pour tous dispositifs électrotechniques, il est régi par les équations de Maxwell. De ce fait, dans la première partie de ce chapitre nous présentons l'ensemble des lois gouvernant le comportement électromagnétique des dispositifs électrotechniques.

Dans la deuxième partie, une brève présentation de la méthode des éléments finis pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles du champ électromagnétique est faite.

II.2 Lois d'électromagnétisme

Le sujet d'électromagnétisme s'expose comme une déduction des quatre équations de Maxwell et trois équations dépendantes des milieux. Il est judicieux de rappeler brièvement ces équations. Communément utilisées dans l'analyse des problèmes dans les différents domaines de l'électrotechnique.

II.2.1 Equations de Maxwell

Tous les phénomènes électromagnétiques sont décrits par les quatre équations de Maxwell. Ces équations aux dérivées partielles peuvent être séparées en équations de couplage électromagnétique et de conservation. Ce sont [12][15] :

- Loi de Maxwell-Faraday

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

- Loi de Maxwell-Ampère

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_c + \vec{J}_D \quad (\text{II.2})$$

- Conservation du flux magnétique

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

- Loi de Maxwell-Gauss

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

\vec{E} : Champ électrique [V/m].

\vec{B} : L'induction magnétique [T].

\vec{D} : L'induction électrique [A.S/m²].

\vec{H} : Champ magnétique [A/m].

ρ : La densité de la charge d'espace [C/m³].

➤ \vec{J}_c exprime la densité de courant de conduction électrique induit ou inducteur donnée

par :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II.5})$$

- \vec{J}_s étant la densité de courant source et \vec{J}_{ind} représente la densité de courant résultant de phénomène induit
- \vec{J}_D représente la densité de courant de déplacement dont l'expression est la suivant :

$$\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

II.2.2 Relations des milieux

Les champs vectoriels ne sont pas indépendants les uns des autres, leur liaison est fonction de milieu où ils régent. Ainsi pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, caractérisé au point de vue électromagnétique par une conductivité électrique [S/m], une permittivité électrique ϵ [F/m] et une perméabilité magnétique μ [H/m], on ajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu. Elles sont les suivantes [14]:

- Loi d'Ohm généralisée

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{v}_d \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.7})$$

En l'absence de mouvement, l'équation (II.7) devient :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.8})$$

- Relation magnétique :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.9})$$

- Relation diélectrique :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

Où

\vec{v}_d est la vitesse de déplacement des parties mobiles.

σ : la conductivité électrique [S/m].

\vec{B}_r : Induction rémanente de l'aimant permanent [T].

μ Perméabilité [H/m] $\mu = \mu_0 \mu_r$

μ_0 : Perméabilité du vide égale à $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]

μ_r : Perméabilité relative

ε représente la permittivité électrique [F/m]. $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

ε_0 Permittivité du vide elle vaut $10^{-9}/36$ [F/m].

ε_r Permittivité relative.

II.2.3 Conditions de passage [14]

Jusqu'à ici, toutes les liaisons source-champ et champ électrique-magnétique et caractéristiques de milieu, ont été définies.

Il reste à définir les relations entre les grandeurs de deux milieux voisins électriquement et magnétiquement différents. Pour cela, on intègre les équations de Maxwell entre deux points très voisins de part et d'autre d'une surface séparant ces deux milieux, le résultat nous permet de constater :

- ❖ La conservation de la composante tangentielle du vecteur champ électrique :

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II.11})$$

- ❖ La discontinuité de la composante normale de l'induction électrique :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{II.12})$$

- ❖ La conservation de la composante normale de l'induction magnétique :

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.13})$$

- ❖ La conservation de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique :

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{II.14})$$

Où ρ_s est densité de charge surfacique.

J_s : Densité de courant surfacique.

\vec{n} Est la normale à l'interface dirigée du milieu 1 vers le milieu 2.

II.2.4 Hypothèses simplificatrices

En pratique, il est généralement usuel de simplifier les équations de Maxwell précédentes on se basant sur les conditions de travail :

L'une des plus importantes simplifications est celle de négliger la densité du courant de déplacement ($\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$) dans le matériau conducteur, parce que leur densité est très faible par rapport à celle de conduction, et aux fréquences usuelles en électrotechnique qui permet de négliger tout aspect propagatif du champ électromagnétique.

Donc, la loi d'Ampère s'écrit comme suit [15]:

$$r \vec{\partial t} \vec{H} = \vec{J}_c \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II.17})$$

A partir des équations de Maxwell précédentes, on peut définir une nouvelle loi dite la loi de conservation de densité de courant.

$$\text{On a : } r \vec{\partial t} \vec{H} = \vec{J}_{ind} + \vec{J}_s \quad \text{et} \quad \text{div}(r \vec{\partial t} \vec{H}) = 0 \quad \text{et} \quad \text{div} \vec{D} = \rho$$

$$\text{Donc} \quad \text{div} \vec{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{II.18})$$

Une notre simplification consiste à négliger la charge d'espace dans les matériaux conducteurs ($\rho = 0$).

L'équation de conservation de densité de courant (II.18) s'écrit comme suit :

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad (\text{II.19})$$

II.3 Formulation du champ électromagnétique [4]

Pour la résolution des équations de Maxwell, des variables d'état de type champs électrique \mathbf{E} et magnétique \mathbf{H} sont directement utilisées. Des variables de type potentiel peuvent aussi être introduites.

Dans le cas des problèmes électromagnétiques tridimensionnels magnétostatiques ou magnétodynamiques, plusieurs formulations en terme des potentiels magnétiques et électriques, scalaires ou vecteurs ont été proposées dans la littérature scientifique.

La formulation en potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} et la formulation en potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} associé au potentiel scalaire électrique V semblent être les plus adaptées pour les problèmes bidimensionnels magnétostatiques et magnétodynamiques respectivement.

II.3.1 Cas des problèmes bidimensionnels

La quasi- totalité des problèmes électromagnétiques est tridimensionnelle, des symétries peuvent permettre de ramener l'étude à un plan bidimensionnel [14].

Dans le cas d'objet suffisamment long ou pourvu d'une symétrie de révolution, les courants induits sont généralement perpendiculaire au plan d'étude [14].

Ainsi, le potentiel vecteur magnétique n'a plus qu'une composante colinéaire à celle du courant et les effets de bord peuvent être négligés. Un autre avantage que présente cette formulation réside dans la condition de jauge de Coulomb ($div \vec{A} = 0$) assurant l'unicité de la solution qui est automatiquement vérifiée dans ce cas [14].

II.4 Formulation en potentiel vecteur magnétique associé au potentiel scalaire électrique : A-V

Dans le cas du fonctionnement dynamique des dispositifs électrotechniques les champs H et E sont couplés par la loi d'induction (Maxwell-Faraday) donc les équations du Maxwell qui nous intéressent pour la formulation du problème sont : [14]

$$div \vec{B} = \vec{0} \quad (II.20)$$

$$r \vec{\partial}_t \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.21)$$

$$r \vec{\partial}_t \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (II.22)$$

Avec :

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \vec{E} \quad (II.23)$$

La conservation du flux magnétique (II.20) nous permet d'introduire un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.24})$$

Dans le fonctionnement magnétodynamique, le potentiel vecteur magnétique \vec{A} est associé au potentiel scalaire électrique v .

Sachant que :

$$\text{rot}(-\text{grad} v) = 0 \quad (\text{II.25})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} v \quad (\text{II.26})$$

Le courant induit s'écrit donc

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \vec{E} = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad} v \right) \quad (\text{II.27})$$

Remplaçant dans l'équation de Maxwell-Ampère on aboutit à l'équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) à résoudre :

$$\text{rot} v \text{rot} \vec{A} + \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad} v \right) = \vec{J}_c + \text{rot} v \vec{B}_r \quad (\text{II.28})$$

Où v est la reluctivité magnétique.

II.5 Résolution de l'EDP du champ électromagnétique

II.5.1 Méthodes de résolution

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour résoudre les EDP du champ électromagnétique. On peut les classer en trois grandes familles : analytique, semi-analytique et numérique. Les deux premières familles sont généralement restreintes aux problèmes mono ou bidimensionnels à caractéristiques physiques et géométriques simples. Tandis que la dernière catégorie est connue par sa robustesse et puissance pour la résolution des problèmes électromagnétiques à géométries complexes et avec de fortes non-linéarités physiques. Elle regroupe trois méthodes :

- ❖ Méthode des différences finies (MDF)
- ❖ Méthode des volumes finis (MVF)
- ❖ Méthode des éléments finis (MEF)

Dans notre travail de modélisation, nous intéressons à la méthode des éléments finis.

II.5.1.1 La méthode des éléments finis MEF

La méthode des éléments finis MEF a été introduite par P.Silvester et M.V.K.Chari en 1970 dans le domaine du calcul électromagnétique car au départ cette méthode n'était utilisée que dans le domaine du génie mécanique ou du génie civil pour le calcul des efforts sur les structures [16].

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations différentielles aux dérivées partielles. Elle s'applique aux problèmes stationnaires ou dépendant du temps, linéaire ou non, à une, deux ou trois variables d'espace indépendantes [15].

✦ Principe de la méthode des éléments finis :

Le principe de la méthode des éléments finis repose sur le concept simple de représentation du comportement physique d'un milieu continu à l'aide d'un modèle mathématique. Ce modèle est obtenu en découpant le domaine d'étude en sous-domaines (éléments finis) plus simples (élément de forme linéique, triangulaire, tétraédrique, etc...) [16]. La MEF consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues à l'intérieur de chaque élément fini pour transformer les équations aux dérivées partielles associées à des conditions aux limites en un système d'équations algébriques.

Pour analyser un problème par la méthode des éléments finis, nous sommes appelés à [17]:

- Comprendre le problème physique étudié et connaître intuitivement la nature de la solution cherchée ;
- Discrétiser le domaine de la solution en sous-domaines dits : éléments finis ;
- Approximation des équations du système étudié, pour cela deux formulations existent : formulation variationnelle et formulation résidus pondérés ;
- Intégrer et résoudre le système d'équations algébriques.

a- Discrétisation en éléments finis

La discrétisation consiste à diviser la région totale en sous domaines, appelés éléments finis. La figure II.1 présente quelques éléments typiques pour des problèmes bidimensionnels [3].

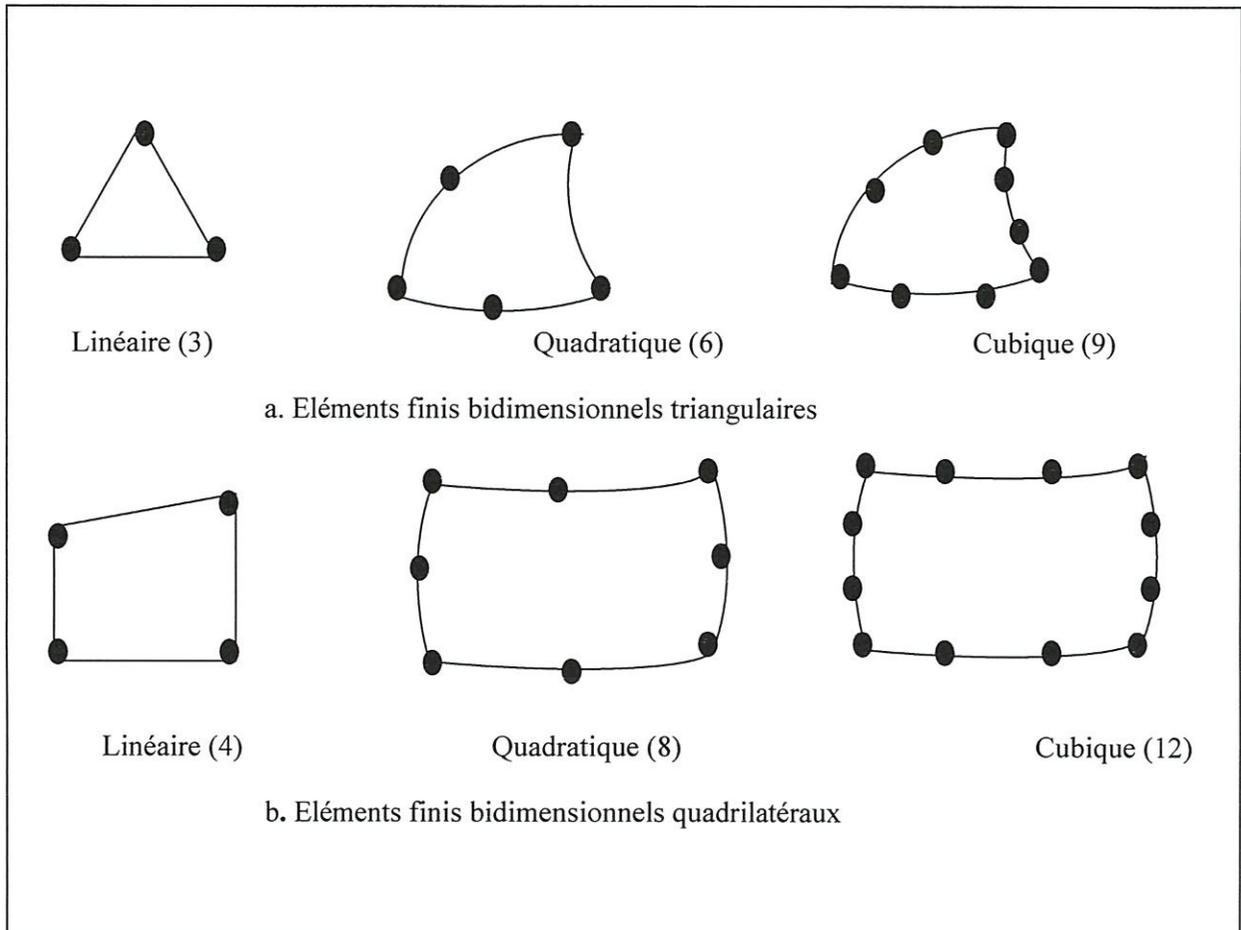


Figure : II.1 Types d'éléments finis bidimensionnels

Chaque élément fini est constitué d'un ensemble des nœuds et des arrêtes. La variable inconnue est approximée sur chaque élément fini à l'aide d'une interpolation polynomiale [3].

b-Approximation et construction des fonctions d'interpolation

Considérant un domaine d'étude (Ω), dans lequel le problème physique considéré est gouverné par une équation différentielle donnée par [3]:

$$L(U) = F \quad (\text{II.29})$$

Avec : L est un opérateur différentiel ;

U est la variable inconnue ;

F est le terme source.

Aux frontières (Γ) de domaine sont associées des conditions aux limites données par l'équation [3] :

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial n} + HA \quad (\text{II.30})$$

Avec :

G et H sont des fonctions connues sur les frontières (Γ). Deux cas sont distingués [3]:

- Si la fonction G est nulle, on aura une condition de type Dirichlet imposant la valeur de la variable sur la frontière (Γ) ;
- Si la fonction H est nulle, on aura une condition de type Neumann imposant la valeur de la dérivée normale de la variable par rapport à la frontière (Γ).

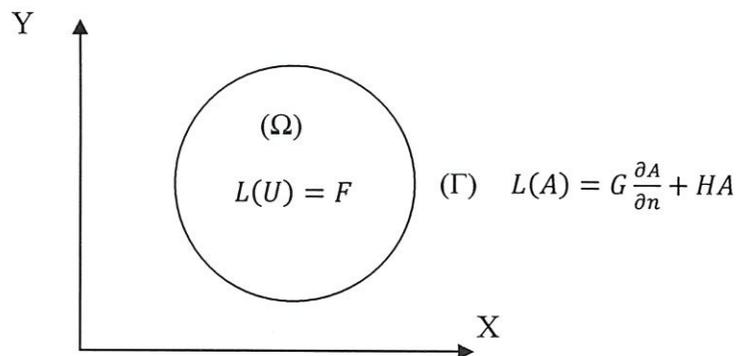


Figure II.2. Domaine d'étude (Ω)

Après la discrétisation de domaine d'étude (Ω) en éléments finis figure II.3, la variable inconnue (U) est approchée sur chaque élément fini par la combinaison linéaire suivante [3]:

$$U_i^e(x, y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x, y) U_i \quad (\text{II.31})$$

Avec :

U_i^e : est la valeur de la variable U au nœud i de l'élément e .

n : est le nombre des nœud de l'élément e .

Les α_i sont les fonctions d'interpolation.

Afin d'avoir la convergence de la solution, l'approximation nodale doit satisfaire les propriétés, ci-dessous [3]:

- a) La fonction approchée $U(X, Y)$ coïncide avec la fonction exacte $U_{ex}(X, Y)$ en tous les nœuds d'interpolation de l'élément, de coordonnées x_i, y_i :

$$U_{ex}(X, Y) = U_{ex}(x_i, y_i) = U_i \quad (\text{II.32})$$

D'où la fonction d'interpolation α doit vérifier :

$$\alpha_i(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } j = i \\ 0 & \text{si } j \neq i \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Où i et j sont les numéros des nœuds de l'élément fini considéré.

- b) Si la fonction approchée $U(x)$ et ses dérivées jusqu'à l'ordre s , sont continues sur l'élément e , les fonctions $\alpha_i(x)$ et leurs dérivées jusqu'à l'ordre s , doivent être continues sur le même élément e .
- c) La variable approchée doit être continue sur une frontière commune à deux éléments

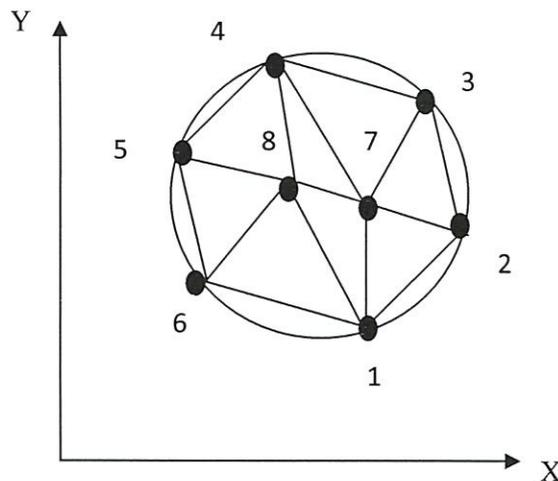


Figure II.3. Discrétisation de domaine (Ω) par éléments

La forme d'approximation la plus connue pour $U^e(x, y)$ est de type polynomiale.

$$U_{ex}(X, Y) = a + bX + cY \quad (\text{II.34})$$

$$U_{ex}(X, Y) = a + bX + cY + dXY \quad (\text{II.35})$$

(II.34) : pour l'élément triangulaire ;

(II.35) : pour l'élément rectangulaire.

Les constantes a, b, c et d sont à déterminer.

c- Formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles :

La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis, peut être obtenue par l'utilisation de l'une des méthodes suivantes [17] :

- ❖ Variationnelle.
- ❖ Résidus pondérés.

c-1 Méthode variationnelle

Consiste à minimiser une fonctionnelle associée à la l'EDP concernée. Cette fonctionnelle est souvent liée à l'expression de l'énergie du système. L'utilisation de la méthode variationnelle nécessite la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système, ce qui n'est pas toujours possible à réaliser. Par contre la méthode des résidus pondérés ne nécessite pas la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système, ce qui a rendu cette méthode plus générale et largement utilisée par rapport à la précédente [17].

c-2 Méthode des résidus pondérés :

C'est la méthode projective ou on cherche à projeter l'équation locale sur des fonctions de base d'un espace de fonction de pondération, et on essaie de minimiser le résidu par l'approximation de la fonction de l'inconnue dont l'expression est [17] :

$$\int_{\Omega} \phi(x,y) d\Omega = 0 \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$$R = L(U) - F \quad (\text{II.37})$$

R : résidus de l'approximation.

ϕ : fonction de pondération.

Les valeurs de U qui permettent d'annuler l'intégrale sont solutions du système algébrique obtenu.

Il y a différentes méthodes pour le choix des fonctions de pondération :

- ❖ Méthode de sous domaines.
- ❖ Méthode de colocation par points.
- ❖ Méthode des moindres carrés.
- ❖ Méthode de Galerkin.

La méthode la plus utilisée est celle de Galerkin. Elle consiste à choisir des fonctions de pondération égales à celles d'interpolation [3]:

$$\phi_k = \alpha_k \quad k=1, \dots, n \quad (\text{II.38})$$

La forme intégrale de l'équation différentielle (II.29) est [3]:

$$\iint \alpha_i(x, y) [\sum_j \alpha_j(x, y) U_j + F] d\Omega = 0 \quad (\text{II.39})$$

Cette intégrale sera calculée sur chaque élément fini e constituant le domaine d'étude (Ω), d'où la forme matricielle élémentaire suivante [3]:

$$[K]^e [U]^e = [F]^e \quad (\text{II.40})$$

d. Assemblage et résolution

d.1 L'assemblage

L'assemblage est l'opération qui permet d'aboutir à la matrice globale $[K]$ et le vecteur globale $[F]$ à partir des matrices élémentaires $[K]^e$ et des vecteurs élémentaires $[F]^e$, on obtient ainsi un système de la forme [17]:

$$[K][U] = [F] \quad (\text{II.41})$$

d.2 Résolution du système

Avant la résolution du système matriciel globale, on doit tenir compte des conditions aux limites où certaines valeurs de $[F]$ sont connues, elles sont imposées sur des portions du contour de domaine d'étude (condition de Dirichlet). Ces conditions aux limites peuvent être introduites dans le système (II.41) par l'une des méthodes suivantes :

- ❖ La méthode du terme diagonal dominant;
- ❖ La méthode du terme unité sur la diagonale ;
- ❖ La méthode de suppression des équations.

La résolution est la dernière étape, qui mène à la détermination des valeurs U_i cherchées, en chaque nœud de domaine considéré, il s'agit de résoudre le système (II.41), pour cela plusieurs méthodes existent selon le type de problème linéaire ou non linéaire [18].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les phénomènes électromagnétiques régis par les lois de Maxwell et, les relations des milieux, en tenant compte les hypothèses simplificatrices. La formulation de l'équation du champ électromagnétique en terme de potentiel vecteur magnétique associé au potentiel scalaire électrique souvent utilisée pour la modélisation des dispositifs électrotechniques en régime magnétodynamique a été aussi présentée

Le calcul du champ électromagnétique passe par la résolution de l'EDP. La méthode des éléments est retenue dans ce travail où une brève présentation de la méthode été faite à la fin de chapitre.

Le prochain chapitre est consacré à la présentation de la démarche d'optimisation en électrotechnique et la position d'un problème d'optimisation concernant un actionneur électromagnétique linéaire axisymétrique.

chapitre III

Conception optimale d'un actionneur électromagnétique

Conception optimale d'un actionneur électromagnétique

III.1 Introduction

Les ingénieurs électrotechniciens sont amenés à concevoir et à dimensionner les dispositifs électromagnétiques, comme les actionneurs linéaires afin d'atteindre des objectifs visés concernant la puissance, le rendement, la consommation minimale d'énergie...etc.

Dans ce chapitre, nous allons présenter succinctement la démarche systématique de conception optimale en électrotechnique ainsi que quelques méthodes d'optimisation souvent employées pour optimiser les dispositifs électromagnétiques. Cette démarche est appliquée pour optimiser la forme d'un actionneur électromagnétique axisymétrique utilisé pour l'automatisation de vannes industrielles qui peuvent être trouvés dans tous types d'installations comme celles de traitement des eaux usées, les centrales électriques et même dans les raffineries. C'est là où ils jouent un rôle majeur dans l'automatisation de contrôle de processus.

III.2 Définition de la conception en électrotechnique

Un outil de conception c'est un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir et la détermination de ses performances en partent d'un cahier de charges donné, il permet d'explorer automatiquement l'ensemble des solutions possibles [19][20] [21] [22].

Un problème de conception optimale consiste à concevoir un dispositif de point de vue dimensionnement et condition d'utilisation pour obtenir des meilleures performances et respecter un ensemble des contraintes exigées par un cahier de charges [19][20] [21] [22].

L'optimisation est souvent réduite à la technique de résolution mathématique des problèmes rencontrés[19][20] [21] [22], et doit faire l'objet d'une démarche systématique qui comporte quatre phases fondamentales présentées dans la figure III.1 [4].

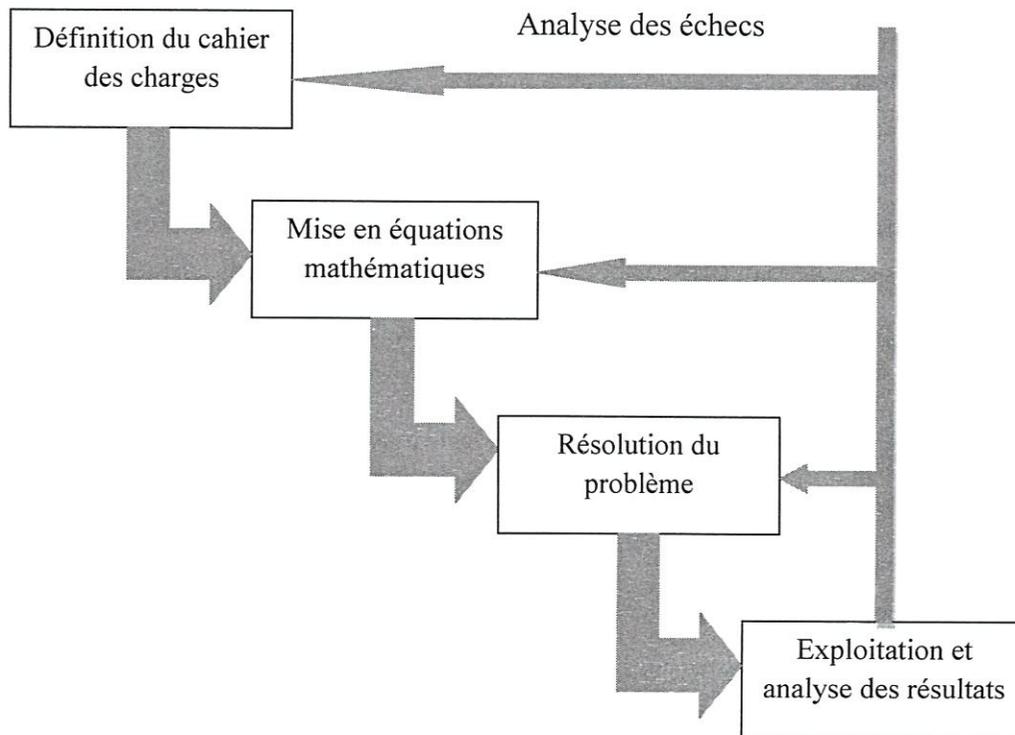


Figure. III.1 démarche de résolution d'un problème de conception.

Pour trouver la solution optimale, il est nécessaire de réaliser un compromis entre deux objectifs [19][20] [21] [22].

- l'exploration robuste de l'espace de recherche.

- L'exploitation des meilleures solutions.

III.2.1 Formulation Mathématique d'un Problème d'Optimisation

Un problème d'optimisation de dimension n peut être écrit de façon générale sous la forme [3]:

$$(p) \quad \begin{cases} \text{Min } f(x) \in \mathbb{R}^n \\ g_i(x) \leq 0 & i = 1, \dots, p \\ h_j(x) = 0 & j = 1, \dots, q \\ x_{k \min} \leq x_k \leq x_{k \max} & k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Où

- $f(x)$ est le critère à minimiser appelé aussi fonction objectif
- x est un vecteur à n variables x_k qui représentent les paramètres du problème à optimiser
- $g_i(x)$ et $h_j(x)$ représentent respectivement les contraintes d'inégalité et d'égalité
- $x_{k \min}$ et $x_{k \max}$ désignent les contraintes de domaine
- \mathbb{R}^n est l'espace de recherche borné par les contraintes de domaine.

La solution d'un problème d'optimisation est alors donnée par un ensemble de paramètres x^* pour lesquels la fonction objectif présente une valeur minimale, en respectant les contraintes d'égalité, d'inégalité et de domaine [3].

III.2.2 Objectif de l'optimisation [19][20] [21] [22]

- Minimiser un coût de production.
- Améliorer les performances d'un dispositif.
- Affiner un modèle de calcul.

III.2.3 Méthodes d'optimisation

La recherche de l'optimum d'un problème est réalisée à l'aide des méthodes d'optimisation. Elles sont divisées en deux grandes classes : les méthodes déterministes et celles stochastiques [4].

La grande majorité des méthodes de la première famille sont basées sur la connaissance de la direction de recherche donnée par le gradient de la fonction objectif. Ce sont des méthodes locales dont l'optimum dépend fortement de point initial [4].

Par contre, les méthodes stochastiques sont considérées comme des méthodes globales à causes de leur capacité à trouver le minimum globale parmi plusieurs minima locaux pour n'importe quel contexte initial sans avoir besoin de connaître le gradient de la fonction objectif. Cependant, le temps de calcul élevé reste l'handicap majeur de ces méthodes [4].

III.2.3.1 Méthodes d'Optimisation Déterministes

Les méthodes déterministes peuvent être classifiées en unidimensionnelles ou multidimensionnelles.

➤ Méthodes Déterministes Multidimensionnelles

Les méthodes déterministes multidimensionnelles sont consacrées à l'optimisation de fonctions à un paramètre ou plus. Elles peuvent être classées selon l'utilisation de l'information des dérivées de la fonction objective par rapport aux paramètres X_k . Elles sont dites directes ou d'ordre 0 si elles n'utilisent que l'information de la valeur de la fonction elle-même. Dans le cas où elles nécessitent aussi le calcul du gradient de la fonction, elles sont dites indirectes ou d'ordre 1[23].

La Figure (III.2) montre les méthodes multidimensionnelles les plus importantes avec leur ordre respectif de résolution[23].

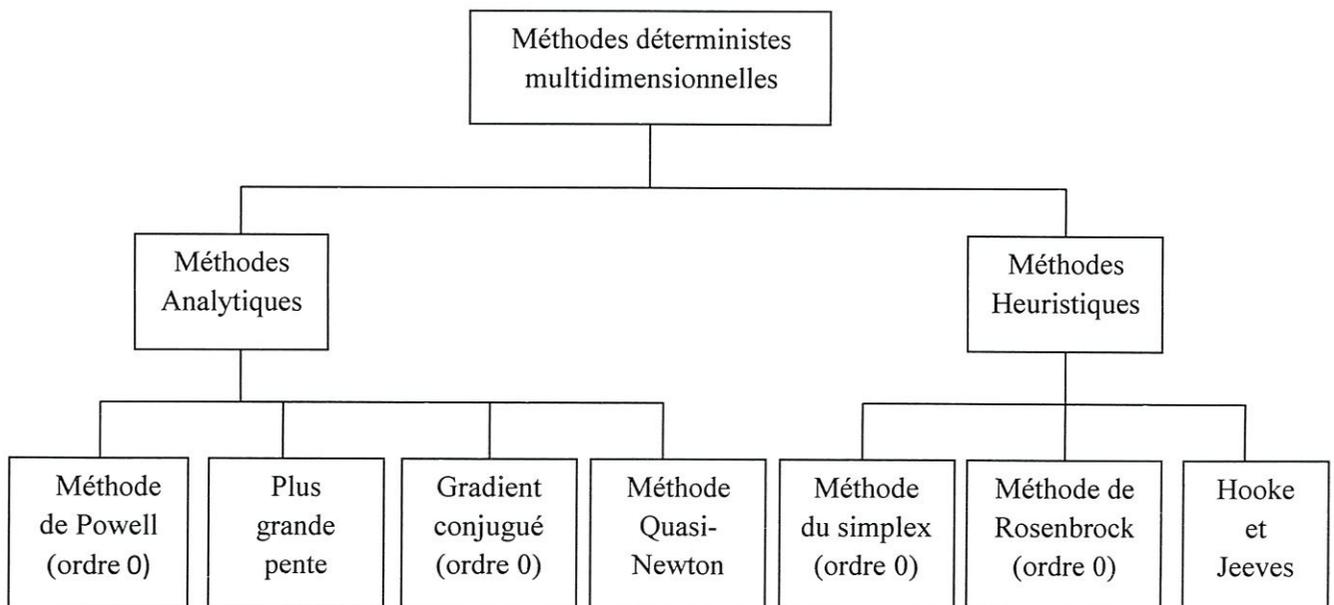


Figure III.2. Principales méthodes déterministes multidimensionnelles

III.2.3.2 Méthodes d'Optimisation stochastiques

Les méthodes stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation. Ces méthodes ont une grande capacité à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Elles sont d'ordre Zéro. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations de la fonction objectif. Dans notre travail la méthode de l'algorithme génétique sera retenue pour résoudre le problème d'optimisation posé. La Figure III.3 Présente les méthodes stochastiques les plus utilisées [2].

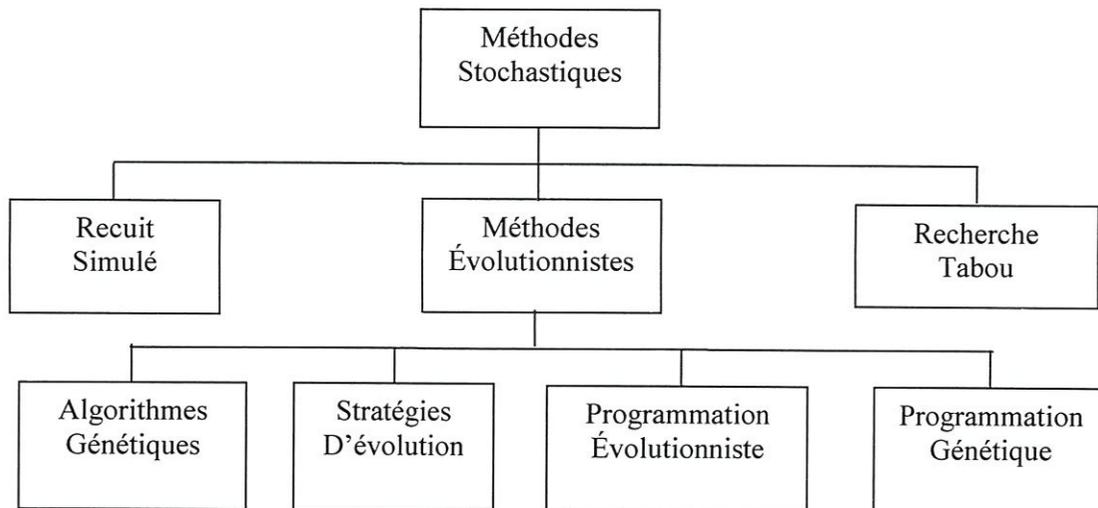


Figure III.3. Principales méthodes stochastiques

➤ Méthode des Algorithmes génétiques

La méthode des Algorithmes Génétiques (AG) fait partie d'une famille de méthodes stochastiques appelée Méthodes Evolutionnistes. Cette méthode s'inspire des mécanismes de l'évolution naturelle [19][20] [21] [22].

L'AG est basé sur la traduction mathématique des phénomènes naturels qui sont la reproduction, la survie et l'adaptation des individus, dans le sens que les individus d'une population les mieux adaptés à leur environnement ont une plus grande probabilité de survivre et de se reproduire de génération en génération, en donnant des descendants encore mieux adaptés. (Tableau III.1) [19][20] [21] [22]

Théorie d'Evaluation naturelle	Algorithme génétique
Individu	Ensemble de paramètres
Population	Ensemble de configuration de paramètres
Environnement	Espace de recherche
Adaptation de l'individu	Evaluation de la fonction objectif
Génération	Itérations de la méthode

Tableau III.1 Analogie entre les AG et le théorème d'évolution naturelle

L'algorithme génétique est basé sur quatre éléments principaux qui sont : l'évaluation, la sélection, le croisement et la mutation.

Après l'initialisation aléatoire de la première population d'individus qui définit la première génération, on répète successivement les quatre étapes suivantes :

1. L'évaluation des individus par le calcul de leurs fonctions objectifs (mesure de l'adaptation).
2. La sélection des individus reproducteurs : théoriquement les individus qui s'adaptent le mieux à l'environnement défini par la fonction objectif.
3. Application de l'opérateur de croisement. Cet opérateur permet l'exploration de l'espace de recherche.
4. Application de l'opérateur de mutation. Cet opérateur joue un double rôle : explorer l'espace de recherche qui n'a pas pu être atteint par l'opérateur de croisement et réaliser une recherche locale, très proche de la solution.

A la fin de l'étape quatre nous obtiendrons une nouvelle population. Cette population constitue l'ensemble d'individus de la génération (itération) qui suit.

III.2.4 Stratégie d'optimisation en électrotechnique

La démarche d'optimisation en électrotechnique consiste à déterminer, à partir d'un cahier des charges, une solution optimisant une fonction objectif qui est la formulation mathématique des objectifs à atteindre. Les étapes essentielles de cette démarche sont illustrées dans la figure III.4 [4].

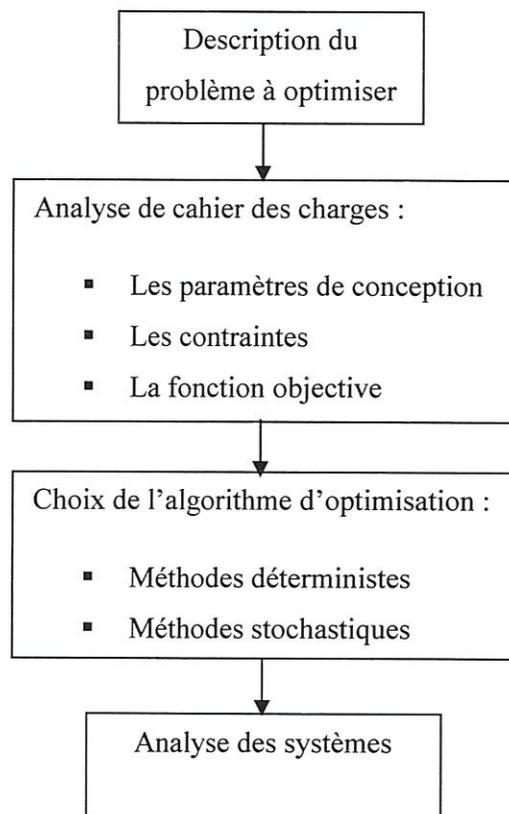


Figure III.4 processus général de l'optimisation

III.3 Optimisation d'un actionneur électromagnétique linéaire axisymétrique

Dans ce travail de Master nous intéressons à l'optimisation d'un actionneur électromagnétique axisymétrique à aimant permanent utilisé pour fonctionner une vanne (actionneur de vanne).

La figure III.5 représente la géométrie de l'actionneur linéaire dans sa position finale pour un entrefer minimal de 0.5 mm par rapport au noyau ainsi que ses éléments constitutifs. L'actionneur considéré présente une symétrie de révolution [24].

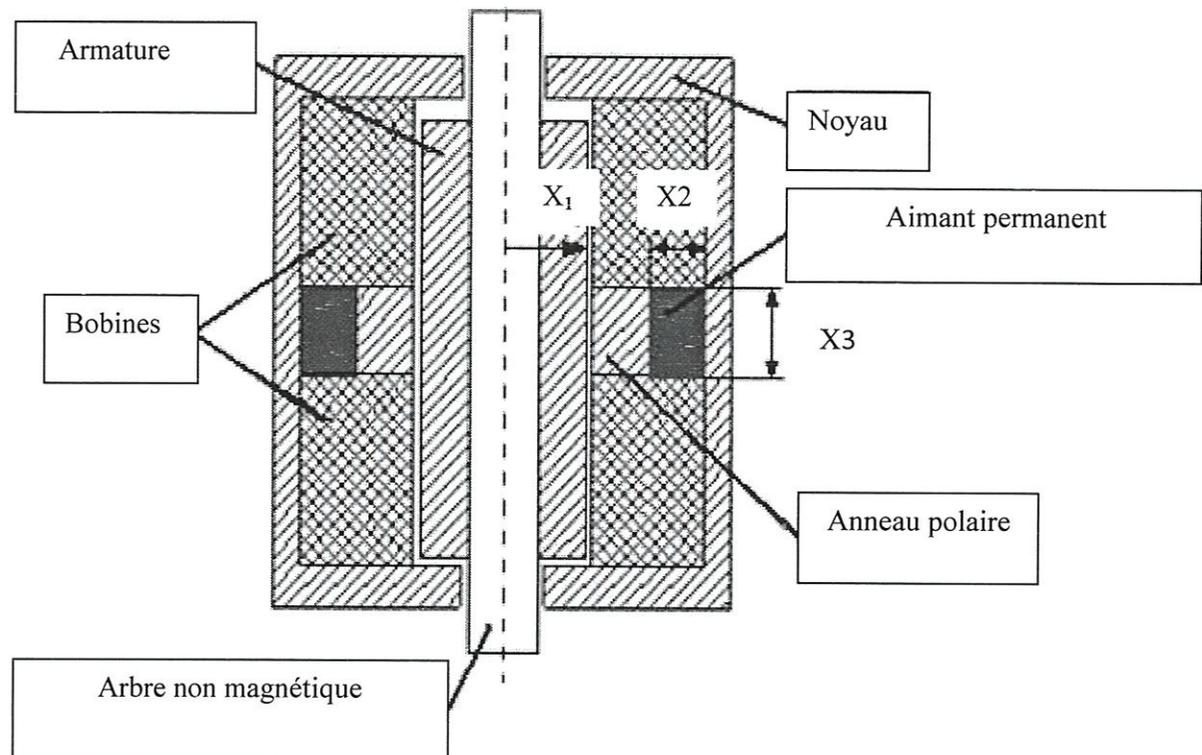


Figure : III.5 construction principale de l'actionneur

Les dimensions non fixées (x_1 , x_2 et x_3) sont les paramètres d'optimisation.

III.3 .1 Analyse de cahier de charges

C'est la première phase dans un processus de conception, elle consiste à spécifier les fonctions à réaliser par le dispositif à concevoir, et les contraintes attachées à ces fonctions et à l'environnement dans lequel va être placé cet actionneur [4].

Dans cet actionneur, les deux bobines sont identiques et alimentées de manière à créer un flux dans le même sens. L'aimant permanent est aimanté radialement [24].

Le flux généré en bas de l'armature (pour l'entrefer inférieur) crée une force dans la partie inférieure de l'actionneur qui s'oppose à la force principale créée dans la partie supérieure. Pour remédier ce problème, nous proposons dans ce travail de Master une stratégie d'optimisation utilisant l'algorithme génétique pour minimiser le flux magnétique créé dans la partie inférieure de l'actionneur à sa position finale ce qui revient aussi à réduire la force opposée à la force principale.

III.3.2 Formulation de problème d'optimisation

Cette phase consiste à traduire le problème physique en un problème mathématique équivalent.

Pour minimiser la force créée dans la partie inférieure de l'armature (position finale) qui s'oppose à la force principale, le flux magnétique créé dans cette partie (entrefer inférieur) doit être minimal. Pour une telle situation critique pour le fonctionnement de dispositif, le flux créé par les bobines doit compenser celui créé par l'aimant permanent. Cela permet de minimiser la force opposée qui naît dans la partie inférieure de l'armature à la fin de sa course (position finale comme est montré dans la figure III.5).

La fonction objectif est formulée alors comme suit :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [(B - B_a)]^2 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

x : désigne le vecteur des paramètres d'optimisation.

n : L'ensemble de points (nœuds) dans l'entrefer inférieur;

B : L'induction magnétique aux points i issue de la modélisation par éléments finis;

B_a : L'induction magnétique aux points i due à l'aimant permanent seul (courant nul dans les bobines).

En outre des trois paramètres géométriques qui apparaît sur la figure III.5, on ajoute un quatrième paramètre d'optimisation et qui concerne la densité de courant dans les bobines.

X_1, X_2, X_3 et X_4 Sont les paramètres d'optimisation dont les limites de variation sont présentées dans le tableau III.3.

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
le rayon extérieur de l'armature X_1	5 [mm]	7[mm]
l'épaisseur de l'aimant permanent X_2	4[mm]	8[mm]
la longueur de l'aimant permanent X_3	2 [mm]	6[mm]
La densité de courant dans les bobines X_4	$0.025 \cdot 10^6$ [A/m ²]	$0.03 \cdot 10^6$ [A/m ²]

Tableau.III.3 les paramètres d'optimisation

La formulation mathématique du problème d'optimisation posé devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } F(X_1, X_2, X_3, X_4) = \sum_{i=1}^n [(B - B_a)]^2 \\ X \in S \subset R^n \\ 5 \leq X_1 \leq 7 \\ 4 \leq X_2 \leq 8 \\ 2 \leq X_3 \leq 6 \\ 0.025 \cdot 10^6 \leq X_4 \leq 0.03 \cdot 10^6 \end{array} \right. \quad (\text{III.3})$$

Avec :

S Est espace de recherche ou bien espace de solution.

R^n Sont les nombres réales positifs.

III.3.4 Résolution du problème

Après avoir fait la formulation mathématique du problème physique traduit par la fonction objectif et les variables de conception, on passe à sa résolution. Pour cela on a choisi la méthode de l'algorithme génétique. Les résultats d'optimisation seront présentés dans le prochain chapitre

III.4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a présenté un aperçu sur la conception en électrotechnique et la démarche générale d'un processus d'optimisation. Après, nous avons présenté succinctement les différentes méthodes d'optimisation. Elles sont classées en deux grandes familles : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

Dans la deuxième partie du chapitre, on a posé le problème d'optimisation auquel nous nous sommes intéressés dans ce travail. Il concerne l'optimisation de forme d'un actionneur électromagnétique axisymétrique à aimant permanent.

Les résultats de la modélisation et l'optimisation de l'actionneur considéré font l'objet du quatrième chapitre.

chapitre IV

Application

Application et résultats

IV.1 Introduction

Ce chapitre est divisé en deux grandes parties. Dans la première partie, nous présentons les résultats liés à la modélisation numérique par éléments finis d'un actionneur électromagnétique axisymétrique dont l'analyse de cahier de charges a fait l'objet du chapitre précédent.

Un processus d'optimisation basé sur l'association de la modélisation numérique à l'algorithme génétique est appliqué à cet actionneur dont l'objectif est de choisir les meilleures dimensions de l'aimant assurant d'une part un bon fonctionnement de dispositif et, d'autre part une consommation minimale d'énergie. Les résultats de la démarche d'optimisation adoptée dans ce travail sont présentés dans la deuxième partie du chapitre.

Le programme de calcul est réalisé sous environnement Matlab.



IV.2 Modélisation numérique de l'actionneur électromagnétique axisymétrique à aimant permanent

IV.2.1 Modéle géométrique

L'actionneur électromagnétique considéré dans cette application est utilisé pour activer une vanne. L'armature mobile de l'actionneur supposée conductrice dans notre travail se déplace linéairement sous l'effet des forces électromagnétiques sur un trajet de 1mm (course de 1mm) marquant deux positions distinctes : initiale et finale dont l'entrefer inférieur est de 0.5 mm. La géométrie de l'actionneur telle est donnée dans [24] est montrée sur la figure IV. 1.

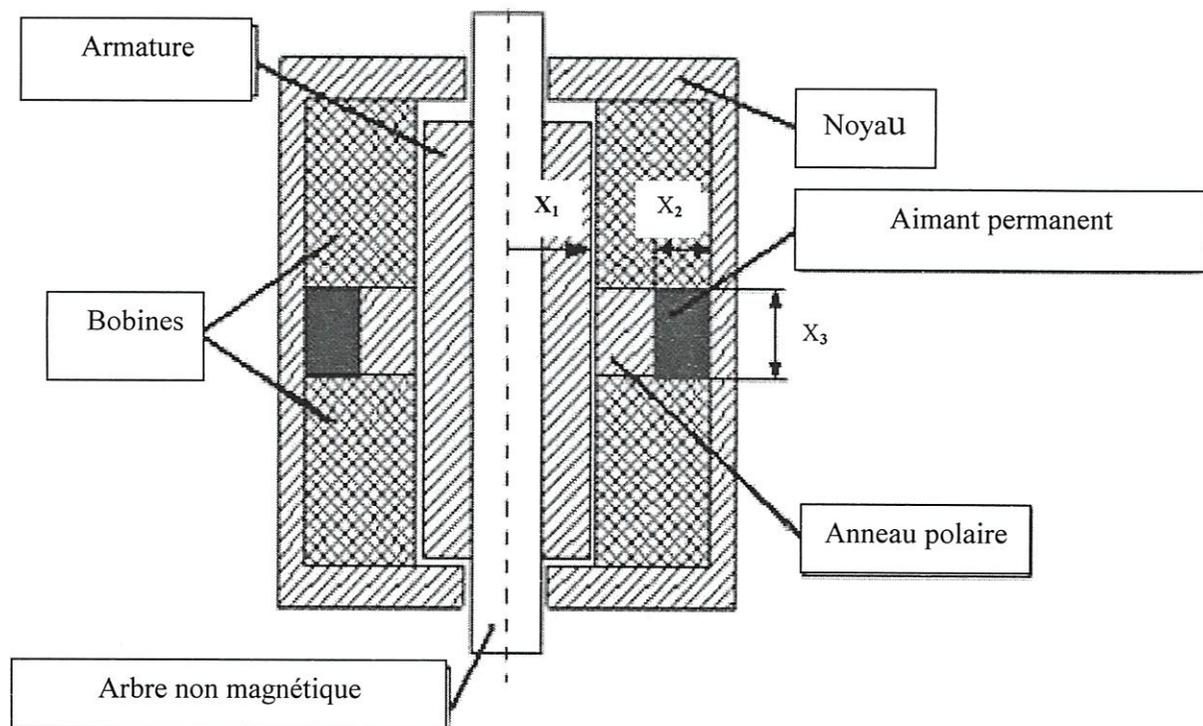


Figure : IV.1 construction principale de l'actionneur

Comme on peut le voir, le dispositif est axisymétrique et l'étude ne concerne donc que la moitié de domaine (figure IV.2) dans le système des coordonnées cylindriques.

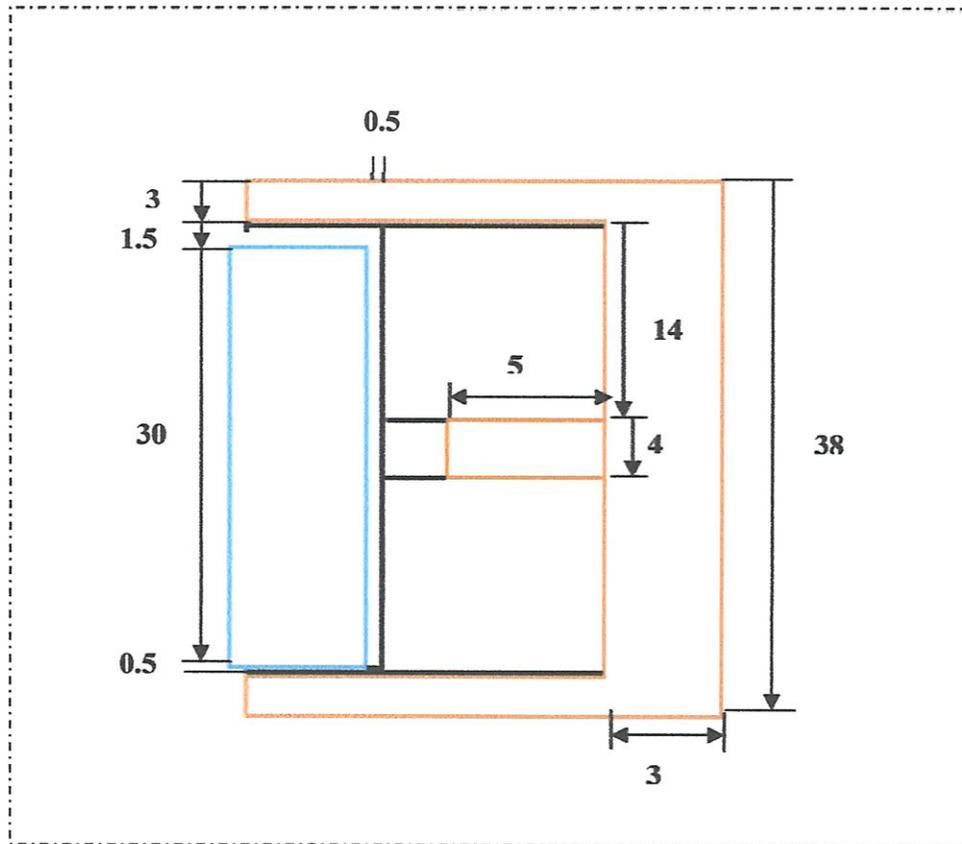


Figure IV.2. Réduction de domaine d'étude et dimensions (mm) des différents éléments constitutifs de dispositif.

Remarque : Toutes les dimensions sont en millimètre.

IV.2.2 Caractéristiques physiques et géométriques

Cet actionneur est constitué d'un inducteur de deux bobines alimentées de manière à produire un flux magnétique dans le même sens et un aimant permanent aimanté radialement, une armature conductrice mobile, un noyon fixe qui couvre les bobines, et un anneau polaire qui est placé juste de côté de l'aimant entre les deux bobines (voir la figure VI.1).

Les caractéristiques physiques et géométriques des éléments constitutifs de l'actionneur sont résumées dans le tableau IV.1.

Dimensions fixes	La course totale	1mm
	Entrefer	0.5mm
	le diamètre intérieur d'armature	5mm
	longueur d'induit	28mm
	L'entrefer entre armature et l'anneau polaire	0.5mm
	L'entrefer entre l'arbre non magnétique et la lame de noyau	0.5mm
	diamètre de noyau extérieur	33.4mm
	épaisseur centrale de la partie tubulaire	2mm
	épaisseur de l'âme dans la partie supérieure et inférieure	3mm
	hauteur du noyau	38mm
Les caractéristiques physiques des différents matériaux	La perméabilité relative	500
	Conductivité électrique de l'armature	58.10^6 [S/m]
	La densité de courant de source	$0.02958.10^6$ [A/m ²]
	L'induction rémanente de l'aimant permanent	0.825 [T]

Tableau VI.1 les dimensions géométrique et les caractéristiques physiques de l'actionneur électromagnétique linéaire axisymétrique

IV.2.3 Résultats de la Modélisation de l'actionneur électromagnétique

Le comportement électromagnétique de dispositif considéré est régi par l'équation de diffusion suivante :

$$r\vec{\partial}t \nu r\vec{\partial}t \vec{A} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s + r\vec{\partial}t \nu \vec{B}_r \quad (\text{IV.1})$$

Où ν est la reluctivité magnétique.

\vec{J}_s : Étant la densité de courant source

B_r : Induction rémanente de l'aimant permanent.

A : potentiel vecteur magnétique.

Pour une source de courant sinusoïdale, l'équation précédente s'écrit :

$$r\vec{\partial t} \nu r\vec{\partial t} \vec{A} - j\sigma\omega \vec{A} = \vec{J}_s + r\vec{\partial t} \nu \vec{B}_r \quad (\text{IV.2})$$

Avec

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{IV.3})$$

f est la fréquence[hz].

ω est la pulsation de la fréquence.

La résolution de cette EDP du champ électromagnétique est faite par la méthode des éléments finis. Son application permet d'obtenir les valeurs de potentiel vecteur magnétique A en tous points de domaines résultants d'un découpage en éléments finis triangulaires de 1^{er} ordre. Le maillage de domaine utilisé est montré sur la figure IV.3.

Les dimensions non fixées de dispositif sont prises dans cette étape comme suit :

x_1 : rayon externe de l'armature 7mm;

x_2 : largeur de l'aimant permanent 4mm;

x_3 : hauteur de l'aimant permanent 5mm.

La densité de courant dans les bobines est fixée à : $J_{ex} = 1.10^6 \text{ [A/m}^2\text{]}$

Les lignes équipotentiels du potentiel vecteur magnétique dans l'actionneur sont présentées dans la figure IV.4.

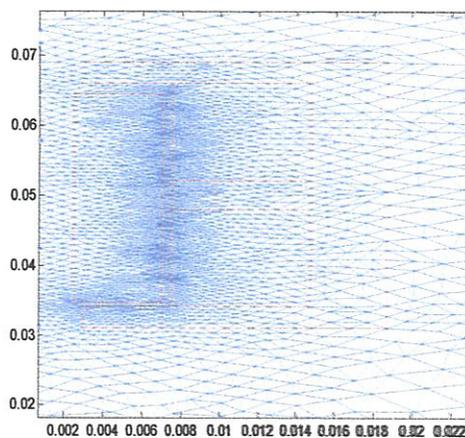


Figure IV.3. Maillage élément finis la configuration initiale

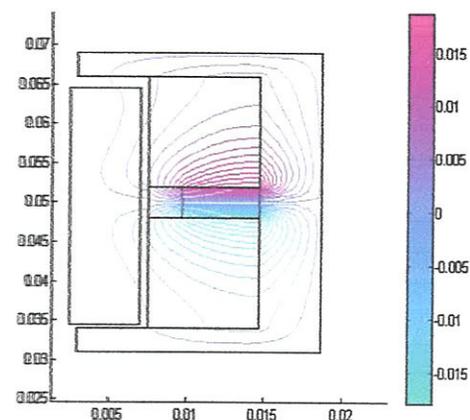


Figure IV.4.les lignes équipotentiels de potentiel vecteur magnétique A

La connaissance de potentiel vecteur magnétique aux sommets des triangles constituant le domaine d'étude permet de déduire toutes les grandeurs électromagnétiques telles que les inductions magnétiques, les courants induits et les forces électromagnétiques.

Les composantes radiale et axiale de l'induction électromagnétique sont calculées à partir des deux expressions suivantes :

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \quad (\text{IV.4})$$

$$B_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} \quad (\text{IV.5})$$

Les figures IV.5 et IV.6 représentent respectivement la répartition et les lignes de l'induction magnétique dans l'actionneur. Comme on peut le voir à partir de ces deux figures, l'induction magnétique maximale est concentrée dans l'aimant permanent.

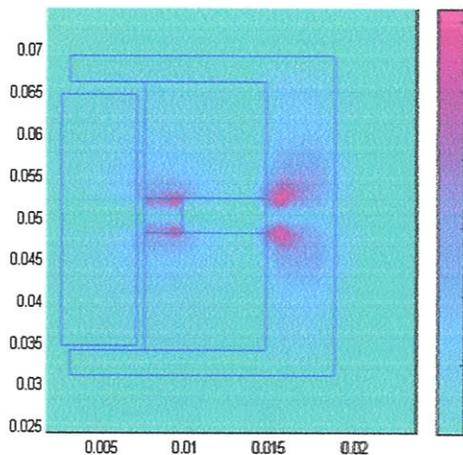


Figure IV.5 répartition de l'induction magnétique : B[T]

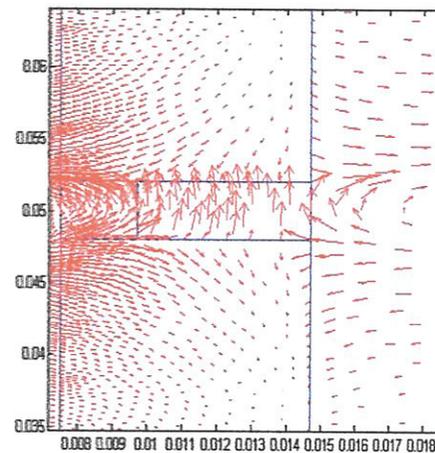


Figure IV.6 les lignes de l'induction magnétique dans l'aimant : B[T]

Les courants induits dans l'armature mobile sont évalués par l'équation ci-dessous:

$$\vec{J}_{ind} = -j\omega\sigma\vec{A} \quad (\text{IV.6})$$

ω la pulsation de la fréquence $\omega = 2\pi f$

La répartition de la densité des courants induits dans la pièce conductrice est montrée sur la figure IV.7.

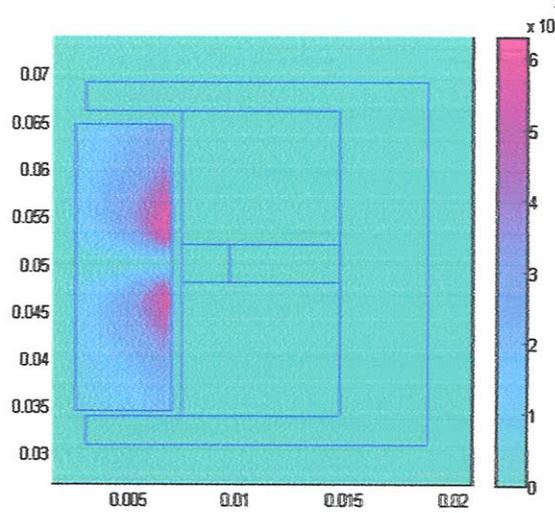


Figure IV.7 Répartition de la densité des courants induits dans l'armature conductrice : J [A/m^2].

Après le calcul de l'induction magnétique et la densité des courants induits, on peut alors évaluer les forces électromagnétiques qui naissent dans l'armature conductrice. La densité des forces de Lorentz est donnée par :

$$\vec{f} = \vec{J}_{ind} \wedge \vec{B} \quad (IV.7)$$

$$\vec{f} = f_r \vec{U}_r + f_z \vec{U}_z \quad (IV.8)$$

\vec{U}_r Vecteur unitaire radial

\vec{U}_z Vecteur unitaire axiale

Les deux composantes radiale et axiale sont données par :

$$f_r = J_{ind} \cdot B_z \quad (IV.9)$$

$$f_z = -J_{ind} \cdot B_r \quad (IV.10)$$

Les figures IV.8 et IV.9 présentent la répartition de la densité de force radiale et celle axiale respectivement.

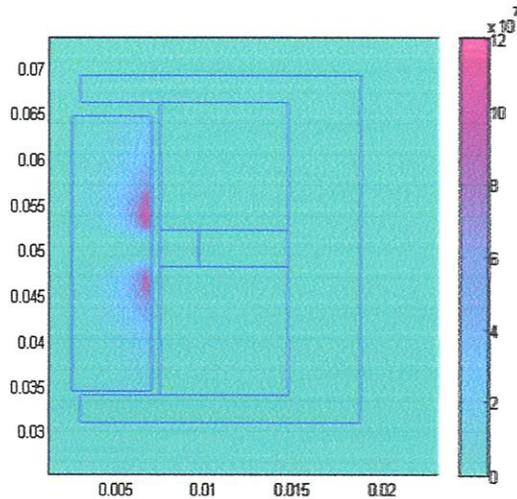


Figure IV.8. La densité de force radiale f [N/m^3]

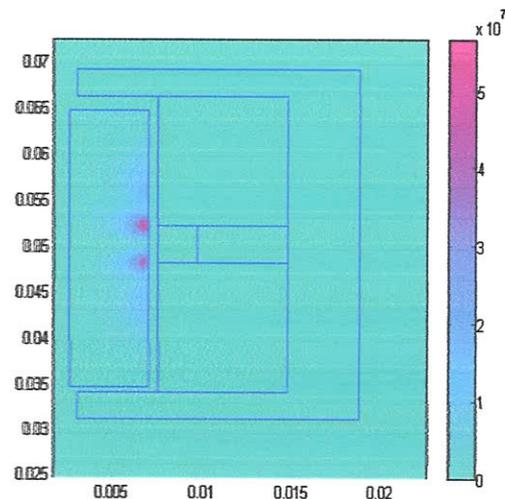


Figure IV.9. La densité de force axiale : f [N/m^3]

La force totale est alors obtenue par l'intégration de la densité de la force sur le volume de la charge mobile

$$\vec{F} = \int \vec{J}_{ind} \times \vec{B} \, dV \quad (\text{IV.11})$$

Les forces radiale et axiale exercées sur l'armature sont calculée comme suit :

$$F_r = \int f_r \cdot dV = f_r(i) \cdot V(i) \quad (\text{IV.12})$$

$$F_z = \int f_z \cdot dV = f_z(i) \cdot V(i) \quad (\text{IV.13})$$

f_r est la densité de la force suivant l'axe r

f_z est la densité de la force suivant l'axe z

$V(i)$ est le volume de l'élément (triangulaire)

Les forces totales sont :

$$F_{rt} = \sum_{i=1}^N F_r \quad (\text{IV.14})$$

$$F_{zt} = \sum_{i=1}^N F_z \quad (\text{IV.15})$$

est N nombre des éléments finis dans l'armature.

Après calcul, on trouve la valeur des deux forces comme suit :

$$F_{rt} = 0.9539[N]$$

$$F_{zt} = 49.0177[N]$$

IV.3.1 Effet de la fréquence sur les grandeurs électromagnétiques

Pour marquer l'effet de la fréquence sur les courants induits on a varié la fréquence de 50 Hz jusqu'à 20 kHz. Les figures VI.10, VI.11, VI.12 et IV.13 représentent la répartition des courants induits dans l'armature conductrice pour des fréquences de 50 Hz, 200 Hz, 1kHz et 20kHz respectivement.

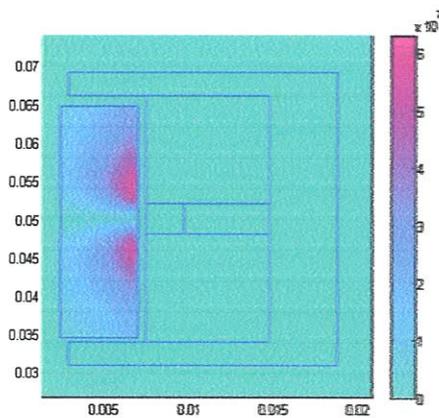


Figure IV.10 Répartition de la densité du courant dans l'armature pour 50hz

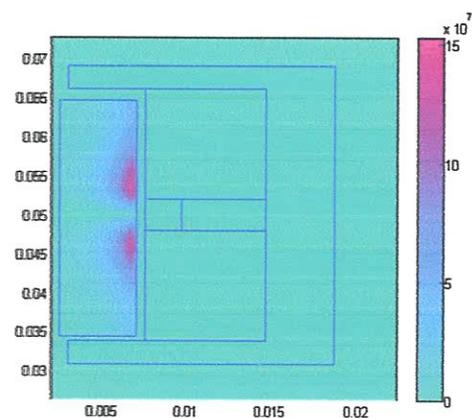


Figure IV.11 Répartition de la densité du courant dans l'armature pour 200hz

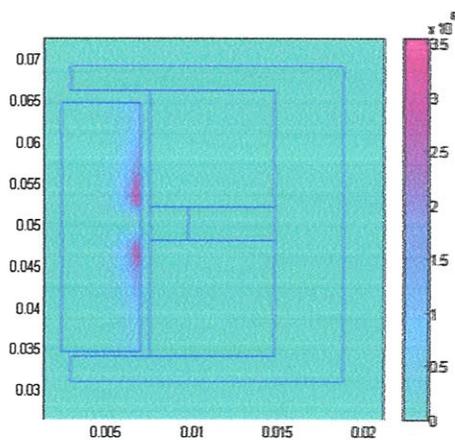


Figure IV.12 Répartition de la densité du courant dans l'armature pour 1khz

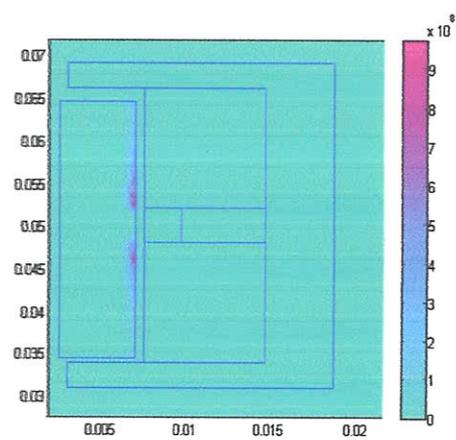


Figure IV.13 Répartition de la densité du courant dans l'armature pour 20khz

D'après les résultats, on remarque qu'avec l'augmentation de la fréquence les courants induit ont tendance à ne circuler que dans la surface de l'armature la plus proche à la source d'énergie. Cela peut se traduire par le phénomène de l'effet de peau. Ce phénomène apparait dans tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs et provoque la décroissance de la densité de courant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur. La densité du courant se concentre dans une couche de la surface de conducteur correspondante à l'épaisseur de peau.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}} \quad (\text{IV.16})$$

ω la pulsation de la fréquence $\omega = 2\pi f$

f la fréquence

IV.3 Optimisation de l'actionneur

Comme on a déjà présenté dans le chapitre précédent, le problème d'optimisation posé dans ce travail concerne la minimisation du flux magnétique dans l'entrefer inférieur de dispositif. Dans cette position le flux dans l'entrefer inférieur doit être faible. Cela signifie que les bobines dominent la totalité du flux créé (elles doivent compenser le flux créé par l'aimant). Une telle condition de fonctionnement permet d'avoir des faibles valeurs des forces opposées. Quatre paramètres d'optimisation sont choisis : trois géométriques (rayon externe de l'armature mobile et dimensions de l'aimant) et un autre physique c'est la densité de courant d'excitation dans les bobines inductrices. Les résultats d'optimisation sont présentés ci-après.

IV.3.1 Résultats d'optimisation

Les résultats d'optimisation liés à l'utilisation conjointe de la méthode de l'algorithme génétique et la méthode des éléments finis sont résumés dans le tableau IV.2.

Algorithme génétique	Taille de la population	16
	Nombre de générations	50
Paramètres d'optimisation	X1	7[mm]
	X2	4.1 [mm]
	X3	2 [mm]
	X4	$0.0842 \cdot 10^6$ [A/m ²]
Fonction objectif [T]	5.6606	
Temps de calcul en Second	3868.594717 [S]	

Tableau VI.2 les résultats obtenus par l'Algorithme génétique

L'algorithme s'arrête après 50 générations pour 16 individus et la variation de la fonction objectif avec les itérations de l'algorithme génétique est donnée dans la figure IV.14

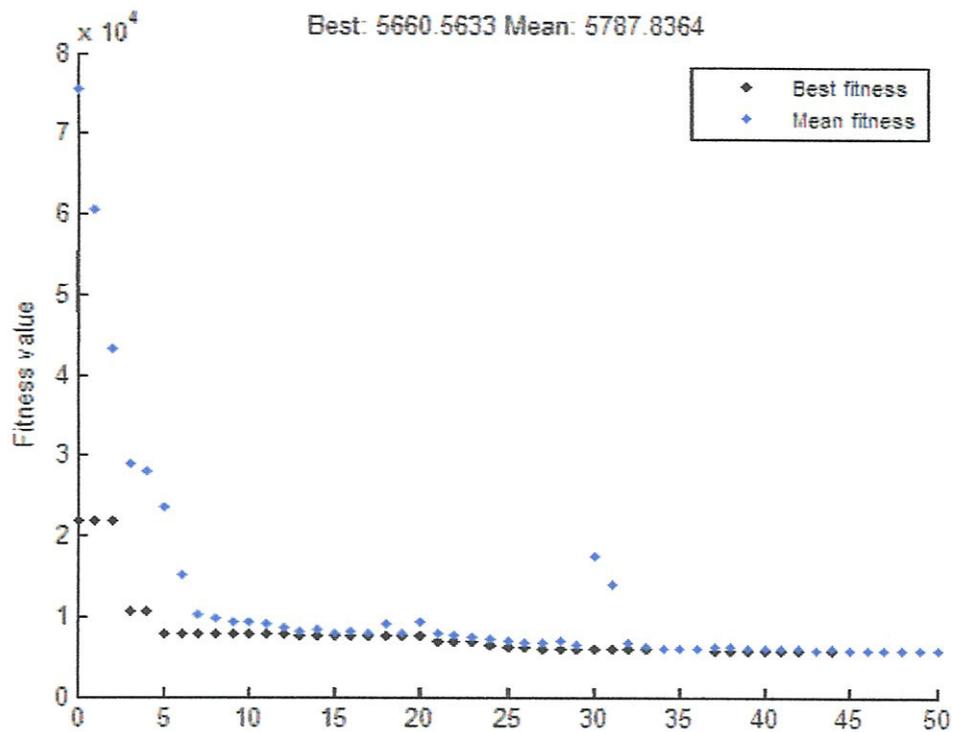


Figure VI.14 Variation de la fonction objectif

Le temps d'exécution est une heure et 4minutes et quelque seconds. Les résultats que nous avons obtenus par l'application de l'algorithme génétique sont satisfaisants, où il nous a permit de minimiser la fonction objectif et trouver les meilleurs paramètres assurant les exigences de problème d'optimisation considéré.

VI.3.2 Grandeurs électromagnétiques pour la configuration optimale

Après l'obtention des résultats d'optimisation, nous modélisons alors le dispositif toute en utilisant les valeurs des paramètres d'optimisation optimaux (le rayon externe de l'armature mobile, les dimensions de l'aimant et la densité de courant d'excitation dans les bobines inductrices)

La figure IV.15, montre les lignes équipotentiels du potentiel vecteur magnétique A de diapositif optimisé par l'algorithme génétique.

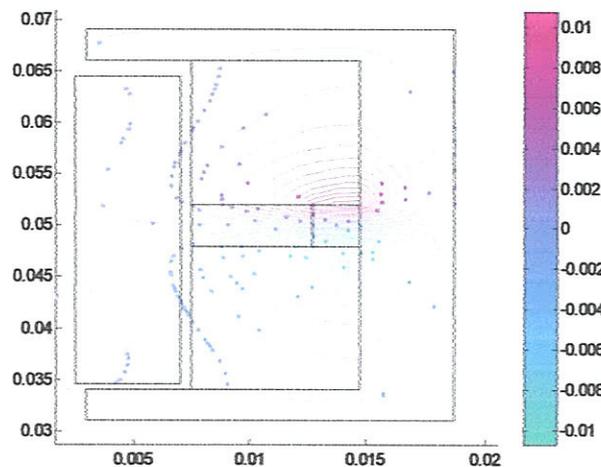


Figure IV.15 lignes équipotentiels du potentiel vecteur magnétique pour la configuration optimale.

Les figures IV.16 et IV.17 représentent respectivement la répartition et les lignes de l'induction magnétique dans l'actionneur électromagnétique optimisé.

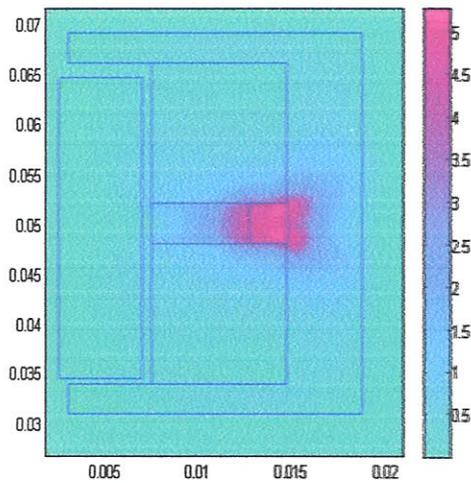


Figure IV.16 répartition de l'induction magnétique pour la configuration optimale

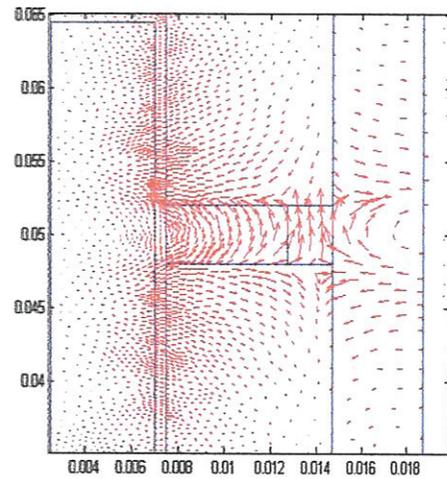


Figure IV.17 les lignes de l'induction magnétique dans l'actionneur pour la configuration optimale

Les courants induits dans l'armature mobile de l'actionneur optimisé sont montrés dans la figure ci-dessous.

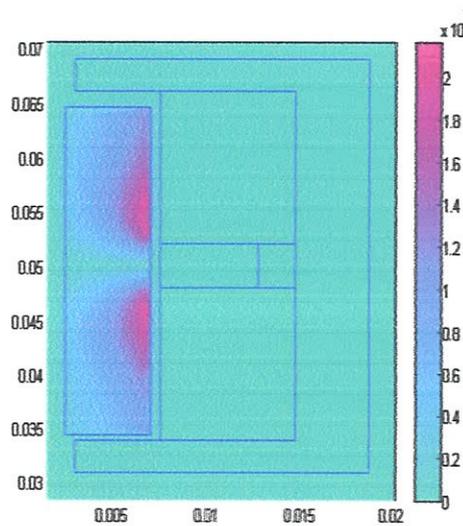


Figure IV.18 Répartition de la densité des courants induits optimal dans l'armature conductrice : J [A/m^2].

Les figures IV.19 et IV.20 présentent la répartition de la densité de force radiale et celle axiale respectivement pour la configuration optimale.

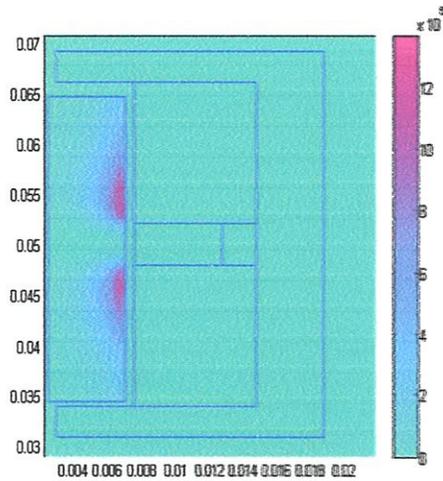


Figure IV.19. La densité de force radiale

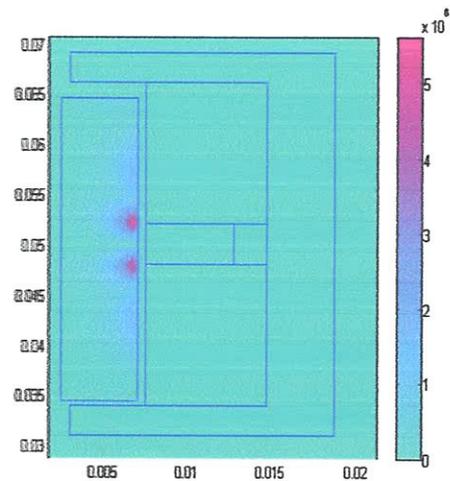


Figure IV.20. La densité de force axiale

De deux force radial et force axiale après l'optimisation sont :

$$F_r = 0.0993[\text{N}]$$

$$F_z = 6.8520[\text{N}]$$

D'après les résultats obtenus, nous remarquons un changement notable dans les valeurs des différentes grandeurs électromagnétiques dans la configuration finale par rapport à celles obtenues dans la configuration initiale. Où les valeurs de potentiel vecteur magnétique ainsi que celles de toutes autres grandeurs électromagnétiques (induction magnétique, densité de courants induits et les forces électromagnétiques) sont diminuées avec l'utilisation des paramètres optimaux. Cela nous permis de conclure que l'objectif de problème d'optimisation posé est atteint.

IV.4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons réalisé une modélisation numérique par éléments finis d'un actionneur électromagnétique axisymétrique où on a calculé les différentes grandeurs électromagnétiques caractérisant le fonctionnement de dispositif. L'effet de la fréquence sur la répartition des courants induits dans l'armature conductrice est aussi étudié.

Dans la deuxième partie du chapitre, on a résout le problème d'optimisation déjà posé dans le chapitre trois. La stratégie d'optimisation adoptée consiste à associer l'analyse numérique du champ électromagnétique par éléments finis à la méthode de l'algorithme génétique. Elle a permis la minimisation de la fonction objectif et l'obtention des meilleurs paramètres géométriques et physiques assurant un flux magnétique faible dans l'entrefer minimal de dispositif correspondant à sa position finale (fin de sa course) et donc d'atteindre l'objectif visé.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans de nombreux domaines de la conception, celle des actionneurs électromagnétiques s'appuie de plus en plus sur des outils informatiques de calcul et de simulation. Le travail présenté dans ce mémoire est versé dans cette direction. Il concerne l'utilisation conjointe d'une méthode d'optimisation basée sur l'algorithme génétique et la méthode des éléments finis pour la modélisation et la conception optimale d'un actionneur électromagnétique linéaire axisymétrique. Pour réaliser cette tâche, au cours de ce travail un programme de calcul est élaboré sous environnement Matlab.

Dans le premier chapitre nous avons effectué une présentation des différents types d'actionneurs électromagnétiques, leur fonctionnement ainsi que la vaste application de ces dispositifs dans les différents domaines et spécialement en électrotechnique. Pour augmenter l'efficacité et le rendement de ces dispositifs une nouvelle génération d'actionneurs à base d'aimants permanents est apparue. Une brève présentation de ce type de matériaux ferromagnétiques a aussi fait l'objet de ce chapitre.

La présentation des différents aspects liés à la modélisation des dispositifs électrotechniques par le calcul du champ électromagnétique et la méthode des éléments finis souvent utilisée pour résoudre les EDP du champ ont été présentés dans le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, on a présenté au début la démarche systématique de la conception optimale en électrotechnique basée sur l'association de l'analyse du champ électromagnétique aux méthodes d'optimisation que soient déterministes ou stochastiques. Après, on a posé le problème d'optimisation auquel nous nous sommes intéressés dans ce travail et qui concerne l'optimisation d'un actionneur électromagnétique linéaire et axisymétrique.

Dans le dernier chapitre, une modélisation numérique par la méthode des éléments finis a permis la résolution de l'EDP du champ et donc l'étude des phénomènes électromagnétiques régissant le dispositif considéré par le calcul des grandeurs électromagnétiques telles que l'induction magnétique, les courants induits et les forces

électromagnétiques. L'effet de la fréquence sur la distribution des courants induits dans la surface de l'armature conductrice est aussi considéré dans cette modélisation.

La conception optimale des dispositifs électrotechniques consiste à obtenir des produits répondants aux exigences techniques et économiques au même temps. Une démarche de conception optimale basée sur l'utilisation conjointe de la méthode des éléments finis et l'algorithme génétique est adoptée et appliquée à un actionneur électromagnétique avec deux bobines parcourues par une densité de courant uniformément répartie dans leur section et un aimant permanent type terre rare. L'actionneur est utilisé pour activer une vanne et sa partie mobile se déplace rapidement entre deux positions différentes dans le sens de la diminution et l'augmentation de l'entrefer contigüe à la vanne (ouverture et fermeture de la vanne).

La démarche d'optimisation qu'on a suivit dans ce travail consiste à déterminer les dimensions de l'aimant permanent et la densité de courant dans les bobines assurant un fonctionnement efficace de l'actionneur toute en essayant d'avoir une consommation minimale de l'énergie électrique. Les résultats obtenus par notre programme de calcul sont satisfaisants. L'outil de calcul est souple et peut être facilement étendu à l'étude de régime transitoire de dispositif, voir même un couplage électromagnétique-mécanique et/ou thermique.

Références bibliographiques

- [1] : **P. E. Cavarec** ; «conception, modélisation et optimisation des actionneurs poly-entrefer application aux structures linéaires multi tiges », thèse de doctorat. Ecole normale supérieur de Cachan novembre 2002.
- [2] : **Z. brihoum**, «stratégie d'optimisation par l'algorithme génétique : application aux dispositifs électrotechniques», mémoire de fin d'étude, l'université de Jijel, Algérie, 2011.
- [3] : **O. Boukachabia et K. Belkhiri**, «optimisation des dispositifs électrotechniques associées au calcul du champ électromagnétique », mémoire de fin d'étude, l'université de Jijel, Algérie, juin 2005.
- [4] **Z.belli**, «Adaptation de méthodes d'optimisation associées au calcul du champ électromagnétique pour l'étude de dispositifs électrotechniques», Thèse de doctorat, l'université de Jijel, Algérie, 2008.
- [5] : **H. Ben Ahmed** ; « généralités sur les actionneurs linéaires », document interne, ENS-Cachan 2002.
- [6] :**J. P. Caron** ; « modélisation des machines électriques par le calcul analytique des champs », ENSEM – Institut national polytechnique de Lyon, Janvier 2003.
- [7] : **Wikipedia**. www.Wikipedia.com
- [8] : **E. Schaeffer** ; « modélisation des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques, dédiés à la simulation et à la détection de défauts », Thèse de doctorat, Université de Nantes 1999.
- [9] : **H. Ben Ahmed** ; N. Bernard ; P. E. Cavarec ; « convertisseurs électromécaniques d'énergie : des systèmes mécatroniques » Revue SATIE, ENS de Cachan, Septembre 2002.
- [11] : **H. ALLAG** ; « Modèles et Calcul des Systèmes de Suspension Magnétique Passive – Développements et Calculs Analytiques en 2D et 3D des Interactions entre les Aimants Permanents» Thèse de doctorat, l'université de GRENOBLE 21 Juin 2010.
- [12] **R. Amieur**, « Etude et conception d'une machine synchrone à aimants permanents », projet de fin d'étude pour l'obtention de diplôme d'Ingénieur d'Etat en génie électrique, Université de Jijel, 2009.
- [13] **A. Ladjimi**, «Modélisations du chauffage par l'induction avec prise en compte de l'hystérésis magnétique », thèse de magister en électrotechnique, l'université de Jijel ,2 février 2004.

- [14] **Z. boulassel,née belli**, «Modèle analytico-numérique dynamique pour la prise en compte du mouvement dans les dispositifs électromagnétiques»,Mémoire de magister, l'université de Jijel, Algérie, 2002.
- [15] **k. Bouhrine et C. Merrouche**, «modèle éléments finis pour le calcul de forces d'origine magnétique», l'université de Jijel, juin 2005.
- [16] **F. Azzouz**, « Intégration dans Matlab de Modèles de pris en compte de Mouvement l'Analyse des phénomènes électromagnétiques transitoires », rapport de stage de D.E.A d'électrotechnique, l'université de Nantes, L.R.T.I, France, 1997.
- [17] **B. Chebbah et A.Rokia**, « Modélisation en 2D d'actionneurs électromagnétiques par la méthode des éléments finis», l'université de Jijel, Algérie, 2004.
- [18] **F. Zaoui**, «méthodes d'optimisation associées à la modélisation numériques», Thèse de doctorat, université de Paris sud, France 1999.
- [19] **R. Krishnan**, « Switched reluctance motor drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications », CRC Press, New York, USA, 2001.
- [20] **M. BELATEL**, « Etude des machines électriques par CAO », Thèse de doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2009.
- [21] **C. DOC**, « Contribution à la conception et au dimensionnement d'un actionneur d'embrayage », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2010.
- [22] **R. REDJEM**, « Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques Application aux moteurs asynchrones », Thèse de magister, Université de Constantine, Algérie, 2006.
- [23] **M.C. COSTA**, «Optimisation de dispositifs électromagnétiques dans un contexte d'analyse par la méthode des éléments finis», THÈSE pour obtenir le grade de Docteur de L'INPG, National polytechnique de Grenoble, le 28 juin 2001.
- [24] **I. Yatchev, V. Gueorgiev, K. Hinov** «Optimization of an axisymmetric linear electromagnetic valve actuator», journal in Electrical and Electronic Engineering COMPEL, Vol. 28 No.5, 2009, pp 1249-1256.