



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

## MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Filière : électrotechnique  
Spécialité : Machine électrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :

**Fares Boudiaf**

Le : lundi 25 juin 2018

# modélisation des actionneurs électromagnétique

---

Jury :

Mr	SRAIRI KAMAL	Prof	Université de Biskra	Président
Mr	CHERIET AHMED	Prof	Université de Biskra	Encadreur
Mm	BOUMARAF RABIAA	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2017/2018

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Machine électrique

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**modélisation des actionneurs  
électromagnétique**

**Présenté par :**  
Fares Boudiaf

**Avis favorable de l'encadreur :**  
Pr. CHERIET AHMED

**Avis favorable du Président du Jury**  
Pr. SRAIRI KAMAL

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Machine électrique

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

# modélisation des actionneurs électromagnétique

Proposé par : fares Boudiaf

Dirigé par : Pr.Cheriet Ahmed

## Résumé

Le développement des actionneurs électromagnétique linéaires s'est d'abord fait en relation avec des applications liées aux systèmes de transport. Actuellement, les actionneurs électromagnétiques linéaires sont de plus en plus amenés à remplacer les systèmes composés d'un moteur rotatif et d'une transmission. L'utilisation d'entrainements directs augmente considérablement les performances du système puisque les limitations mécaniques sont supprimées. Dans ce travail on aborde la modélisation par FEMM d'un moteur linéaire à induction triphasé dont l'inducteur constitué de trois bobines représente la partie mobile et l'inducteur représenté par une plaque Aluminium représente la partie fixe. Deux cas ont été considéré avec et sans circuit magnétique.

تم تطوير المحركات الكهرومغناطيسية الخطية لأول مرة في اتصال مع التطبيقات المتعلقة بأنظمة النقل، في الوقت الحالي، أصبحت المحركات الكهرومغناطيسية الخطية مطلوبة بشكل متزايد لاستبدال أنظمة مكونة من محرك دوار وانتقال. يزيد استخدام محركات الأقراص المباشرة من أداء النظام بشكل كبير حيث تتم إزالة القيود الميكانيكية. في هذا العمل، ناقشنا نمذجة FEMM لمحرك تحريض خطي ثلاثي الطور يمثل محته المكون من ثلاثة ملفات الجزء المتنقل والمحرض الممثل بلوحة الألومنيوم يمثل الجزء الثابت. تم النظر في حالتين مع وبدون دائرة مغناطيسية.

# *Dédicace*

*A la mémoire de mes grands parents...*

*Aux deux perles rares ...*

*Mon Père et ma Mère **salah et mebarka***

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instructin et mon bien etre. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours que Dieu le tres haut vous accorder santé, Bonheur, et longue vie.*

*A mes sœurs: **aïcha ,khamssa , samira et nouira***

*A tous mes frères: **hamma,abdelhamid,noureddine***

*A ceux qui font tous les jours notre Bonheur: **Hocine, Abd Karim, Hakim, Mourad, Chikh, Nabil , La couleur (Mohamed), Zakí, Rahim, Abd ElHamid, Abd ElAziz***

*Du profond de mon Coeur je dédie ce travail à **Abir**, mes remerciements ne pourront jamais égaler ton grand Coeur qui m'a apporté du soutien au moment où j'avais besoin d'aide. Je te remercie de mettre tant d'effort, de tendresse et d'imagination dans notre amitié, de partager tant de si bons moments et de créer tant de si bons souvenirs avec moi... Que ton âme repose en paix*

*Un énorme merci pour les personnes tous simplement géniales*

*A tous ceux que j'ai omis de citer.*

# *Remerciement*

*Je remercie, tout d'abord, mon Dieu le tout puissant ALLAH qui ma donné volonté et patience pour faire ce modeste travail.*

*Je remercie mon encadreur Ahmed Chrïet : que j'ai eu l'honneur d'avoir comme encadreur et que je remercie pour ses conseils. J'adresse ma gratitude à chacun des membres du jury qui ont bien voulu lire et évaluer ce travail.*

*Mes remerciements chaleureux vont également à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien surtout dans des moments de découragement et particulièrement ma famille, mes parents, mes frères, mes sœurs, mes amis pour m'avoir encouragée et supportée jusqu'au bout*

# Liste des figures

## Chapitre I : généralité

<b>Figure I.1</b> : Domaine d'étude.	08
<b>Figure I.2</b> : Problème général magnétodynamique	08
<b>Figure I.3</b> : Maillage du domaine d'étude.	11
<b>Figure I.4</b> : les étapes de résolutions les équations partielles.	13
<b>Figure I.5</b> : schématisation de la force de Laplace	15

## Chapitre II : les actionneurs électromagnétique

<b>Figure.II.1</b> :fonctionnement de la machine à cc.	16
<b>Figure.II.2</b> :description de la machine à courant continu.	17
<b>Figure II.3:</b> l'inducteur de la machine à cc.	18
<b>Figure II.4:</b> le rotor de la machine à cc.	18
<b>Figure II.5:</b> le dispositif collecteur/balais.	19
<b>Figure. II.6</b> : fonctionner en moteur	19
<b>Figure. II.7</b> : fonctionnement génératrice	20
<b>Figure II.8</b> : Eléments constitutifs d'une MAS	21
<b>Figure II.9</b> : Symbole moteur F	22
<b>Figure II.10</b> : Symbole génératrice	22
<b>Figure II.11</b> : Photo du stator d'une machine asynchrone.	22
<b>Figure II.12</b> : Rotor bobiné.	23
<b>Figure .II.13</b> : Rotor à cage d'écureuil.	23
<b>Figure II.14</b> : Classification des moteurs linéaires	26
<b>Figure. II.15</b> : architectures des actionneurs linéaires	27
<b>Figure II.16</b> : Structure a inducteur solidaire du rail fixe.	28
<b>Figure II.17:</b> Structure a inducteur solidaire du rail mobile.	28
<b>Figure. II.18</b> : structure a inducteur mobile	28
<b>Figure II.19</b> : Principe de fonctionnement d'un moteur linéaire.	29
<b>Figure II.20</b> : Moteur linéaire à aimants permanents.	30
<b>Figure II.21:</b> Moteur linéaire a induit en forme d'échelle.	30
<b>Figure II.22</b> : Moteur linéaire à inducteur simple.	31
<b>Figure II.23:</b> Moteur linéaire à inducteur simple sans circuit magnétique de fermeture.	31
<b>Figure II.24:</b> Moteur linéaire à induit composite	32

<b>Figure II.25</b> : Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable.	33
<b>Figure II.26</b> : Métro de Kuala Lumpur à moteur linéaire	33
<b>Figure II.27</b> : Maglev japonais à une vitesse de 500 km/h	34

### **Chapitre III :Modélisation d'un moteur à induction linéaire**

<b>Figure .III.1</b> : Modèle géométrique du moteur linéaire.	36
<b>Figure .III.2</b> : Maillage du moteur crée par FEMM	38
<b>Figure.III.3</b> : Effet du courant source sur la force	39
<b>Figure.III.4</b> : Vecteurs de l'induction magnétique pour $I=5A$ .	40
<b>Figure.III.5</b> : Densité des courants induits pour $I=5A$ .	41
<b>Figure.III.6</b> : Entrefer du moteur	41
<b>Figure III .7</b> : Effet de l'entrefer sur la force	42
<b>Figure.III.8</b> : Vecteurs de l'induction magnétique, pour un entrefer 0,5mm	43
<b>Figure.III.9</b> : Densité des courants induits, pour un entrefer =0.5mm	43
<b>Figure.III.10</b> :Vecteurs de l'induction magnétique pour un entrefer 4mm	44
<b>Figure.III.11</b> : Densité des courants induits, pour un entrefer 4mm	44
<b>Figure.III.12</b> : Schématisation de la largeur de la plaque aluminium	45
<b>Figure.III.13</b> . Effet de la largeur de la plaque aluminium sur la force	46
<b>Figure.III.14</b> : Vecteurs de l'induction magnétique pour une plaque de largeur de 5mm	47
<b>Figure.III.15</b> : Densité du courant induit pour une largeur de 5 mm	47
<b>Figure.III.16</b> : Vecteurs de l'induction magnétique pour une largeur de 25mm.	48
<b>Figure.III.17</b> : Densité des courants induits pour une largeur plaque de 25mm	48
<b>Figure.III.18</b> : Schématisation du glissement géométrique de l'inducteur	49
<b>Figure.III.19</b> : Effet du glissement de l'inducteur sur la force	50
<b>Figure.III.20</b> : Vecteurs de l'induction magnétique pour glissement de 10mm.	51
<b>Figure.III.21</b> : Densité des courants induits dans la plaque pour un glissement de 10mm	51
<b>Figure.III.22</b> : Vecteurs de l'induction magnétique pour un glissement de 50mm	52
<b>Figure.III.23</b> : Densité des courants induits pour un glissement de 50mm.	52
<b>Figure.III.24</b> : Effet de fréquence sur la force	53
<b>Figure.III.25</b> : Vecteurs de l'induction magnétique pour une fréquence de 10hz	54
<b>Figure.III 26</b> : Densité des courants induits pour une fréquence de 10hz	55

**Figure.III.27:** Vecteurs de l'induction magnétique pour une fréquence de 500Hz 55

**Figure.III.28:** Densité des courants induits pour 500hz 56



# Liste des tableaux

<b>Tableau III.1:</b> Les données du moteur .....	37
<b>Tableau.III.2 :</b> effet du courant sur la force.....	39
<b>Tableau.III.3 :</b> effet d'entrefer sur la force.....	42
<b>Tableau.III.4:</b> effet de largeur de plaque aluminium.....	45
<b>Tableau.III.5 :</b> effet de glissement sur la force.....	49
<b>Tableau.III.6 :</b> effet de la fréquence sur la force.....	53

# Liste d'abréviations

**MDF** : Méthode Des Différences Finies.

**MEF** : Méthode Des Eléments Finis.

**MVF** : Méthode Des Volumes Finis.

**MCC** : Méthode Des Circuits Couples.

**MIF** : Méthode Des Intégrales De Frontières.

**MSAP**: machine asynchrone à aimant permanent

# Liste de symboles

**E** ( $V^1$ ) : Champ électrique.

**B** (T) : Induction magnétique.

**H** ( $A / m^{-2}$ ) : Champ magnétique.

**J** ( $A / m^2$ ) : Densité de courant.

**D** ( $C / m^{-2}$ ) : Induction électrique.

$P$  ( $C / m^3$ ) : Charge volumique.

$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  ( $A / m^{-2}$ ) : Densité de courant de déplacement.

**M** (A/m) : L'aimantation des aimants.

$\mu_0$  ( $H / m^{-1}$ ) : Perméabilité magnétique du vide.

$\mu_r$ : Perméabilité magnétique relative du milieu.

$\mu$  ( $H / m^1$ ) : Perméabilité magnétique absolue.

I : est l'intensité de courant (A)

B:est l'intensité (la norme) du vecteur champ magnétique (T)

a : est l'angle formé par B par rapport au conducteur.

# Sommaire

Introduction générale.....	01
<b>Chapitre I : Généralité</b>	
Introduction .....	02
1-Les équations de Maxwell .....	02
1-1-Equation de Maxwell-Faraday .....	02
1.2. Equation de Maxwell-Ampère .....	02
1.3. Equation de conservation de flux magnétique.....	03
1.4. Equation de Maxwell-Gauss.....	03
1.5. Lois constitutives.....	04
2-Formulations électromagnétiques.....	04
2-1- Modèle électrostatique .....	04
2-2-Modèle électrocinétique .....	05
2-3- Modèle magnétostatique .....	06
2-3-1- Modèle magnétostatique scalaire.....	06
2-3-2- Modèle magnétostatique vectoriel .....	06
2-4- Modèle magnétodynamique .....	07
2-5- Formulation en potentiel A du problème magnétodynamique.....	09
3-Techniques de résolution des équations aux dérivées partielles .....	10
3-1- Méthode Des Différences Finies (MDF) .....	10
3-2- Méthode Des Eléments Finis (MEF) .....	11
3-3- Méthode Des Volumes Finis (MVF) .....	11
3-4- Méthode Des Circuits Couples (MCC).....	11
3-5- Méthode Des Intégrales De Frontières (MIF).....	12
3-6- Les conditions aux limites.....	12
3-6-1- Condition de Dirichlet .....	12
3-6-2- Condition de Neumann .....	12
3-7- Etapes d'un problème de modélisation.....	13
4-Grandeurs électromagnétiques : exploitation.....	14
4-1- Les courants induits.....	14
4-2- Force de Laplace .....	14
Conclusion .....	15

## Chapitre II : les actionneurs électromagnétique

Introduction.....	16
1-Classification des actionneurs électromagnétiques.....	16
1-1 Les actionneurs électromagnétiques rotatifs .....	16
1-1-1 Les machines à courant continu .....	16
1.1.2 Les machines asynchrones .....	21
1-2 Les actionneurs électromagnétiques linéaires .....	25
1-2-1 Classification des actionneurs linéaires .....	25
1-2-2-Principales architectures d'actionneurs linéaires.....	26
1-2-3- Géométries des machines linéaires.....	27
1-2-4- Fonctionnement des actionneurs électromagnétiques linéaires .....	29
1-2-5- Différents types de moteurs linéaires.....	29
1-2-5-1- Moteur linéaire à aimants permanents.....	29
1-2-5-2- Moteur à induit en forme d'échelle .....	30
1-2-5-3- Moteur à inducteur simple.....	31
1-2-5-4- Moteur à inducteur simple sans circuit de fermeture.....	31
1-2-5-5- Moteur linéaire à induit composite.....	32
1-2-5-6- Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable.....	32
1-2-6- Domaines d'application des moteurs linéaires.....	33
1-2-7- Les avantages et les inconvénients .....	35
Conclusion.....	35

### **Chapitre III :Modélisation d'un moteur à induction linéaire**

Introduction.....	36
3.1. Modèle géométrique du moteur proposé .....	39
3.2. Etude de l'effet des différents paramètres sur la force .....	39
3.2.1. Effet du courant inducteur sur la force.....	39
3.2.2. Effet de l'entrefer sur la force .....	41
3.2.3. Effet de largeur de la laque aluminium.....	45
3.2.4. Effet du glissement géométrique de l'inducteur .....	49
3.2.5. Effet de la fréquence du courant source.....	53
Conclusion.....	56
Conclusion général .....	57
Bibliographie	
Annexe	

## Introduction générale

Le développement des actionneurs électromagnétiques linéaires s'est réalisé principalement en relation avec les applications liées aux systèmes de transport. Ils sont de plus en plus amenés à remplacer les systèmes composés d'un moteur rotatif et d'une transmission. La modélisation de tels actionneurs se fait souvent par des méthodes numériques de discrétisation telle que la méthode des éléments finis qui permet, dans la plupart des cas, d'obtenir des résultats très comparables à l'expérimentation.

L'objectif principal du présent travail consiste à la modélisation d'un moteur linéaire à induction linéaire constitué de deux circuits magnétiques et trois bobines identiques (partie fixe du moteur), et une plaque en aluminium (partie mobile). Cette modélisation sera effectuée en exploitant le logiciel FEMM, dans lequel la méthode des éléments finis est implémentée. La force magnétique, qui représente la grandeur d'intérêt, appliquée sur la partie mobile du moteur sera évaluée par l'équation de Laplace.

Ce mémoire comportera principalement une introduction générale, trois chapitres et une conclusion générale :

Dans le premier chapitre nous allons exposer les modèles mathématiques de l'électromagnétisme qui caractérisent l'évolution du champ électromagnétique ainsi que la formulation de la force de Laplace qui fait la grandeur d'intérêt.

Le deuxième chapitre concerne un aperçu sur les actionneurs électromagnétiques rotatifs et linéaires, ainsi que leurs applications en particulier dans le domaine du transport. L'importance des actionneurs linéaires est due à la simplification des mécanismes de transmission, ainsi que à leur grande précision.

Le troisième chapitre concerne la modélisation par FEMM du moteur linéaire à induction. La force magnétique, qui représente la grandeur d'intérêt a été évaluée en fonction de plusieurs paramètres de variabilité tels que : le courant d'alimentation, l'épaisseur de l'entrefer, la largeur de la plaque aluminium, le glissement géométrique de l'inducteur et en fin la fréquence du courant source.



## Introduction

La description d'un problème physique est souvent réalisée à l'aide d'un modèle mathématique c'est-à-dire sur la base d'une mise en équations. Ces modèles sont associés souvent à certain nombres d'hypothèses simplificatrices. Dans le cas des problèmes électromagnétiques (machines électriques, actionneurs,...etc.), on utilise les équations de MAXWELL associées à des lois de comportement dites du milieu. Ces dernières permettent de prendre en compte les caractéristiques physiques des matériaux. Une fois, le modèle mathématique est obtenu, il faut être capable de l'exploiter, c'est-à-dire de calculer par la suite les différentes grandeurs physiques.

### 1- Les équations de Maxwell

Les équations de MAXWELL sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous les dispositifs et qui sont [1] :

#### 1.1. Equation de Maxwell-Faraday

Un champ électrique peut induire un champ magnétique. Ce champ induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité. Cela est traduit par l'équation Maxwell-Faraday suivante :

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

Tels que :

E : est le champ électrique.

B : est l'induction magnétique.

#### 1.2. Equation de Maxwell-Ampère

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières: par la variation d'un champ électrique ou par les courants électriques. Ce phénomène est exprimé par l'équation suivante :

$$\mathbf{rot H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{I.2})$$



Tels que :

$\mathbf{H}$  (A /m) : est le Champ magnétique

$\mathbf{J}$  (A/m<sup>2</sup>) : est la Densité de courant.

$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  (A /m<sup>2</sup>) : est la densité de courant de déplacement.

### 1.3. Equation de conservation de flux magnétique

Cette équation est exprimée par la divergence de l'induction magnétique comme suite :

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (\text{I.3})$$

Tel que :

$\mathbf{B}$  (T) : est l'induction magnétique.

### 1.4. Equation de Maxwell-Gauss

Un champ électrique est généré par des charges électriques :

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (\text{I.4})$$

Tel que :

$\mathbf{D}$  (C /m<sup>2</sup>) : est l'induction électrique.

$\rho$ (C /m<sup>3</sup>) : est la Charge volumique.

### Remarques

- Ces équations s'appliquent quel que soit le milieu [2].
- Ce sont des équations locales : elles établissent des relations entre des valeurs locales (ponctuelles) des grandeurs et de leurs dérivées.
- $\rho$  et  $\mathbf{J}$  sont supposées connues (sources).
- Les couples de grandeurs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$  et  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{J}$  et  $\mathbf{E}$  ne sont pas indépendantes entre elles car elles sont liées par les lois de comportement des milieux, appelées aussi relations constitutives [3].

### 1.5. Lois constitutives

Ces lois sont caractéristiques du milieu considéré, elles traduisent la réponse de la matière aux champs électromagnétiques. Elles sont données par l'expérience et ne sont que des approximations. Elles doivent compléter les équations de Maxwell en fonction des propriétés spécifiques des milieux. Dans le cas général elles s'écrivent sous la forme suivante:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{I.6})$$

$\mathbf{M}$  (A/m) : est l'aimantation des aimants.

$\mu_0$  (H / m<sup>1</sup>) : est la Perméabilité magnétique du vide.

$\mu_r$  : est la Perméabilité magnétique relative du milieu.

$\mu$  (H / m<sup>1</sup>) : est la Perméabilité magnétique absolue.

## 2. Formulations électromagnétiques

Les équations de MAXWELL se découpent donnant naissance à des formulations plus simples dites formulations électromagnétiques ou modèles électromagnétiques.

### 2.1. Modèle électrostatique

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas du temps en régime stationnaire (cas du courant continu). De ce fait le champ magnétique créé ne varie pas dans le temps :

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \mathbf{0} \quad (\text{I.7})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (\text{I.8})$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0 \quad (\text{I.9})$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (\text{I.10})$$

La relation  $\text{rot } \mathbf{E} = 0$  permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique  $V$  :

$$\mathbf{E} = -\text{grad } V \quad (\text{I.11})$$

Le modèle se ramène alors à l'équation finale suivante :

$$\text{div}(\epsilon \text{ grad } V) + \rho = 0 \quad (\text{I.12})$$

## 2.2. Modèle électrocinétique

Ce type de problèmes concerne l'étude de la répartition des courants dans des conducteurs électriques soumis à des tensions continues (le terme  $\frac{d\mathbf{B}}{dt}$  reste nul). Ce modèle est régi par les équations suivantes :

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0 \quad (\text{I.13})$$

$$\text{div } \mathbf{J} = 0 \quad (\text{I.14})$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{I.15})$$

Où :

L'équation (I.11) implique que le champ électrique dérive d'un potentiel scalaire  $V$ . Tenant compte de l'équation (I.15) on trouve :

$$\mathbf{J} = -\sigma \text{ grad } V \quad (\text{I.16})$$

On aboutit alors à l'équation finale du modèle donnée par :

$$\text{div}(-\sigma \text{ grad } V) = 0 \quad (\text{I.17})$$

### 2.3. Modèle magnétostatique

Dans ce modèle, le terme  $\frac{dB}{dt}$  est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Dans ce cas, nous avons deux sortes de formes:

#### 2.3.1. Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce modèle, les champs ne dépendent pas du temps. Ici on s'intéresse aux grandeurs  $\mathbf{H}$  et  $\mathbf{B}$ . On obtient alors les équations de Maxwell qui se réduisent à:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{I.18})$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (\text{I.19})$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par des forces magnétomotrices ou bien par des aimants permanents. Dans ce dernier cas, on dispose de la loi :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (\text{I.20})$$

Dans le cas où la densité du courant surfacique est nulle, la relation implique qu'il existe une fonction potentiel scalaire magnétique  $\Phi$  telle que :

$$\mathbf{H} = -\text{grad } \Phi \quad (\text{I.21})$$

On obtient donc l'équation finale suivante :

$$\text{div } (\mu_0 \text{ grad } \Phi) = \text{div } \mathbf{J} \quad (\text{I.22})$$

#### 2.3.2 Modèle magnétostatique vectoriel

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Le terme  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  est alors nul et les champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{B}$  sont découplés. On obtient alors les équations suivantes :

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{I.23})$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (\text{I.24})$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (\text{I.25})$$

La condition précédente permet de définir une fonction potentiel vecteur magnétique  $A$  :

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (\text{I.26})$$

Pour que  $A$  soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition :

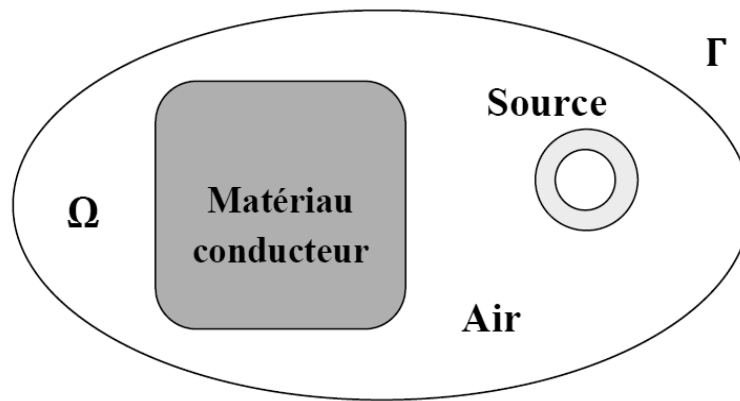
$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0 \quad (\text{I.27})$$

Qui est la plus simple à mettre en œuvre. Mais cette condition, appelée jauge de Coulomb, n'est pas toujours la meilleure et peut être adaptée afin d'éviter quelques difficultés numériques. On obtient donc l'équation vectorielle dite de Poisson :

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{A}) + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (\text{I.28})$$

#### 2.4. Modèle magnétodynamique

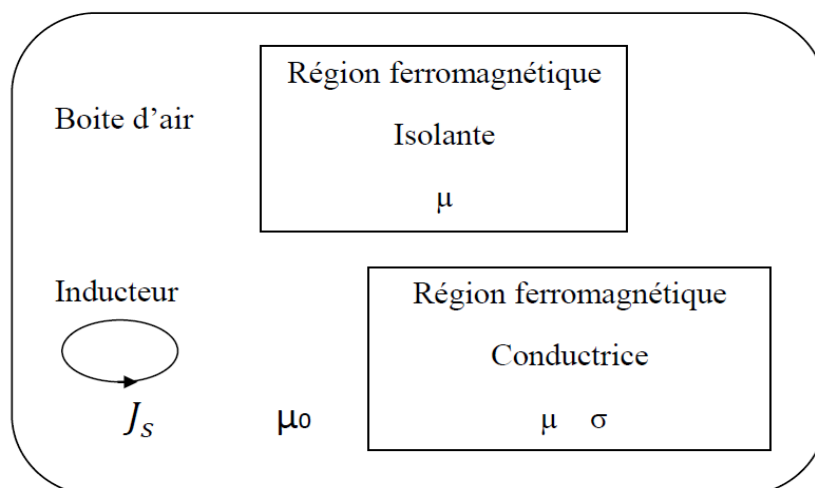
La magnétodynamique consiste en l'étude des phénomènes magnétiques et électriques en régime dynamique, en négligeant toutefois les courants de déplacement  $\frac{d\mathbf{B}}{dt}$  pour les faibles fréquences (problèmes en électrotechnique). Les champs électromagnétiques sont alors variables, soit par variation de courants d'excitation, soit par mouvement d'une partie de la géométrie du problème. Cependant, les problèmes liés au calcul des courants induit peuvent être schématisés par un modèle type constitué de l'air, du matériau conducteur (C) et d'une source de courant variable dans le temps (Figure II.1). Ces trois éléments forment le domaine de calcul  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$ . Il s'agit de calculer sous l'excitation du courant la distribution du champ magnétique en tout point du domaine d'étude  $\Omega$  et de la densité du courant induit  $\mathbf{J}$  dans le matériau conducteur C [5] .



**Figure I.1 :** Domaine d'étude.

Typiquement, un problème magnétodynamique est composé des trois parties suivantes (Figure II.2):

- Des inducteurs (sources) dans lesquelles circulent des courants variables en fonction du temps et dans lesquelles aucun courant de Foucault n'est supposé se développer.
- Des régions composées des matériaux magnétiques saturables ou non saturables qui sont supposés isolants.
- Des conducteurs où peuvent circuler des courants induits.



**Figure I.2 :** Problème magnétodynamique type

## 2.5. Formulation en potentiel A du problème magnétodynamique

Nous nous intéressons qu'à la formulation en potentiel vecteur magnétique car cette formulation est la plus favorable et la plus économique en terme de place mémoire et de temps de calcul. Ecrivons les deux équations de Maxwell qui se présentent sans terme source :

$$\mathbf{rot} \mathbf{E} = - \frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (\text{I.29})$$

$$\mathbf{div} \mathbf{B} = 0$$

La substitution de ( $\mathbf{B} = \mathbf{rot} \mathbf{A}$ ) dans (I.27) donne :

$$\mathbf{rot} \left( \mathbf{E} + \frac{d\mathbf{A}}{dt} \right) = 0 \quad (\text{I.30})$$

Alors :

$$\left( \mathbf{E} + \frac{d\mathbf{A}}{dt} \right) = - \mathbf{grad} v \quad (\text{I.31})$$

Soit :

$$\mathbf{E} = - \left( \frac{d\mathbf{A}}{dt} + \mathbf{grad} v \right) \quad (\text{I.32})$$

Dans (I.30), V est le potentiel scalaire électrique. On remarque qu'en régime variable, L'expression de  $\mathbf{E}$  dépend à la fois de V et de A. A partir de l'équation (I.2) nous avons:

$$\mathbf{rot} \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \right) = \mathbf{J} \quad (\text{I.33})$$

A partir des équations ( $\mathbf{B} = \mathbf{rot} \mathbf{A}$ ) et (I.30) :

$$\mathbf{rot} \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} + \sigma \cdot \mathbf{E} + \sigma (\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}) \quad (\text{I.34})$$

D'où:

$$\mathbf{rot} \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} + \sigma \left( \frac{d\mathbf{A}}{dt} + \mathbf{grad} V \right) + \sigma (\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}) \quad (\text{I.35})$$

Soit :

$$\mathbf{rot} \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{rot} \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{d\mathbf{A}}{dt} + \sigma \mathbf{grad} V - \sigma (\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}) = \mathbf{J}_s \quad (\text{I.36})$$

Afin de résoudre cette équation à deux inconnues ( $\mathbf{A}$ ,  $V$ ), on doit fixer la divergence du potentiel  $A$  pour assurer l'unicité de la solution. On rajoute alors la condition appelée Jauge de Coulomb. Soit :

$$\mathbf{rot} \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{rot} \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{dA}{dt} + \sigma \mathbf{grad} V - \sigma (\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}) = \mathbf{J}_s \quad (\text{I.37})$$

$$\text{Div} \mathbf{A} = 0$$

Cette hypothèse de Jauge, naturellement vérifiée dans la configuration axisymétrique, assure également l'unicité de  $A$  en fixant la valeur de  $V$ . Le terme  $\mathbf{grad} V$  en Axisymétrique est nul.

Pour le terme  $(\sigma(\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}))$ , la pratique montre qu'à cause de la faible valeur de l'induction d'une part, et pour des vitesses faibles d'autre part, on peut négliger le terme  $(\sigma(\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}))$  dans l'équation électromagnétique. Le système (II.36) devient alors :

$$\mathbf{rot} \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{rot} \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{dA}{dt} = \mathbf{J}_s \quad (\text{I.38})$$

$$\text{div} \mathbf{A} = 0$$

### 3. Techniques de résolution des équations aux dérivées partielles

Il existe deux grandes familles de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles :

- Les méthodes analytiques,
- Les méthodes numériques.

Les méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en points dits nœuds du maillage. Parmi ces méthodes, nous citons la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, ... etc.

#### 3.1. Méthode Des Différences Finies (MDF)

La MDF consiste à transformer par un développement de TAYLOR l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences finies. La méthode aux différences finies permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans de nombreux problèmes comme elle possède la simplicité de la formulation numérique, mais elle reste limitée aux configurations à géométrie régulière.

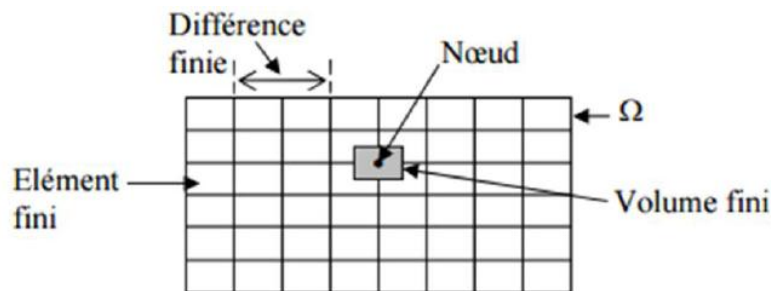


### 3.2. Méthode Des Éléments Finis (MEF)

La méthode des éléments finis est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) surtout dans les géométries complexes et quelques soient les conditions physiques de fonctionnements.

### 3.3. Méthode Des Volumes Finis (MVF)

La MVF se déduit à partir de la MDF. Le domaine d'étude ( $\Omega$ ) est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage (celui des différences finies)[6].



**Figure I.3** : Maillage du domaine d'étude.

Pour calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Grâce à un libre choix de la fonction de liaison entre nœuds consécutifs, la procédure conduit à une solution plus précise que celle fournie par la MDF.

### 3.4. Méthode Des Circuits Couplés (MCC)

La MCC permet de fournir la solution d'une EDP par une expression intégrale du type loi de BIOT et SAVARD. Dans ce cas, on associe à la forme intégrale de la solution, une subdivision de l'inducteur en spires élémentaires. En appliquant les lois de KIRCHOFF à ces circuits

élémentaires, on aboutit à un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des densités du courant.

### 3.5. Méthode Des Intégrales De Frontières (MIF)

Lorsqu'on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La MIF permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. Ainsi, le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontières, la MIF utilise le théorème de d'OSTROGRADSKI-GREEN. Cette méthode peut être intéressante pour l'étude de structure 3D ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. Cependant, cette méthode a l'inconvénient de conduire à un système algébrique à matrice pleine (pas de termes nuls). Ceci augmente le temps utilisateur, donc le coût de calcul [7].

### 3.6. Les conditions aux limites

Généralement, on rencontre deux types de conditions aux limites:

**3.6.1. Condition de Dirichlet :** L'inconnue prend des valeurs données sur les bords du domaine on distingue deux types :

- **Dirichlet homogène :** Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite est considéré égal à zéro :  
 $A=0$
- **Dirichlet non homogène :** Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite et sa valeur non nulle :  
 $A \neq 0$ .

### 3.6.2. Condition de Neumann

La valeur du gradient sur les bords du domaine de résolution est connue. On distingue deux types:

- **Neumann homogène :** La dérivée par rapport à la normale de l'inconnu est nulle:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0.$$

n: Vecteur normale à la limite.

Ce qui signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnu sont perpendiculaires à la limite.

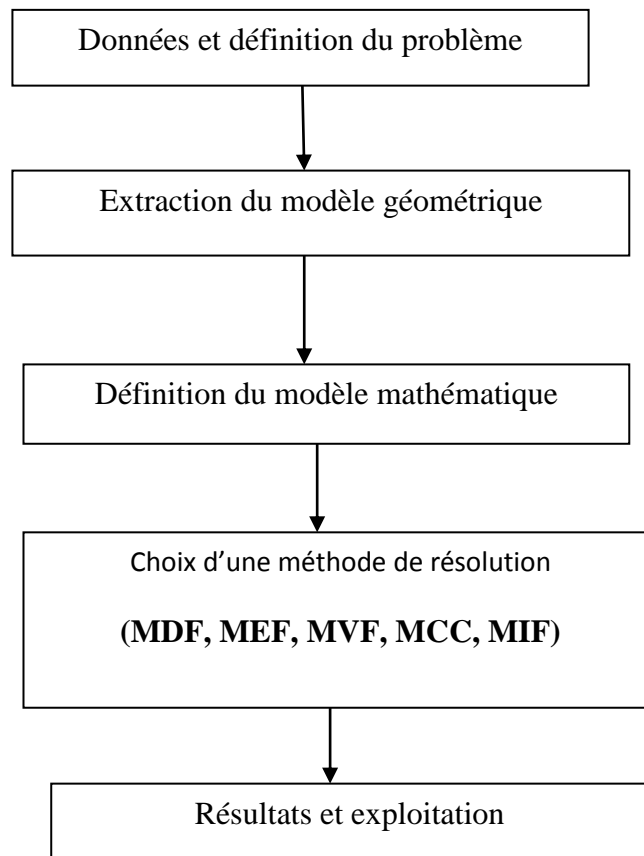
- **Neumann non homogène** : Dans ce cas :

$$\frac{\partial A}{\partial n} = \text{cte} \neq 0$$

Ce qui signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnue forment un angle  $\alpha$  avec la limite.

### 3.7. Etapes d'un problème de modélisation

L'organigramme suivant résume les étapes principales d'un problème de modélisation.



**Figure I.4** : Les étapes d'un problème de modélisation

## 4. Grandeurs électromagnétiques : exploitation

### 4.1. Les courants induits

On appelle les courants induits les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu, soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant. Ces courants ont les effets :

- Provoquent un échauffement par effet joule de la masse conductrice,
- Créent un champ magnétique qui s'oppose à la cause de la variation du champ extérieur (loi de Lenz),
- Créent une force répulsive (interaction entre champ extérieur et champ induit) [8].

### 4.2. Force de Laplace

On considère un conducteur rectiligne de longueur  $L = PM$  parcouru par un courant électrique d'intensité  $I$  placé dans un champ magnétique  $\mathbf{B}$  perpendiculaire à  $PM$ . Les  $N$  électrons libres contenus dans ce conducteur et constituant le courant de charge  $q = -e$ , se déplacent avec une vitesse  $\mathbf{v}$  à travers  $\mathbf{B}$ . Ces électrons subissent donc une force dite de Lorentz :

$$F_m = I q v B \sin(\alpha)$$

Où:

$$F_m = I e v B \sin(\alpha)$$

La résultante  $\mathbf{F}$  des  $N$  forces de Lorentz constitue la force électromagnétique de Laplace s'exerçant sur le conducteur tout entier. Afin de déterminer  $F$ , nous raisonnons sur le modèle simplifié du courant électrique où les  $N$  électrons libres se déplacent à la même vitesse constante  $\mathbf{v}$ . Dans ces conditions, les  $N$  électrons subissent la même force de Lorentz  $\mathbf{F}_m$ .

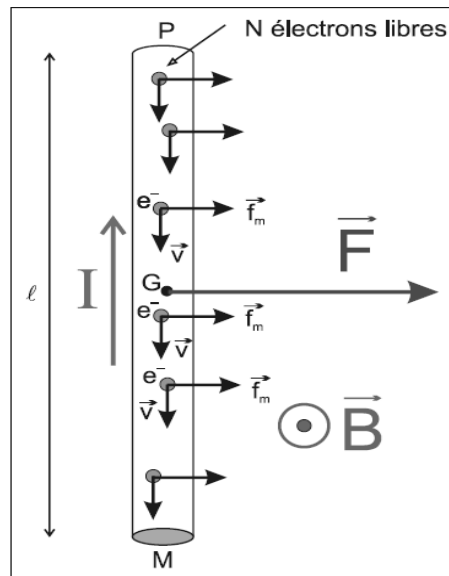
Pareillement, un conducteur de longueur  $L$  placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant  $I$ , est soumis à une force dite de Laplace  $F$  :

$$F = N I q v B \sin(\alpha)$$

Avec :

$\alpha$  = angle entre  $\mathbf{q}$ ,  $\mathbf{v}$  et  $\mathbf{B}$

La direction de  $\mathbf{F}$  est perpendiculaire au plan formé par le conducteur et  $\mathbf{B}$ . Et le sens est déterminé par la règle des trois doigts de la main droite.



**Figure I.5:** schématisation de la force de Laplace

### Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons rappelé les équations de MAXWELL, les principales formulations des modèles qui nous intéressent à savoir le modèle magnétostatique scalaire et vectoriel ainsi que la modèle magnétodynamique. Nous avons également rappelé la création des courants induits ainsi que la force de Lorentz et de Laplace.

## Introduction

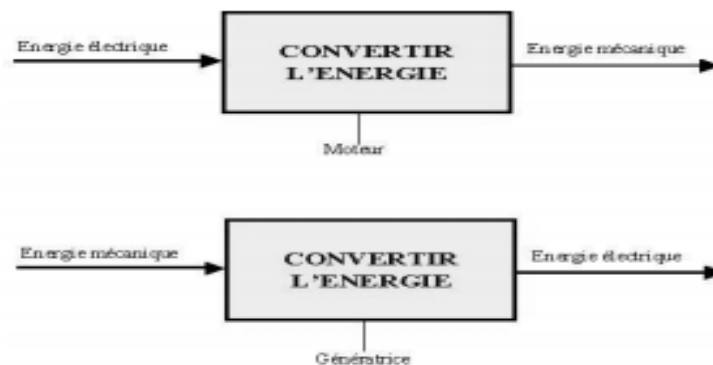
Les actionneurs électromagnétiques sont classés dans deux grandes familles (tournantes et linéaire) les actionneurs rotatifs sont les machines électriques tournantes permet de convertir l'énergie électromagnétique en énergie mécanique, ainsi que l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans ce chapitre, nous avons procédé à une description générale sur les actionneurs électromagnétique linéaires, leurs principe de fonctionnement, les différents types, leurs classification ainsi que leurs domaine d'application.

### 1. Classification des actionneurs électromagnétiques

#### 1.1. Les actionneurs électromagnétiques rotatifs

##### 1.1.1. Les machines à courant continu

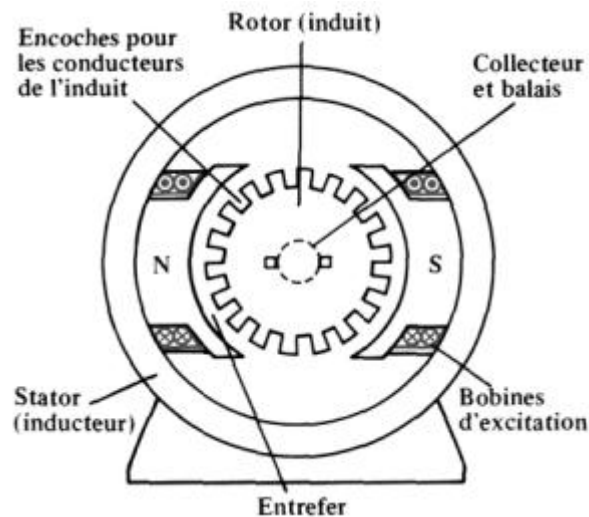
Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie (figure II.1), soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur. Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînée.



**Figure.II.1.** Fonctionnement de la machine à CC.

La machine à CC est constituée de trois parties principales :

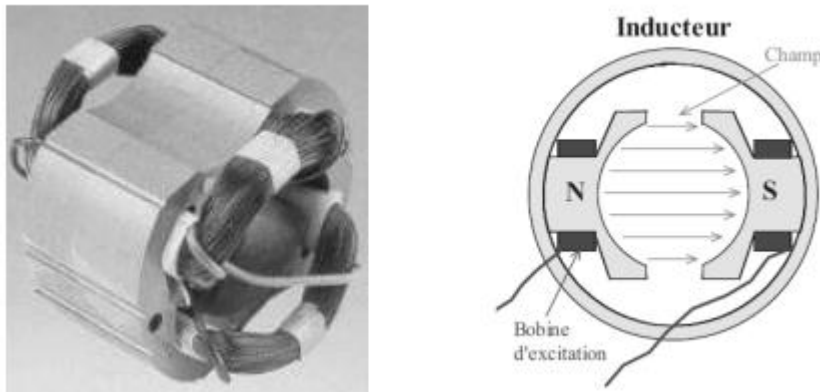
- l'inducteur
- l'induit
- collecteur /balais



**Figure.II.2** : Description de la machine à courant continu

- **L'inducteur :**

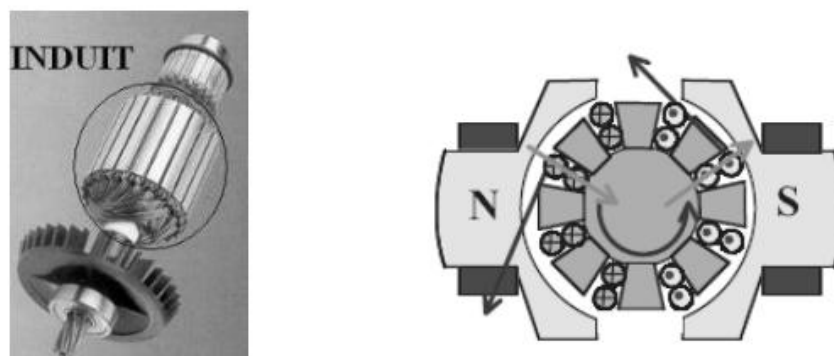
Appelé aussi 'stator'. Que la machine fonctionne en moteur ou en génératrice, le principe est de créer un champ magnétique constant d'induction. Deux moyens peuvent être utilisés : des aimants ou une bobine électrique. Pour canaliser les lignes de champ, un circuit ferromagnétique sera utilisé. Le champ magnétique sera créé dans la partie fixe de la machine appelé Stator (Figure .II.3). Dans le cas de la MCC à aimant permanent il est impossible d'inverser le sens du champ magnétique. Au contraire, dans le cas d'une machine à inducteur bobiné on peut inverser le sens du champ magnétique en inversant le sens du courant dans la bobine inductrice.



**Figure II.3:** Inducteur de la machine à CC

- **Le rotor :**

L'Appelé aussi 'induit', il est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique et montées sur un arbre qui tourne entre les pôles de l'inducteur (**Figure II.4**). L'induit constitue donc un ensemble de conducteurs qui coupent le flux magnétique. Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur .



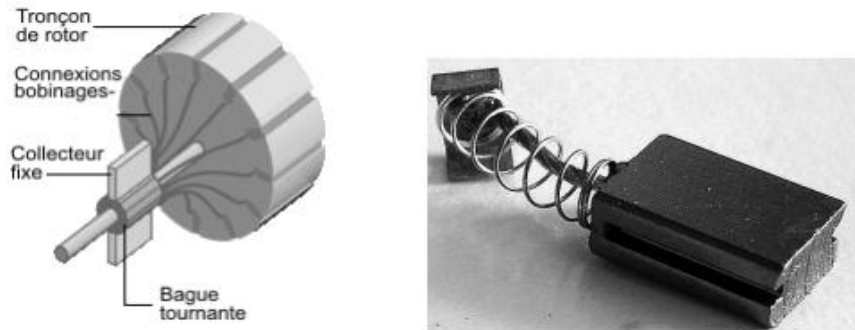
**Figure II.4:** Rotor de la machine à CC

- **Le collecteur et les balais :**

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit. Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation. Deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur. Ainsi, ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur (**Figure II.5**). Le dispositif collecteur/balais permet de faire circuler un courant dans l'induit. Les bobines et l'induit



peuvent être reliés entre elles et au collecteur de plusieurs manières, une des plus employées est l'enroulement imbriqué. [10]



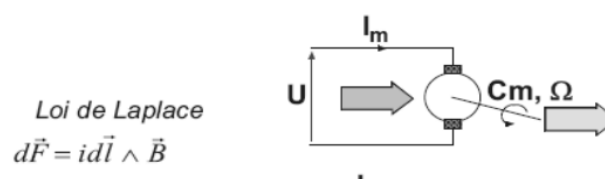
**Figure II.5:** Dispositif collecteur/balais

- **Principe de fonctionnement :**

La machine à courant continu est une machine réversible. C'est-à-dire qu'elle peut :

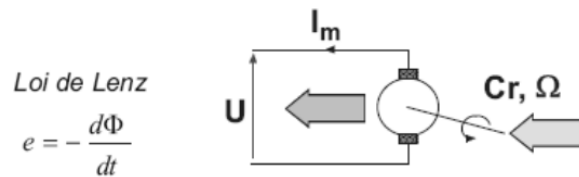
- ✓ fonctionner en moteur et donc recevoir de l'énergie électrique pour la transformer en énergie mécanique,
- ✓ fonctionner en génératrice et donc recevoir de l'énergie mécanique pour la transformer en énergie électrique.

Cette machine tourne par action d'un champ magnétique constant d'induction radiale  $B$  sur un courant continu  $I_m$  passant dans des brins de conducteurs orthogonaux à la direction de l'induction (loi de Laplace).



**Figure. II.6 :** fonctionner en moteur

En fonctionnement génératrice cette machine entraînée en rotation par la partie mécanique voit apparaître une force électromotrice induite aux extrémités de chaque brin de conducteur qui coupe le flux créé par le champ magnétique constant d'induction radiale  $B$  (loi de Lenz).



**Figure. II.7 :** fonctionnement génératrice

On distingue deux types de moteur à CC :

✓ **Les moteurs à inducteur à aimant permanent :**

Il n'y a de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. tous les moteurs à cc de faible puissance et les micromètres sont des moteurs à aimant permanent.

✓ **Les moteurs à inducteur bobiné :**

Il existe 4 types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont :

- ✓ Le moteur à excitation séparée
- ✓ Le moteur à excitation shunt
- ✓ Le moteur à excitation série
- ✓ Le moteur à excitation composée

• **Les avantages et les inconvénients :**

• **Les avantages :**

- ✓ Alimentation aisée dans les systèmes transportant leur réserve d'énergie (piles ou batterie),
- ✓ La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.

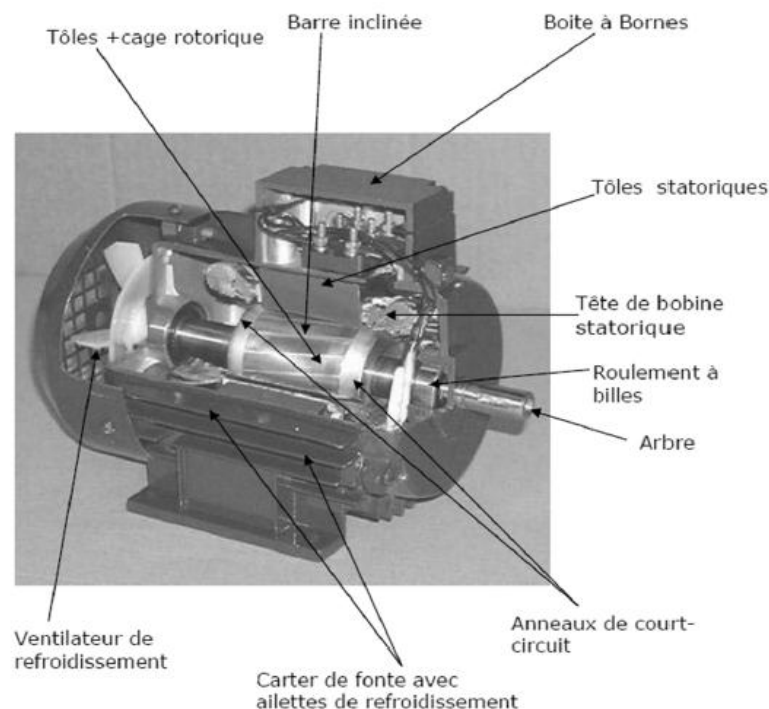
• **Les inconvénients :**

- ✓ Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent appuyer fort pour rester en contact et plus le frottement est important,
- ✓ Aux vitesses élevées les charbons doivent être remplacés très régulièrement,

- ✓ Le contact électrique imparfait cause des arcs électriques, usant rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation.
- **Utilisation de la machine à CC :**
  - ✓ Démarreur (automobiles),
  - ✓ Moteur de traction (locomotive, métro...),
  - ✓ Appareils de levage,
  - ✓ Ventilateurs, pompe centrifuges, compresseurs, pompes à piston,
  - ✓ Machine-outil à couple variable.

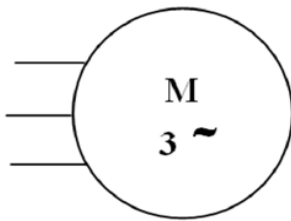
### 1.1.2. Les machines asynchrones

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. La machine qui nous intéresse dans ce mémoire est plus précisément une machine à induction (**Figure II.8**). Il existe en effet théoriquement d'autres types de machines asynchrones. Une machine à induction est une machine asynchrone dont le circuit magnétique est associé à deux, ou plus de deux, circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique.

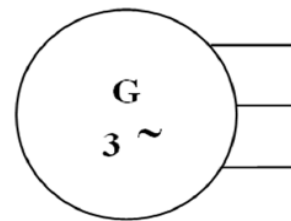


**Figure II.8 :** Eléments constitutifs d'une MAS

La machine asynchrone peut être représentée par son symbole normalisé général qui précise si elle fonctionne en moteur (*figure II.8*) ou en génératrice (*figure II.9*).



**Figure II.9 :** Symbole moteur

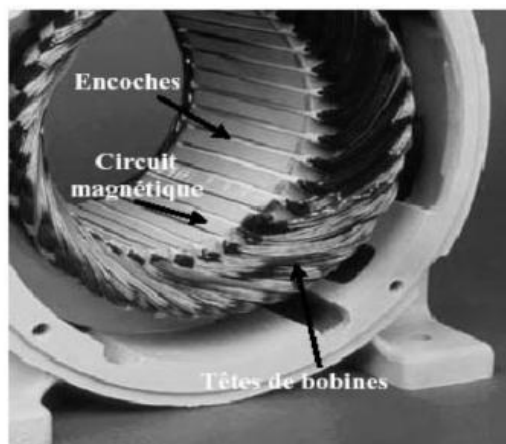


**figure II.10 :** Symbole génératrice

Cette machine est constituée de :

- **Le stator**

Les différents types des moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine [11].Figure II.11.



**Figure II.11 :** Photo du stator d'une machine asynchrone.

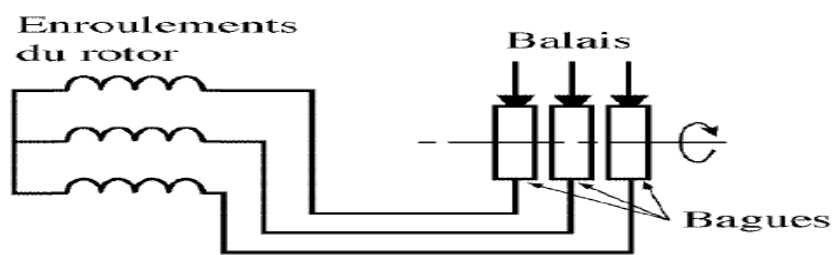
- **Le rotor :**

Le circuit magnétique du rotor est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques rainurées. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées

sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un noyau. On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil :

- **A rotor Bobiné :**

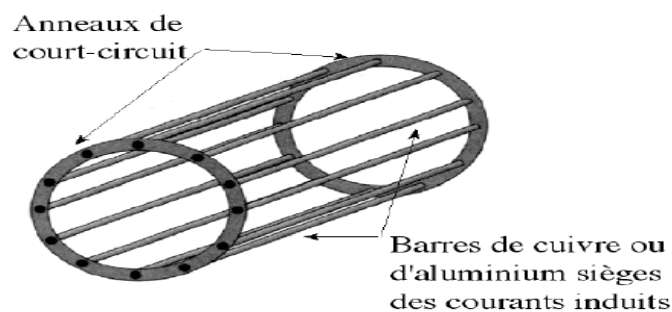
Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à «  $p$  » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile (*Figure II.10*), et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixes.



**Figure II.12 :** Rotor bobiné.

- **Rotor à cage :**

La grande majorité des moteurs sont à cages. Dans chaque encoche rotorique est placée une barre (*Figure II.11*). Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Elles sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit.



**Figure II.13 :** Rotor à cage d'écureuil.

- **Principe de fonctionnement :**

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. [12] De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur: le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:

$$n_1 = \frac{f \cdot 60}{P} \quad (\text{II.1})$$

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $n_1$ ) diffère de celle du rotor ( $n$ ), c'est-à-dire, lorsque  $n \neq n_1$ , car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque  $n = n_1$ , le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique. Le rapport :

$$g = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (\text{II.2})$$

Est appelé glissement d'une machine asynchrone

- **Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones :**
- **Avantages :**

Il ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone :

- ✓ Structure simple.
- ✓ Robuste et facile à construire.
- ✓ Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- ✓ Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- ✓ Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- ✓ Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements.

- **Inconvénients :**

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone :

- ✓ Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- ✓ La vitesse dépend de la charge.
- ✓ Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).

## 1.2. Les actionneurs électromagnétiques linéaires

Un moteur linéaire est essentiellement un moteur électrique qui produit une force linéaire sur sa longueur par le biais d'un champ électromagnétique, le déplacement de l'induit est alors linéaire et non rotatif. Il y a donc moins de pièces en mouvement et donc moins d'inertie, le moteur linéaire s'impose lorsque la vitesse et la précision sont importantes[14].

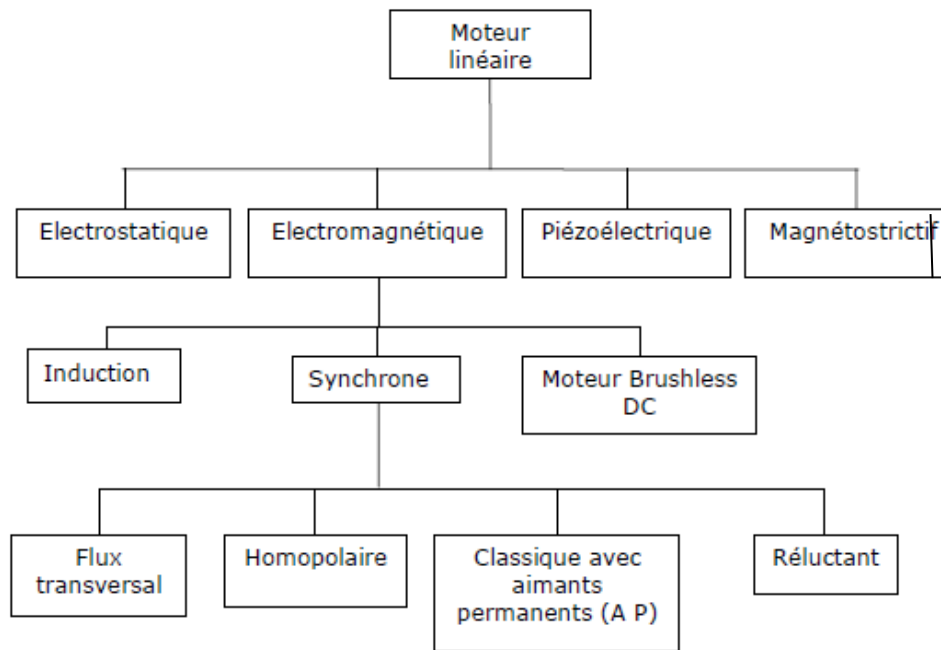
Le moteur linéaire diffère du moteur rotatif par les points suivants :

- circuit magnétique (inducteur) ouvert aux deux extrémités, ce qui donne en outre la possibilité d'y ménager soit un nombre pair, soit un nombre impair de pôles.
- induit constitué, par une masse conductrice, ou des conducteurs.

### 1.2.1. Classification des actionneurs linéaires

Il y a principalement quatre approches différentes pour produire un mouvement linéaire (figure II.14 ) :

- La première solution est d'employer les propriétés électrostatiques.
- La deuxième solution par une manière électromagnétique qui est d'intérêt pour ce mémoire.
- Les troisième et quatrième solutions basées sur les frottements mécaniques utilisant les propriétés piézoélectriques ou magnétostrictives.



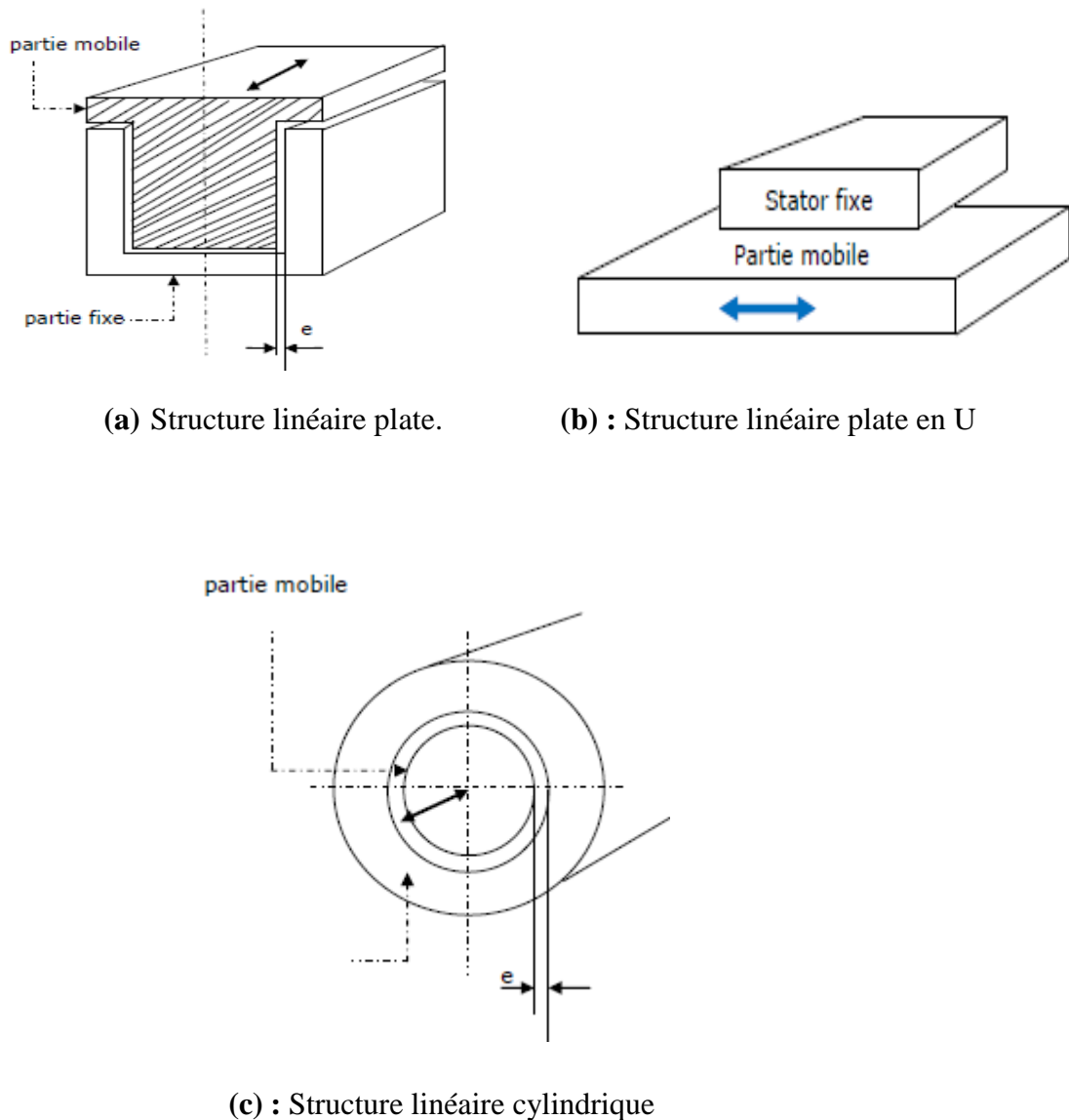
**Figure II.14** : Classification des moteurs linéaires

### 1.2.2. Principales architectures d'actionneurs linéaires

Contrairement au cas des machines rotatifs où le stator et le rotor sont généralement coaxiaux, elles sont constituées d'une partie mobile et d'un stator fixe dont les positions peuvent être inversées. Les machines linéaires peuvent se présenter sur trois formes de structures [13] (figure. II.15) :

- forme plate.
- forme plate en U.
- forme cylindrique



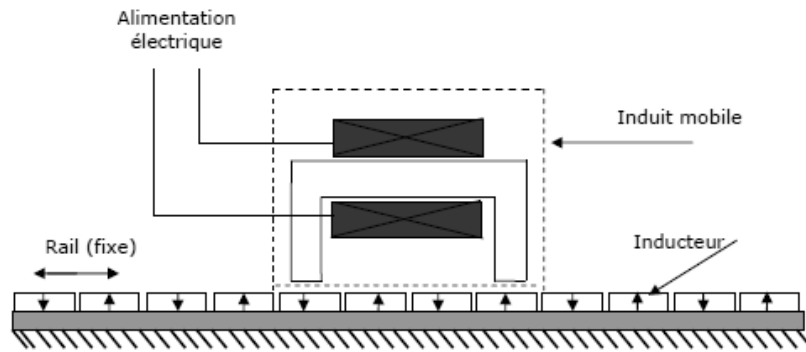


**Figure. II.15** : architectures des actionneurs linéaires

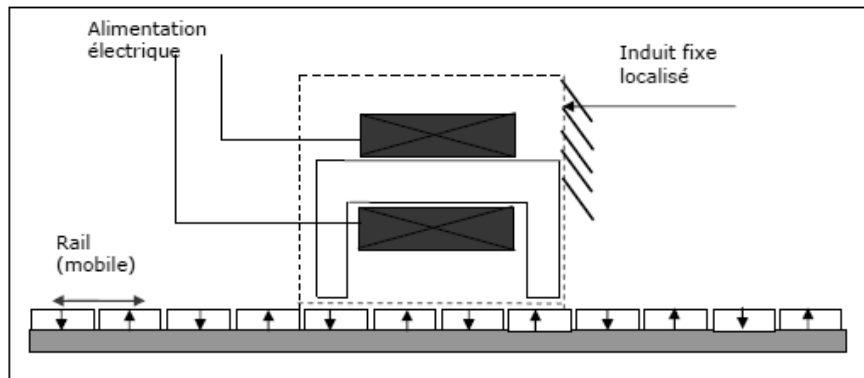
### 1.2.3. Géométries des machines linéaires

Trois familles peuvent être distinguées :

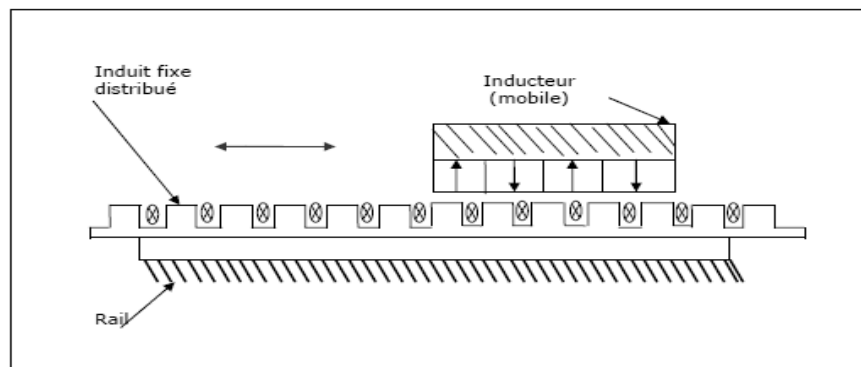
- inducteur solidaire du rail, donc fixe, et induit mobile dont l'alimentation peut s'effectuer par un câble souple ou par transmission d'énergie sans contact, l'énergie peut être également embarquée (figure. II.16).
- inducteur solidaire du rail mobile et induit fixe (figure. II.17).
- induit fixe distribué sur la longueur du rail (voie active dans le cas des trains), la partie mobile supporte uniquement l'inducteur.



**Figure II.16 :** Structure à inducteur solidaire du rail fixe.



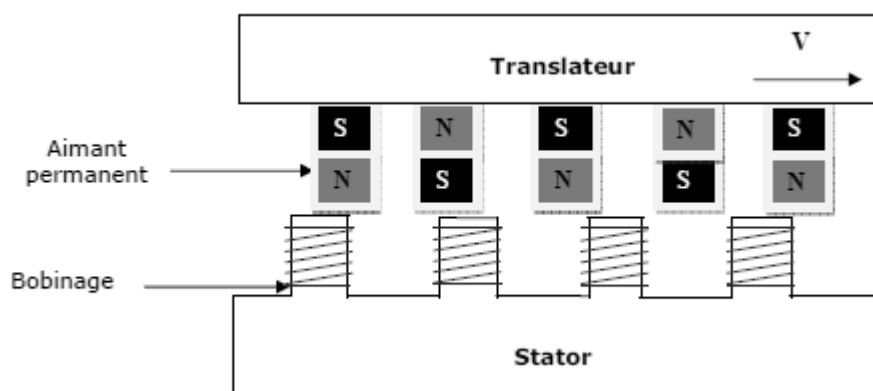
**Figure II.17:** Structure à inducteur solidaire du rail mobile.



**Figure. II.18 :** structure à inducteur mobile

### 1.2.4. Fonctionnement des actionneurs électromagnétiques linéaires :

Le principe de fonctionnement est le même pour les actionneurs électromagnétiques rotatifs. Les principaux éléments, bobines et aimants, sont simplement arrangés différemment pour produire une force et non un couple. Le principe de fonctionnement d'un moteur linéaire repose simplement sur la loi de Laplace. Un courant est appliqué dans les enroulements successifs ce qui les attire (ou les repousse) vers les différentes polarités provoquées par les aimants permanents du stator. La force attirant (ou repoussant) la partie mobile se transforme donc en une force permettant le déplacement linéaire.

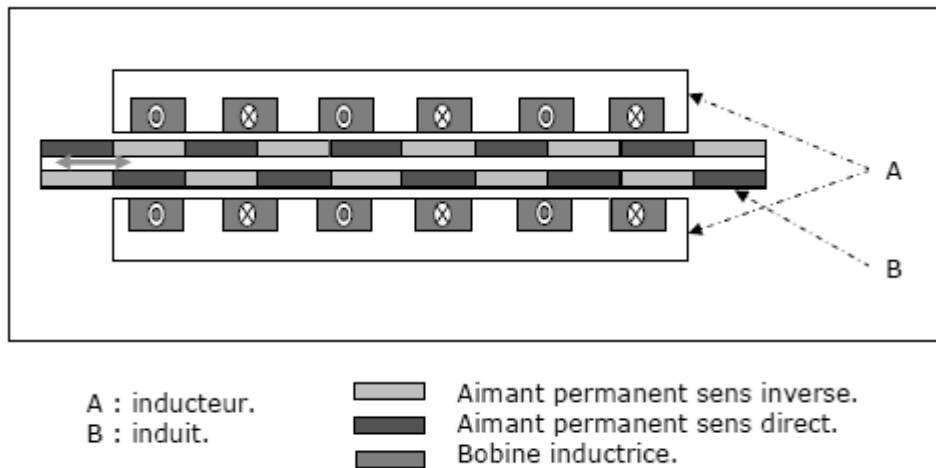


**Figure II.19 :** Principe de fonctionnement d'un moteur linéaire.

### 1.2.5. Différents types de moteurs linéaires

#### 1.2.5.1. Moteur linéaire à aimants permanents

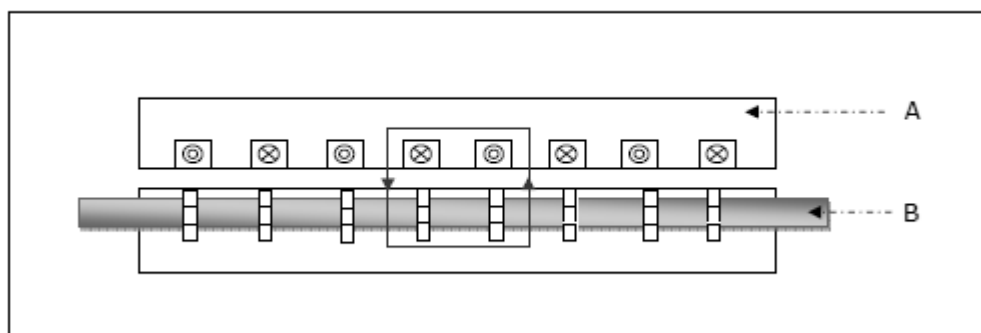
Le principe de fonctionnement du moteur linéaire à aimants permanents est assuré par l'action d'un champ électromagnétique de l'inducteur sur l'induit composé d'aimants permanents. Les enroulements sont bobinés sur les dents et régulièrement réparties dans l'inducteur. Généralement, les aimants utilisés dans les moteurs linéaires synchrones à aimants permanents sont du type Néodyme-Fer-Bore. Les moteurs linéaires à aimants permanents sont souvent alimentés en bipolaire ainsi les enroulements, sont mis en série pour former deux phases décalées de l'angle  $\pi/2$ . L'alimentation des deux phases par des courants positifs et négatifs provoque un mouvement linéaire appliqué sur l'induit.



**Figure II.20 :** Moteur linéaire à aimants permanents.

### 1.2.5.2. Moteur à induit en forme d'échelle

Dans lequel on dispose, dans les encoches de l'induit ferromagnétique, une échelle conductrice, dont les barreaux sont équivalents aux barres des moteurs à cage.



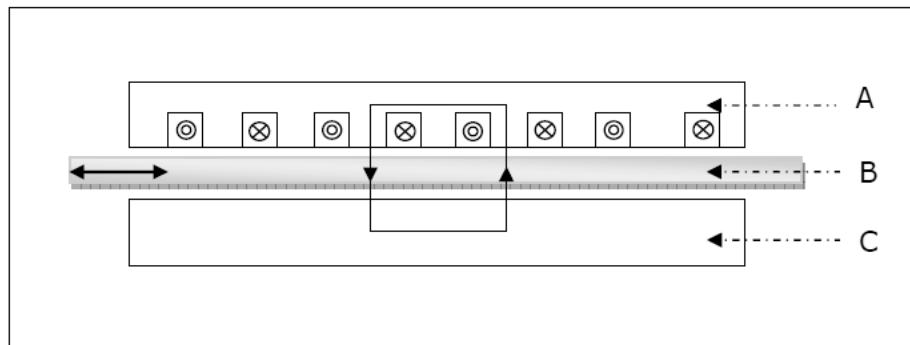
A : inducteur.

B : induit ferromagnétique des barreaux conducteurs.

**Figure II.21:** Moteur linéaire à induit en forme d'échelle.

### 1.2.5.3. Moteur à inducteur simple

Le principe de fonctionnement est celui du couplage magnétique : les bobines de l'inducteur traversées par le courant de l'alimentation créent un champ magnétique qui engendre dans l'induit des courants. L'interaction des courants induits et du champ inducteur se traduit par une force de poussée. Ce type de moteur comporte un circuit magnétique de fermeture.



A : inducteur.

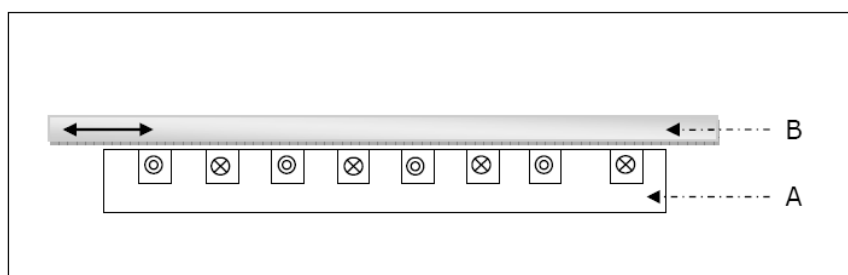
B : induit.

C : circuit magnétique de fermeture.

**Figure II.22 :** Moteur linéaire à inducteur simple.

### 1.2.5.4. Moteur à inducteur simple sans circuit de fermeture

Le même principe que le précédent, sauf que les lignes d'induction se ferment dans l'air.



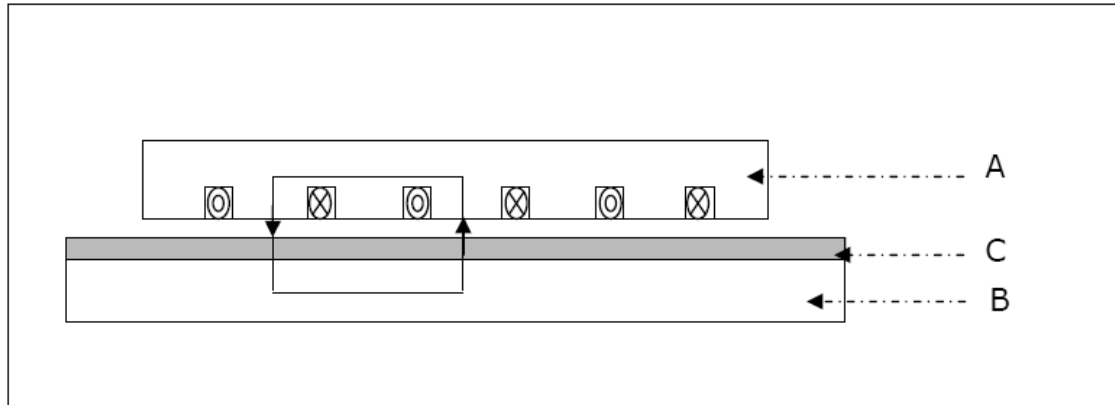
A : inducteur.

B : induit.

**Figure II.23:** Moteur linéaire à inducteur simple sans circuit magnétique de fermeture.

### 1.2.5.5. Moteur linéaire à induit composite

Le courant est induit dans une couche conductrice généralement en aluminium appliquée sur une plaque d'acier magnétique assurant le retour (la fermeture) du flux.



A : inducteur.

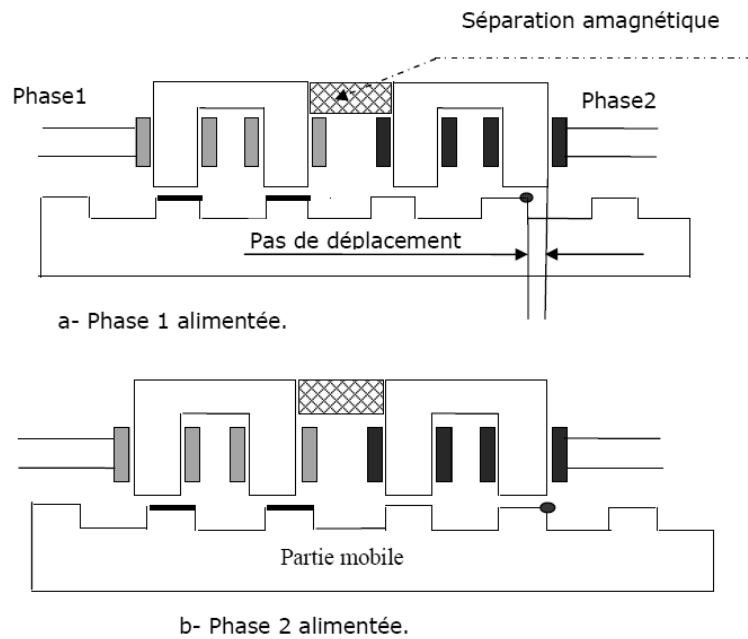
B : plaque en acier (circuit magnétique de fermeture).

C : couche conductrice.

**Figure II.24:** Moteur linéaire à induit composite

### 1.2.5.6. Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable

Ce type de moteur est caractérisé par une structure dentée au niveau du stator et de la partie mobile. Le circuit magnétique est généralement assemblé à partir de tôles magnétiques de forte perméabilité. Toutefois, les machines destinées au positionnement ou à une translation lente, peuvent être réalisées avec des pièces massives. Les enroulements du circuit électriques sont généralement concentrés autour des plots du stator et donc faciles à réaliser. Chaque module comporte deux plots autour desquels sont enroulées les bobines. Chaque phase de la machine est formée par la mise en série des deux bobines d'un même module. Des séparations aimantiques sont nécessaires entre les différents modules statoriques afin d'imposer un décalage.



**Figure II.25 :** Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable.

### 1.2.6. Domaines d'application des moteurs linéaires

- **Transports**

Le métro à moteur linéaire est une avancé pour les transports urbains. En effet, la traction linéaire apporte de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes de transports traditionnels (figure II .26).



**Figure II.26 :** Métro de Kuala Lumpur à moteur linéaire

La figure (II.27) représente un système de MAGLEV. la force de propulsion du système provient des moteurs linéaires. Comme les moteurs linéaires génèrent directement la force de translation

sans système intermédiaire, la structure des trains avec moteurs linéaires est simple par rapport à celle avec moteurs traditionnels. De plus, les vibrations et le bruit provenant des contacts mécaniques sont fortement diminués.



**Figure II.27 :** Maglev japonais à une vitesse de 500 km/h

- **Traction routière**

Pour les véhicules électriques (hybrides ou autres), qu'ils s'agissent d'automobiles, autobus, il est comme dans le cas des trains tentant de supprimer les organes d'usure (lubrification, bruit) et une meilleure contrôlabilité.

- **Ascenseurs**

Habituellement les moteurs d'ascenseurs sont situés dans une cabine en haut de la cage et l'ascenseur est tiré par un système de câbles. Pour diverses raisons, gain de place (suppression de la cabine), élimination des câbles, deux solutions sont actuellement sur le marché :

- ✓ L'ascenseur est un véhicule avec des roues qui se déplace dans un couloir vertical (Schindler).
- ✓ Un moteur linéaire propulse la cabine (Otis au Japon).



### 1.2.7. Les avantages et les inconvénients

- **Les avantages :**

- ✓ Grande dynamique de mouvement.
- ✓ Grande précision ou résolution de positionnement.
- ✓ Accroissement de la durée de vie.
- ✓ Réduction du nombre de composants.
- ✓ Flexibilité et souplesse avec, entre autre, la possibilité de monter plusieurs parties mobiles indépendantes sur un seul axe.

- **Les inconvénients :**

- ✓ Compte tenu de système de guidage entre les parties fixes et mobile d'un moteur linéaire, il est difficile de réaliser un entrefer aussi faible que dans une variante tournante.
- ✓ La capacité maximale de la force électromécanique linéaire est limitée.
- ✓ La géométrie très particulière de la machine linéaire imposant une puissance spécifique inférieure à celle de la machine tournante.

### Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons procédé à une description générale des actionneurs électromagnétiques en particulier les actionneurs linéaires, ainsi que leurs différents types, leurs classifications et leurs domaines d'application.

**Introduction :**

La résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) se fait soit par des méthodes analytiques dans les cas simples ou par des méthodes numériques dans les cas complexes. Parmi les méthodes numériques de discrétisation les plus en plus utilisées on trouve la méthode des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF) et la méthode des éléments finis (MEF), cette dernière est implémentée dans le logiciel de modélisation FEMM. La modélisation du moteur linéaire, qui fait l'objet du présent chapitre, a pour objectif principal l'évaluation des forces électromagnétiques exercées sur la plaque aluminium qui représente la partie mobile du moteur, dont le champ électromagnétique étant créé par deux circuits magnétiques alimentés par un système triphasé.

Le système étudié est un moteur linéaire. Le dispositif d'étude est constitué d'un inducteur triphasé fixe (trois bobines identiques) et d'un induit mobile (plaque longue en aluminium). Le modèle géométrique du moteur est donné par la Figure III.1 A+, A- : la bobine de la phase 1, B+, B- : la bobine de la phase 2, C+, C- : la bobine de la phase 3).

III.1.Modèle géométrique du moteur proposé :

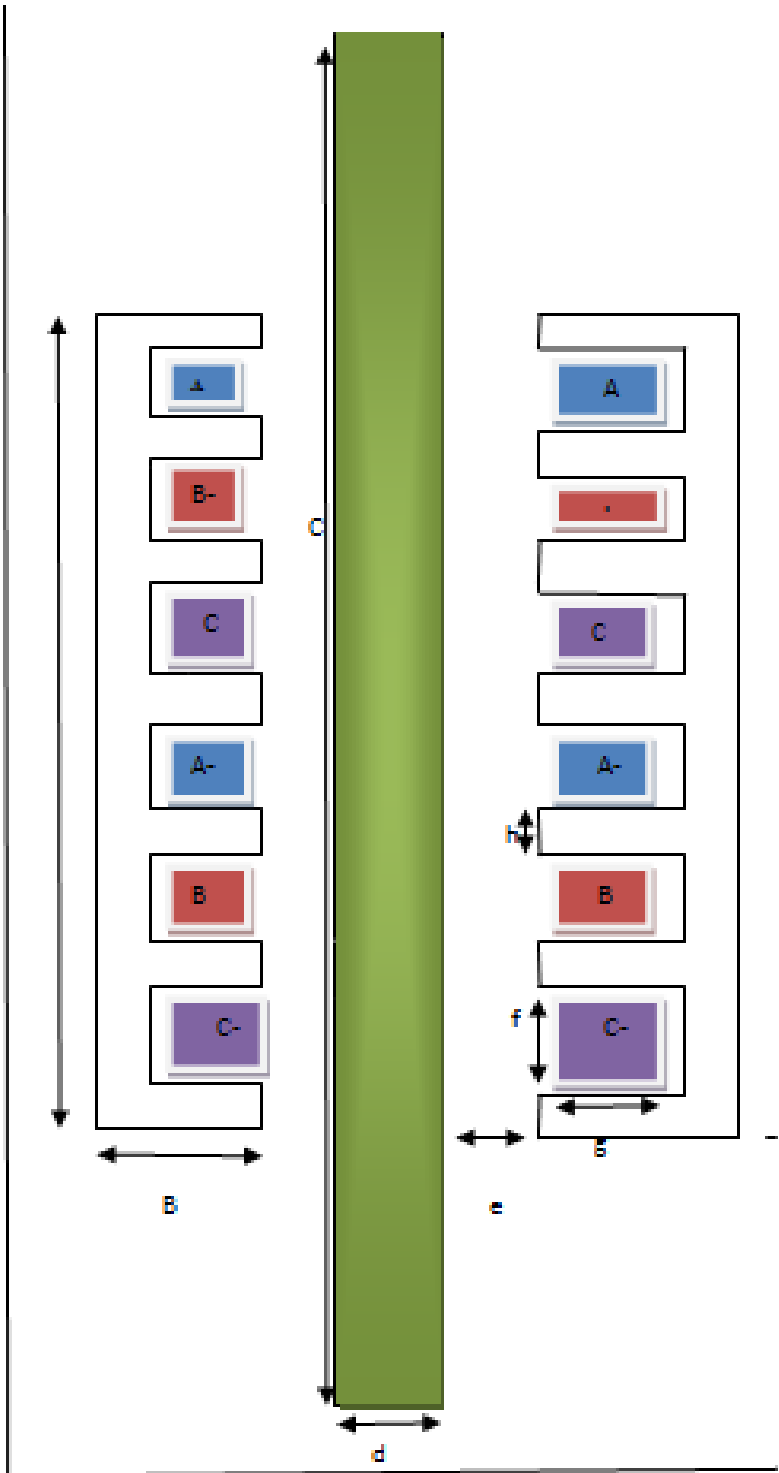


Figure .III.1 : Modèle géométrique du moteur linéaire.

Les données du moteur sont montrées dans le Tableau III.1.

Largeur de la bobine (g)	19mm
Hauteur de la bobine (f)	8mm
Distance entre les bobines (h)	12mm
Longueur de l'inducteur (a)	130mm
Largeur de l'inducteur (b)	40mm
Longueur de la plaque aluminium (c)	300mm
Largeur de la plaque aluminium (d)	5mm
La distance entre l'inducteur et la plaque (e)	1mm
Le courant	1A
Conductivité de la plaque	3,7 MS
Perméabilité magnétique relative de la plaque	1
Perméabilité magnétique relative de l'air	1
Densité du courant dans la phase A	$J_A=0.65 \text{ MA/m}^2$
Densité du courant dans la phase B	$J_B=-0,325-i*0,52 \text{ MA/m}^2$
Densité du courant dans la phase C	$J_C=-0,325+i*0,52 \text{ MA/m}^2$
Perméabilité magnétique relative du fer	100

**Tableau III.1** : Les données du moteur.

La figue III.2 Représente le maillage triangulaire crée par le logiciel FEMM du moteur.

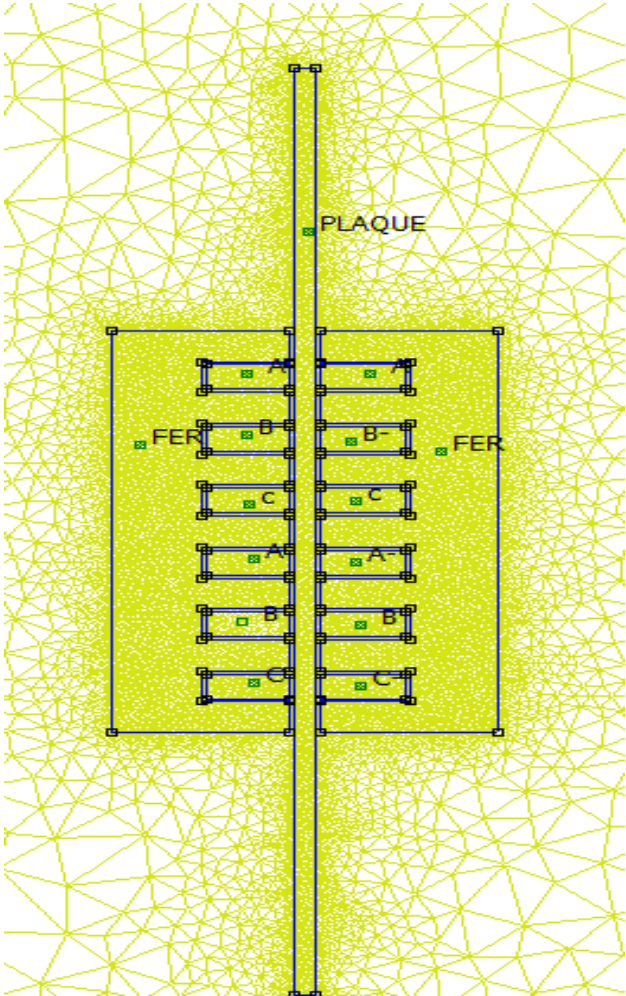


Figure .III.2 : Maillage du moteur crée par FEMM

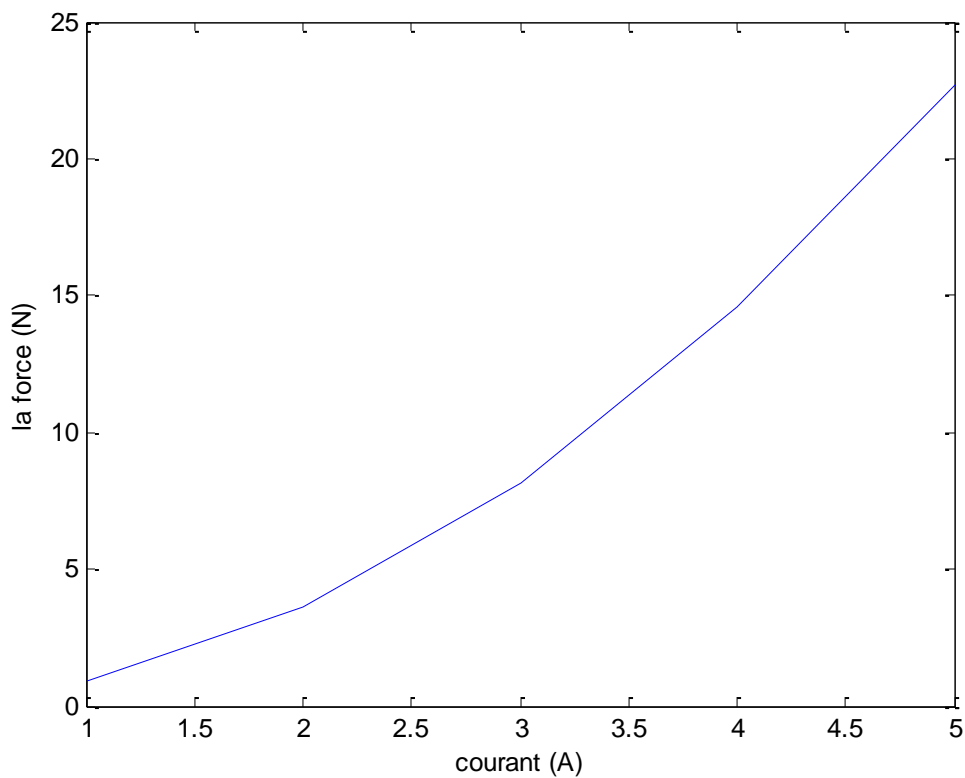
## III.2. Etude de l'effet des différents paramètres sur la force

### III.2.1. Effet du courant inducteur sur la force

Le tableau III.2 ainsi que la figure III.3 représentent les résultats de la modélisation pour différentes valeurs du courant d'alimentation. En effet, ces résultats représentent l'effet du courant sur la valeur de la force magnétique appliquée sur la plaque aluminium (partie mobile du moteur).

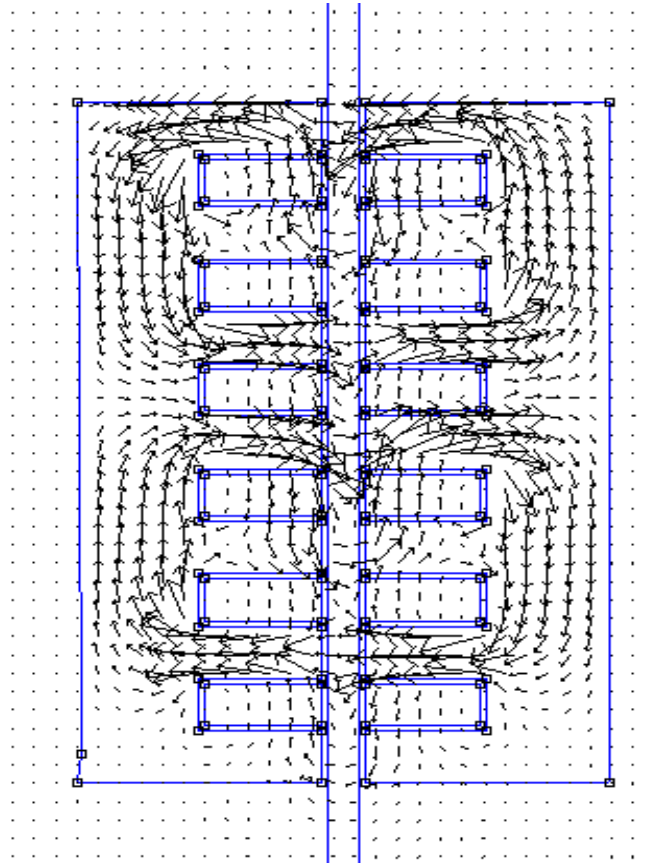
I(A)	La force (N)
1	0.89
2	3.62
3	8.18
4	14.59
5	22.69

**Tableau.III.2 :** Effet de la courante source sur la force

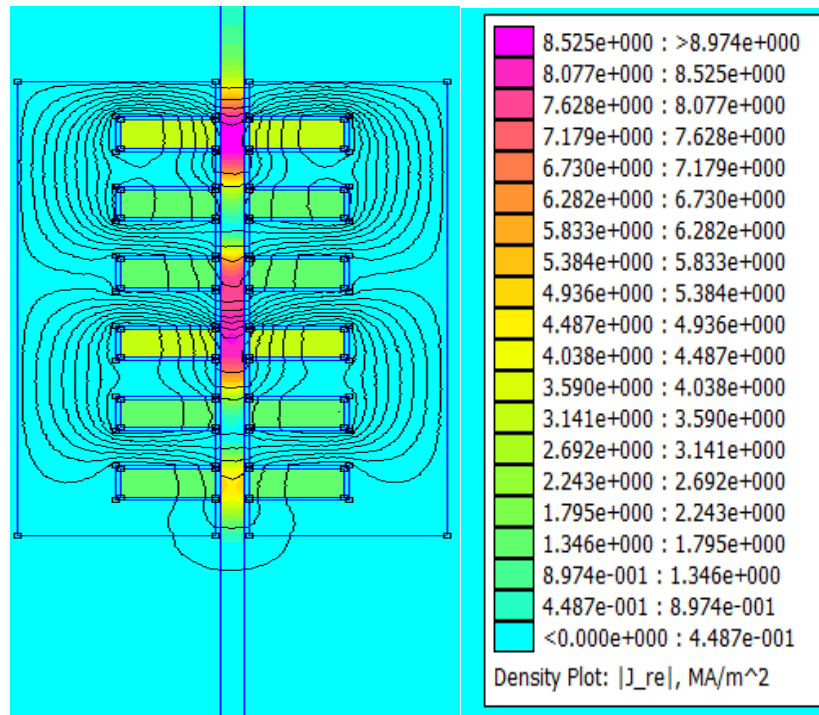


**Figure.III.3 :** Effet de la courante source sur la force

On remarque que la force magnétique augmente avec l'augmentation du courant. Cela est traduit par l'équation de Laplace (La force est proportionnelle au courant). A titre d'illustration, la figure III.4 représente les vecteurs de l'induction magnétique créée par les trois bobines, et la figure III.5 représente la densité des courants induits dans la plaque pour un courant d'alimentation  $I=5A$ .

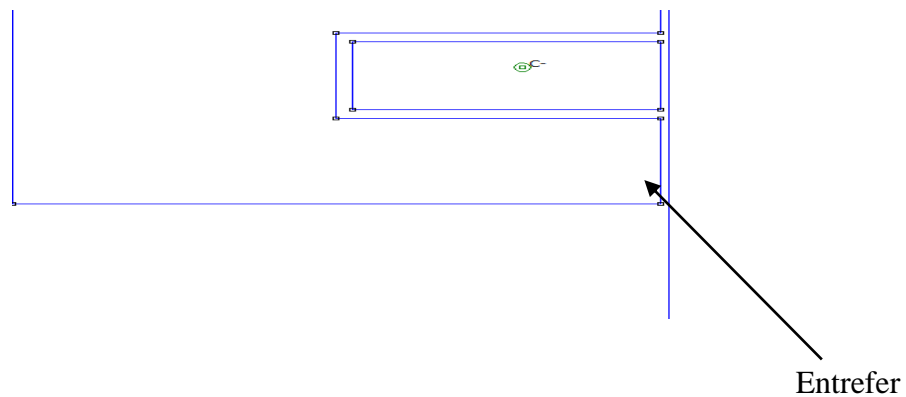


**Figure.III.4 :** Vecteurs de l'induction magnétique pour  $I=5A$ .



**Figure.III.5** : Densité des courants induits pour  $I=5A$ .

### III.2.2. Effet de l'entrefer sur la force



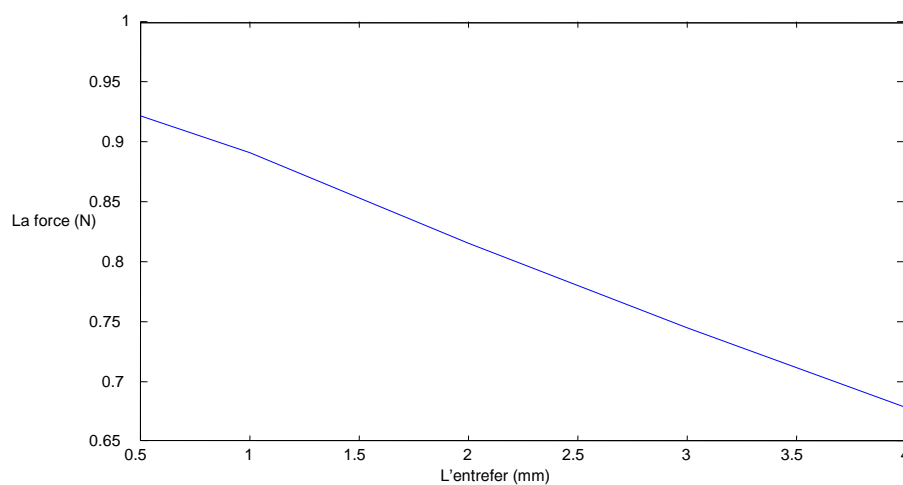
**Figure.III.6** : Entrefer du moteur.

Le tableau III.3 ainsi que la figure.III.7 représentent les résultats de la modélisation pour ce deuxième paramètre. En effet, c'est l'effet de la largeur de l'entrefer sur la valeur de la force magnétique appliquée sur la partie mobile du moteur.



Entrefer (mm)	Force (N)
0,5	0.92
1	0.89
2	0.81
3	0.74
4	0.67

**Tableau.III.3 :** Effet d'entrefer sur la force



**Figure III .7 :** Effet de l'entrefer sur la force.

On observe que la force magnétique diminue avec l'augmentation de la largeur de l'entrefer (distance entre l'inducteur et la laque aluminium). A cause de l'augmentation de la reluctance équivalente du circuit magnétique, par conséquent la diminution de l'induction magnétique qui produit la diminution de la force magnétique (équation de Laplace). A titre de l'illustration, la figure III.8 représente les vecteurs de l'induction magnétique créée par les trois bobines et la figure III.9 représente la densité des courants induits, et cela pour un courant d'alimentation  $I=1A$  et pour une largeur d'entrefer égale à 0,5mm.

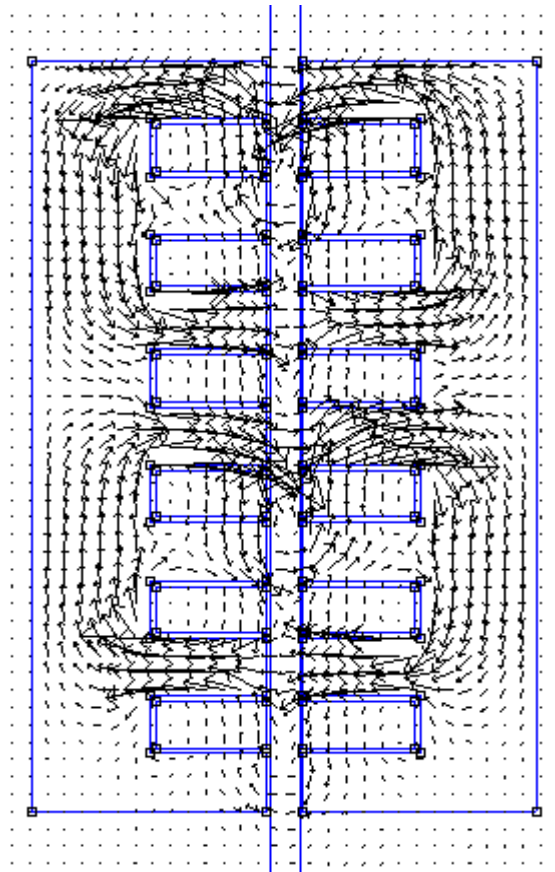


Figure.III.8 : Vecteurs de l'induction magnétique, pour un entrefer 0,5mm

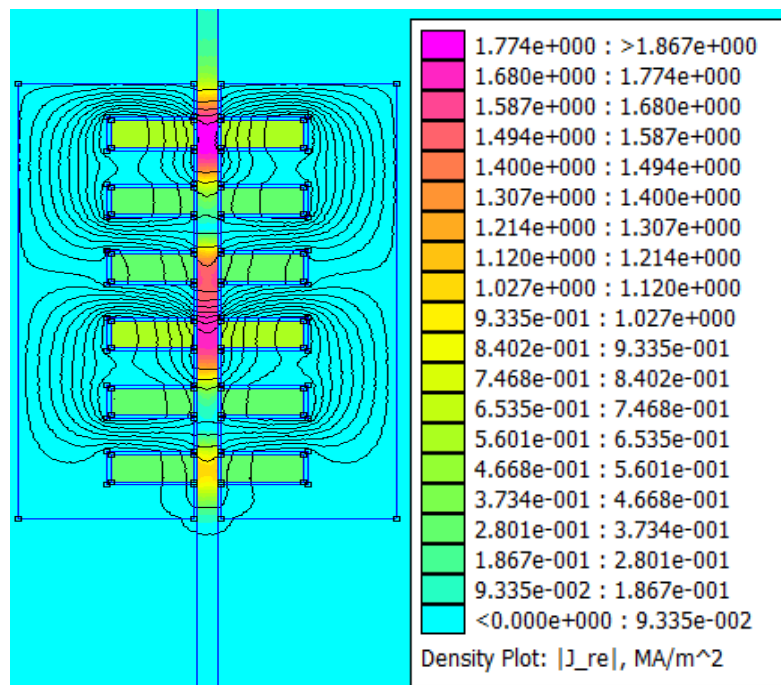
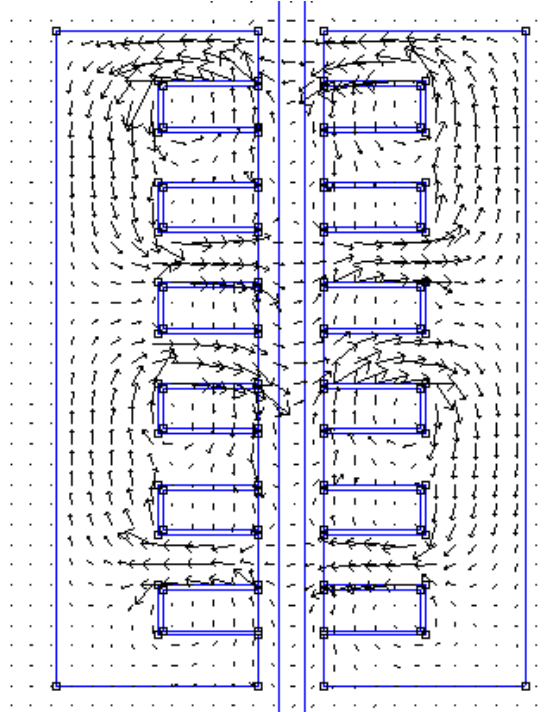
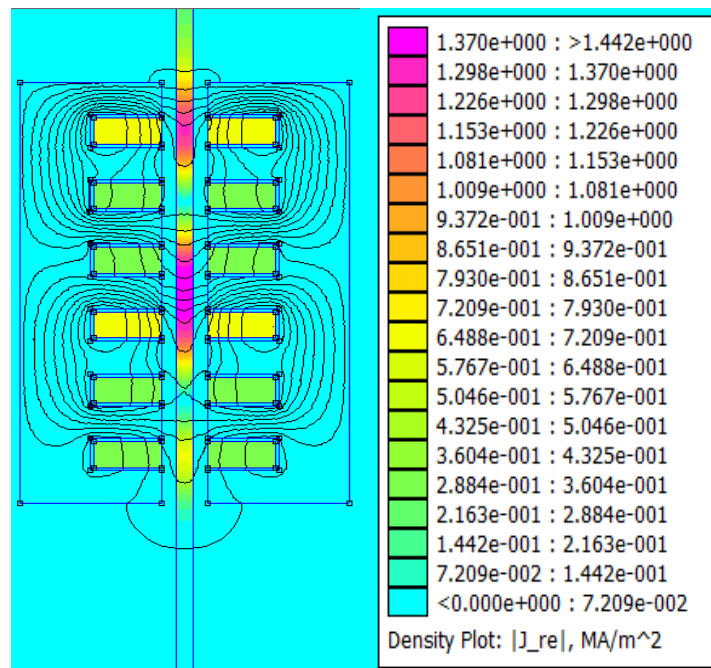


Figure.III.9 : Densité des courants induits, pour un entrefer =0.5mm

De plus, à titre de l'illustration la figure.III.10 représente les vecteurs de l'induction magnétique créé par les trois bobines et la figure III.11 représente la densité des courants induits, pour un courant  $I=1A$  et pour une largeur de l'entrefer égale à 4mm.

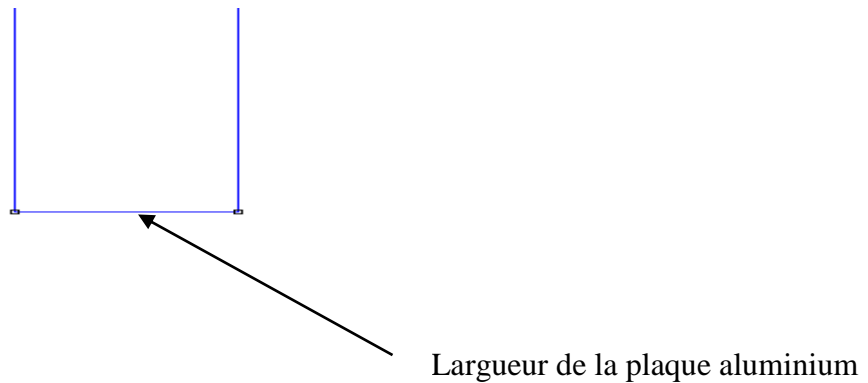


**Figure.III.10 : Vecteurs de l'induction magnétique pour un entrefer 4mm**



**Figure.III.11 : Densité des courants induits, pour un entrefer 4mm**

### III.2.3. Effet de largeur de la laque aluminium

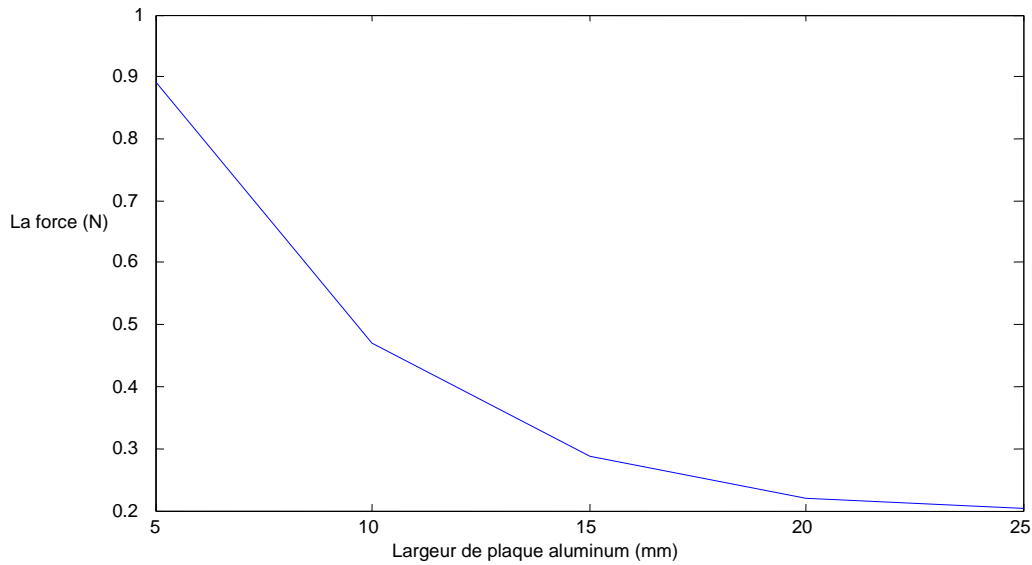


**Figure.III.12 :** Schématisation de la largeur de la plaque aluminium

Dans cet essai, on change la largeur de la plaque aluminium. Le courant d'alimentation est fixe et vaut  $I=1A$ , de même on fixe l'entrefer à 1mm. Le tableau III.4 et la figure III.13 représentent les résultats de cette troisième modélisation. C'est derniers indiquent l'effet de la largeur de la plaque sur la valeur de la force magnétique appliquée sur cette même plaque.

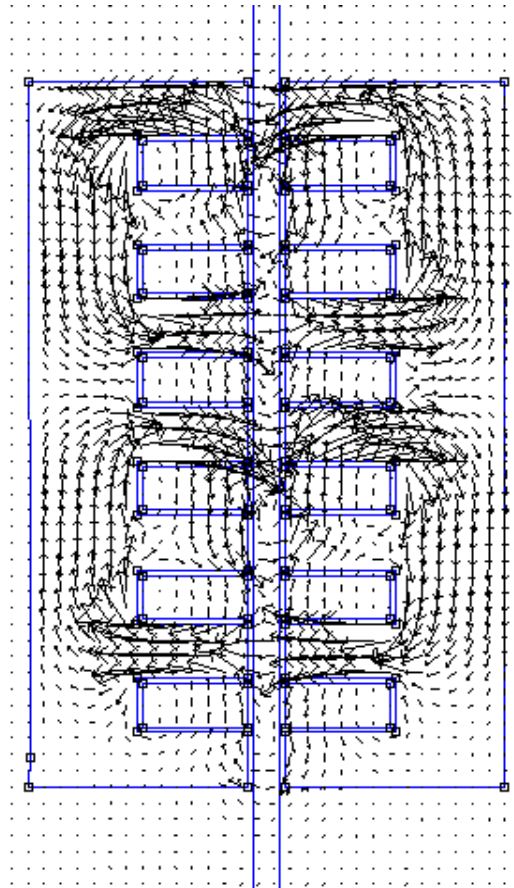
Largueur de plaque aluminium (mm)	La force (N)
5	0.89
10	0.47
15	0.28
20	0.22
25	0.20

**Tableau.III.4 :** Effet de la largeur de plaque aluminium sur la force

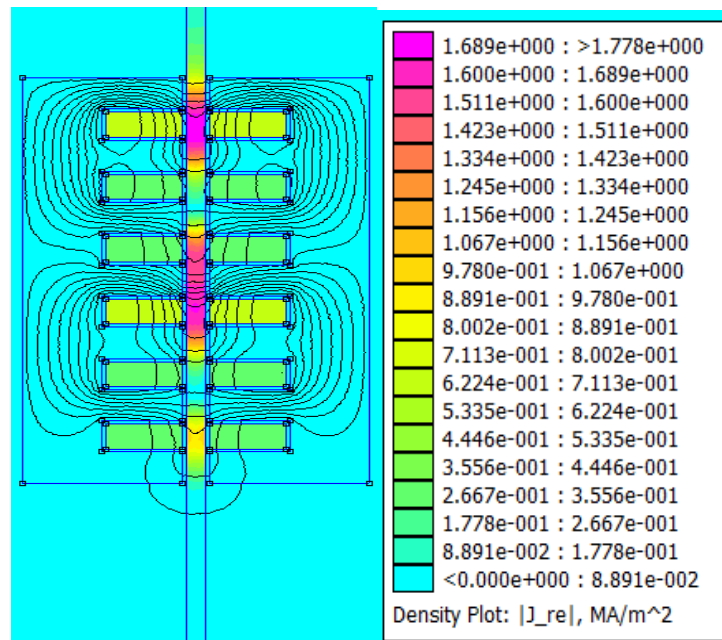


**Figure.III.13.** Effet de la largeur de la plaque aluminium sur la force

On remarque que la force magnétique diminue avec l'augmentation de largeur de la plaque aluminium. Cela est dû à l'augmentation de la reluctance magnétique équivalente (éloignement des deux parties du circuit magnétique). A titre de l'illustration, la figure.III.14 représente les vecteurs de l'induction magnétique créée par les trois bobines et la figure III.15 représente la densité des courants induits, cela pour une largeur de la plaque de 5mm, pour un courant d'alimentation  $I=1A$  et pour un entrefer de 1mm.

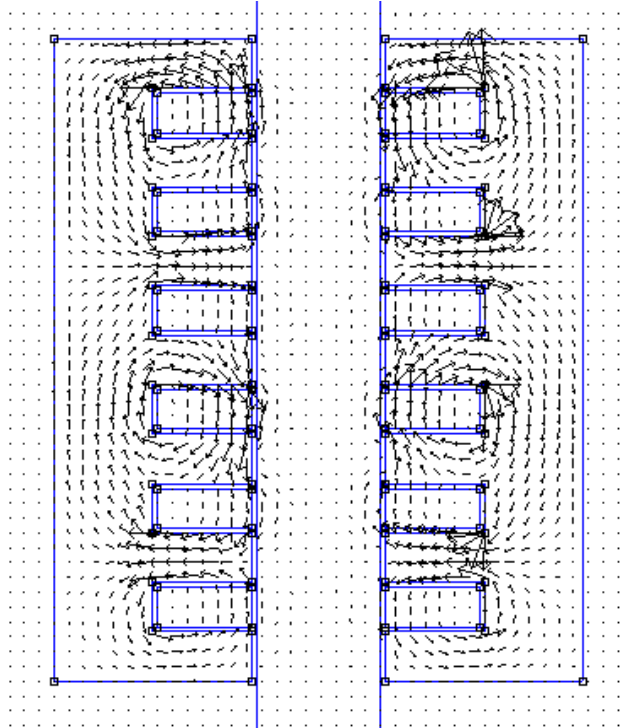


**Figure.III.14 :** Vecteurs de l'induction magnétique pour une plaque de largeur de 5mm

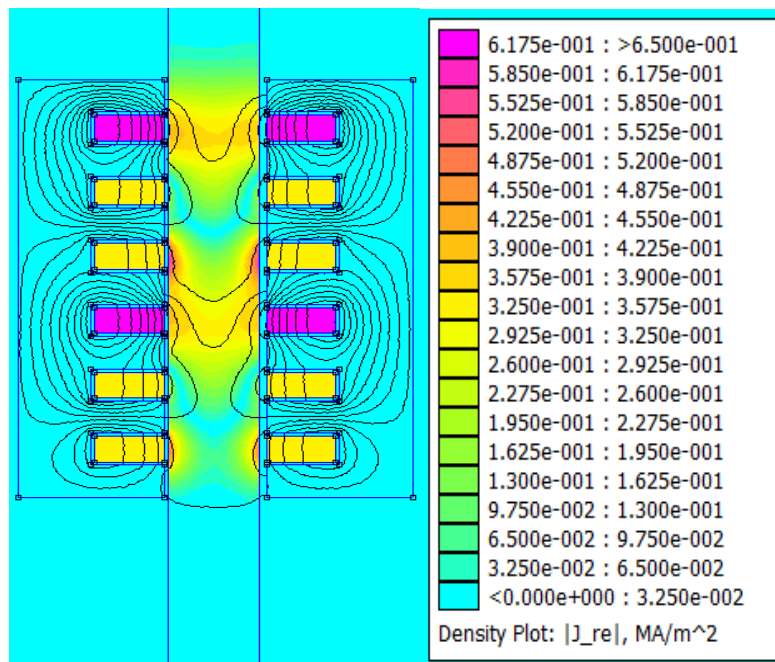


**Figure.III.15 :** Densité du courant induit pour une largeur de 5 mm

Pareillement, à titre de l'illustration la figure III.16 représente les vecteurs de l'induction magnétique créée par les trois bobines et la figure III.17 représente la densité des courants induits, cela pour une largeur de 25mm et pour une courante source  $I=1A$  avec entrefer de 1mm.



**Figure.III.16 :** Vecteurs de l'induction magnétique pour une largeur de 25mm.

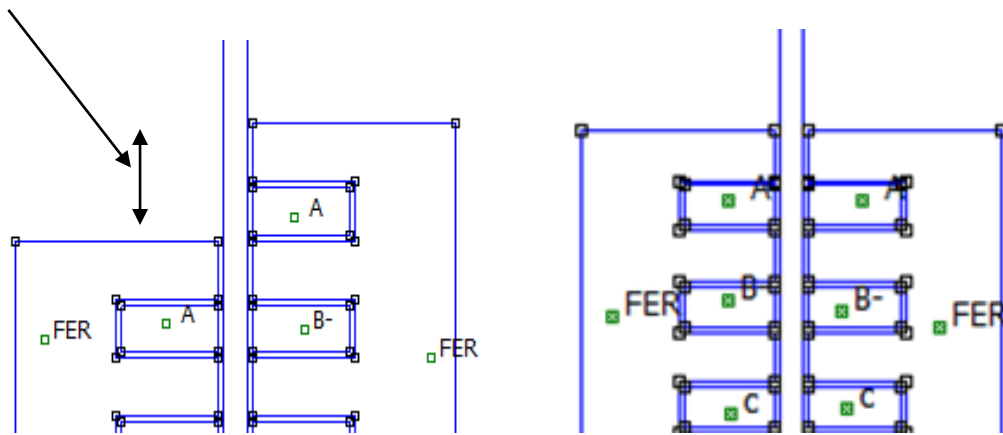


**Figure.III.17 :** Densité des courants induits pour une largeur plaque de 25mm

### III.2.4. Effet du glissement géométrique de l'inducteur

Dans cette modélisation, on change le glissement géométrique de l'inducteur. Le courant d'alimentation est fixe et vaut  $I=1A$ , de même on fixe l'entrefer à 1mm. Le tableau III.5 et la figure III.19 représentent les résultats obtenus. C'est derniers résultats indiquent l'effet du glissement géométrique de l'inducteur sur la valeur de la force magnétique appliquée sur la plaque aluminium.

Glissement géométrique

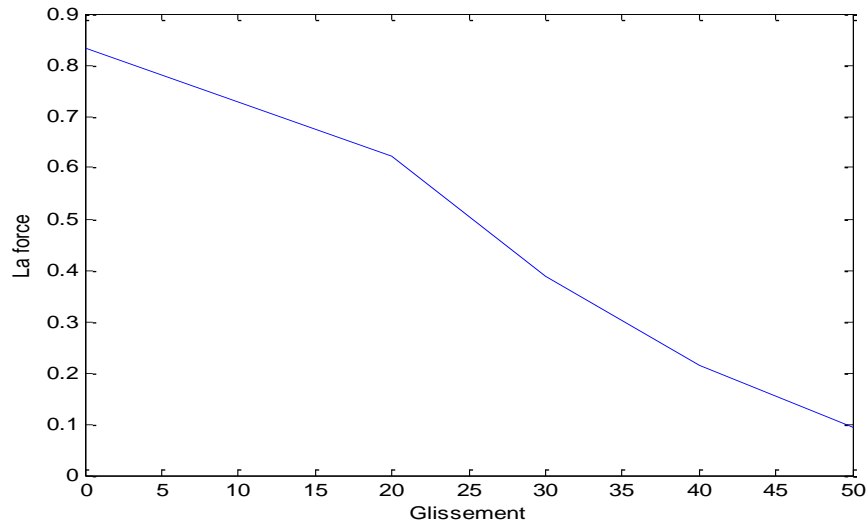


**Figure.III.18** : Schématisation du glissement géométrique de l'inducteur

Glissement de l'inducteur (mm)	La force (N)
10	0.83
20	0.62
30	0.38
40	0.21
50	0.09

**Tableau.III.5** : Effet du glissement de l'inducteur sur la force





**Figure.III.19** : Effet du glissement de l'inducteur sur la force

On remarque que la force diminue avec l'augmentation du glissement géométrique, ce qui traduit l'éloignement des deux parties du circuit magnétique de l'inducteur (augmentation de la reluctance magnétique équivalente et par conséquent diminution de l'induction magnétique traversant la plaque aluminium). A titre de l'illustration, la figure III.20 représente les vecteurs de l'induction magnétique créée par les trois bobines et la figure III.21 représente la densité des courants induits dans la plaque, cela pour un glissement géométrique de l'inducteur de 10mm.

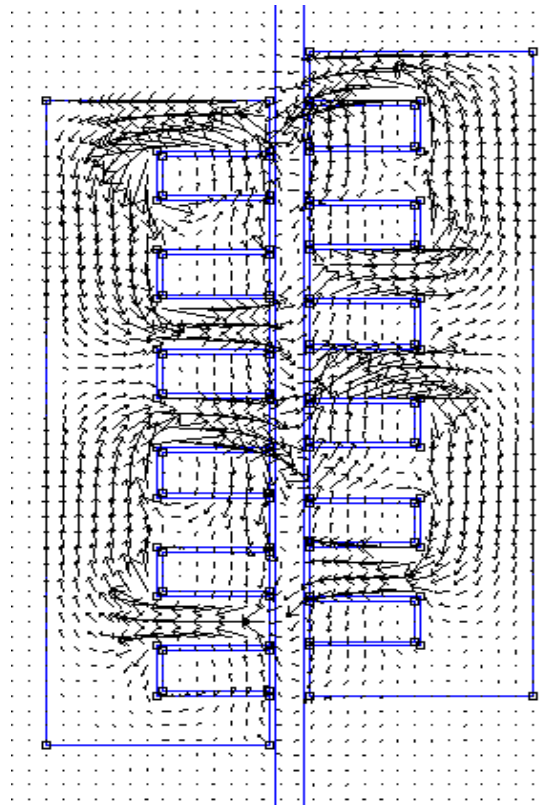


Figure.III.20 : Vecteurs de l'induction magnétique pour un glissement de 10mm.

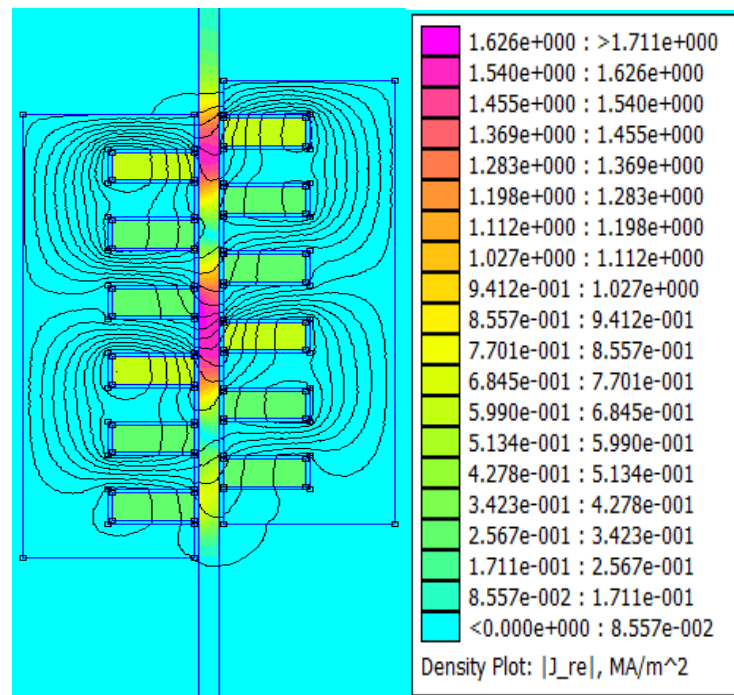
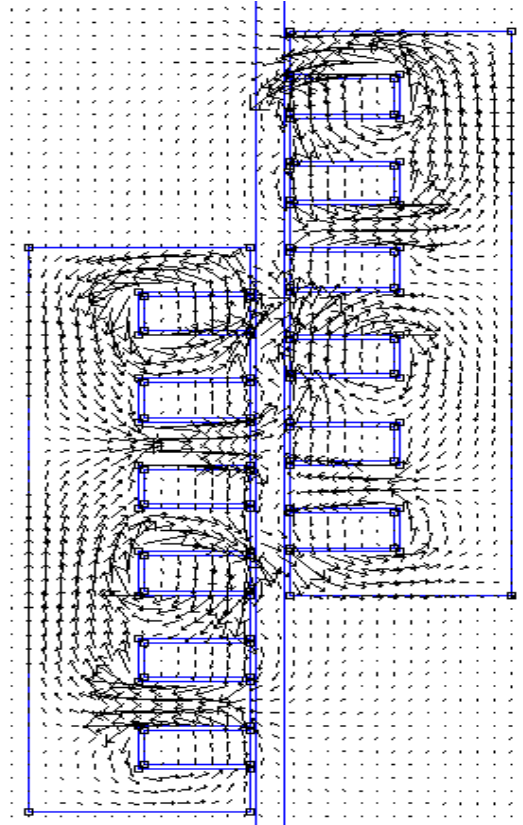
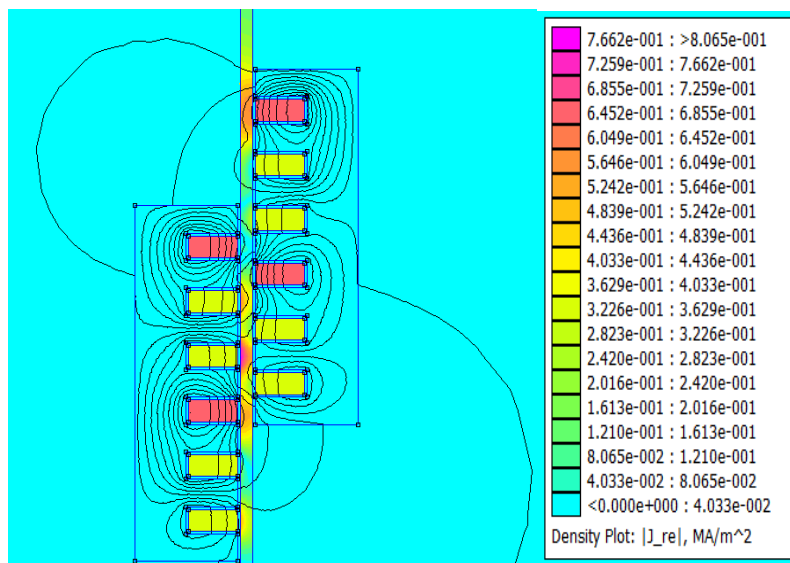


Figure.III.21 : Densité des courants induits dans la plaque pour un glissement de 10mm.

De même, à titre de l'illustration, la figure III.22 représente les vecteurs de l'induction magnétique créée par les trois bobines et la figure III.23 représente la densité des courants induits dans la plaque pour un glissement géométrique de l'inducteur de 50mm.



**Figure.III.22 :** Vecteurs de l'induction magnétique pour un glissement de 50mm



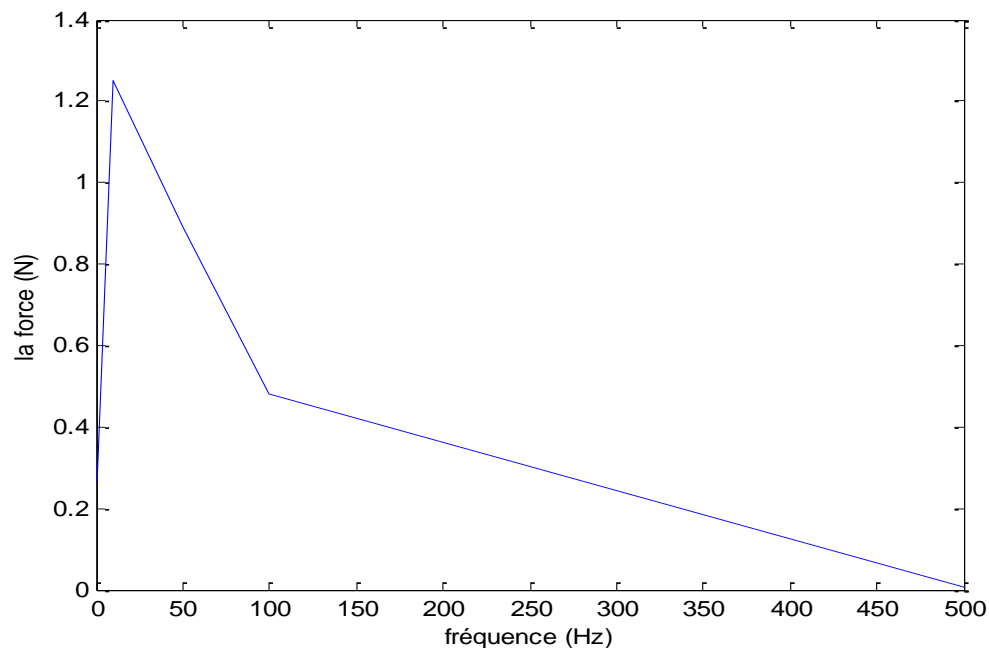
**Figure.III.23 :** Densité des courants induits pour un glissement de 50mm.

### III.2.5. Effet de la fréquence de la courante source

Dans cette modélisation, on procède à la variation de la fréquence de la courante source. Le courant d'alimentation étant fixe et vaut  $I=1A$ , de même on fixe l'entrefer à 1mm. Le tableau III.6 et la figure III.24 représentent les résultats obtenus. C'est derniers résultats indiquent l'effet du glissement géométrique de l'inducteur sur la valeur de la force magnétique appliquée sur la plaque aluminium.

Fréquence (Hz)	La force (N)
1	0.26
10	1.25
50	0.89
100	0.47
500	0.006

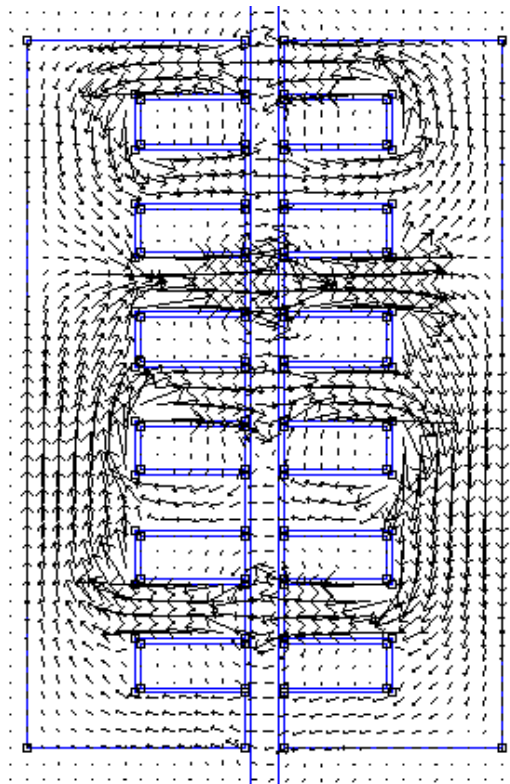
**Tableau.III.6** : Effet de la fréquence sur la force magnétique



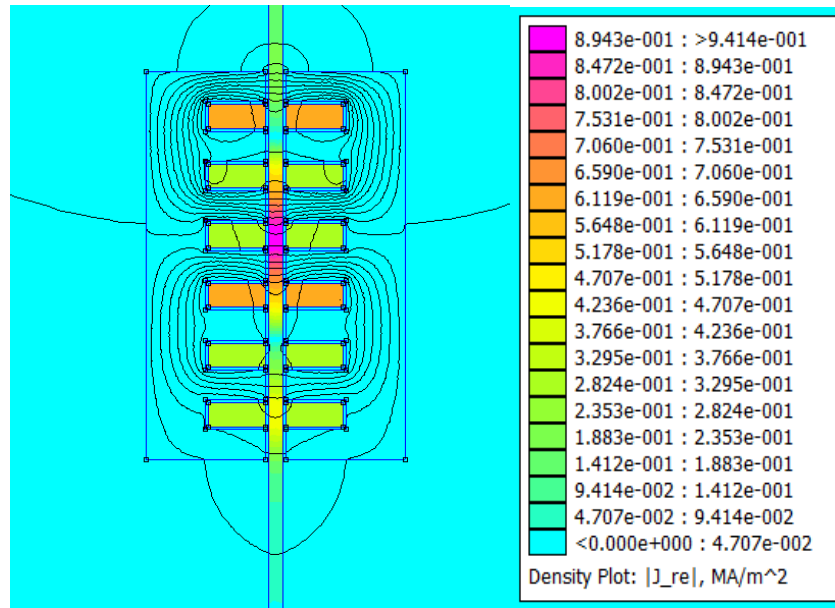
**Figure.III.24** : Effet de fréquence sur la force

On remarque que la force magnétique diminue avec l'augmentation de la fréquence de la courante source, cela est due principalement à l'effet de peau. A titre d'illustration, la figure III.25 représente les vecteurs de l'induction magnétique créée par les trois bobines pour une fréquence de 10hz.

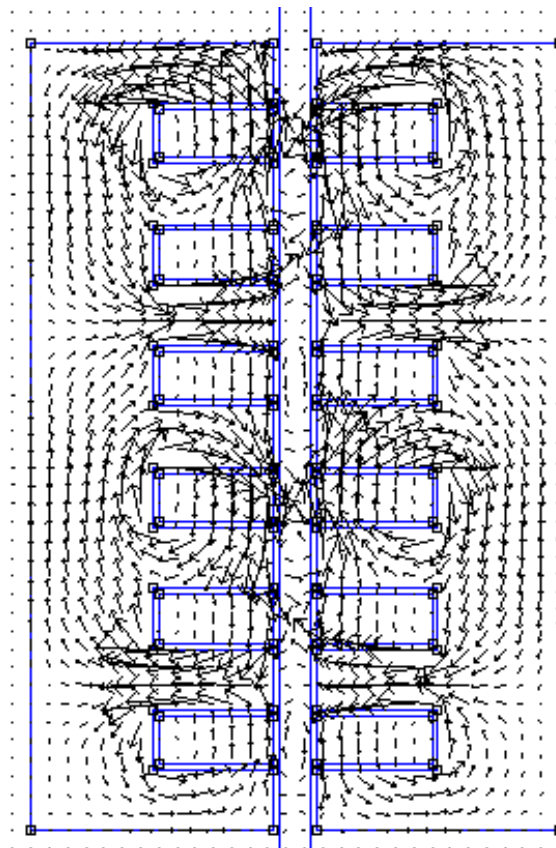
Egalement, à titre d'illustration, la figure III.25 représente les vecteurs de l'induction magnétique créée par les trois bobines pour une fréquence relativement importante de 500Hz.



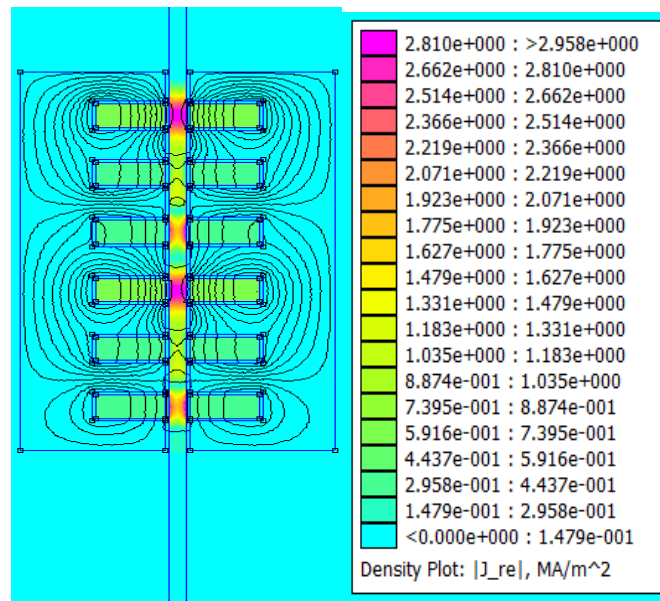
**Figure.III.25** : Vecteurs de l'induction magnétique pour une fréquence de 10Hz



**Figure. III 26 :** Densité des courants induits pour une fréquence de 10Hz



**Figure.III.27 :** Vecteurs de l'induction magnétique pour une fréquence de 500Hz



**Figure.III.28** : Densité des courants induits pour 500Hz

### Conclusion

Ce chapitre a été principalement consacré à l'évaluation de la force électromagnétique engendrée dans un moteur linéaire à induction par le logiciel FEMM. Le but de cette étude a concerné l'évaluation de l'influence de quelques paramètres tels que la densité de la courante source, l'épaisseur de l'entrefer, le largueur de la plaque aluminium, le glissement géométrique de l'inducteur et finalement la fréquence de la courante source sur la force magnétique sur la plaque aluminium qui représente la partie mobile dans le moteur linéaire. Les caractéristiques obtenues peuvent être vues comme des lois de commande du moteur c.-à-d. choix de l'un des paramètres en fonction de la force magnétique désirée.

## Conclusion générale

Rappelons que l'objectif principal du présent travail consiste à l'étude d'un moteur à induction linéaire triphasé constitué de deux circuits magnétiques comportant trois bobines identiques (partie fixe) et une plaque en Aluminium longue (partie mobile). La force électromagnétique qui représente la grandeur d'intérêt a été évaluée par l'équation de Laplace implémentée dans le logiciel FEMM.

Dans ce mémoire nous avons décrit les modèles mathématiques de l'électromagnétisme qui caractérise l'évolution du champ électromagnétique. Nous avons présenté quelques applications des actionneurs électromagnétiques linéaires, en particulier dans le domaine du transport. Egalement pour la modélisation de tel moteur, nous avons mené une étude sur quelques méthodes numériques d'approximation pour la résolution des problèmes électromagnétiques et en particulier la méthode des éléments finis implémentée dans le logiciel FEMM.

Ce mémoire a concerné principalement la modélisation par FEMM d'un moteur synchrone linéaire triphasé simple en insistant sur l'influence de quelques paramètres sur la force magnétique appliquée sur la partie mobile du moteur (la plaque en aluminium) à savoir l'influence de :

Courant d'alimentation,

Epaisseur de l'entrefer,

Largeur de la plaque aluminium,

Glissement géométrique de l'inducteur,

Fréquence.

A titre d'exemple, d'après les résultats obtenus, on constate que l'effet du courant d'alimentation sur la force est le plus remarquable. En effet, les résultats obtenus (les cinq caractéristiques) peuvent être utiles pour le choix d'un ou plusieurs paramètres afin d'obtenir la force magnétique désirée.



Référence

Bibliographie

- 
- [1] Chouaib Labiod, «Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », thèse de Magister université de biskra, 12/05/2014.
- [2] C. Sabonnadière, L. Coulomb, «Calcul des champs électromagnétiques», Technique de l'ingénieur D 3020.
- [3] P. Mas, « Modélisation en électromagnétisme », étude technique, janvier 1992.
- [4] Cristian GOLOVANOV, « Développement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique: application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement », thèse de doctorat, spécialité génie électrique, l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE.
- [5] Khebbab Mohamed, « Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) », Thèse de magister, université de Constantine, 2007.
- [6] Bahamma Hacene , « Etude géométrique des inducteurs utilisés dans une cuisson par Induction », mémoire de master, Spécialité électrotechnique, Université de Biskra.
- [7] Abd Elhamid Mabrouk, « ANALYSE TRANSITOIRE ET COMMANDE DE POSITION D'UN SYSTEME DE LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE », Mémoire Magister, 2012.
- [9] T.Bouchala ,''modélisation semi-analytique des courants de Foucault. Application au contrôle non destructif par des capteurs à noyau de ferrite'', thèse de magister, spécialité Electrotechnique, Université de Batna,2008.
- [10] A.youmssi, ''Contribution aux calculs des machines synchrones à aimants permanents''.Thèse de doctorat d'état°INPL, 1992.
- [11] T.Bouchala ,''modélisation semi-analytique des courants de Foucault. Application au contrôle non destructif par des capteurs à noyau de ferrite'', thèse de magister, spécialité Electrotechnique, Université de Batna,2008.
- [12] [www .wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [13] Bernard Multon et Jean Bonal , les entrainements électromécaniques directs : Diversités, contraintes et solutions. CEMD'99, ENS de Cachan SEE, France.
- [14] Robert Bonnefille et Michel Kant. Application de la théorie du champ Électromagnétique aux machines linéaires a induction.
- [15] Lilia El Amraoui, conception Electromécanique d'une gamme d'actionneurs Linéaires tubulaires a reluctance variable, thèse de doctorat, université de Lille .2002.

## Annexe

### A. Le logiciel FEMM :

Le logiciel FEMM (finité élément méthode magnétiques) ou méthode des éléments finis magnétique c'est un ensemble des programmes pour résoudre des problèmes électromagnétiques basse fréquence sur deux dimensions planes et axisymétriques. Le programme s'adresse actuellement pour le cas linéaire et non linéaire pour les modèles magnétostatiques, magnétique harmoniques et temporel ,ainsi que les problèmes électrostatique. Le logiciel FEMM se compose de trois programmes :

- Femm.exe :est un pré et post-processeur contenant une interface graphique qui permet de fixer la géométrie du problème, les propriétés des matériaux ainsi que les conditions limites .le logiciel permet également d'évaluer un certain nombre d'intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long de contours définis par l'utilisateur.
- Triangles.exe :décomposition du domaine d'étude en un grand nombre de triangles, une partie essentielle du processus des éléments finis.
- Fkern.exe (solveurs) : solution de l'équation électromagnétique

Le FEMM permet des résoudre plusieurs types des problèmes :

- ✓ Magnétiques problèmes/les problèmes magnétique
- ✓ Electrostatiques problème /les problèmes électrostatique
- ✓ Heat flow problème/les problèmes de flux du chaleur
- ✓ Curent flow problème/les problèmes de débit actuel

#### A.1 Création de la géométrie par FEMM :

Pour créé la géométrie on utilise l'un cinq modes :le mode point, le mode segment, le mode segment d'arc, le mode de bloc, ou le mode de groie par la figureIII-1.les quartes première modes correspondent aux quartes types d'entités qui définissent la géométrie de problèmes :les nœuds qui définissent tous les coins de la géométrie do solution ,segments de droite et des segments d'arc qui relient les nœuds pour former limites et des interfaces. Le cinquièmes modèle mode de groupe ,est destiné à coller les déférents objets entre eux en parties de telle sorte que des parties entière peuvent être manipulées plus facilement .



**Figure.A.1** : les boutons de dessin dans la barre d'outil

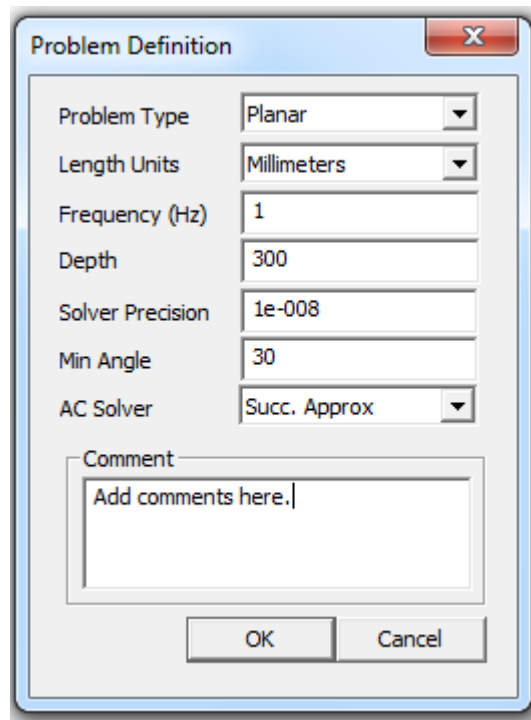
#### A.2 Définition des matériaux et définition du problèmes :

La sélection de cette option ouvre la boîte de diadoque de définition du problème, montré à la figure.A.2.le première choix est la liste découlant **problème type**. Cette liste déroulante

permet à l'utilisation de choisir parmi un problème 2-D plane (la sélection **planar**), ou un problème de révolution (la sélection axisymétrique/**axisymétrique**). Suivant est la liste **length units**, cette case indique quelle unité est associée aux dimensions prescrites dans la géométrie du modèle. actuellement, le programme prend en charge les pouces, millimètres, centimètres, et micromètre.

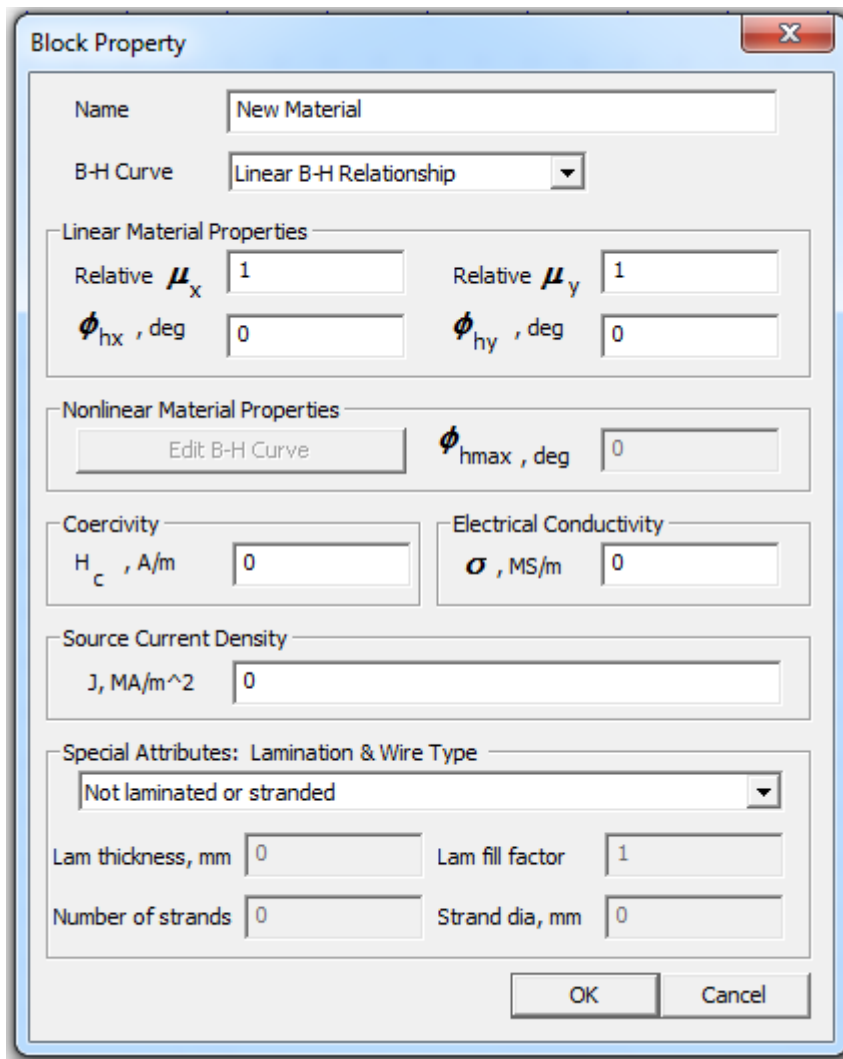
La première zone d'édition dans la boîte de dialogue est **Fréquence(Hz)** pour un problème magnétostatique, l'utilisateur doit choisir une fréquence de zéro. Si la fréquence est différente de zéro, le programme va effectuer une analyse harmonique, dans lequel toutes les grandeurs de champ sont oscillantes à cette fréquence prescrite. la fréquence par défaut est égale à zéro.

La deuxième zone d'édition est la spécification de profondeur **depth**. si un problème **planar** est sélectionné. cette zone de texte devient prémisses. cette valeur correspond à la longueur de la géométrie. cette valeur est utilisée pour étendre les résultats intégrés dans le post-processeur (par exemple, de la force, inductance, etc.) à la longueur appropriée. les unités de la sélection de la profondeur sont les mêmes que les unités de longueur sélectionnés.



### A.3 Affectation de matériaux :

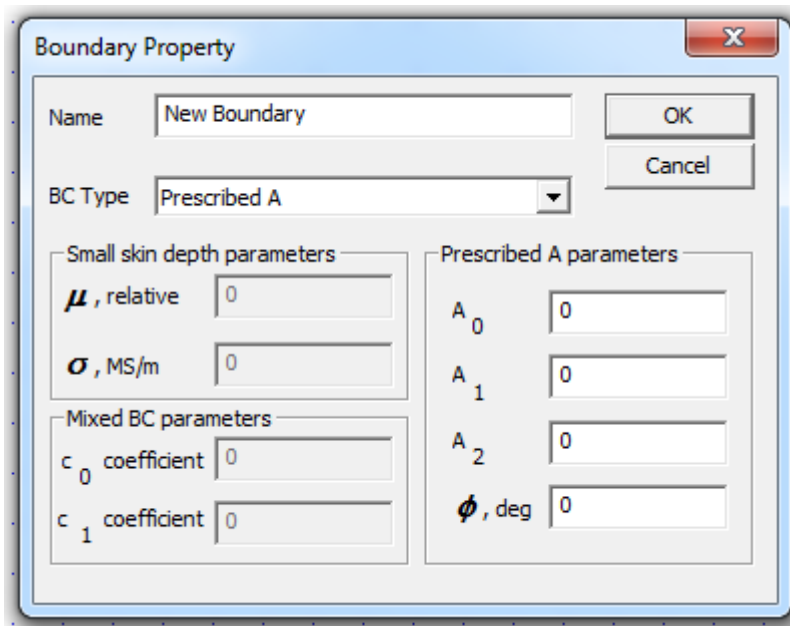
La boîte de dialogue propriétés du matériau est utilisée pour spécifier les propriétés matériaux figure A.2



**Figure A.2** : boîte de dialogue :propriétés du matériau

#### **A.4 Définition des conditions aux limites :**

La boîte de dialogue qui permet de spécifier les propriétés des segments ou des segments d'arc qui sont des limites du domaine est montrée sur la figure A.3.ici par exemple le potentiel vaut 0 comme condition aux limites.



**Figure A.3** : boîte de dialogue :condition aux limites

### **A.5 Maillage, résolution et visualisation :**

Les trois taches maillage su modèle, l’analyse du modèle et la visualisation des resulta sont le plus facilement effectuées par les boutons de la barre d’outils représentée dans la figure A.4



**Figure A.4** : boutons de la barre d’outil : maillage,résolution et visualisation