



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département Génie Industrielle

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Science Technologie

Spécialité : Génie Industrielle

Thème

Etude et modélisation par le logiciel FEMM D'un moteur linéaire à aimant permanent

Présenté et soutenu publiquement par :

Hachelafi Abderrahmen

et

Rechidi Moulay Cherif

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr .Lalaoui Mohamed	MAA	IMSI	Président
Mme .Rahiel Rachida	MCB	IMSI	Examineur
Mme . Chouitek Mama	MCA	IMSI	Encadreur

Année 2019/2020

REMERCIEMENTS

Avant d'entamer la rédaction de ce rapport et à travers ce travail, on tient à remercier tous ceux qui ont orienté les différents étapes de ce travail jusqu'à son terme, par leurs estimables conseils et contributions, en particulier :

Mme. Chouitek Mama notre encadrant, dans l'institut de maintenance et sécurité industriel de Oran, du projet de fin d'étude pour son aide et ses précieux conseils et qui nous a fait part de sa riche expérience.

Tout le corps administratif de l'institut de maintenance et sécurité industriel de Oran, tous nos professeurs, pour le suivi de notre PFE et pour leurs disponibilités, leur assistance, et pour les renseignements qu'ils nous ont fournis durant notre période de réalisation de notre projet de fin d'étude.

Je tiens à remercier les membres du jury de bien vouloir accepter d'évaluer notre travail.

On tient finalement à exprimer nos gratitude à nos familles et respects à tous nos ami(e)s pour leurs conseils, critiques et observations , et tous ceux qui nous ont aidé.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail en guise d'amour, de respect et de reconnaissance :

A le plus chère au monde, ma mère, qui a toujours été là pour moi, et qui m'a donné un prestigieux model de labeur

et de persévérance. J'espère qu'elle trouvera dans ce travail ,toute ma connaissance . Que dieu la protège et l'entoure avec sa bénédiction.

A mes très chères sœurs « Dalila et aicha »

Et mon frère «Abdel Madjid »

. Et tous mes proches et toute ma famille.

A mon très cher collègue Abderrahmane et sa famille.

A tous mes amis : Sofiane, amine, Abdelkader, Mohamed, Yousef et toute la promotion.

A ce qu'est fantastique avec moi,

A ce qu'est me comprend toujours,

Merci d'être là...

DEDICACE

Je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage, la santé et la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Je tiens à le dédier particulièrement à mes très chers parents ma mère et mon père pour leurs sacrifices, patience, leur présence et leur soutien tout au long de mes années d'études, que le bon dieu les garde et les protège.

A mes chers frères Amine et Salah Eddine

A ma chère sœur Sadika

A tous mes amis Sofiane , Amine , Mouhcen , Iliass

A mon binôme Cherif et toute sa famille

A tout (e) mes amis (es) sans exception

Et surtout sans oublié les étudiants de ma promotion

En fin à tous ceux que je connais ou qui me connaissent que je n'ai pas pu citer.

Abderrahmen

Merci A Vous Tous

Table des matières

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	1
Introduction Générale.....	2
CHAPITRE I	
Étude du moteur linéaire	4
1-Généralité	5
2-Architecture d'un moteur linéaire synchrone à aimants permanents	6
2.1 Constitution d'un M.L	6
2.1.1 Inducteur (secondaire).....	6
2.1.2 Induit (primaire).....	7
3-Comparaison entre le moteur linéaire et le moteur rotatif.....	9
3.1-Le moteur à induction rotatif.....	9
3.2-Le moteur linéaire à induction.....	9
4-Différences essentielles entre le moteur linéaire et le moteur tournant ...	10
4-Topologies et classification des moteurs linéaires	10
4.1-Topologie du moteur linéaire	10
4.2-Classification des moteurs linéaires :	11
4.3-Structure des moteurs linéaires.....	12
5-Différents types de moteurs linéaires	13
5.1-Moteur a inducteur simple	13
5.2-Moteur a inducteur simple sans circuit de retour	14
5.3-Moteur a induit en forme d'échelle	15
5.4-Moteur linéaire a induit composite.....	15
5.5-Moteurs pas a pas linéaires	16
5.6-Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable	16
5.7-Moteur pas à pas linéaire polarise	17
5.8-Moteur linéaire a aimants permanents.....	20
6-Les avantages et limites des moteurs linéaires	20
7-Domains d'application	22
8. Conclusion	23
ChapitreII	
Principe de fonctionnement de moteur linéaire	24
1-Introduction	25

Table des matières

2. Principe de fonctionnement.....	25
3. Commutation des séquences de la commande 6 secteurs.....	30
4. Problèmes relatifs aux M.L	33
4.1. La force Normale	33
4.2. La force de détente	34
4.3.Effets d'extrémités	34
4.4.Effets d'encoches ou de denture (Cogging)	35
5.Modele Analytique du moteur linéaire synchrone à aimants permanents	36
5.1.Analogie entre un moteur linéaire et un moteur rotatif	36
6.Modélisation du moteur linéaire synchrone à aimants permanents	37
6.1.Expression des équations électriques.....	37
6.2. Expressions des termes dus aux aimants permanents	38
6.3.Expression de la force de poussée.....	39
7.Conclusion.....	40
Chapitre III	
Modélisation du Moteur Linéaire avec FEMM	42
1- Introduction :	44
2-Paramètres géométriques du mobile et du rail :.....	45
3.Calcul des forces :	47
3.1-Force électromagnétique de Laplace :	47
3.1.1-Application numérique :	47
4 -Méthodes d'analyse numérique du moteur synchrone linéaire à aimant permanent	48
4.1-L'outil de modélisation	49
5.Présentation du logiciel FEMM :	50
6.Définition de la structure de moteur sous FEMM.....	51
6.1. Distribution de l'induction magnétique dans la structure.....	54
6.2- Variation de la force tangentielle et normale pour différents matériaux utilisés	56
7-Conclusion.....	57
Conclusion Générale :	58
Bibliographie	60

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1: Aimants permanents d'un M.L.....	7
Figure 2: Primaire d'un M.L.....	8
Figure 3: Coupe transversal d'un M.L.....	8
Figure 4: Transformation d'un moteur rotatif en moteur linéaire.....	9
Figure 5: Topologies moteur	11
Figure 6: Classification moteur linéaires.....	12
Figure 7: Structure linéaire plate	13
Figure 8: les différentes structures du moteur linéaire.....	13
Figure 9: moteur linéaire a induction simple.....	14
Figure 10: moteur linéaire a induction simple sans circuit de retour	14
Figure 11: moteur linéaire a induit sous forme d'échelle.....	15
Figure 12: moteur linéaire a induit composite	16
Figure 13: Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable	17
Figure 14: Moteur linéaire réluctant	18
Figure 15: Distribution du flux dans moteur réluctant polarisé.....	19
Figure 16: le moteur linéaire à aimants permanent.....	20
Figure 17: système de train (Maglev)	23
Figure 18: principe de fonctionnement de moteur linéaire	25
Figure 19: les forces électromagnétiques dans le moteur linéaire	26
Figure 20: Réparation des phase (a.b.c) dans l'inducteur (partie mobile).....	27
Figure 21: Induction générée par les aimants le long du rail.....	28
Figure 22: Force contre électromotrice et courant dans chaque bobine.....	29
Figure 23: Structure de l'onduleur	29
Figure 24: Signal capture a effet Hall de la variable Secteur	30
Figure 25 : Branchement des trois phases avec l'onduleur (L6234).....	32
Figure 26: Présentation des phénomènes d'extrémités	35
Figure 27: Moteur tournant synchrone bipolaire à aimants permanents	36
Figure 28: Moteur linéaire synchrone à aimants permanents.....	37
Figure 29: structure du mobile et le bobinage	44
Figure 30: les paramètres de dimension du mobile.....	44
Figure 31 : Les paramètres de dimension du rail.....	45
Figure 32: Induction générée par les aimants le long du rail.....	48
Figure 33: Discrétisation par élément finis en deux dimensions	50
Figure 34: Structure du moteur linéaire à aimant permanent définie sous FEMM.....	52
Figure 35: Détail du maillage de la structure du MSlin sous FEMM	53
Figure 36: Détail du maillage près de l'entrefer	53
Figure 37: Structure des blocs de mêmes matériaux du MSlin sous FEMM.....	53
Figure 38: Champ magnétique de MSlin sous FEMM.....	54
Figure 39: Calcul des forces sur les 4 positions du MSlin	55
Figure 40: champ magnétique de MSlin par une culasse en acier sous FEMM	56

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1: Séquence pour la réalisation de la marche avant	31
Tableau 2: Séquence pour la réalisation de la marche arrière	31
Tableau 3: Liste des principales grandeurs géométriques	46
Tableau 4: Matériaux utilisés dans différentes structures	57
Tableau 5: Perméabilités relatives pour chaque matériau	57

Introduction Générale

Introduction générale :

L'évolution des moyens de production, toujours plus rapides et plus précis, qui ont facilité le développement de certains concepts comme l'usinage à très grande vitesse. Ce concept n'est pas nouveau, mais son exploitation reste propre à certains domaines, car la mise en œuvre de ce type d'usinage est difficile. A présent, une ouverture s'est créée grâce à l'entraînement des axes par moteurs linéaires.

Ce type de motorisation permet un gain, en vitesse, accélération et décélération, important par rapport aux systèmes classiques. L'objectif de cette étude est la compréhension des différents phénomènes liés au moteur linéaire, en utilisant une modélisation numérique de ce moteur afin de valider le modèle analytique simplifié utilisé dans sa stratégie de commande.

Dans le premier chapitre, nous présentons le rôle important du moteur linéaire dans la modélisation du comportement des machines de production à dynamique rapide sera présenté. Ainsi que l'architecture du moteur linéaire synchrone à aimants permanents (M.L), qui équipe la plupart de ces machines, sera également introduite.

Dans le second chapitre, le principe de fonctionnement du M.L ainsi que les particularités inhérentes à ce genre de moteur. Puis son modèle analytique classique sera abordé en analysant ses limites de validité.

Le troisième chapitre présentera les différentes simulations telles que le FEMM effectuées sur le moteur linéaire afin d'en déterminer les paramètres géométriques et électriques, où seront présentés aussi les résultats de simulation du M.L obtenus par la méthode des éléments finis(FEMM). Ceux-ci ont permis d'analyser la validité du modèle analytique en fonction des principaux paramètres influents.

On terminera par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I

Étude du moteur linéaire

1-Généralité

Les moteurs linéaires sont une catégorie spéciale de servomoteurs synchrones sans balais qui « a été déroulé » de sorte qu'au lieu de produire un couple (rotation), il produise une force linéaire sur sa longueur en installant un champ électromagnétique de déplacement. Ils fonctionnent avec le même principe que les moteurs rotatifs mais sont ouverts et déroulés à plat. Les principaux éléments, bobines et aimants, sont simplement arrangés différemment pour produire une force et non un couple.

L'interaction électromagnétique entre un assemblage de bobines (ensemble primaire) et une voie d'aimants permanents (ensemble secondaire) transforme l'énergie électrique en une énergie mécanique linéaire avec une grande efficacité. Habituellement, on appelle également l'ensemble primaire moteur, partie mobile ou chariot ; quant à l'ensemble secondaire, il est aussi appelé voie d'aimants ou voie magnétique. Etant donné que les moteurs linéaires sont conçus pour produire de grandes forces à faible vitesse ou à vitesse nulle, le dimensionnement n'est pas basé sur la puissance mais sur la force contrairement à des entraînements traditionnels [1].

Il demande donc beaucoup moins d'adaptations que les approches classiques ou le mouvement linéaire est obtenu en couplant un moteur rotatif à une vis à bille ou à une crémaillère. Il y a donc moins de pièces en mouvement et donc moins d'inertie et de jeux. De ce fait, le moteur linéaire s'impose lorsque la vitesse et la précision importent vraiment.

2-Architecture d'un moteur linéaire synchrone à aimants permanents

Dans le domaine des entraînements électriques, le moteur linéaire est présenté comme l'une des plus grandes innovations technologiques. Cependant, son réel essor ne date que du début des années 1990 grâce à l'évolution de l'électronique de puissance ainsi que la commande qui lui est associée.

Pour alléger l'écriture, on désignera, dans la suite de cette étude, le moteur linéaire synchrone à aimants permanents par l'appellation M.L [2].

2.1 Constitution d'un M.L

2.1.1 Inducteur (secondaire)

L'inducteur d'un M.L est constitué d'une culasse ferromagnétique sur laquelle sont collés des aimants permanents avec une alternance des polarités (figure 1). Les aimants permanents utilisés dans un M.L sont généralement des aimants terres rares ou des aimants à base de NdFeB :

- Les aimants Cobalt – terres rares :

Les aimants terres rares présentent des caractéristiques magnétiques fondamentales intéressantes et principalement une aimantation rémanente importante qui peut atteindre facilement le Tesla. Le champ coercitif est important. Ce qui permet à ces aimants de supporter l'environnement le plus défavorable sans rien perdre de leur aimantation initiale. Leur utilisation reste encore très limitée en raison des prix élevés qui sont pratiqués et leur emploi est recommandé dans la mesure où l'on a besoin d'un $(B. H)$ max très important (ou d'un H_c très important) [2].

- Les aimants à base de NdFeB :

Ce sont des alliages de NdFeB convenablement dosés qui donnent naissance à des aimants plus performants que les terres rares. Leurs caractéristiques sont proches

Chapitre I : Étude du moteur linéaire

de par leur induction rémanente qui atteint des valeurs de 1.15 à 1.25 T. L'avantage de ces aimants réside dans leur densité volumique qui est de 13. inférieure à celle des terres rares, ce qui est intéressant pour les systèmes embarqués. De plus, ils présentent des propriétés mécaniques supérieures.

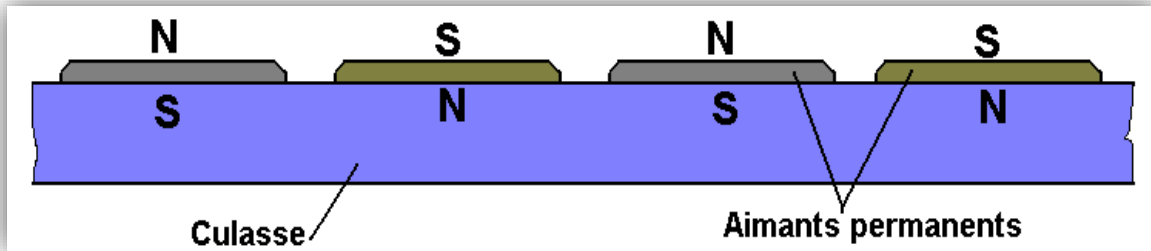


Figure 1: Aimants permanents d'un M.L

Quel que soit l'aimant utilisé, il est intéressant de connaître son fonctionnement lors des variations de la réluctance. Par conséquent, nous introduisons ci-dessous la notion de droite de recul qui nous servira à expliquer quelques phénomènes qui se produisent dans le M.L.

2.1.2 Induit (primaire)

Le stator d'un M.L est une armature ferromagnétique plane contenant des encoches où est logé un bobinage triphasé (figure 2). Ce dernier est souvent à deux couches et contrairement aux moteurs rotatifs, les encoches d'extrémités sont généralement remplies avec une simple couche [2].

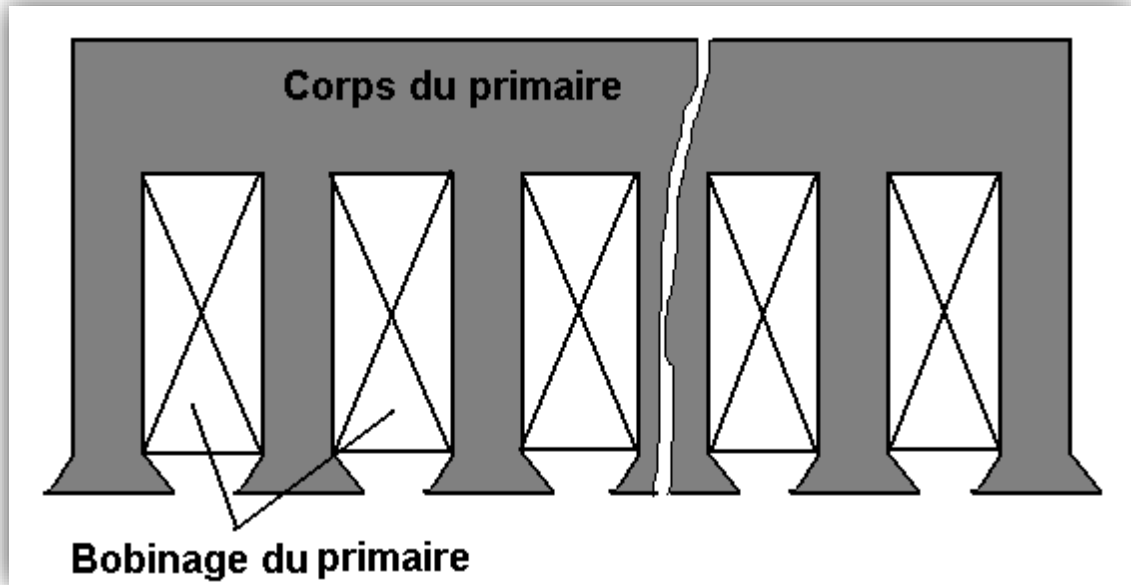


Figure 2: Primaire d'un M.L

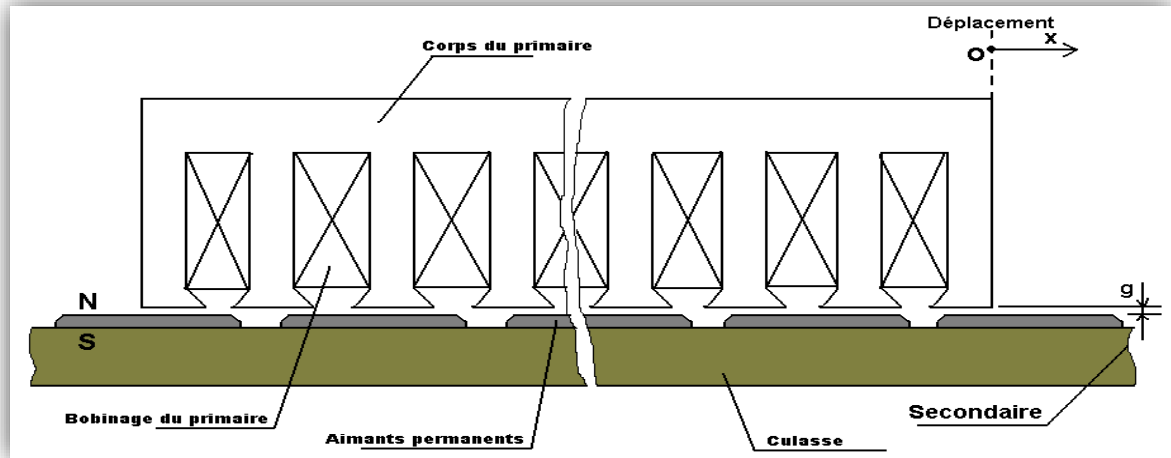


Figure 3: Coupe transversal d'un M.L

3-Comparaison entre le moteur linéaire et le moteur rotatif

3.1-Le moteur à induction rotatif

Les machines asynchrones tournantes sont constituées de deux armatures (le stator et le rotor). L'armature statorique est munie d'encoches où logent les courants inducteurs créant dans le cas idéal un champ ayant un seul harmonique d'espace. Le rotor est le siège de courants induits qui peuvent être localisés dans des barres conductrices (rotor à cage), dans des enroulements (rotor bobiné) ou encore dans la masse du rotor (rotor massif). Dans les trois cas, les courants au rotor sont induits ; d'où l'appellation de moteur à induction.

3.2-Le moteur linéaire à induction

Si l'on découpe une portion de l'armature statorique tout en gardant suffisamment d'encoches pour pouvoir conserver un couple électromagnétique suffisant, on obtient un moteur en arc (figure 4). En dépliant la structure en arc, on obtient un moteur linéaire à induction ayant un seul inducteur. Celui-ci fonctionne sous le même principe d'induction électromagnétique ; il peut être doté d'un deuxième inducteur placé de l'autre côté du rotor déplié qu'on appelle maintenant induit [3].

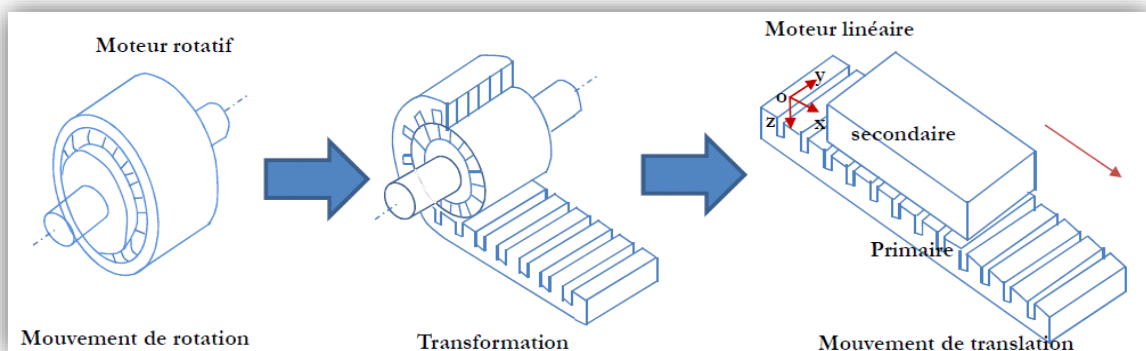


Figure 4: Transformation d'un moteur rotatif en moteur linéaire

4-Différences essentielles entre le moteur linéaire et le moteur tournant

Le moteur linéaire diffère du moteur rotatif par les points fondamentaux suivants :
Un 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 pôles.

Un induit constitue, par une masse conductrice, généralement homogène et isotrope, ou des conducteurs isolés transportent les courants dans des directions imposées.

Un entrefer important et occupe, dans sa majeure partie, par l'induit.

4-Topologies et classification des moteurs linéaires

4.1-Topologie du moteur linéaire

Les moteurs linéaires peuvent être soit synchrone ou asynchrone avec un flux transversal ou longitudinal (voir la figure 5). Ils sont caractérisés par plusieurs topologies; stator court ou stator long, tubulaire ou non. Ces différentes variantes offrent une multitude de possibilités pour effectuer un mouvement linéaire[4].

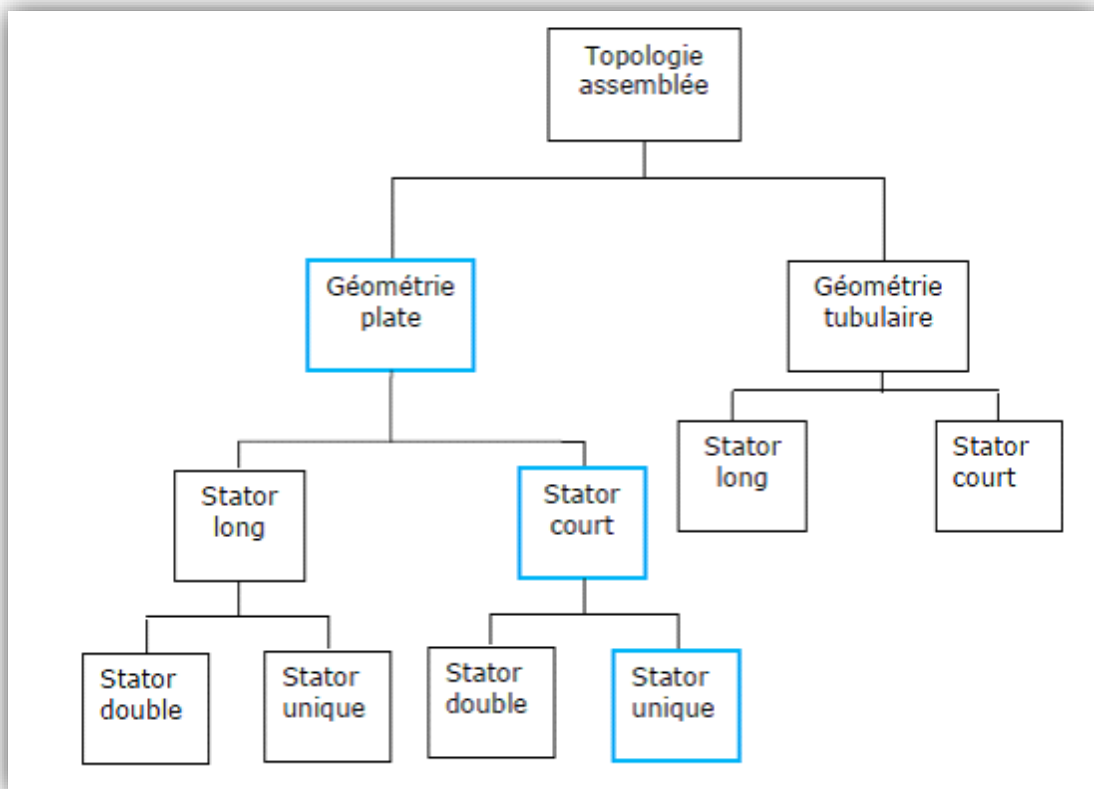


Figure 5: Différentes topologies du moteur linéaire

4.2-Classification des moteurs linéaires

Il y a principalement quatre approches différentes pour produire un mouvement linéaire : (voir la figure 6)

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 d'agir l'un sur l'autre avec un moteur [4].

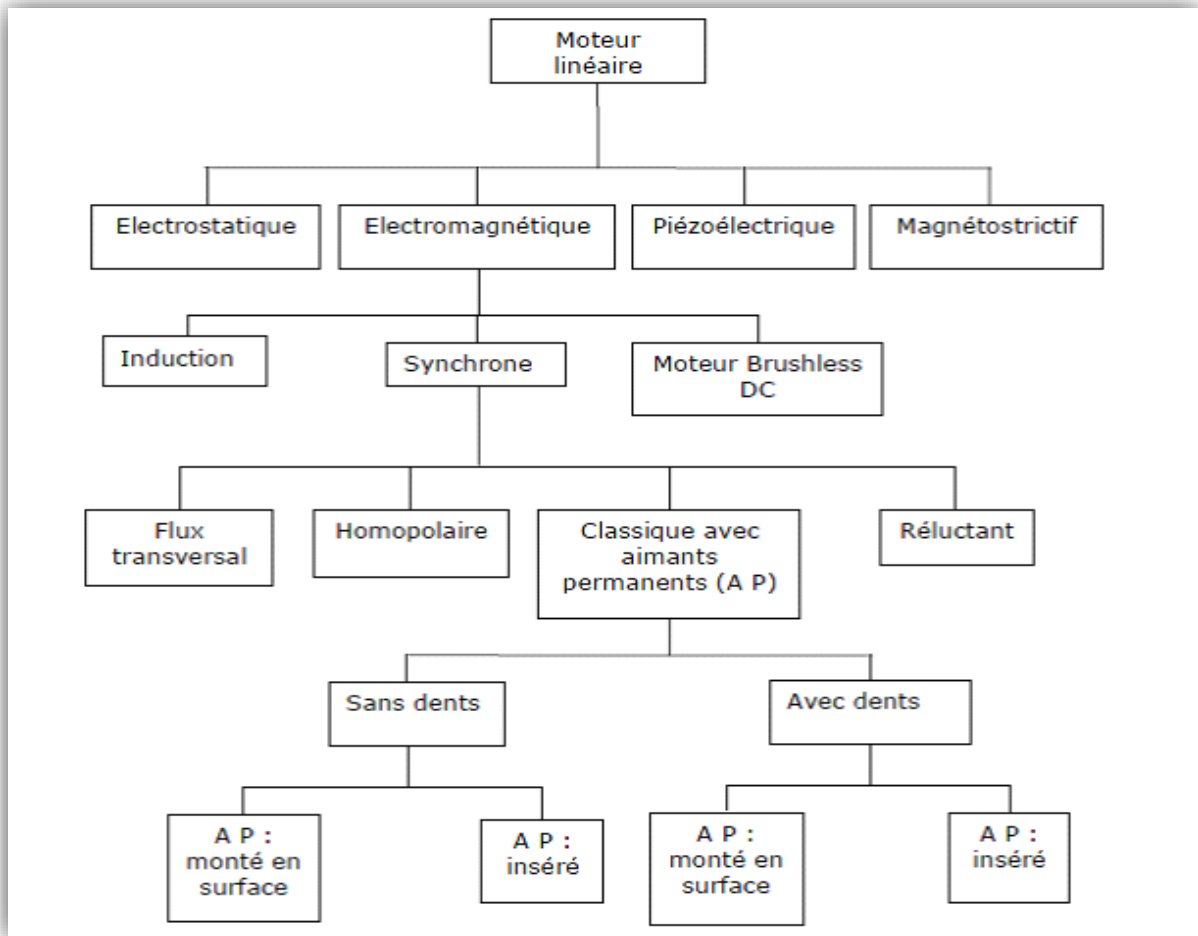


Figure 6:Classification du moteur linéaires

4.3-Structure des moteurs linéaires

Les moteurs linéaires sont caractérisés par plusieurs topologies avec des géométries de type plat, forme U ou tubulaire. Ces différentes variantes offrent une multitude de possibilités pour effectuer un mouvement linéaire. (figure 7) [5].

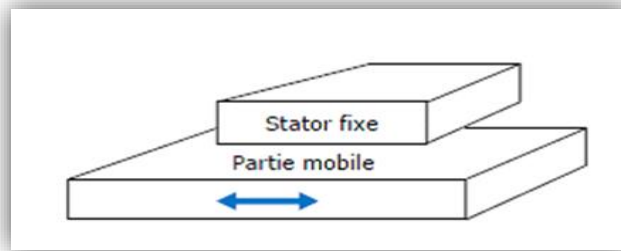


Figure 7: Structure linéaire plate

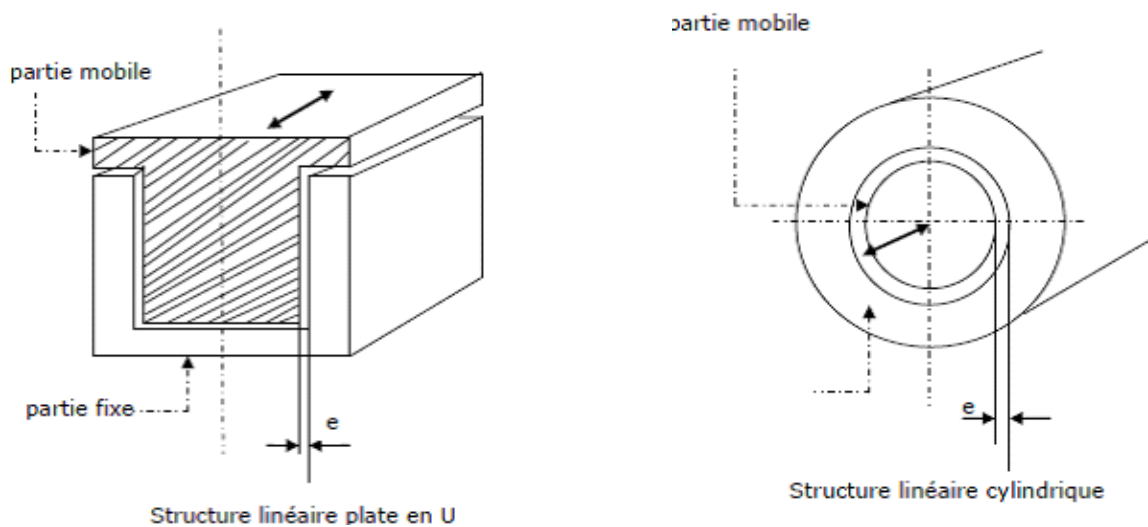


Figure 8: les différentes structures du moteur linéaire

5-Différents types de moteurs linéaires

5.1-Moteur a 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 f.é.m. [6]. Donc 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 retour (figure 9).

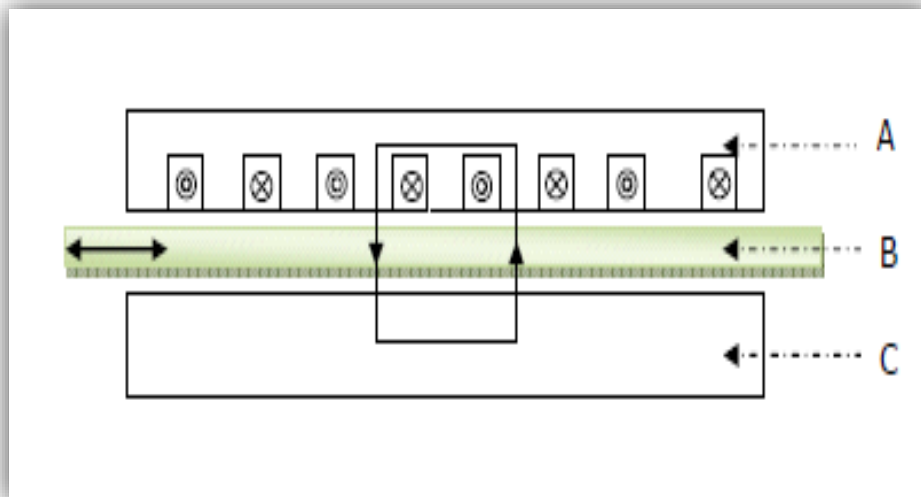


Figure 9: moteur linéaire a induction simple

A : inducteur.

B : induit.

C : circuit magnétique de fermeture.

5.2-Moteur a inducteur simple sans circuit de retour

Le même principe que le précédent, sauf que les lignes d'induction se ferment dans l'air (figure 10)

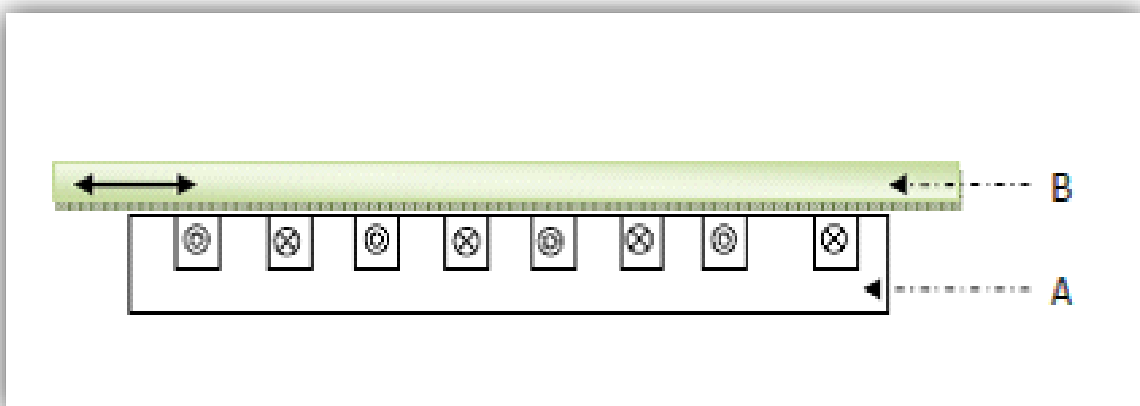


Figure 10: moteur linéaire a induction simple sans circuit de retour

A : inducteur.

B : induit.

5.3-Moteur a 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 a cage et les montants aux anneaux de court-circuit(figure 11) .

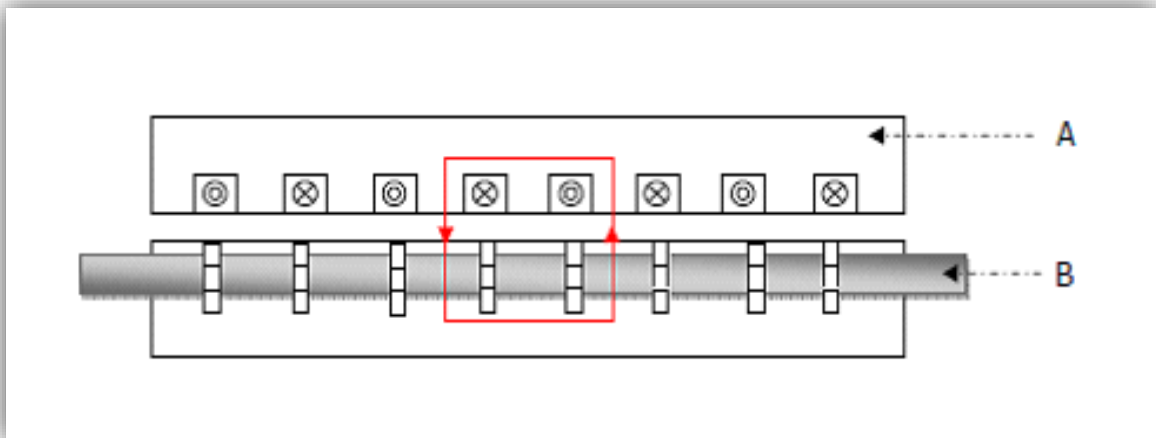


Figure 11:moteur linéaire a induit sous forme d'échelle

A : inducteur.

B : induit ferromagnétique des barreaux conducteurs.

5.4-Moteur linéaire a induit composite

Le courant est induit dans une couche conductrice généralement en aluminium appliquée sur une plaque d'acier magnétique assurant le retour du flux (figure12)

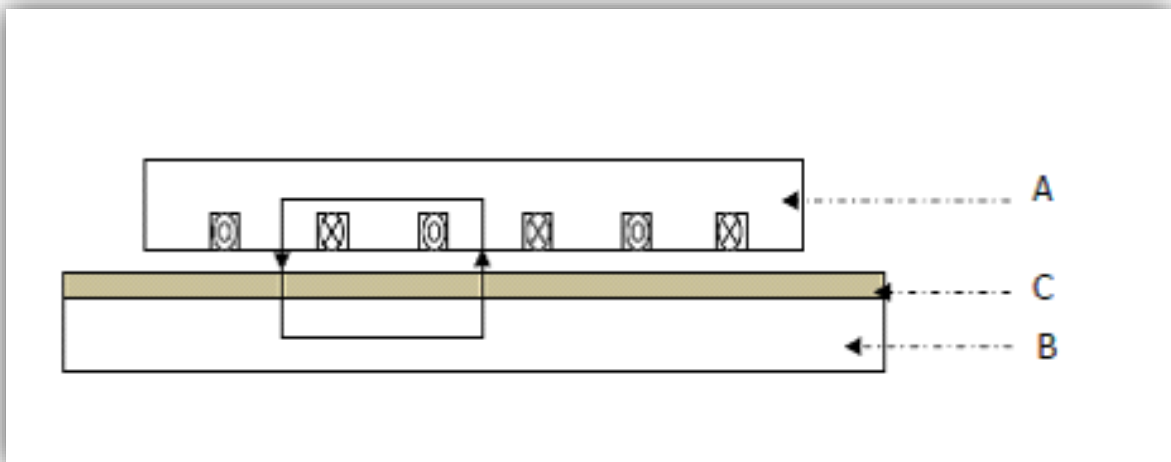


Figure 12: moteur linéaire a induit composite

A : inducteur.

B : plaque d'acier magnétique.

C : couche conductrice.

5.5-Moteurs pas a pas linéaires

Le moteur pas à pas linéaire se compose d'un stator portant le bobinage et d'une partie mobile se déplaçant linéairement. Cette partie mobile peut être réalisée à partir d'une pièce ferromagnétique dentée, dans ce cas la structure est dite à reluctance ou passive ; ou alors la partie mobile est maniée d'aimants permanents et dans ce cas la structure est dite polarisée ou active

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 concentres autour des plots du stator et donc faciles à réaliser. La figure (I.21) présente une structure linéaire à reluctance variable à deux modules stator. Chaque module

comporte deux plots autour desquels sont enroulées les bobines. Chaque phase de la machine est formée par la mise en série de deux bobines d'un même module. Des séparations amagnétiques sont nécessaires entre les différents modules statiques afin d'imposer un décalage. En effet, si les plots d'un module sont alignés avec les dents de la partie mobile, les plots des autres modules stator doivent être décalés pour pouvoir créer une force de déplacement. Chaque phase de la machine impose à la partie mobile une position d'équilibre correspond à l'alignement de ces dents avec les plots statoriques de la phase alimentée.

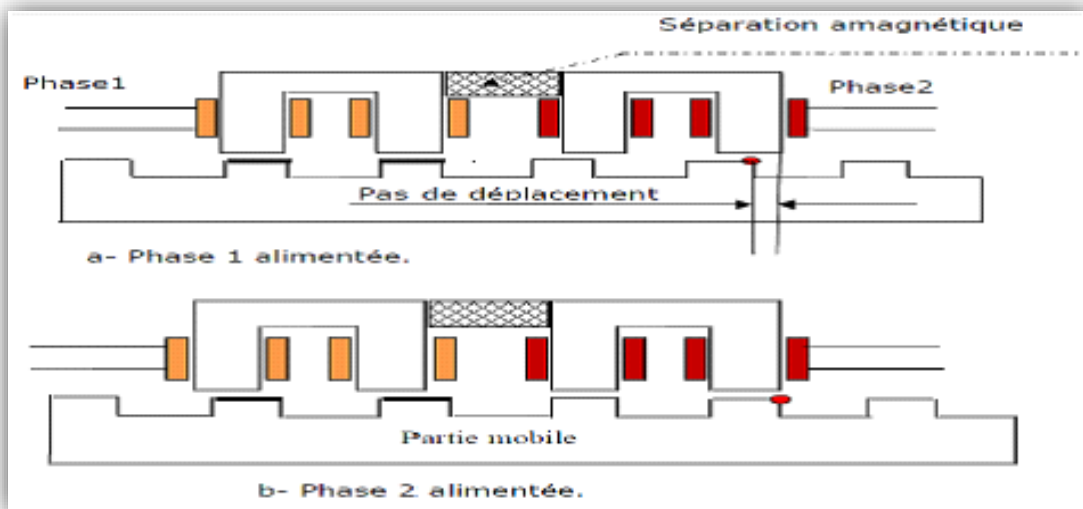


Figure 13: Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable

5.7-Moteur pas à pas linéaire polarise

Deux types de moteurs :

5.7.1-Moteurs pas à pas à aimants permanents

Ce sont des moteurs dont la partie mobile est généralement lisse et formée d'une succession d'aimants permanents montés en surface.

5.7.2-Moteurs linéaires hybrides

Le mouvement des moteurs hybrides résulte de la superposition de la force développée par l'effet réactif des dents et de la force créée par l'aimant. La contribution des amplitudes et des périodes géométriques de ces forces permet de réaliser des caractéristiques statiques très diversifiées. En effet l'aimant, placé dans la structure hybride, assure une certaine distribution des lignes de champs. L'alimentation des bobines produit un phénomène d'aiguillage des lignes de champs plus ou moins important suivant l'intensité du courant d'alimentation. En jouant sur l'orientation des lignes de champs, il est possible de maîtriser la variation de la force réactance.

(La figure 10) représente un moteur linéaire réactif polarisé bipolaire où l'aimant et les bobines sont placés sur le même support fixe.

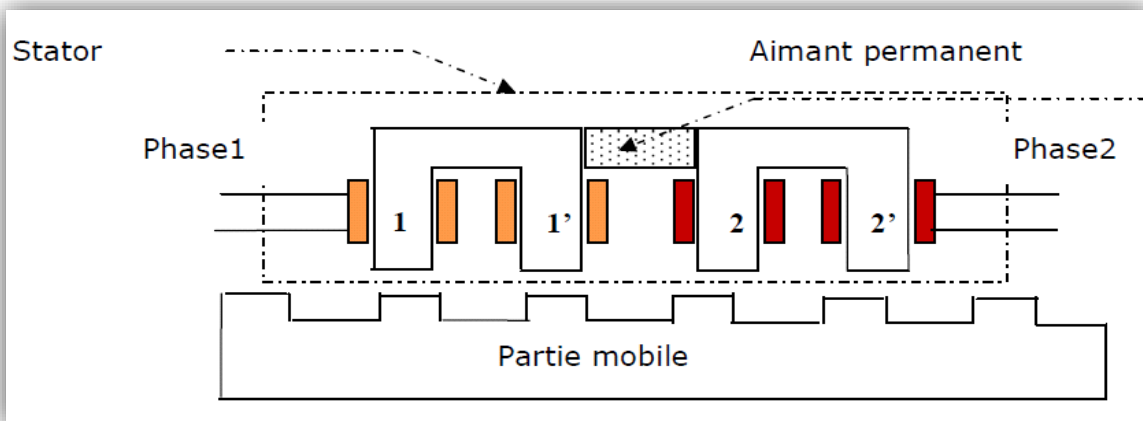


Figure 14: Moteur linéaire réactif

Les deux paires de plots adjacents (1,1') et (2,2') de la structure de la (figure 14) sont parcourus dans le même sens par le flux de l'aimant. Les quatre bobines forment deux phases constituées chacune par deux bobines montées en série. Si le sens d'enroulement des bobines est opposé, alors le flux créé par une phase circule conformément à la distribution de la (figure 15.b) La superposition du flux

Chapitre I : Étude du moteur linéaire

créé par l'aimant à celui créé par la bobine de la phase 1 produit une nouvelle distribution des lignes de flux, donc de la force (figure 15.c).

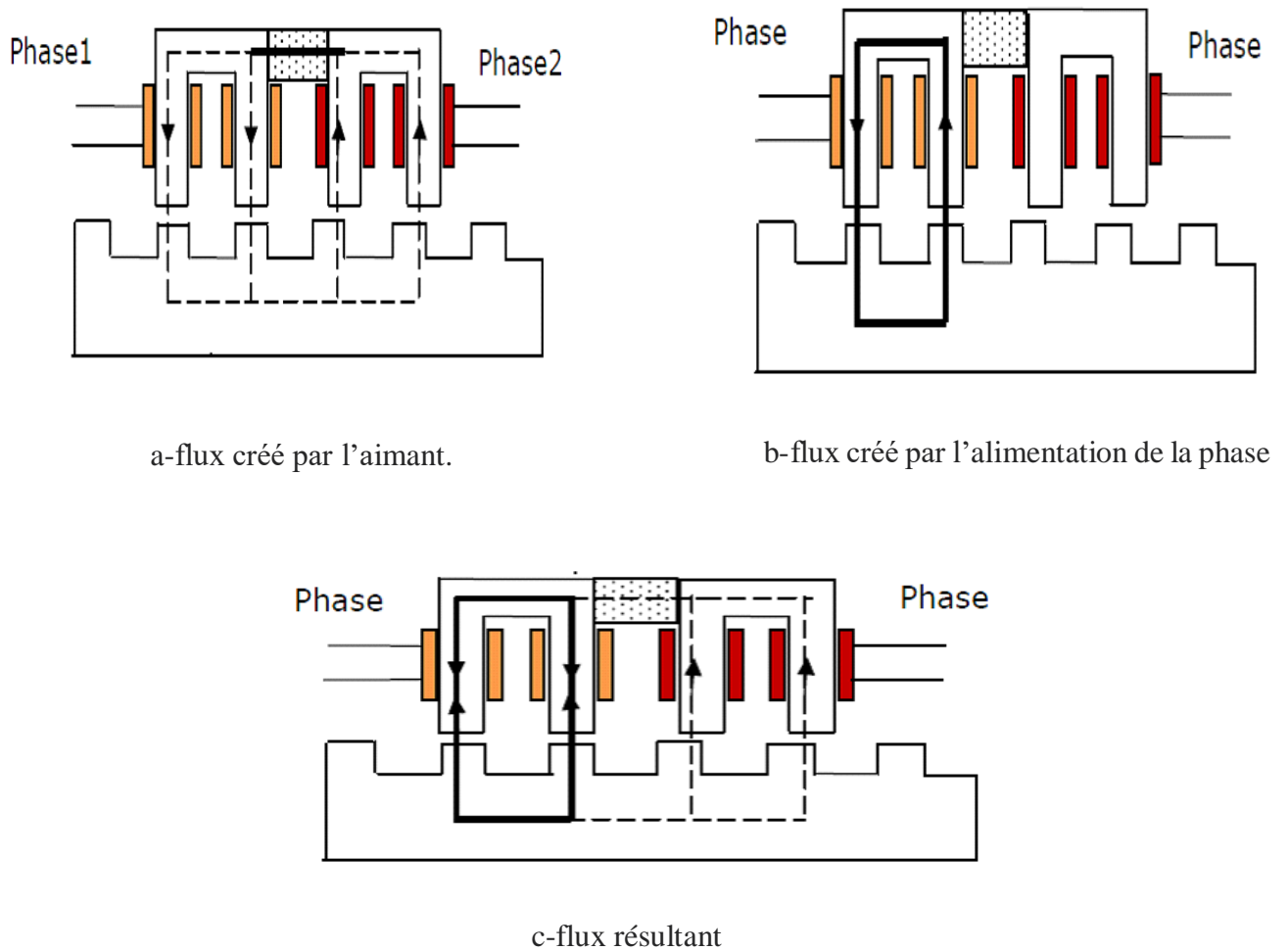


Figure 15: Distribution du flux dans moteur réactif polarisé

Pour une structure où l'aimant est fixé sur la partie mobile, les flux développés par la réluctance variable et l'aimant obéissent aux mêmes conventions que dans le cas précédent.

5.8-Moteur linéaire a aimants permanents

Le principe de fonctionnement du moteur linéaire a aimant permanent est assuré par l'action d'un champ électromagnétique de l'inducteur sur l'induit composé d'aimants permanents. Les enroulements sont bobines sur les dents régulièrement réparties dans l'inducteur. Généralement, les aimants utilisés dans les moteurs linéaires synchrones a aimants permanents sont du type Néodyme-Fer-Bore. Les moteurs linéaires a 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.

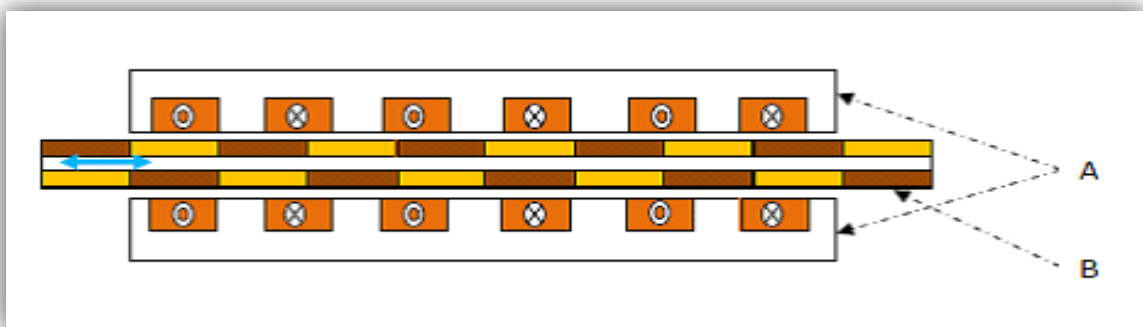


Figure 16:le moteur linéaire à aimants permanent

En particulier dans notre étude le moteur linéaire synchrone a aimants permanents.

6-Les avantages et limites des moteurs linéaires

L'avantage principal de tout moteur linéaire est qu'il élimine le besoin d'éléments de transmission tels que des supports, des vis à billes, des pignons, des courroies et des poulies. Dans le cas d'un train à lévitation magnétique par

Chapitre I : Étude du moteur linéaire

exemple, il n'y a aucun contact avec les pièces en mouvement. Il n'y a donc aucune usure mécanique, ce qui engendre une excellente fiabilité et une longue durée de vie. La réduction du nombre de composants mécaniques minimise la maintenance et réduit le coût du système. La technologie de l'entraînement directe propre aux systèmes basés sur des moteurs linéaires assure un ensemble efficace et performant. De cette façon, la complexité du système mécanique est considérablement réduite.

En se limitant à des critères principalement techniques, l'attrait pour l'entraînement linéaire direct s'explique aisément par les avantages apportés par la technologie. Ces avantages sont :

- . Grande dynamique de mouvement (vitesse maximale ou accélération)
- . L'absence de jeu entre les éléments d'entraînement permet un positionnement de très haute précision ou résolution de positionnement.
- . Accroissement de la durée de vie, grande fiabilité.
- . Réduction du nombre de composants pour réaliser un axe motorisé
- . Flexibilité et souplesse avec, entre autres, la possibilité de monter plusieurs parties mobiles indépendantes sur un seul axe.

Techniquement toujours, les principales limites sont les suivantes :

- . Le moteur linéaire placé à proximité de la charge peut nuire au processus : échauffement, aimantation de copaux sur la partie magnétique, environnement agressif. Dans ces cas, l'entraînement indirect est technologiquement plus adapté.
- . Le coût d'un moteur linéaire synchrone à aimants permanents est étroitement lié au marché des aimants permanents
- . Par contre, il existe un inconvénient majeur à la technologie Néodyme-Fer-Bore Un échauffement limité ($<150^{\circ}\text{C}$) dans les moteurs linéaires est prévu lors de leur conception.

Nous avons volontairement ciblé les avantages et les limites sur un plan technique car l'entraînement direct linéaire n'a pas encore atteint une expansion industrielle

importante, ainsi les critères de coûts lui sont encore défavorables par rapport à l'entraînement indirect [7].

7-Domains d'application

Les moteurs linéaires sont principalement dédiés aux applications très variées dans plusieurs domaines principalement pour dépasser les limites des moteurs tournants associés aux systèmes de transformation de mouvement ou pour des applications hautement dynamiques, de grande précision de positionnement :

- . La traction ferroviaire : Transrapid (Allemagne) et Maglev (Japon)
- . Les applications machines-outils, orientées.
- . Les applications pilotées au moyen d'un PC.
- . Le semi-conducteur et le circuit imprimé (montage et contrôle final de composants en microélectronique), la machine textile, la manutention, l'emballage, les machines de coupe au laser, les lecteurs de disque dur, la domotique.
- . Les techniques médicales.
- Système à lévitation magnétique (Maglev) :

Le train utilisant le système de Lévitation Magnétique (Maglev) est un très bon candidat. Le Maglev est un système de transport qui suspend, guide et propulse le train. Tandis qu'un train conventionnel est propulsé à l'aide du frottement entre les roues et les rails, le Maglev utilise la lévitation sur la voie de guidage, et se propulse grâce à un moteur linéaire. La Figure 1- présente un système de Maglev. Il est composé de trois parties: le système de propulsion (i. e. le moteur linéaire), le système de lévitation et le système de guidage. Dans ce paragraphe premièrement, le système de propulsion est présenté selon les différents types de

moteurs linéaires utilisés. Deuxièmement, les applications du Maglev sont présentées selon les différents types de système de lévitation. [7]

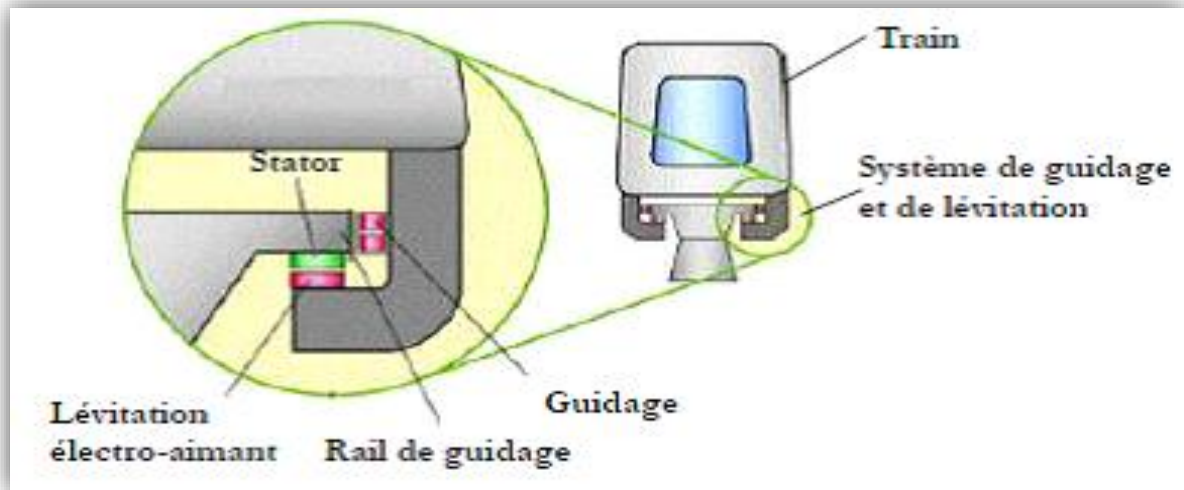


Figure 17: système de train (Maglev)

8. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le moteur synchrone linéaire dans sa version initiale ainsi que les principes de sa commande et les différents éléments matériels

Chapitre II

*Principe de fonctionnement de
moteur linéaire*

1-Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation technologique de notre moteur linéaire synchrone à aimants, sa constitution et son mode de fonctionnement d'une part, et d'autre part, à un rappel de la Modèle Analytique du moteur linéaire synchrone à aimants permanents.

2. Principe de fonctionnement

Pour expliquer simplement le fonctionnement d'un moteur linéaire synchrone à aimant permanent, nous pouvons préciser qu'il est essentiellement composé de deux éléments principaux (Figure 18)

Une partie fixe (le rail), composée d'une série d'aimants permanents à polarités alternées, c'est l'inducteur

Une partie mobile composée du bobinage (induit) et trois capteurs magnétiques à effet Hall. Ces capteurs permettent de connaître à chaque instant la position du mobile par rapport au rail.

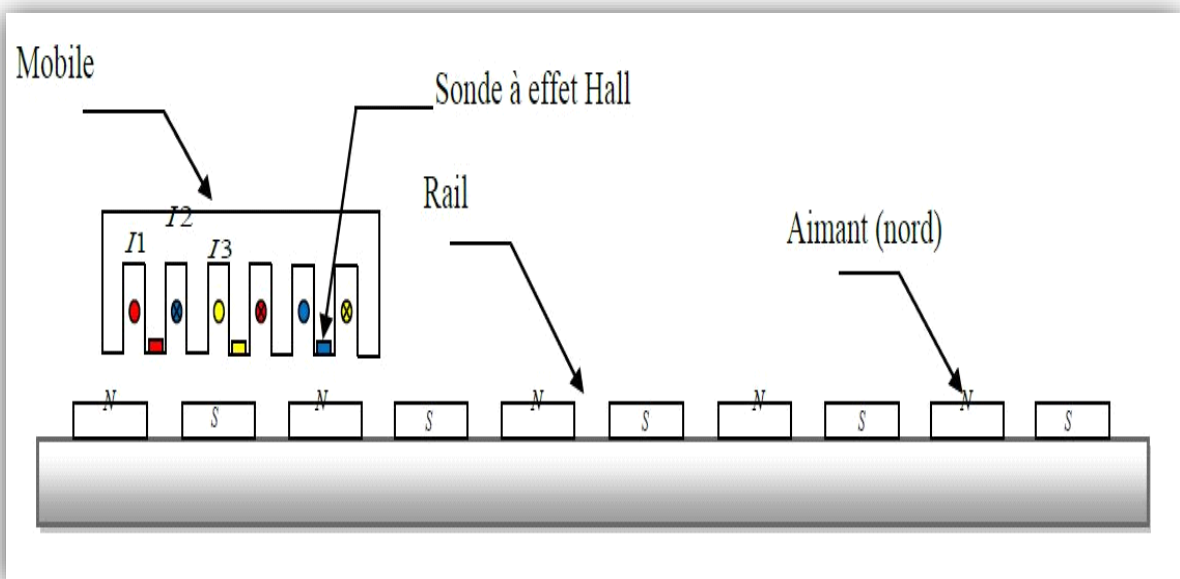


Figure 18: principe de fonctionnement de moteur linéaire

Chapitre 2 : Principe de fonctionnement de moteur linéaire

Puisque le moteur linéaire synchrone suit le même principe que le moteur rotatif, nous retrouvons aussi les mêmes caractéristiques. Il y a cependant quelques petites différences.

Le couple devient une poussée linéaire (force tangentielle) et la vitesse de rotation devient une vitesse linéaire. Outre la force tangentielle F_x il faut tenir compte de l'attraction (la force normale F_z) qui s'exerce entre l'inducteur et l'induit. En effet, les bobines jouent aussi le rôle d'électroaimant collant le mobile au rail. De manière simplifiée, on peut décomposer les efforts électromagnétiques en deux catégories (Figure 19)

- Les efforts tangentiels, dans le sens du déplacement, sont les efforts utiles.
- Les efforts normaux, perpendiculaires au déplacement, sont des efforts parasites. Dans une structure à aimants, ceux-ci sont dus essentiellement aux aimants et aux dimensions du mobile.

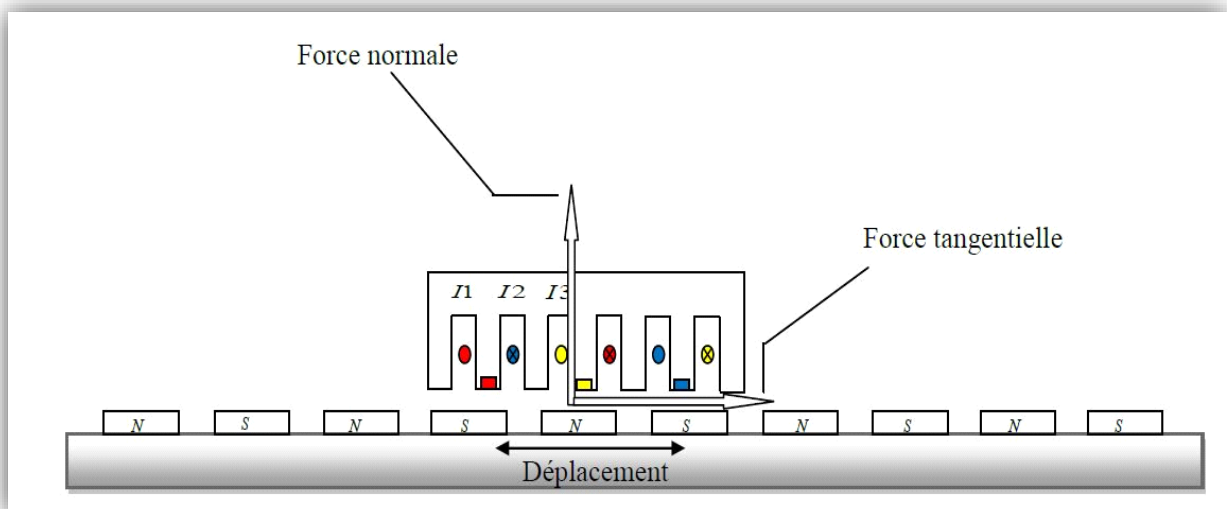


Figure 19: les forces électromagnétiques dans le moteur linéaire

Une phase est constituée par plusieurs spires (N=120). Ces bobines sont alors connectées entre elles et passent dans les encoches suivant un schéma de répartition (a,c',b,a',c,b') (Figure 20).

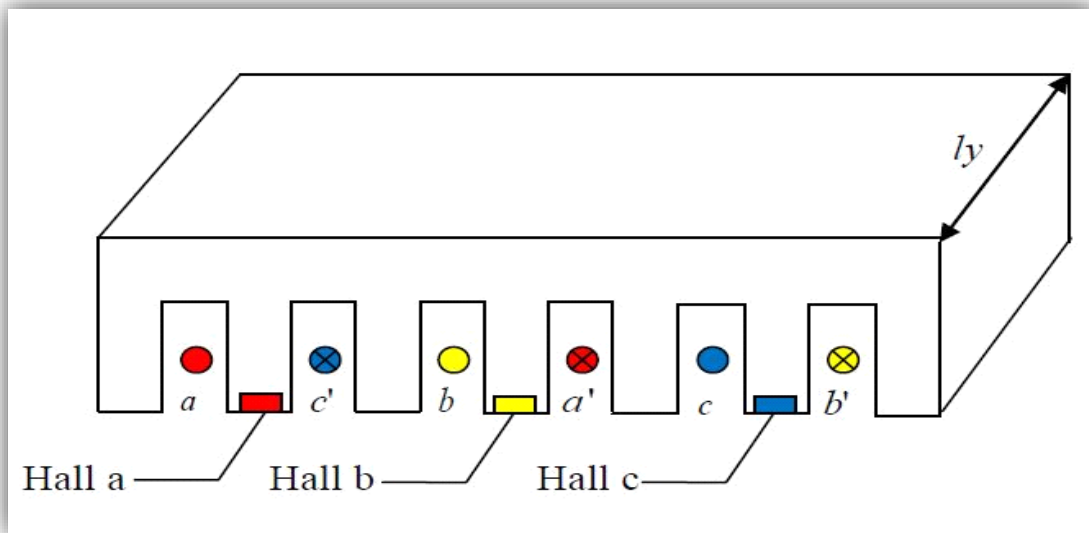


Figure 20: Répartition des phase (a.b.c) dans l'inducteur (partie mobile)

Les capteurs à effet Hall sont situés dans une partie fraisée des dents entre les faisceaux et sont désignés par : Hall a, Hall b, Hall c. Ces sondes vont basculer leur sortie logique à 0 ou 1, en fonction de l'induction magnétique qu'ils subissent. Donc, en l'absence d'une réaction d'induit, Si le capteur est face à un Sud, il bascule à 0 et s'il est face à un Nord, il bascule à 1. On génère alors numériquement dans le programme de commande du dsPIC, une variable appelé secteur :

$$\text{Hall Secteur} = 2^{\circ} \cdot \text{Hall a} + 2 \cdot \text{Hall b} + 2^2 \cdot \text{Hall c} \quad \text{II.1}$$

Chapitre 2 : Principe de fonctionnement de moteur linéaire

Cette variable va prendre les valeurs (3, 2, 6, 4, 5, 1) ou (1, 5, 4, 6, 2, 3) quand le mobile va parcourir le rail, sur une longueur active.

La relation entre les phases du moteur linéaire et les capteurs à effet Hall est la propriété qui définit la configuration correcte et permet au microcontrôleur de commuter le courant dans les bobines pour appliquer la commande 6 secteurs, dite aussi commande 120° ou autopilotage. On peut également reconstituer la position relative du mobile, avec plus ou moins de précision, par la lecture des sondes à effet Hall.

Le rail est composé d'une série d'aimants permanents donc on a une force contre-électromotrice qui a la forme d'un trapèze, cela s'explique par le fait que la loi d'induction est de cette forme (Figure 21).

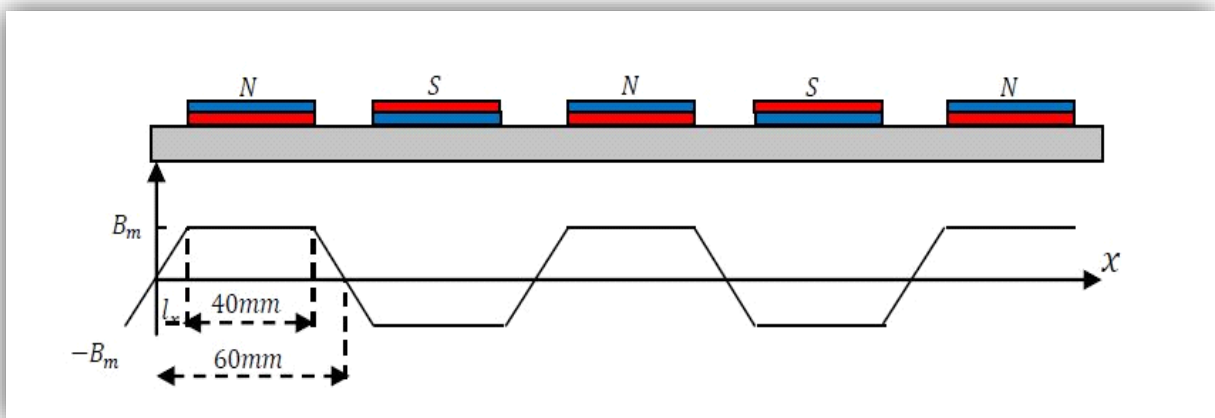


Figure 21: Induction générée par les aimants le long du rail

Donc en fonction de la position du mobile et du secteur, on doit imposer du courant dans deux phases et annuler celui de la troisième phase. On a une force contre-électromotrice qui a la forme d'un trapèze sur les 6 secteurs.

Le contrôle permet d'obtenir une force de la forme : $F=k \cdot I$

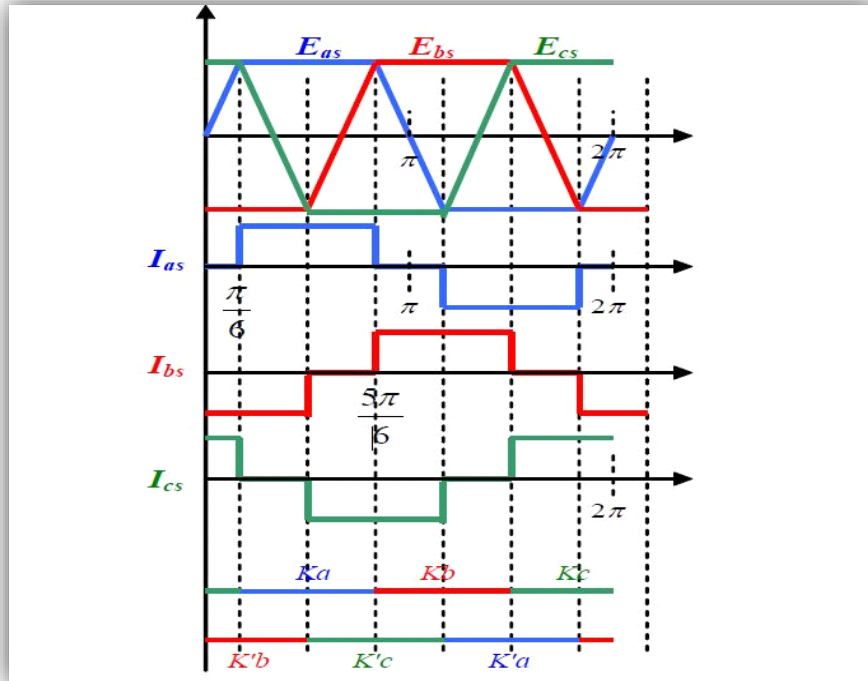


Figure 22: Force contre électromotrice et courant dans chaque bobine

Cela nécessite un onduleur particulier où l'on doit pouvoir contrôler l'arrêt d'un bras de hachage, tandis que les 2 autres continuent à hacher la tension du bus continu, en MLI afin de contrôler le courant absorbé [7].

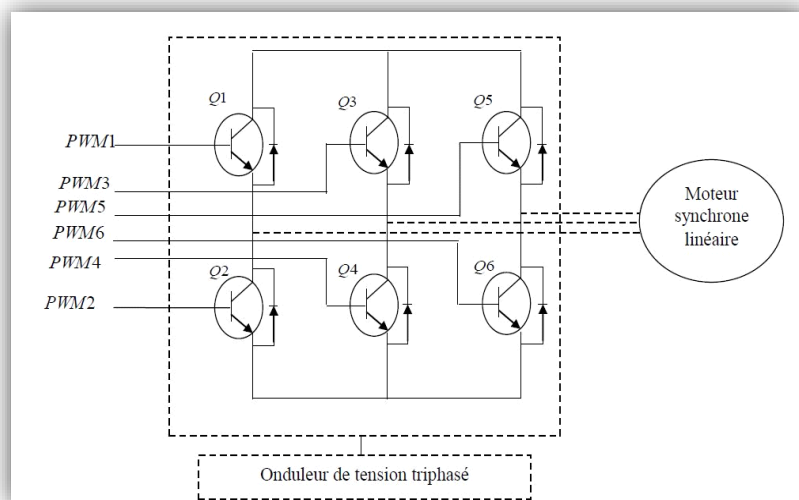


Figure 23: Structure de l'onduleur

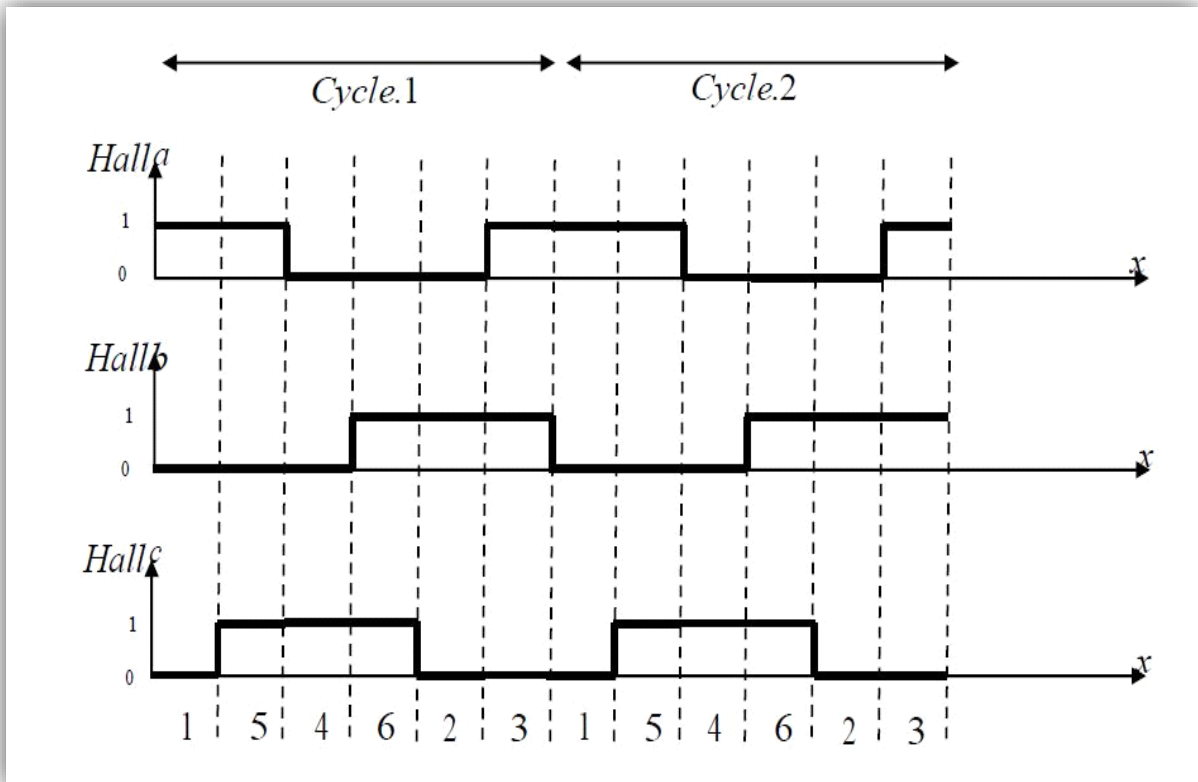


Figure 24: Signal capture à effet Hall de la variable Secteur

3. Commutation des séquences de la commande 6 secteurs

Pour créer un programme qui nous permet de mouvoir le moteur dans les deux sens, on s'est basé sur les deux tableaux suivants.

Tableau 1 : donne le séquençement des phases qui nous permettent de réaliser la marche avant.

Tableau 2 : donne le séquençement des phases pour réaliser la marche arrière.

Notre premier objectif est de réaliser la commande en suivant les séquences de commande décrite ci-dessous :

Chapitre 2 : Principe de fonctionnement de moteur linéaire

Séquences	Sondes effet Hall			PWMs		Courants		
	C	B	A			C	B	A
3	0	1	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q6)	-i	0	+i
6	1	1	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q4)	0	-i	+i
2	0	1	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q4)	+i	-i	0
5	1	0	1	PWM5(Q5)	PWM0(Q2)	+i	0	-i
1	0	0	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q2)	0	+i	-i
4	1	0	0	PWM3(Q3)	PWM4(Q6)	-i	+i	0

Tableau 1: Séquence pour la réalisation de la marche avant

Séquences	Sondes effet Hall			PWMs		Courants		
	C	B	A			C	B	A
5	1	0	1	PWM1(Q5)	PWM4(Q4)	+i	-i	0
3	0	1	1	PWM1(Q1)	PWM2(Q4)	0	-i	+i
1	0	0	1	PWM5(Q1)	PWM2(Q6)	-i	0	+i
6	1	1	0	PWM5(Q3)	PWM0(Q6)	-i	+i	0
4	1	0	0	PWM3(Q3)	PWM0(Q2)	0	+i	-i
2	0	1	0	PWM3(Q5)	PWM4(Q2)	+i	0	-i

Tableau 2: Séquence pour la réalisation de la marche arrière

On remarque qu'à chaque phase il n'y a que 2 bras qui conduisent à la fois et que le changement d'une séquence à une autre n'implique qu'un bras à la fois. Cela permet de recourir à plusieurs types de solutions d'électronique de puissance.

Chapitre 2 : Principe de fonctionnement de moteur linéaire

Notre choix s'est porté sur un onduleur triphasé compact et de faible tension suivant le cahier des charges.

Le but de l'onduleur est de permettre au moteur de fonctionner en assurant une commutation correcte de l'alimentation de ses enroulements.

Pour répondre aux besoins du moteur en termes de commutations, chaque interrupteur est constitué de la mise en antiparallèle d'une diode et d'un transistor.

Les diodes placées en antiparallèle avec les transistors sont importantes, sans celles-ci lorsque les transistors formant un bras de l'onduleur sont ouverts simultanément, aucun courant ne pourrait passer par ce bras.

L'ouverture de ces transistors risquerait de couper le courant dans la source de courant que forme l'enroulement du moteur commandé par ce bras. Cela n'aurait pour conséquence que de mener à la destruction des transistors à cause de la surtension provoquée par l'effet selfique de la bobine en question. La présence de la diode permet de régler ce problème en laissant toujours un chemin libre au courant vers l'alimentation.

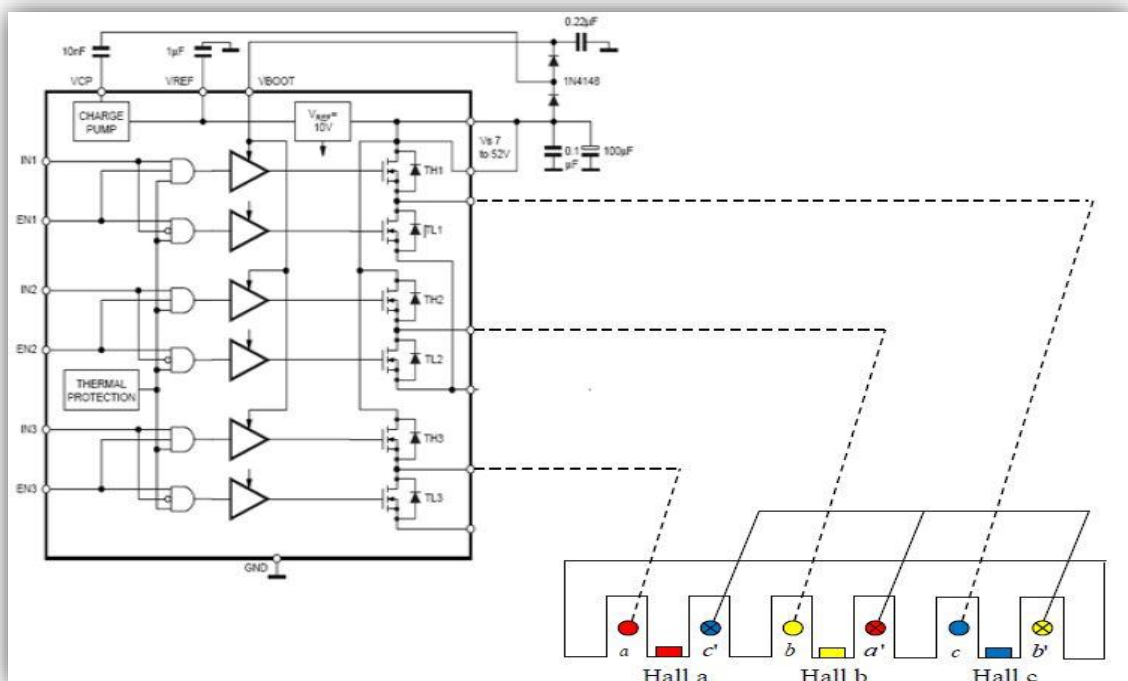


Figure 25 : Branchement des trois phases avec l'onduleur (L6234)

Chapitre 2 : Principe de fonctionnement de moteur linéaire

C'est l'interaction du courant dans chacun des 4 faisceaux des bobines alimentées avec l'induction magnétique créée par les aimants en vis-à-vis qui donne 4 forces de Laplace qui s'additionnent pour donner la force de traction totale :

$$F_x = 4L_y N_s B I \quad \text{II.2}$$

Evidemment, cette force est une approximation de la force réelle car beaucoup d'éléments restent non modélisables (effet de bords, réaction magnétique d'induit, matériaux ferromagnétiques, entrefer, saturation, denture).

On va donc par la suite effectuer une modélisation plus fine en ayant recours à l'analyse par éléments finis [7].

4. Problèmes relatifs aux M.L

Nous avons montré que le M.L fonctionne suivant le même principe qu'un moteur rotatif. En effet, le M.L a des points communs avec un moteur rotatif mais il a néanmoins certaines particularités. La longueur finie du primaire dans le M.L se répercute sur son fonctionnement en introduisant des effets particuliers généralement parasites.

Nous allons commencer tout d'abord par analyser le problème commun au M.L et au moteur rotatif : l'effet d'encoches ou la force de détente [2].

4.1. La force Normale

Dans les actionneurs linéaires synchrones à aimants permanents, la force normale (c'est-à-dire perpendiculaire au déplacement) est la source des contraintes mécaniques sur la structure. Dans notre structure, nous avons opté pour une solution simple qui consiste à fabriquer un mobile en plexiglas (culasse) ou un

matériel peu ferromagnétique en acier-inox inoxydable. Cela diminue ou annule toutes les forces de détente, la force . Le contrôle du moteur linéaire synchrone est donc plus simple.

4.2. La force de détente

Par définition, la force de détente est la force issue de l'interaction aimant / fer en l'absence de courant. En présence de courant, ces phénomènes d'interaction aimant / fer sont toujours présents mais ne correspondent plus à la définition de la force de détente. On parlera donc d'ondulations de force, la force de poussée n'étant alors que la composante utile de la force électromagnétique. L'interaction aimant / fer participe aux ondulations de force qui sont indésirables pour le bon fonctionnement de l'actionneur [8].

Dans la littérature, les forces de denture (cogging) et les forces d'extrémités sont regroupées sous le nom de force de détente :

$$\text{Force de détente} = \text{Forces de cogging} + \text{Forces d'extrémités} \quad \text{II.3}$$

4.3.Effets d'extrémités

Les effets d'extrémités regroupent deux grands phénomènes (Figure 26) :

- Les effets liés à la largeur finie du primaire qui génèrent des forces d'extrémités

(en rouge).

- L'influence du bobinage des têtes de bobines qui crée une asymétrie des couplages entre les différentes inductances qui composent le bobinage (en bleu).

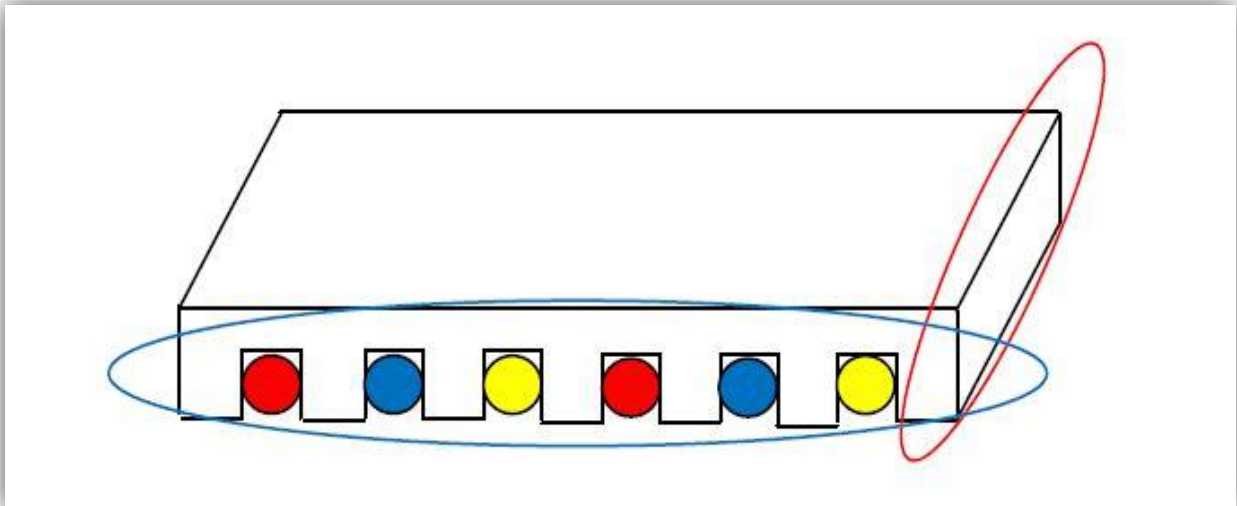


Figure 26: Présentation des phénomènes d'extrémités

Les aimants ont une influence sur le circuit magnétique, ils génèrent donc des forces parasites. Dans le cas de la largeur finie du primaire, les aimants créent une force sur les extrémités du primaire, cette force est appelée force d'extrémités.

Les forces d'extrémités dépendent donc de la position du mobile par rapport aux aimants, elles dépendent aussi de la forme des extrémités du circuit magnétique.

Une solution pour réduire les effets de ces forces d'extrémités est d'incliner les extrémités du circuit magnétique du mobile. [8]

4.4.Effets d'encoches ou de denture (Cogging)

Tout comme celle des moteurs tournants, les encoches du primaire du PMLSM, étant constituées de matériaux ferromagnétiques, subissent l'attraction des aimants. Ainsi, il en résulte une force normale et une force tangentielle. Cette force tangentielle aux encoches vient donc s'ajouter à la force de poussée du moteur, et donc doit être considérée comme une force perturbatrice. Ce phénomène est appelé cogging , et génère une composante de la force de détente.

Il peut être très important et gênant pour la marche régulière du moteur et pour son contrôle.

5. Modèle Analytique du moteur linéaire synchrone à aimants permanents

Le choix de la stratégie de commande du M.L se base principalement sur son modèle analytique. Nous allons, dans ce chapitre, introduire le modèle analytique classique du M.L et mettre en exergue ses éventuelles limites. Comme dans le cas des moteurs synchrones à aimants permanents rotatifs, ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- la non linéarité des matériaux est négligée .
- l'entrefer est supposé lisse .
- pas de pertes fer .
- pas d'effet de peau.

Ces hypothèses simplificatrices permettent d'obtenir un modèle présentant l'avantage d'être simple et rapide. Cependant, dans le cas où les effets inhérents aux M.L ne sont pas résolus par la conception, ce modèle peut induire des erreurs. Nous allons à la fin de ce chapitre analyser les limites de validité de ce modèle. [2]

5.1. Analogie entre un moteur linéaire et un moteur rotatif

Le modèle analytique du M.L peut être déduit par analogie avec celui d'un moteur synchrone à aimants permanents rotatif (figure 27 et 28).

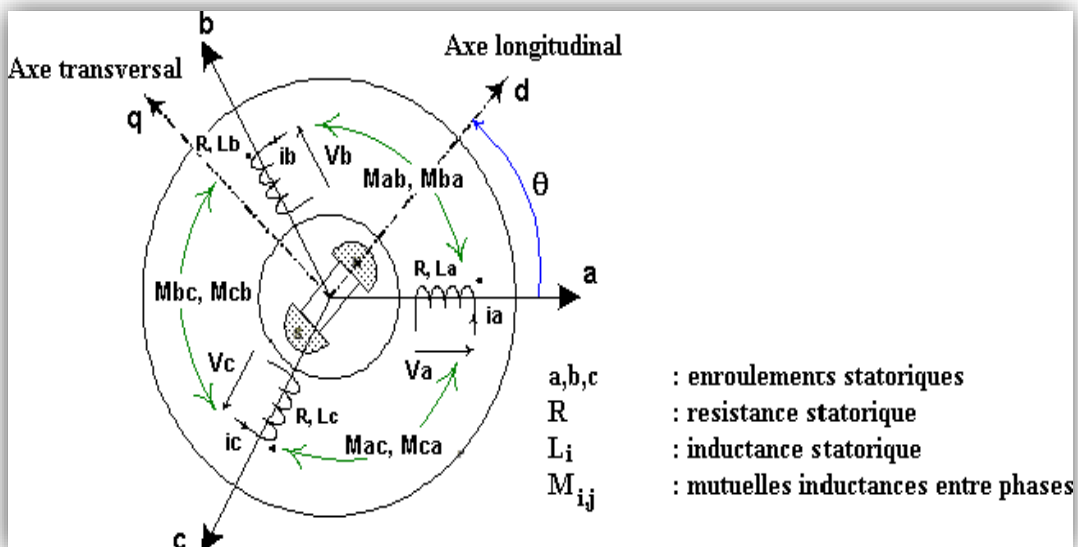


Figure 27: Moteur tournant synchrone bipolaire à aimants permanents

ont chacune électrique une ouverture de π dans le repère tournant.

Pour le moteur linéaire, les bobines, sont décalée de $2\frac{\tau_p}{3}$, on chacun une ouverture de τ_p dans le repère cartésien.

Pour un moteur tournant, le rotor se déplace d'un angle électrique noté, tandis que pour un moteur linéaire le primaire se déplace d'une distance " électrique " notée x .

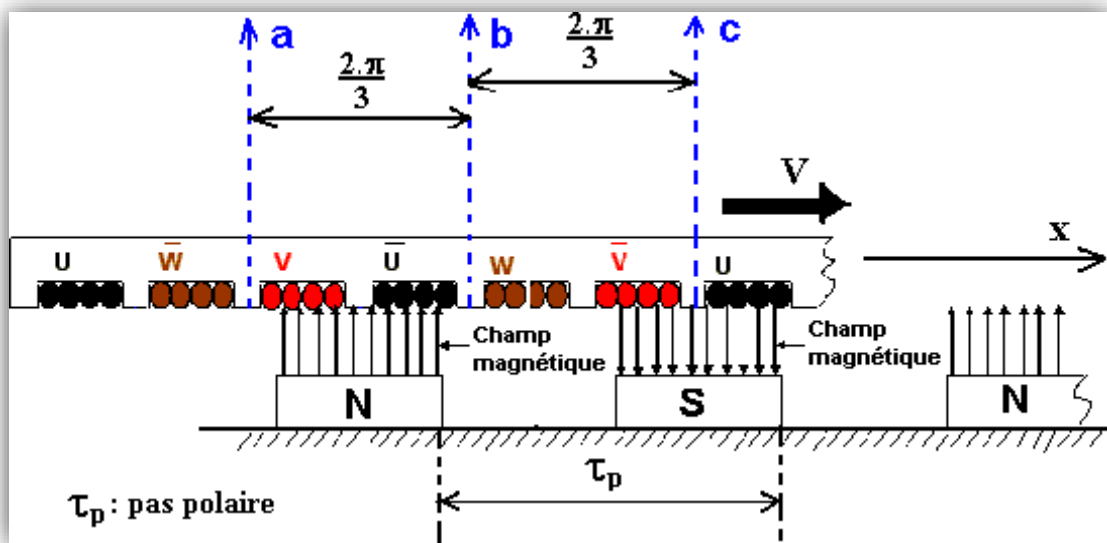


Figure 28: Moteur linéaire synchrone à aimants permanents

L'analogie entre le moteur linéaire et le moteur tournant est donc réalisée par la transformation suivante :

- θ_e dans le repère tournant devient x pour le repère cartésien.
- π dans le repère tournant devient τ_p dans le repère cartésien.

6. Modélisation du moteur linéaire synchrone à aimants permanents

6.1. Expression des équations électriques

Pour écrire les équations des tensions, nous exploitons la propriété de la loi de Faraday. On en déduit, pour l'ensemble des phases

(A, B et C), les équations suivantes :

$$\begin{cases} u_A = r_A i_A + \frac{d\phi_A}{dt} \\ u_B = r_B i_B + \frac{d\phi_B}{dt} \\ u_C = r_C i_C + \frac{d\phi_C}{dt} \end{cases} \quad \text{II.4}$$

$$\text{Tel que } \begin{cases} \phi_A = L_{AA} i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \phi_{AM} \\ \phi_B = M_{BA} i_A + L_{BB} i_B + M_{BC} i_C + \phi_{BM} \\ \phi_C = L_{CA} i_A + M_{CB} i_B + M_{CC} i_C + \phi_{CM} \end{cases} \quad \text{II.5}$$

Vec ϕ_{AM} , ϕ_{BM} , ϕ_{CM} : les flux provenant d'une source d'excitation (aimants permanents)

L_{ij} inductances propres

M_{ij} inductances mutuelles

r_i résistance des enroulements du primaire

Si on considère un déplacement dx suivant l'axe \vec{x} pendant un temps dt , l'équation des tensions est la suivante :

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_A & 0 & 0 \\ 0 & r_B & 0 \\ 0 & 0 & r_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_B}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\phi_{AM}}{dt} \\ \frac{d\phi_{BM}}{dt} \\ \frac{d\phi_{CM}}{dt} \end{bmatrix} \quad \text{II.6}$$

6.2. Expressions des termes dus aux aimants permanents

D'après l'étude on peut exprimer les flux créés par les aimants sous la [9] forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \phi_{AM} \\ \phi_{BM} \\ \phi_{CM} \end{pmatrix} = p\phi_V \begin{pmatrix} \cos(kx) \\ \cos(kx - \frac{2\tau}{3}) \\ \cos(kx - \frac{4\tau}{3}) \end{pmatrix} \text{ tel que } \phi_V = n \cdot \frac{2\tau_p \cdot B_f \cdot l_a}{\pi} \quad \text{II.7}$$

On retrouve la forme classique du vecteur flux du moteur tournant à aimants permanents à pôles lisses.

Où n : nombre de spires de chaque phase.

B_f : la valeur maximale du fondamental du champ crée par les aimants.

l_a : la largeur des aimants.

τ_p : pas polaire.

p : nombre de paires de pôles.

$K = \frac{\pi}{\tau_p}$: nombre d'onde.

Les forces électromotrices peuvent s'exprimer à partir de l'équation (II.7) sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{pmatrix} = -\phi_V \cdot k \cdot p \cdot \frac{dx}{dt} \begin{pmatrix} \sin(k \cdot x) \\ \sin(k \cdot x - \frac{2\tau}{3}) \\ \sin(k \cdot x - \frac{4\tau}{3}) \end{pmatrix} \quad \text{II.8}$$

6.3. Expressions de la force de poussée

La puissance électromagnétique est déterminée par la relation suivante :

$$P_e = e_A \cdot i_A + e_B \cdot i_B + e_C \cdot i_C \quad \text{II.9}$$

Nous déduisons alors l'expression de la force de poussée :

$$F_e = \frac{P_e}{\omega} \quad \text{II.10}$$

Elle peut alors être exprimée par la relation [9] :

$$F_e = -p \cdot 2 l_a \cdot B_f \cdot n [i_A \cdot \sin(kx) + i_B \cdot \sin\left(kx - \frac{2\tau}{3}\right) + i_C \cdot \sin\left(kx - \frac{4\tau}{3}\right)] \quad \text{II.11}$$

Si on alimente le moteur avec un système de courants de la forme suivante :

$$i_A = \hat{I} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$i_B = \hat{I} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\tau}{3}\right) \quad \text{II.12}$$

$$i_C = \hat{I} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\tau}{3}\right)$$

L'expression (II.12) devient :

$$F_e = -p \cdot l_a \cdot B_f \cdot 3 \cdot I \cdot n \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad \text{II.13}$$

Cette force de poussée est alors constante si ; c'est-à-dire à la vitesse de rotation :

$$\omega = k \cdot \frac{dx}{dt} \quad \text{II.14}$$

7. Conclusion

La validité du modèle analytique dépend directement des hypothèses simplificatrices que l'on a adoptées. Nous pouvons alors envisager les deux cas suivants :

- les effets, négligés dans notre modélisation, sont éliminés par les choix de conception du moteur . Dans ce cas, le modèle analytique se rapproche du comportement réel du M.L.

Chapitre 2 : Principe de fonctionnement de moteur linéaire

- dans le cas contraire, il faut ajouter au modèle analytique des termes pour prendre en compte les effets de la force de détente et de la force d'extrémité.

Afin de juger de la validité des hypothèses et de comprendre les différents phénomènes propres au M.L, nous allons utiliser la modélisation numérique du moteur linéaire. Cette modélisation sera validée par les mesures expérimentales qui seront présentées dans le chapitre suivant

Chapitre III

Modélisation du Moteur
Linéaire avec FEMM

1- Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une étude numérique du moteur synchrone linéaire à aimants permanent.

Pour ce faire, une modélisation numérique avec un logiciel d'éléments finis libre FEMM doit être conduite. On étudiera notamment l'influence des matériaux choisis (rail et mobile, sur le fonctionnement du moteur. Nous présenterons les principaux résultats.

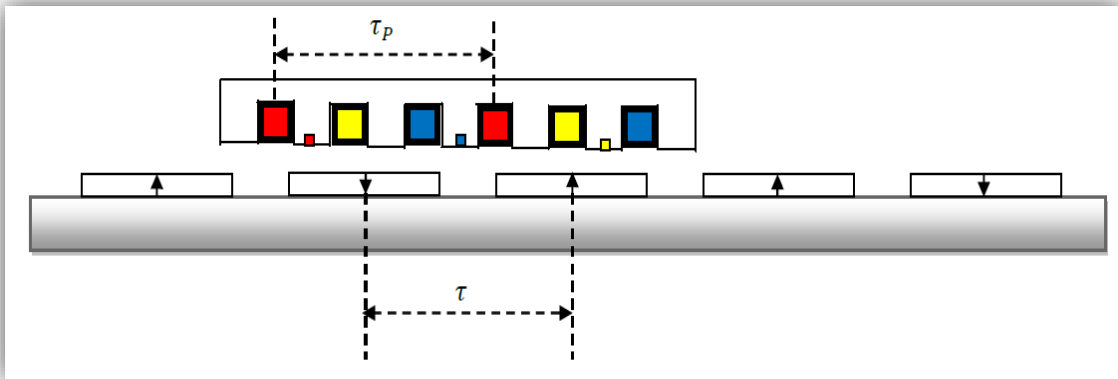


Figure 29: structure du mobile et le bobinage

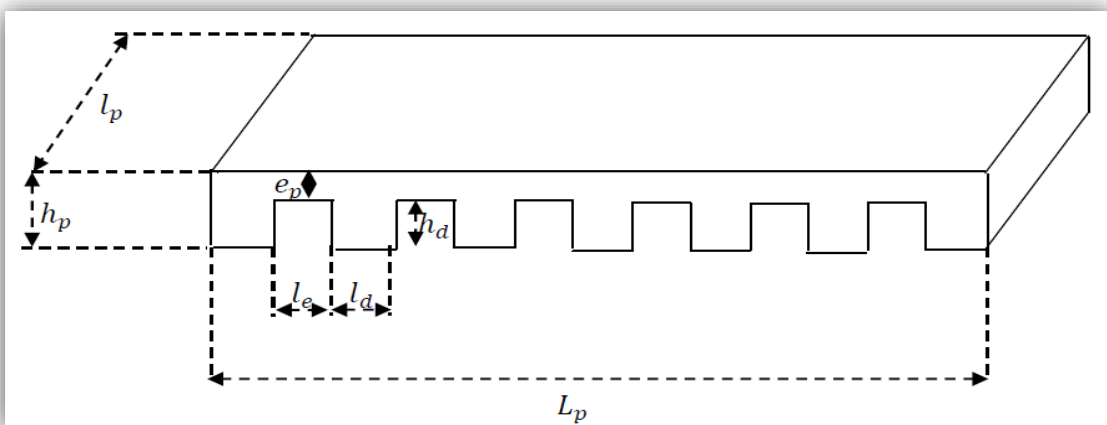


Figure 30: les paramètres de dimension du mobile

Les aimants utilisés dans notre moteur linéaire synchrone sont de type N38, blocs plaqué au nickel, en Neodyme-Fer-Bore (NdFeB).

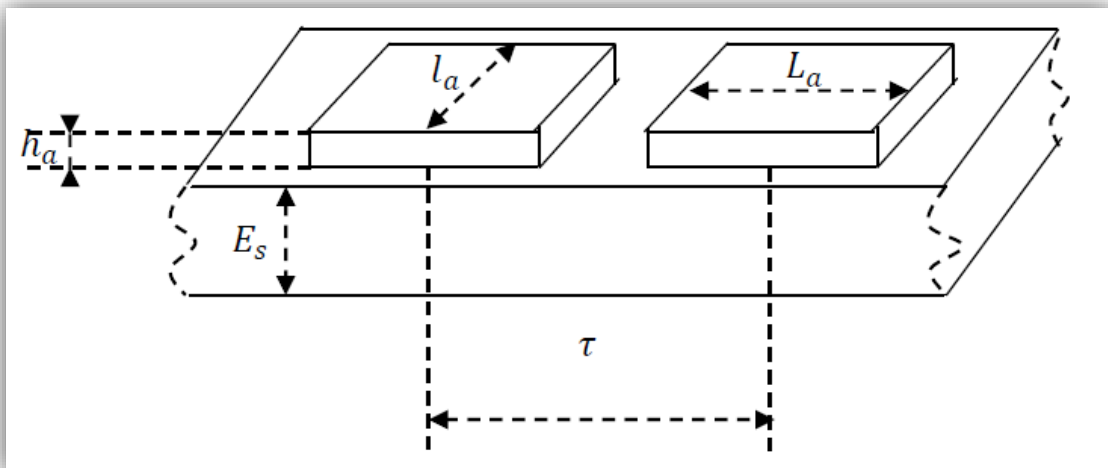


Figure 31 : Les paramètres de dimension du rail

2-Paramètres géométriques du mobile et du rail

La figure 29 montre la structure du mobile et le bobinage. Il y a six encoches et sept dents, les encoches sont droites. Il y a 120 conducteurs par encoche, les trois enroulements sont bobinés diamétralement.

Le détail des dimensions du circuit ferromagnétique est donné par la figure 30 et la figure 31. Ces données seront utilisées pour modéliser le moteur linéaire par la méthode des éléments finis.

La figure 30 présente les dimensions du mobile.

La figure 31 présente la disposition des aimants sur le secondaire du moteur linéaire à aimant permanent. La structure du moteur linéaire est définie en deux dimensions sous FEMM et la définition de la profondeur permet d'extrapoler les résultats de calcul uniquement. Les effets de bord dus à cette troisième dimension ne sont pas pris en compte par FEMM.

Le tableau ci-dessous présente une liste des principales grandeurs géométriques du moteur linéaire

Chapitre III : Modélisation du Moteur Linéaire avec FEMM

Composants	Listes des paramètres	Valeur
Mobile	Longueur totale du circuit magnétique	130mm
	Largeur totale du circuit mangnétique	30mm
	Hauteur totale du circuit magnétique	15mm
	Profondeur d'encoche	10mm
	Épaisseur de la culasse	5mm
	Nombre d'encoches	6
	Nombre de spires par phase	120
	Nombre de dents	7
	Nombre de phases	3
	Pas d'encoche	20mm
	Rail (inducteur)	Pas polaire
Épaisseur de la culasse		10mm
Longueur des aimants		29mm
Largeur des aimants		40mm
Épaisseur des aimants		3mm

Tableau 3:Liste des principales grandeurs géométriques

τ : Pas polaire (le pas entre deux pôles d'aimants consécutifs)

h_s : Épaisseur de la culasse

l_a : Longueur des aimants

L_a : Largeur des aimants

h_a : Hauteur des aimants

3. Calcul des forces

La principale force de déplacement est une force tangentielle. Elle peut se calculer par la loi de Laplace. Les autres forces sont perturbatrices. Elle peuvent être déterminée numériquement, par l'évaluation du tenseur de Maxwell ou de la force de Lorentz (si le matériau conducteur est de perméabilité relative unitaire ($\mu_r = 1$)). [10]

3.1-Force électromagnétique de Laplace

La force de Lorentz se réduit à la force de Laplace en absence de charge électrostatique [11]. La force électromagnétique \vec{F} s'exprime alors :

$$\vec{F} = I. \vec{l} \times \vec{B} \quad \text{III.1}$$

La force magnétique n'agit donc que sur un conducteur traversé par un courant. Pour N conducteurs (nombre de spires de la bobine) traversant l'encoche de longueur active l_y soumis à une induction magnétique supposée constante et perpendiculaire partout sous le conducteur (de module), la force vaut :

$$F = B_m I N l_y \quad \text{III.2}$$

3.1.1-Application numérique

Une culasse en plexiglas $\mu_r = 1$ pour la partie mobile, un support en plexiglas $\mu_r = 1$ pour le rail, pour un entrefer $e = 3$ mm, $l_x = 10$ mm, $l_y = 30$ mm, $I = 2$ A et $N = 120$ spires.

On impose des courants dans les bobines de sorte que si les faisceaux a et c' des bobines sont face à un Nord, que les faisceaux b et b' sont face à une pente de croissante ou décroissante et que les faisceaux a' et c sont face à un Sud

(Figure 17) alors on doit alimenter les phases respectivement [12] par et +I, 0, -I. On obtient ainsi 4 forces qui vont s'additionner pour agir sur le mobile :

$$F_x = 4F_a = 4B_m I N l_y$$

III.3

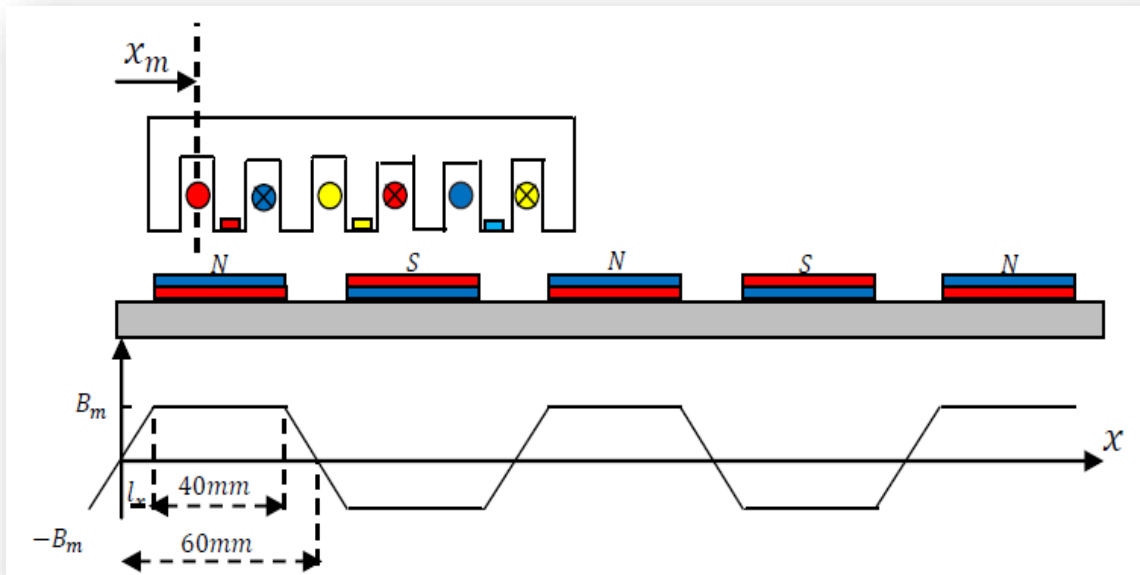


Figure 32: Induction générée par les aimants le long du rail.

4 -Méthodes d'analyse numérique du moteur synchrone linéaire à aimant permanent

Avec l'apparition des ordinateurs assez puissants en terme d'espace mémoire, rapides en terme d'exécution des calculs, l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution des problèmes de champs électromagnétiques, devient un choix réaliste. Ce type de problèmes est modélisé de façon fondamentale, en partant des équations de Maxwell, qui sont manipulées pour aboutir à une équation différentielle globale régissant le fonctionnement du dispositif électromagnétique dans un cadre d'hypothèses restreintes et bien déterminées.

4.1-L'outil de modélisation

Nous n'allons pas comparer les méthodes d'éléments finis ou de différences finies pour l'analyse de notre moteur. Le choix d'un logiciel libre (FEMM) [13].

, d'analyse par éléments finis en 2D, nous a été imposé par notre encadrement. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées pour résoudre d'une manière efficace, les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques.

La méthode des éléments finis consiste à rechercher une fonction globale représentant les phénomènes étudiés, sur un domaine de résolution préalablement subdivisé en parties finis adjacents appelées élément finis.

Le principe du calcul par éléments finis est de diviser la structure de la machine étudiée en un nombre important d'éléments de dimensions finies puis de résoudre les équations de Maxwell sur chacun de ces éléments. Les conditions aux limites de chaque élément sont fixées par les éléments voisins. La combinaison de tous ces éléments de calcul permet alors de connaître l'état magnétique de la structure complète et donc d'effectuer des calculs de flux, de force et d'inductance.

Le domaine, dans lequel est effectuée la simulation, est décomposé en éléments sur lesquels sont construites des solutions approchées dont les inconnues sont les valeurs de la solution en ensemble de points finis qui sont les nœuds de la discrétisation. Sur chaque point est calculé un potentiel (Figure 34). D'habitude, on utilise des triangles ou des quadrilatères pour les problèmes 2D et des tétraèdres ou des hexaèdres pour les problèmes 3D.

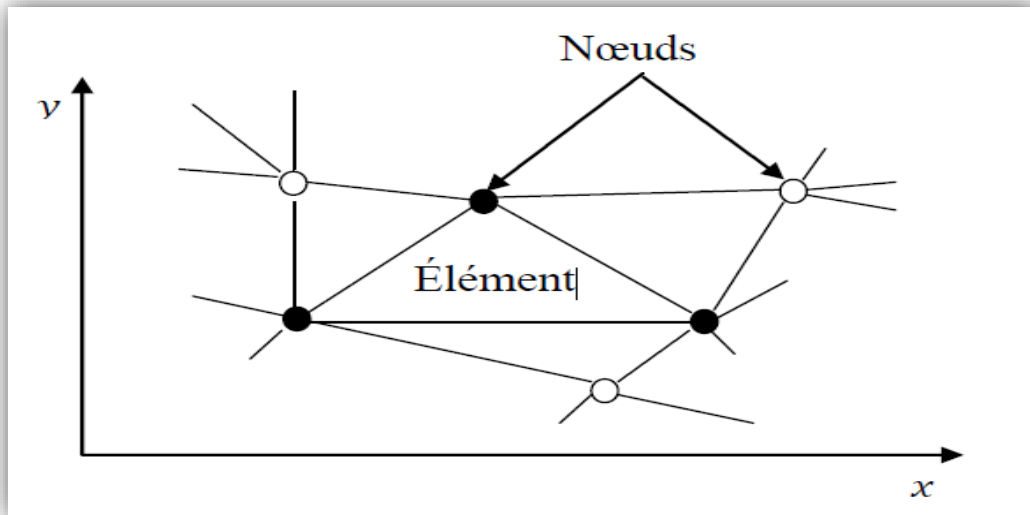


Figure 33: Discrétisation par éléments finis en deux dimensions

5. Présentation du logiciel FEMM

Le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) comporte une suite de programmes permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétisme à basse fréquence dans des domaines 2D ou axisymétriques. Ce logiciel, développé par *David Meeker*, est disponible gratuitement (*Aladdin Free Public License*) [14].

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 matérielles ainsi que les conditions aux limites. Après l'analyse, la solution est affichée sous forme de contour, densité de flux... 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.
- *triangle.exe* : découpe les régions du problème en éléments triangulaires, ce qui constitue une étape importante de l'analyse par éléments finis.

Chapitre III : Modélisation du Moteur Linéaire avec FEMM

- *fkern.exe* : est un solveur qui résout les équations aux dérivées partielles pour obtenir les valeurs du champ magnétique dans le domaine étudié.

Le langage *LUA* est également intégré dans les pré et post-processeurs. Il suffit d'écrire un programme ou donner des instructions dans la console LUA pour commander les étapes de calculs. Toute modification sur le domaine d'étude, analyses ou exploitations des résultats peut être effectuée de manière automatique par un programme en LUA sans l'intervention manuelle de l'utilisateur.

La modélisation de moteur synchrone linéaire à aimant permanent par la méthode des éléments finis va nous permettre de résoudre les équations. Une fois la résolution des équations de Maxwell terminée, on détermine l'induction magnétique (sous les capteurs à effet Hall) et les composantes de la force électromagnétique que subit le mobile. Ces études sont réalisées pour différentes positions relatives, courants, et matériaux. Elles permettront de déterminer la position optimale du capteur par rapport à l'aimant, l'entrefer, les matériaux à utiliser, les dimensions, les forces résultantes (amplitude et ondulations).

6. Définition de la structure de moteur sous FEMM

On définit la structure de moteur linéaire qui comporte deux parties, chacune des deux parties est décrite par un matériau dont les caractéristiques sont modifiables. La figure 35 présente la structure de l'actionneur avec les différents matériaux utilisés :

- Un support en plexiglas (rail) pour les aimants, le matériau est assimilé à de l'air ($\mu_r=1$)
- Des aimants de perméabilité relative ($\mu_r=1.045$)
- Le bobinage en cuivre de perméabilité relative ($\mu_r=1$)
- Une culasse en plexiglas pour le mobile, assimilé à de l'air ($\mu_r=1$)
- De l'air autour de la structure du moteur et dans la zone d'entrefer.

Chapitre III : Modélisation du Moteur Linéaire avec FEMM

Les capteurs à effet hall ne sont pas modélisés, mais leur position sera utilisée pour déterminer l'induction magnétique et changer la séquence d'alimentation ; Nous présentons les résultats de modélisation sous FEMM de moteur linéaire à aimant permanent (Figure 35), dont l'ensemble des paramètres géométriques et électromagnétiques sont récapitulés dans Tableau 3.

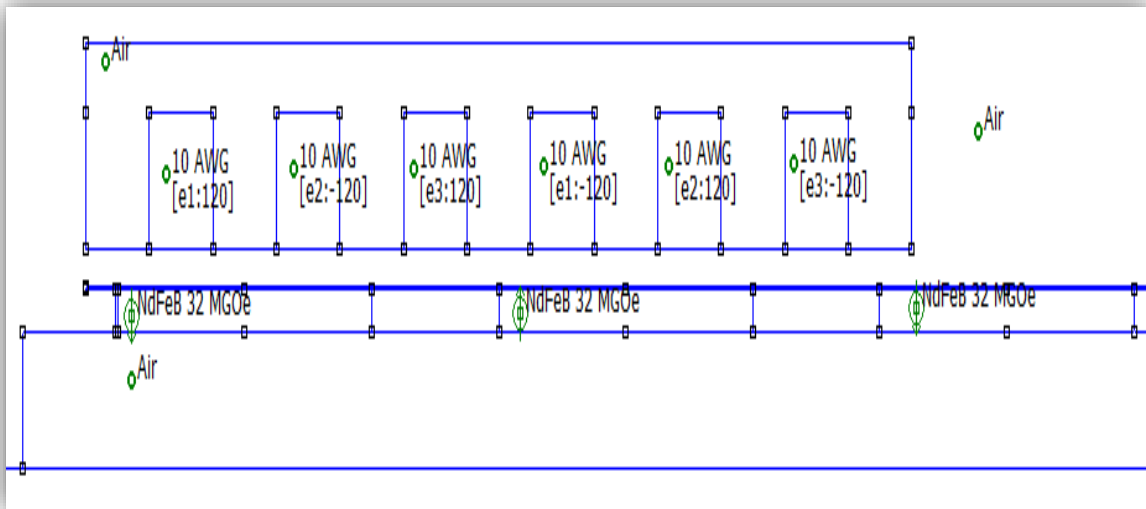


Figure 34: Structure du moteur linéaire à aimant permanent définie sous FEMM

Le maillage s'effectue automatiquement, en fonction de la taille des éléments. Afin de forcer un maillage plus fin dans la zone d'entrefer, nous avons rajouté des lignes fictives, non fermées (figure 35). Le logiciel FEMM choisi automatiquement un maillage de 49998 nœuds et 99088 éléments comme illustré sur la figure 35. Nous obtenons le résultat d'un maillage resserré aux niveaux des points de calculs désirés sur la figure 36.

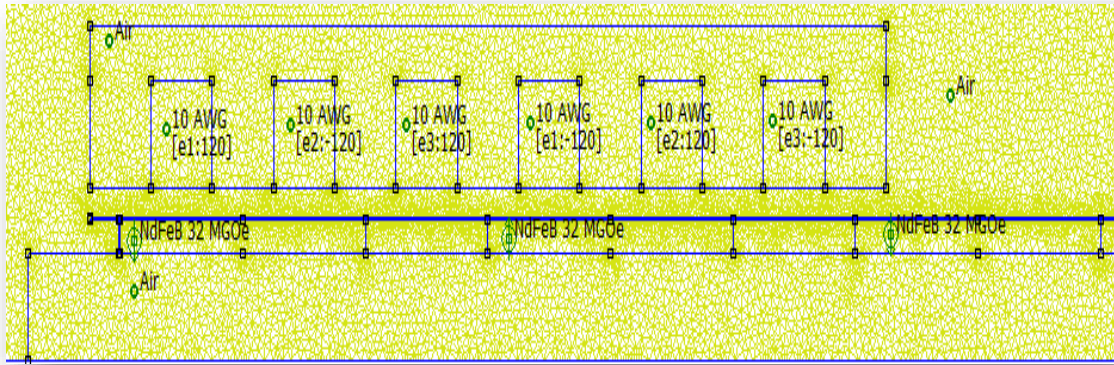


Figure 35: Détail du maillage de la structure du MSLin sous FEMM

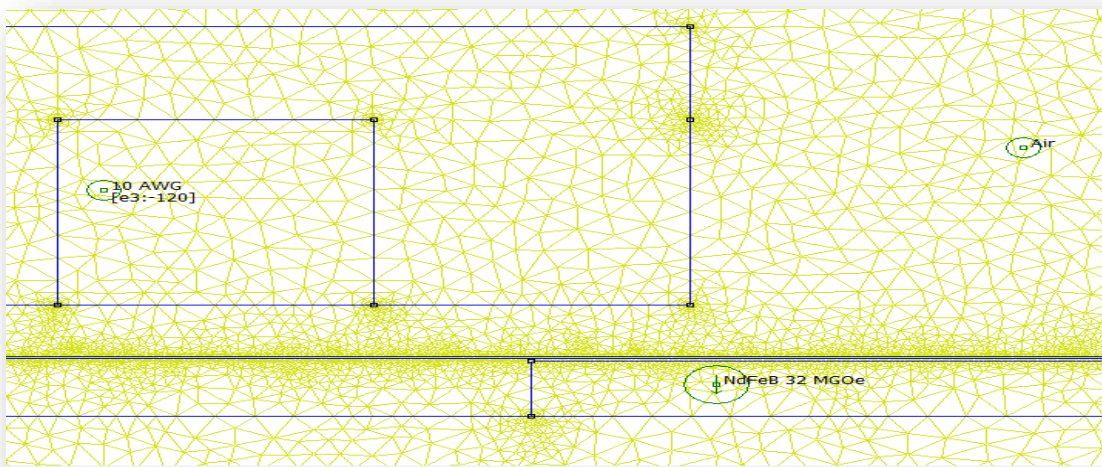


Figure 36: Détail du maillage près de l'entrefer

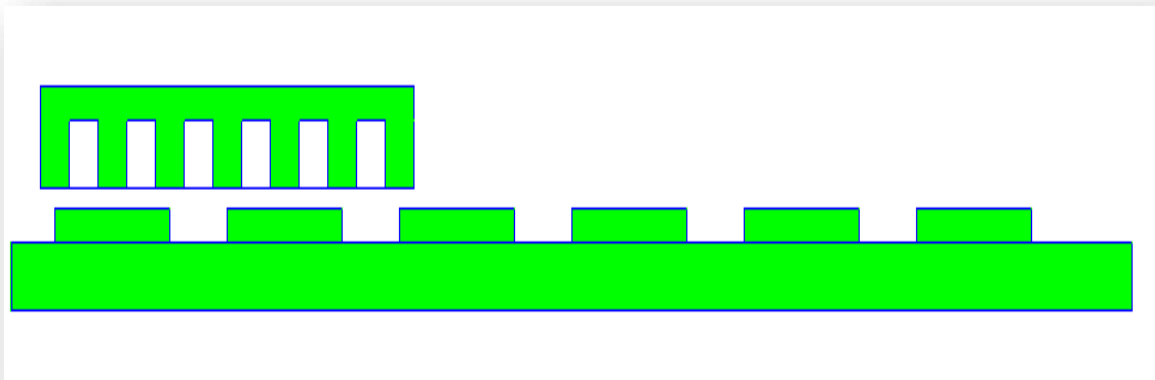


Figure 37: Structure des blocs de mêmes matériaux du MSLin sous FEMM

Chapitre III : Modélisation du Moteur Linéaire avec FEMM

La figure 38 permet la visualisation de la valeur de l'induction magnétique en tout point. Nous observons que le champ magnétique est plus fort sur les bords des aimants permanents.

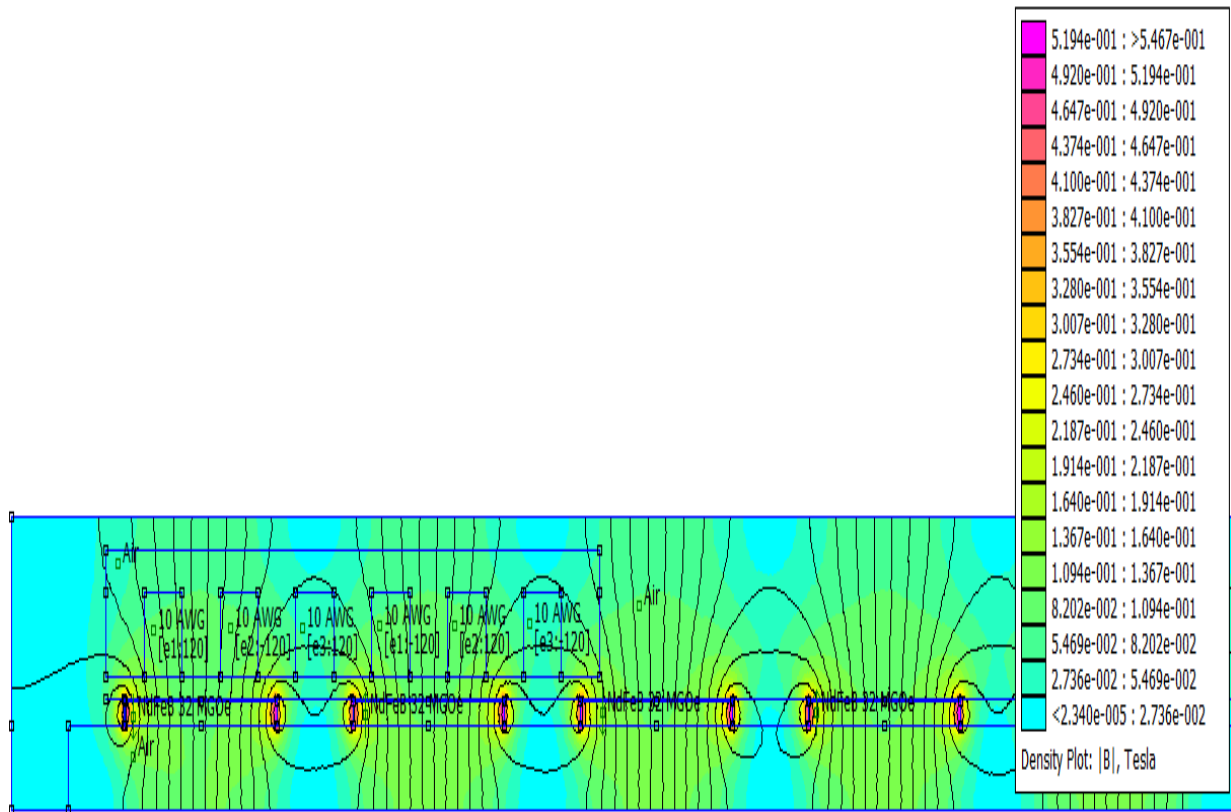


Figure 38: Champ magnétique de MSlin sous FEMM

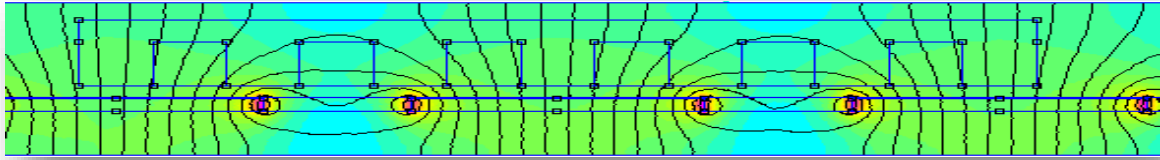
La vérification par éléments finis de l'état de saturation de la machine, la Figure 38 montre que l'induction dans les différentes parties du moteur linéaire est inférieure à 0.3 Tesla

6.1. Distribution de l'induction magnétique dans la structure

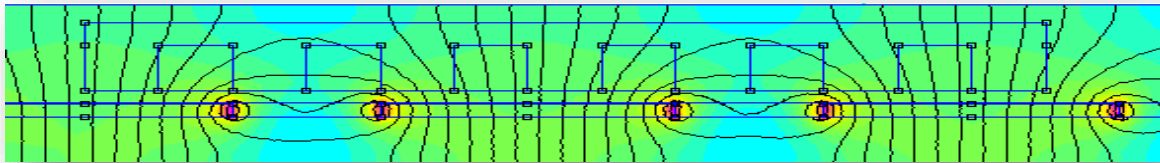
Une fois l'induction magnétique calculée en tout point, le post-processing de FEMM permet de calculer des intégrales sur des contour ou sur des bocs. La méthode utilisée est celle de l'intégrale volumique du tenseur de Maxwell pondéré (Weighted Stress Tensor Volume Integral) [10]. Elle nous permet d'obtenir directement les forces tangentielle et normale que subit le mobile. La figure 39

Chapitre III : Modélisation du Moteur Linéaire avec FEMM

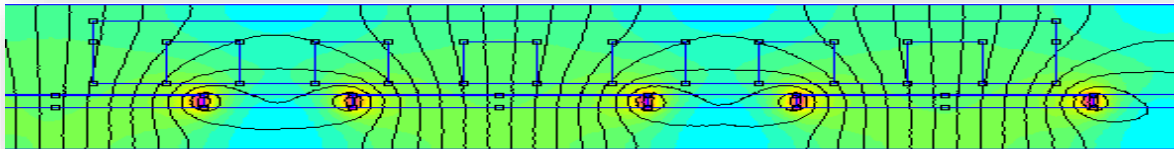
présente la distribution de l'induction magnétique dans la structure choisie et le calcul de la force en x et z par rapport à la position $x = l_d = 20$ mm.



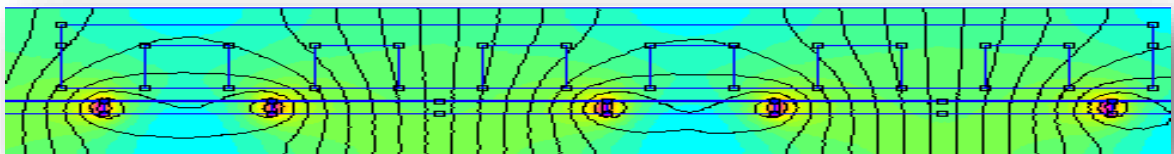
$$x = +2l_d \quad F_x = 0.261 \text{ N} \quad ; \quad F_y = -0.048 \text{ N}$$



$$x = +5/2l_d \quad F_x = 0.198 \text{ N} \quad ; \quad F_y = -0.119 \text{ N}$$



$$x = +3l_d \quad F_x = 0.091 \text{ N} \quad ; \quad F_y = -0.105 \text{ N}$$



$$x = +3l_d \quad F_x = -0.029 \text{ N} \quad ; \quad F_y = -0.137 \text{ N}$$

Figure 39: Calcul des forces sur les 4 positions du MSlin

Les forces sont mesurées pour différentes valeurs de position suivant l'axe x . La Figure 39 représentent les forces en x et y respectivement, sur un de déplacement de longueur. On remarque que la force tangentielle varie de -0.05N à 0.5N et que la force normale varie de-0.13N à 0.05N.

6.2- Variation de la force tangentielle et normale pour différents matériaux utilisés

Pour les différentes valeurs de la perméabilité magnétique relative du matériau de la partie mobile, On va utiliser d'autres matériaux pour pouvoir augmenter l'échange d'énergie entre les aimants et le bobinage du mobile.

En vas utilisé Une culasse en acier (steel 1018) $\mu_r = 1$ pour la partie mobile, un support en plexiglas $\mu_r = 1$ pour le rail, pour un entrefer $e = 3$ mm, $l_x = 10$ mm, $l_y = 30$ mm, $I = 2A$ et $N = 120$ spires.

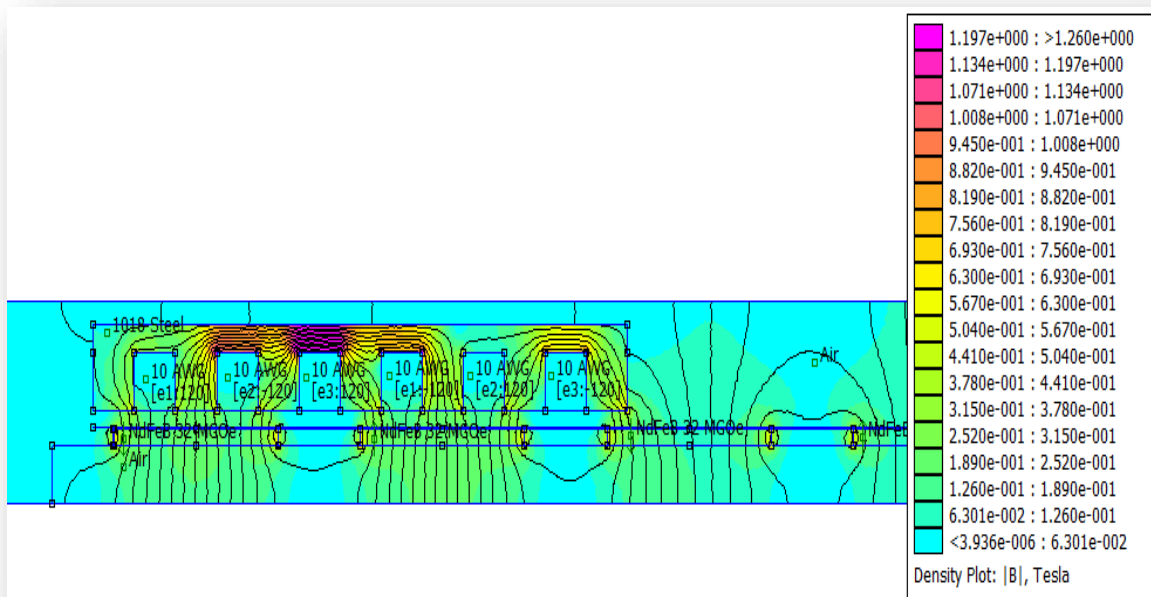


Figure 40: champ magnétique de MSlin par une culasse en acier sous FEMM

L'induction dans les différentes parties du moteur linéaire est inférieure à 1.19 Tesla.

Chapitre III : Modélisation du Moteur Linéaire avec FEMM

Structure	1	2
Mobile	Air	Acier 1018
Rail	Air	Air

Tableau 4:Matériaux utilisés dans différentes structures

Matériau utilisé	Air	Acier-inox ou acier 1018
Perméabilité relative	1	529

Tableau 5:Perméabilités relatives pour chaque matériau

D'après la loi de Laplace l'induction magnétique est directement proportionnelle à la force, Cela signifie une augmentation de la force appliquée sur la partie de mobile lors du changement la matière de culasse en perméabilité plus élevée comme illustré sur la figure 40

7-Conclusion

On a présenté dans ce chapitre le fonctionnement de la méthode des éléments finis et son application pour l'analyse des champs électromagnétiques, dans une section longitudinale d'un moteur linéaire synchrone à aimants.

Tout d'abord, la méthode des éléments finis en 2D est utilisée. Ce qui permet de mettre en évidence les problèmes qui n'existent pas dans une machine ronde, comme la force de collage (force normale) qui est nettement supérieure à la force de traction.

La sélection appropriée des matériaux et des dimensions pourra assurer le bon fonctionnement du moteur.

Conclusion Générale

Dans les chaînes de transmission de mouvement dans les machines à dynamique rapide, le moteur linéaire est devenu un des éléments principaux.

L'objectif de notre travail a donc consisté à étudier un moteur linéaire synchrone à aimants permanents en utilisant une modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis.

Cette étude a pour but de déterminer l'effet de différents paramètres du moteur sur son fonctionnement et de valider éventuellement les hypothèses du modèle analytique classiquement adopté pour l'élaboration de la commande du moteur.

Après avoir introduit le principe de fonctionnement du moteur linéaire, nous avons exposé les différents inconvénients inhérents à sa longueur finie. Une synthèse de la bibliographie récente nous a permis de cerner les possibilités structurelles proposées dans différents travaux pour atténuer, voire éliminer les effets de la longueur finie ainsi que ceux dus aux encoches.

Nous avons ensuite introduit le modèle analytique utilisé pour étudier les performances et élaborer les commandes du moteur. Nous avons explicité les hypothèses simplificatrices et avons suggéré les limites qu'impliquent ces dernières sur la validité du modèle.

Un modèle numérique en MEF-2D a alors été élaboré pour étudier les effets de différents matériaux sur le fonctionnement du moteur.

Il est plus aisé de l'utiliser pour une étude paramétrique et calculer des grandeurs qui sont difficilement accessibles expérimentalement.

dans le cas du modèle analytique, les inductances cycliques ne sont pas constantes. Elles varient en fonction de la position.

Chapitre III : Modélisation du Moteur Linéaire avec FEMM

Face à ces observations et au regard des résultats obtenus, des perspectives intéressantes, pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du moteur synchrone linéaire, se dégagent :

Compléter la partie modélisation, en étudiant d'autres phénomènes, tels que les courants de Foucault dans les aimants, induisant des pertes qui augmentent localement la température des aimants, les forces de détente sont soumises aux champs magnétiques issus des courants, quiaturent les dents du mobile et ainsi mettre en évidence d'autres phénomènes perturbateurs.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] <https://www.etel.ch/fr/moteurs-lineaires/principe/>
- [2] Rachid ASKOUR Mémoire de DEA " Modélisation numérique d'un moteur linéaire synchrone à aimants permanents " ENIM – Maroc 2001-2002
- [3] TAKORABET noureddine "OPTIMISATION DE L'ALIMENTATION DES CONVERTISSEURS ELECTROMECHANQUES LINEAIRES A INDUCTION" DOCTORAT de l'I.N.P.L. le 19 Décembre 1996
- [4] Samuel CHEVAILLER comparative study and selection criteria of linear motors, thèse de doctorat .2006.
- [5] Bernard Multon et Jean Bonal, les entraînements électromécaniques directs : diversités, contraintes et solutions. CEMD'99, ENS de Cachan SEE, France.
- [6] Adjina Miloud " Contribution a l'étude d'un Moteur synchrone linéaire a Aimants permanents" Université de Batna
- [7] KHOUANE Boulanouar" Etude et Commande d'un Moteur Synchrone Linéaire à Aimants "
- Magister En Automatique Université Aboubekr BELKAID TLEMCEM, 2012-2013
- [8] G. Remy, "commande optimisée d'un actionneur linéaire synchrone pour un axe de positionnement rapide", thèse de doctorat ENSAM, CER de Lille, 2007.
- [9] Denis Lemoine, "Commande en poussée d'un moteur linéaire synchrone application aux machines-outils à dynamique élevée", Mémoire C.N.A.M – centre régional associé de Lille - Mai 2002.
- [10] <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>, page 44
- [11] http://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Lorentz
- [12] L. Baghli, A. Rezzoug, "Actionneurs linéaires : MRVlin et MSlin, un projet pédagogique", J3eA, Vol. 7 No. HORS SÉRIE 1 (février 2008), Special Edition: CETSIS 2007. ISSN (version électronique) : 1638-1963.
- [13] D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.0.1 (03Dec2006): <http://femm.foster-miller.net>
- [14] <http://www.femm.info>

Liste des abréviations

ML : moteur linéaire

MSLin : moteur synchrone linéaire

Fem : force électromotrice

FEMM : Finit Element Methode Magnetic

MLI : modulation de largeur d'impulsion

Liste des symboles

F_x : force de traction

L_y : Largeur du primaire

L_x : largeur du secondair

B : l'induction magnétique

I : densité de courant

N_s : nombre de spire par phase

R : résistance statorique

L_i : inductance statorique

M_{ij} : mutuelles inductance entre phases

a, b, c : enroulement statorique

r_i : résistance d'enroulement de primaire

τ_p : Pas polaire

\emptyset : flux magnétique

B_f : la valeur maximale du fondamental du champ crée par les aimants.

l_a : la largeur des aimants.

τ_p : Pas polaire.

p : nombre de paires de pôles.

$K = \frac{\pi}{\tau_p}$: nombre d'onde

h_s : Épaisseur de la culasse

l_a : Longueur des aimants

L_a : Largeur des aimants

h_a : Hauteur des aimants