



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAÏA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER EN ELECTROTECHNIQUE
Option : **Electromécanique**

Thème

*Moteur Linéaire pour Train à
Lévitiation Magnétique*

Présentée par :

Mr. DJEMAI Hicham
Mr. DROUCHE Ali

Encadré par :

Mr. A. BOUZIDI
Mr. B. MAUCHE

Année Universitaire 2014/2015

Remerciements

Nous tenons, en premier lieu à remercier le Bon Dieu pour le courage et la patience qui nous a donné afin de mener ce projet à terme.

On tient à remercier tous d'abord notre promoteur, Mr. A.BOUZIDI pour ces conseils, orientations et sa disponibilité le long de l'élaboration de ce travail.

Nous remercions aussi Mr. B.MAOUCHE notre co-promoteur pour son aide, sa constante disponibilité et ses précieux conseils qui ont permis à ce travail de voir le jour.

Nous sommes aussi très reconnaissants aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'accepter de juger ce travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques techniques.

Enfin, nous tenons à remercier, tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin pour l'élaboration de ce présent travail.

Dédicaces

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 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 mon cher frère. A mes deux chères sœurs

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

A mon binôme Ali et toute sa famille

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.



Hicham

Merci A Vous Tous

Dédicaces

Je tien à dédier ce mémoire :

A mon père je lui dis :

A quel point tes précieux conseils ma servis. Quand je tu cherches, ce n'est pas la peine d'aller très loin, car je te trouve toujours à l'intérieur de moi. J'espère que tu es fier de ton fils.

A ma très chère mère :

A l'ange qui a appris seulement à aimer qui ne pourrait jamais mais jamais perdre cette habitude. Je pense toujours à toi, ma mère, et j'apprécie énormément ton sacrifice. A la mère, l'ombre de clémence de dieu sur la terre et pour l'humanité.

Mon travail est dédié aussi à mes grands mère, ma sœur Mouma et son mari Aziz et ses enfants, mes frères Nabil, Djamel, Doudine et Farid. À tous ceux qui me sont très chers, à mon binôme Hicham et sa famille et à mes amis, à ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir.



Ali

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Fig. I.1. Train traditionnel et train à lévitation magnétique..... | 4 |
| Fig. I.2. Brevetée de Zehen en 1902 sur rails..... | 5 |
| Fig. I.3. Application du moteur linéaire avec des roues | 6 |
| Fig. I.4. Transformation d'un moteur rotatif en moteur linéaire..... | 8 |
| Fig. I.5. Géométrie linéaire plate, en U et tubulaire | 9 |
| Fig. I.6. Classement des moteurs linéaires selon leur géométrie | 10 |
| Fig. I.7. Classement des moteurs linéaires selon leur circuit magnétique | 11 |
| Fig. I.8. Structure à stator simple | 12 |
| Fig. I.9. Structure à stator double..... | 12 |
| Fig. I.10. Structure tubulaire à partie mobile interne | 13 |
| Fig. I.11. Structure tubulaire à partie mobile externe | 13 |
| Fig. I.12. Structure à inducteur solidaire du rail fixe..... | 14 |
| Fig. I.13. Structure à inducteur solidaire du rail mobile | 15 |
| Fig. I.14. Structure à induit fixe et inducteur mobile | 15 |
| Fig. I.15. Moteur linéaire à inducteur simple | 17 |
| Fig. I.16. Moteur linéaire à inducteur simple sans circuit magnétique de retour | 18 |
| Fig. I.17. Moteur linéaire à induit en forme d'échelle | 18 |
| Fig. I.18. Moteur linéaire à induit composite | 19 |
| Fig. I.19. Moteur linéaire à induit magnétique massif | 19 |
| Fig. I.20. Moteur linéaire a aimants permanents..... | 20 |
| Fig. I.21. Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable | 21 |
| Fig. I.22. Moteur linéaire réluctant..... | 22 |
| Fig. I.23. Distribution du flux dans un moteur linéaire réluctant polarisé | 23 |
| Fig. I.24. système de Maglev..... | 24 |
| Fig. I.25. Le système de guidage | 25 |
| Fig. I.26. Frein linéaire à induction | 26 |
| Fig. I.27. panneaux de freinage aérodynamiques | 27 |
| Fig. I.28. Suspension électromagnétique avec du guidage intégré..... | 28 |
| Fig. I.29. Suspension électromagnétique avec du guidage..... | 29 |
| Fig. I.30. Suspension électrodynamique | 30 |
| Fig. I.31. System MLX Japonais..... | 31 |
| Fig. I.32. comparaison entre les trains traditionnels et les trains à lévitation magnétique | 32 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----------|
| LISTE DES FIGURES..... | 7 |
| TABLE DES MATIERES..... | 1 |
| INTRODUCTION GENERALE | 5 |
| I- Train à lévitation magnétique et moteurs linéaires | 8 |
| I.1- Introduction..... | 9 |
| I.2- Histoire du train traditionnel..... | 9 |
| I.3- Présentation du moteur linéaire | 11 |
| I.3.1- Avantages et inconvénients..... | 12 |
| I.3.2- Principe de base..... | 13 |
| I.3.3- Structure et topologies des moteurs linéaires..... | 14 |
| I.3.4- Les actionneurs linéaires plans..... | 16 |
| I.3.5- Les actionneurs linéaires cylindriques | 17 |
| I.4- Géométries des machines linéaires | 18 |
| I.5- Particularités du moteur linéaire | 20 |
| I.5.1- Guidage | 20 |
| I.5.2- Entrefer..... | 21 |
| I.5.3- Effets d'extrémités | 21 |
| I.6- Différents types de moteurs linéaires | 21 |
| I.6.1- Moteur à inducteur simple | 21 |
| I.6.2- Moteur à inducteur simple sans circuit de retour | 22 |
| I.6.3- Moteur à induit en forme d'échelle | 23 |
| I.6.4- Moteur linéaire a induit composite | 23 |
| I.6.5- Moteur linéaire à induit massif | 24 |
| I.6.6- Moteur linéaire à aimants permanents : | 24 |
| I.6.7- Moteurs pas à pas linéaires | 25 |
| I.6.7.1- Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable | 25 |
| I.6.7.2- Moteur pas à pas linéaire polarise..... | 26 |
| I.7- Système à lévitation magnétique (Maglev) | 28 |
| I.7.1- Le système de propulsion..... | 28 |
| I.7.2- Le système de guidage latéral | 29 |
| I.7.3- Le système de freinage..... | 30 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| I.7.3.1- | Frein linéaire | 30 |
| I.7.3.2- | Frein aérodynamiques | 31 |
| I.7.4- | Le développement du Maglev | 32 |
| I.7.4.1- | Lévitiation électromagnétique..... | 32 |
| I.7.4.2- | Lévitiation électrodynamique..... | 33 |
| I.7.5- | Avantages et inconvénients..... | 34 |
| I.8- | CONCLUSION | 35 |
| II- | Modèle mathématique et méthode des éléments finis..... | 37 |
| II.1- | Introduction..... | 38 |
| II.2- | Equations de MAXWELL | 38 |
| II.2.1- | Forme différentielle des équations de Maxwell | 38 |
| II.2.2- | Forme intégrale des équations de Maxwell..... | 39 |
| II.3- | Relation du milieu..... | 40 |
| II.4- | La loi d'ohm | 41 |
| II.5- | L'équation de conservation de la charge | 42 |
| II.6- | Relations de passage | 42 |
| II.7- | Conditions aux limites | 44 |
| II.7.1- | Condition de type DIRICHELET | 44 |
| II.7.2- | Condition de type NEWMANN..... | 44 |
| II.7.3- | Condition mixte..... | 44 |
| II.7.4- | Condition de périodicité et d'anti-périodicité..... | 44 |
| II.8- | Equation électromagnétique | 45 |
| II.8.1- | Hypothèses simplificatrices | 45 |
| II.8.2- | Equation électromagnétiques 2D | 46 |
| II.8.2.1- | Formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique..... | 46 |
| II.9- | Equations magnétodynamiques bidimensionnelles | 47 |
| II.10- | Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles | 48 |
| II.10.1- | Méthodes analytiques..... | 48 |
| II.10.2- | Méthodes numériques | 48 |
| II.11- | Méthode des éléments finis (MEF)..... | 49 |
| II.11.1- | Discrétisation par éléments finis | 49 |
| II.11.2- | Formulation Intégrale..... | 50 |
| II.11.2.1- | Formulation Variationnelle..... | 50 |

| | |
|---|-----------|
| II.11.2.2- Formulation résidus pondérés | 50 |
| II.12- Notion d'énergie et de Co-énergie..... | 51 |
| II.12.1- Expression de l'énergie magnétique | 51 |
| II.12.2- Expression de la Co-énergie magnétique..... | 51 |
| II.13- La force magnétique | 52 |
| II.13.1- La force déduite à partir de l'énergie magnétique totale | 52 |
| II.13.2- La force déduite à partir de la Co-énergie magnétique | 52 |
| II.13.3- La force de Lorentz | 52 |
| II.13.4- La force déduite à partir du tenseur de Maxwell..... | 53 |
| II.13.5- Force déduite à partir des travaux virtuels | 53 |
| II.14- Conclusion | 54 |
| III- Application et résultats..... | 55 |
| III.1- Introduction..... | 56 |
| III.2- Présentation du dispositif étudié..... | 56 |
| III.2.1- Caractéristiques géométriques | 58 |
| III.2.2- Définition du problème | 58 |
| III.2.3- Caractéristiques physiques et maillages..... | 59 |
| III.3- Equations électromagnétiques | 60 |
| III.4- Conditions aux limites | 61 |
| III.5- Expression de la force électromagnétique | 61 |
| III.6- Organigramme de calcul..... | 61 |
| III.7- Application | 62 |
| III.7.1- Définition de la géométrie..... | 62 |
| III.7.2- Distribution du champ d'induction : | 64 |
| III.7.3- Calcul de la force de poussée..... | 65 |
| III.8- Influence des propriétés géométriques et physique | 66 |
| III.8.1- Influence de l'entrefer | 66 |
| III.8.2- Influence de la perméabilité magnétique relative | 67 |
| III.8.3- Influence de l'épaisseur de l'induit..... | 67 |
| III.8.4- Influence de la largeur des dents..... | 68 |
| III.8.5- Influence de la conductivité de l'induit..... | 69 |
| III.9- Conclusion | 70 |
| CONCLUSION GENERALE | 71 |

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....72

INTRODUCTION GENERALE

La lévitation et la propulsion électromagnétique sont particulièrement appliquées dans le domaine du transport ferroviaire pour le transport des populations et des marchandises. Ce dernier est le poumon de l'économie dans les pays développés.

En Algérie, un intérêt particulier a été accordé à ce domaine ces dernières années par l'installation de nouvelles lignes pour trains rapide, tramways et métros. La maîtrise de cette technologie par la recherche et des formations s'avère nécessaire afin de développer ce secteur.

Un train à lévitation magnétique est un train qui utilise les forces magnétiques pour se déplacer. Il utilise le phénomène de sustentation électromagnétique et n'est donc pas en contact avec des rails, contrairement aux trains classiques. Ce procédé permet de supprimer la résistance au roulement et d'atteindre des vitesses plus élevées : le record est de 603 km/h obtenu en avril 2015 soit, 28,2 km/h de plus que le record d'un train classique (574,8 km/h par une version modifiée du TGV en 2007) [1].

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, les Maglev utilise la lévitation sur la voie de guidage, et se propulse grâce à un moteur linéaire.

Un tel train possède de nombreux atouts indéniables. En premier lieu, il est intéressant de noter que les trains à lévitation magnétique ont la capacité de gravir des pentes plus raides et de prendre des virages plus serrés que leurs homologues "classiques", avantage qui permettrait grandement de raccourcir certains tracés de voies, notamment dans les pays très montagneux. De plus, et c'est certainement leur plus grand atout, les trains à lévitation magnétique ne subissent aucun effort de frottement avec leurs rails, ce qui constitue évidemment une amélioration de très grande ampleur. L'impact que peuvent avoir de tels trains est donc non seulement économique mais aussi écologique. C'est d'ailleurs ce constat qui a poussé certains pays à développer leurs propres projets de train à lévitation magnétique.

De nos jours, les moteurs linéaires sont devenus de plus en plus utilisés dans le système ferroviaire. Sans système intermédiaire de transmission, le moteur linéaire permet de générer directement une force de poussée. Les trains à moteur linéaire sont plus robustes aux conditions météorologiques et plus confortables pour les passagers.

L'écriture des équations aux dérivées partielles traduisant les phénomènes électromagnétiques et celles mécaniques, présentées dans le procédé de la conversion électromécanique s'obtient à partir des équations fondamentales de la physique et des propriétés des matériaux qui composent le système à étudier. Dans le cas de l'électromagnétisme, ce sont les équations de MAXWELL et les caractéristiques électrique (conductivité électrique) et magnétique (perméabilité magnétique) des matériaux.

Les moyens informatiques et les logiciels dits de conception assistés par ordinateur constituent des moyens puissants de calcul et d'analyse des systèmes et des structures électromagnétiques en particulier. Les outils de calcul puissant qui ne cessent de s'améliorer, dans le domaine de l'électrotechnique sont généralement basés sur des méthodes numériques dont le principe est souvent connu depuis bien longtemps. La méthode des éléments finis en est un exemple lorsqu'elle est convenablement appliquée aux problèmes d'électromagnétisme plans, volumique ou axisymétriques, elle permet d'obtenir des résultats très proches de la réalité. Elle devient ainsi parfaitement adaptée à la simulation des performances d'un nouveau produit et à son optimisation en diminuant considérablement le nombre de prototype à réaliser. Ce fait, la simulation devienne véritable outil de prototypage virtuel et de référence du concepteur [2], [3].

L'objectif principal qu'on s'est fixé est d'étudier la force de poussée du moteur linéaire d'un train à sustentation magnétique. On va évaluer la force électromagnétique sur un inducteur d'une machine linéaire à induction de forme plate par la méthode de LORENTZ en fonction des propriétés physiques et géométriques de l'inducteur et de l'induit en exploitant le logiciel FEMM (Finite Element Magnetic Method). Le problème de la lévitation ne sera pas étudié dans ce travail.

Nous commençons notre travail par le chapitre I consacré à l'histoire des trains suivi par la présentation des machines linéaires. Nous présentons aussi les géométries, les particularités et les différents types de moteurs linéaires. On termine ce chapitre par la présentation du système de lévitation magnétique.

Le deuxième chapitre est consacré aux équations régissant le phénomène électromagnétique et mécaniques. Nous allons élaborer les formulations en potentiel vecteur magnétique en tenant compte des hypothèses simplificatrices en utilisant les équations de Maxwell. Nous verrons ensuite les différentes méthodes permettant la résolution de cette formulation. Nous expliquons ensuite la méthode des éléments finis pour la résolution du

problème électromagnétique. Nous terminons le chapitre par les méthodes de calcul de la force induite.

Dans le troisième chapitre nous présentons le dispositif de la machine linéaire sur lequel sera porté notre étude, en définissant sa géométrie, ces propriétés et les équations électromagnétique aux dérivées partielles régissant chaque domaine, aussi que les expressions des forces électromagnétique induite et le développement de l'algorithme de calcul. Le programme de calcul sous le logiciel FEMM sera appliqué ensuite pour l'évaluation de la force induite pour différentes propriétés géométriques et physique de l'inducteur et de l'induit.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

I- Train à lévitation magnétique et moteurs linéaires

I.1- Introduction

Un train volant, qui y aurait cru ? Depuis des siècles, l'homme, en recherche continue et perpétuelle, ne peut étouffer en lui l'ambition d'aller toujours plus vite surtout dans ce monde où le temps ne compte que pour de l'or. Depuis la première locomotive ayant vu le jour au pays de Galles au XIX^e siècle jusqu'à l'Eurostar, les plus grands génies de l'univers n'arrêtent de se remuer les méninges pour découvrir des moyens de transports toujours plus rapide. Cependant, les défis environnementaux croissants du XX^e siècle poussent l'homme à repenser son rôle dans la protection de la planète donc à utiliser des énergies plus "vertes". Des énergies plus propres et respectueuses de l'environnement et ceci pour assurer un développement économique plus durable pour les générations futures. L'histoire commence en Allemagne avec Hermann Kemper qui va défier les lois de la physique grâce à des principes physiques nouveaux comme la lévitation magnétique et créer un train duquel est supprimé un élément resté jusque-là indispensable : la roue. L'humanité toute entière est alors témoin d'un lever de soleil prometteur qui risque de bouleverser l'histoire scientifique mondiale...

I.2- Histoire du train traditionnel

Les premiers rails firent leur apparition dans les mines de charbon en 1544 en Alsace, France. Ils étaient en bois, et les chariots qui circulaient dessus étaient tirés par des chevaux. C'est le 21 février 1804, au pays de Galles, que la première locomotive à vapeur construite par Richard Trevithick, fonctionna sur des rails. Elle parcourut 15 kilomètres à la vitesse de 8 km/heure. Cette tentative ne fut pas couronnée de succès, l'engin était si lourd qu'il brisa la voie.

Le transport ferroviaire connut un grand succès en Angleterre, 50 000 ouvriers ont été employés pendant 40 ans à partir de 1830 pour construire les voies de chemins de fer. Les réseaux de chemins de fer ne cessèrent donc de grandir jusqu'en 1870. C'est alors que l'électricité fit son apparition dans les zones urbaines. On essaya d'établir un nouveau chemin de fer urbain électrique. Suite à cet essai et au développement de l'électricité, des chemins de fer souterrains furent établis, comme celui de Londres et de New York. L'électrification connaissant un grand succès, les compagnies décidèrent de l'appliquer sur les grandes lignes.

Finalement, en 1947, des essais en Allemagne puis en France montrèrent qu'un courant alternatif de 25 000 V monophasé à 50 Hz est l'idéal pour le fonctionnement du train

(c'est le courant industriel). Ce courant fut alors généralisé, et les pays qui n'avaient pas encore commencé leur électrification le sélectionnèrent.

Toutefois, le train électrique n'a pas totalement remplacé la locomotive à vapeur. Celle qui pourrait être désignée comme logique successeur est la locomotive diesel-électrique. Son utilisation commença dans les années 1950 et s'imposa dans beaucoup de régions, particulièrement aux Etats-Unis. Enfin, le TGV fit son apparition le 27 septembre 1981 en France.

Un train à sustentation magnétique est un train qui se déplace grâce aux forces magnétiques. Il utilise le phénomène de sustentation électromagnétique et n'est donc pas en contact avec les rails : c'est la technologie de non-contact, contrairement aux trains classiques. Ce procédé permet de minimiser les frottements et d'atteindre des vitesses plus élevées : le record est de 581 km/h (obtenu en 2003), soit 6,2 km/h de plus que le record d'un train classique (574,8 km/h par une version modifiée du TGV en 2007).

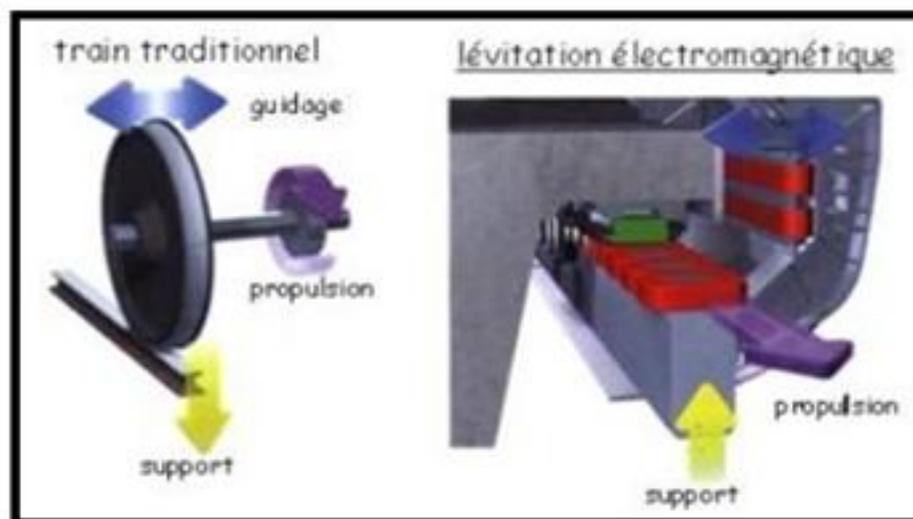


Fig. I.1. Train traditionnel et train à lévitation magnétique

Depuis l'invention du train au début du XIXème siècle, les véhicules avaient toujours été propulsés par des roues en contact avec les rails. La propulsion se faisait alors par une force mécanique exercée par le moteur sur les roues. Ce type d'application utilise des roues et des rails traditionnels. Le train est propulsé par des forces magnétiques provenant de courants induit dans une bande conductrice située entre les rails. La première apparition de moteur linéaire pour la traction ferroviaire débute en 1905 grâce à l'idée de Zehen [4]. C'est un moteur linéaire polyphasé enserrant une plaque disposée verticalement entre les deux rails. La Figure (I.1) présente le brevet. Ce type de train peut avoir des roues en acier ou

pneumatique. Le circuit inducteur est sur le véhicule et le circuit induit est constitué par le 3^{ème} rail.

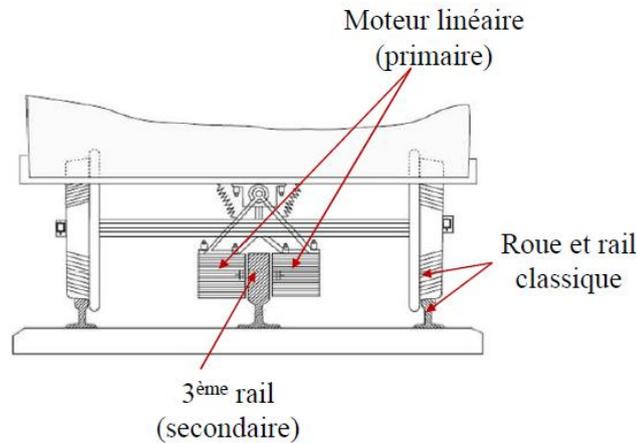


Fig. I.2. Brevetée de Zehen en 1902 sur rails [4]

I.3- Présentation du moteur linéaire

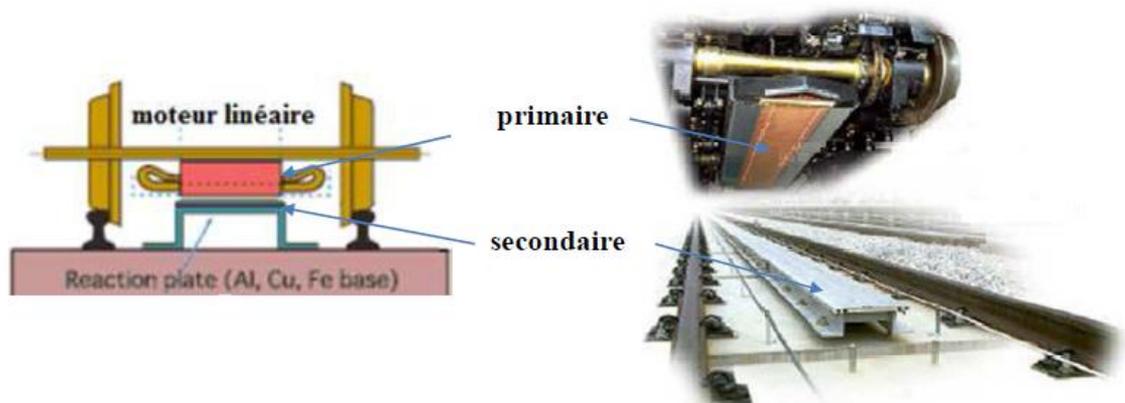
L'entraînement électromécanique direct permet de supprimer les organes de transmissions mécaniques : réducteurs, multiplicateurs, transformation de mouvement de rotation et mouvement linéaires

Le moteur linéaire est dit à entraînement linéaire direct, c'est à dire qu'il n'y a aucune pièce pour convertir un mouvement d'une autre nature (rotatif par exemple) en mouvement linéaire. Le mouvement et l'effort sont directement appliqués au niveau de la charge, alors que les autres entraînements linéaires sont effectués sur la base d'un mouvement rotatif transformé en mouvement linéaire. Pour le second mode, il reste très employé actuellement et nécessite un organe mécanique entre le moteur et sa charge.

Il y a deux types de base de moteurs linéaires : ceux à accélération faible et ceux à accélération rapide. Les moteurs linéaires à faible accélération sont généralement utilisés pour les applications dans lesquelles l'endurance (ou la résistance) est favorisée par rapport à la puissance ou l'énergie. Ces types de moteurs linéaires sont conçus pour le transport (trains à lévitation magnétique) et les systèmes automatisés.

Les moteurs linéaires à accélération rapide sont des moteurs qui peuvent produire des vitesses plus élevées pour des courtes périodes de temps, tels que ceux utilisés dans les équipements militaires (torpilles, lanceur...), des engins spatiaux de propulsion, etc.

Aujourd'hui, les moteurs linéaires les plus utilisés en traction ferroviaire sont des moteurs plats à un seul primaire. La Figure (I.3.a) présente une structure de traction à un seul primaire. C'est un moteur linéaire avec un primaire court. Le primaire est installé sur le train. Le secondaire est en aluminium avec une bande magnétique en fer pour le retour du champ magnétique. L'ensemble est installé au sol le long des rails. La Figure (I.3.b) présente l'installation du moteur linéaire sur le train. Le secondaire au sol est souvent appelé troisième rail. Les roues servent simplement à soutenir le train. Elles ne propulsent pas le train ce qui résout le problème d'adhérence.



(a) Structure [5]

(b) Montage du moteur linéaire sur un train [6]

Fig. I.3. Application du moteur linéaire avec des roues

I.3.1- Avantages et inconvénients

La traction linéaire apporte de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes de transports traditionnels.

Les roues servent seulement à soutenir le poids du véhicule. De plus le train à 1 moteur linéaire n'a plus besoin de système intermédiaire de transformation de la force de rotation en force de translation. La suppression de cette partie permet de réduire la section du véhicule. La force de poussée provient du troisième rail, et ne dépend plus du contact roue-rail comme dans le train traditionnel

Le train à moteur linéaire satisfait à tous les besoins de transport urbain. Toutefois les recherches se poursuivent afin d'améliorer la maintenance, de réduire l'impact environnemental, et la consommation énergétique. Ils ont aussi des inconvénients ; Le rendement et le facteur de puissance sont plus faibles que ceux des moteurs traditionnels, à cause de l'entrefer important nécessaire au système d'entraînement direct. Les moteurs

linéaires ont des effets d'extrémités qui complexifient leur commande. Le champ magnétique n'est pas périodique dans l'espace. Ainsi le contrôle du moteur linéaire est plus complexe et donc plus coûteux.

I.3.2- Principe de base

En 1821, après la découverte de l'électromagnétisme par le chimiste Danois Hans Oersted, le physicien anglais Michael Faraday invente le premier dispositif de conversion électromagnétique. La conception initiale du moteur électrique date de la deuxième moitié du XIXème siècle. Le premier brevet No. 391968 de moteur électrique, à courant alternatif, est déposé par le physicien d'origine Serbe Nikola Tesla en 1887.

Le moteur électrique a été envisagé initialement sous la forme linéaire puis, presque aussitôt, sous la forme rotative. Un moteur linéaire peut être considéré comme un moteur rotatif qui est coupé selon la direction radiale et déroulé à plat. La Figure (I.4) présente le passage d'un moteur rotatif à un moteur linéaire.

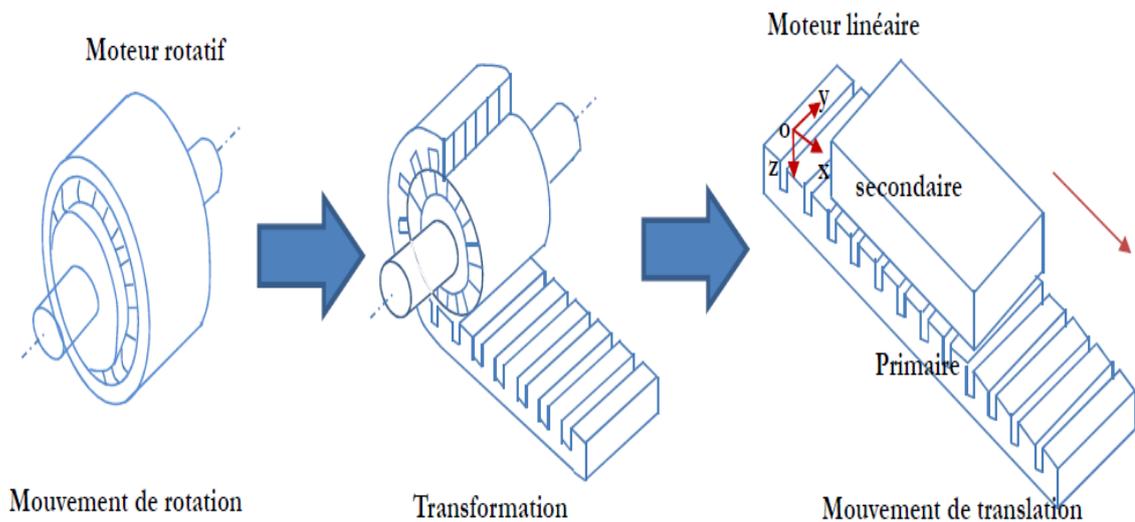


Fig. I.4. Transformation d'un moteur rotatif en moteur linéaire

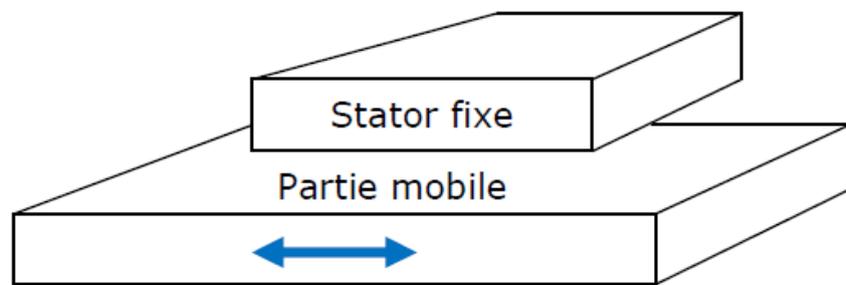
La Figure (I.4) présente un moteur linéaire à induction avec un seul primaire. Les enroulements sont placés suivant l'axe transversal \overrightarrow{OY} . Ainsi, les courants créent un champ d'induction magnétique, dirigé suivant l'axe \overrightarrow{OZ} . Si les enroulements sont convenablement répartis et alimentés par une source électrique polyphasée de pulsation ω , le champ magnétique se propage sous la forme d'une onde glissante selon la direction \overrightarrow{OX} .

$$B = B_{\max} \cos\left(\frac{\pi^* x}{\tau} - \omega t\right) \text{ où } \tau \text{ représente le pas polaire du moteur. En réaction,}$$

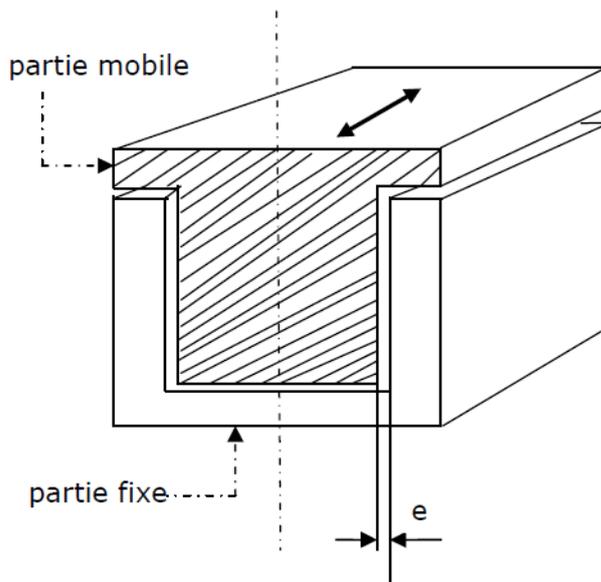
les courants induits créent le flux magnétique au secondaire. Une force de translation apparaît. Le principe est identique à celui du moteur rotatif à induction, mais au lieu de créer un champ magnétique tournant, c'est un champ magnétique de translation qui est créé. Tous les types de moteur rotatif peuvent être réalisés en moteur linéaire.

I.3.3- Structure et topologies des moteurs linéaires

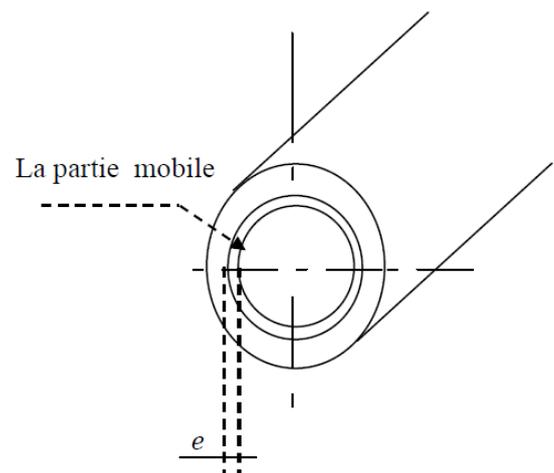
Les moteurs linéaires sont caractérisés par plusieurs topologies avec des géométries de type plat, forme U ou tubulaire. Ces différentes variantes offrent une multitude de possibilités pour effectuer un mouvement linéaire Figure (I.5).



(a) forme linéaire plate



(b) forme en U et T



(c) forme tubulaire

Fig. I.5. Géométrie linéaire plate, en U et tubulaire.

A chaque type de moteur linéaire correspond un type de moteur rotatif. Cela permet d'avoir le même classement que les moteurs rotatifs [7]. Mais les moteurs linéaires peuvent aussi être classés suivant leur géométrie.

La Figure (I.6) présente le classement des moteurs linéaires selon leur géométrie. Il y a deux grandes familles du moteur linéaires : le moteur linéaire à géométrie plate et à géométrie tubulaire. Ils peuvent être divisés encore en deux parties selon la géométrie du primaire : long ou court. Les moteurs linéaires à géométrie plate peuvent être encore sous divisés selon le nombre de primaire : à primaire double et à primaire simple.

Il existe un autre classement relatif au principe de fonctionnement du moteur. Celui-ci est présenté sur la Figure (I.7) Les moteurs linéaires électromagnétiques sont les plus utilisés et peuvent être divisés en trois parties : les moteurs linéaires à inductions, synchrone et à courant continu.

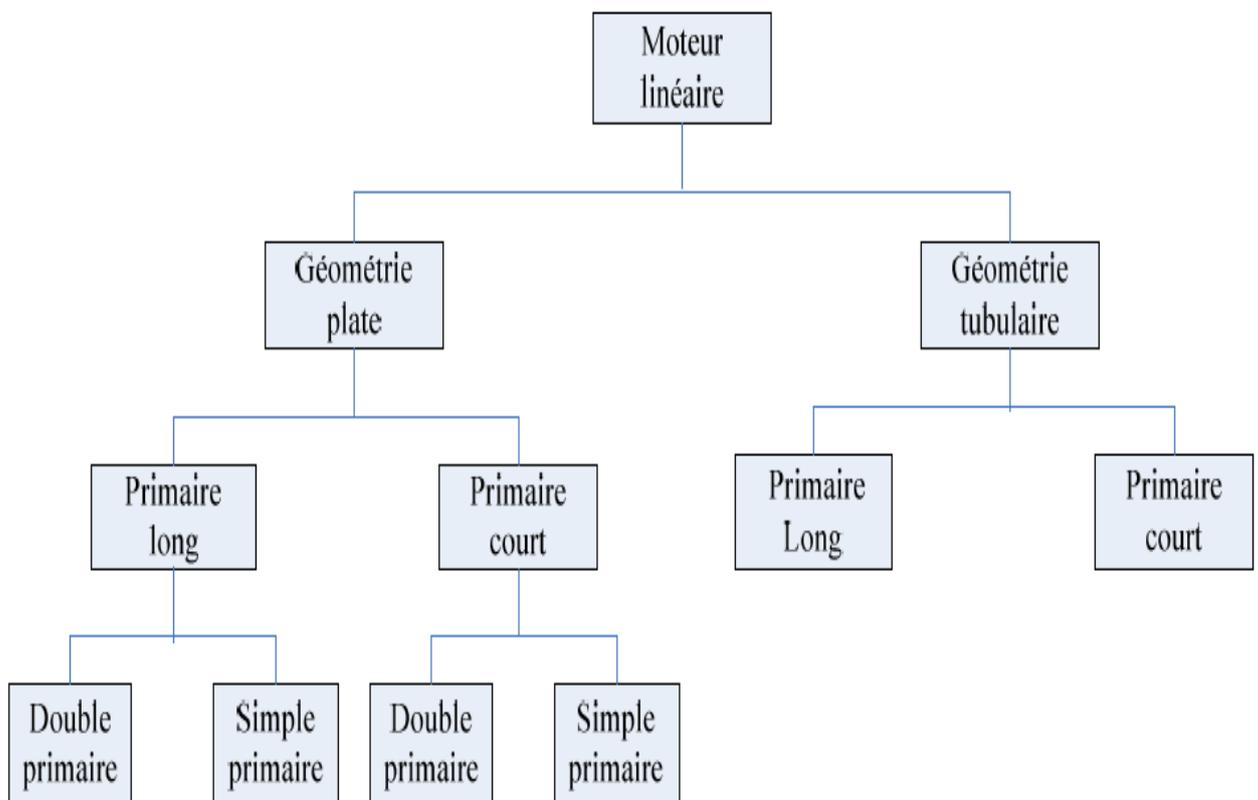


Fig. I.6. Classement des moteurs linéaires selon leur géométrie

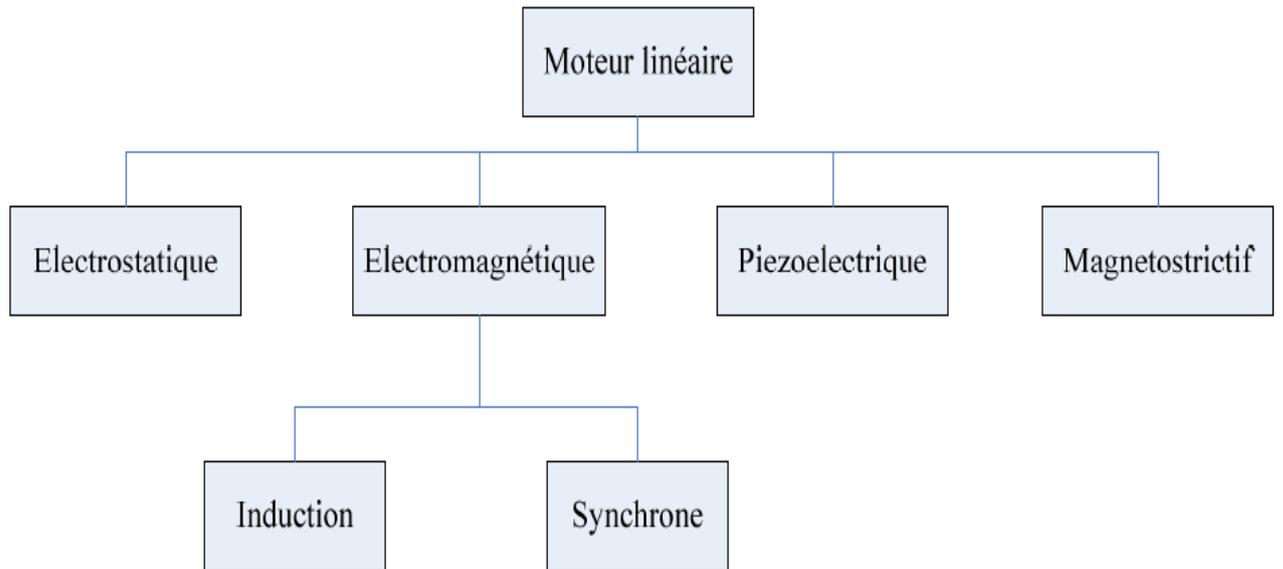


Fig. I.7. Classement des moteurs linéaires selon leur circuit magnétique

I.3.4- Les actionneurs linéaires plans

Pour les structures plates, il est possible de réaliser des actionneurs à stator unique ou à stator double. Pour les structures cylindriques, il est possible d'envisager des actionneurs tubulaires à partie mobile interne ou externe.

a. Stator unique :

C'est une variante simple qui s'intègre aisément dans les applications courantes mais qui présente une force d'attraction importante entre stator et partie mobile, figure(I.8).

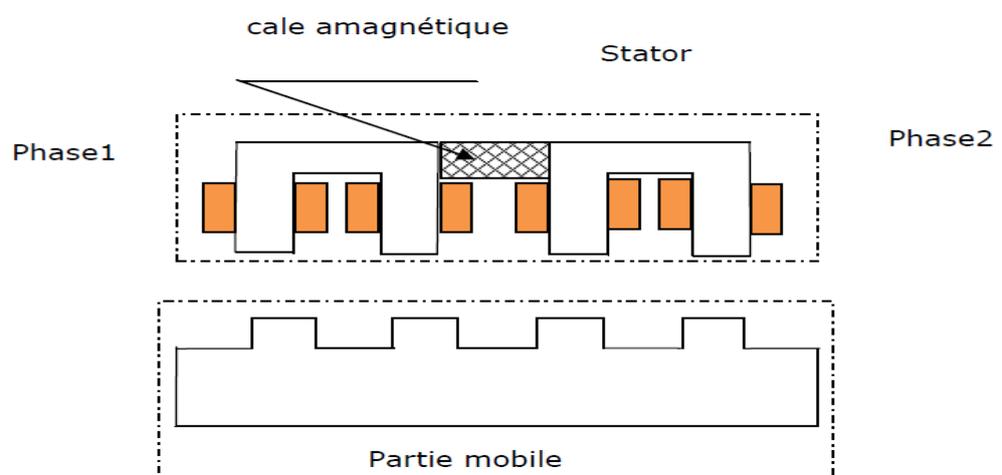


Fig. I.8. Structure à stator simple.

b. Stator double :

La structure à stator double permet d'obtenir, d'une part des forces de poussées plus élevées que pour la structure à stator unique et d'autre part d'alléger la partie mobile, car si cette dernière est bien centrée, la résultante des forces d'attraction est alors nulle. Cette structure est particulièrement bien adaptée au cas où le stator est fixe, figure (I.9).

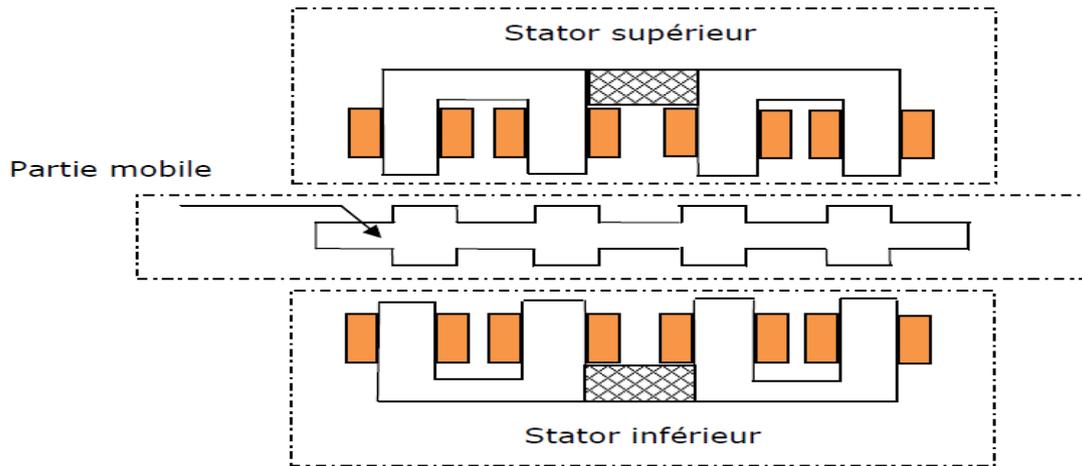


Fig. I.9. Structure a stator double

I.3.5- Les actionneurs linéaires cylindriques

a) Structure tubulaire à partie mobile interne :

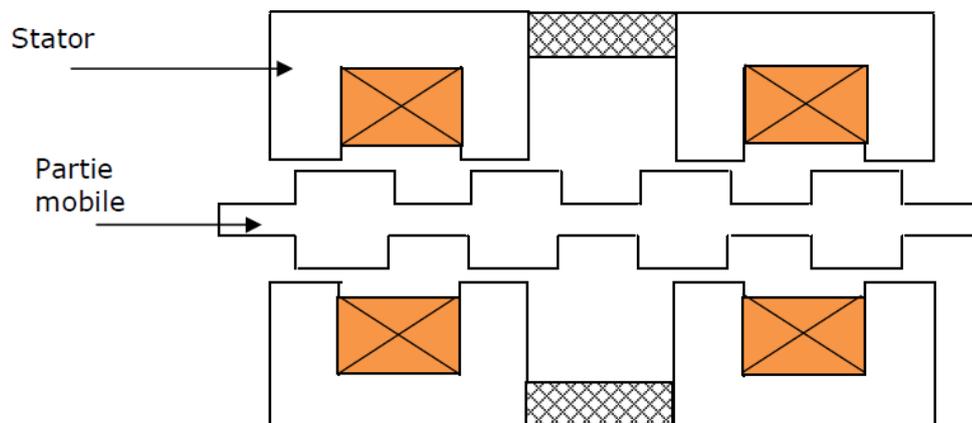


Fig. I.10. Structure tubulaire à partie mobile interne

Cette variante permet une meilleure utilisation du volume disponible. Tout comme la structure à stator double, la résultante des forces d'attraction est nulle à condition que la structure soit bien centrée, figure (I.10).

b) Structure tubulaire à partie mobile externe :

La puissance volumique d'une structure à partie mobile externe est très comparable à celle d'une structure à partie mobile interne, figure (I.11). Cependant, la structure à partie mobile externe est plus délicate à ajuster.

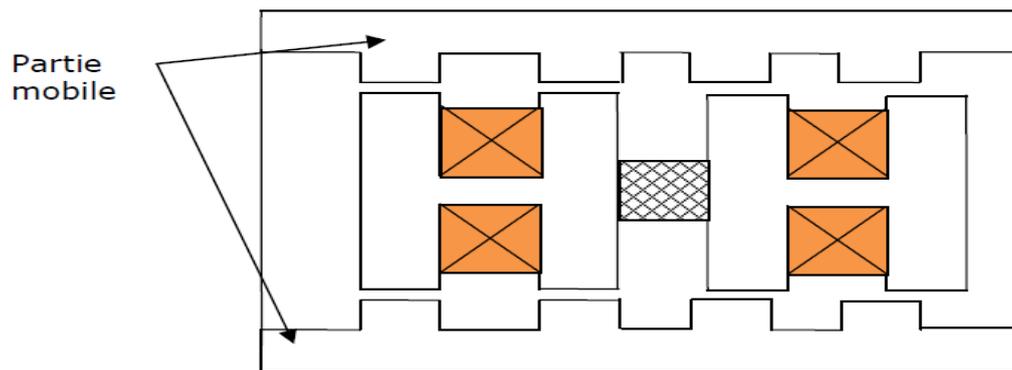


Fig. I.11. Structure tubulaire a partie mobile externe

Pour les différentes structures de moteur linéaire, le mouvement de la partie mobile est soit du à un effet de reluctance variable pur, soit à la présence d'aimants permanents, ou alors à un effet combiné.

I.4- Géométries des machines linéaires

Sans aborder les principes de conversion électromécanique, trois familles d'architectures peuvent être distinguées, [8] :

- a) inducteur solidaire du rail, donc fixe, et induit mobile dont l'alimentation peut s'effectuer par un câble souple (mouvement limité) ou par transmission d'énergie sans contact, l'énergie peut être également embarquée, figure (I.12).

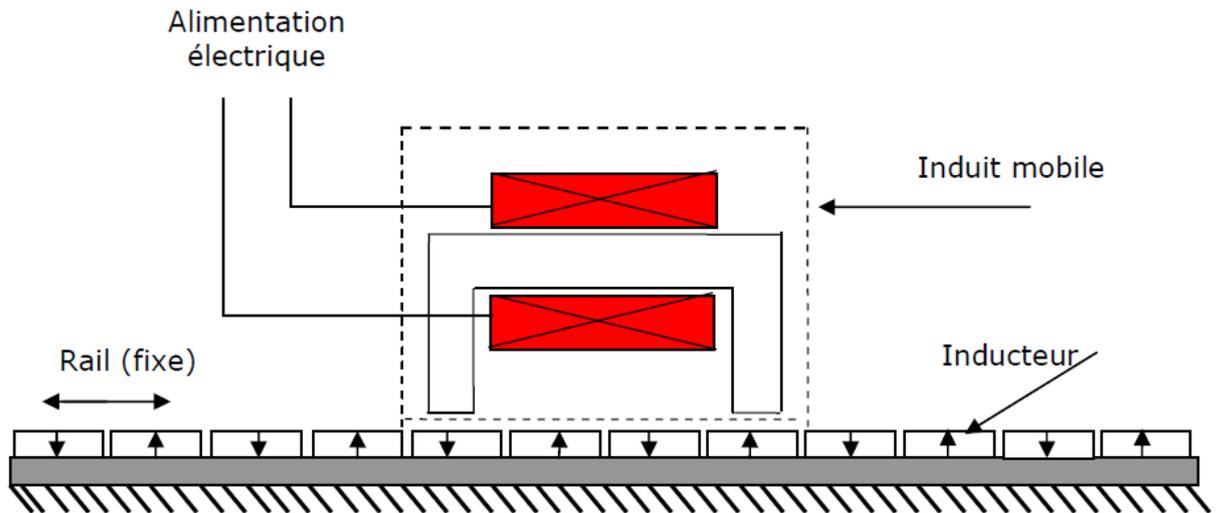


Fig. I.12. Structure à inducteur solidaire du rail fixe

- b) inducteur solidaire du rail (ex. table de machine-outil) mobile et induit fixe localisé (alimentation facilitée), figure (I.13).

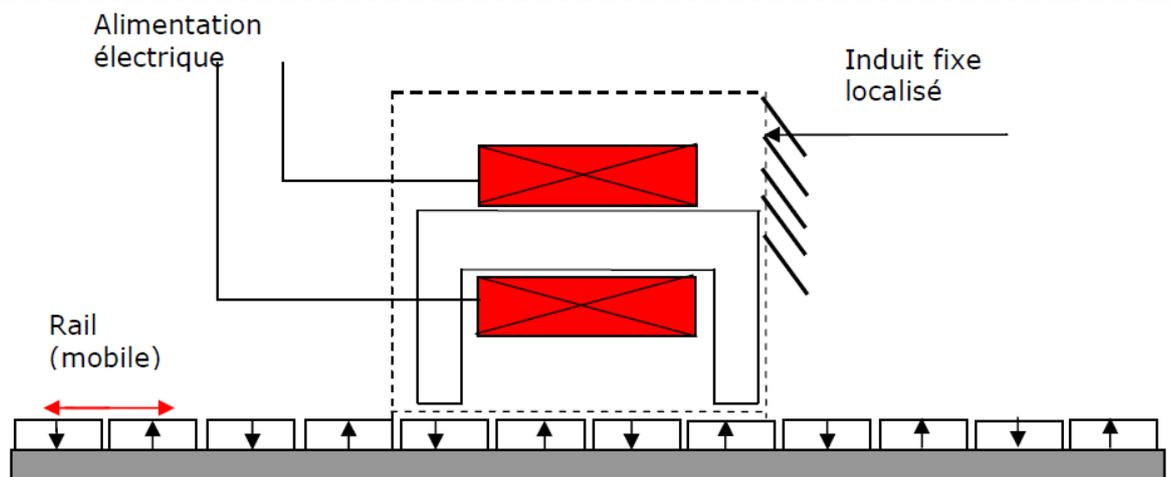


Fig. I.13. Structure à inducteur solidaire du rail mobile

- c) induit fixe, figure (I.14) et distribué sur la longueur du rail (voie active dans le cas des trains), la partie mobile supporte uniquement l'inducteur. Dans ce cas, l'énergie est amenée à la partie fixe ce qui évite les difficultés de transmission mais le système d'alimentation est complexe et coûteux.

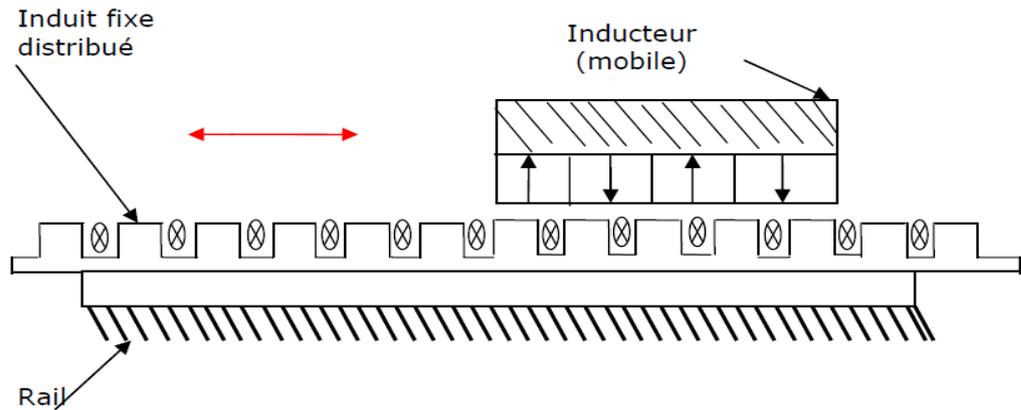


Fig. I.14. Structure a induit fixe et inducteur mobile.

I.5- Particularités du moteur linéaire

Suite à leur fonctionnement, le moteur linéaire présente des spécificités dues à la disposition de leur partie mobile par rapport à leur partie fixe, ou s'introduisent des effets spéciaux, généralement parasites, et qui interviennent peu dans les machines rotatives. Notamment des systèmes de guidage particuliers, entraînant de nouvelles contraintes au niveau de l'entrefer magnétique. De plus, les moteurs linéaires présentent des effets d'extrémités provoqués par les discontinuités de leur structure géométrique. Ces différences technologiques par rapport aux moteurs rotatifs doivent être prises en compte au moment de la conception et de la réalisation pratique, [9].

I.5.1- Guidage

Comme les autres moteurs électriques, les moteurs linéaires comportent deux parties agissant l'une sur l'autre sans contact, à travers des surfaces actives maintenues en vis-à-vis aussi proche que possible. Dans les moteurs rotatifs, les surfaces sont cylindriques et les dispositifs de centrage par des boîtes de roulements sont beaucoup plus simples et efficaces que le guidage sur une structure linéaire où les surfaces sont planes et les dispositifs de centrage sont le plus souvent extérieurs aux moteurs et confondus avec les moyens de guidage du mobile et la résultante des forces d'attraction peuvent être importante et difficile à maîtriser à cause de la distance entre les appuis.

Toutefois, certaines structures permettent de s'affranchir de cette force d'attraction et de faciliter ainsi le guidage.

I.5.2- Entrefer

Compte tenu du système de guidage entre les parties fixes et mobiles d'un moteur linéaire, il est difficile de réaliser un entrefer aussi faible que dans une variante tournante. L'entrefer rapporté au pas de déplacement est, par conséquent, plus élevé. Il en résulte une force par unité de surface plus faible.

I.5.3- Effets d'extrémités

Le stator d'un moteur rotatif est ferme sur lui-même. Il assure donc la continuité des phénomènes électromagnétiques contrairement à tout moteur linéaire caractérisé par une discontinuité à ses extrémités. Cette discontinuité crée des différences de trajets pour les lignes de champs circulant dans le fer, ces effets d'extrémités sont classés en deux catégories :

a) L'effet de longueur finie : qui est dû principalement :

- à la variation de la perméabilité à l'entrée et à la sortie.
- aux flux parasite se fermant aux extrémités et sur les côtés.
- aux f.e.m à l'entrée et à la sortie due aux courants d'induits, qui se ferment en dehors de la carcasse magnétique de la machine ;
- aux f.e.m dues à la discontinuité de l'induction à l'entrée et à la sortie.

b) L'effet de largeur finie : ou effet de bord, du à la fermeture des courants à l'intérieur de la partie active de l'induit.

I.6- Différents types de moteurs linéaires

I.6.1- 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 f.e.m, 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 (I.15).

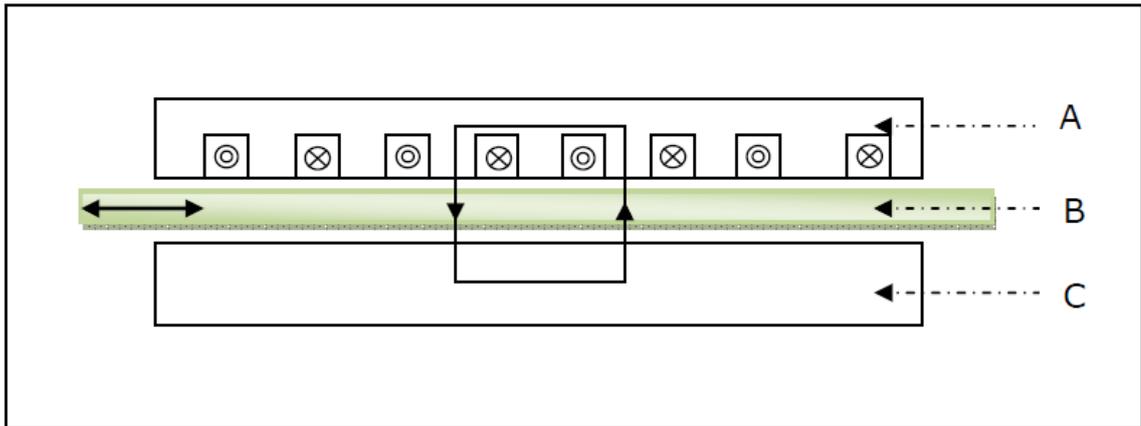


Fig. I.15.Moteur linéaire à inducteur simple

A : inducteur.

B : induit.

C : circuit magnétique de fermeture.

I.6.2- Moteur à inducteur simple sans circuit de retour

Le même principe que le précédent, sauf que les lignes d'induction se ferment dans l'air, figure (I.16) :

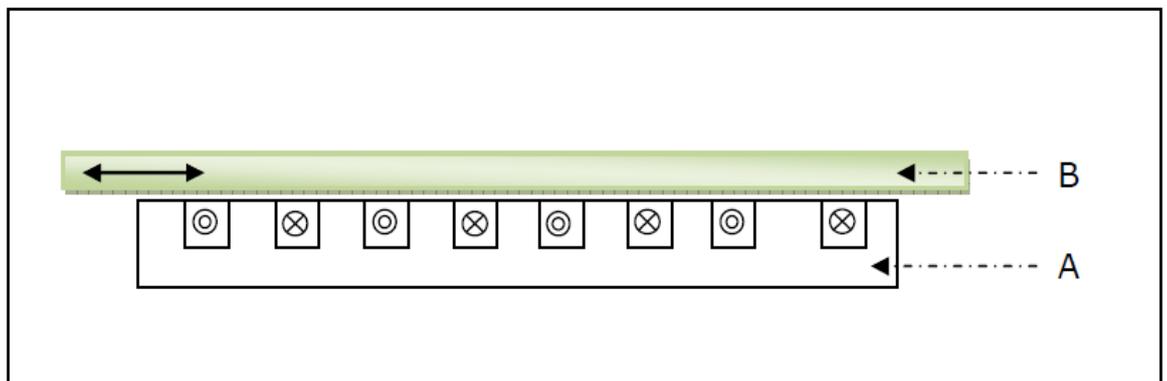


Fig. I.16.Moteur linéaire à inducteur simple sans circuit magnétique de retour

A : inducteur.

B : induit.

I.6.3- 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 et les montants aux anneaux de court-circuit, figure (I.17).

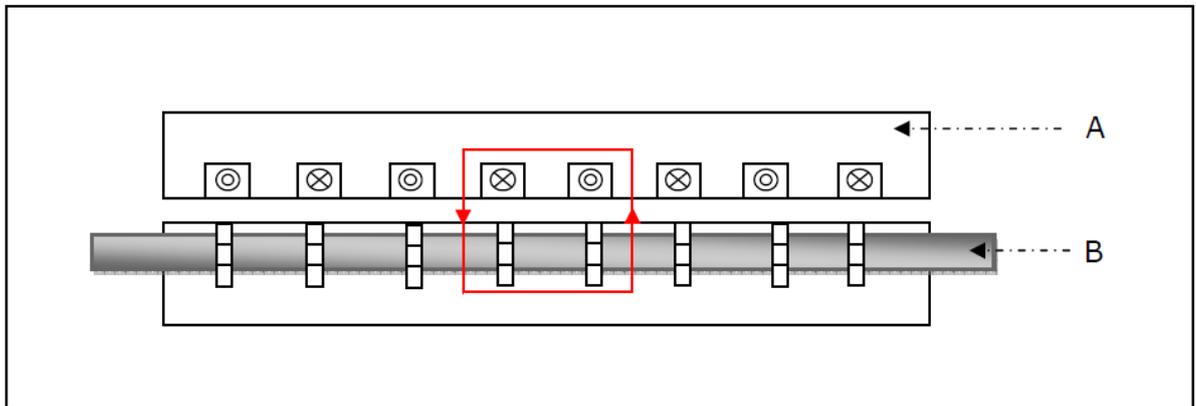


Fig. I.17. Moteur linéaire à induit en forme d'échelle

A : inducteur.

B : induit ferromagnétique des barreaux conducteurs.

I.6.4- 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 du flux, figure (I.18).

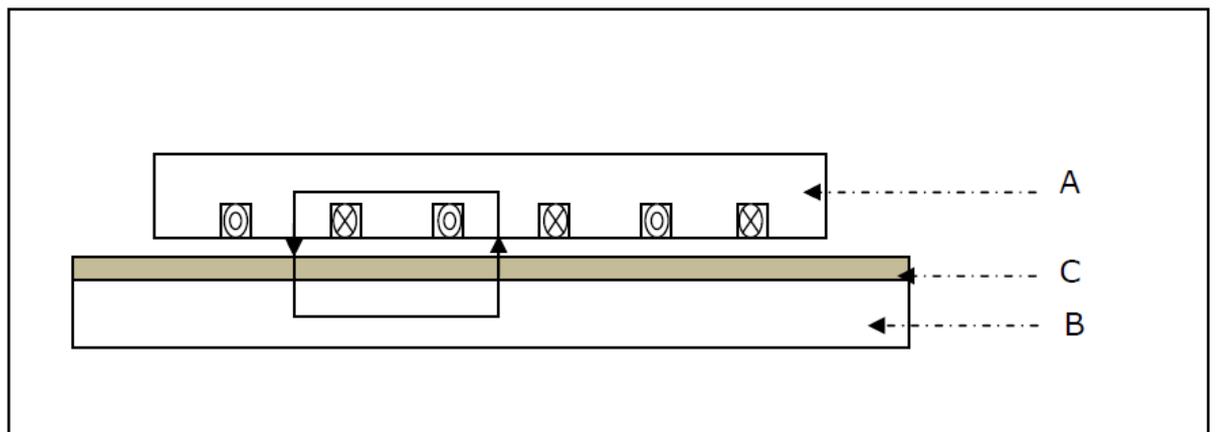


Fig.I.18. Moteur linéaire à induit composite

A : inducteur.

B : plaque d'acier magnétique.

C : couche conductrice.

I.6.5- Moteur linéaire à induit massif

L'inducteur peut être soit simple soit double.

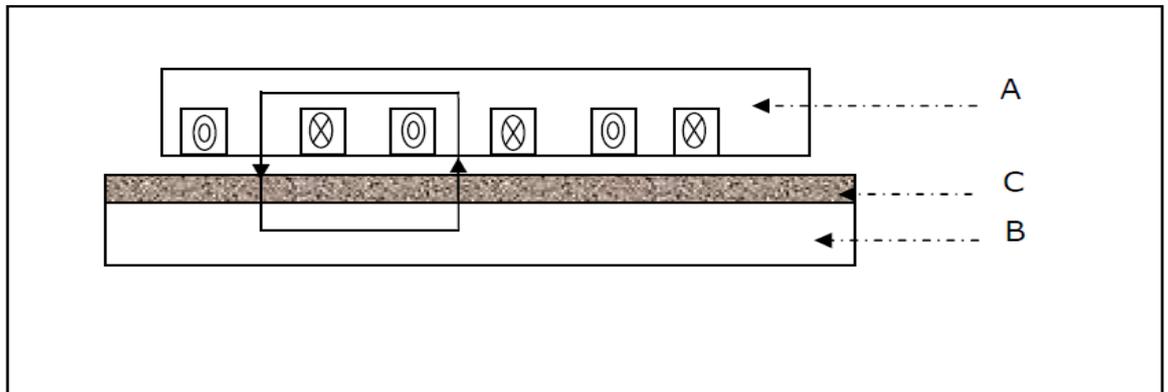


Fig. I.19. Moteur linéaire à induit magnétique massif

A : inducteur.

B : induit magnétique.

C : zone pelliculaire de circulation du courant.

I.6.6- Moteur linéaire à aimants permanents :

Le principe de fonctionnement du moteur linéaire à aimant permanent 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 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 (I.20).

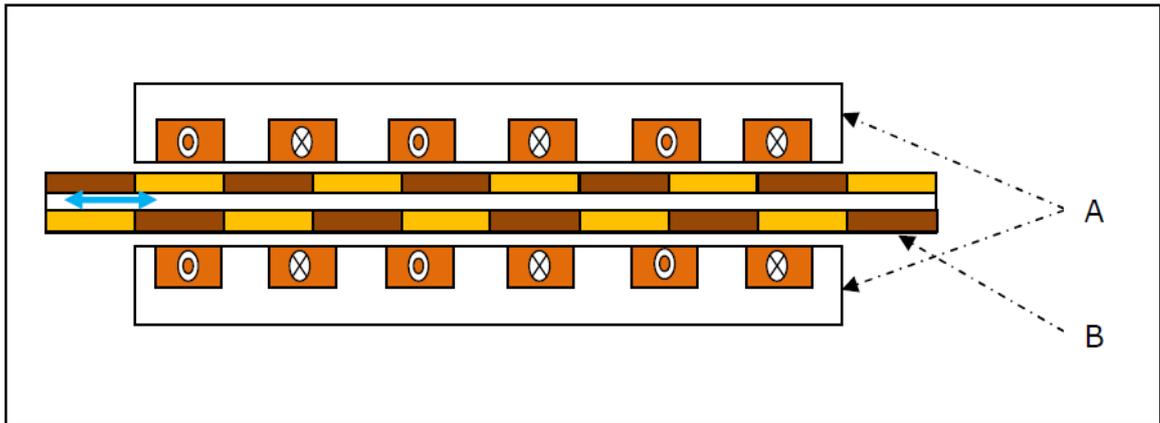


Fig. I.20. Moteur linéaire à aimants permanents

| | | |
|-----|---|--------------------------------|
| |  | Aimant permanent sens inverse. |
| |  | Aimant permanent sens direct. |
| |  | Bobine inductrice. |
| A : | | inducteur. |
| B : | | induit. |

I.6.7- Moteurs pas à 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, [9].

I.6.7.1- 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 concentriques 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 des 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, [9].

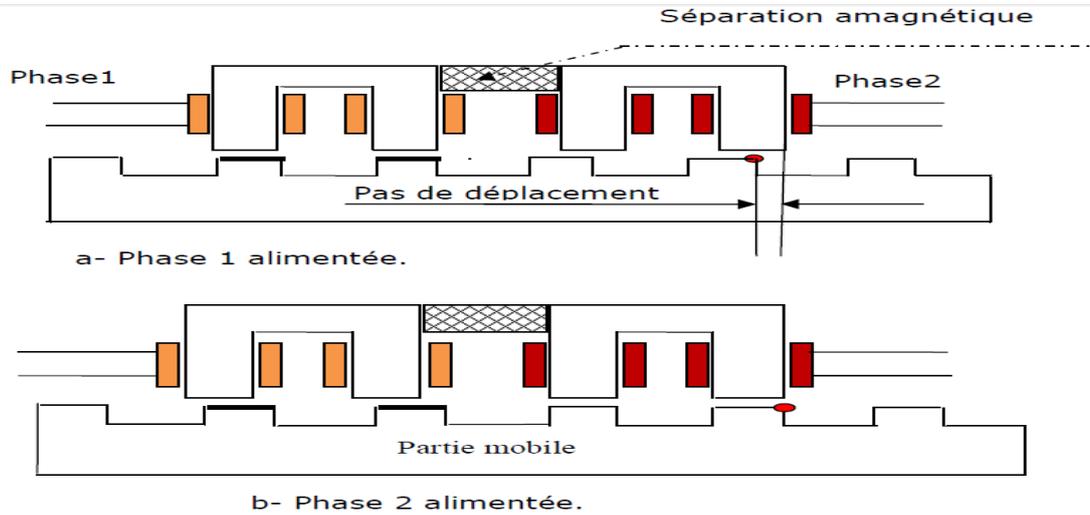


Fig. I.21- Moteur pas à pas linéaire à reluctance variable

I.6.7.2- Moteur pas à pas linéaire polarisé

Deux types de moteurs :

a. 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.

b. 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 (I.22) représente un moteur linéaire réactance polarisé bipolaire où l'aimant et les bobines sont placés sur le même support fixe, [9].

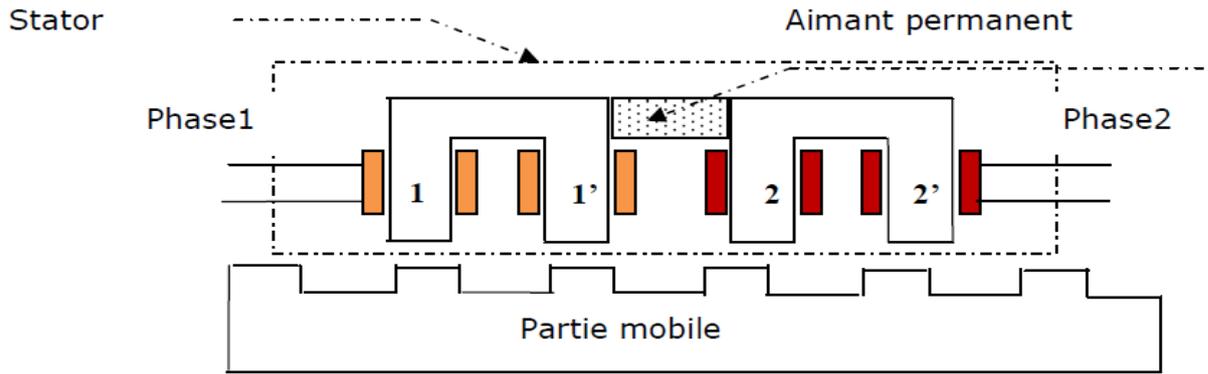


Fig. I.22. Moteur linéaire réductant

Les deux paires de plots adjacents (1,1') et (2,2') de la structure de la figure (I.22) 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 (I.23.b) La superposition du flux 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 (I.23.c).

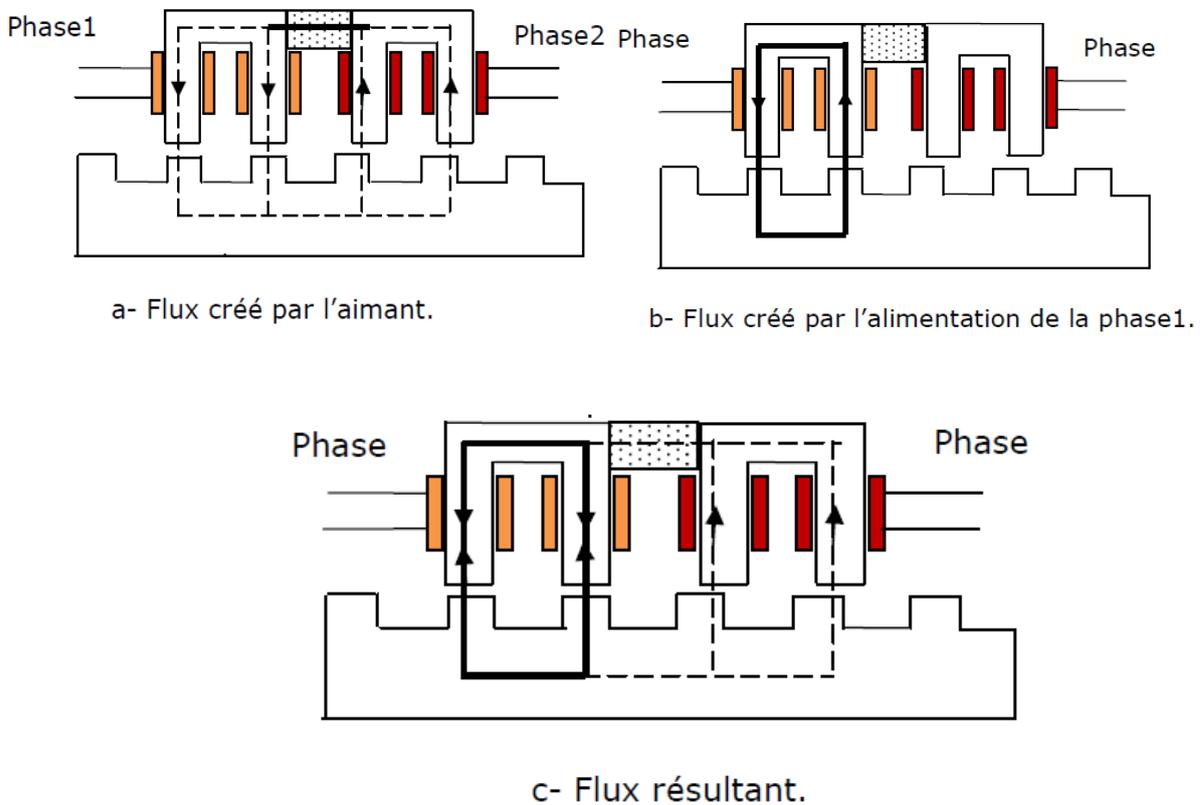


Fig. I.23. Distribution du flux dans un moteur linéaire réductant polarisé

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

I.7- Système à lévitation magnétique (Maglev)

Avec l'augmentation de la population et l'extension des zones d'activités humaines, les moyens de transport traditionnels ne satisfont plus les besoins. Des moyens de transport en commun innovants sont nécessaires. Le train utilisant le système de **MAG**nétique **LEV**itation (Maglev) est un très bon candidat.

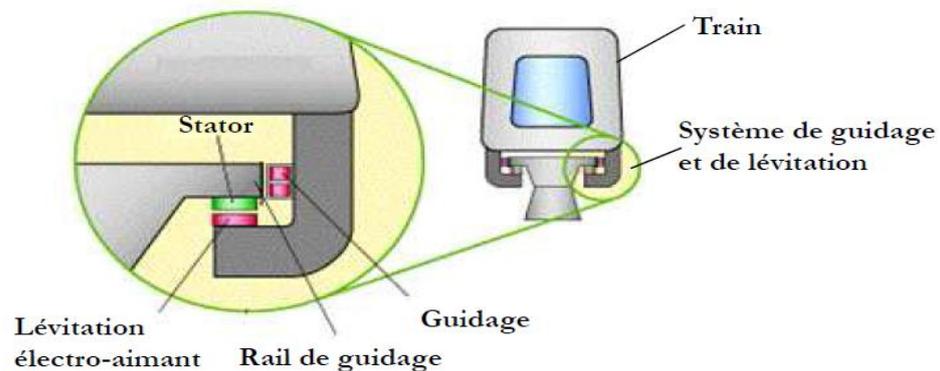


Fig. I.24. Système de Maglev

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 (I.24) présente un système de Maglev, il est composé de trois parties : le système de propulsion (le moteur linéaire), le système de lévitation et le système de guidage. Dans ce qui suit nous présentons le système de propulsion selon les différents types de moteurs linéaires utilisés. Deuxièmement, les applications du Maglev sont présentées selon les différents types de système de lévitation. Et en fin, les avantages et les inconvénients par rapport aux systèmes classiques.

I.7.1- Le système de propulsion

La force de propulsion du système Maglev 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 celles avec moteurs

traditionnels. De plus, les vibrations et le bruit provenant des contacts mécaniques sont fortement diminués. Deux types principaux de moteur linéaire sont utilisés dans les Maglevs : les moteurs linéaires à induction et les moteurs linéaires synchrones.

- La structure du moteur linéaire à induction. Il y a deux types de structure:
 - a. primaire court : le primaire est fixé sur le véhicule et le secondaire (souvent une plaque conductrice de l'électricité) est fixé sur le rail de guidage.
 - b. primaire long : le bobinage du primaire est fixé sur le rail de guidage et le secondaire est fixé sur le véhicule.

Le prix de construction pour la seconde structure est beaucoup plus important que le premier, mais il est préféré dans les systèmes à grandes vitesses. Les moteurs à primaire court sont préférés pour les systèmes de faible vitesse, c'est-à-dire les trains traditionnels.

- Les moteurs linéaires synchrones créent eux même leur champ magnétique d'excitation, ils sont deux types :
 - a. le champ est généré par un électro-aimant avec un noyau en fer, par exemple, le Transrapid, Figure (I.29).
 - b. le champ est généré par un supra conducteur avec un noyau en air, par exemple, le MLX technique Figure (I.31).

Pour les trains à grande vitesse, les moteurs linéaires synchrones sont préférés, parce qu'ils ont un rendement et un facteur de puissance élevé.

I.7.2- Le système de guidage latéral

Les enroulements de lévitation se faisant face sont reliés sous la voie de guidage, constituant alors une boucle. Quand le véhicule, contenant l'aimant, se déplace transversalement, un courant électrique est induit dans la boucle, ayant pour résultat une force répulsive agissant sur les enroulements de lévitation les plus proches du wagon et une force attractive agissant sur les enroulements de lévitation les plus loin. Ainsi, une voiture courante est toujours située bien au centre de la voie de guidage.

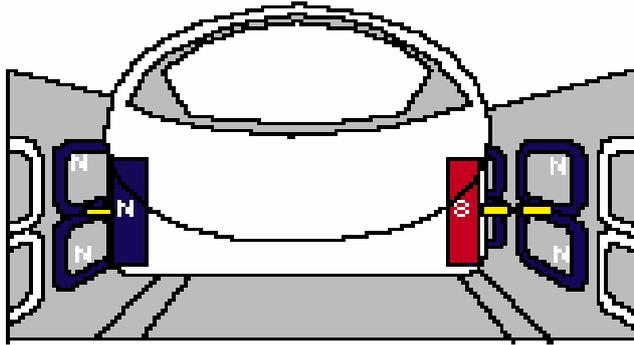


Fig. I.25. Le système de guidage

I.7.3- Le système de freinage

I.7.3.1- Frein linéaire

La performance du système de freinage est cruciale pour les trains rapides. Des trains de voyageur dépendent de l'adhérence entre les roues et le rail. Pour un train, une distance de freinage prévisible est indispensable. C'est pourquoi des freins linéaires à courant de Foucault ont été développés ces dernières années. Le frein linéaire est utilisé dans les systèmes Maglev et les trains à grande vitesse. Il évite l'abrasion des freins mécaniques par frottement. Deux types de freins linéaires sont envisageables : les freins à induction et les freins à aimants permanents.

La Figure (I.26) présente une application typique du frein linéaire à induction dans un système ferroviaire.

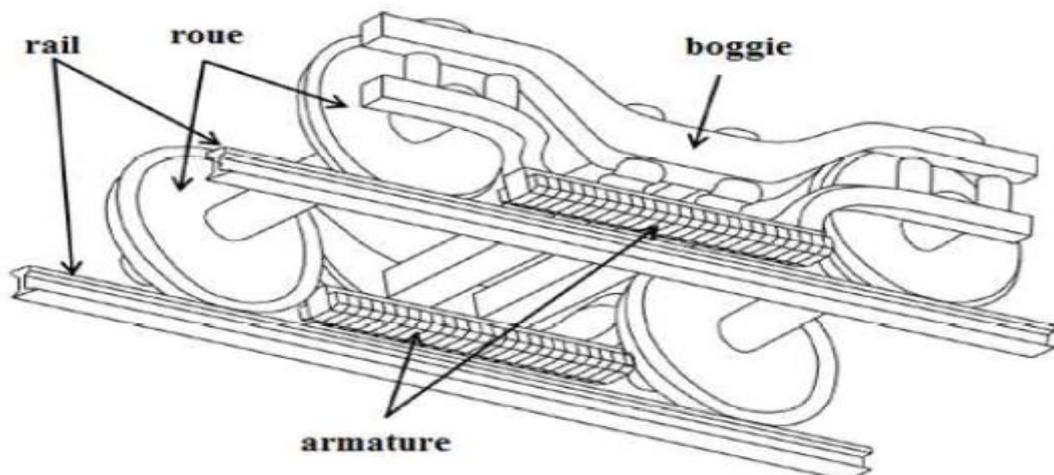


Fig. I.26. Frein linéaire à induction [10]

Un frein linéaire à induction est composé de pôles magnétiques, il est fixe sur le boggie, juste en dessus des rails. Il existe deux façons de générer une force de freinage : la première façon consiste à créer un champ glissant en sens inverse du sens déplacement. La seconde façon, plus simple, est de créer un champ fixe, grâce au déplacement du train, qui induit des courants qui s'oppose au déplacement.

La première façon pour freiner peut être réalisée grâce à un moteur linéaire alimenté en sens inverse. Le moteur linéaire peut facilement se transformer en frein.

La deuxième façon pour freiner consiste à alimenter le primaire par une source de courant continu qui crée un champ magnétique fixe. L'interaction entre les courants induits dans le rail et le champ magnétique du primaire fixe engendre une force de freinage. Toutefois cette force dépend de la vitesse du véhicule qui se déplace et devient très faible à basse vitesse.

I.7.3.2- Frein aérodynamiques

L'arrêt du train peut se faire avec le même principe que le freinage des avions : des surfaces généralement en métal, ayant des formes non aérodynamiques, se déplient pour opposer une résistance grâce aux frottements avec l'air, ralentissant ainsi le véhicule, figure (I.27).



Fig. I.27. Panneaux de freinage aérodynamiques

Un autre système de freinage, utilisé uniquement par le Maglev est le système de freins à disques (comme sur les voitures) : dans ce cas, lors du freinage, des plaquettes viennent frotter de chaque côté du disque fixé au centre de la roue.

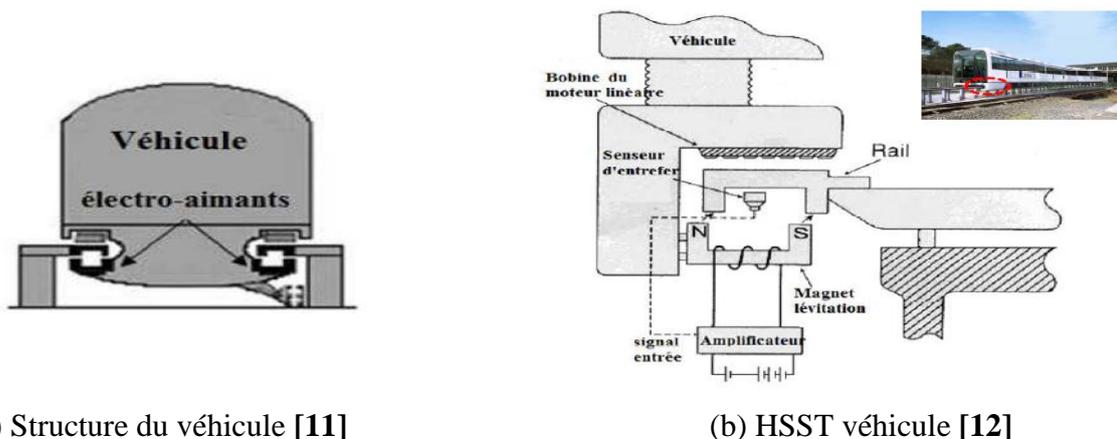
I.7.4- Le développement du Maglev

La technologie Maglev est considérée comme un moyen innovant de transport, mais elle a déjà une longue histoire que nous présenterons dans cette partie, selon les différents systèmes de lévitation utilisés. Actuellement, deux types de technologies de lévitation existent, électromagnétique et électrodynamique.

I.7.4.1- Lévitation électromagnétique

La lévitation électromagnétique est basée sur la force d'attraction magnétique entre une voie de guidage et des électro-aimants. Il existe deux types de lévitation électromagnétique.

La Figure (I.28.a) présente la structure à lévitation électromagnétique avec guidage intégré. Ce type de système est préféré pour les applications à vitesse réduite, car la partie lévitation et la partie de guidage interagissent à grande vitesse. La Figure (I.28.b) présente le véhicule HSST avec trois voitures utilisant la lévitation électromagnétique.



(a) Structure du véhicule [11]

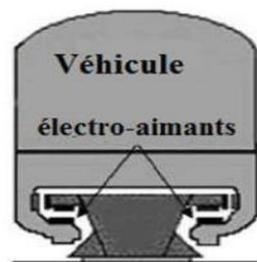
(b) HSST véhicule [12]

Fig. I.28. Suspension électromagnétique avec du guidage intégré

Le système HSST a été développé à partir des années 1972 au Japon pour une vitesse réduite. Il est conçu pour transport urbain. Une ligne de test a été construite en 1991 et une ligne commerciale de 8,9km ensuite été mise en service. La construction de cette ligne a commencée en 2002 et elle a été mise en service en 2005. Le système HSST a une vitesse maximale de 100km/h. Le temps total de circulation est environ 15 minutes avec une vitesse moyenne 35,6km/h. Sa capacité nominale par train est de 255 passagers et il permet de transporter 30000 passagers par jour. La Chine et la Corée du sud ont également commencé à développer ce type de système à partir des années 1980. Plusieurs véhicules ont été construits.

La Figure (I.29.a) présente la structure à lévitation électromagnétique avec guidage sépare.

Ce type de système est favorise pour des applications à grande vitesse, parce que la partie lévitation et la partie guidage n'interagissent pas. Une application typique de ce système est la technologie allemande du Transrapid. La Figure (I.29.b) présente une photo du Transrapid sur une ligne de démonstration à Shanghai en Chine. La difficulté majeure de cette technologie est un entrefer de lévitation de 10mm, ce qui nécessite des électro-aimants de forte puissance et un guidage précis de l'entrefer.



(a) Structure du véhicule [11]



(b) Suspension et guidage séparées [13]

Fig. I.29. Suspension électromagnétique avec du guidage séparé

Le système Transrapid a été développé comme un projet national dans les années 1969. 1,3 billion d'euro ont été investis en recherche et développement dans ce projet. En 1979, la phase de recherche est terminée. A partir de 1980, une ligne de 31,5km est construite puis mise en service. Les véhicules de test atteignent une vitesse de 450km/h. Une ligne de 292km entre Berlin et Hambourg a commencé à être construite, mais ce projet est arrêté pour des raisons économiques.

Une ligne de démonstration avec une longueur de 30km est mise en service en 2004 à Shanghai Figure (I.29.b). La vitesse commerciale est de 431km/h. C'est le train le plus rapide du monde ! De plus la fiabilité est démontrée par le respect de ses horaires à 99,97%.

I.7.4.2- Lévitation électrodynamique

Le système de lévitation électrodynamique utilise la force de répulsion, alors que le système de lévitation électromagnétique utilise la force d'attraction. Quand les électro-aimants, fixes sur le véhicule, viennent au-dessus des plaques conductrices situées sur la voie de guidage, des courants induits traversent ces plaques et produisent un champ magnétique de

répulsion. La force répulsive fait léviter le véhicule. La Figure (I.30) présente les deux structures de ce système : une avec des aimants permanents, l'autre avec des électro-aimants.

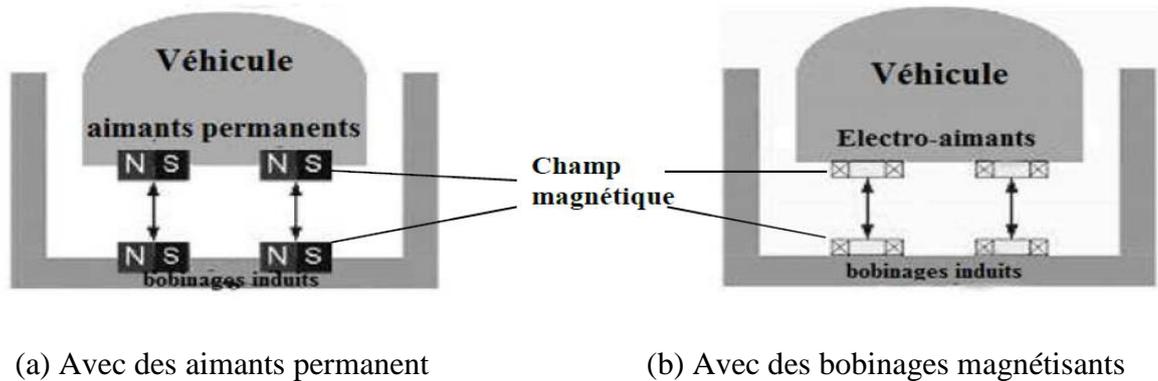


Fig. I.30. Suspension électrodynamique [11]

La Figure (I.31) présente un véhicule qui utilise des supra conducteurs en Nb-Ti permettant de générer la force de lévitation électrodynamique. Le système MLX a été développé comme un projet national au Japon. La recherche a commencée en 1962, et une ligne test de 7km a été construite en 1977. Une seconde ligne de 18,4km avec une double voie et un centre d'opération ont été construits en 1997. Après plus de 20 ans de test, ce système a maintenant atteint un niveau commercial.



Fig. I.31. System MLX Japonais [14]

I.7.5- Avantages et inconvénients

Le système Maglev a de nombreux avantages par rapport aux trains traditionnels:

- 1) Il permet de grande vitesse de fonctionnement, plus de 600km/h.
- 2) Il nécessite une faible consommation d'énergie, fait moins de bruit, est plus sécurisé et est plus confortable en raison de l'absence de contact mécanique.
- 3) Il permet de négocier facilement des pentes importantes et des courbes serrées.

- 4) Il possède une accélération et décélération importante.
- 5) Il est peu influencé par les conditions météorologiques.
- 6) Ils n'usent pas les voies (car il n'y a pas de contact direct).

Le système Maglev a quelques inconvénients :

- 1) Le moteur de traction doit fournir la totalité de force de traction et de la force de freinage.
- 2) Un système de lévitation est nécessaire, et doit être alimenté en énergie.
- 3) Le système de lévitation rayonne et peut éventuellement nuire aux passagers.

Une comparaison détaillée avec les trains traditionnels est présentée dans la figure (I.32) :

| | Maglev | Trains traditionnels |
|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| Vibration & bruit | 60dB-65dB | 75dB-80dB |
| Sécurité | Aucune possibilité de déraillement | Possible |
| guidage | Véhicule Leger | Véhicule lourd |
| Maintenance | Faible | Périodique |
| Capacité de courbure | 30m de rayon | 50m de rayon |

Fig. I.32. Comparaison entre les trains traditionnels et les trains à lévitation magnétique

I.8- CONCLUSION

Les applications du moteur linéaire pour les systèmes de traction ont tout d'abord été présentées selon deux catégories: les trains traditionnels avec roues et les trains à lévitation magnétique. Les avantages et les inconvénients des deux catégories ont été présentés. L'étude a permis de montrer que les trains à traction linéaire sont sans doute des composants essentiels pour les transports du futur.

Le principe de base du moteur linéaire est ensuite expliqué. Le processus de transformation

virtuelle d'un moteur rotatif à un moteur linéaire est présenté. Les moteurs linéaires sont classés selon deux manières : la géométrie et le principe de fonctionnement. Les différents types de moteurs linéaires à induction de forme plate sont présentés.

CHAPITRE II

II- Modèle mathématique et méthode des éléments finis

II.1- 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. Qui résulte suite à certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Dans le cas des problèmes électromagnétiques, on utilise les équations de MAXWELL associées à des lois de comportement. 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 et de calculer les différentes grandeurs physiques. En électromagnétisme, comme nous l'avant signalé précédemment, les équations de bases décrivant les grandeurs électriques et magnétiques sont constituées par les équations de MAXWELL et des lois de comportement en tenant compte des hypothèses simplificatrices. La résolution directe de ce système, comprenant des équations différentielles, n'est généralement pas possible. On fait alors recours à des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis, pour approcher au mieux la solution exacte du modèle mathématique. [15] [16].

II.2- Equations de MAXWELL

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut générale ment étudier au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu à étudier. Ces équations s'écrivent sous deux formes équivalentes qui sont. [15] [16]

II.2.1- Forme différentielle des équations de Maxwell

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (II.1)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (II.3)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (II.4)$$

Où :

\vec{H} : Champ magnétique [A /m] ;

\vec{E} : Champ électrique [V/m] ;

\vec{B} : Induction magnétique [T] ;

ρ : Densité volumique de charge électrique ;

\vec{D} : Induction électrique [C/m²]

\vec{J} : Représente la densité de courant.

L'équation précédente s'exprimera de manière détaillée par :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_C + \vec{J}_D \quad (II.5)$$

\vec{J}_C : exprime la densité de courant de conduction électrique [A/m²].

\vec{J}_D : Représente la densité de courant de déplacement [A/m²] dont l'expression est la suivante:

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

En introduisant (II.6) dans (II.4) l'équation (II.5) devient :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_C + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (II.7)$$

L'expression de la quatrième équation de Maxwell est la forme la plus utilisée dans la littérature.

La nature locale des équations de Maxwell permet de prendre en compte dans les différentes équations, en fonction de la nature du milieu considéré [19].

II.2.2- Forme intégrale des équations de Maxwell

La première équation de Maxwell de forme intégrale est la généralisation du théorème de Gauss d'après ce dernier nous avons :

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho \cdot dV \quad (II.8)$$

Ou encore :

$$\iiint_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{D}) dV = \iiint_V \rho \cdot dV \quad (II.9)$$

dV : Élément du volume [m^3]

ρ : La densité de charge volumique [C/m^3]

ds : Élément de surface [m^2]

La deuxième équation de Maxwell est la forme différentielle de la loi d'induction, elle stipule que la variation du champ magnétique produit un champ électrique.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \left(\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \right) \quad (II.10)$$

Avec :

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (II.11)$$

ϕ : Flux magnétique traversant la section [s].

$d\vec{l}$: Élément de longueur [m];

La troisième équation de Maxwell traduit le principe de conservation flux magnétique.

$$\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (II.12)$$

La quatrième équation de Maxwell est la généralisation de la loi d'Ampère pour les champs dynamiques.

D'après le théorème d'Ampère on a :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_i I_i \quad (II.13)$$

I_i : Courant I contenu à l'intérieur de contour fermé.

Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut leur associer les relations qui définissent la matière et le milieu à étudier ainsi que ces conditions de passage entre deux milieux de propriétés différentes.

II.3- Relation du milieu

Les relations du milieu expriment le lien entre les vecteurs champs électriques et déplacement électrique à travers la permittivité électrique d'une part, et la relation qui existe

entre les vecteurs champs magnétiques et induction magnétique à travers la perméabilité magnétique d'autre part [20] [17].

Pour un milieu à propriétés physiques homogènes et isotropes, on a :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (II.14)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (II.15)$$

Avec :

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré ;

ε_0 : Permittivité électrique du vide : $\frac{1}{36.\pi} .10^{-9} [F/m]$;

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré ;

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide : $4\pi.10^{-7} [H/m]$;

D : Induction électrique : $[C/m^3]$;

Dans le cas des matériaux ferromagnétiques durs (aimants permanents), le phénomène de rémanence est introduit, et on obtient une loi de la forme :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (II.16)$$

II.4- La loi d'ohm

La loi d'ohm exprime la relation entre le champ électrique et le vecteur densité de courant électrique dans un milieu donné. Cette loi est donnée par la relation suivante :

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (II.17)$$

- Dans un milieu statique avec courant source :

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (II.18)$$

- Dans un milieu en mouvement avec courant source:

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} + \sigma (\vec{V}_d \wedge \vec{B}) + \vec{J}_s \quad (II.19)$$

σ : Conductivité électrique $[\Omega/m]^{-1}$

\vec{V}_d : Vitesse de déplacement du conducteur dans le champ magnétique d'induction \vec{B} en [m/s].

Le terme $\sigma \vec{E}$ exprime le courant résultant du champ électrique E et le terme $\sigma(\vec{V}_d \wedge \vec{B})$ exprime le courant résultant du mouvement.

L'équation (II.17) est définie dans un milieu diélectrique et l'équation (II.19) est définie dans un milieu conducteur. Mais dans un milieu supraconducteur la relation entre le champ électrique et la densité du courant électrique est non linéaire, c'est-à-dire :

$$\vec{J}_c = \sigma(E)\vec{E} \quad (II.20)$$

II.5- L'équation de conservation de la charge

En appliquant la divergence à l'équation(II.7) en tenant compte de l'équation(II.1) on retrouve l'équation de continuité appelée aussi l'équation de conservation de la charge ci-dessous :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (II.21)$$

\vec{J} : Densité de courant [A/m²] ;

ρ : Densité de charge volumique [C/m³].

II.6- Relations de passage

La résolution des équations de Maxwell associées aux relations liées à la matière permettant de décrire l'état d'un système, passe par la connaissance des relations de passage d'un milieu à un autre pour les champs mis en jeu ainsi que les conditions aux limites que nous citerons ci-après. Les relations de passage sont obtenues par l'intégration des équations de Maxwell entre deux points voisins situés de part et d'autre de la surface séparant les deux milieux de propriétés différentes [21].

- la conservation de la composante tangentielle du champ électrique E

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (II.22)$$

\vec{n} : Vecteur normale à la surface de séparation entre les deux milieux (1) et (2).

E_1 : La composante tangentielle du champ électrique dans le milieu 1.

E_2 : La composante tangentielle du champ électrique dans le milieu 2.

- Discontinuité de la composante normale du vecteur induction électrique si les charges surfaciques existent:

$$\left(\vec{D}_1 - \vec{D}_2\right) \wedge \vec{n} = \rho_s \quad (II.23)$$

ρ_s : Charges surfaciques ;

D_1 : La composante normale de l'induction électrique dans le milieu 1.

D_2 : La composante normale de l'induction électrique dans le milieu 2.

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

$$\left(\vec{B}_1 - \vec{B}_2\right) \wedge \vec{n} = 0 \quad (II.24)$$

B_1 : La composante normale de l'induction magnétique dans le milieu 1.

B_2 : La composante normale de l'induction magnétique dans le milieu 2.

- La discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique si les courants surfaciques existent:

$$\left(\vec{H}_1 - \vec{H}_2\right) \wedge \vec{n} = \vec{K} \quad (II.25)$$

H_1 : La composante tangentielle de l'induction magnétique dans le milieu 1.

H_2 : La composante tangentielle de l'induction magnétique dans le milieu 2.

\vec{K} : Densité de courant à la surface de séparation.

- La conservation de la composante normale de la densité de courant:

$$\left(\vec{J}_1 - \vec{J}_2\right) \wedge \vec{n} = 0 \quad (II.26)$$

J_1 : La composante tangentielle de la densité de courant dans le milieu 1 ;

J_2 : La composante tangentielle de la densité de courant dans le milieu 2.

II.7- Conditions aux limites

La résolution du système composé des équations de Maxwell et des lois de comportement admet une infinité de solutions. Par conséquent, pour assurer l'unicité de la solution, des conditions aux limites du domaine sont appliquées. [22],

On distingue essentiellement quatre types de conditions aux limites.

II.7.1- Condition de type DIRICHELET

Cette condition nous informe sur la valeur exacte de l'inconnue sur la frontière du domaine d'étude. Elle est sous forme :

$$U|_r = U_0 \quad (II.27)$$

$$.U_0 = \text{Constante}$$

II.7.2- Condition de type NEUMANN

Elle est appliquée sur la frontière lorsque la valeur de la grandeur calculée n'est pas connue à la frontière du domaine d'étude.

Elle est sous forme :

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_r = U_n \quad (II.28)$$

U_n : Constante.

II.7.3- Condition mixte

$$a.U + b \frac{\partial U}{\partial n} = c \quad (II.29)$$

a, b et c sont des constantes ;

U : l'inconnu du problème.

II.7.4- Condition de périodicité et d'anti-périodicité

Cette condition permet de prendre en considération la périodicité du phénomène physique mis en jeu. Il existe des conditions de périodicité et anti-périodicité, dites aussi cycliques ou anticycliques.

Elle s'exprime comme suit :

$$U|_r = K.U|_{r+dr} \quad (II.30)$$

II.8- Equation électromagnétique

II.8.1- Hypothèses simplificatrices

L'équation électromagnétique à établir sera obtenue à partir des équations de Maxwell en tenant compte des hypothèses simplificatrices souvent utilisées lors du traitement des phénomènes électromagnétiques dans le domaine des courants forts [19], qui sont les suivantes:

Si on considère que les phénomènes étudiés relèvent du domaine quasi-statique ou magnétodynamique des fréquences inférieures à 10^{12} HZ les courants de déplacement sont négligeables devant les courants de conduction.

Ceci se traduit par :

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \ll \vec{J} \quad (II.31)$$

- La densité de charge volumique est supposée nulle.
- Les matériaux utilisés sont à propriétés physiques isotropes.

En tenant compte des hypothèses ainsi formulées les équations de Maxwell à considérer deviennent:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (II.32)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.33)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (II.34)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (II.35)$$

Avec :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (II.36)$$

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{induit} \quad (2.37)$$

$$\overrightarrow{J}_{induit} = \sigma \overrightarrow{E}_{induit} + \sigma (\overrightarrow{\nabla} \wedge \overrightarrow{B}) \quad (2.38)$$

II.8.2- Equation électromagnétiques 2D

La résolution des équations de Maxwell associées aux lois de comportement peut être obtenue en considérant les champs comme inconnus. On préfère exprimer les champs magnétiques et électriques en fonction des potentiels qui peuvent être scalaires ou vectoriels.

II.8.2.1- Formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique

A partir du système d'équation formulé précédemment on peut déduire des équations aux dérivées partielles pour chacune des grandeurs H et E. Toutefois, les formulations en champ présentent un inconvénient majeur, (c'est celui de la discontinuité aux interfaces et particulièrement aux coins). On utilise donc le potentiel vecteur magnétique \overrightarrow{A} et du potentiel scalaire électrique V ainsi que le potentiel scalaire magnétique Φ ce qui permet de condenser et de réduire le nombre d'inconnues.

L'équation (II.34) permet de déduire qu'il existe un potentiel vecteur magnétique tel que :

$$\overrightarrow{B} = \overrightarrow{\nabla} \wedge \overrightarrow{A} \quad (II.39)$$

La combinaison des équations (II.39) et (II.33) nous donne :

$$\overrightarrow{\nabla} \wedge \overrightarrow{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\overrightarrow{\nabla} \wedge \overrightarrow{A}) \quad (II.40)$$

$$\overrightarrow{\nabla} \wedge \overrightarrow{E} + \frac{\partial}{\partial t} (\overrightarrow{\nabla} \wedge \overrightarrow{A}) = 0 \quad (II.41)$$

$$\overrightarrow{\nabla} \wedge \left(\overrightarrow{E} + \frac{\partial}{\partial t} \overrightarrow{A} \right) = 0 \quad (II.42)$$

La relation (II.42) permet de déduire qu'il existe un potentiel électrique scalaire V tel que :

$$\overrightarrow{E} + \frac{\partial \overrightarrow{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\nabla} V \quad (II.43)$$

D'où :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (II.44)$$

$$\vec{J} = \sigma \left(-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (II.45)$$

D'où finalement l'expression de la densité de courant de conduction et l'équation (II.35) devienne:

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (II.46)$$

\vec{J}_s : Densité de courant source.

L'équation (II.46) traduit le phénomène de pénétration des courants induits dans un système comportant un circuit d'excitation et un induit conducteur en régime transitoire.

II.9- Equations magnétodynamiques bidimensionnelles

Pour que \vec{A} soit complètement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition de jauge de coulomb donnée par :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (II.47)$$

En 2D, le potentiel vecteur ne possède qu'une seule composante non nulle \vec{A}_z , ce qui nous donne l'équation de diffusion suivante :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A}_z \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial t} = \vec{J}_{sz} \quad (II.48)$$

$\nu = \frac{1}{\mu}$: réductivité magnétique.

$$\vec{A} = (0, 0, A_z) \text{ et } \vec{J} = (0, 0, J_z)$$

Donc l'équation (II.48) devient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\nu \vec{\nabla} \wedge \vec{A}_z \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial t} = \vec{J}_{sz} \quad (II.49)$$

a) Dans le cas de 2D cartésien :

En développant l'équation (II.49) dans le cas cartésien bidimensionnel, on obtient :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial \overline{A_z}}{\partial t} = J_{sz} \quad (II.50)$$

J_{sz} : est le module de la composante $\overline{J_{sz}}$.

A_z : est le module de la composante $\overline{A_z}$.

En régime harmonique :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\sigma\omega A_z = J_{sz} \quad (II.51)$$

II.10- Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles

La résolution du système d'équations aux dérivées partielles obtenues peut se faire par des méthodes : analytiques, numériques.

II.10.1- Méthodes analytiques

Ce sont les premières méthodes utilisées. Elles sont d'emploi restreint à des géométries simples dans une approche unidimensionnelle, ou quelque fois dans des problèmes bidimensionnels. La méthode analytique la plus couramment utilisée pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles est la méthode de séparation des variables. Le principe de cette méthode consiste à mettre l'inconnue sous forme d'un produit des fonctions, dont chacune ne dépend que d'une seule variable [23],

Si la résolution analytique donne des solutions exactes, elle présente l'inconvénient majeur de ne pas prendre en compte le non linéarité et la déformation de la géométrie. Pour cela, et afin de dépasser cet handicap, on fait appel aux méthodes numériques.

II.10.2- Méthodes numériques

L'avènement de l'outil informatique a révolutionné les sciences de l'ingénieur. Des problèmes, autrefois insolubles avec les méthodes classiques, sont maintenant facilement accessibles avec les méthodes numériques qui consistent en une discrétisation des équations aux dérivées partielles [19]. Parmi ces méthodes, on trouve les méthodes des différences finies (MDF), les intégrales de frontières (MIF) et la méthode des éléments finis (MEF).

Sa meilleure adaptation aux géométries complexes, donne l'avantage à cette dernière.

II.11- Méthode des éléments finis (MEF)

Appliquée aux les modélisations en vue de la conception des structures électromagnétiques, la méthode des éléments finis (MEF) est devenue un outil très répandu. Elle consiste à chercher une solution approchée à partir d'une discrétisation du domaine d'étude sur lequel les équations de maxwell sont résolues. Elle permet de déterminer un champ scalaire ou vectoriel satisfaisant l'ensemble des équations aux dérivées partielles et d'équations ordinaires en tout point du domaine d'étude et à tout instant, tout en respectant les conditions aux limites et les conditions de passage en deux milieux de propriété différentes. Le domaine dans lequel est effectuée la simulation, est décomposé en éléments sur lesquels sont construites des solutions approchées dont les inconnus sont les valeurs de la solution en un ensemble de point finis qui sont les nœuds de la discrétisation. Sur chaque point est calculé un potentiel. [23]

La méthode des éléments finis permet donc de résoudre de manière discrète une EDP (Équation aux dérivées partielles) dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable.

II.11.1- Discrétisation par éléments finis

Le maillage consiste à discrétiser le domaine objet d'analyse, qui peut être à une, deux ou trois démentions, en un ensemble d'éléments finis de forme simple. Ces éléments peuvent être des segments de droite, des triangles, des quadrilatères, des parallélépipèdes, des prismes etc., selon le domaine à discrétiser [25]. La figure (II.1) montre la forme d'un maillage triangulaire à deux dimensions.

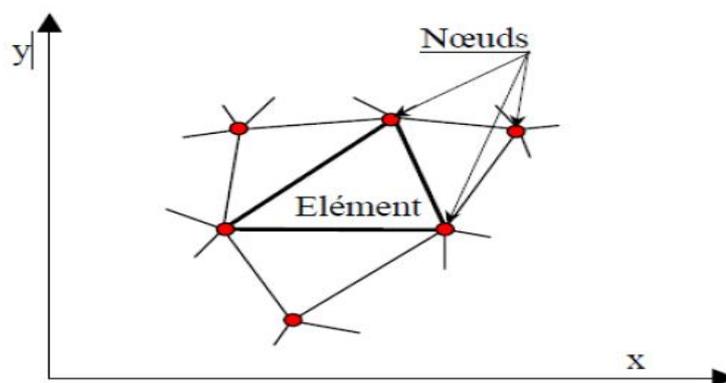


Fig. II.1. Discrétisation par éléments finis en deux dimensions

II.11.2- Formulation Intégrale

L'étape importante qui permet d'aboutir au système algébrique est la mise sous forme intégrale de l'équation aux dérivées partielles.

En premier lieu, cette formulation nous permet d'obtenir les expressions des éléments des différentes matrices et vecteurs du système algébrique élémentaire (dans un élément type). La formulation intégrale peut être de deux types [26]:

- Variationnelle.
- Résidus pondérés.

II.11.2.1- Formulation Variationnelle

La formulation variationnelle s'appuie sur un principe énergétique qui nécessite la connaissance de la variation de l'énergie du système en fonction de l'inconnue, ce qui est appelé fonctionnelle d'énergie :

$$F(A) = \int_{\Omega} \left(\int_0^B H dB \right) d\Omega \quad (II.52)$$

Ω : est le domaine de résolution.

La résolution du problème variationnelle revient à minimiser cette fonctionnelle d'énergie.

II.11.2.2- Formulation résidus pondérés

La formulation résidus pondérés est basée sur le principe de l'orthogonalité de deux fonctions et dans laquelle on exploite le fait que le vecteur nul est orthogonal à tous les vecteurs de l'espace. Dans ce cas on définit un résidu R ; tel que :

$$R_i = L(A) - F \quad (II.53)$$

$L(A)$:Forme équation aux dérivées partielles.

F : Terme source de l'équation aux dérivées partielles.

La formulation résidus pondérés consiste à écrire :

$$\int_{\Omega} R_i \Phi_i d\Omega = 0 \quad (II.54)$$

Φ_i : Est la fonction de projection et A est l'inconnu du problème.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale sont les solutions du système algébrique obtenu. Parmi les méthodes qui découlent de la méthode des résidus pondérés on cite:

- La méthode de collocation par points.
- La méthode des moindres carrés.
- La méthode de GALERKINE.

II.12- Notion d'énergie et de Coénergie

L'énergie magnétique constitue la partie délimitée par la courbe $B = f(H)$ et l'axe des ordonnées.

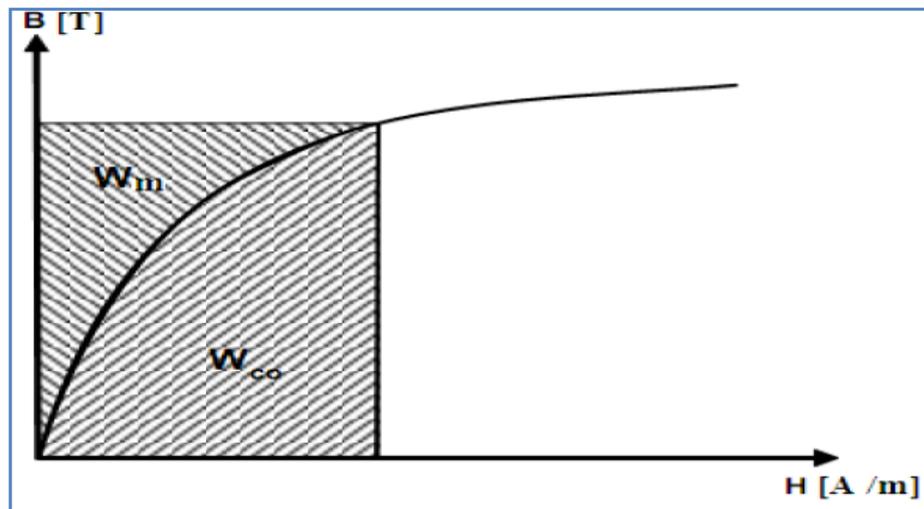


Fig. II.2. Densités d'énergie et de coénergie magnétique

II.12.1- Expression de l'énergie magnétique

L'énergie magnétique s'obtient en utilisant la relation intégrale suivant:

$$W_m = \int_{\Omega} \left(\int_0^B H dB \right) d\Omega \quad (II.55)$$

Ω : est le domaine d'étude considéré.

II.12.2- Expression de la Coénergie magnétique

La relation qui donne la coénergie est obtenue à partir de la courbe $B = f(H)$ est de la forme :

$$W_{co} = \int_{\Omega} \left(\int_0^H B dH \right) d\Omega \quad (II.56)$$

II.13- La force magnétique

La force magnétique est obtenue après la résolution de l'équation électromagnétique et l'obtention de la valeur du potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} [26], le calcul de cette force magnétique se fait soit à partir de la dérivée de l'énergie magnétique par rapport au déplacement en maintenant le flux constant ou la dérivée de la Coénergie magnétique à courant constant [15], en utilisant aussi :

- La force de Lorentz.
- Le tenseur de Maxwell (les forces sont définies directement en terme du champ).
- Les travaux virtuels (bases sur la variation de l'énergie).

II.13.1- La force déduite à partir de l'énergie magnétique totale

Dans ce cas la force magnétique est obtenue en calculant la dérivée de l'énergie magnétique par rapport au déplacement en maintenant le courant constant.

$$F_m = \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{\Omega} \left(\int_0^B H dB \right) d\Omega \right) \quad (II.57)$$

II.13.2- La force déduite à partir de la Coénergie magnétique

La dérivée de la coénergie magnétique par rapport au déplacement, tout en maintenant le flux constant, fournit la force magnétique dont l'expression est la suivante :

$$F_{co} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{\Omega} \left(\int_0^H B dH \right) d\Omega \right) \quad (II.58)$$

II.13.3- La force de Lorentz

La force électromagnétique de Lorentz résulte de la coexistence d'une induction magnétique résultante d'une source d'excitation et d'une densité de courant induit dans un milieu conducteur. L'expression de cette force est donnée par :

$$\vec{F} = \iiint_V \vec{J} \cdot \vec{B} d\Omega \quad (II.59)$$

\vec{J} : Densité de courant [A/m²].

Le terme $\vec{J} \wedge \vec{B}$ représente la densité de la force magnétique qui est souvent utilisée à la place de la force magnétique.

II.13.4- La force déduite à partir du tenseur de Maxwell

Elle définit la force directement en termes de champ magnétique. La force est donnée par l'expression suivante :

$$\vec{F} = \iint_S \left[(\vec{B}_n \cdot \vec{H}_t) \vec{i} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\mu_0} B_n^2 - \mu_0 H_t^2 \right) \vec{n} \right] dS \quad (II.60)$$

B_n : Composante normale de l'induction magnétique.

H_t : La composante tangentielle du champ magnétique.

\vec{n} : Est la normale extérieure à la surface d'intégration.

\vec{i} : Est le vecteur tangent a la même surface.

s : La surface d'intégration contenant le milieu ou la force doit être calculée.

II.13.5- Force déduite à partir des travaux virtuels

Le principe de la méthode consiste à utiliser la méthode des éléments finis afin de calculer la force magnétique totale.

L'expression de l'énergie magnétique est donnée par l'équation(II.61) :

$$W = \int_V \left(\int_0^B H dB \right) d\Omega \quad (II.61)$$

En appliquant la méthode des éléments finis, le domaine est divisé en sous-domaine et l'énergie magnétique totale W sera la somme des énergies magnétiques contribuées par chaque élément.

$$W = \sum_{e=1}^n \int_{V_e} \left[\int_0^B H_e \cdot dB_e \right] d\Omega_e \quad (II.62)$$

Où n est le nombre des nœuds de la région subdivisée par éléments finis et V_e est le volume de l'élément e.

$$F = \frac{\partial}{\partial X} \sum_{e=1}^n \int_{V_e} \left[\int_0^B H_e \cdot dB_e \right] d\Omega_e \quad (II.63)$$

II.14- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations de Maxwell et les différentes formulations électromagnétiques qui permettent la résolution des équations de la magnétodynamique. Une attention particulière a été accordée à la formulation en potentiel vecteur magnétique pour ces avantages.

Ensuite, nous avons présenté ces différentes méthodes de résolutions des équations aux dérivées partielles. Nous avons aussi détaillé la MEF appliqué à un problème électromagnétique, ainsi que les divers moyens qui nous permettent de calculer la force électromagnétique.

CHAPITRE III

III- Application et résultats

III.1- Introduction

La modélisation des moteurs linéaires consiste principalement en l'évaluation de leurs forces électromagnétiques générées. Pour calculer la force produite dans le moteur, nous avons choisi la méthode de Lorentz, qui est adaptée à ce genre de problèmes. Plusieurs méthodes telles que le Tenseur de Maxwell, la méthode des travaux virtuels et la méthode de l'énergie totale (l'énergie magnétique et la Coénergie magnétique), celle-ci est évaluée dans l'inducteur du moteur en fonction de plusieurs paramètres principalement la densité de courant, l'épaisseur de l'induit, la profondeur d'encoches et la perméabilité relative.

La méthode des éléments finis est une méthode numérique fréquemment utilisée en électromagnétisme. Avec cette méthode, le domaine d'analyse est divisé en sous domaines. Les équations sont appliquées sur chaque élément. La méthode permet d'obtenir le champ magnétique (ou potentiel magnétique) en tous points de la géométrie. Cette méthode a été proposée en 1940, et est devenue la méthode la plus diffusée pour résoudre des problèmes de champ vectoriel [27].

III.2- Présentation du dispositif étudié

Le dispositif étudié, figure (III.1) est un moteur linéaire à induction (LIM) à double primaire. Ce dispositif se compose de deux primaires symétriques placés face à face. Le secondaire est réalisé par une plaque en aluminium, placée entre les deux primaires. Le dispositif est représentatif d'une application ferroviaire. Dans ce type d'application, la partie statique est une plaque en aluminium qui est fixée au sol, constituant un troisième rail, tandis que la pièce mobile est faite de deux primaires installés sur le train.

Quand les enroulements sont alimentés par un système symétrique triphasé de tension alternative, un champ magnétique de traction apparaît et induit des courants de Foucault dans la plaque en aluminium. Le champ magnétique et les courants de Foucault donnent naissance à une force de poussée, ce qui déplace les deux primaires le long de la plaque en aluminium. Le dispositif de référence est à une échelle réduite. Ce choix permet de valider les modèles utilisés et la démarche sur un dispositif physique réel.

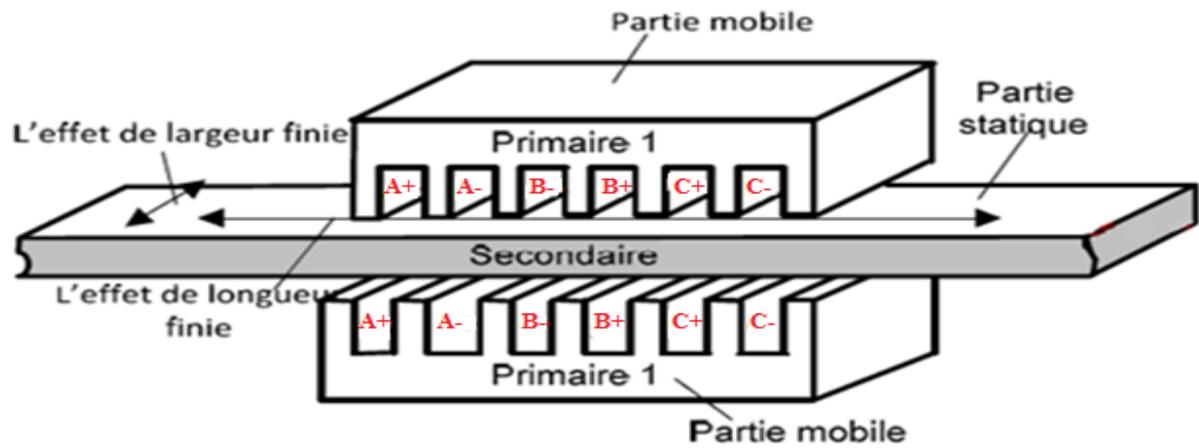


Fig. III.1. Moteur linéaire à induction à doubles primaires

Un moteur linéaire particulier est pris comme référence. Cette structure de référence est choisie dans l'objectif de valider les approches de modélisation retenues. La structure et les dimensions du primaire du moteur de référence sont présentées comme suit.

La machine étudiée est un moteur linéaire à simple induction à six encoches pour chaque inducteur.

La Figure (III.2) présente les dimensions du dispositif, ces paramètres seront utilisés pour modéliser le moteur de référence par la méthode éléments finis.

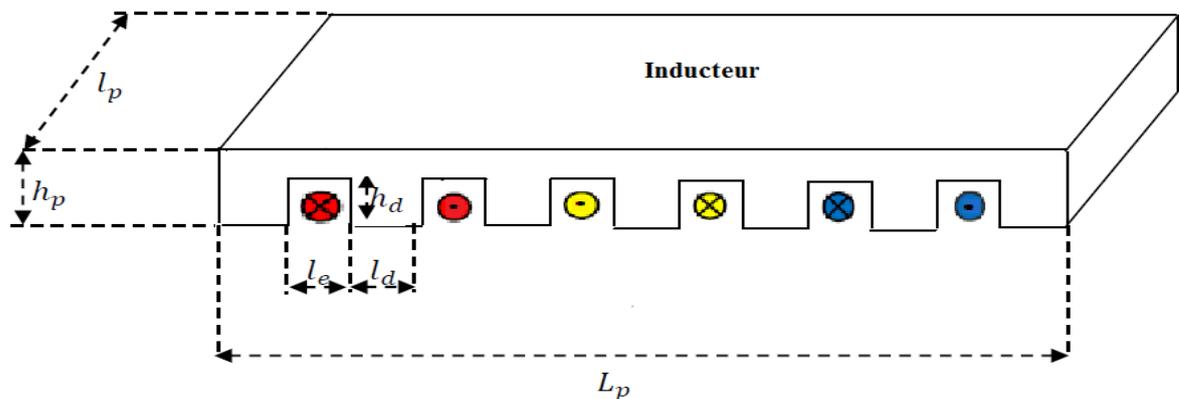


Fig. III.2. Les paramètres de la géométrie du mobile

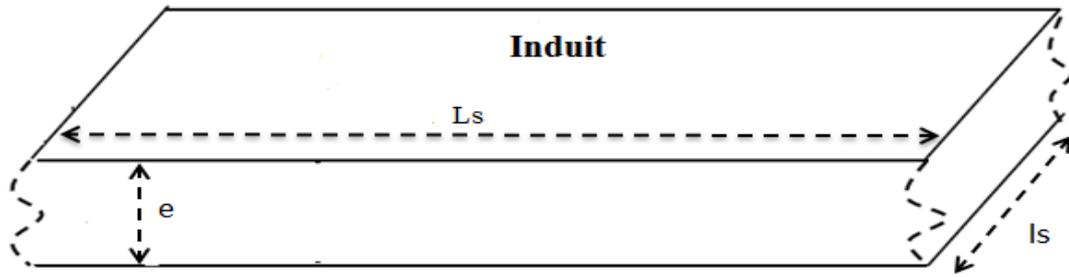


Fig. III.3. Les paramètres de la géométrie du rail

III.2.1- Caractéristiques géométriques

a) Inducteur (Fer-Silicium)

Longueur : $L_p = 84$ mm ;

Largeur : $L = 251.2$ mm ;

Hauteur : $h_p = 16$ mm ;

Hauteur de l'encoche : $h_d = 6$ mm ;

Largeur de l'encoche : $l_e = 8$ mm ;

Largeur de la dent : $l_d = 4.5$ mm ;

b) Induit (aluminium)

Longueur : $L_s = 400$ mm ;

Largeur du secondaire : $l_s = 251.2$ mm ;

Epaisseur : $e = 5$ mm ;

c) Entrefer (air)

Epaisseur : $g = 2$ mm ;

Les indices p et s sont respectivement relatifs au primaire qui désigne l'inducteur et au secondaire qui est l'induit.

III.2.2- Définition du problème

On définit les caractéristiques de notre problème sous le logiciel FEMM

Type de problème : cartésien ;

Unité de longueur : millimètre ;

Fréquence : 50Hz ;

La profondeur : 1000mm

Précision de calcul : $1e-008$;

III.2.3- Caractéristiques physiques pour les différentes régions et la maillages

a) l'air:

Perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$

Perméabilité magnétique relative du vide : $\mu_r = 1$

Finesse de maillage: 2

Groupe: 3

b) Le fer-silicium:

Perméabilité magnétique relative : $\mu_r = 4416$

Finesse de maillage : 2

Groupe : 3

c) L'aluminium :

Perméabilité magnétique relative : $\mu_r = 1$

Finesse de maillage: 0.25

Groupe: 2

Conductivité électrique: $\sigma = 34.45.10^6 S/m$

d) Le cuivre :

Perméabilité relative : $\mu_r = 1$

Finesse de maillage : 0.5

Groupe: 1 ;

Conductivité électrique : $\sigma = 58.10^6 S/m$

Densité de courant $J_s = 4 MA/m^2$

L'étude du moteur linéaire peut se ramener à l'étude d'une géométrie 2D, Le modèle géométrique traité dans le cadre de cette application est donné par la figure (III.4).

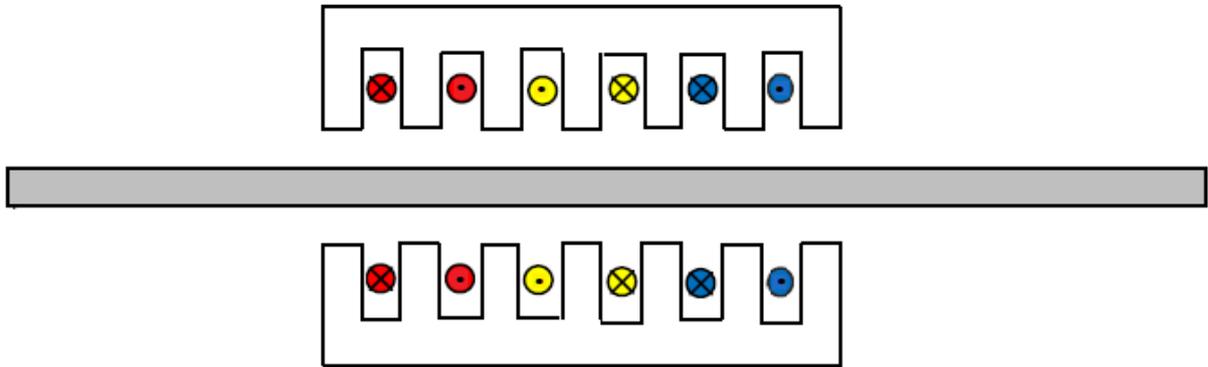


Fig. III.4.Modèle géométrique 2D de la machine à étudier

III.3- Equations électromagnétiques

L'étude de problèmes électromagnétiques dans le plan $[x, y]$ nécessite la résolution des équations aux dérivées partielles suivantes :

- Dans l'inducteur :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = J_{sz} \quad (III.1)$$

Avec :

$\nu = \frac{1}{\mu}$: reluctivité magnétique.

J_{sz} : La composante de la densité de courant suivant la direction z.

A_z : La composante du potentiel vecteur magnétique suivant la direction z.

- Dans l'induit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = 0 \quad (III.2)$$

σ : La conductivité électrique

- Dans l'air :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (III.3)$$

III.4- Conditions aux limites

Nous imposons des conditions aux limites de type Dirichlet ($A=0$)

III.5- Expression de la force électromagnétique

La méthode de calcul de la force magnétique utilisée pour évaluer la grandeur de la force produite dans l'inducteur est la force de Lorentz. La densité de force magnétique dans ce cas est donnée comme suit:

$$\vec{F} = \vec{J} \wedge \vec{B} \quad (III.4)$$

$$F_x = \iint J_{sz} B_x dx \quad (III.5)$$

$$F_y = \iint J_{sz} B_y dy \quad (III.6)$$

- F_x et B_x sont respectivement les composantes suivant l'axe de déplacement x de la force magnétique et de l'induction.
- F_y et B_y sont respectivement les composantes suivant y de la force magnétique et de l'induction.

III.6- Organigramme de calcul

La résolution par la méthode des éléments finis des équations (III.1), (III.2) et (III.3) en utilisant un programme de calcul sous le logiciel FEMM se fait suivant les étapes résumées dans l'organigramme de calcul donné par la figure (III.5) :

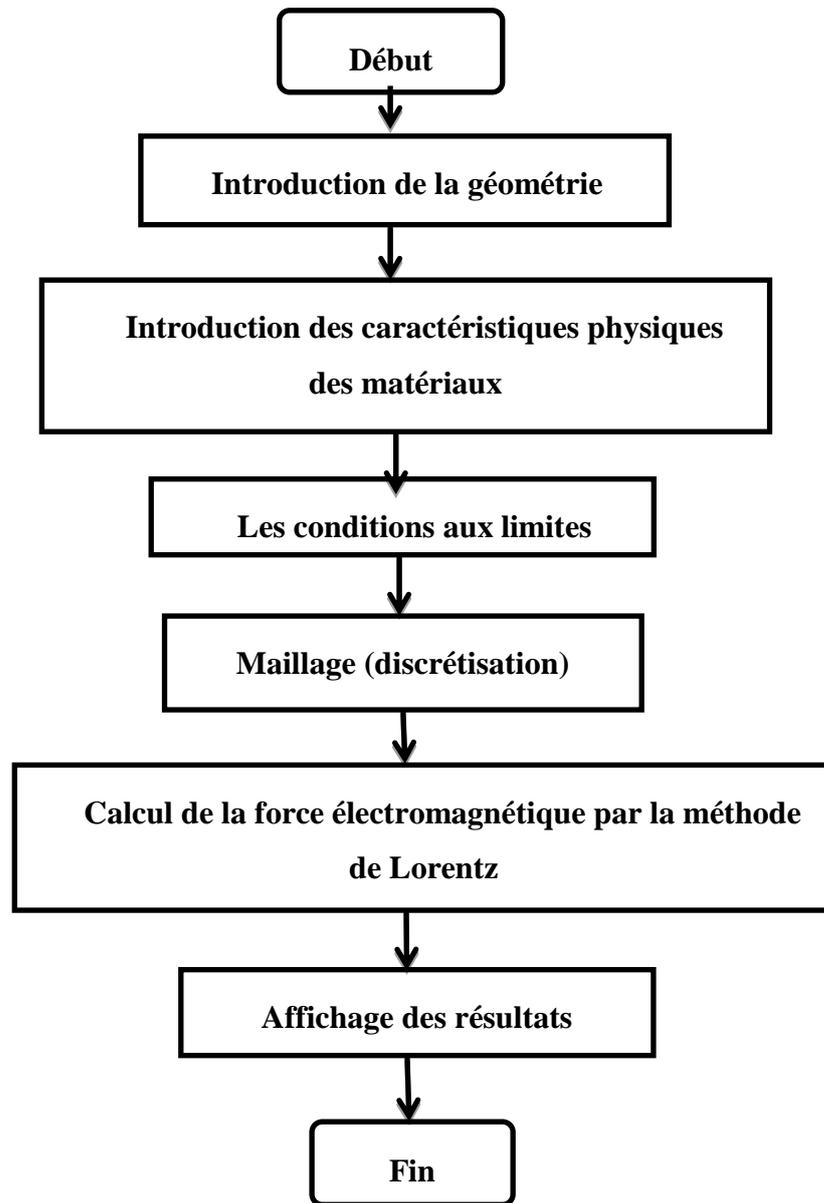


Fig. III.5. Organigramme de calcul

III.7- Application

III.7.1- Définition de la géométrie

On définit la géométrie de notre structure, les caractéristiques des matériaux et la géométrie du dispositif auquel sont associées des conditions aux limites sur les frontières du domaine, elles sont de type Dirichlet ($A=0$) représentées par la figure (III.6).

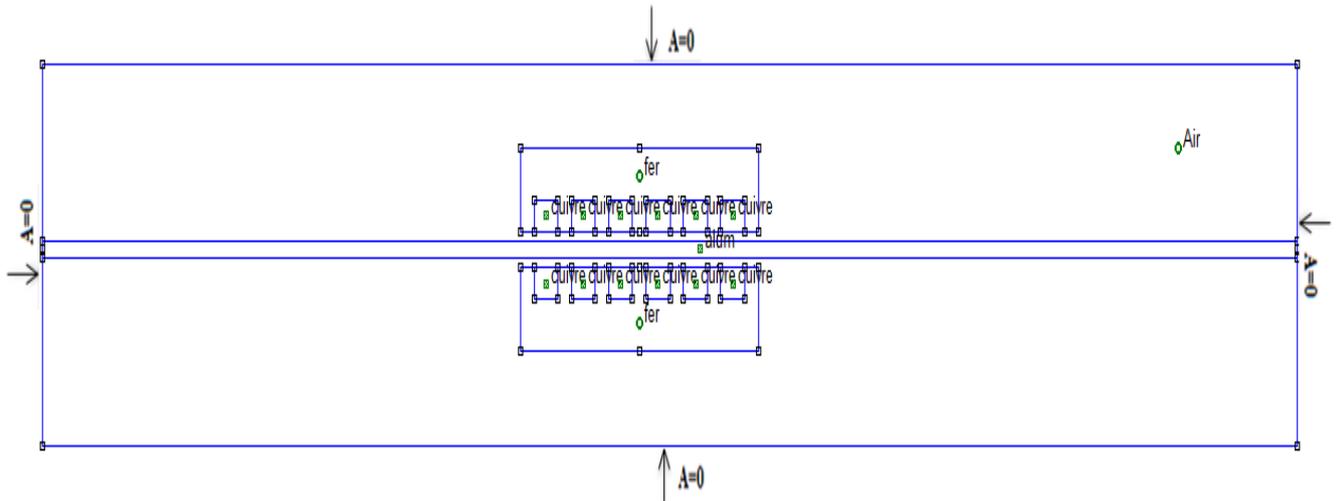


Fig. III.6. Définition du domaine et de la structure du moteur sur FEMM

En effet, la méthode s'adapte bien pour calculer le potentiel vecteur magnétique sur des structures avec une géométrie complexe et avec des caractéristiques des matériaux magnétiques non linéaires. Moyennant les hypothèses simplificatrices couramment utilisées, notamment négliger les effets d'extrémité, nous travaillerons en géométrie 2D, saturation du matériau ferromagnétique négligée, chute de force magnétomotrice dans le fer est nulle, l'énergie magnétique entièrement stockée dans le volume délimité par les deux surfaces des dents. C'est le logiciel FEMM qui va résoudre les équations du système. Il choisit automatiquement un maillage de 28269 nœuds et beaucoup plus raffiné au niveau des matériaux constituant le moteur qu'au niveau de l'air comme illustré sur la figure (III.7) :

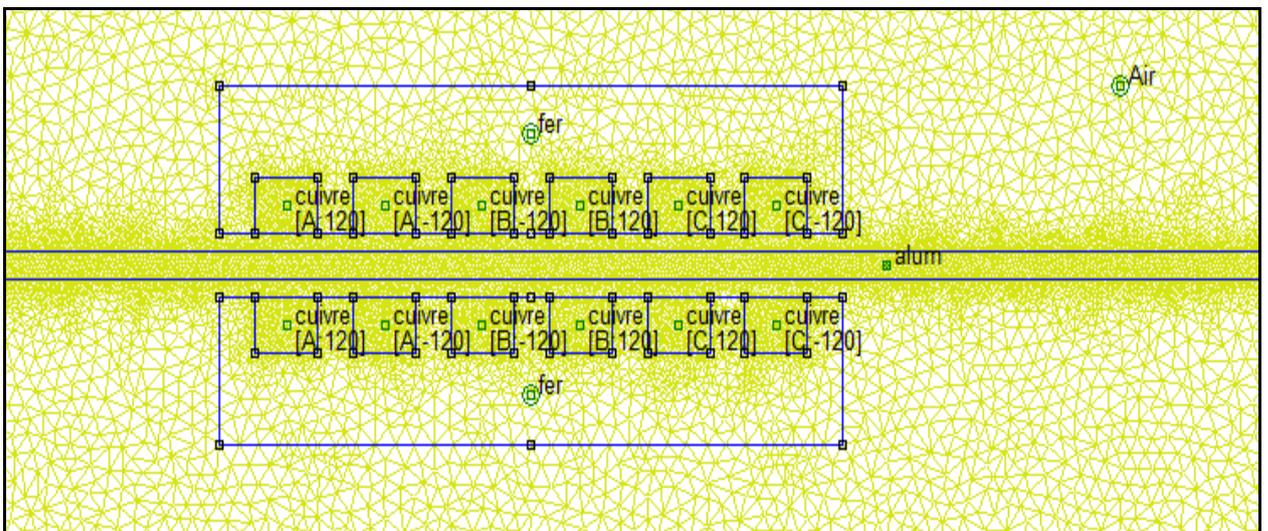


Fig. III.7. Maillage de la structure avec la méthode des éléments finis

III.7.2- Distribution du champ d'induction :

Les Figures (III.8) et (III.9) présente la distribution du champ magnétique dans le modèle éléments finis 2D lors de l'alimentation d'une seule phase avec une tension alternative.

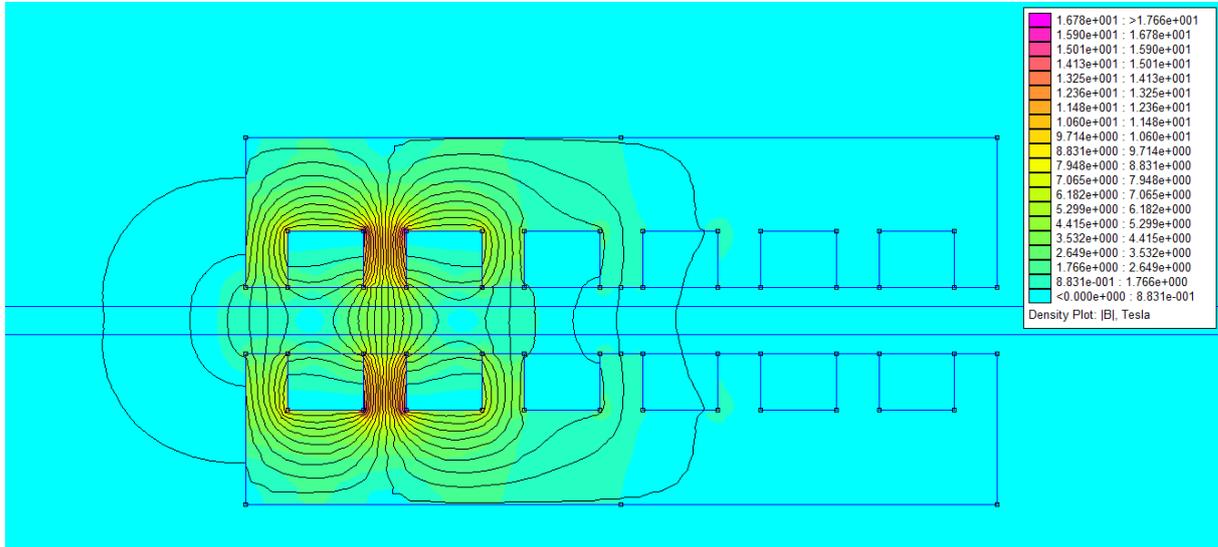


Fig. III.8.Distribution du champ magnétique créé par la bobine A

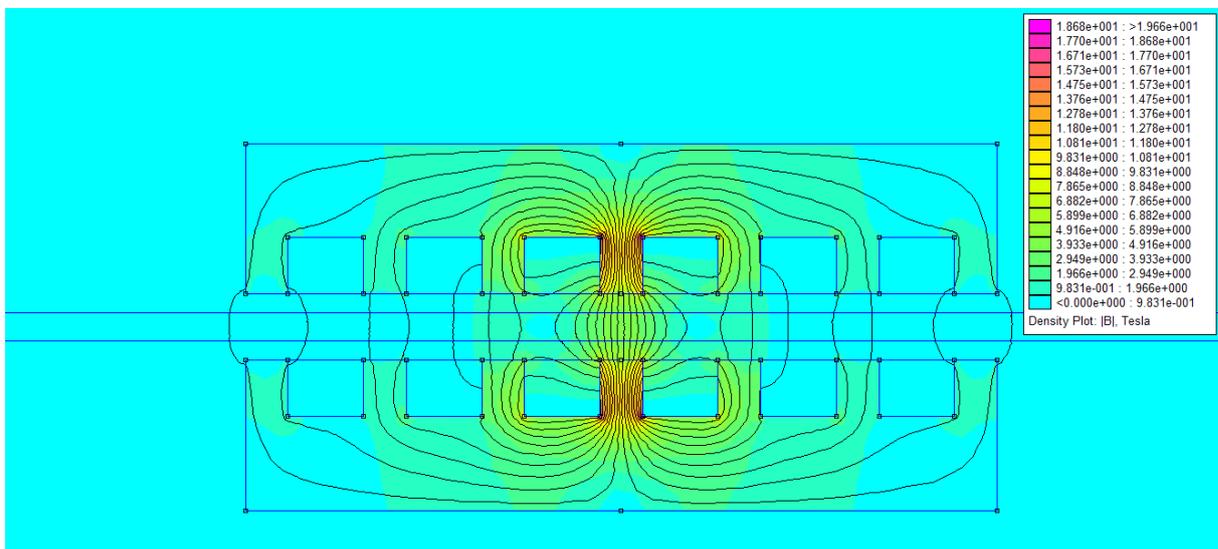


Fig. III.9.Distribution du champ magnétique créé par la bobine B

La Figure (III.10) présente la distribution du champ magnétique dans le moteur complet.

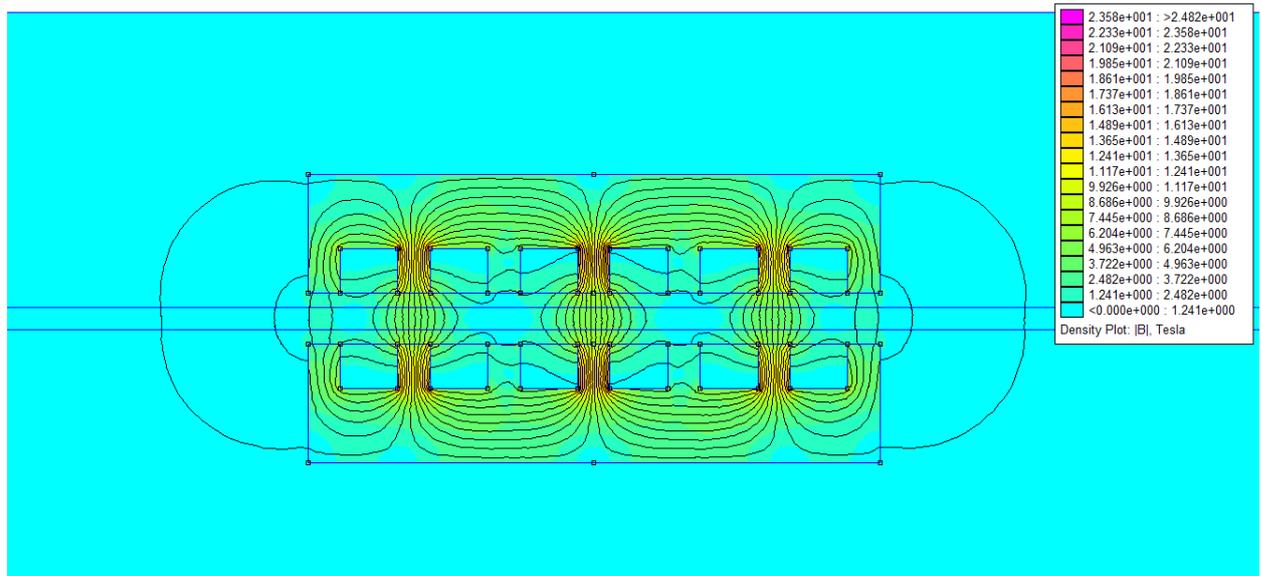


Fig. III.10.Distribution du champ magnétique dans la structure

Les deux primaires sont alimentés par la même tension au niveau de l'ordre et de l'amplitude des phases. Cela permet de renforcer l'induction dans le moteur par rapport au moteur à un seul primaire.

III.7.3- Calcul de la force de poussée

L'avantage important du moteur linéaire est de générer directement une force de poussée, sans système intermédiaire. Dans la structure de référence (figure III.4), deux primaires sont alimentés simultanément afin de créer un champ glissant selon la direction X. Des courants de Foucault sont induits dans le secondaire. L'interaction entre le champ magnétique du secondaire et le champ des deux primaires génère la force de poussée.

La Figure (III.11) montre le chemin d'intégration pour calculer la force de poussée.

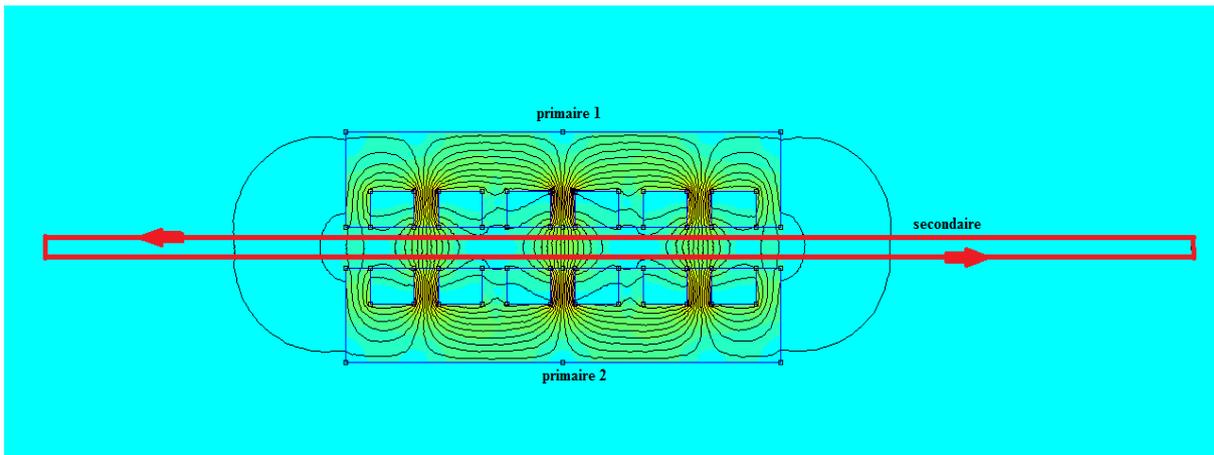


Fig. III.11. Chemin d'intégration de la force

III.8- Influence des propriétés géométriques et physique

III.8.1- Influence de l'entrefer

Pour le dispositif représenté par la figure (III.4), on fait varier l'entrefer de 1mm à 8mm en gardant les autres paramètres constants, en calculant pour chaque entrefer la valeur de la force générée.

La Figure (III.12) présente l'évolution de la force de poussé en fonction de l'entrefer.

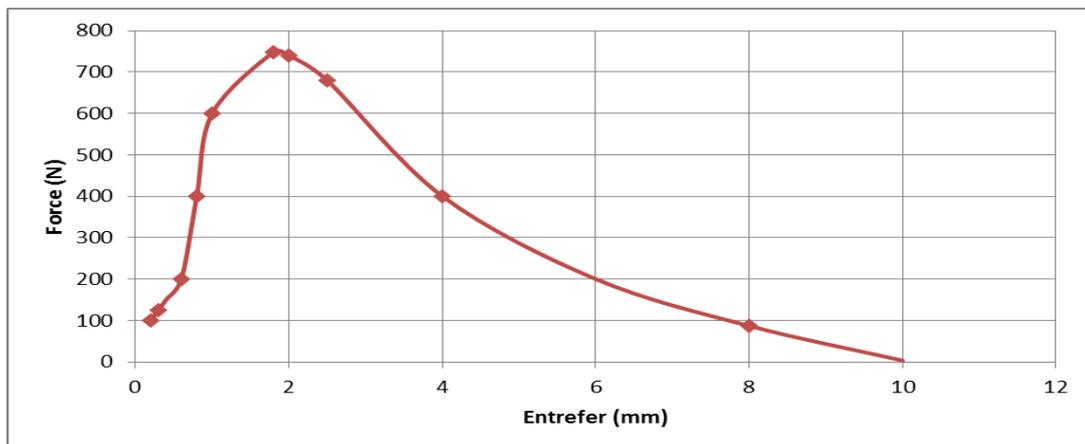


Fig. III.12. Force de poussé en fonction de l'entrefer

Le bobinage est alimenté par une tension triphasée alternative fréquence 50Hz. Quand l'entrefer augmente, la force de poussé croît progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximal pour un entrefer de 1.8mm ensuite elle commence à décroître progressivement pour tendre vers zéro. La force suivant l'axe Y (F_y) est nulle. L'influence de l'entrefer est majeure et importante.

III.8.2- Influence de la perméabilité magnétique relative

La Figure (III.13) présente l'évolution de la force de poussé pour les différentes valeurs de la perméabilité magnétique relative du matériau de la culasse, variant de 500 à 10000.

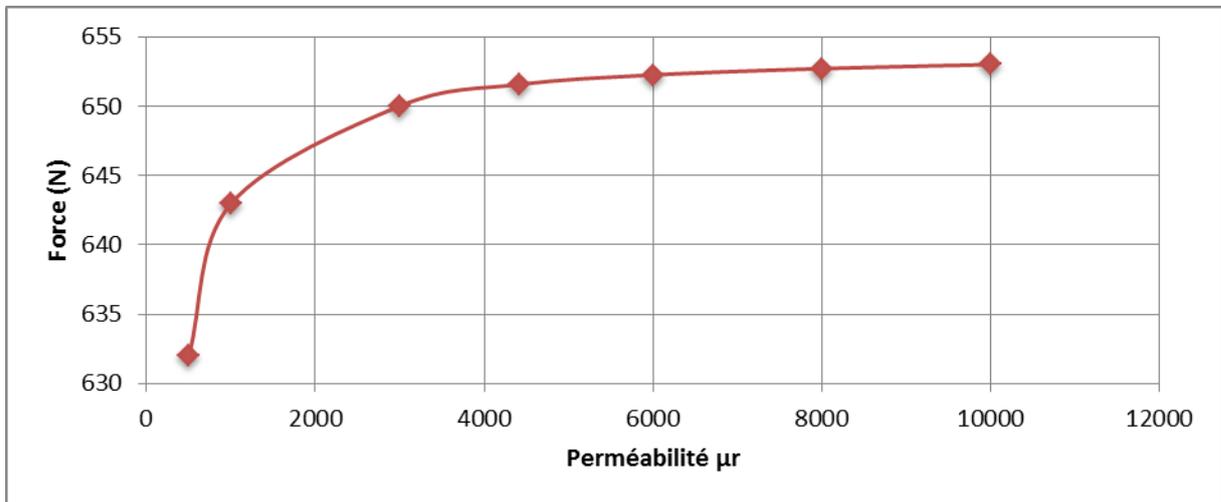


Fig. III.13. Force en fonction de la perméabilité magnétique relative

La figure (III.13) représente l'allure de la force en fonction des perméabilités magnétiques de la culasse du moteur. Nous constatons que la force croît progressivement jusqu'à atteindre approximativement la valeur de 653 N puis elle se stabilise à partir de cette dernière, car les perméabilités magnétiques relatives considérées servent seulement à canaliser les lignes de champ magnétique et n'interviennent pas directement dans le calcul de force qui est évaluée seulement dans la plaque conductrice.

III.8.3- Influence de l'épaisseur de l'induit

Pour voir l'influence de l'épaisseur de l'induit sur la force magnétique on fait varier l'épaisseur de l'induit de 0.5mm à 15mm, en gardant les autres paramètres constants, en calculant pour chaque épaisseur la valeur de la force générée. Nous avons obtenu le résultat suivant dans la figure (III.14).

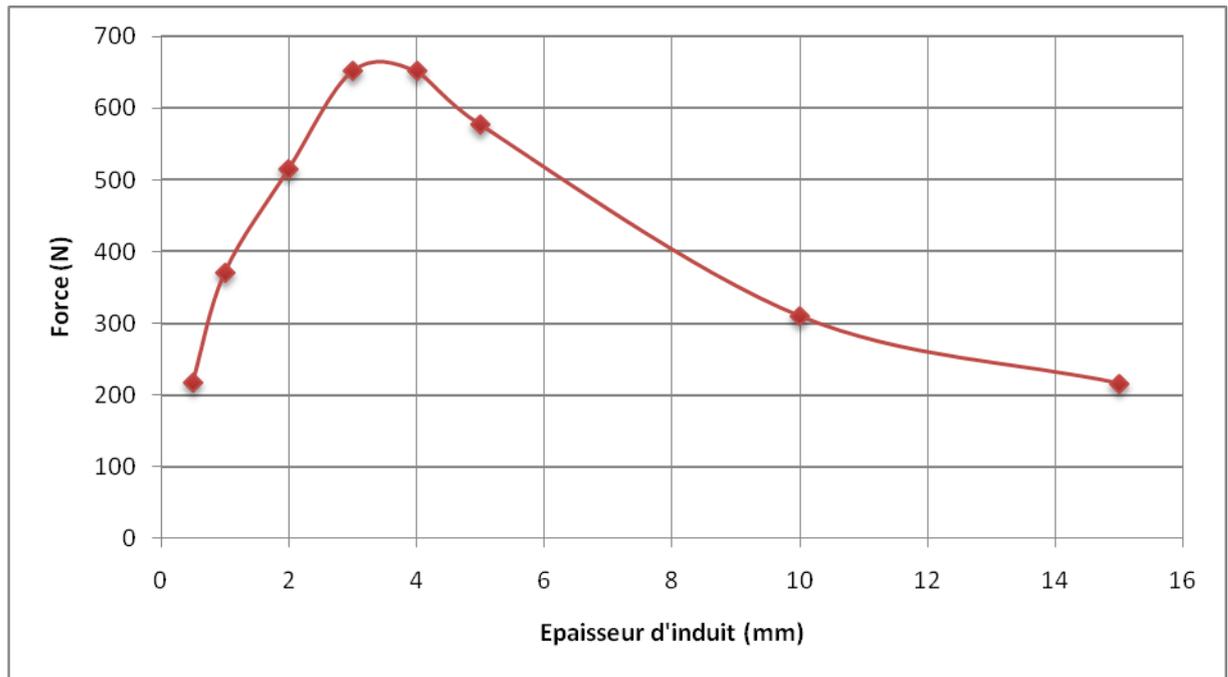


Fig. III.14. Force de poussée en fonction de l'épaisseur de l'induit

Tout d'abord, la force augmente avec l'épaisseur de l'induit puis diminue. Quand l'épaisseur augmente au-delà de 3.5mm, la force de poussée continue à décroître. C'est-à-dire qu'il y a une épaisseur permettant d'avoir la force maximale par la même source d'alimentation.

III.8.4- Influence de la largeur des dents

Pour voir l'influence de la largeur des dents sur la force, on prend le dispositif représenté par la figure (III.4) en gardant toutes les autres propriétés constantes, on fait varier la largeur des dents de 1mm à 14mm et on calcule la force magnétique pour chaque valeur.

La figure (III.15) représente la variation de la force magnétique en fonction de la largeur des dents.

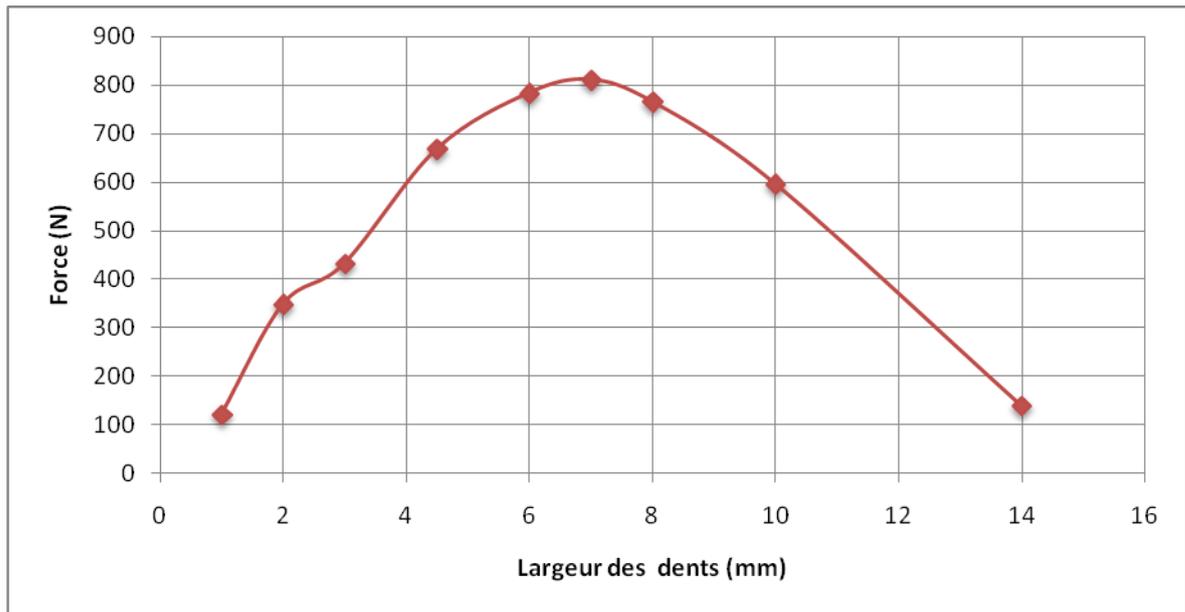


Fig. III.15. Force de poussée en fonction de la largeur des dents

Nous constatons que la variation de la largeur des dents a un effet important sur la valeur de la force magnétique. On remarque que la force augmente avec l'augmentation de la largeur des dents jusqu'à une valeur maximal pour une largeur de 7mm, ensuite elle commence à décroître.

III.8.5- Influence de la conductivité de l'induit

Pour voir l'influence du matériau de l'induit sur la force magnétique, on fait varier la conductivité électrique de l'induit du dispositif étudié en utilisant des matériaux différents (l'aluminium, le cuivre, le fer et l'acier) et on relève la force magnétique.

La figure (III.16) représente la valeur de la force magnétique pour des différents matériaux de l'induit.

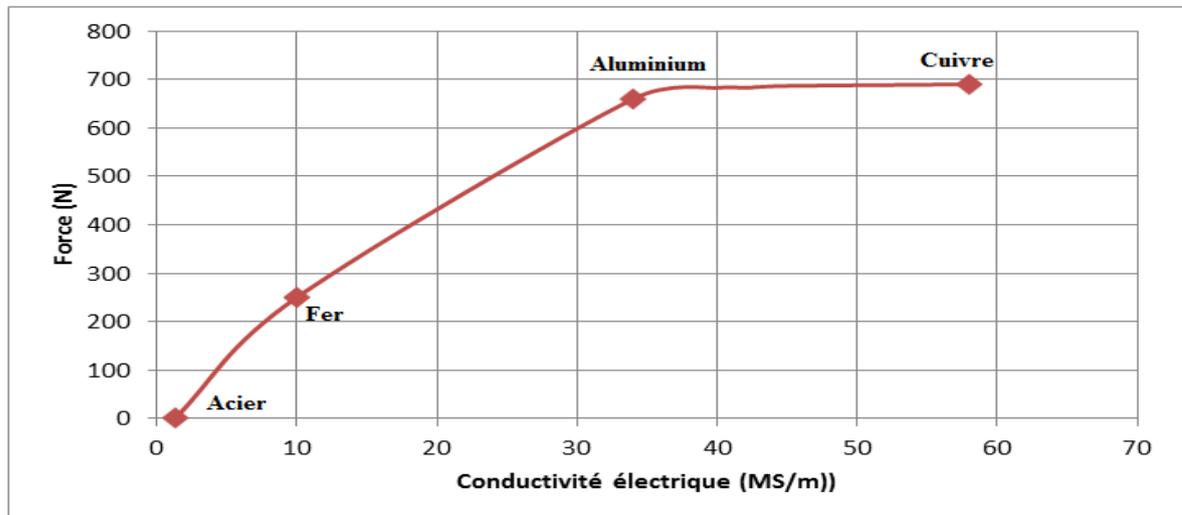


Fig. III.16. Force de poussée en fonction du matériau de l'induit

On constate que la valeur de la force magnétique obtenue augmente avec la conductivité électrique. Pour les deux matériaux (le fer et l'acier), la force est trop faible par rapport à celles obtenue avec l'aluminium et le cuivre qui sont beaucoup plus intéressante, cela est dû à la différence des caractéristiques (la conductivité électrique et la perméabilité magnétique relative de ces matériaux).

III.9- Conclusion

Cette partie a été principalement consacrée à l'évaluation de la force électromagnétique engendrée par un moteur linéaire à induction par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FEMM. Le but de l'étude est d'évaluer aussi l'influence de quelques paramètres tels que la perméabilité magnétique, l'épaisseur de l'entrefer, la largeur des dents, l'épaisseur et la conductivité de l'induit sur la force électromagnétique calculée par la méthode de Lorentz. En examinant les différents résultats que nous avons obtenus, nous constatons qu'ils sont très significatifs.

L'étude nous a permis de montrer que l'augmentation de la perméabilité relative augmente et la conductivité du matériau de l'induit, la force augmente jusqu'à une valeur maximal où elle se stabilise, par contre avec l'augmentation de la largeur des dents, l'entrefer et l'épaisseur de l'induit, au début la force augmente jusqu'à une valeur maximal puis elle commence à diminuer progressivement.

CONCLUSION GENERALE

Les différentes applications du moteur linéaire pour la traction sont présentées. On retrouve les applications pour les trains traditionnels à roues sur rails et pour les trains sans contact ou à lévitation magnétique (Maglev). Avec l'augmentation de la population et de l'expansion des zones d'activité humaines, les moyens de transport traditionnels ne satisferont plus les besoins. Le train utilisant le système Maglev est un moyen de transport en commun innovant et représente un très bonne alternative pour les besoins de transport du futur.

Le principe de fonctionnement et les différentes configurations des moteurs linéaires sont également présentés et plus particulièrement les moteurs pour trains à lévitation magnétique.

Des simplifications du point de vue spatiale et fréquentielle sont adoptées pour réduire le modèle générale de Maxwell à une seule équation magnétodynamique dont la variable d'état est le potentiel vecteur magnétique. Pour la résolution de cette équation, nous avons présenté les différentes méthodes de résolutions des équations aux dérivées partielles ainsi que les divers moyens de calcul de la force électromagnétique.

La méthode numérique exploitée pour la résolution du problème est la méthode des éléments finis avec laquelle le logiciel FEMM (Finit Element Method Magnetic) est développé. Nous avons utilisé ce logiciel pour simuler le fonctionnement d'un moteur ayant des bobines séparées avec six encoches et alimentées avec un système triphasé équilibré. Pour maintenir l'équilibre, ce moteur est à double inducteur. Différents essais ont été réalisés pour étudier l'influence des différents paramètres géométriques et électromagnétiques sur la densité de force électromagnétique.

L'étude a concernée l'évolution de la force électromagnétique en fonction de la perméabilité magnétique, de conductivité électrique, de l'épaisseur de l'induit, de l'entrefer et de la largeur des dents.

Des résultats obtenus, nous constatons, du point de vue électromagnétique, que la force électromagnétique varie proportionnellement avec la conductivité électrique du matériau d'induit et la perméabilité magnétique de la culasse jusqu'à la saturation où elle se stabilise. Du point de vue géométrique, tout d'abord la force augmente avec l'augmentation de la largeur des dents, l'entrefer et l'épaisseur de l'induit jusqu'à une valeur maximal, ensuite elle commence à décroître progressivement. C'est-à-dire qu'il y une épaisseur permettant d'avoir la force maximale par la même source d'alimentation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. ZEHDEN, New Improvement in Electric Traction Apparatus, U.S. Patent n° 88145, 04/06/1902.
- [2] J. F. Gieras, Linear Induction Drives, Oxford Science Publications, 1994.
- [3] Bernard Multon et Jean Bonal, les entrainements électromécaniques directs : Diversités, contraintes et solutions. CEMD'99, ENS de Cachan SEE, France.
- [4] Lilia El Amraoui, conception Electromécanique d'une gamme d'actionneurs linéaires tubulaires à reluctance variable, thèse de doctorat, université de Lille.2002.
- [5] Y. Sakamoto, T. Kashiwagi, T. Sasakawa and N. Fujii, Linear Eddy Current Brake for Railway Vehicles Using Dynamic Braking, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM2008, Vilamoura, Portugal, Sep. 2008.
- [6] H. Lee, K. Kim and J. Lee, Review of Maglev Train Technologies, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 7, July 2006.
- [7] ModelHSST-100 (Linimo) <http://www.nsharyo.co.jp/>
- [8] Shanghai Maglev Transportation Development Co., Ltd official Website: <http://www.smtdc.com/en/index.asp>
- [9] MaglevTransport, website: <http://www.maglevtransport.com>
- [10] Hitachi Rail.com:www.hitachirail.com/products/rv/linear/features/index_2.html.
- [11] W. Xu, J. Zhu, Y. Zhang, D. G. Dorrell and Y. Guo, Electromagnetic Optimal Design of a Linear Induction Motor in Linear Metro, IECON 2010, 36th annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, 7-10 Nov. 2010.
- [12] W. Xu, J. Zhu, Y. Zhang, Y. Guo, G. Sun, Steady and Dynamic Performance Analyses of a Linear Induction Machine, XIX International Conférence on Electrical Machines (ICEM 2010), Roma, Italia, 6-8 Sept. 2010.
- [13] B. Luc Quin ET O. Pironneau, introduction au calcul scientifique, collections mathématiques appliquées pour la maîtrise, Masson, Paris, 1996.

- [14] O. C. Zienkiewicz et R. L. Taylor, la méthode des éléments finis: Formulation de base et problèmes linéaires, Afnor, Paris, 1991.
- [15] A-BOUZIDI. Etude du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Pulsés en utilisant les Circuits Electromagnétiques Couplés. Université de Bejaia 2012.
- [16] B.MAUCHE. Elaboration de modèles par les Grandeurs Electromagnétiques Couplées. Application au Contrôle et à l'Evaluation Non Destructif par Courant de Foucault. Université FERHAT ABBASS – SETIF. 2007.
- [17] N. Hulin et M. Hulin, Equations de Maxwell, ondes électromagnétiques, tome3, Edition Ediscienne, Paris, 1996.
- [18] H .Mohellebi, modèle analytico-numérique de calcul des courants de Foucault dans des dispositifs axisymétriques, Mémoire de Magister, Université de Tizi-ouzou 1996.
- [19] E. Amzallag, N. Picolli, Electromagnétisme, Tome3, Edition Ediscienne, Paris, 1996.
- [20] J. C. Sabonnadiere, J. L. Colomb, Calcul des champs électromagnétiques, Technique de l'ingénieur, D 3020, traite de génie électrique, 2003.
- [21] Matthew N.O. Sadiku, Numerical Technique in Electromagnetic, Copyright C 1992 by CRC Press Inc, ISBN 0-8493-4232-5, 1992.
- [22] F. Hocini, M. Abdellah, M. Zaouia, H.Mohellbi, Modèle De Couplage électromagnétique, CNEA 04, Sidi Bel-abbes, 24 ET 25 Mai 2004.
- [23] P.P. Silvester and R. L. Ferrari, Finite Elements Method For Electrical Engineers, Cambridge University press, 2nd Edition, 1990, Reprinted 1991.
- [24] S. Yaici, Modélisation électromagnétique et évaluation des performances d'une machine lineaire synchrone à aimant permanent, thèse de Magister, U.S. T. H. B, 1996.
- [25] G. Spinnler, conception des machines : principe et application, Tomel, Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 1997.
- [26] G. Meunier, D. Shen, J.L. Coulombe, Modélisation of 2D Axisymmetric magnetodynamic domain by the finite element method, IEEE Transactions on magnetics, vol.24,N°1,January1988
