

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SIENTIFIQUE
جامعة جيجل
UNIVERSITE DE JIJEL

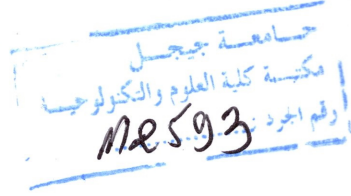
MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA

Faculté Des Sciences Et

كلية العلوم و التكنولوجيا



De La Technologie



Département D'électrotechnique

قسم الهندسة الكهربائية

MEMOIRE DE FJN D'ETUDE

Présenté Pour L'obtention Le Diplôme De Master En Electrotechnique

OPTJON

Machines Électriques

THÈME

**Étude Des Effets De Mouvement Dans Les
Dispositifs à Aimants Permanents**

Préparé par :

➤ **BOUKEHIL Zahira**

Encadré pare :

Mr .ALLAG Hicham

Promotion juin 2016

REMERCEMENTS

On doit remercier en premier celui qui nous a donné la vie, et nous prend en soin à chaque instant « ALLAH », le clément de avoir nous donné la foi et le courage pour terminer ce travail.

Un spéciale remerciement pour l'encadreur Mr « H .ALLAG » qui à proposé ce sujet de recherche, et qui m'a encadré et soutenu par ses conseils, sa Compréhension et ses encouragements.

Je tiens aussi à présenter mesremerciement aux membres de jury qui ont accepté de juger mon modeste travail.

Tous les enseignants qui ont contribués à notre formation.

De plus je remercie ma famille pour leur compréhension et leur en couragement et toute personne ayant aidé de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sans oublier mes amis et collègues de la promotion pour leur Soutien amicaux.

« On a toujours assez du temps si on l'exploite bien »

Zahira.

Dédicaces

*A celle qui a su me consolider durant les moments les plus difficiles
de ma vie*

..Mémère,

A ma source de patience, je lui souhaite bonne santé et belle vie

..Mon père,

A mes sœurs

A mes frères, et femme de frère « Antar »

A mes chers les collègues, et sa famille,

A toutes mes amies,

*Particulièrement à l'encadreur Mr « H .ALLAG » et Tout les
enseignants de spésailité,*

*A tous ceux qui, de près ou de loin n'ont cessé de m'apporter leur
soutien durant mes études,*

Zahira...

Sommaire

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I

Les types des aimants permanents et leurs propriétés magnétiques.

Introduction	2
I.1 Grandes classes de matériaux pour aimants permanents	2
I.2 Différent type des aimants permanents	3
I.2.1 Les AlNiCo.....	3
I.2.2 Les ferrites dures.....	4
I.2.3 Les aimants céramiques.....	5
I.2.4 Les terres rares.....	5
I.2.4.1 Les Samarium-Cobalt.....	5
I.2.4.2 Les Néodyme-Fer-Bore.....	6
I.3 Propriétés magnétiques	6
I.3.1 Importance de la température sur le BH_{max} (énergie maximale des aimants terres rares)	8
I.3.2 L'énergie développée comme industrielle	9
I.3.3 Le développement des aimants permanents dans le 20 ^{ème} Siècle	11
Conclusion.....	12

Chapitre II

Les systèmes électromécaniques contenant des aimants permanents.

SOMMAIRE

Introduction	13
II.1 Systèmes électromagnétiques à aimants permanents	13
II.1.2 Intérêt des aimants pour les systèmes magnétiques	13
II.1.3 Systèmes contenant uniquement des aimants permanents	14
II.1.3.1 Les paliers à aimants permanents	15
II.1.3.2 Les différentes configurations de centreurs et de butées magnétiques.....	15
II.2 Systèmes tournants contenant des aimants permanents et partie conductrice	17
II.2.1 Les machines synchrones à aimant permanent	18
II.2.2 Différents types de machines à Aimants	18
II.3 Le four à induction	19
II.4 Moteur linaire	20
Conclusion	21

Chapitre III

Méthodes et calcul bidimensionnels des interactions entre aimants permanents et conducteurs

Introduction	22
III.1 Principes des sources équivalentes	22
III.1.1 Calcul du champ magnétique dû à un volume aimanté en un point extérieur à l'aimant	22
III.2 Application en 2D de la méthode des charges équivalente « Approche Coulombienne ».....	25
III.2.1 Calcul du potentiel scalaire.....	26

SOMMAIRE

III.2.2 Calcul du champ et de l'induction magnétiques.....	27
III.3 calcul des grandeurs magnétiques des aimants permanents	27
III.3.1 Prise en compte du mouvement (aimants et la plaque conductrice).....	30
III.3.2 Application et calcul	35
Conclusion.....	40
Conclusion générale.....	41



Introduction générale

Introduction générale

Les exigences de plus en plus pointues de la technologie ont fait que les systèmes à aimants permanents sont de plus en plus utilisés plus particulièrement dans les applications industrielles exigeantes en encombrement et en puissance. Les performances de ces structures peuvent être accrues en élaborant des modèles d'étude représentant le plus fidèlement possible leur comportement dynamique. La technologie et l'industrialisation étaient et resteront parmi les plus gigantesques préoccupations pour pouvoir accaparer et monopoliser les richesses, le pouvoir, l'armement...etc. Quand on dit industrialisation, on pense souvent à des chaînes complètes automatisées capable de réaliser des tâches spécifiques. Ces derniers ont toujours besoin d'organes et de dispositifs capables de fonctionner en mouvement, qu'on les appelle généralement actionneurs électriques. Il y a une très grande variété d'actionneurs qui peuvent assurer des mouvements en rotation ou en translation suivant des degrés de liberté imposés par les constructeurs.

Dans notre travail, on va s'intéresser uniquement aux actionneurs contenant des aimants permanents pour pouvoir prédire et calculer les courants induits issus directement des mouvements en question. Pour ce faire, ce mémoire est organisé en trois chapitres, dont le premier traite directement les propriétés des aimants permanents en donnant des éclaircissements sur leurs évolutions et l'intérêt qu'ils offrent.

Le deuxième chapitre, montre la majorité des dispositifs électromécaniques contenant des aimants permanents et leurs supériorités par rapport à d'autres qui peuvent avoir entièrement des bobinages conductrices en cuivre.

Le dernier chapitre, qui est le vrai fruit de ce modeste travail, concerne toute une procédure électromagnétique, ajouté à cela la prise en compte des détails mécaniques pour pouvoir calculer et prédire le comportement des courants induits dans ces systèmes.

Enfin, on terminera avec des conclusions et des perspectives.

Chapitre I

Les types des aimants permanents et leurs propriétés magnétiques

Introduction

L'histoire des aimants commence dans l'Antiquité. En Chine, puis un peu plus tard en Grèce, les hommes découvrent une pierre noire, la pierre d'aimant, qui a l'étrange pouvoir d'attirer le fer. Qui plus est, cette pierre a la capacité de transmettre son pouvoir au fer [1].

Le mot aimant doit son origine au latin « Adamas » Qui signifie fer, La magnétite (Fe_3O_4) n'est pas le seul composé aimant. Vers le XIXe siècle apparaissent en Europe les premiers aimants artificiels en fer, et peu de progrès ont été faits dans ce domaine jusque vers les années 1930. Les matériaux utilisés étaient alors des aciers durs martensitiques au chrome, au tungstène ou au cobalt, caractérisés par la traditionnelle forme en U [4]. Les mêmes propriétés ont été trouvées dans de nombreux autres composés minéraux. Le volume de vente d'aimants dans le monde occidental qui dépasse dix milliards de Francs (1,5 milliard d'Euros) par an en 1994 reflète leurs importance les mondes actuel [1]. Ceci est du à leurs hautes performances, puissances massiques et couple volumique élevés.

Aujourd'hui, on trouve des aimants dans des domaines aussi divers que la santé, la production des sources d'énergie renouvelables, les moteurs électriques, les télécommunications, etc. [1].

I.1 Grandes classes de matériaux pour aimants permanents

Les matériaux que l'on utilise pour leurs **propriétés magnétiques** peuvent se classer en deux grandes familles :

- les matériaux magnétiques **durs** qui sont des aimants permanents ;
- les matériaux magnétiques **doux** qui ne présentent des propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation extérieure ; En effet, quand un matériau est placé dans un champ électromagnétique extérieur H , il se crée une induction magnétique B_r propre au matériau qui est due à la polarisation des domaines (petites régions dans lesquelles les dipôles magnétiques s'orientent localement). Lorsque l'on supprime le champ extérieur, il reste une polarisation permanente dans le cas des matériaux magnétiques durs, appelée rémanence, alors qu'il n'y en a pratiquement pas dans les matériaux magnétiques doux [2].

La courbe $B = f(H)$ relative à chaque type de matériau est appelée **cycle d'hystérésis**. La Figure I.1 montre la forme de ces courbes dans les deux cas.

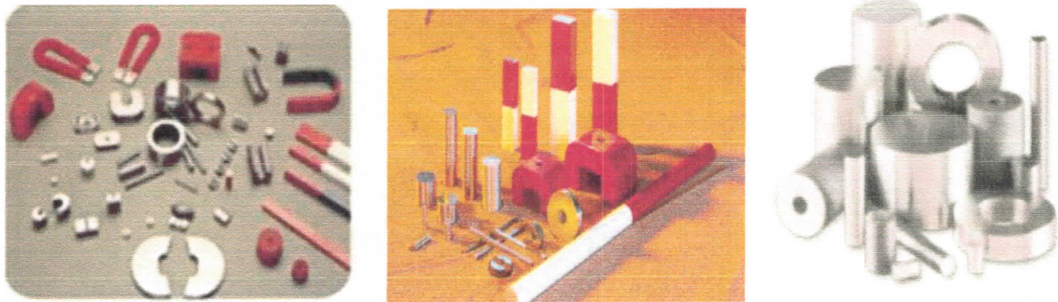


Figure I.2 aimants en AlNiCo

I.2.2 Les ferrites dures

- Les ferrites durs (dans les années 1950) sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Les aimants ferrites, trouvent l'essentiel de leurs applications dans les moteurs de faible puissance, utilisés dans l'industrie automobile [3].

Les aimants à liant synthétique peuvent être fabriqués par matriçage ou par injection d'un matériau de base constitué de ferrite, de Neoflux ou de samarium-cobalt. Cet élément de base est mélangé à un matériau thermoplastique tel que le polyamide.

L'avantage de ce matériau est qu'il peut prendre, par matriçage ou par injection, des formes très irrégulières, avec des tolérances serrées, de l'ordre de 0,05 mm, sans usinage de finition. Bien que les aimants au Neoflux à liant synthétique aient une bien meilleure résistance à la corrosion que ceux au Neoflux fritté, il est cependant conseillé de les enduire. Du fait de l'isotropie du matériau, ce dernier peut être magnétisé dans différentes directions [4] et [5]. La Figure. I.2.3.



Figure I.3 aimants ferrites



I.2.3 Les aimants céramiques

- Les aimants céramiques sont encore toujours les aimants les plus utilisés. En raison des contraintes environnementales de plus en plus sévères, la ferrite de baryum a été remplacée, ces dernières années, par la ferrite de strontium [5].

La ferrite est le matériau magnétique le moins cher et possède une grande résistance à la corrosion, rendant tout revêtement inutile. Ce matériau magnétique est dur et cassant et doit être travaillé à l'outil diamant, de préférence avant magnétisation [4] et [5]. La Figure. I.4



Figure. I.4 aimants céramique.

I.2.4 Les terres rares

Ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones [3] ;

I.2.4.1 Les Samarium-Cobalt

- Les Samarium-Cobalt : Il y'a deux type ;(SmCo), (fin des années 1960), Sm(CoFeCuZr), (fin des années 1970) [4]; Sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300°C), mais ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition [3] et [6].

Les SmCo sont utilisés dans des applications particulières (télécommunications, aéronautique), dont les propriétés à haute température et la résistance à l'oxydation sont supérieures. Les aimants au SmCo ont de très bonnes propriétés magnétiques, avec une énergie magnétique maximale allant de 18 à 30 MGOe [4] et [5].

Les aimants au SmCo représentent souvent le meilleur choix pour les applications où la durabilité est très importante, comme les produits électroniques de haute qualité des appareils médicaux et de l'industrie automobile. Le prix de revient des aimants au SmCo est beaucoup plus élevé que pour le Neoflux, compte tenu des prix élevés et fluctuants du cobalt. Le SmCo est très fragile [2] et [4]. La Figure. I.2.5

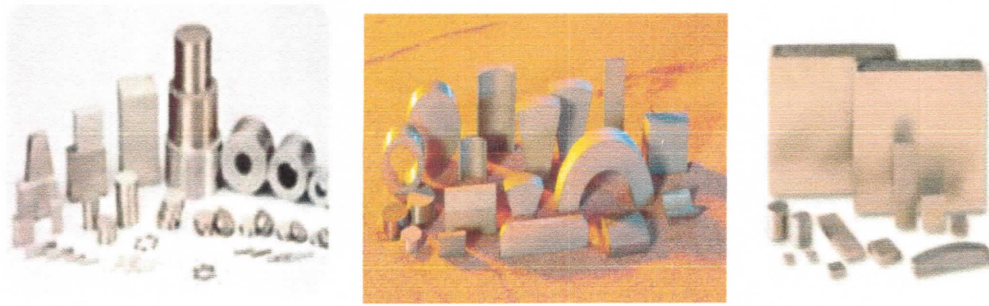


Figure. I.2.5 aimants au samarium-cobalt

I.2.4.2 Les Néodyme-Fer-Bore

- Les Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)-(milieu des années 1980) [2].ont des performances supérieures aux Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu' à 160-200°C) [6]. Les aimants de type Nd-Fe-B sont principalement utilisés dans la microinformatique et les télécommunications. Ils constituent en particulier l'élément central des actionneurs de têtes de lecture.

Les aimants au Neoflux étant magnétiquement très puissants mais moins résistants sur le plan mécanique [5] et [4]. La Figure. I.2.6

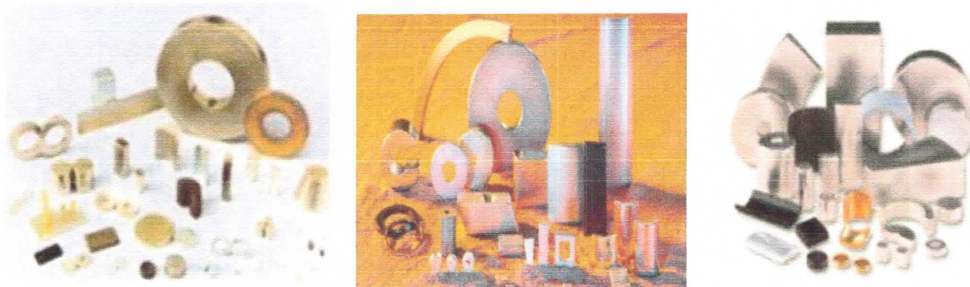


Figure. I.2.6 aimants au Neoflux (Nd-Fe-B)

I.3 Propriétés magnétiques

Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par le deuxième quadrant de ce cycle appelé **courbe de désaimantation** d'où on peut tirer les propriétés suivantes [2]:

- L'**induction rémanente** B_r ; c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé; c'est une indication de la polarisation intrinsèque de l'aimant.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{j} \quad (I.1)$$

Avec :

\vec{H} : Champ magnétique, en ampères par mètre (A/m).

\vec{j} : **Polarisation magnétique**, en teslas (T).

\vec{B} : **Induction magnétique**, en teslas (T).

La constant μ_0 : qui représente la **perméabilité du vide**, vaut $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

- Le **champ coercitif de l'induction** ; H_cB qui est le champ démagnétisant annulant l'induction plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable.

- Le **produit d'énergie volumique** (BH) max, qui définit la valeur énergétique de l'aimant par unité de volume figure (I.7). En plus des propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître les propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix ainsi que le point de curie (température au-delà de laquelle l'aimant perd ses propriétés magnétiques) [3].

Ce point peut s'obtenir graphiquement soit en traçant les variations du produit ($B \times H$) en fonction de B (Figure I.8), soit en traçant les lignes d'isovaleurs du produit ($B \times H$). Pour avoir un produit max ($B \times H$) élevé, l'aimant doit posséder une induction rémanente élevée et une plage de fonctionnement réversible qui s'étend au moins jusqu' à ce point ($B \times H$) max .Mais le max ($B \times H$) ne donne aucune information complémentaire sur le champ coercitif de l'aimant [2].

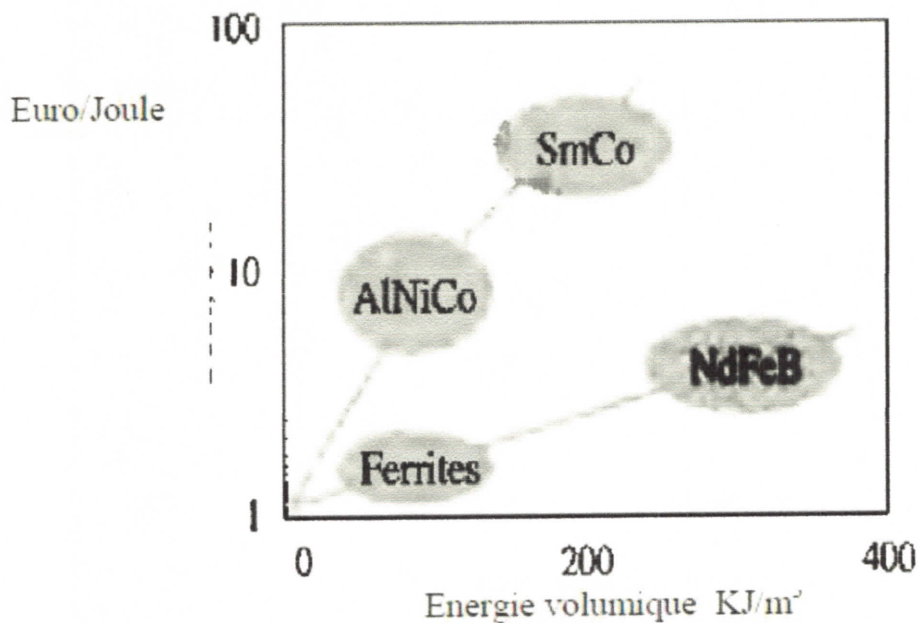


Figure I.7 Le Coût en fonction d'énergie fournie des principales familles d'aimants permanents

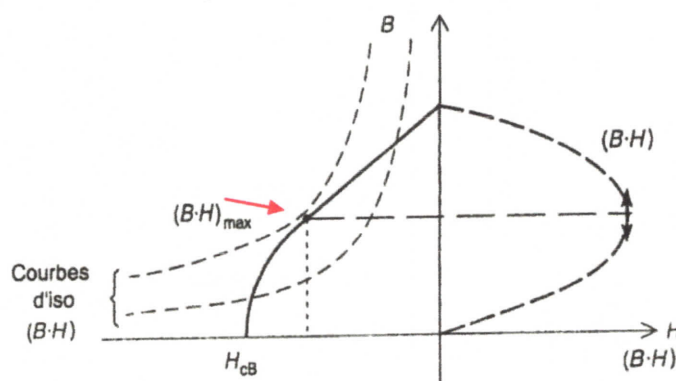


Figure I.8 Point $(B \times H)_{\max}$ de la courbe de désaimantation [2]

I.3.1 Importance de la température sur le BH_{\max} (énergie maximale) des aimants terres rares

Les caractéristiques des aimants sont normalement spécifiées à 20°C, le comparatif suivant permet de mettre en évidence les plages de température optimales en fonction des technologies d'aimants terres rares figure (I.9) [7].

La température des aimants doit bien entendu rester inférieure à la valeur limite spécifiée par le fabricant (d'ailleurs inférieure à la température de Curie proprement dite) à partir de laquelle on assiste à des désaimantations irréversibles [7].

En dessous de cette température limite, l'effet principal de la température est une baisse de la constante de couple (et de la constante de f.e.m, en fait il s'agit d'une baisse du flux inducteur) figure (I.9) [7].

- Température excessive, en général, bien avant la température de Curie, on observe des pertes d'aimantation partielles mais non réversibles : on définit ainsi une température limite d'utilisation (variable entre 80 et 350°C selon les nuances).

- Champ désaimantant excessif : dépassement de H_{ci} (champs coercitif interne créée par l'aimant. La charge magnétique produit un effet désaimantant, de même un champ opposé produit par une fmm tend à désaimanter l'aimant (réaction d'induit dans une machine électrique). La combinaison des deux ne doit pas conduire, dans les pires conditions, à une désaimantation irréversible.

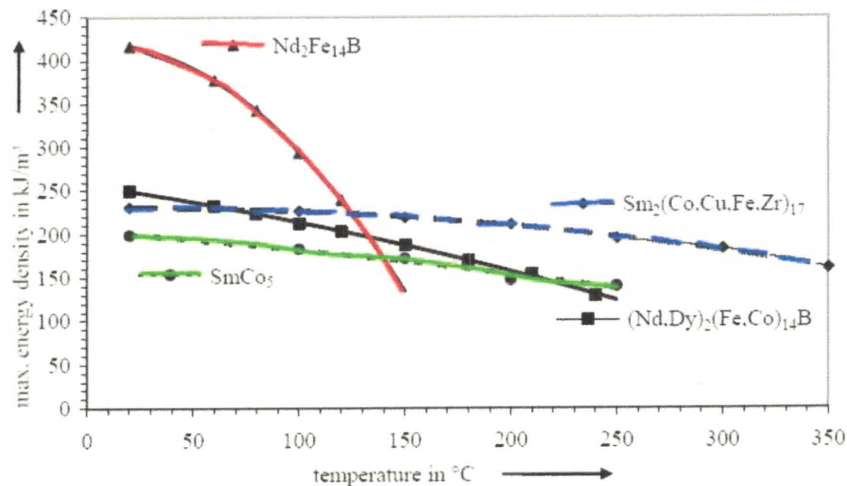


Figure. I.9 présentation des énergies d'aimants en fonction de la température [7]

En réalité, les fuites inévitables, surtout en situation d'aimants enterrés ou exploitant des pièces polaires ferromagnétiques, conduisent à la nécessité d'un volume d'aimant supérieur [7].

I.3.2 L'énergie développée comme industrielle

Dans le cas des aimants durs de type ferrite et terres rares, H_{cb} correspond sensiblement à $B_a = 0$ (perméabilité relative proche de 1), mais il ne s'agit que de la valeur du champ pour laquelle l'induction s'annule. La valeur limite, conduisant à une désaimantation irréversible significative, est bien plus élevée. Elle est notée H_{cj} et correspondant à l'annulation de

l'aimantation qu'il ne faut absolument pas atteindre sous peine de désaimantation irréversible. Ce champ est très sensible à la température [7].

Avec :

$-H_{cj}$ est le **champ coercitif de la polarisation**, qui indique la valeur du champ magnétique appliqué en sens inverse de la polarisation J pour laquelle celle-ci est globalement nulle. En pratique la polarisation s'est retournée dans la moitié du volume de l'aimant.

$-H_{cb}$ est le **champ coercitif d'induction**, pour lequel l'induction créée par l'aimant est globalement nulle.

$-B_a$ est le **champ magnétique** dans l'aimant.

Les matériaux magnétiques présents dans les systèmes électromécaniques sont généralement non linéaires. Leurs caractéristiques magnétiques sont décrites par les courbes $B(H)$, voir (figure. I.10). Celles-ci expriment la variation de l'induction magnétique B produit dans le matériau par l'application d'un champ magnétique d'intensité H . La (figure. I.12) montre que les matériaux magnétiques ne sont pas seulement représentés par leurs courbes de magnétisation mais aussi par leurs cycles d'hystérésis. Cependant, la modalisation des matériaux magnétiques en tenant compte de leurs cycles d'hystérésis nécessite des informations sur leur passé, ce qui rend le modèle plus complexe [3].

Ces matériaux sont relativement chers, mais ils possèdent des caractéristiques magnétiques remarquables. L'une des particularités des $SmCo_5$ est d'avoir un champ coercitif énorme, de l'ordre de 2000 kA/m. Ce matériau est très difficile à désaimanter. L'aimantation est particulièrement rigide et pratiquement insensible aux champs extérieurs. L'induction rémanente de ce type d'aimant est de l'ordre de 0,9 T, et $(BH)_{max}$ vaut environ entre 160 jusqu'à 280 kJ/m³, Figure I.11 [2].

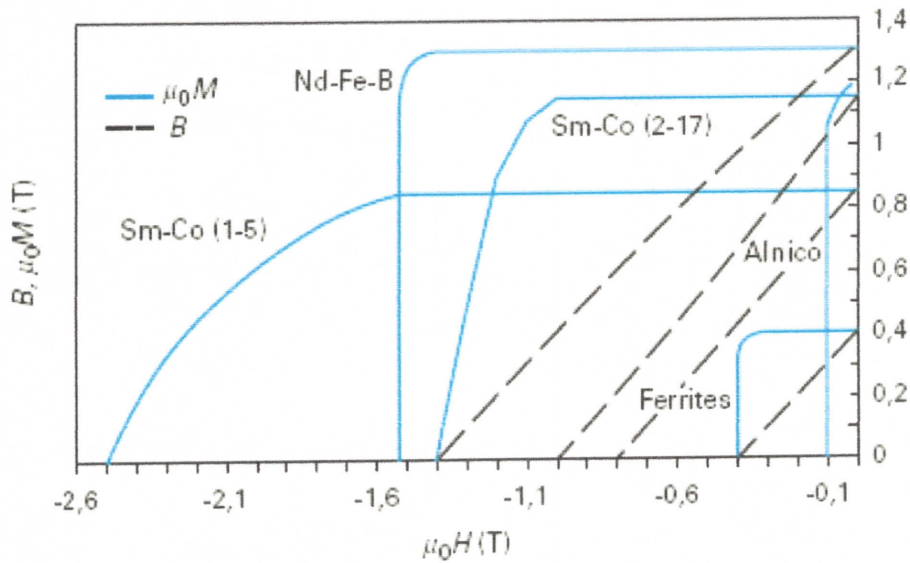


Figure. I.10. courbes de désaimantation de principaux des type des aimantes

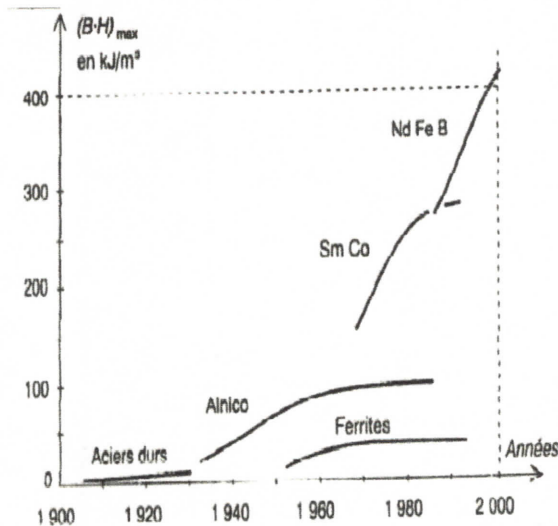


Figure. I.11 l'énergie interne des aimants rigides

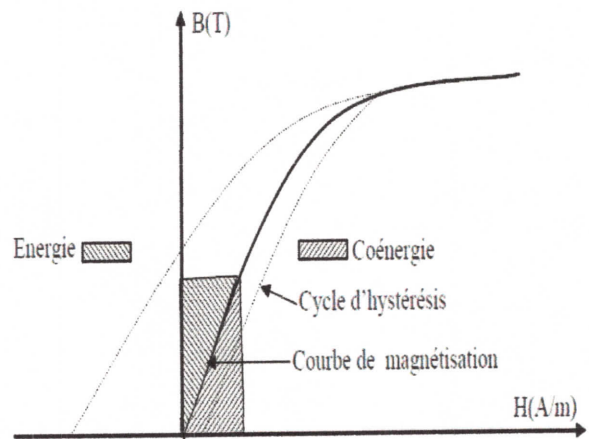


Figure. I. 12 courbes de magnétisation B(H)

I.3.3 Le développement des aimants permanents dans le 20^{ème} Siècle

Les aimants permanents modernes sont ainsi certainement hauts créatures de technologie du 20^{ème} siècle. La Figure I.13 illustre leur évolution chronologique, en utilisant des valeurs record du produit statique d'énergie comme mesure [8]. Ce type d'aimant est de l'ordre de 0,9 T, et $(BH)_{max}$ (le produit de l'énergie volumique) vaut environ entre 160 jusqu'à 280 kJ/m³.

Leurs caractéristiques non linéaires et les représentations associées, plus complexes que celles des aimants rigides, sont celles qui sont les plus décrites dans la littérature, car ces aimants ont longtemps régné. Cela contribue d'ailleurs à rendre difficilement accessible leur modélisation (non linéarités, effets hystérétiques...), car elle nécessite notamment des approches de résolution graphique (ou numérique) alors que les aimants rigides, dont la caractéristique est modélisée par une simple droite où les deux paramètres (induction rémanente et champ de désaimantation) dépendant de la température, se prêtent bien aux calculs analytiques [7].

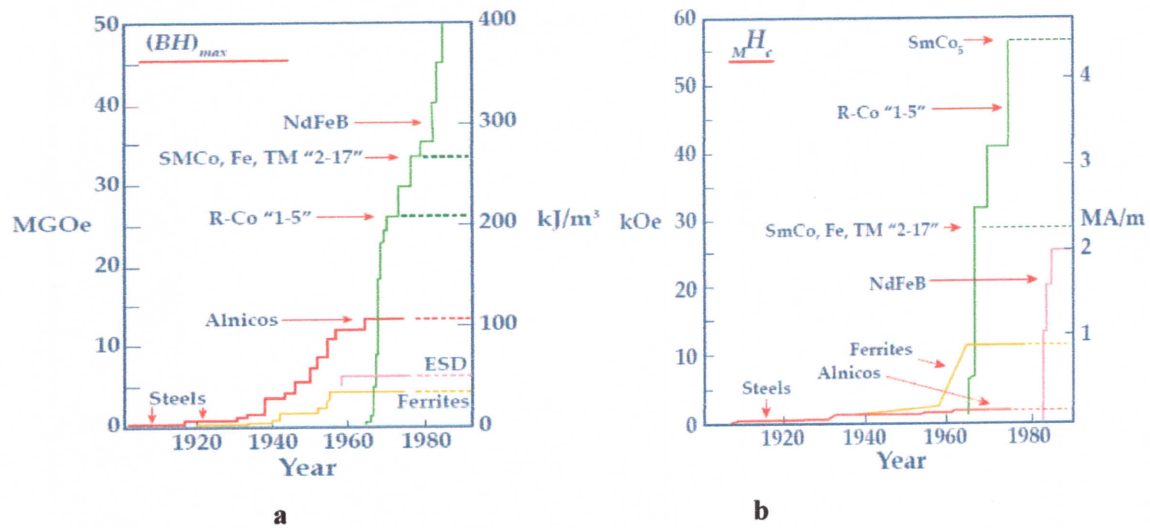


Figure. I.13 Le développement des aimants permanents dans 20ème Siècle (a) et (b) [8]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les différents types d'aimants permanents industriels, il s'agit des quatre familles, dont la plus importante c'est celle des terres rares à cause de leur rigidité en aimantation, l'énorme énergie qu'ils peuvent fournir et les champs coercitifs qui les rend presque insensibles aux champs démagnétisant. Ces caractéristiques et d'autres - vues au cours de ce chapitre- les classent dans la même catégorie d'aimants dits « presque parfaits, idéaux » dont leurs cycles d'hystérésis. Ces aimants idéaux, à cause de leurs caractéristiques linéaires, peuvent être traités plus aisément à l'aide des modèles mathématiques issus des lois de l'électromagnétisme.

Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse à la présence des aimants dans les systèmes électromécaniques.

Chapitre II

*Les systèmes électromécaniques contenant
des aimants permanents*

Introduction

L'évolution de la technologie et des besoins industriels et domestiques en plus des contraintes de réduction de la consommation d'énergie ont poussé les industriels à adopter des systèmes compacts à haut rendement. Parmi ces dispositifs, on situe à très bonne place les actionneurs à aimants permanents. Grâce à leurs performances, ces derniers ont été adoptés dans plusieurs applications avec des structures multiples et généralement complexes.

Les aimants permanents sont utilisés dans une très grande variété des systèmes. Ce sont des composants qui fournissent un flux magnétique permanent et génèrent un champ magnétique statique. On les trouve actuellement dans plusieurs applications [1].

II.1 Systèmes électromagnétiques à aimants permanents

L'utilisation d'aimants permanents est de plus en plus dominante dans les domaines industriels à cause de l'apparition d'aimants dits terres rares. Ces derniers présentent des caractéristiques remarquables, tels que la rigidité d'aimantation, le pouvoir de fonctionner en circuits ouverts sans risque de désaimantation et l'énergie importante fournie permettant d'avoir des forces d'interactions considérables qui rend leur rôle dans des systèmes électromécaniques incontournable [2].

II.1.2 Intérêt des aimants pour les systèmes magnétiques

Les champs magnétiques sont utilisés pour générer des forces dans la majorité des actionneurs qui nous entourent. Souvent, ces actionneurs ne fonctionnent que suivant un degré de liberté. Dans le cas d'un moteur, par exemple, seuls les efforts magnétiques qui permettent la rotation de l'arbre sont utilisés. Dans le cas d'un objet en lévitation dans un champ magnétique, c'est à dire flottant sans contact, les efforts doivent être générés et contrôlés suivant les six degrés de liberté [9]. Ils ne nécessitent pas de pertes Joule et sont avantageux pour améliorer le rendement. Nous montrons ci-dessous que ces dernières qualités sont obtenues dans le cas des pôles de petites dimensions (petits moteurs et/ou gros moteurs à très grand nombre de pôles) [7] La figure II.1.

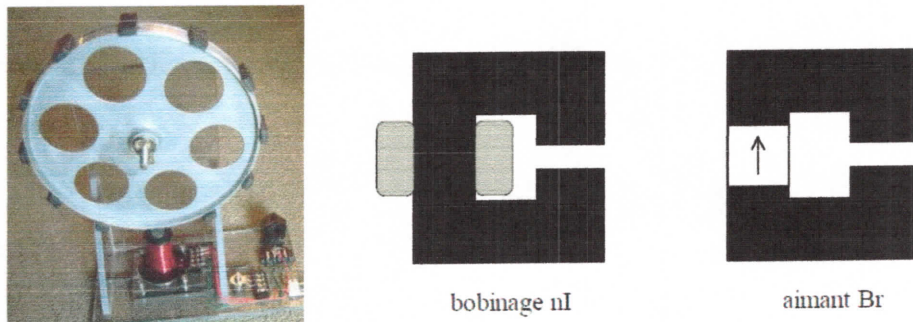


Figure. II.1 systèmes magnétiques

II.1.3 Systèmes contenant uniquement des aimants permanents

Ces diverses fonctions ont été remplies pendant longtemps par les champs magnétiques créés par les courants ; solénoïdes, électro-aimants. Mais les progrès remarquables accomplis dans le domaine des matériaux pour aimants permettent d'envisager le remplacement progressif de l'électro-aimant par l'aimant permanent donnant la même efficacité avec un encombrement trois à quatre fois plus faible, un poids réduit dans la même proportion et une grande simplicité de réalisation et d'emploi. Cette concurrence s'accroîtra encore dans l'avenir grâce aux avantages que procure l'aimant [10] La figure II.2.

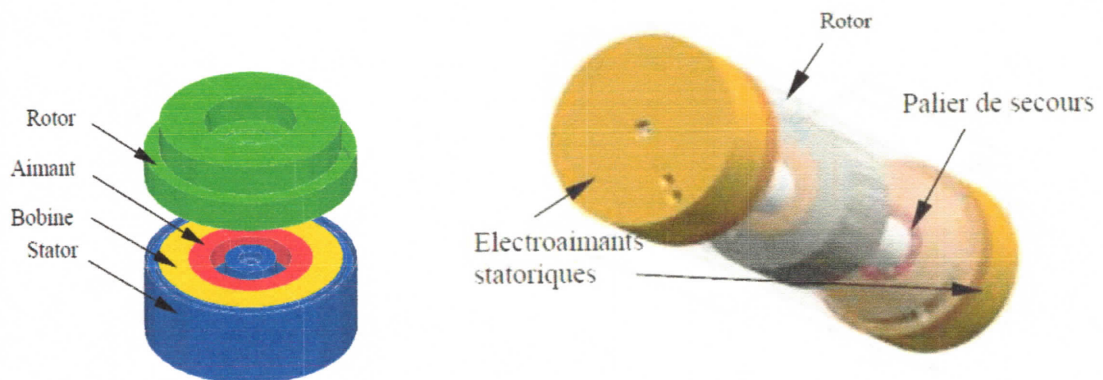


Figure. II.2 Suspension magnétique

II.1.3.1 Les paliers à aimants permanents

Les paliers magnétiques sont utilisés lorsque les autres paliers ont atteint leur limite. Ils permettent à un rotor de tourner sans frottement ni contact. Leur domaine de prédilection concerne les applications à très haute vitesse de rotation, celles pour lesquelles il faut minimiser les pertes, éviter l'usure, ne pas polluer un environnement sensible par des poussières ou un lubrifiant, supprimer les vibrations, fonctionner à très basse ou très haute température ou limiter la maintenance.

Ils sont constitués au minimum de deux bagues d'aimants permanents en interaction, l'une des bagues étant fixe tandis que l'autre est solidaire du rotor. En fonction des directions d'aimantation des deux bagues il est possible d'obtenir, avec la même géométrie, soit un centreur, soit une butée [2], voir la figure II.3 et II.4.

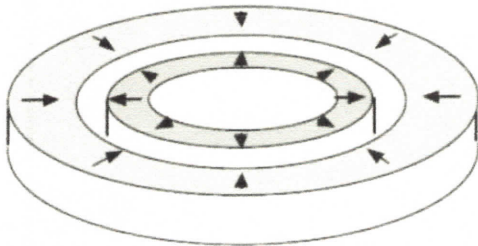


Figure II.3 Centreur à aimant permanent

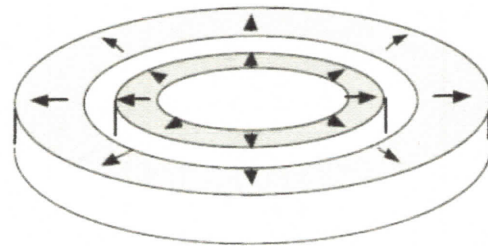


Figure II.4 Butée à aimant permanent

II.1.3.2 Les différentes configurations de centreurs et de butées magnétiques

Il existe dix configurations possibles de centreurs et de butées (Figure II.5 et Figure II.6). Certaines d'entre elles semblent être identiques au niveau des forces et des raideurs développées, mais elles diffèrent par rapport au champ démagnétisant total. Exemple, A1 et A2 fournissent les mêmes forces par contre le champ démagnétisant total de A2 est bien plus grand que celui du centreur A1 [2].

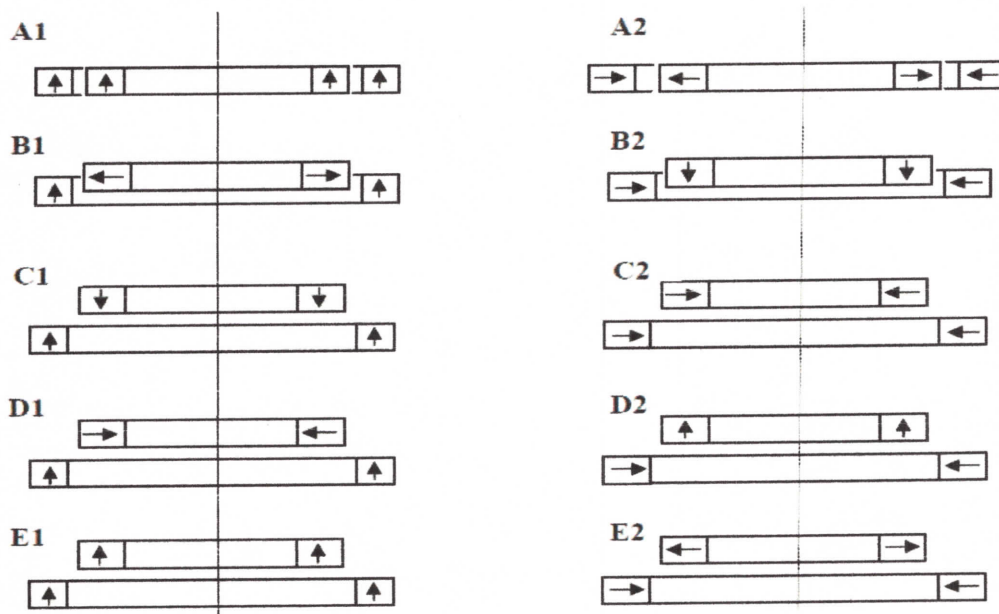


Figure II.5 Les dix configurations de centreurs magnétiques [2]

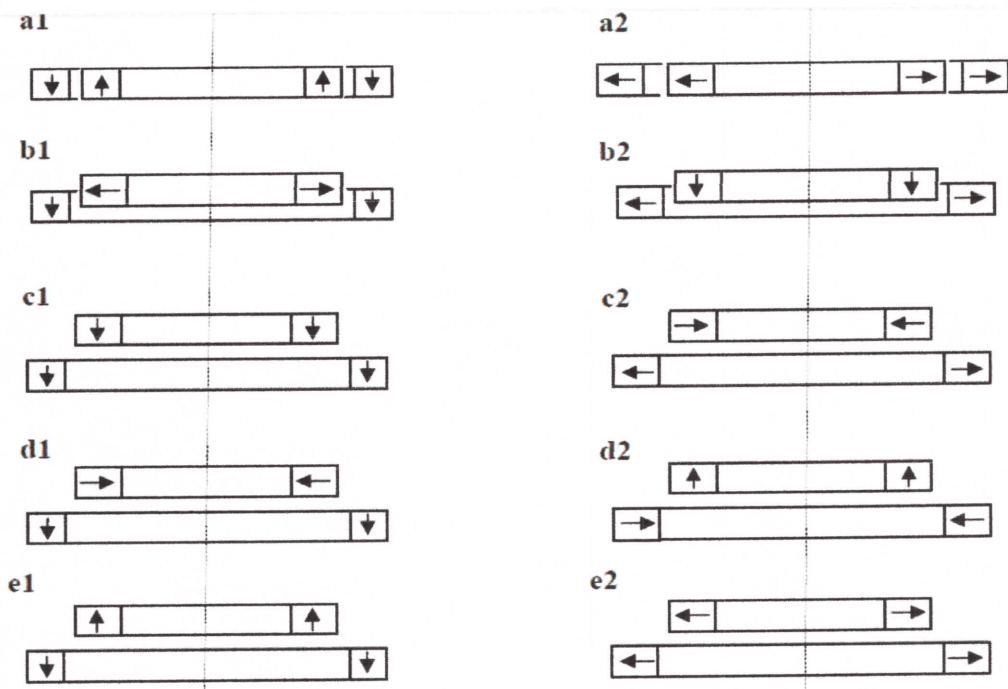


Figure II.6 Les dix configurations de butées magnétiques [2]

II.2 Systèmes tournants contenant des aimants permanents et parties conductrices

Les aimants permanents sont utilisés dans une très grande variété de systèmes. Ce sont des composants qui fournissent un flux magnétique permanent et génèrent un champ magnétique statique, la figure II.7. On les trouve actuellement dans plusieurs applications telles que :

- Inducteur de machines tournantes de faible puissance (<10 kW) ; machine à courant continu, synchrone, à aimants permanents.
- Les petits moteurs électriques (moteur linéaire, moteur spécial).
- Appareil de mesure.
 - Détecteur magnétique.
 - Compteur EDF-freins magnétiques-tachymètre.
 - Haut-parleur et microphone.

Les principales contraintes des moteurs à aimants permanents résident dans la minimisation des ondulations du couple et le dimensionnement des aimants pour parer aux éventuels risques de démagnétisation des aimants lors d'un fonctionnement anormal (court-circuit par exemple) et des contraintes de températures [1].

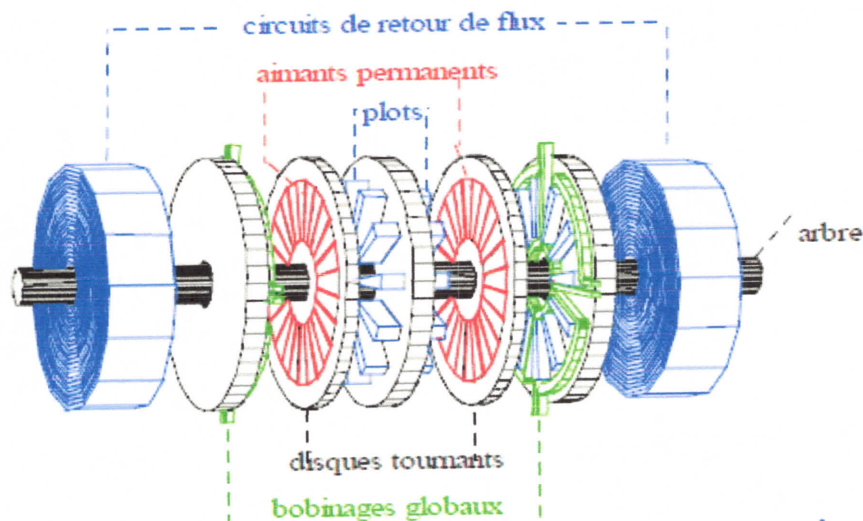


Figure. II.7. Moteur à disques à aimants alternés Cegelec-Nancy [9]

II.2.1 Les machines synchrones à aimant permanent

Par définition, les machines synchrones à aimants permanents permettent de s'affranchir d'un système de conversion balai et collecteur. Le rotor ne nécessite donc pas de cuivre dédié à l'excitation, ce qui élimine la contribution des pertes Joule et offre donc un rendement plus élevé.

Certaines configurations de ces machines ont également, un bon comportement en défluxage, toutefois, les aimants ont pour inconvénient d'être chères ce qui, au final, peut jouer en leur défaveur [1] voir la figure II.8.

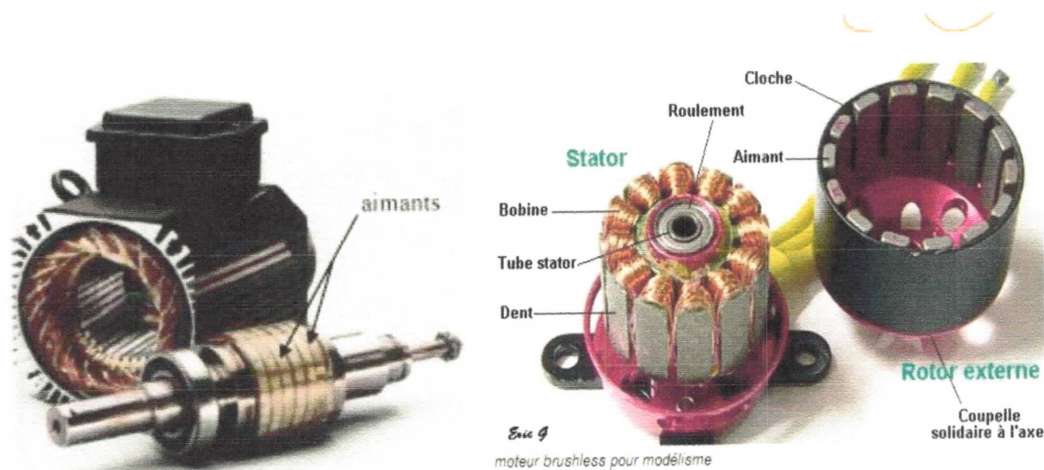


Figure .II.8 Moteur à aimants en géométries cylindriques [7]

II.2.2 Différents types de machines à Aimants

L'évolution des machines électriques pour les grandes séries. Au fil des années, les machines n'ont cessé d'évoluer dans le but d'obtenir des performances en rendement, densité de puissance et vitesse maximale plus élevées. Les machines à aimants les plus répandues sont celles à aimants montés à la surface du rotor (AMSAP). Elles présentent une faible inductance par phase et une réaction d'induit réduite à cause d'un entrefer magnétique relativement large.

Nous pouvons distinguer les différents types de machines synchrones à aimants permanents principalement par la structure de rotor [1]. Leur classification globale en termes de placement des aimants suivant :

-aimants en surface (Surface magnet type) ;

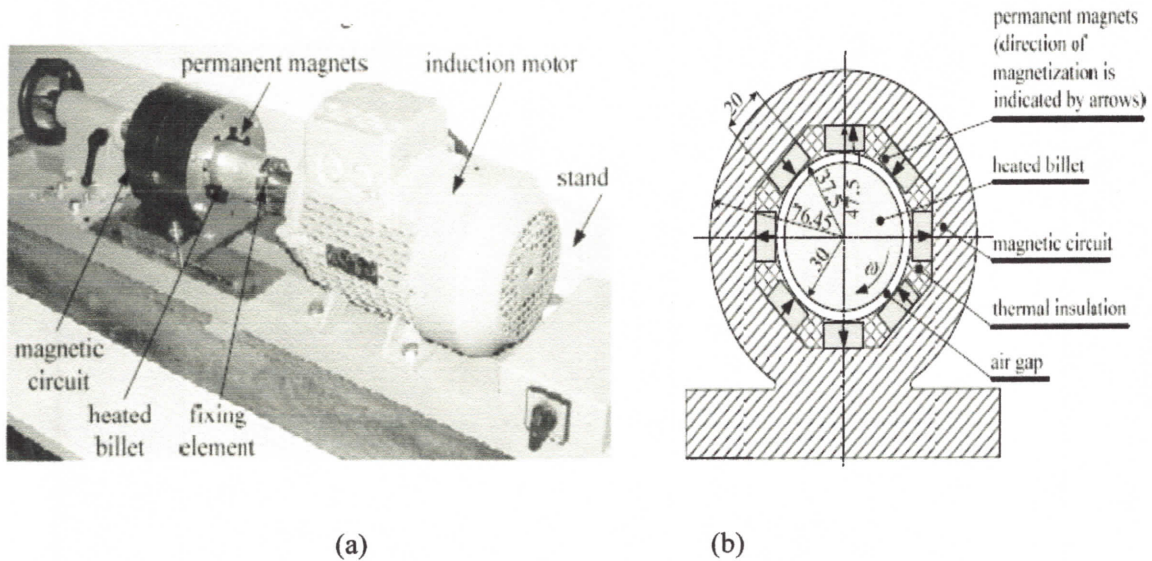


Figure II.10.Dispositif de chauffage par induction de rotation des billettes d'aluminium.

Figure. II.10(a).Vue de dispositif de laboratoire, Figure. II.10(b).Coupe de pièce active de dispositif de laboratoire [11].

II.4 Moteur linéaire

Comme son nom l'indique, le moteur linéaire produit un déplacement linéaire. Dans le cas des systèmes à mouvement linéaire, les entraînements nécessitant une poussée élevée, utilisent généralement soit des actionneurs hydrauliques ou pneumatiques soit des actionneurs tournants classiques accouplés à des systèmes mécaniques de transformation de mouvement rotation/translation [9].figure II.11 et II.12.

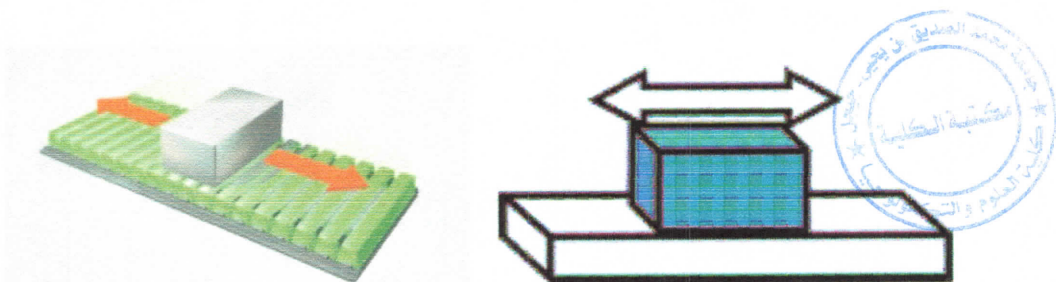


Figure. II .11 déplacement linéaire à aimants permanent [6]

Chapitre III

*Méthodes et calcul bidimensionnels des
interactions
entre aimants permanents et conducteurs*

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la détermination analytique des interactions (inductances, forces) entre les aimants permanents et des plaques conductrices en mouvement dont les sources équivalentes présentent d'excellentes approches. Elles reposent sur le fait que l'on peut remplacer l'aimant (ou le champ créé par celui-ci) par des distributions volumiques et surfaciques de source de champ. Ces distributions définissent un équivalent parfait du système, où les données magnétiques équivalentes à celles produites par l'aimant. Du point de vue extérieur à l'aimant, les données (champ et induction magnétique) produites par ces modèles sont parfaitement équivalentes à celle de l'aimant. Cependant, à l'intérieur de l'aimant, selon le modèle utilisé, le champ ou l'induction est modifié. Pour ces méthodes, les sources de champ peuvent être soit des courants, soit des charges magnétiques, soit une combinaison de courants et de charges.

Les plaques sont aussi constituées de conducteurs liées entre elles dont on maîtrise calcul des inductances et des résistances.

III.1. Principes des sources équivalentes

III.1.1 Calcul du champ magnétique dû à un volume aimanté en un point extérieur à l'aimant

Imaginons, dans le référentiel (O, x, y, z) , un volume aimanté (v') , dont l'aimantation $\vec{J}(\vec{r}')$ est supposée connue en chaque point et un observateur $M(\vec{r})$ figure.III.1. On s'intéresse aux seules grandeurs magnétiques liées à la présence du volume aimanté et on suppose l'observateur situé d'abord à l'extérieur de la matière aimantée, donc dans le vide.

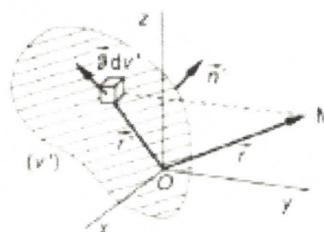


Figure.III.1 Notations utilisées pour le calcul du champ magnétique dû à un volume aimanté.

Chaque élément de volume dv' se comporte comme un moment élémentaire $d\vec{M}$:

$$d\vec{M} = \vec{J}(\vec{r}') \cdot dv' / \mu_0 \quad (\text{III.1})$$

Le champ d'induction $\vec{B}(\vec{r})$ vu par l'observateur dérive à la fois d'un potentiel scalaire $\mu_0 V(\vec{r})$ et d'un potentiel vecteur $\vec{A}(\vec{r})$, avec :

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \iiint_{V'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \quad (\text{III.2})$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \quad (\text{III.3})$$

On démontre facilement que les intégrales précédentes peuvent être remplacées par les expressions mathématiques suivantes qui représentent des potentiels scalaire et vectoriel :

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left[\iint_{S'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \cdot \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' + \iiint_{V'} \frac{-\text{div}(\vec{J})}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv' \right] \quad (\text{III.4})$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \left[\iint_{S'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' + \iiint_{V'} \frac{\text{rot}(\vec{J})}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv' \right] \quad (\text{III.5})$$

Dans les relations précédentes S' désigne la surface du volume aimanté V' et le vecteur normal unitaire \vec{n}' est toujours orienté vers l'extérieur.

Ces deux expressions montrent que :

- Pour calculer le potentiel scalaire $V(\vec{r})$ d'où dérive le champ d'excitation \vec{H} , on peut utiliser la loi de Coulomb en remplaçant la distribution d'aimantation $\vec{J}(\vec{r}')$ par une distribution de pôles magnétiques fictifs comprenant :

- une répartition volumique de pôles avec une densité :

$$\rho^* = -\text{div}(\vec{J}) \quad (\text{III.6})$$

- une répartition surfacique de pôles avec une densité :

$$\sigma^* = (\vec{J} \cdot \vec{n}') \quad (\text{III.7})$$

- Pour calculer le potentiel vecteur $\vec{A}(\vec{r})$ d'où dérive le champ d'induction \vec{B} , on peut utiliser la formule de Biot et Savart en remplaçant la distribution d'aimantation $\vec{J}(\vec{r}')$ par une distribution de courants Ampériens, qui comprennent :

- une répartition volumique avec une densité :

$$\vec{J}^* = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{J}) / \mu_0 \quad (\text{III.8})$$

- une répartition surfacique avec une densité :

$$\vec{K}^* = (\vec{J} \times \vec{n}') / \mu_0 \quad (\text{III.9})$$

Les pôles et les courants ampériens ne sont que des modèles mathématiques sans existence physiques réelle. Ils n'en sont pas moins très précieux puisqu'ils permettent d'accéder non seulement au champ vu par l'observateur, mais compte tenu de ce qui a été dit à propos du moment magnétique, aux forces d'interaction, au couple, etc.

Dans tous nos applications et calculs on va considérer que des aimants idéals, au niveau des calculs il y'aura des simplifications pour les expressions des potentiels scalaire et vecteur magnétiques (III.4) et (III.5), ainsi :

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left[\iint_{s'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \cdot \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' \right], \quad \text{car} \quad \text{div}(\vec{J}) = 0 \quad (\text{III.10})$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \left[\iint_{s'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' \right], \quad \text{car} \quad \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{J}) = 0 \quad (\text{III.11})$$

Dans ce qui suit on va s'intéresser uniquement au calcul des grandeurs électromagnétiques à l'extérieur des aimants à aimantations rigides, qui nous permettra de déterminer les forces et les énergies d'interactions entre ces derniers. Pour bien illustrer la méthode, on va prendre comme exemple un aimant cylindrique dont l'aimantation est axiale Figure.III.2 .a, ce dernier peut être représenté par une distribution de charges sur la surface de ses pôles Figure. III.2.b. Par convention, les pôles de l'aimant où le flux est sortant est appelé « pôle nord », il est représenté par des charges (+). Le « pôle sud » correspondant au flux entrant est représenté par des (-), le calcul du champ magnétique peut être effectué à partir de cette distribution de charges équivalentes. La densité de charges équivalentes vaut -d'après l'équation (III.7):

$$\sigma = |\vec{J}| \quad (\text{III.12})$$

Par la méthode ampérienne, l'aimantation est remplacée par une nappe de courants qui s'enroule autour de l'aimant Figure.III.2.c. On les appelle «courants ampériens».l'aimant peut alors être assimilé et calculé comme un solénoïde parcouru par une densité linéique de courant (équation III.8) :

$$j = \frac{|\vec{J}|}{\mu_0} \quad (\text{III.13})$$

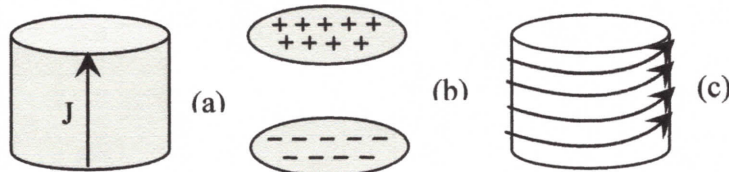


Figure. III.2 Équivalence entre l'aimantation (a),
La distribution de charges (b) et la répartition de courants ampériens(c).

Ces modèles avec les considérations que les aimantations sont rigides, conviennent parfaitement pour les aimants en samarium cobalt et les aimants terres rares. Ce sont les premiers aimants qui peuvent être utilisés dans la répulsion sans risque de démagnétisation. Pour un aimant Nd Fe B ($J=1.25$ T), de 1cm de haut (dans le sens parallèle à l'aimantation), la densité de courants ampériens J vaut 10^6 A/m ce qui donne un courant total équivalent à 10^4 A sur la surface extérieure de l'aimant. Créer le même champ permanent avec un solénoïde parcouru par un courant électrique est impossible pour des systèmes de taille centimétrique; cela permet de comprendre pourquoi les performances des aimants sont irremplaçables dans les systèmes miniaturisés

III.2 Application en 2D de la méthode des charges équivalente

« Approche Coulombienne »

Dans la littérature, peu nombreuses les études purement analytiques de calcul des forces et des raideurs qui ont été développées, et la plupart des travaux divulgués sont principalement consacrés à l'analyse dynamique des systèmes actifs fut mené au LEG [2].

Jean-Paul YONNET, a proposé de calculer les expressions analytiques des forces, et de leurs dérivées, créées entre deux aimants parallèles infiniment longs, de sections rectangulaires. Les matériaux magnétiques utilisés sont supposés être infiniment durs, c'est-à-dire que leur aimantation est constante est insensible à toute action extérieure. Comme il était déjà mentionné, les aimants peuvent donc, se représenter par une densité superficielle σ de masses magnétiques équivalentes dans le vide, $\sigma = J \cdot n$ ou n est la normale à la surface de

l'aimant. L'aimantation est supposée parallèle à l'un des côtés de la section rectangulaire de l'aimant Figure.III.3.

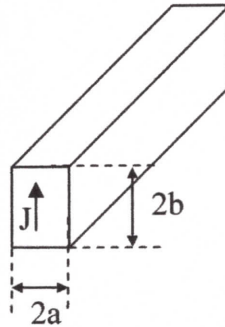


Figure III.3 Barreau aimanté.

La présentation bidimensionnelle de calcul est présentée en fig.III.4

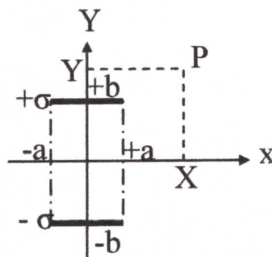


Figure.III.4 Présentation en 2D d'un aimant par les pôles magnétiques.

III.2.1 Calcul du potentiel scalaire

Le potentiel scalaire au point P après développement de la première intégrale de l'équation (III.10) devient :

$$V_1 = \int_{-a}^a \frac{\sigma \cdot dx}{2\pi\mu_0} \ln\left(\frac{r}{b}\right) \quad (\text{III.14})$$

Après calcul, le potentiel scalaire $V(p)$ créé par l'aimant peut s'exprimer ainsi :

$$V_1 = \frac{\sigma}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \phi(U_i, V_j)$$

$$\phi(U, V) = U \ln(U^2 + V^2) + 2 \cdot V \cdot \text{tg}^{-1}\left(\frac{U}{V}\right) \quad (\text{III.15})$$

$$U_i = x - (-1)^i a \quad V_j = y - (-1)^j b$$

III.2.2 Calcul du champ et de l'induction magnétiques

Le champ magnétique peut être calculé par la relation $\vec{H} = -\vec{grad}(V)$, équation (III.16).

Donc, les expressions des composantes de H seront :

$$H = \frac{-\sigma}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \psi(U_i, V_j)$$

Avec :

$$H_x, \quad \psi(U_{ij}, V_{kl}) = \ln(U_{ij}^2 + V_{kl}^2) \quad (III.17)$$

$$H_y, \quad \psi(U_{ij}, V_{kl}) = 2 \cdot V_{kl} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{U_{ij}}{V_{kl}} \right)$$

Et toujours $U_i = x - (-1)^i a$ $V_j = y - (-1)^j b$

À l'extérieur de l'aimant l'induction magnétique vaut $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, dans ce cas son expression sera :

$$B = \frac{-\sigma}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \psi(U_i, V_j) \quad (III.18)$$

Avec :

$$B_x, \quad \psi(U_{ij}, V_{kl}) = \ln(U_{ij}^2 + V_{kl}^2)$$

$$B_y, \quad \psi(U_{ij}, V_{kl}) = 2 \cdot V_{kl} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{U_{ij}}{V_{kl}} \right)$$

III.3 calcul des grandeurs magnétiques des aimants permanents

Nous utiliserons les formules développées pour calcul le potentiel scalaire et l'induction magnétique par la méthode de l'approche analytique programmé en logisail « MATLAB » La Méthode analytique ; Ce sont les premières méthodes utilisées. Elles consistent à résoudre l'équation différentielle analytiquement avec la technique de séparation de variables. Elles sont d'emploi restreint à des géométries simples dans approche unidimensionnelle, ou quelque fois dans des problèmes bidimensionnels.

✚ Le dispositif en 2D choisi pour l'étude avec le dimensionnement :

➤ Caractéristique le dispositif (aimant et plaque conductrice)

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7};$$

Segma $\sigma = 1$, polarisation $J = 1$;

Alpha (décalage entre l'aimant)= $2e-2$;

Largeur de l'aimant $a=5$ mm,

Hauteur de l'aimant $b=a$,

Epaisseur suivant x et y ; $x=y=100$ mm ;

Epaisseur suivant Y de la plaque $L_y=5$ mm ;

Longueur suivant X de la plaque $L_x=10$ mm ;

La distance entre le bas de l'aimant et le haut de la plaque (lift off) est égale à (1 mm). La figure III.5 et III.6, montre la position de l'aimant et la plaque et cela avant la résolution du système d'équation obtenu.

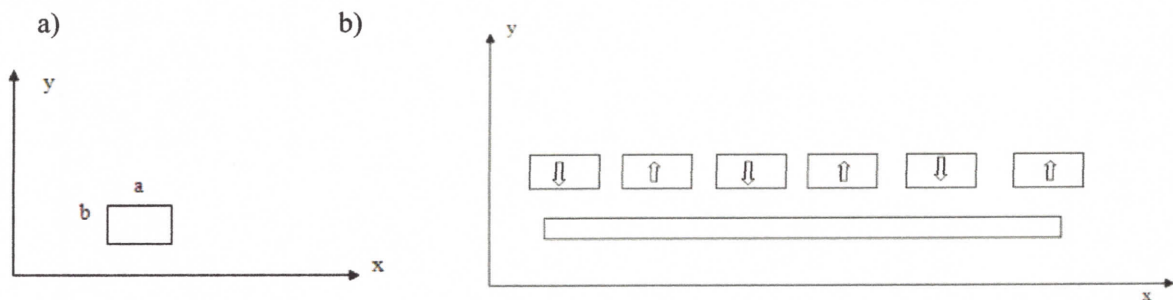


Figure III.5 modél de l'aimant (a) et aimant avec la plaque conductrice (b)

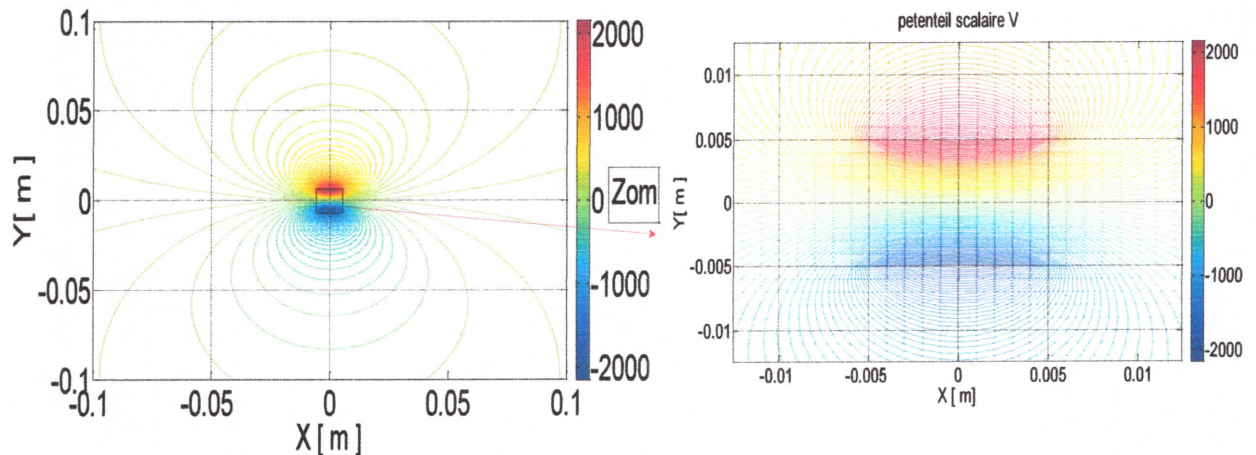


Figure.III.6 Potentiel scalaire V pour un aimant de dimensions (1cm 1cm)
Et de polarisation $J=1$ T.

-Nous pouvons superposer les aimants pour former un modèle linéaire (NSNS), La zone rectangulaire inférieure est la partie conductrice à prévoir pendant les calculs la figure III.7 ;

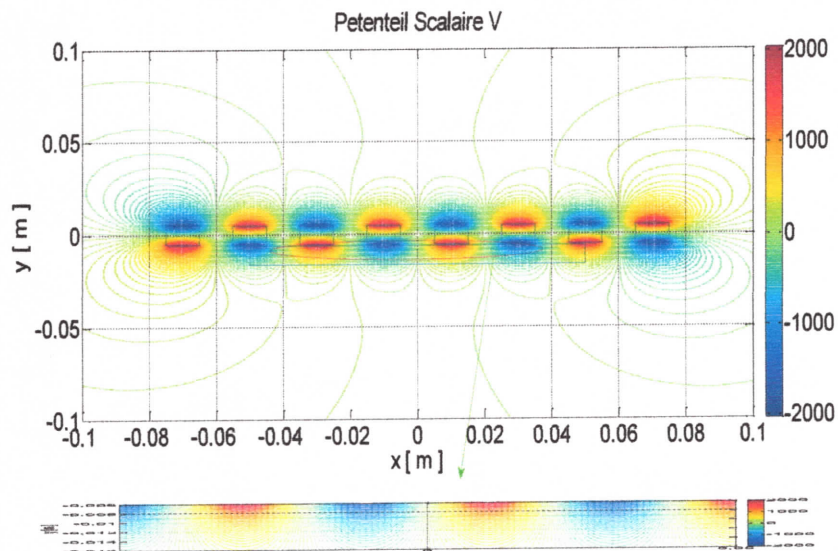


Figure.III.7 Potentiel scalaire V issue des aimants permanents en configuration NSNS
La partie inférieure concerne la plaque conductrice à modéliser.

Par le biais des relations de l'induction magnétique (Equations III.16), nous obtenons les distributions graphiques suivantes Figure III.8 ;

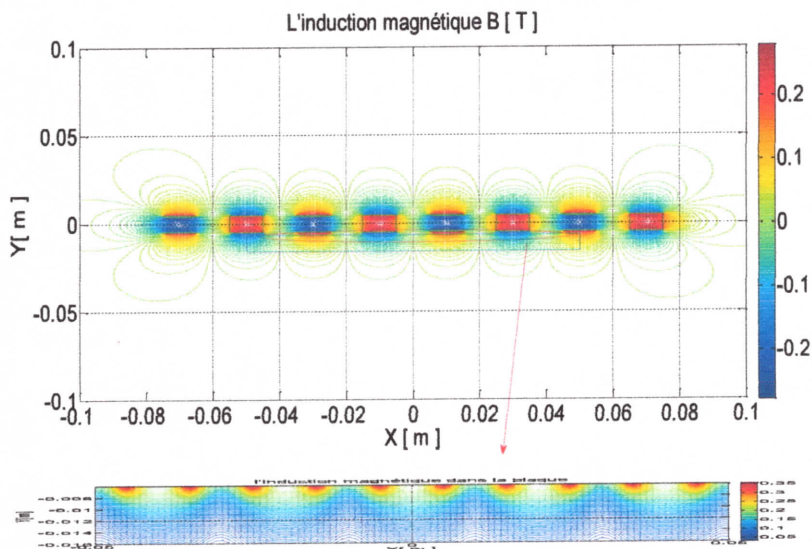


Figure.III.8 L'induction magnétique B, issue des aimants permanents en configuration NSNS

Dans l'intérêt de montrer que le modèle analytique adopté pourra être appliqué à différentes configurations, nous choisissons une configuration à quatre aimants non alignés (Figure III. 9)

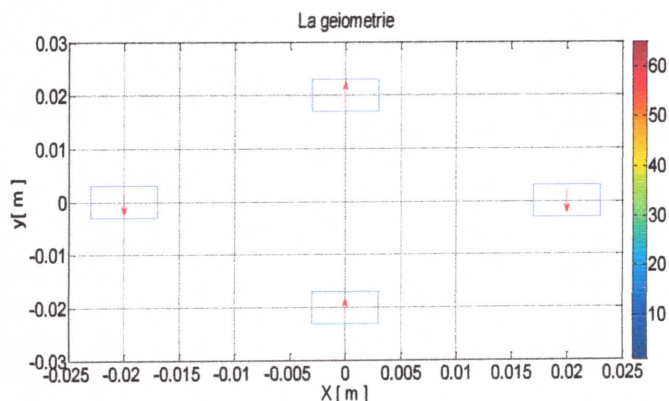


Figure.III.9 superposition particulière des aimants.

-Nous constatons une parfaite distribution du potentiel scalaire et l'induction (figure III.10).

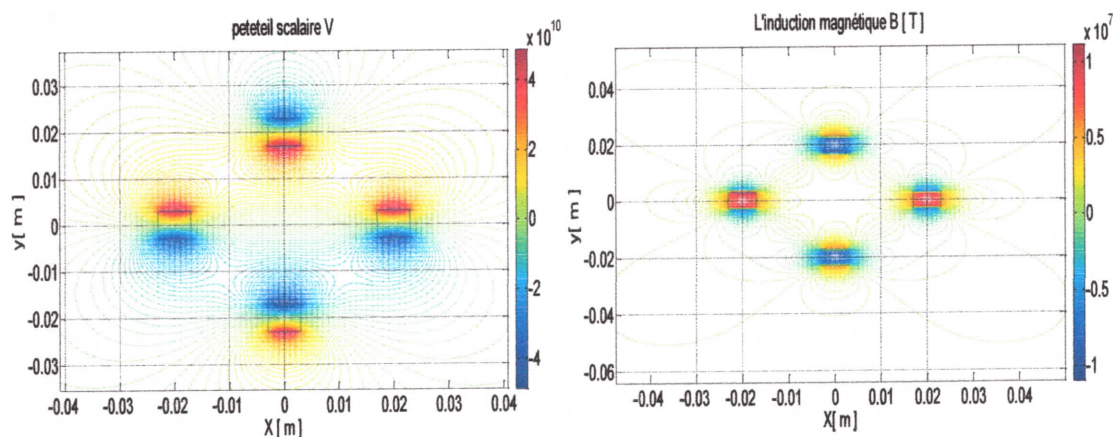


Figure.III.10 Le potentiel scalaire V et L'induction magnétique.

III.3.1 Prise en compte du mouvement (aimant et plaque conductrice)

Lors de la prise en compte du mouvement, on a besoin de connaître les grandeures mises en jeu et surtout, celles qui seront influencées par les phénomènes de déplacement.

Les aimants sont modélisés par l'approche ampérienne, courants imposés circulant aux extrimités de ces derniers (plaques fines) Figure III.11.

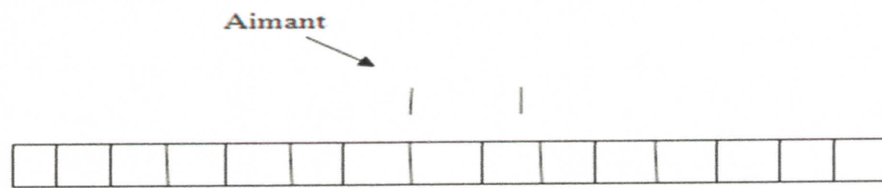


Figure.III.11 modèle de plaques fines pour l'aimant et massives pour les conducteurs

Le courant linéique fictif de l'aimant à pour relation :

$$I_{ai} = \frac{H_{ai} J}{\mu_0} \quad (\text{III .19})$$

H_{ai} est la hauteur des plaques fines du modèle de l'aimant

J est la polarisation en Tesla.

Les étapes de calculs et les développements réalisés par nos soins, seront traités en considérant la vitesse linéaire constante.

Donc à partir des équations électriques et magnétiques, nous pouvons écrire au départ.

$$[R] [I] + \frac{d}{dt} [\Phi] = [0] \quad (\text{III .20})$$

$[R]$ est la matrice résistance contenant les résistances des conducteurs formant la plaque.

$[I]$ est le vecteur des courants, il contient les courants fictifs constants des aimants permanents et aussi les courants des plaques conductrices à déterminer.

$[0]$ est les tensions nulles (en 2D les brins conducteurs forment des boucles fermées)

$[\Phi]$ est les flux magnétiques contribuant dans tous le modèle, il est donné ainsi:

$$[\Phi] = [M_{ac}] [I_{ai}] + [L_c] [I_c] + [M_c] [I_c] \quad (\text{III .21})$$

$[M_{ac}]$ est la matrice des mutuelles entre l'aimant et les conducteurs (variables pendant le mouvement)

$[L_c]$ est la matrice diagonale des selfs inductances des conducteurs (fixes pendant le mouvement)

$[M_c]$ est la matrice inductances mutuelles entre conducteurs (fixes pendant le mouvement)

Le mouvement est à vitesse constante ($\frac{dx}{dt} = V = cst$), donc

$$\frac{d}{dt} [\Phi] = \frac{d}{dt} \frac{dx}{dx} [\Phi] = V \frac{d}{dx} [\Phi] \quad (\text{III .22})$$

En remplaçant les flux de l'équation (III.19), nous aurons:

$$V \frac{d}{dx} [\Phi] = ([L_c] + [M]) \left(V \frac{d}{dx} [I_c] \right) + V \frac{d}{dx} [M_{ac}] [I_{ai}] \quad (\text{III .23})$$

En remplaçant tous dans l'équation III. 18, nous aurons ;

$$\begin{bmatrix} \left[\begin{array}{ccc} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & -1 \end{array} \right] & 0 \\ V \frac{d}{dx} [M_{ac}] & [R] + ([L_c] + [M]) V \frac{d}{dx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{ai}] \\ [I_c] \end{bmatrix} \quad (\text{III .24})$$

$$\text{Avec } [I] = \begin{bmatrix} [I_{ai}] \\ [I_c] \end{bmatrix}$$

La présence des dérivées du courant nous oblige à utiliser une méthode de résolution tels que celle d'Euler , en considérant

$$\frac{d}{dx} [I_c] = ([I_c(i+1)] - [I_c(i)]) / \Delta x \quad (\text{III .25})$$

Le courant de l'aimant sera considéré comme une moyenne

$$I_{ai} = ([I_{ai}(i+1)] + [I_{ai}(i)]) / 2 \quad (\text{III .26})$$

En remplaçant dans le système (III.22) nous aurons :

$$[AA] \begin{bmatrix} I_{ai(i+1)} \\ I_{c(i+1)} \end{bmatrix} = [BB] \begin{bmatrix} I_{ai(i)} \\ I_{c(i)} \end{bmatrix} \quad (\text{III .27})$$

D'où la résolution

$$\begin{bmatrix} I_{ai(i+1)} \\ I_{c(i+1)} \end{bmatrix} = \text{inv} ([AA])[BB] \begin{bmatrix} I_{ai(i)} \\ I_{c(i)} \end{bmatrix} \quad (\text{III .28})$$

$$AA = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & -1 \end{bmatrix} & 0 \\ \frac{V}{2} \frac{d}{dx} [M_{ac}] & \frac{1}{2} [R] + ([L_c] + [M]) V \frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (\text{III .29})$$

$$BB = \begin{bmatrix} \frac{-1}{2} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & -1 \end{bmatrix} & 0 \\ -\frac{V}{2} \frac{d}{dx} [M_{ac}] & -\frac{1}{2} [R] + ([L_c] + [M]) V \frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (\text{III .30})$$

Le problème restant est la détermination des inductances propres et mutuelles.

- pour $[L_c]$

Nous appliquons le calcul des inductances propre par le biais des formules de green en 2D, les résultats sont donnés par l' expression suivante [11] et [12]:

$$M_c = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{abcd} \left[\left[\left(\frac{y^2 z^2}{4} - \frac{y^4}{24} - \frac{z^4}{24} \right) X \ln(X + \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}) + \left(\frac{X^2 y^2}{4} - \frac{X^4}{24} - \frac{y^4}{24} \right) z \ln(z + \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}) + \left(\frac{X^2 z^2}{4} - \frac{X^4}{24} - \frac{z^4}{24} \right) y \ln(y + \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}) + \frac{1}{60} (X^4 + y^4 + z^4 - 3X^2 y^2 - 3y^2 z^2 - 3z^2 X^2) \sqrt{X^2 + y^2 + z^2} - \frac{X^3 y z}{6} \text{Arctg} \frac{yz}{X \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}} - \frac{X y^3 z}{6} \text{Arctg} \frac{Xz}{y \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}} - \frac{X y z^3}{6} \text{Arctg} \frac{Xy}{z \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}} \right] (X)_{E+d, E-a}^{E+d, E-a} (y)_{p+b-a, E}^{p+c, p-b} (z)_{l_3+l_2, l_3-l_1}^{l_3+l_2, l_3-l_1} \right] \quad (\text{III .30})$$

En 2D et Pour $z = 0$, l'expression sera :

$$M_c = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{abcd} \left[\left[\left(-\frac{y^4}{6} \right) X y \ln(y + \sqrt{X^2 + y^2}) + \left(-\frac{X^4}{24} \right) y \ln(y + \sqrt{X^2 + y^2}) + \frac{1}{60} (X^4 + y^4 - 3X^2 y^2) \sqrt{X^2 + y^2} \right] (X)_{E+d, E-a}^{E+d, E-a} (y)_{p+b-a, E}^{p+c, p-b} \right] \quad (\text{III .32})$$

L'inductance propre est définie pour $E=0$;

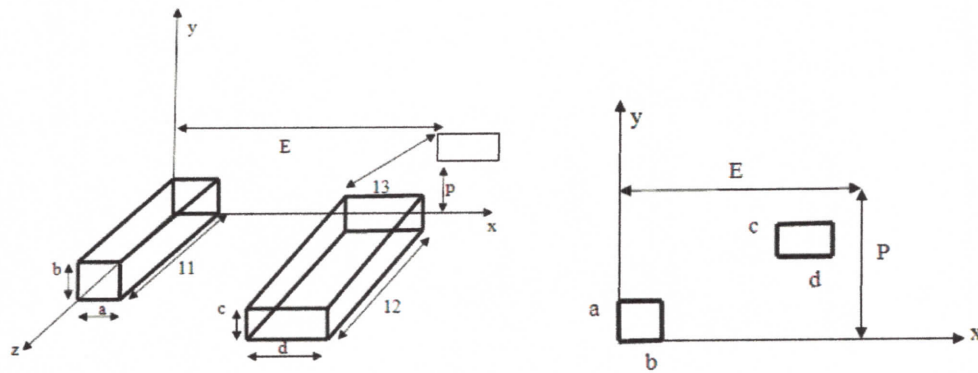


Figure.12 Mutuelle partielle entre deux barres

- Pour $[M_C]$

Les mutuelles conducteurs sont calculées par les mêmes formules avec $p = 0$ et E égale à l'écart entre chaque conducteur.

$[M_{ac}]$ c'est la matrice mutuelles entre les aimants et les conducteurs, ils sont calculées à partir des développement des inductances entre des conducteurs massifs et des plaques conductrices représentant les aimants permanents en question.

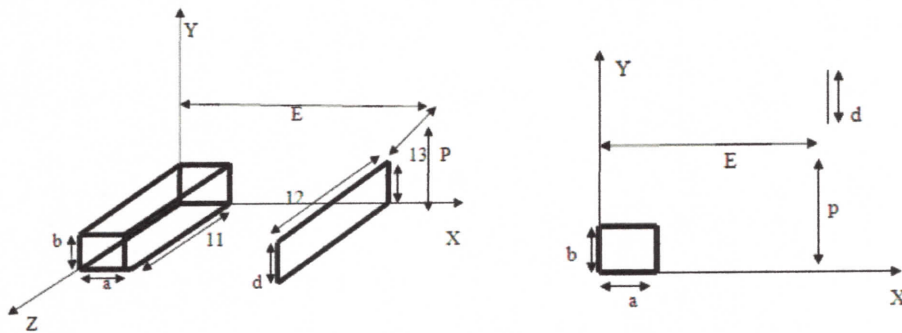


Fig.13 Mutuelle partielle entre une plaque et le conducteur cubique

Le calcul donne [11] et [12];

$$M_{ac} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{abd} \left[\left[\left(\frac{z^2}{2} - \frac{y^2}{6} \right) Xy \ln(X + \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}) + \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{X^2}{2} - \frac{y^2}{6} \right) yz \ln(z + \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}) + \left(-\frac{X^4}{24} - \frac{z^4}{24} + \frac{z^2 X^2}{24} \right) \ln(y + \sqrt{X^2 + y^2 + z^2}) - \right. \right.$$

$$\frac{X^3 z}{6} \operatorname{Arctg} \frac{yz}{z\sqrt{X^2+y^2+z^2}} - \frac{Xz^3}{6} \operatorname{Arctg} \frac{yX}{z\sqrt{X^2+y^2+z^2}} - \frac{Xy^2 z}{2} \operatorname{Arctg} \frac{Xz}{y\sqrt{X^2+y^2+z^2}} \left(\frac{y^2}{12} - \frac{X^2+z^2}{6} \right) y \ln(X\sqrt{X^2+y^2+z^2}) \left[(X)_{E+d, E-a}^{E+d, E-a} \right] (y)_{p-b}^p \left[(z)_{I_3+I_2, I_3-I_1}^{I_3+I_2, I_3-I_1} \right] \quad (\text{III .33})$$

La dérivée de $[M_{ac}]$ par rapport au déplacement est calculée numériquement.

III.3.2 Application et calcul

Pour l'application nous considérons les caractéristiques suivantes :

Caractéristique de l'aimant

Hauteur $H=5$ mm

Largeur $L=5$ mm

Polarisation $J=1$ T

Le courant fictif $I_{ai} = J \cdot H / \mu_0 = 3.9789e+03$ A

Caractéristique de la plaque

Epaisseur suivant Y $L_y = 2$ mm

Longueur suivant X $L_x = 102$ mm

Nombre de subdivision en conducteur 102

Résistivité $\rho = 1e - 6 \Omega m$

La distance entre le bas de l'aimant et le haut de la plaque (lift off) est égale à (3.5 mm). La figure III.14, montre la position de l'aimant et la subdivision de la plaque et cela avant la résolution du système d'équation obtenu.



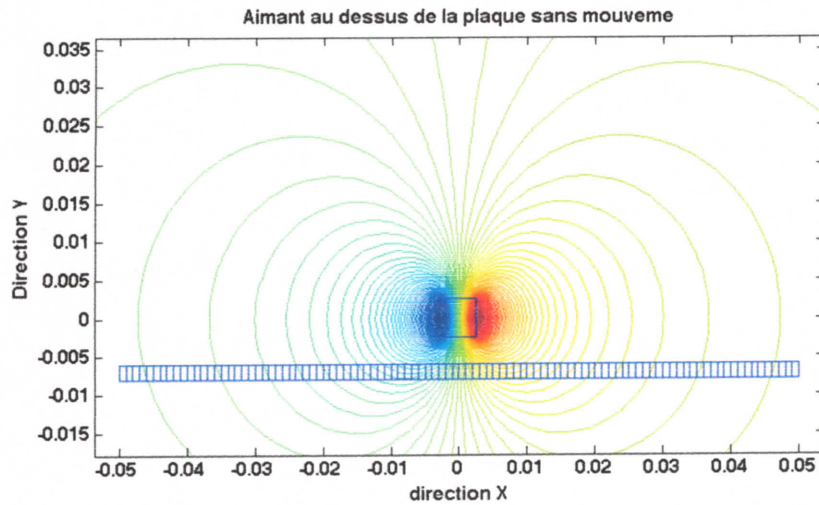


Figure.III.14 Aimant et plaque conductrice en question

Pour donner une idée sur les résultats des inductances, on trace les inductances mutuelles entre l'aimant et ses un plaques fines et tous les conducteurs de la plaque (Figure.III.15). On constate mieux que les valeurs maximales coïncident avec les distances les plus petites

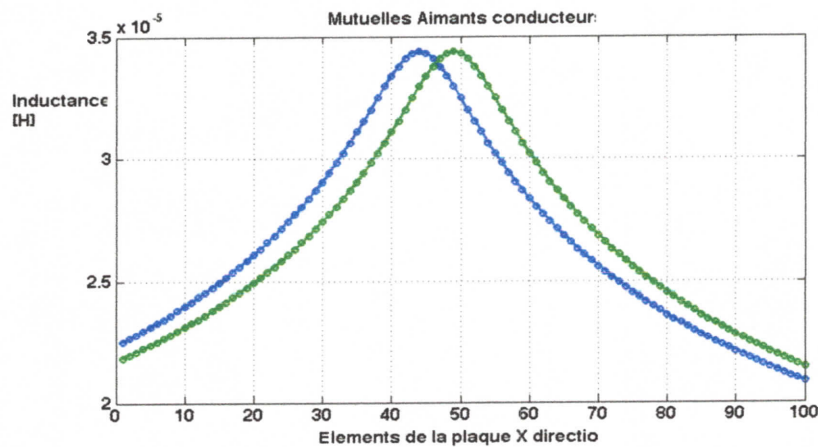


Figure.III.15 Inductances mutuelles aimant conducteurs

On a aussi besoin de savoir et de calculer la dérivée des inductances par rapport au déplacement Figure.III.16

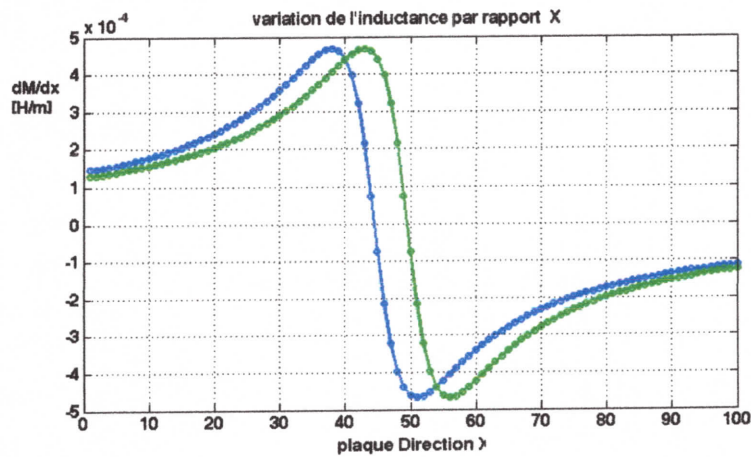


Figure.III.16 dérivée des Inductances mutuelles aimant conducteurs

Comme on vient de l'évoquer, toutes les procédures de développement matricielles et les idées exploitées pour résoudre ce genre de problème sont de notre propre création. Pour ces raisons, on a un peu peur de ne pas pouvoir valider avec des travaux de même genre. Mais les résultats des courants -surtout pour les plus faibles vitesses- sont les plus interprétables. La figure III.17 pour $V=2\text{m/s}$, nous révèle des courants induits de belles allures et presque symétriques. Vous pouvez voir la nature des résultats avec le schéma explicatif trouvé dans le Wikipidai (Figure III.18)

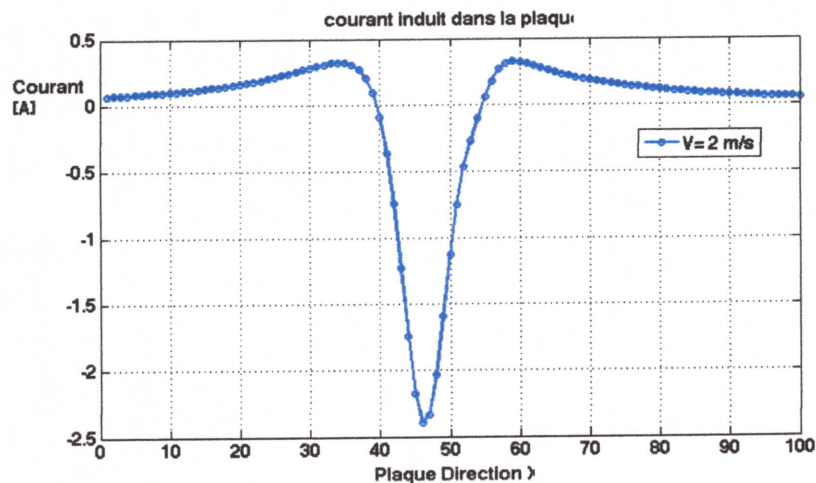


Figure.III.17 courants induit le long de la plaque pour $V=2\text{m/s}$

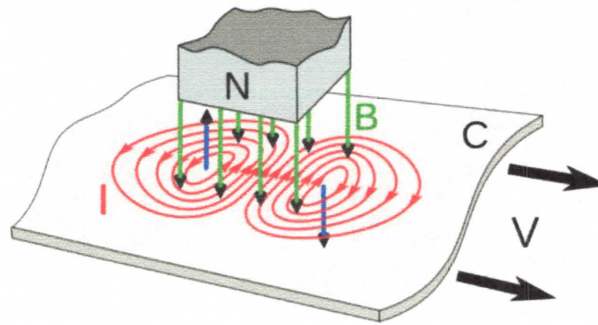


Figure.III.18 présentation des courants induits en présence du mouvement

En augmentant la vitesse, l'intensité et l'asymétrie des courants induits deviennent d'une importance frappante Figure III.19. En plus nous pensons qu'il y a une influence des effets des coins créant des fluctuations des courants pour les vitesses les plus grandes. On pense pour le modèle qu'il faut agrandir la largeur de la plaque en fonction de la vitesse choisie

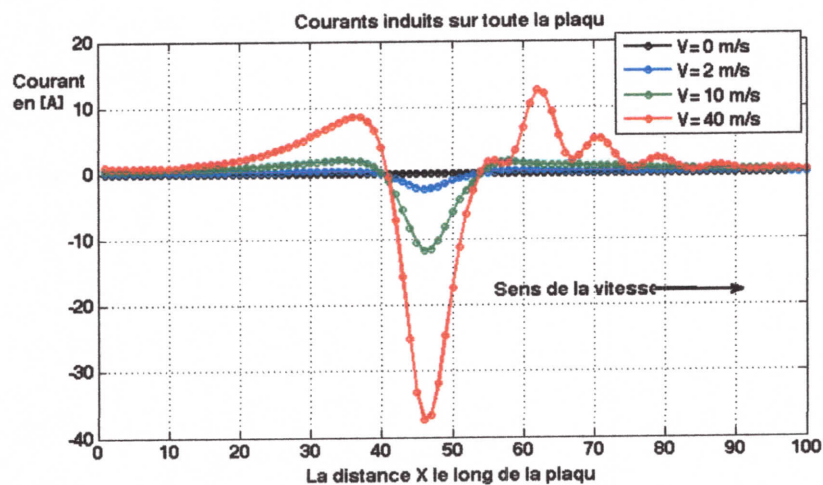


Figure.III.19 Distribution des courants induits pour plusieurs valeurs de vitesse

Pour la suite, nous montrons les résultats des courants induits exposés aux mêmes différentes valeurs de vitesses, mais au lieu d'un aimant nous insérons deux aimants décalés de 0.02m dans la direction du mouvement Figure III.20

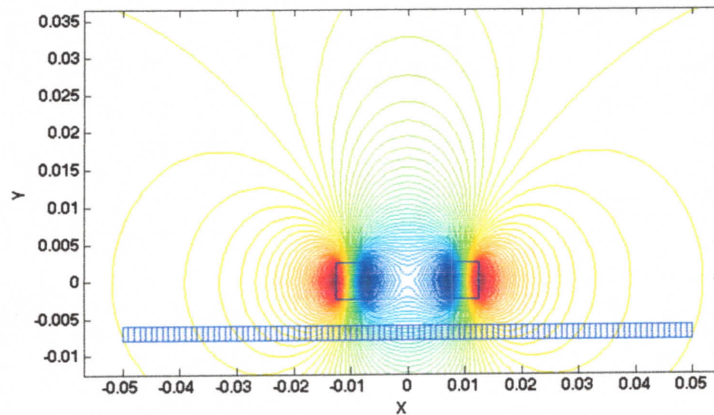


Figure.III.20 Présentation des deux aimants et la plaque conductrices

Dans cette situation, les courants induits présentent deux sommets alternés. Dans la pratique, composer des aimants en NSNS permet d'avoir des onduleurs magnétiques où les lobes du champ sont liés aux nombre d'aimants. Ici, pour les courants induits c'est une chose identique puisque le changement des directions ou tout simplement le nombre de boucles de courants est directement lié au nombre d'aimants utilisés la figure III.21.

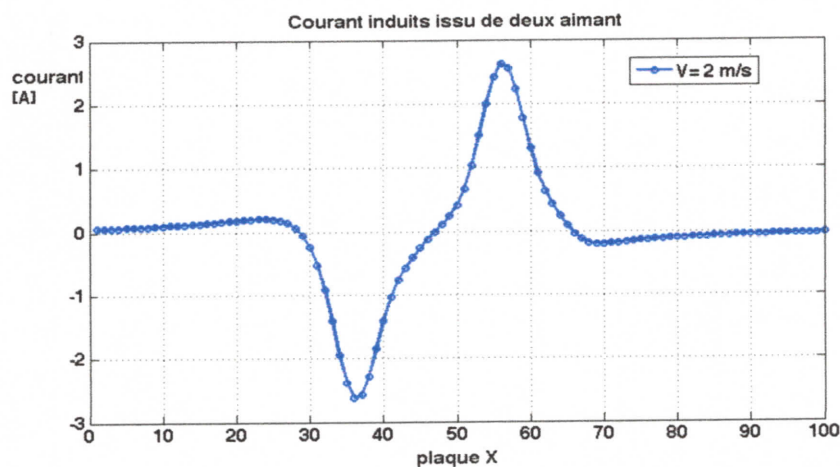


Figure.III.21 courants induit le long de la plaque pour $V=2\text{m/s}$ et deux aimants

Les mêmes remarques sont à noter par rapport au premier cas, lors de l'application des valeurs de vitesses suivantes 0, 2, 10 et 40m/s la figure III.22 .

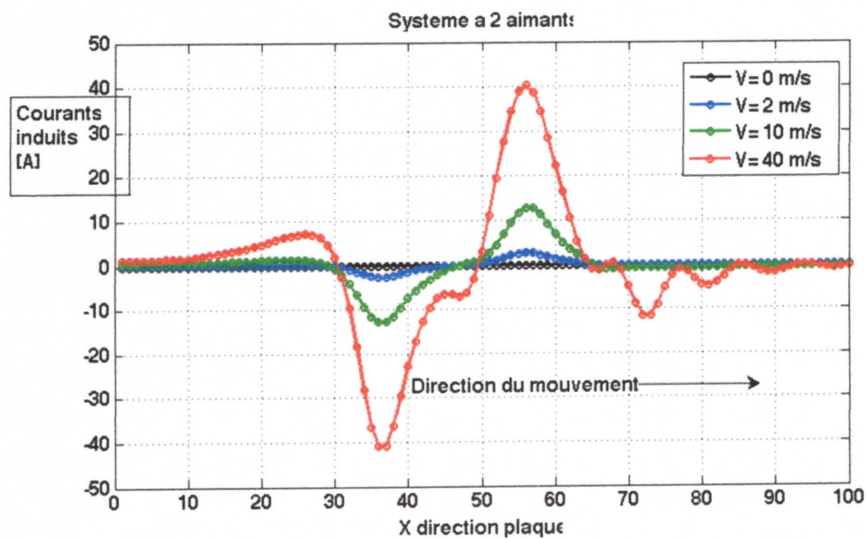


Figure.III.22 Distribution des courants induits pour plusieurs valeurs de vitesse (2 aimants^o)

Conclusion

Dans ce chapitre, toute la procédure de prise en compte du mouvement à vitesse constante a été réalisée avec succès. Commenant au départ par la modélisation des aimants permanents simples à travers des approches intégrales (Ampérienne ou Coulombienne) que nous les avons jugé équivalentes du point de vu calcul des grandeurs dans l'air environnant. La considération du mouvement était réalisée après détermination des inductances propres et mutuelles entre les différents composants conducteurs du système (à savoir, les plaques composées de conducteurs parallélépipédiques et les aimants remplacés par des conducteurs fins).

Les résultats sont composés de deux grandes parties. Les premiers concerne la distribution des grandeurs magnétiques (potentiel scalaire, induction magnétiques) dont on a présenté des aimants seuls ou en configuration NSNS et même des distributions particulières. Les seconds concernent la détermination des courants induits dans les plaques après imposition des vitesses constants. Nous sommes entièrement convaincus des résultats obtenus et on souhaite quand même les comparer avec d'autres à trouver dans la littérature.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons vu des dispositifs électromécaniques contenant des aimants permanents, l'utilisation des aimants est indiscutable vu les avantages qu'ils génèrent dans ces systèmes. Nous, notre souci était de savoir et de prédire le comportement des courants induits lors des mouvements. Ces applications, s'adaptent bien pour les systèmes de freinages largement utilisés. Le travail réalisé de cette manière ne manque pas d'audace car nous n'avions pas trouvé dans la littérature des travaux traitant de la même façon des problèmes similaires. Tous cela est dû à la connaissance préalable des calculs par les approches dites intégrales des interactions propres et mutuelles caractérisant tous le modèle.

Pour le calcul des grandeurs magnétiques où les aimants sont seuls entre eux, l'utilisation de l'approche intégrale par ces deux types très connus (ampérien ou coulombien) est parfaitement identique. Mais, il est toujours plus intéressant lors de la présence des conducteurs d'utiliser le modèle ampérien où l'aimant est remplacé par une bobines fictifs très fines portant un courant linéique proportionnel à l'aimantation.

Le besoin de calcul des inductances de façon précise, nous a conduit à utiliser des développements analytiques exacts pour lesquelles les résultats les sont convaincants. Les variations des courants induits sont très logiques et mérites d'être validés au futur pour donner plus de crédibilité pour ce travail.

Bibliographies

Références bibliographiques

- [1] M.Ounnadi «Elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimants permanents » Soutenu publiquement le 07 / 04 / 2011 devant le jury, L'Université de Tizi-Ouzou.
- [2] H. Allag « Modèles et calcul des systèmes de suspension magnétique passive Développements et calculs analytiques en 2d et 3d des interactions entre aimants Permanents-» Thèse de Doctorat, UJF Grenoble et UMC Constantine, 2010.
- [3] Mr BOUKAIS Boussad «Contribution a La Modalisation des couples Machines Convertisseurs : Application Aux Machines a Aimants Permanents (BDCM-PMSM) », Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Soutenu publiquement le : 21/02/2012.
- [4] www.blsmagnet.com « Depuis 1987, BLS Magne conçoit et réalise des solutions et matériaux Magnétique innovants. ». ZI de Villers - Route d'Bussigny 54920 Villers la Montagne (France).
- [5] SA. Prunellalaan « aimants permanent » Goudsmit Magnétique Supplies 14Postbus 75580 AA WAALRE Pays-Bas Numéro de dossier : 07/73.
- [6] P.E. CAVAREC, H. BEN AHMED, B. MULTON, M. ANTUNES « Actionneur linéaire synchrone à aimants permanents multi-tiges. EF'2003 Électrotechnique du futur 9 et 10 décembre 2003 Supélec.
- [7] ENS Cachan – Antenne de Bretagne « Notes de cours 2005 (version 1 : 1995) »- Bernard MULTON.
- [8] By Karl J. Strnat « Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology » Proceedings of the IEEE, Volume 78 Number 6, J'UNE 1990, pp. 923, doi:10.1109/5.56908&, Professor Emeritus, University of Dayton, Ohio.

[9] ENS Cachan-Antenne de Bretagne « Actionneurs-Transport-Energie » SATIE (UMR CNRS 8029) - Antenne de Bretagne, équipe, campus de Ker lann, 35170 Bruz. EF'2003 Électrotechnique du futur 9 et 10 décembre 2003 Supplée.

[10] <http://www.universalis.fr/encyclopedie/aimants/>« Applications des aimants Permanents» - Encyclopédie Universalis.htm.

[11] References, A.E Ruehli « Inductance calculation in a complex integrated circuit environment, IBM journal of research and devlopment, 1972

[12] Cletus Hoer* car Love « Exact Inductance Equations for Rectangular conductors with Applications to More complicated Geometries» JOURNAL OF RESEARCH OF THE NATINAL Bureau of Standards-c.Engineering and Instrumentation Vol.69C, No. April-JUNE 1965.