

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie électrique

Option

Electrotechnique industriel

Thème

Etude et modélisation du lanceur électromagnétique à rails

Présenter par :

Mr BEDJOU Messaoud

Mr HAMGA Fateh

Encadre par :

Mr MAUCHE Bachir

Mr BOUCHABAH Badis

Année universitaire 2019 /2020

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.

Nous voulons exprimer par ces quelques lignes de remerciements notre gratitude envers tous ceux en qui en leur présence, leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils, nous avons eu courage d'accomplir ce projet.

Nous commencerons par remercier Mr. B. Mouche qui nous a fait l'honneur d'être notre encadreur.

Nous le remercions profondément pour son encouragement continue et aussi d'être toujours là pour nous écouter, nous aider et nous guider à retrouver le bon chemin par sa sagesse et ces précieux conseils.

Ainsi que son soutien moral et sa preuve de compréhension, ce qui nous a donné la force et le courage d'accomplir ce projet.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent de même au doctorant BADIS pour ses conseils, son aide crucial dans notre étude ainsi que pour le temps qu'il nous a réservé.

Nous tenons à remercier également les membres de jury qui nous feront l'honneur d'accepter de juger ce travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques techniques.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé Que DIEU les protège et les garde pour nous, Amène.

A mes chères sœurs : Lydia, El Djida

A tous mes amis :

Messaoud, Massi, Amine, Larbi, Nassim, Saïd, Ghilas, Belkacem, Meziane, Nadir, Younes, Farouk, Morad, Baya, Lyna, Kahina, Sara, Camélia, Jojo, et pour tous ceux que je connais et que j'ai oublié de citer

Fateh,

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents, mes sœurs, mes amis et à tous ceux qui ont contribué à l'achèvement de ce projet.

Messaoud,

Liste des figures

Figure I. 1- Catapulte a baliste.....	2
Figure I. 2 - Char léopard 2	3
Figure I. 3- Lanceur a bobine.....	4
Figure I. 4- lanceur de Fauchon-Villeplée (1), le projectile avant (2) et après (3) le tir...	5
Figure I. 5- lanceur à induction.....	7
Figure I. 6- Lanceurs électromagnétiques à induction à plusieurs bobines	8
Figure I. 7- Lanceur à rail	9
Figure I. 8- lanceur à rail augmenté en série.....	10
Figure I. 9- Lanceur à rails à shunt	11
Figure I. 10- Lanceur à rails augmenté en parallèle	11
Figure I. 11- Lanceur à rails augmenté avec un circuit extérieur segmenté	13
Figure II. 1- Schéma équivalent d'alimentation électrique du lanceur a rails.	15
Figure II. 2- Allure du courant d'alimentation du lanceur a rail	16
Figure II. 3- Alimentation de lanceur à rail par banc de condensateur.	17
Figure II. 4- courant en fonction temps.	18
Figure II. 5- Décharge de multiple courant	18
Figure II. 6- Alimentation par décharges simultanées.....	19
Figure II. 7- Schéma électrique de l'alimentation augmentée et distribuée.	19
Figure II. 8- Représentation d'une spire parcourue par un courant.....	22
Figure II. 9- Champ généré par un fil infini	24
Figure II. 10- Champ magnétique génère par un fil infini.....	25
Figure II. 11- Force de Laplace	26
Figure III. 1- Lanceur à deux rails.....	27
Figure III. 2- Champ magnétique génère par les deux rails	28
Figure III. 3- Force électromagnétique induite lors de la première configuration sur chacune des tiges	29
Figure III. 4- Configuration avec deux tiges perpendiculaires.....	30
Figure III. 5- Configuration avec ajout de deux tiges décalées d'un angle 45°	33
Figure III. 6- Champ créer par le couple 3 sur la tige 1	34

Figure III. 7- Champ créé par le couple 4 sur la tige 1	35
Figure III. 8- Champ créé par le couple 3 sur la tige 2	36
Figure III. 9- Champ créé par le couple 4 sur la tige 2.....	37

Table des matières

Introduction générale.....	1
I- Généralité sur le lanceur électromagnétique.....	2
I.1- Introduction	2
I.2- Historique et l'évolution des lanceurs	2
I.2.1- Lanceurs mécaniques	2
I.2.2- Lanceurs chimiques	3
I.2.3- Lanceurs électromagnétiques.....	4
I.3- Lanceurs électromagnétiques	6
I.3.1- Lanceur électromagnétique à induction	6
I.3.2- Lanceur électromagnétique à rail conventionnelle	8
I.4- Lanceur a rails électromagnétiques augmente.....	9
I.4.1- Différentes configurations du lanceur augmenté	10
I.5- Application des lanceurs électromagnétiques.....	13
I.6- Conclusion	14
II- Alimentation et conversion électromécaniques des lanceurs a rails	15
II.1- Introduction	15
II.2- Alimentation électrique	15
II.3- Alimentation d'un lanceur à rail avec des bancs de condensateurs.....	16
II.3.1- Décharge simple.....	17
II.3.2- Décharges multiples (augmentées)	18
II.4- Conversion électromagnétique	20
II.4.1- Equations de maxwell	20
II.4.2- Simplification de l'équation de Maxwell-Ampère	21
II.4.3- Equation de Laplace.....	22
II.4.4- Loi de Biot et Savart	22

II.4.5-	Théorème d'Ampère	23
II.4.6-	Force de Laplace	25
II.5-	Conclusion	26
III-	Modélisation et applications.....	27
III.1-	Introduction	27
III.2-	Système à un couple de deux rails.....	27
III.2.1-	Champs magnétiques du système à un couple de rails	28
III.2.2-	Force de Laplace	29
III.3-	Système à deux couples de rails	30
III.3.1-	Champs magnétiques du système à deux couples de rails	30
III.4-	Système à quatre couples de rails	32
III.4.1-	Géométrie du système.....	32
III.4.2-	Champs magnétiques du système a quatre couples de rails.....	33
III.4.3-	Influence du couple 3 sur la tige 1 :.....	34
III.4.4-	Influence du couple 4 sur la tige 1	35
III.4.5-	Influence du couple 3 sur la tige 2	36
III.5-	Conclusion	37
	Conclusion générale	38

Introduction générale

L'accélération électromagnétique est un concept qui a été étudié pendant au minimum huit décennies. En 1920, un canon électrique a été proposé par un ingénieur français, et un effort concentré a été fourni en Allemagne durant la dernière partie de la deuxième guerre mondiale. Plusieurs études, concernant cette technologie, ont été ensuite menées pendant les années soixante mais celles-ci se voient entravées par le manque d'alimentation adéquate et de modèles de conception fiables. Les travaux de Rashleigh, Marshall, et Barber, menés à l'université nationale d'Australie, ont partiellement résolu ces problèmes, ouvrant ainsi la voie des à exploits considérables dans ce domaine de la propulsion électromagnétique

Le concept consiste à établir une différence de potentiel électrique entre deux rails parallèles conducteurs de l'électricité et à insérer entre eux un projectile conducteur pouvant glisser ou rouler dessus, en faisant contact. Dès que le contact a lieu, un courant électrique circule entre les deux rails, un champ magnétique naît et le projectile est accéléré par la force de Laplace (interaction entre le courant qui circule dans le projectile et le champ magnétique créé).

Les deux rails métalliques parallèles sont connectés à un générateur électrique, formant ainsi un circuit ouvert. Dès qu'un objet conducteur est inséré entre les rails, le circuit est fermé, et un courant le suit.

Le travail est composé de trois chapitres. Dans le premier chapitre, on donnera les généralités sur le lanceur électromagnétique et son principe de fonctionnement. Dans le second, on traitera la modélisation électromagnétique élémentaire. Finalement dans le dernier chapitre, on modélise le lanceur à deux rails puis à plusieurs rails et on exposera les résultats obtenus

Chapitre I

Généralité sur le lanceur électromagnétique

I- Généralité sur le lanceur électromagnétique

I.1- Introduction

On peut définir un lanceur comme un organe de conversion d'énergie initiale (mécanique, chimique ou électromagnétique) en une énergie finale (cinétique) destinés à assurer le déplacement d'un engin mobile pour atteindre une cible ou pour le satelliser. L'homme mène depuis des dizaines de siècles des recherches afin de perfectionner les lanceurs. Depuis le début du vingtième siècle, il s'attache notamment à développer un lanceur électromagnétique [1].

I.2- Historique et l'évolution des lanceurs

I.2.1- Lanceurs mécaniques

Des recherches archéologiques à Nimroud, en Irak, ont montré que l'utilisation des lanceurs mécaniques pour des buts militaires date du neuvième siècle avant Jésus-Christ.

Les lanceurs mécaniques, comme la catapulte et la baliste (**Fig. I-1**). Étaient très répandus dans le monde antique. C'est Les Romains, qui possédaient la plus grande variété, Ils avaient introduit sous l'influence des Grecs des méthodes mathématiques et d'ingénierie pour les optimiser [1].

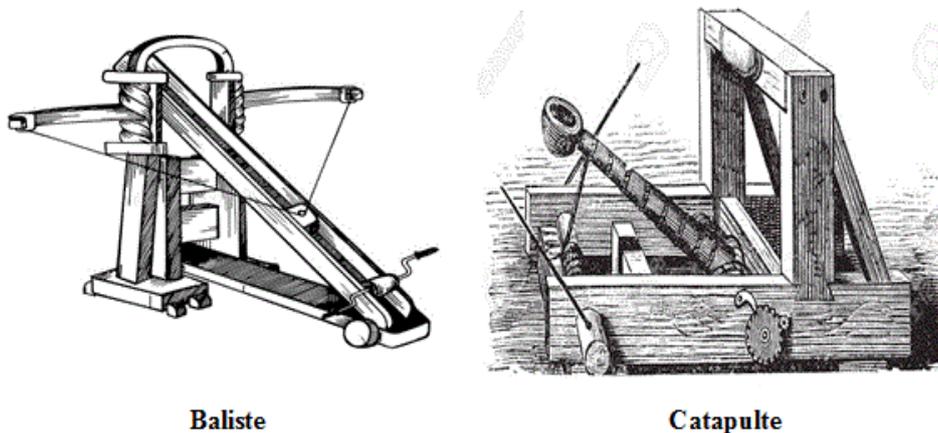


Figure I. 1- Catapulte a baliste

Au douzième siècle, au début du Moyen-Âge, le trébuchet apparût sur les champs de bataille. Les plus puissantes armes de ce type pouvaient lancer des pierres sphériques de 140 kg, avec une vitesse de lancement estimée à 50 m/s, à des distances de 275 m. Les projectiles étaient accélérés au moyen d'un contrepoids qui pouvait peser jusqu'à 10 tonnes [1].

I.2.2- Lanceurs chimiques

Sans l'apparition de la poudre noire qui est un mélange chimique composé de (soufre, nitrate de potassium et de charbon de bois) inventée en Chine probablement vers le neuvième siècle les lanceurs chimiques n'auraient pas vu le jour [6].

En 1247, pendant le siège de Séville, les Maures utilisèrent le mélange chimique, et la poudre noire, pour lancer des projectiles. Ce lanceur chimique se répandit ensuite dans toute l'Europe, mais le lanceur mécanique resta d'usage courant jusqu'au dix-huitième siècle. Une des raisons de la réticence envers les armes à feu fut le manque de précision des tirs et le danger d'explosion du lanceur et des réservoirs de poudre. Ce n'est pas pour rien que les artilleurs étaient les militaires les mieux payés dans les armées d'antan. De puis la deuxième moitié du dix-neuvième siècle, des nouvelles inventions menèrent à des poudres et des canons de plus en plus fiables et performants [1].

Actuellement les lanceurs utilisent la poudre noire qui sont limités à des armes anciennes de chasse et de tir sportif et aux feux d'artifices. De nos jours l'un des plus puissants systèmes d'armes est le char Leopard 2 réalisé par l'Allemagne depuis 1980 (**Fig. I-2**).



Figure I. 2 - Char léopard 2

En plus du lanceur à poudre (propergol solide), il existe depuis soixante dix ans le lanceur spatial, qui utilise des propergols liquides comme l'hydrogène liquide et le kérosène.

I.2.3- Lanceurs électromagnétiques

Le premier lanceur électromagnétique développé était le lanceur à bobine. Son développement aurait commencé en 1845. Le premier brevet a été attribué au professeur Kristian Birkeland. Il accélère un projectile de 500g à 50 m / s (**Fig. I-3**) [7].

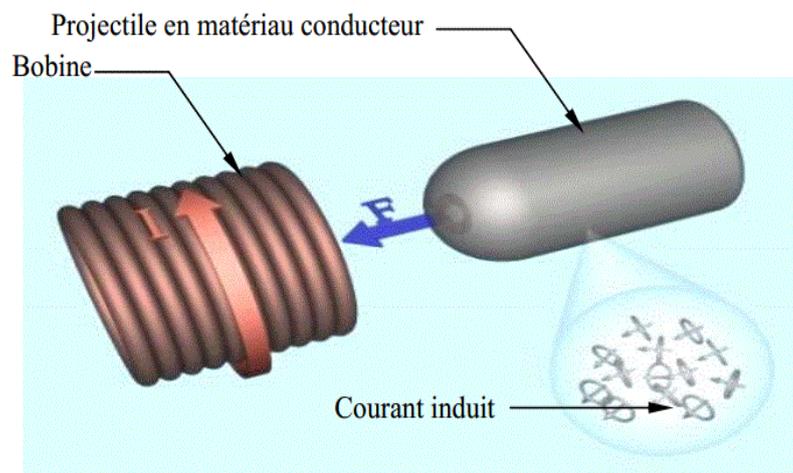


Figure I. 3-Lanceur a bobine

En 1918, l'inventeur français Louis Octave-Fauchon Villeplée a créé un lanceur à rail, Le lanceur avait une longueur de 2 m et lançait des projectiles de 50 g avec une vitesse de 200 m/s.

Dans son dispositif, deux parallèles barres sont reliées par les ailes d'un projectile, et l'ensemble du dispositif est entouré par un champ magnétique. Par le courant passant à travers les jeux de barres et projectile, une force est induite qui propulse le projectile le long des barres conductrices et en vol (Fig. I-4) [7].

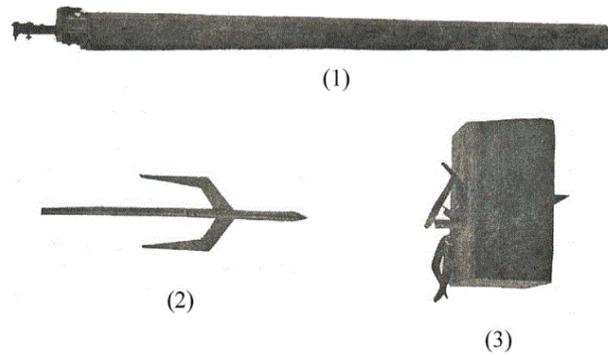


Figure I. 4-lanceur de Fauchon-Villeplée (1), le projectile avant (2) et après (3) le tir

Le projet fut abandonné à la fin de la première Guerre Mondiale en raison d'objections diverses et d'un manque de moyens. La principale objection était celle "qu'il faut adjoindre à ces canons des usines puissantes, pratiquement indéplaçables pour leur permettre de fonctionner".

En 1944, pendant la Seconde Guerre mondiale l'Allemand Hänslera proposé son premier lanceur électrique théoriquement viable, à la fin de 1944 la théorie derrière son lanceur électrique antiaérien avait été élaborée le lanceur été de 2 m et réussit à accélérer des projectiles de 10 g jusqu'à une vitesse de 1200 m/s. Il fut confronté au même problème que Fauchon-Villeplée : l'impossibilité de fabriquer des sources d'énergie de faible encombrement. En 1946, une commission américaine évalua son travail et conclut que le problème de la source d'énergie était insoluble. Les études furent alors arrêtées.

Au cours de 1950, Sir Mark Oliphant , un Australien physicien et premier directeur de l' école de recherche en sciences physiques à la nouvelle Université nationale australienne , a lancé la conception et la construction de la plus grande source d'énergie (500 mégajoule) du monde, un générateur homopolaire . Cette machine est opérationnelle à partir de 1962 et a été utilisé plus tard pour alimenter les lanceurs électriques à grande échelle [1].

Richard Marshall alors construisit à l'université nationale australienne a Canberra un lanceur à rails de longueur égale à 5 m qui accélère des projectiles de 3 g jusqu'à des vitesses de 5.9 km/s en utilisant un énorme générateur homopolaire.

En 1994, L'Organisation de recherche et développement pour la défense indienne a mis au point un lanceur électromagnétique avec 240 kJ, à faible capacité d'inductance fonctionnant à 5 kV puissance capable de lancer des projectiles de 3-3,5 g de poids à une vitesse de plus de 2 km / s.

À l'ISL, les activités de recherche sur le lanceur électrique ont commencé en 1987. Les lanceurs étudiés sont le lanceur à rails, le lanceur à induction et le lanceur électrothermique chimique. Les études se limitent essentiellement aux applications militaires et plus particulièrement à l'accélération de projectiles d'une masse de 0.1 kg à 10 kg à des vitesses de 2 à 3 km/s. La longueur d'accélération est toujours inférieure à 7 m et le calibre varie de 15 mm à 120 mm [7].

Le lanceur à rails PEGASUS ("Program of an Electric Gun Arrangement to Study the Utilization in Systems») a été construit par l'ISL en 1998. Le lanceur PEGASUS de 10 MJ est un lanceur électromagnétique utilisé pour faire évoluer la technologie des lanceurs et des composants électriques associés. Il sert au développement d'un système d'accélération fiable afin d'obtenir de très longues portées. Les résultats récents montrent, qu'un corps volant d'une masse qui peut avoir jusqu'à 1kg peut atteindre des vitesses supérieures à 2500 m/s [8].

I.3- Lanceurs électromagnétiques

Les lanceurs électromagnétiques sont des engins de transformation de l'énergie initiale électrique à une énergie finale cinétique par l'effet de l'induction électromagnétique.

On distingue deux types de lanceur électromécanique :

- Lanceur électromagnétique à induction
- Lanceur électromagnétique à rail

I.3.1- Lanceur électromagnétique à induction

Le propulseur à induction a le même principe de fonctionnement que la machine asynchrone à induction (spécialement le moteur linéaire) [2].

Dans sa forme la plus simple, le lanceur à induction consiste en une bobine fixe et une bobine mobile coaxiale (projectile), qui sont électriquement indépendantes (**Fig. I-5**)[5].

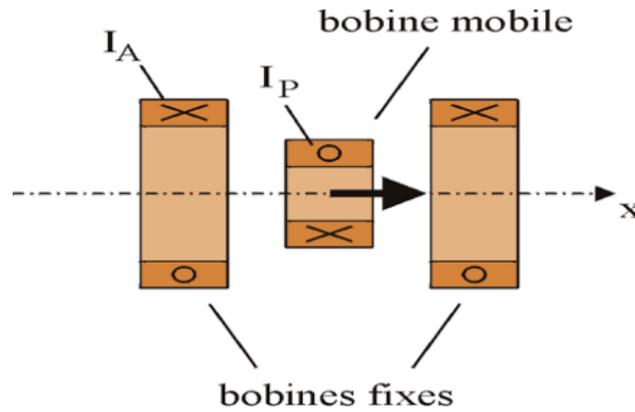


Figure I. 5-lanceur à induction

Lorsqu'un courant variable circule dans la bobine fixe, il crée un champ magnétique variable, ce dernier induit un courant aussi variable au niveau du projectile qui crée à son tour un deuxième champ magnétique variable de direction opposée au premier champ, l'interaction entre les deux champs, inducteur (origine de courant d'injection) et induit crée la force de propulsion qui donne une accélération à la bobine mobile (projectile) [1]. La force est donnée par :

$$F = I_A I_P \frac{\partial M}{\partial x} \quad (I.1)$$

Avec :

I_A : Courant injecté dans la bobine fixe.

I_P : Courant dans la bobine mobile (projectile) induit par le courant I_A .

$\frac{\partial M}{\partial x}$: Gradient de l'inductance mutuelle des deux bobines en fonction de la distance x .

Les lanceurs électromagnétiques à bobine sont généralement constitués d'une ou plusieurs bobines disposées le long d'un canon, de sorte que la trajectoire du projectile accélérateur se situe le long de l'axe central des bobines. Les bobines sont activées et désactivées dans une séquence minutée avec précision, provoquant une accélération rapide du projectile le long du canon via des forces magnétiques. Les bobines du canon forment plusieurs sections alimentées indépendamment à des fréquences différentes et des niveaux de tension

différents par des générateurs de tension sinusoïdales ou par des bancs de condensateurs comme la figure (**Fig. I-6**) le montre[5].

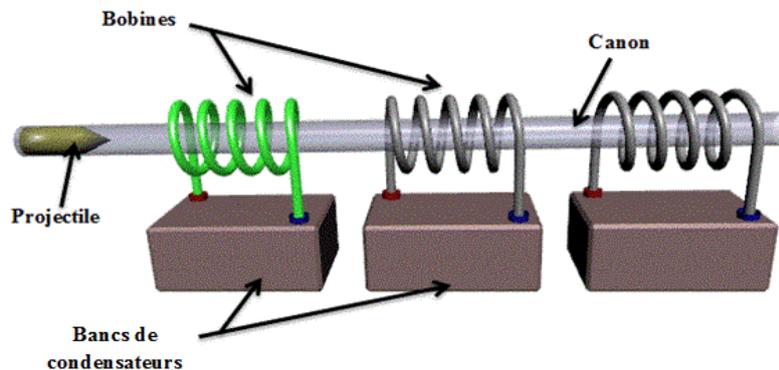


Figure I. 6-Lanceurs électromagnétiques à induction à plusieurs bobines

I.3.2- Lanceur électromagnétique à rail conventionnelle

Ces lanceurs sont généralement constitués d'une partie fixe à savoir deux rails conducteur monté en parallèle et d'une partie mobile le projectile qui constitue un pont de courant solide et mobile entre deux rails. Il n'existe qu'un seul circuit électrique. Il est constitué d'une source d'énergie (actuellement des bancs de condensateurs), des deux rails et du projectile. La décharge du banc de condensateur dans le circuit fermé ainsi constitué provoque l'apparition d'un courant de forte intensité ainsi qu'un champ magnétique autour du circuit. Le projectile est donc traversé par un courant I et soumis à un champ magnétique B . Le projectile est accéléré par la force de Lorentz, générée par l'interaction du champ magnétique des rails et du courant dans le pont de courant (**Fig. I-7**) [4]. La force de propulsion est donnée par :

$$F = \frac{1}{2} \cdot L \dot{I}^2 \quad (I.2)$$

Où $L' = \frac{\partial L}{\partial x}$: Variation de l'inductance des rails selon la direction du déplacement projectile.

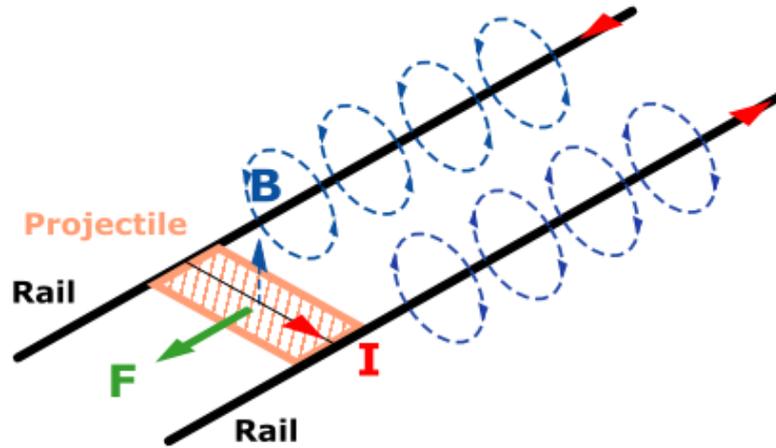


Figure I. 7-Lanceur à rail

I.3.2.1- Alimentation

Le lanceur électromagnétique à rail nécessite une très grande alimentation qui fournit un courant très élevé de l'ordre d'un million d'ampères pour accélérer des projectiles à des grandes vitesses et pour l'alimenter on utilise des générateurs homopolaires ou des bancs de condensateurs. [3]

I.3.2.2- Rails

Les rails sont des parties statiques. Ils sont réalisés avec une matière conductrice pour permettre la circulation des courants électriques délivrés. Ils sont constitués de deux conducteurs, parcourus par un courant I , entre lesquels se trouve un projectile comportant une ou plusieurs parties conductrices et pouvant glisser sur le long des rails [3].

I.3.2.3- Projectile

Le projectile est la partie dynamique du propulseur à rail. Il est construit par une matière à forte conductivité et se compose d'un ou plusieurs couches. L'interaction entre le champ d'induction magnétique et le courant circule dans le projectile génère la force de propulsion [3].

I.4- Lanceur a rails électromagnétiques augmenté

Pour un lanceur à rails conventionnel la méthode la plus efficace pour augmenter la force sur le projectile est d'augmenter le courant dans les rails. Mais la densité de courant est limitée. L'échauffement des contacts entre les rails et les ponts de courant par l'effet Joule et la force de frottement, peut résulter dans la transformation d'un contact solide dans un contact plasma,

ce qui est à éviter. Pour cela il faut réduire l'intensité de courant dans le pont, sans diminuer la force électromagnétique. Ceci peut être réalisé en augmentant l'inductance du lanceur ou en appliquant un champ magnétique extérieur au lanceur par des différentes configuration [9].

I.4.1- Différentes configurations du lanceur augmenté

I.4.1.1- Lanceur augmenté en série

Cette configuration est basée sur l'ajout d'une ou plusieurs spires supplémentaires au circuit du lanceur qui permet d'augmenter l'inductance du circuit et donc de diminuer le courant dans le pont du projectile, en maintenant la force électromagnétique constante (**Fig. I-8**).

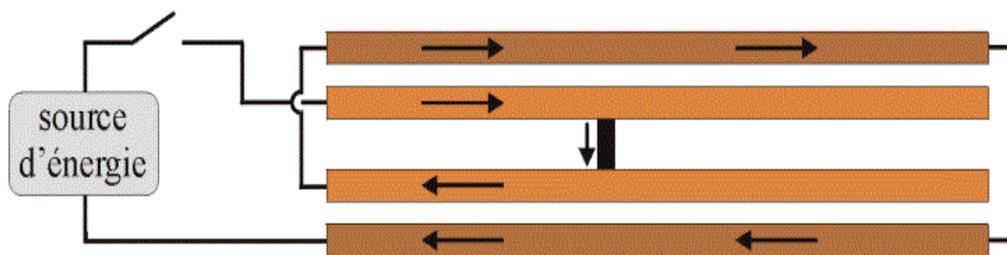


Figure I. 8-lanceur à rail augmenté en série

Cette configuration présente plusieurs inconvénients. La force de répulsion entre les rails est plus grande, ce qui nécessite une structure de maintien des rails plus lourde. Le circuit du lanceur est plus long, et donc la résistance plus grande. Les pertes par effet Joule qui en résultent sont la cause d'une diminution du rendement du lanceur et par conséquent d'une augmentation du volume de l'alimentation. Des conducteurs intérieurs multiples augmentent la complexité mécanique et électrique du système, ce qui se traduit par des coûts de construction et de maintenance accrus et en une fiabilité réduite [10].

I.4.1.2- Lanceur à shunt

Cette configuration permet d'augmenter l'inductance du circuit et donc de diminuer le courant dans le pont du projectile, en maintenant la force électromagnétique constante tout comme le lanceur à rails augmenté en série, mais sans rails supplémentaires.

Le lanceur à shunt consiste en un lanceur à rails conventionnel avec un circuit shunt à la bouche (**Fig. I-9**). Le courant injecté est réparti entre le pont de courant du projectile et le

shunt. Il y a alors du courant dans les rails devant le projectile, ce qui augmente la force sur le projectile [11].

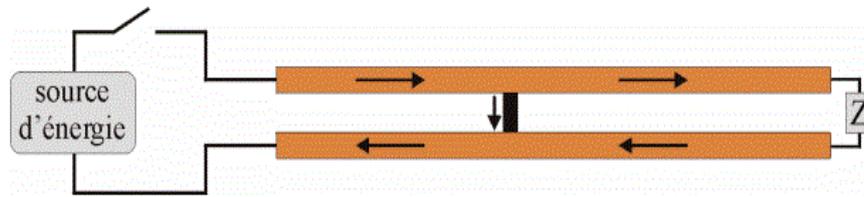


Figure I. 9- Lanceur à rails à shunt

I.4.1.3- Lanceur augmenté en parallèle

L'augmentation en parallèle consiste en la génération d'un champ magnétique extérieur par des rails supplémentaires (**Fig. I-10**). Cette configuration présente plusieurs avantages : Une deuxième source d'énergie, indépendante de celle du circuit intérieur, alimente le circuit extérieur. Le courant dans ce circuit ne doit pas être impulsionnel donc l'encombrement de la source peut être minimisé, ainsi le circuit extérieur permet, par couplage électromagnétique de récupérer l'énergie résiduelle dans les rails intérieurs après la sortie du projectile, et le rendement du lanceur peut être augmenté. Les circuits de cette configuration sont plus courts que ceux du lanceur augmenté en série ; les pertes par effet Joule sont donc plus faibles [10].

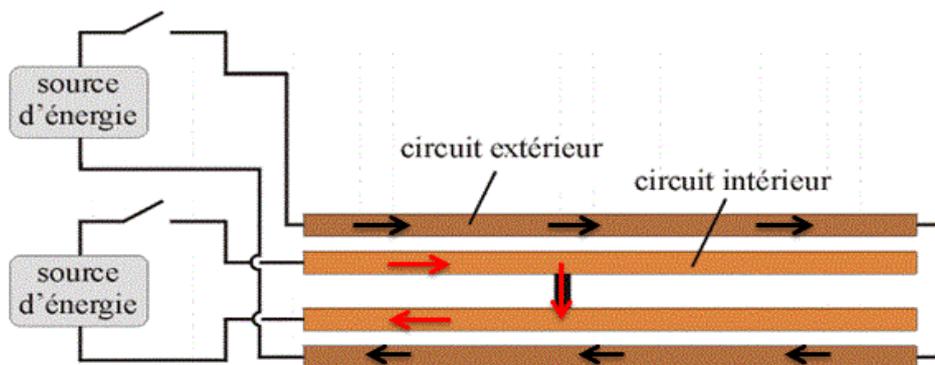


Figure I. 10- Lanceur à rails augmenté en parallèle

I.4.1.4- Lanceur augmenté par des aimants permanents

Des études théoriques et expérimentales ont été menées concernant l'augmentation du champ magnétique par des aimants permanents. Cette configuration consiste à insérer des aimants permanents comme un circuit extérieur au lanceur pour augmenter la force de

propulsion dans le projectile ce qui offre deux avantages majeurs : le courant dans le pont est réduit pour une même force propulsive et le risque de former des arcs secondaires est plus faible [7].

I.4.1.5- Comparaison entre le lanceur à rail conventionnel et le lanceur à rail augmenté

Afin de comparer entre les lanceurs à rails conventionnel et les lanceurs à rails augmenté plusieurs études expérimentales ont été menées en se basant sur trois critères de comparaison qui sont : l'énergie cinétique maximale à la bouche du lanceur, le rendement et la puissance requise. La première caractéristique est la plus essentielle car elle détermine la valeur ajoutée du lanceur augmenté par rapport au lanceur conventionnel. Le rendement et la puissance requise sont des paramètres importants pour le dimensionnement de la source d'énergie.

Les études menées pour déterminer l'énergie cinétique en donné le tableau suivant :

Tableau I.1-Tableau comparatif de l'énergie maximale à la bouche des deux lanceurs

Projectile à un Pont de courant	Lanceur conventionnel (17.5 g)	Lanceur augmenté (16.1 g)
Vitesse à la bouche	350 m/s	850 m/s
Énergie électrique	151 kJ	459 kJ
Énergie cinétique	1.07 kJ	5.82 kJ

Les études ont montré que le lanceur a rail conventionnel à un rendement plus élevé par rapport au lanceur a rail augmente et ce, est due aux pertes d'énergie résultantes de la résistance du circuit extérieur de ce dernier. Afin de limiter cette perte et d'augmenter le rendement du lanceur, il faut modifier le circuit extérieur. Segmenté le circuit extérieur pourrait alors être une des solutions (**Fig. I-11**). [1].

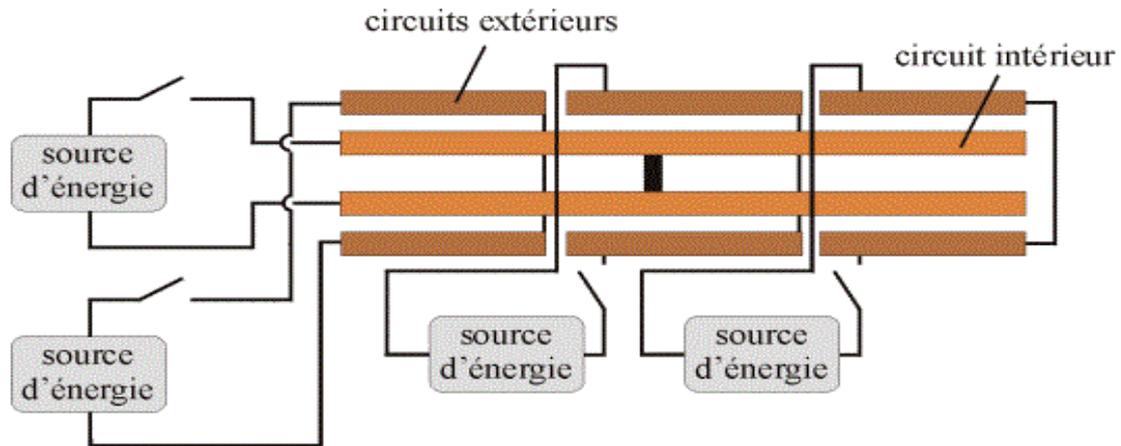


Figure I. 11- Lanceur à rails augmenté avec un circuit extérieur segmenté

I.5- Application des lanceurs électromagnétiques

Actuellement l'utilisation du propulseur électrique dans le domaine industriel est envisagée pour les applications qui requièrent une vitesse initiale du projectile plus élevée. Leur intégration dans des véhicules est également étudiée. Les applications civiles du propulseur électriques sont nombreuses. En voici quelques exemples [2] :

- Accélération de petits projectiles (1g) à des vitesses très élevées (6Km/s) afin d'étudier les équations d'état des matériaux à ultra haute pression.
- Applications militaires.
- Accélération de particules d'une centaine de milligrammes pour simulation d'impacts de micrométéorites.
- Application au traitement de surface : utilisation du propulseur électromagnétique et électrothermique pour générer des plasmas à haute énergie accélérés sur des surfaces métalliques, ceci ayant pour effet de créer des couches surfaciques très dures et très résistantes au frottement.
- Injections de particules de deutérium solide dans le plasma à haute température d'un Tokamak.
- La mise en orbite de fret et de satellites.
- Véhicules de transport comme Le TGV.
- L'approvisionnement en carburant d'un réacteur à fusion nucléaire.

I.6- Conclusion

Dans ce chapitre, on a défini le lanceur et donner un aperçu sur son historique et son évolution et les différents types de lanceur existant dont celui d'électromagnétisme. On a aussi cité les différentes variantes de ce dernier tout en donnant leurs structures globales. Finalement, on a cité les différentes applications du lanceur à rails .

Chapitre II

**Alimentation et conversion électromécaniques
des lanceurs a rails**

II- Alimentation et conversion électromécaniques des lanceurs a rails

II.1- Introduction

Le propulseur électromagnétique à rails à l'avantage d'augmenter sensiblement la vitesse initiale des projectiles. De tels propulseurs, alimentés par des sources d'énergie électrique allant jusqu'à 10MJ, sont utilisés pour l'étude de contacts électriques glissants aux vitesses et courants élevés [7]. Le propulseur électromagnétique à rail semble être le plus promoteur du propulseur électrique. Son principe de fonctionnement est simple et ses performances sont très satisfaisantes. Dans le domaine de l'accélération électrique, le propulseur à rails soulève le plus grand intérêt tant et les recherches les plus actives lui sont consacrées pour le recherché civile.

En électromagnétisme, le théorème d'Ampère et de Faraday forme principalement le système d'équations aux dérivées partielles de Maxwell. La résolution de ces équations associées aux lois de comportement électrique et magnétique des matériaux permet de déterminer les grandeurs électromagnétiques. La connaissance de ces grandeurs dans d'un dispositif électromagnétique permet de l'étudier et de déduire la grandeur principale permettant son fonctionnement. Dans les dispositifs d'électromécaniques comme le formage et le lanceur électromagnétiques, la grandeur principale est la force magnétique de Laplace qui produit des déformations et des déplacements des pièces mobiles.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'alimentation électrique du système et les lois électromagnétiques associées.

II.2- Alimentation électrique

L'alimentation du propulseur est obtenue par la fermeture de l'interrupteur K. Le circuit comprend une résistance R et une inductance montée en série (Fig.II-1).

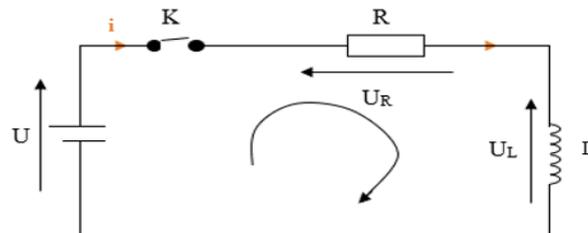


Figure II. 1- Schéma équivalent d'alimentation électrique du lanceur a rails.

U : Tension de la source

R : Resistance des rails

L : Inductance des rails

U_R et U_L : tension au bord de la resistance et de l'inductance respectivement

D'après la loi des mailles, on a :

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = U \quad (\text{II.1})$$

En divisant par L membre à membre l'équation (II.1), on a :

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{\tau}i(t) = \frac{U}{L} \quad (\text{II.2})$$

Avec $\tau = L/R$: Constante de temps en seconde

La solution de l'équation (II.2) est :

$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (\text{II.3})$$

La figure (Fig.II-2) montre l'allure du courant en fonction du temps :

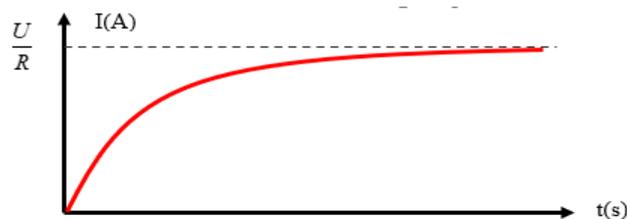


Figure II. 2- Allure du courant d'alimentation du lanceur a rail

II.3- Alimentation d'un lanceur à rail avec des bancs de condensateurs

Les propulseurs à rails sont alimentés par une décharge d'un banc de condensateurs. Sur le plan électrique, les rails avec le projectile constituent un élément de court-circuit du banc de condensateur et dans lequel le courant est du type impulsionnel à haute amplitude pouvant atteindre des Millions d'Ampères.

La force de propulsion dépend fortement de la source d'énergie alimentant les rails. On distingue deux types avec des bancs de condensateurs comme source d'énergie : décharge simple et décharge multiple. [2]

II.3.1- Décharge simple

On distingue deux types de décharge ; simple courant et multiple courant.

II.3.1.1- Simple courant

Dans ce type d'alimentation, un seul banc de condensateur est déchargé dans les rails.

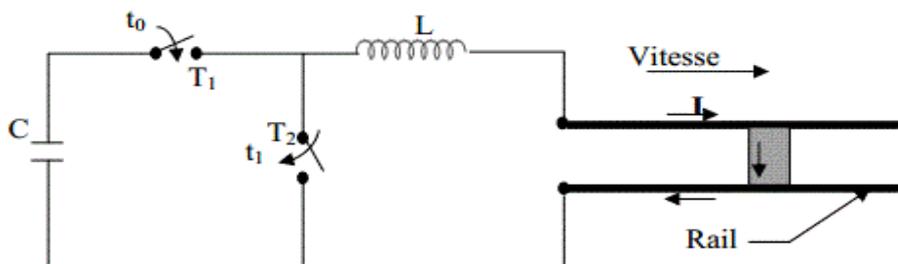


Figure II. 3- Alimentation de lanceur à rail par banc de condensateur.

La figure II.3 représente le schéma typique d'un circuit d'alimentation avec des condensateurs. En fermant T1 à l'instant t_0 , le banc de condensateurs C est déchargé dans le lanceur (Fig.II.4). Quand le courant atteint sa valeur maximale, à l'instant t_1 , la tension aux bornes du banc est presque nulle. Afin d'éviter leur recharge pour un courant de sens opposé, ce qui constituerait une perte d'énergie, le commutateur T2 est fermé. Puis, le courant est maintenu par la bobine L.

Le courant injecté dans les rails résulte d'une seule décharge du banc de condensateur (Fig.II-4).

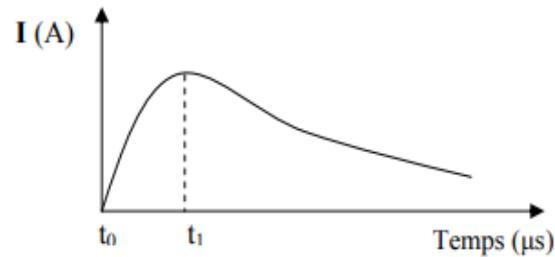


Figure II. 4- courant en fonction temps.

II.3.1.2- Multiple courant

L'alimentation multiple courant consiste à une alimentation distribuée de l'énergie électrique stockée dans une bobine (Fig.II-5).



Figure II. 5- Décharge de multiple courant

Les rails sont alimentés en courant de manière découpée lors de la progression du projectile dans les rails. Une telle alimentation exige le passage du projectile dans son trajet par des capteurs de position permettant alors l'amorçage des interrupteurs d'alimentation.

II.3.2- Décharges multiples (augmentées)

Cette technique utilise plusieurs bancs de condensateurs, on distingue deux types d'alimentation : décharge simultanée et décharge distribuée

II.3.2.1- Alimentation par décharge simultanée

Par un seul interrupteur, les bancs peuvent alimenter le propulseur. La décharge de ces bancs se fait d'une manière simultanée (voir la figure II.6).

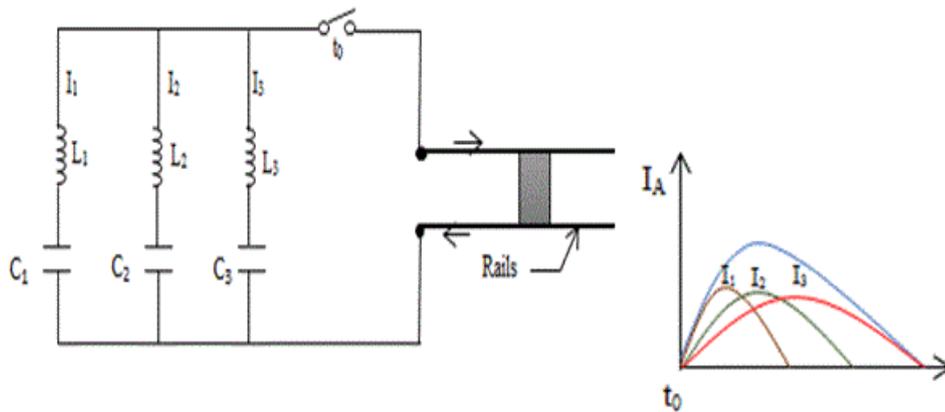


Figure II. 6- Alimentation par décharges simultanées

II.3.2.2- Alimentation distribuée le long des rails

Ce dernier type est le plus utilisé où les bancs de condensateurs sont distribués le long des rails. La décharge des bancs est en fonction de la position du projectile (Fig.II.7).

La figure (II.8) montre le schéma électrique de la distribution d'énergie avec l'allure du comportement du courant.

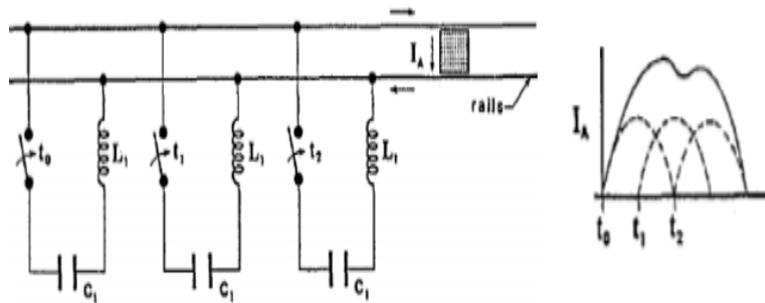


Figure II. 7-Schéma électrique de l'alimentation augmentée et distribuée.

Les avantages de ce type d'alimentation sont [2] :

- Grande vitesse de lancement,
- Réduction des pertes dues à l'échauffement des rails et les pertes par l'effet joule (la résistance effective constante),
- Utilisation d'une source d'énergie partagée (condensateurs),
- Précision de tir

L'inconvénient de ce type d'alimentation est lié à son encombrement.

II.4- Conversion électromagnétique

Le lanceur électromagnétique à rails étant un système électromagnétique constitué de conducteur baignant dans un milieu magnétique. Il est donc géré par les équations de Maxwell. Le fonctionnement de ce système résulte des interactions entre l'induction magnétique et le courant électrique.

II.4.1- Equations de maxwell

L'objectif fondamental de la discipline électromagnétique est la détermination des grandeurs électromagnétiques locales qui règnent à l'intérieur d'un système. Cette détermination s'effectue par la résolution des équations reliant l'électricité et le magnétisme associées aux lois de comportement des différents milieux du système. Le lien entre ces deux branches de la physique a été formulées, sur la base des expériences de l'époque, par le physicien écossais « James Clerk Maxwell » (1831-1879) et appelé équation de Maxwell. On se limitera aux deux équations ; celle de Maxwell-ampère et Maxwell-Thomson.

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.5})$$

$\vec{H} [A / m]$: Champ magnétique.

$\vec{D} [A.s / m]$ Et $\vec{B} [T]$: Induction électrique et magnétique.

$\vec{J} [A / m^2]$: Densités de courant de conduction.

Dans un milieu magnétique, on aura :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} [A / m]$: Perméabilité magnétique du vide.

La relation (II.4) devient :

$$\text{rot} \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.7})$$

II.4.2- Simplification de l'équation de Maxwell-Ampère

L'équation (II.4) exprime la relation entre la circulation du champ magnétique sur un contour fermée et le flux de courant à travers une surface s'appuyant sur ce contour. On distingue deux types de courants ; le courant de conduction J_C et le courant de déplacement J_D , tels que :

$$\begin{cases} \vec{J}_C = \vec{J} \\ \vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial(\epsilon_0 \vec{E})}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$\epsilon_0 = 1/\mu_0 C^2 = 10^{-9}/36\pi$ [F/m]: Permittivité électrique de vide.

\vec{E} [V/m] : Champ électrique

Le courant de conduction est donné par la loi d'Ohm suivante :

$$\|\vec{J}_C\| = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

$$\|\vec{J}_D\| = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \epsilon_0 \omega \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

Le rapport entre le courant de déplacement et le courant de conduction s'écrit :

$$\frac{\|\vec{J}_D\|}{\|\vec{J}_C\|} = \omega \frac{\epsilon_0}{\sigma} \quad (\text{II.11})$$

Pour le cuivre de conductivité $\sigma = 6.10^7$ [S.m] et de permittivité $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ [F/m] le rapport : $\sigma/\epsilon_0 = 10^{19}$ est de l'ordre de GHz, Ainsi, les fréquences utilisées dans l'électrotechnique sont largement inférieures au GHz.

De ce fait, pour $\omega \ll \sigma/\epsilon_0$, le courant de déplacement est largement négligeable devant le courant de conduction et on peut écrire :

$$\|\vec{J}_D\| \ll \|\vec{J}_C\|$$

On déduit que dans les basses fréquences on peut négliger le courant de déplacement.

Ainsi la relation (II.7) devient :

$$\text{rot } \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (\text{II.12})$$

II.4.3- Equation de Laplace

Du fait que la divergence d'un rotationnel est nulle, l'équation (II.5) permet d'identifier le champ B au rotationnel d'un autre champ de vecteur. On peut alors poser :

$$\text{div}(\text{rot } \vec{A}) = 0 \quad (\text{II.13})$$

Par identification, on trouve :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (\text{II.14})$$

\vec{A} [T.m] : le potentiel vecteur magnétique

En remplaçant la relation (II.9) dans (II.14), on trouve

$$\text{rot}(\text{rot } \vec{A}) = \mu \vec{J} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{rot}(\text{rot } \vec{A}) - \mu \vec{J} = 0 \quad (\text{II.16})$$

La relation (II.16) est l'équation magnétique de Poisson.

Dans le cas où il n'y a pas de courant électrique ($J=0$) ou dans un milieu loin des courants, le rotationnel du potentiel est nul ; c'est l'équation de Laplace, telle que :

$$\text{rot}(\text{rot } \vec{A}) = 0 \quad (\text{II.17})$$

II.4.4- Loi de Biot et Savart

La solution de l'équation de Laplace (II.17) est donnée par la loi de Biot et Savart telle que :

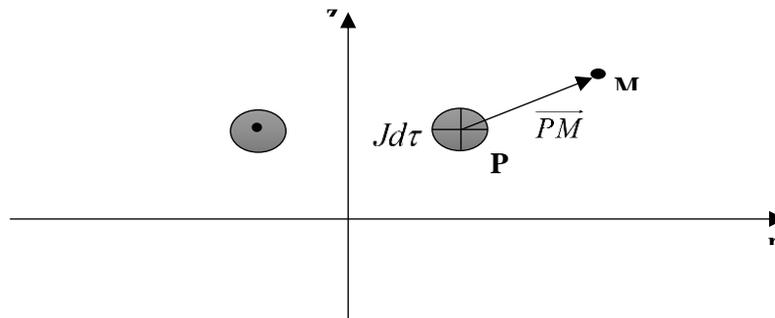


Figure II. 8- Représentation d'une spire parcourue par un courant

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{\tau} \frac{\vec{J} d\tau \times \overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|^3} \quad (\text{II.18})$$

La loi de de Biot et Savart s'applique au calcul du champ magnétique de n'importe quel type configuration.

Le système à étudier est composé de rails de longueur très grande devant la tige. Dans ce cas, on peut considérer les rails comme fil conducteur infini. De ce fait, le calcul du champ magnétique est plus simple par le théorème d'Ampère.

II.4.5- Théorème d'Ampère

Le théorème d'Ampère permet de calculer le champ magnétique créé par une distribution de courants lorsque celle-ci possède des symétries.

On applique l'intégrale de surface a la relation (II.12) :

$$\iint_S \text{rot} \vec{B} d\vec{S} = \mu_0 \iint_S \vec{J} d\vec{S} \quad (\text{II.19})$$

En utilisant la formule de Stokes :

$$\iint_S \text{rot} \vec{B} d\vec{S} = \oint_C \vec{B} d\vec{l} \quad (\text{II.20})$$

L'intensité de courant en fonction de la densité :

$$I = \iint_S \vec{J} d\vec{S} \quad (\text{II.21})$$

La relation (II.19) devient :

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu I \Rightarrow \oint_C \vec{H} d\vec{l} = I \quad (\text{II.22})$$

La circulation du champ magnétique sur une courbe C fermée est égal au produit de la perméabilité du vide par l'intensité algébrique du courant traversant une surface (orientée) s'appuyant sur le contour C. Ce courant est appelé courant enlacé.

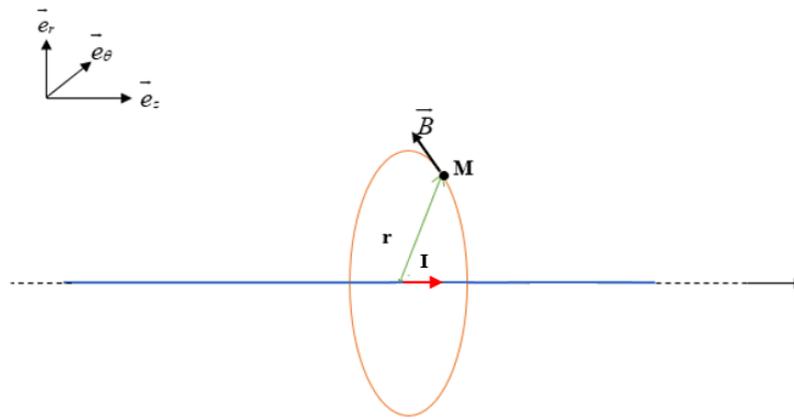


Figure II. 9- Champ généré par un fil infini

Le champ magnétique \vec{B} en tout point de M s'écrit :

$$\vec{B}(M) = \begin{cases} \vec{B}_r(r, \theta, z) \\ \vec{B}_\theta(r, \theta, z) \\ \vec{B}_z(r, \theta, z) \end{cases}$$

L'invariance par translation : on considère que la longueur des rails est très grande devant celle de la barre donc on suppose que la distribution du courant possède une invariance par translation suivant z donc B ne dépend pas de z .

La distribution de courants est invariante le long de l'axe Oz et pour toute rotation autour de \vec{e}_z donc B ne dépend pas respectivement de z et de θ .

Le plan (\vec{e}_r, \vec{e}_z) est un plan de symétrie de la distribution du courant. Sachant que le champ magnétique \vec{B} est perpendiculaire au plan de symétrie, on en déduit que B est suivant \vec{e}_θ .

$$\vec{B}(M) = B_r(r) \vec{e}_\theta \quad (\text{II.23})$$

$$d\vec{l} = dl \vec{e}_\theta$$

$$\oint_r \vec{B} d\vec{l} = \int B(r) \vec{e}_\theta dl \vec{e}_\theta = \int B(r) dl \quad (\text{II.24})$$

$$dl = r d\theta$$

D'où :

$$\int B(r) dl = B(r) r d\theta = B(r) r \int_0^{2\pi} d\theta = B(r) r \int_0^{2\pi} d\theta = 2\pi B(r) \quad (\text{II.25})$$

On aura finalement :

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta \quad (\text{II.26})$$

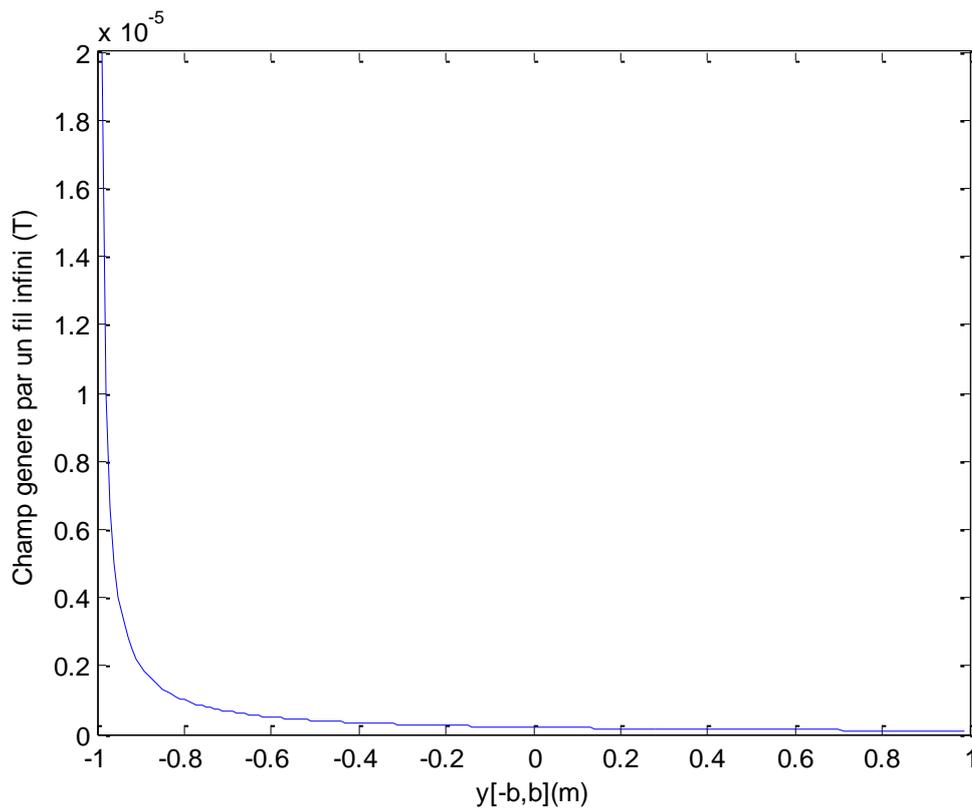


Figure II. 10- Champ magnétique génère par un fil infini

II.4.6- Force de Laplace

Puisqu'un courant électrique crée un champ magnétique et les champs magnétiques des aimants créent des forces répulsives ou attractives entre les aimants. Cette force \vec{F} est appelée force de Laplace est donnée par :

$$d\vec{f} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (\text{II.27})$$

Cette force est proportionnelle à l'intensité du courant, à la longueur du conducteur et à l'intensité du champ magnétique. Elle est orientée perpendiculairement à la direction du conducteur et au champ magnétique.

Relativement à un volume $d\tau = s dl$, on peut exprimer en utilisant la densité de courant ($j = i/s$), la densité de force volumique, telle que :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{f}}{d\tau} = \vec{J} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.28})$$

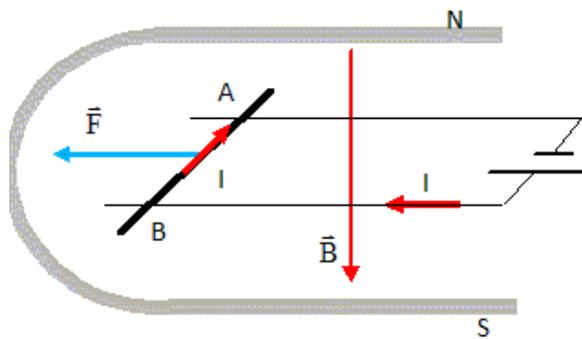


Figure II. 11- Force de Laplace

On place une tige cylindrique et conductrice sur deux rails, entre les pôles d'un aimant U.

- On fait passer un courant dans la tige : elle se déplace.
- On inverse le sens du courant : elle se déplace en sens inverse.
- On permute les pôles de l'aimant : elle se déplace en sens inverse.

Une portion de circuit électrique parcourue par un courant électrique, placé au voisinage d'un aimant convenablement orienté, est soumise à une force électromagnétique dont le sens dépend du sens du courant (d'où le principe de fonctionnement du lanceur à rail électromagnétique).

II.5- Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'alimentation du lanceur électromagnétique à rails, et les différentes lois fondamentales de l'électromagnétisme à utiliser à savoir plus particulièrement le théorème d'Ampère et son application pour un fil infini.

Chapitre III

Modélisation et applications

III- Modélisation et applications

III.1- Introduction

Afin de maximaliser la force électromagnétique sur le projectile, il faut choisir la configuration des tiges qui offre l'avantage d'augmenter cette force tout en veillant à ne pas dépasser la contrainte maximale sur les rails. Nous présentons dans ce chapitre, une étude comparative de trois configurations pour lesquelles les champs et les forces sur les barres (projectile) et sur les rails sont simulées.

III.2- Système à un couple de deux rails

Un lanceur avec deux rails et une tige entre les rails. On aura à trouver l'expression du champ magnétique créé par chacune des deux rails sur un point quelconque du repère (Ox, Oy) (Fig. III.1), et l'expression de la force de Laplace induite dans ce cas.

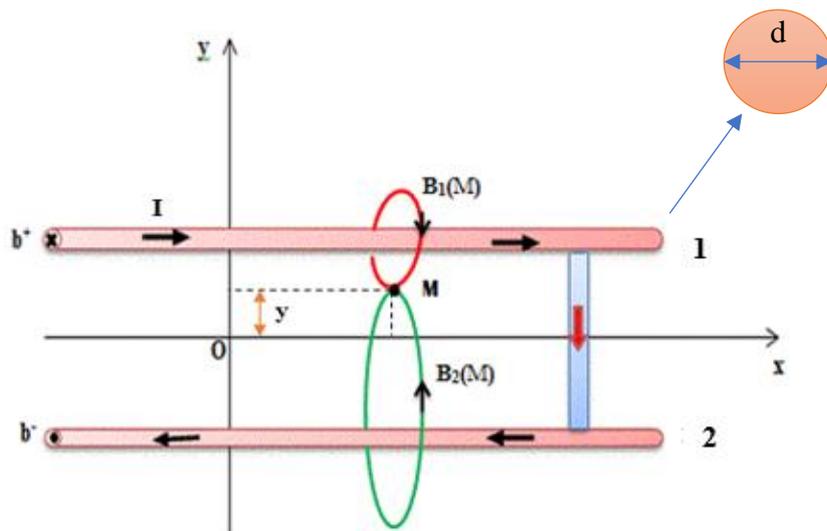


Figure III. 1- Lanceur à deux rails

III.2.1- Champs magnétiques du système à un couple de rails

On cherche à trouver le rayon r de la ligne du champ en fonction de b et y dans la zone située entre les rails.

$$\begin{cases} \text{pour } -b < y < 0 \Rightarrow r = b - y & \text{(a)} \\ \text{pour } 0 < y < b \Rightarrow r = b + y & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

Avec : b est la distance de l'origine à l'axe du rail

Ainsi le champ magnétique créée par le rail 1 et 2 au point (M) est donnée par :

$$\begin{cases} B_1(M) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{b - y} \text{ rail(1)} \\ B_2(M) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{b + y} \text{ rail(2)} \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

Le champ magnétique total B créé par les deux rails au point (M) est égal à :

$$B(M) = B_1(M) + B_2(M) = \frac{\mu_0 I}{\pi} \frac{b}{b^2 - y^2} \quad \text{(III.3)}$$

La figure (II.2) représente l'allure du champ magnétique B en fonction de y :

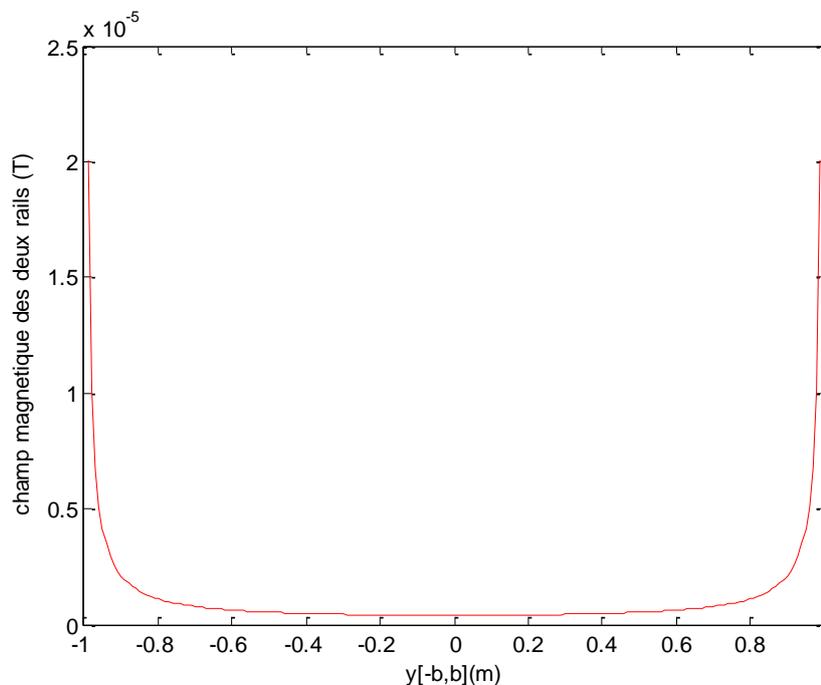


Figure III. 2- Champ magnétique génère par les deux rails

III.2.2- Force de Laplace

En un point M repéré par l'ordonnée y, la densité de force de Laplace est :

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

Discretisation uniforme :

$$\vec{F}_i(y) = \frac{\mu_0}{\pi S} I^2 \int_{-b+d/2}^{b-d/2} \frac{b}{b^2 - y^2} dy \tag{III.5}$$

Dans le calcul de la force, pour éliminer les valeurs de B qui tendent vers l'infini, on suppose que le courant circule au centre des rails et on prend en consideration le champ à partir de la peripherie des rails donc il varie de (-b+d/2) jusqu'à (b-d/2) ou d est le diametre de la sectin du rail.

$$\vec{F}_i = 2 \frac{\mu_0}{\pi S} I^2 \ln \left| \frac{2b - d / 2}{d / 2} \right| \vec{k} \tag{III.6}$$

La figure (II.3) représente la force électromagnétique induite par les rails sur le projectile.

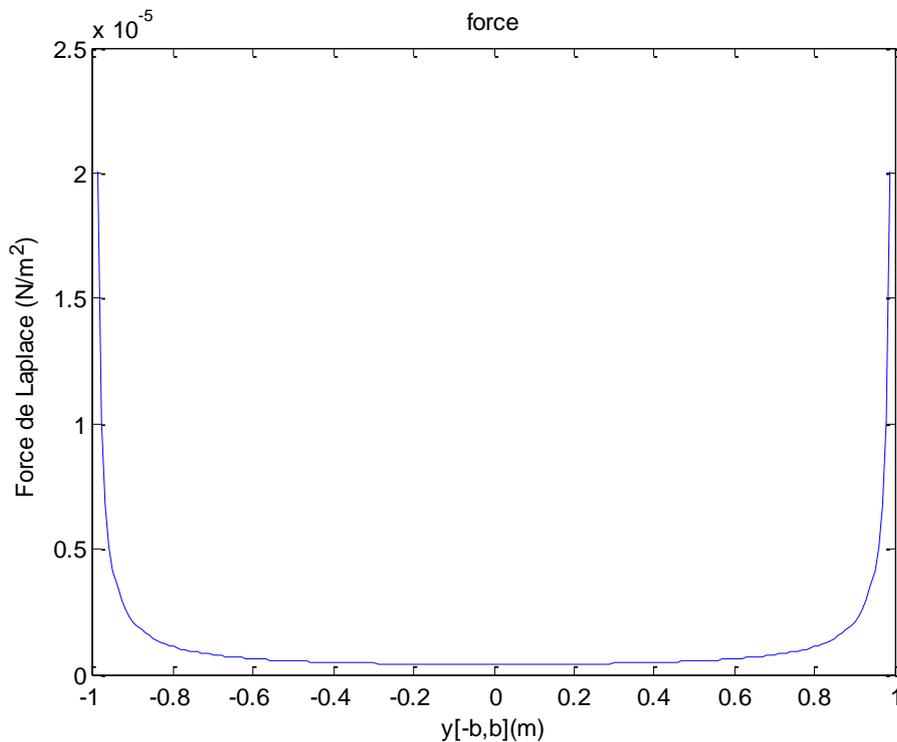


Figure III. 3- Force électromagnétique induite lors de la première configuration sur chacune des tiges

Dans la figure ci-dessus on constate que la force électromagnétique suit la courbe du champ magnétique et que la force se concentre sur les rails pour les mêmes valeurs du courant et de la longueur de b .

III.3- Système à deux couples de rails

Pour la deuxième configuration, on a proposé deux tiges perpendiculaires qui sont liées à un projectile qui se situe au point d'intersection des deux tiges comme le montre la figure (III.4) et on observe leurs effets mutuels.

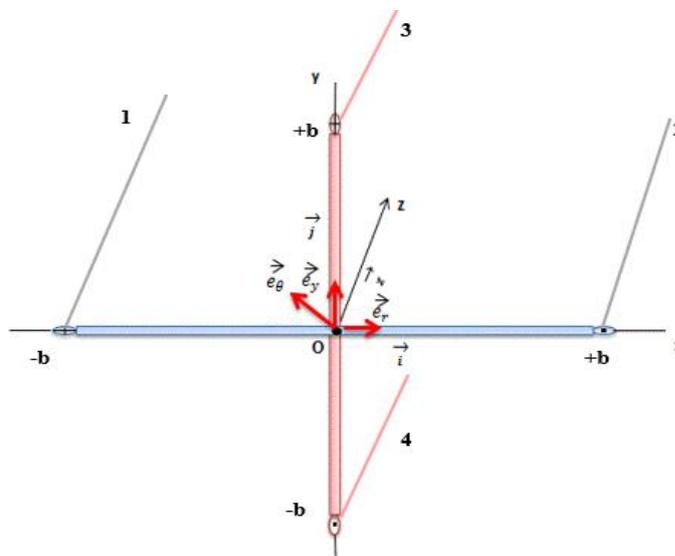


Figure III. 4- Configuration avec deux tiges perpendiculaires

III.3.1- Champs magnétiques du système à deux couples de rails

On exploite l'expression du champ donnée par la relation (II.26). On suppose que le champ est créé au centre du repère avec les données suivantes :

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \vec{e}_\theta = -\sin \theta \vec{i} + \cos \theta \vec{j} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{cases} \cos \theta = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \sin \theta = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

La relation (II.26) devient :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-y}{x^2 + y^2} \vec{i} + \frac{x}{x^2 + y^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.9})$$

En faisant un changement de repère vers les positions réelles des rails, les expressions du champ magnétique créer par chacun des rails sont :

$$B_1^{R1} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta = \frac{-\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-y}{(b+x)^2 + y^2} \vec{i} + \frac{b+x}{(b+x)^2 + y^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.10})$$

$$B_1^{R2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-y}{(x-b)^2 + y^2} \vec{i} + \frac{x-b}{(x-b)^2 + y^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.11})$$

$$B_2^{R1} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta = \frac{-\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{b-y}{(b-y)^2 + x^2} \vec{i} + \frac{x}{(b-y)^2 + x^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.12})$$

$$B_2^{R2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-(b+y)}{(b+y)^2 + x^2} \vec{i} + \frac{x}{(b+y)^2 + x^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.13})$$

L'expression de la force créer par le couple 1 sur la tige 2 est :

$$\vec{F}_{12} = I d\vec{l} \wedge \vec{B} = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & -dy & 0 \\ B_{1x} & B_{1y} & 0 \end{pmatrix} = Idy B_{1x} \vec{k} \quad (\text{III.14})$$

La composante du champ magnétique qui intervient dans la force est la composante selon x.

Or :

$$B_{1x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{y}{(b+x)^2 + y^2} \vec{i} - \frac{y}{(b-x)^2 + y^2} \vec{i} \right] \quad (\text{III.15})$$

Pour x=0, on obtient :

$$B_{1x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{y}{b^2 + y^2} \vec{i} - \frac{y}{b^2 + y^2} \vec{i} \right] = 0 \quad (\text{III.16})$$

On déduit que la composante B_{1x} est nul donc le couple 1 n'a aucun effet sur la tige 2.

L'expression de la force créée par le couple 2 sur la tige 1 est :

$$\vec{F}_{21} = I d\vec{l} \wedge \vec{B} = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ dx & 0 & 0 \\ B_{2x} & B_{2y} & 0 \end{pmatrix} = Idx B_{2y} \vec{k} \quad (\text{III.17})$$

La composante du champ magnétique qui intervient dans la force est la composante selon y.

$$B_{2y} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-x}{(b-y)^2 + x^2} \vec{j} + \frac{x}{(b+y)^2 + x^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.18})$$

Pour $y=0$, on obtient :

$$B_{2y} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-x}{b^2 + x^2} \vec{j} + \frac{x}{b^2 + x^2} \vec{j} \right] = 0 \quad (\text{III.19})$$

On conclue qu'il n'y a pas d'influence entre les deux couples des tiges 1 et 2.

III.4- Système à quatre couples de rails

III.4.1- Géométrie du système

Pour la troisième configuration, on a mis deux autres tiges décalées d'un angle de 45° des deux tiges perpendiculaires de la deuxième configuration (Figure III.8) et on va étudier l'influence des deux couples 3 et 4 sur les tiges 1 et 2.

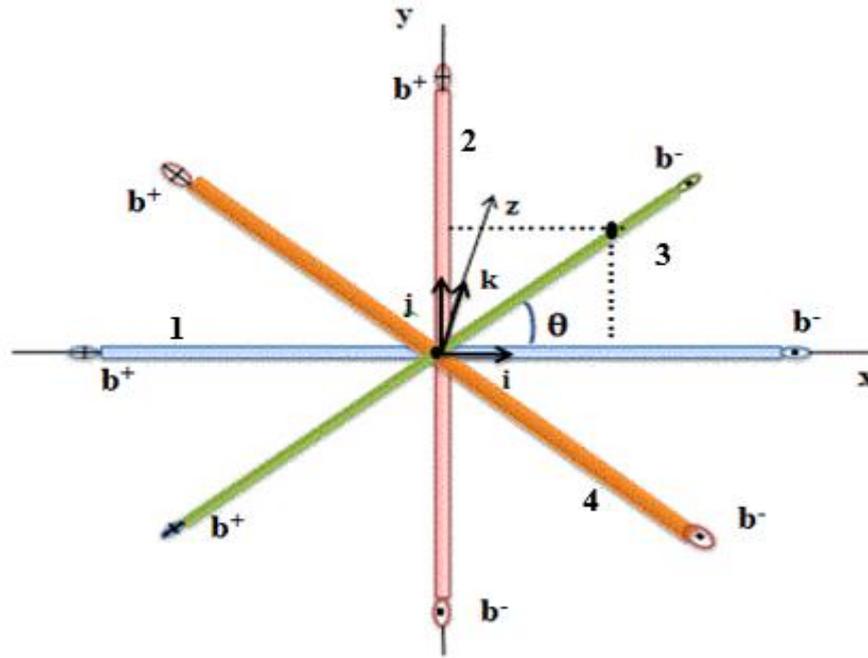


Figure III. 5- Configuration avec ajout de deux tiges décalées d'un angle 45°

III.4.2- Champs magnétiques du système a quatre couples de rails

En s'appuyant sur l'expression du champ magnétique crée par un rail central de courant sortant et en procédant à un changement de repère adéquat, on obtient les expressions des champs crée par les couples 3 et 4 :

$$B_3^{R1} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-(y - \frac{b}{\sqrt{2}})}{(x - \frac{b}{\sqrt{2}})^2 + (y - \frac{b}{\sqrt{2}})^2} \vec{i} + \frac{(x - \frac{b}{\sqrt{2}})}{(x - \frac{b}{\sqrt{2}})^2 + (y - \frac{b}{\sqrt{2}})^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.20})$$

$$B_3^{R2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta = \frac{-\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-(y + \frac{b}{\sqrt{2}})}{(x + \frac{b}{\sqrt{2}})^2 + (y + \frac{b}{\sqrt{2}})^2} \vec{i} + \frac{(x + \frac{b}{\sqrt{2}})}{(x + \frac{b}{\sqrt{2}})^2 + (y + \frac{b}{\sqrt{2}})^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.21})$$

$$B_4^{R1} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta = \frac{-\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-(y - \frac{b}{\sqrt{2}})}{(x + \frac{b}{\sqrt{2}})^2 + (y - \frac{b}{\sqrt{2}})^2} \vec{i} + \frac{(x + \frac{b}{\sqrt{2}})}{(x + \frac{b}{\sqrt{2}})^2 + (y - \frac{b}{\sqrt{2}})^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.22})$$

$$B_4^{R2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{-(y + \frac{b}{\sqrt{2}})}{(x - \frac{b}{\sqrt{2}})^2 + (y + \frac{b}{\sqrt{2}})^2} \vec{i} + \frac{(x - \frac{b}{\sqrt{2}})}{(x - \frac{b}{\sqrt{2}})^2 + (y + \frac{b}{\sqrt{2}})^2} \vec{j} \right] \quad (\text{III.23})$$

III.4.3- Influence du couple 3 sur la tige 1 :

D'après la relation (III.14) la composante du champ qui est impliqué dans la force agissant sur la tige 1 est toujours la composante selon y donc on s'intéresse qu'à B_{3y} et B_{4y} :

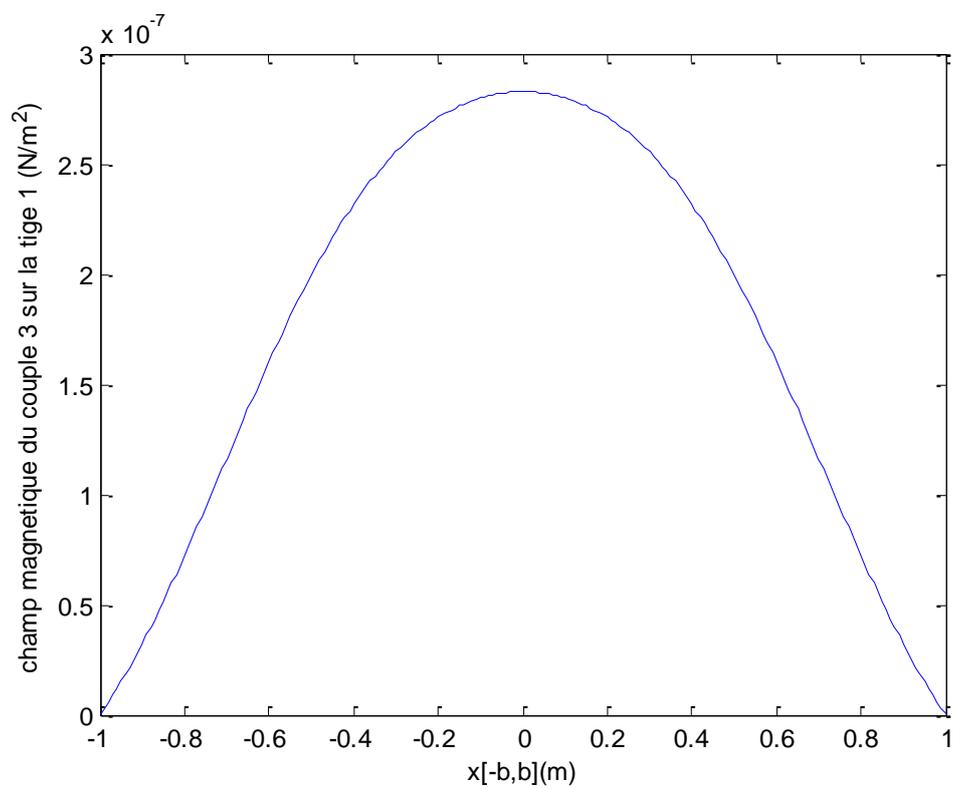


Figure III. 6- Champ créer par le couple 3 sur la tige 1

III.4.4- Influence du couple 4 sur la tige 1

Voir figure (III.7) :

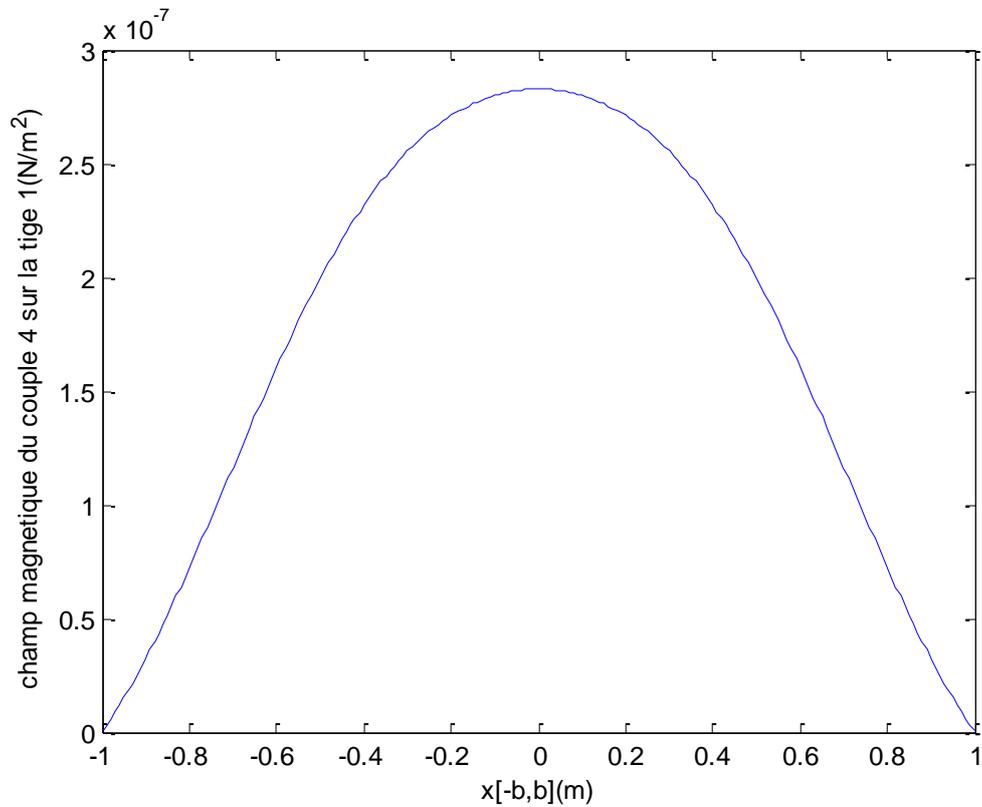


Figure III. 7- Champ créé par le couple 4 sur la tige 1

On remarque que les deux champs magnétiques créés dans ce cas par les deux couples 3 et 4 sur la tige 1 s'assomment.

D'après (III.11) la composante du champ qui est impliquée dans la force agissant sur la tige 2 est toujours la composante selon x donc on s'intéresse qu'à B_{3x} et B_{4x} :

III.4.5- Influence du couple 3 sur la tige 2

Voir figure (III.8) :

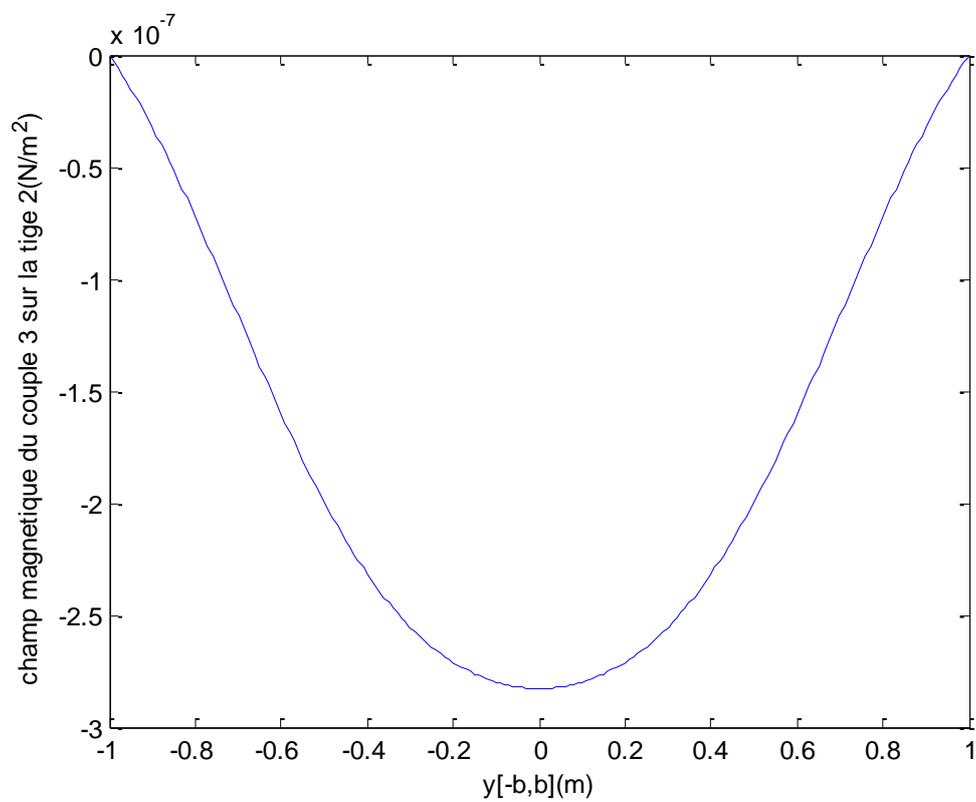


Figure III. 8- Champ créé par le couple 3 sur la tige 2

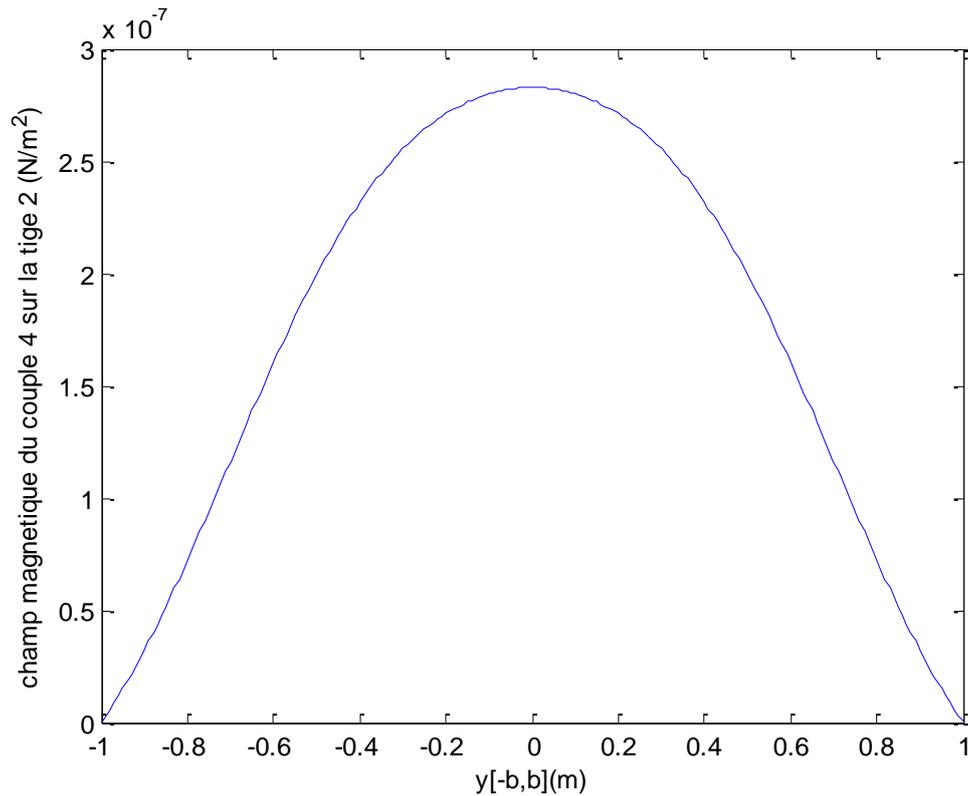


Figure III. 9- Champ créée par le couple 4 sur la tige 2

Les deux figures (III.8) et (III.9) représente le champ magnétique des deux couples 3 et 4 sur la tige 2. On remarque que la résultante des deux champs est nulle ; il s'agit d'un effet compensatoire.

III.5- Conclusion

Ce chapitre concerne la modélisation et l'application du système de lanceur a rail électromagnétique dont nous avons décrit le développement mathématique pour les différentes applications.

Conclusion générale

Ce travail représente une contribution à la modélisation et application du système de lanceur à rails électromagnétiques. Nous nous sommes intéressés principalement au développement des grandeurs qui régissent le système dont le courant électrique et le champ magnétique.

La force de propulsion produite par l'interaction entre le courant circulant dans projectile-rails et l'induction magnétique créée par ce même courant permet de lancer un projectile à grandes vitesses.

Pour un système à un couple de rails, on a trouvé que la force de la place se concentre à proximité des rails et plus en plus en s'éloigne des rails elle diminue.

Pour un système à deux couples de rails perpendiculaire, on a démontré que l'influence mutuel entre les deux couples est nulle.

Pour un système à quatre couples de rails décalés de 45 degrés, on a montré que l'influence se somment d'un côté et se compensent de l'autre côté.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. GALLANT, « le lanceur électromagnétique à rails augmente : modélisation et validation expérimental », thèse de doctorat, université de Franche-Comté, 2004.
- [2] M.DJEGHAM, W. MAAROUF, « Contribution à l'étude d'un propulseur électromagnétique », mémoire d'ingénieur, université de M'SILA, 2009.
- [3] O. BOUHADJA, S. BOUGHIDA, E. ZAIDI, « Contribution à l'étude d'un propulseur électromagnétique », mémoire d'ingénieur, université de M'SILA, 2007.
- [4] P. FAROUX J, J. RENAULT, « Electromagnétisme ». Paris: Dunod, 1998, 445 p.
- [5] H. FAIR, «Electric launch: an inevitable technology », 18th International Symposium on Ballistics, 1999, p. 318-333.
- [6] WikiHow, (2019, 17 janvier), « Comment fabriquer de la poudre à canon », <https://fr.wikihow.com/fabriquer-de-la-poudre-%C3%A0-canon>.
- [7] Mieke Ineke Rik Coffo, « Contribution à la modélisation, à l'optimisation et à l'étude expérimentale d'un lanceur à rails augmenté et du projectile », Université de Franche-Comté ; École Royale Militaire (Bruxelles), 2011.
- [8] ISL, « ISL – Accélération électromagnétique », www.isl.eu, Consulté 17 septembre 2020, à l'adresse <https://www.isl.eu/42-recherches/laser-and-electromagnetic-technologies/492-acceleration-electromagnetique>.
- [9] Coffo. M. I. R, (2020, 19 septembre), « Contribution à la modélisation, à l'optimisation et à l'étude expérimentale d'un lanceur à rails augmenté et du projectile », CORE, <https://core.ac.uk/display/40120266>.
- [10] J. KOTAS, C. GUDERJAHN, F. LITTMAN, «parametric evaluation of railgun augmentation», IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 22, 1986, p. 1573-1577.

- [11] J. PARKER, « Muzzle shunt augmentation of conventional railguns», IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, 1991, p. 80-84.
- [12] A. MARSHALL, «Railgunnery: where have we been? Where are we going? », IEEE Transactions on Magnetics, 2001, Vol. 37, p. 440-444.
- [13] H. GROSCH, «All electric combat vehicle (AECV) E Vision and reality», Military Technology, 1999, Vol. 9, p. 37-47.
- [14] P. LEHMANN, E. SPAHN, «The pulse power generation for weapon systems», Groupe de travail OTAN AVT 047 & 098, 2003.
- [15] R. OGORKIEWICZ, «In search of lighter, smaller electric guns for future tanks», Jane's International Defense Review, 1999, Vol. 2, p. 26-31.