

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIORAT**

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE**

ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UN
PROPULSEUR
ELECTROMAGNETIQUE**

Proposé et dirigé par:

Monsieur :TORKI Zohir

Présenté par :

DJEGHAM MOHAMED

MAAROUF WALID

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2008/2009

Remerciements

*Tout d'abord nous remercions le bon Dieu tout puissant de
La bonne santé, de la volonté et de la patience qu'il nous a
accordées tout au long de nos études.*

*Nous tenons en premier lieu à remercier cordialement,
notre cher encadreur M.r TORKI Zohir.*

*Les mêmes expressions de reconnaissance vont également
au chef de département M.Benjaïma Bachir pour les
facilités qu'il les a mis à notre disposition. Ainsi que tous
les enseignants.*

Dédicace

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A :

Mes chers parents

Mes soeurs et mes frères

Toute ma famille

Tous mes amis

Et surtout Mon Exit

*Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou
de loin pour être un jour un ingénieur d'état en
électromécanique.*

MAAROUF WALID

DEDICACE

Je dedie ce memoire :

A mes parents avec toute ma gratitude pour

*Tous ces annees de sacrifices et de
d'encouragement.*

*A tous mes profs qu'il m'ont appris durant toutes
mes annees d'etude a mes freres.*

*A tous mes amies que je ne vais pas nommer car ils
sont nombreux et je ne sais pas qui choisir.*

A tous mes collegues sans exception

A toutes les promos 2009 surtout electromecanique.

Et Surtout blizak.

Djegham Mohamed

SOMMAIRE

Sommaire

Sommaire	i
Liste des symboles et abréviations	vi
Table des figures	x
Introduction Générale	1

CHAPITRE -I-

LES PROPULSEURS ELECTROMAGNETIQUES

I.1. Introduction	3
I.2. les propulseurs électriques	3
I.2.1. Le propulseur réluctant	3
I.2.1.1 Principe de fonctionnement	3
I.2.1.2. Alimentation du propulseur réluctant	4
I.2.2. propulseur à induction	4
I.2.2.1. Le principe de fonctionnement	4
I.2.2.2.Types d'alimentation du propulseur inductif	6
I.2.2.2.1.Alimentation par générateurs des tensions sinusoïdales	6
I.2.2.2.2.Alimentation par bancs de condensateurs	6
I.3. propulseur à rail	8
I.4. L'MHD	9
I.5. propulseur à poudre	10
I.6.Les lois de magnetisme	11
I.6.1.Loi de Lenz : phénomène d'induction	11
I.6.2. Loi de Lenz- Faraday	12
I.6.3.Loi quantitative de Lenz faraday	13
I.7.Théorème d'Ampère	13
I.7.1.Intensité enlacée	14
I.8.L'Électromagnétisme	15
I.8.1.Les grandeurs du magnétisme	15
I.9.L'interaction « courant / excitation »	18
I.10.Classification des matériaux magnétiques	20
I.10.1.Les matériaux ferromagnétiques	21

Sommaire

I.11.Utilisation des matériaux magnétiques.....	22
I.11.1.Canalisation des lignes de champ.....	22
I.11.2.Utilisation des matériaux magnétiques	24
I.11.2.1 Production d'induction magnétique.....	24
I.11.2.2.Notions importantes à retenir à partir des observations précédent.....	25
I.12.Lignes de champ d'un solénoïde	25
I.12.1.Champ magnétique au milieu d'un solénoïde	25
I.13.CONCLUSION.....	26

CHAPITRE -II-

ANALYSE DU PROPULSEUR À RAIL

II.1. Introduction.....	27
II.2. Le principe de fonctionnement	27
II.3. Architecture du système.	28
II.4. Technique de Choix des matériaux.....	29
II.5. Rendement de la propulsion	29
II.6. Le générateur d'alimentation.....	30
II.6.1. Utilisation du propulseur à rails.....	30
II .6.1.1.Des applications de propulseur à rail	30
II.7.Etat de recherche autour le propulseur à rails.	31
II.8.Structure de l'alimentation d'un propulseur à rail.....	32
II.8.1.Alimentation simple	32
II.8.1.1.phase (1)	32
II.8.1.2.phase (2)	33
II.8.1.3.Décharge simple	33
II.8.1.3.1.Simple courant.....	33
II.8.1.3.2. Multiple courant.....	33
II.8.1.4. Décharges augmentées	34
II.8.2. Alimentation par décharge successive	34
II.8.3. Alimentation distribuée le long de rail.....	34
II.9. Description du propulseur à rail	36
II.9.1. Le tube de lancement.....	36
II.9.2.Le bâti	36
II.10. Les rails.....	37

Sommaire

II.11.Le projectile	37
II.12.Conclusion	39

CHAPITRE –III-

METHODES DE CALCUL DE LA FORCE

III.1. INTRODUCTION.....	40
III.2.Les équations électromagnétiques.....	40
III.2.1.Les équations de Maxwell.....	40
III.2.2.Modèle magnétodynamique.....	41
III.3.Méthode de calcul des forces magnétiques.....	42
III.3.1.Méthode de variation de la coénergie et de l'énergie magnétique.....	43
III.3.2.Méthode du tenseur de Maxwell.....	43
III.3.3.Méthode des travaux virtuels.....	46
III.4.Conclusion	47

CHAPITRE -IV-

ETUDE ELECTRIQUE DU PROPULSEUR A RAIL

IV.1.INTRODUCTION	48
IV.2.Analyse le circuit d'alimentation.....	48
IV.2.1.Cas de chargement	48
IV.2.2. Cas de déchargement	49
IV.3.L'allure des grandeurs électriques et mécaniques.....	50
IV.3.1.partie électrique	50
IV.3.2.partie mécanique.....	52
-Caractéristique d'alimentation	54
-Caractéristique de propulseur	54
IV.4.Interprétation.....	58
IV.5.Conclusion.....	59

Sommaire

CHAPITRE -V-

ETUDE NUMERIQUE

(APPLICATION ET RESULTA DE SIMULATION)

V.1.Introduction	60
V.2. Equations electromagnetiques du systeme	60
V.3. Discretisation par éléments finis.....	61
V.3.1 .formulation variationnelle.....	62
V.3.2. Méthodes des residus ponderes.....	62
V.3.3. Conditions aux limites.....	63
V.4. Aperçu sur l'architecture du logiciel.....	64
V.5.Propulseur a rail en forme carree.....	65
V.5.1. Presentation du prototype.....	65
V.5.2 .Caracteristiques du prototype	66
A) Caracteristiques geometriques.....	66
B) Caracteristiques physiques.....	67
V.5.3. Repartition de l'induction magnétique b dans le propulseur.....	67
V.5.4. Repartition de la densite de courant dans le propulseur.....	70
V.5.5. Repartition de la force de propulsion sur le projectile.....	71
V.5.6. Conclusion.....	72
V.6.Propulseur a rail de forme ronde.....	72
V.6.1. Presentation du prototype.....	72
V.6.2. Caracteristiques du prototype	73
A) Caracteristiques géométriques.....	73
B) Caracteristiques physiques.....	73
V.6.3. Repartition de l'induction B dans le propulseur.....	74
V.6.4 .Repartition de la densite de courant dans le propulseur.....	75
V.6.4.1 .Repartition de la densite de courant dans les rails.....	75
V.6.4.2 .Repartition de la densite de courant dans le projectile.....	77
V.6.5. La repartition de la force.....	78
V.6.6. Conclusion.....	79

Sommaire

V.7. Propulseur à rail en forme carree à double injections	79
V.7.1. Presentation du prototype a doubles ponts.....	79
V.7.2. Caracteristiques du prototype.....	80
A) Caracteristiques geometriques.....	80
B) Caracteristiques physiques	81
V.7.3. Prototype a ponts en cuivre.....	81
V.7.3.1.Repartition de l'induction B_y dans le propulseur.....	81
V.7.3.2. La diffusion du courant dans le projectile.....	83
V.7.3.3. Repartition de la force dans le prototype.....	85
V.7.4. Prototype a ponts en titane	85
V.7.4.1. Repartition de l'induction B_y dans le propulseur.....	85
V.7.4.2. La diffusion du courant dans le projectile.....	87
V.7.4.3. Repartition de la force dans les ponts.....	88
V.7.5 .Conclusion	89
 CONCLUSION GENERALE.....	 90
ANNEXE	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Liste des symboles et abréviations

- $\vec{A}$: Vecteur potentiel magnétique
- A_i : Inconnue au noeud i du domaine
- a : L'accélération du projectile [m/s^2]
- $\vec{B}$: Vecteur d'induction magnétique
- B_y : Composante du champ d'induction suivant l'axe y
- C : Capacité
- c : Centre de la bobine
- dl : Élément de longueur
- $\vec{E}$: Vecteur du champ électrique [V/m]
- E : Force électromotrice de Lenz
- e : Largeur de rail
- F : Force de Laplace
- F : Force appliquée sur le projectile
- F_R : Force appliquée sur le rail à travers le projectile
- F_z : Force globale produite par le solénoïde suivant l'axe z
- f : Fréquence de la source
- $\vec{H}$: Vecteur du champ magnétique [A/m]
- I_B : Courant circule dans la bobine [A]
- I_p : Courant dans le projectile [A]
- I_C : Courant de décharge [A]
- $\vec{J}$: Vecteur de la densité du courant [A/m^2]
- L_2 : Inductance du câble de connexion [H]
- L_p : Inductance du projectile [H]
- L_1 : Gradient d'inductance par unité du rail [H/m]
- l : Distance entre les rails
- l : Longueur de rail
- L_{pd} : Longueur du projectile à double pont d'injection (mm)
- L_{pi} : Longueur du pont d'injection (mm)

Liste des symboles et abréviations

L_{Br}	: Longueur du bâti rond (mm)
L_{Rr}	: Longueur du bâti rond (mm)
L_{Pr}	: Longueur du projectile rond (mm)
L_{Rd}	: Longueur du rail pour le projectile à doubles ponts (mm)
L_{Bd}	: Longueur du bâti pour le projectile à doubles ponts (mm)
L_{Bc}	: Longueur du bâti carré (mm)
L_{Rc}	: Longueur du rail de forme carrée (mm)
M_{BP}	: Inductance mutuelle entre la bobine d'excitation et le projectile [H]
m	: Masse du projectile [kg]
N	: Nombre de bobines.
N_n	: Nombre de nœuds
N_e	: Nombre d'éléments
P	: Largeur de rail.
$P_{1,2}$	: Premier et deuxième pont d'injection
P_{ic}	: Position du projectile carré dans le type du lancement (mm)
P_i	: Position initial du projectile à doubles ponts dans le tube de lancement (mm)
P_{ir}	: Position initiale du projectile de forme ronde dans le tube de lancement (mm)
R_p	: Résistance du projectile (Ω)
R	: Résistance (Ω)
R_2	: résistance du câble de connexion (Ω)
R_p	: Résistance du projectile (Ω)
Re_m	: Nombre de Reynolds magnétique
R_{Pr}	: Rayon du projectile rond (mm)
R_{Rr}	: Rayon du rail rond (mm)
R_{Br}	: Rayon du bâti rond (mm)
S	: Section du barreau
S_R	: Section du rail ($(mm)^2$)
$T_{1,2}$	: Interrupteurs d'alimentation
$\vec{T}_1$	: Composantes du tenseur de Maxwell
t	: Temps (S)
$V_{A,B,C}$	: Tensions des phases A, B, C
V_m	: Tension maximale

V_L : Tension inductive

v : Vitesse du projectile (m/s)

W : Energie électromagnétique

x_{Bc} : Distance du bâti carré suivant l'axe x (mm)

x_{Rc} : Distance du rail carré (mm)

x_{Pc} : Distance du projectile carré suivant l'axe x (mm)

x_{Pd} : Distance du projectile à double ponts suivant l'axe x (mm)

x_{Rd} : Distance du projectile à double ponts suivant l'axe y (mm)

y_{Bc} : Distance du bâti carré suivant l'axe y (mm)

y_{Pc} : Distance du projectile carré suivant l'axe y (mm)

y_{Rc} : Distance du rail carré suivant l'axe y (mm)

y_{Pd} : Distance du projectile à doubles ponts suivant l'axe y (mm)

y_{Rd} : Distance du rail pour le projectile doubles ponts suivant l'axe y (mm)

δ : Epaisseur de peau

δ_{ro} : Profondeur de peau dans les rails à vitesse nulle du projectile

δ_p : Profondeur de peau dans le projectile

δ_z : Longueur de la portion de rail derrière le projectile

μ : Perméabilité de matériau des rails [H/m]

μ_r : Perméabilité relative du milieu considéré

μ_0 : Perméabilité du vide

Ω : Domaine de résolution.

ω : Pulsation du réseau

φ : Angle de déphasage initiale

ρ_0 : Résistivité initiale de cuivre

β : Coefficient de la dépendance de la résistivité à la température

σ : Conductivité électrique [S/m]

ρ : Résistivité

Θ : L'ouverture du rail

ν : Réductivité magnétique [m/H]

$\vec{\sigma E}$: Densité de courant induit dû au champ électrique E [A/m²]

Liste des symboles et abréviations

$\sigma(\vec{u} \wedge \vec{B})$: Densité de courant induit dû au mouvement [A/m²]

$\vec{\partial D} / \partial t$: Densité du courant de déplacement négligeable à basse fréquence [A/m²]

R_r : Résistance du projectile(Ω)

R_x : Résistance variable du rail(Ω)

R_0 : Résistance de la charge (Ω)

L_0 : Inductance de la charge [H]

L_r : Inductance du projectile [H]

L_x : Inductance variable du rail [H]

X : la distance [mm]

T : commande de circuit

TABLE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure. I.1 : Schéma de principe de fonctionnement du propulseur réactant.....	3
Figure .I.2 : Principe d'alimentation de propulseur réactant.....	4
Figure. I.3 : Représentation de principe de fonctionnement de propulseur inductif.....	5
Figure. I.4 : Schéma représentatif de l'alimentation du propulseur inductif par générations des tensions sinusoïdales à six bobines.....	6
Figure. I.5 : Schéma électrique équivalent du circuit de décharge d'un condensateur dans une bobine.....	7
Figure. I.6 : Phénomène de résonance électrique dans le circuit.....	7
Figure I.7 : Schéma de mode d'alimentation par bancs de condensateurs.....	8
Figure. I.8: Représentation schématisée de propulseur à rails.....	8
Figure. I.9 : Système MHD.....	10
Figure I.10 : principe d'une fusée à carburant solide (booster)	10
Figure. I.11:schéma de mouvement de l'aimant d'une bobine.....	11
Figure. I.12:sens de circulation dans le courant.....	12
Figure. I.13:Schéma de générateur équivalent FEM.....	13
Figure. I.14:sens de courant I et de champ $\vec{B}$	13
Figure. I.15: Un aimant permanent.....	15
Figure. I.16: Un aimant avec bobine.....	15
Figure. I.17:sens de champ et induction magnétique $\vec{B}$	16
Figure. I.18:sens de champ $\vec{H}_M$ et induction magnétique $\vec{B}_M$ et courant d'induit $\vec{J}_M$	16
Figure. I.19: le champ magnétique n'est pas forcément colinéaire à celui du point M.	17
Figure. I.20: lignes de champ.....	17
Figure. I.21:règle de la main droite.....	18
Figure. I.22:le champ magnétique s'enroule sur des cercles concentriques.....	19
Figure .I.23: le champ magnétique intérieur est parallèle à l'axe de l'enroulement.....	19
Figure. I.24:le champ magnétique s'enroule sur des cercles concentriques.....	20
Figure .I.25: le champ magnétique intérieur est parallèle à l'axe de l'enroulement.....	20

Figure I.26: circulation le courant I dans la matériaux ferromagnétique.....	21
Figure I.27: schéma de domaines dont l'aimentation.....	21
Figure I.28: schéma représente la domaines de confondus en un seul.....	22
Figure I.29: la circulation le courant I dans la bobine.....	22
Figure. I.30 : allure l'induction magnétique $\vec{B}$ dans la bobine.....	23
Figure. I.31 : allure l'induction magnétique $\vec{B}$ dans un barreau de fer dans la bobine.....	23
Figure. I.32 : allure l'induction magnétique $\vec{B}$ dans un barreau de fer sur la forme « U ».....	24
Figure. I.33: le sens de rotation du courant.....	25
Figure .I.34: champ produit par ce solénoïde que celui-ci. Sera plus intense.....	25

CHAPITRE II

Figure .II.1 : schéma de principe d'une propulseur à rail	27
Figure .II.2. Schéma représenté le propulseur avec son alimentation	28
Figure. II.3: Pénétration de projectile dans une cible plaque en acier	31
Figure. II.4 : Principe de l'alimentation de lanceur à rail	32
Figure II.5 : le courant en fonction temps	32
Figure. II.6 : Phase d'amorçage d'interrupteur T2 (à $t = t_1$)	33
Figure : II.7 :le courant en fonction temps	33
Figure. II.8: Décharge de multiple courant	34
Figure. II.9 : Alimentation par décharges successives	34
Figure. II.10 : Distribution d'énergie le long de rail	35
Figure. II.11 : Schéma électrique de l'alimentation augmentée et distribuée	35
Figure. II.12: Ensemble du tube de lancement du lanceur à rails	36
Figure .II.13: Types de lanceurs à rail : a) lanceur de forme carré, b) lanceur d'une forme ronde ...	36
Figure. II.14 : Forces dans un projectile en forme de U	38
Figure. II.15 : a) Projectile carré, b) Projectile de forme U en aluminium	38
Figure. II.16 : Projectile du lanceur de forme ronde	39

CHAPITRE III

Figure .III.1 : Courbe d'aimantation	43
Figure.III.2 : Principe de la loi de Laplace	44

CHAPITRE IV

Figure .IV. 1 : Circuit électrique d'alimentation de propulseur	48
Figure .IV. 2 : Circuit électrique active avec " K "=1, chargement de L_0	48
Figure. IV. 3 : Circuit électrique active " k " = 0 déchargement L_0	49
Figure .IV.4 : Représentation le terme résistive (V_R).....	50
Figure .IV.5 : Représentation le terme inductives (V_L).....	51
Figure .IV.6 : Représentation inductive (V_{LX}) (rail).....	51
Figure. IV.7 : circuit inductive.....	52
Figure. IV.8 : Position initiale du projectile	53
Figure .IV.9 : Modèle de l'équation mécanique	53
Figure. IV. 10 : Représentation un modèle du système	54
Figure. IV.11 : Le courant en fonction de temps.....	55
Figure. IV.12 : la force en fonction de temps	55
Figure. IV.13 : la vitesse en fonction de temps.....	56
Figure. IV .14 : Le déplacement en fonction de temps.....	56
Figure .IV.15 : l'accélération en fonction de déplacement.....	57
Figure. IV.16 : la vitesse en fonction de déplacement.....	57

CHAPITRE V

Figure. V.1.Les conditions aux limites sur le modèle.	63
Figure .V.2 : Organigramme de la résolution	64
Figure .V.3 : Prototype de lanceur de forme carrée	65
Figure .V.4 : Vue de prototype suivant l'axe z (coupe (AA)	66
Figure. V.5 : Vue de prototype suivant l'axe x (coupe (BB)	66
Figure. V.6 : Modèle simulé suivant le plan (x, y)	68
Figure .V.7 : Présentation du maillage.....	68
Figure. V.8 : Les iso valeurs de l'induction B_y dans le projectile.....	68
Figure .V.9 : La variation de (B_y) suivant l'axe x dans le projectile.....	69
Figure. V.10: Variation de (J_z) le long du projectile suivant l'axe z.	70
Figure .V.11 : Présentation des différents paramètres responsables de la force.	71
Figure V.12 : La force en fonction de z dans le projectile.....	71
Figure .V.13 : Prototype de lanceur de forme carré	72
Figure. V.14 : Vue de prototype suivant l'axe z (coupe (A'A')	73

Figure .V.15 : Vue de prototype suivant l'axe x (coupe (B'B'))	73
Figure .V.16 : Modèle simulé suivant le plan (x, y)	74
Figure. V.17 : Les iso valeurs de l'induction (By) dans le modèle.....	74
Figure. V.18 : Variation de (By) suivant l'axe x dans le projectile	75
Figure. V.19 : Variation de la densité du courant (Jz) suivant l'axe x du rail de forme carrée.....	76
Figure .V.20 : Variation de la densité du courant (Jz) suivant l'axe x de rail de forme ronde.....	76
Figure. V.21: Variation de la densité du courant (Jz) suivant l'axe z dans le projectile rond.....	77
Figure .V.22 : Définition de la force appliquée sur un projectile rond.....	78
Figure .V.23 : Répartition de la force appliquée sur le projectile rond.....	78
Figure .V.24 : Présentation du lanceur à rail de forme carrée avec un projectile équipé de deux ponts d'injection.....	79
Figure. V.25 : Vue de prototype suivant l'axe z (coupes (A''A'))	80
Figure. V.26 : Vue de prototype suivant l'axe x (coupes (B''B'))	80
Figure .V.27 : Schéma du lanceur avec projectile équipé de deux ponts.....	81
Figure. V.28 : Schéma représentatif du maillage en 3D.....	82
Figure. V.29 : Les iso valeurs de l'induction By (T) à 4 plans coupant le modèle suivant l'axe z.....	82
Figure. V.30 : Variation d'induction By suivant l'axe x dans les deux ponts.....	83
Figure. V.31 : les iso valeurs de la densité du courant dans le rail par A /m2.....	83
Figure .V.32 : Diffusion du courant suivant l'axe z dans les ponts en cuivre.....	84
Figure .V.33 : Répartition de la force dans le projectile double ponts (cuivre)	85
Figure .V.34 : Variation d'induction By suivant l'axe x dans les deux ponts.....	86
Figure .V.35 : Diffusion du courant suivant l'axe z dans les ponts en titane.....	87
Figure. V.36 : Variation de la force suivant l'axe z dans le projectile (ponts en titane)	88

LES TABLEAU

Tab II.1 : représenté quelque caractéristique de matière.....	29
---	----

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les recherches consacrées à l'accélération de projectiles ont révélé depuis de nombreuses années les limitations des propulseurs à poudre. L'idée de la propulsion électromagnétique a été émise par BRIKELAND en 1918 [1]. En 1920, un propulseur 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 [2], menés à l'université nationale d'Australie, ont partiellement résolu ces problèmes, ouvrant ainsi la voie à des exploits considérables dans ce domaine de la propulsion électromagnétique.

Un accélérateur électromagnétique est un dispositif qui utilise l'interaction entre les champs magnétiques produits par des courants électriques pour accélérer un projectile. Un tel accélérateur constitue une alternative aux propulseurs actionnés par réaction chimique et offre l'avantage de pouvoir obtenir des vitesses très élevées. En effet, l'avancée considérable dans le domaine de la puissance impulsione, pendant les décennies précédentes, a placé cette technologie de lancement dans le royaume de la praticabilité et des modèles de laboratoire sont visés pour le développement de systèmes pratiques plus performants. Des vitesses de 10 km/s ont été atteintes avec des prototypes de laboratoire. Cette possibilité de lancer des charges avec des vitesses considérablement élevées fournit une option attrayante pour les systèmes de défense militaire. Elle offre également un intérêt potentiel pour des applications spatiales de lancement [3].

Les propulseurs électromagnétiques à rails appartiennent à la famille des propulseurs électriques. Leur concept est simple: un projectile est placé entre deux rails connectés à une source d'énergie électrique. Le courant crée un champ magnétique qui interagit avec le courant dans le projectile. Cette interaction crée une force de Laplace responsable du déplacement du projectile. Cependant, les différents aspects électriques et mécaniques qui interviennent dans son fonctionnement rendent l'étude de ce propulseur très complexe.

Dans notre étude nous avons adopté la démarche suivante. Elle est reflétée par les cinq chapitres constituant ce mémoire.

Dans le premier chapitre nous allons présentés les différents types de propulseurs électromagnétiques qui ont suscité un intérêt particulier dans le domaine de la propulsion.

Dans la première partie du second chapitre nous avons procédé à une Contribution à l'étude du propulseur à rails, en suite on a vu une aperçu sur les techniques de l'alimentation de propulseur à rail dans le deuxième partie du ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du propulseur en tant que système électromagnétique régit par les équations de Maxwell.

En vue de l'évaluation de la force électromagnétique tout en faisant appel à une méthode de calcul numérique.

Le quatrième chapitre est consacré à la formulation mathématique des les équations d'alimentation – proposé pour notre propulseur - pour but les defferant grandeurs d'évaluer électrique et mécanique.

Dans le cinquième chapitre, après une brève description de la méthode des éléments finis et sur laquelle le code de simulation est utilisé, nous avons procédé à l'étude de différents prototypes de propulseurs. Ils se distinguent par leurs formes géométrique, leurs architectures et par les matériaux constituant les projectiles.

**CHAPITRE **

LES SYSTEMES DE PROPULSION ELECTROMAGNETIQUES

I.1. Introduction

Les systèmes de propulsion électromagnétiques sont l'objet de plusieurs études et recherches, parmi ces systèmes, les propulseurs électromagnétiques qui sont mis en œuvre pour remplacer certains propulseurs classiques.

Dans ce chapitre on donnera un aperçu sur les propulseurs électromagnétiques en mettant l'accent sur le principe de fonctionnement et les différents types d'alimentations, dans la deuxième partie d'un chapitre on rappellera les lois des magnétismes.

I.2. propulseurs électrique

I.2.1. Le propulseur réluctant

Ce lancement est basé sur le mouvement d'un corps ferromagnétique, à l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant électrique.

I.2.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de propulseurs électromagnétiques est semblable à celui de la machine à reluctance variable qui est basée sur la variation de l'inductance. En effet, cette variation est due à la réduction de la reluctance qui est due à son tour à la minimisation de l'énergie électromagnétique. Ce processus donne naissance à une force responsable du déplacement du projectile. On résume ce principe par les équations suivantes :

L'énergie magnétique est une fonction de l'inductance L et le courant d'alimentation I :

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad (I.1)$$

Donc la force égale :

$$F = \frac{dW}{dz} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dz} I^2 \quad (I.2)$$

Si nous considérons Figure (I.1) le point c comme étant le centre du solénoïde, tout corps ferromagnétique placé à l'intérieur du solénoïde sera attiré vers ce centre, qu'il soit introduit initialement à gauche ou à droite du solénoïde (voir la figure. I.1).

Donc on a deux phases : phase d'accélération ; Phase de freinage.

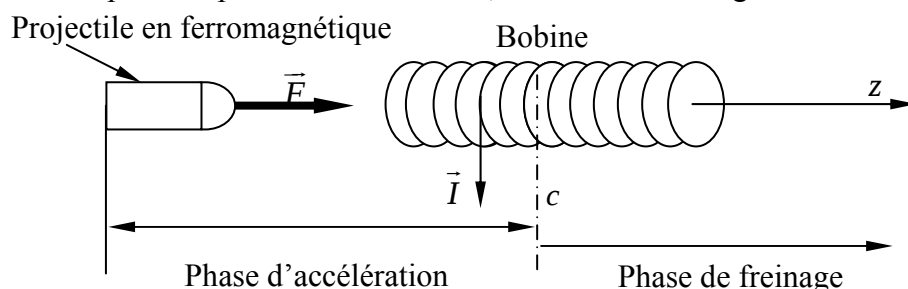


Figure. I.1 : Schéma de principe de fonctionnement du propulseur réluctant.

Pour éviter la phase de freinage, dans ce type de lancement, on coupe l'alimentation quand le projectile arrive au point c , en utilisant des capteurs pour détecter le passage du projectile au centre c .

La force globale produite par le solénoïde comporte n bobines est :

$$F_{z_n} = \sum^n \frac{dL}{dz} I^2 . n . \quad (I.3)$$

Cette formule est applicable dans le cas où on néglige les pertes par courant de Foucault et la résistance de l'air (n est le nombre de bobines).

I.2.1.2. Alimentation du propulseur réluctant

Le courant injecté dans la bobine (canon) est un courant impulsionnel d'intensité très élevée, ce courant est assuré par la décharge d'un banc de condensateur dans la bobine avec interrupteur bidirectionnelle T_1 et T_2 .

Le schéma de ce type d'alimentation est illustré sur la figure (I.2).

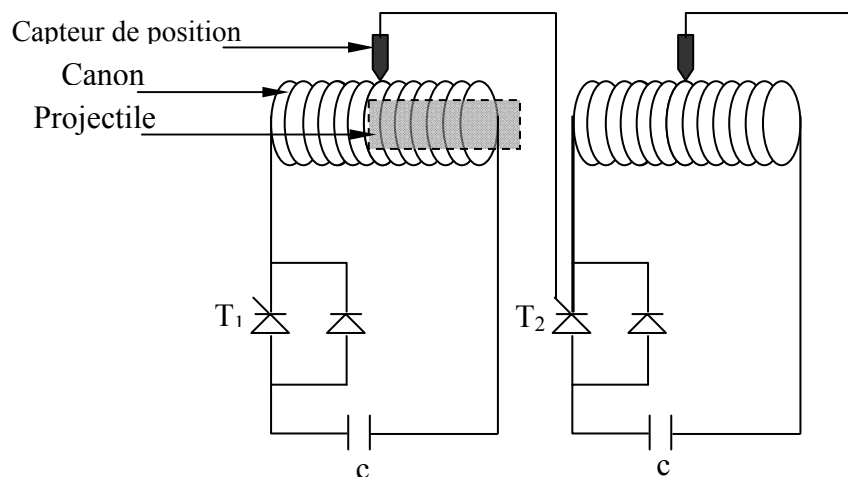


Figure I.2 : Principe d'alimentation de propulseur réluctant

I.2.2. propulseur à induction

Les recherches dans ce type de lancement sont très larges car le domaine d'utilisation est vaste, cela revient à son principe de fonctionnement et à la simplicité de son alimentation.

I.2.2.1. Le principe de fonctionnement

Le propulseur à induction a le même principe de fonctionnement que la machine asynchrone à induction (spécialement le moteur linéaire) [4].

Il est constitué de deux parties principales :

- Une armature fixe (le canon)
- Une armature mobile (le projectile)

Le courant variable circulant dans la bobine (armature fixe) crée un champ variable, ce dernier induit un courant aussi variable au niveau de projectile (voir la figure I.3). D'après la loi de Lenz :

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (I.4)$$

Où : E est la force électromotrice au niveau de projectile, le matériau conducteur de projectile constitue un court-circuit à cette dernière (E) pour permettre la circulation du courant induit.

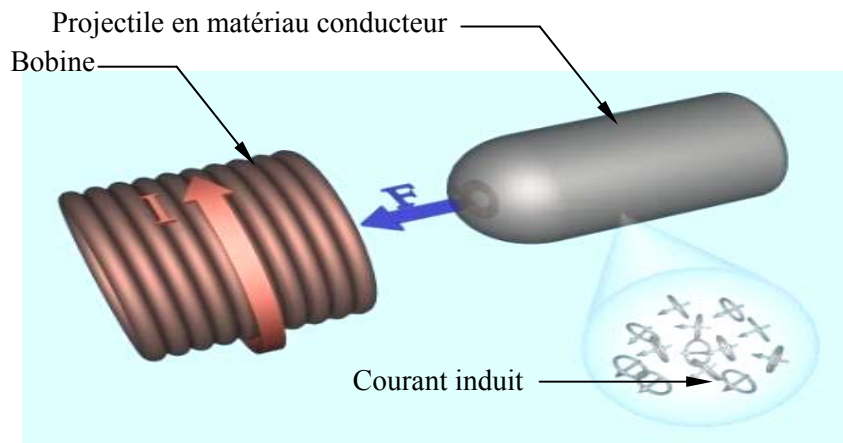


Figure. I.3 : Représentation de principe de fonctionnement le propulseur inductif

L'interaction entre les deux champs, inducteur (origine de courant d'injection) et induit est créée la force de propulsion. L'armature fixe de longueur L constituant le canon est formée de plusieurs bobines connectées de manière à avoir trois enroulements déphasés de $(L/3)$ qui sont alimentées par la source d'énergie. Ces derniers créeront le champ glissant. L'armature mobile n'est autre que le projectile, elle est constituée en matériau conducteur où circulent les courants induits par le champ glissant créé par l'armature fixe (canon).

On suppose que le mouvement de projectile est suivant l'axe z , I_B est le courant d'alimentation et I_P le courant induit, donc l'expression de la force donnée par un système triphasé équilibré qui créera alors un champ glissant.

La force de propulsion est donnée par :

$$F_z = I_B I_P \frac{dM_{BP}}{dz} \quad (I.5)$$

$\frac{dM_{BP}}{dz}$: est le gradient d'inductance mutuelle entre la bobine d'excitation et le projectile.

Pour augmenter la force de propulsion, il suffit de multiplier les systèmes de base en série.

I.2.2.2.Types d'alimentation du propulseur inductif

On distingue deux types d'alimentation pour créer l'onde glissante :

I.2.2.2.1.Alimentation par générateurs des tensions sinusoïdales

Ce type d'alimentation est classique [5], (voir la figure. I.4). En effet, une source d'alimentation triphasée équilibrée alimente chaque enroulement par une phase tel que :

$$V_A = V_m \sin (\omega t + \varphi) ; \quad (I.6)$$

$$V_B = V_m \sin (\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}) ; \quad (I.7)$$

$$V_C = V_m \sin (\omega t + \varphi + \frac{4\pi}{3}) ; \quad (I.8)$$

Avec $\omega = 2\pi f$, f la fréquence de la source est constante fixe avec l'amplitude V_m .

La figure ci-dessous illustre le schéma de l'alimentation d'une section de six bobines inductrices du propulseur par un générateur.

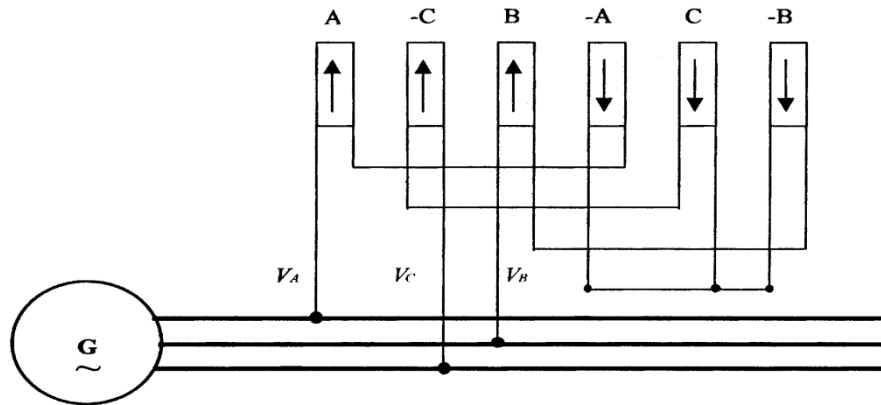


Figure. I.4 : Schéma représentatif de l'alimentation du propulseur inductif par générations des tensions sinusoïdales à six bobines.

I.2.2.2.2.Alimentation par bancs de condensateurs

Dans ce type d'alimentation, les connexions des bobines des sections du propulseur sont similaires à celles du cas précédent. Seulement, chacune des trois phases d'une section est alimentée par un banc de condensateur [6].

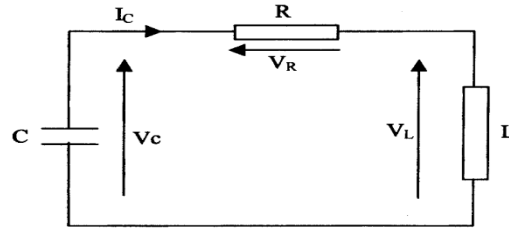


Figure. I.5 : Schéma électrique équivalent du circuit de décharge d'un condensateur dans une bobine

Les équations électriques régissant le circuit électrique équivalent de la figure(I.5), sont données par :

$$LC \frac{d^2 V_C(t)}{dt^2} + RC \frac{dV_C}{dt} - V_C(t) = 0 \quad (I.9)$$

avec I_C donner comme suite [6]:

$$I_C = -C \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (I.10)$$

En tenant compte des conditions initiales $I_C(0) = 0$ et $V_C(0) = V_{C_0}$, la solution analytique de l'équation (I.9) est comme suit :

$$V_C(t) = V_{C_0} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) [\cos \omega t + RC \sin \omega t]. \quad (I.11)$$

$$\text{Avec : } \omega = \frac{\sqrt{4LC - (RC)^2}}{2LC} \quad (I.12)$$

Cette solution exprime le phénomène de résonance électrique de circuit. L'allure du courant $I_C(t)$ figure. (I.6) est le résultat de simulation (résistance et inductance) en absence de la diode de roue libre.

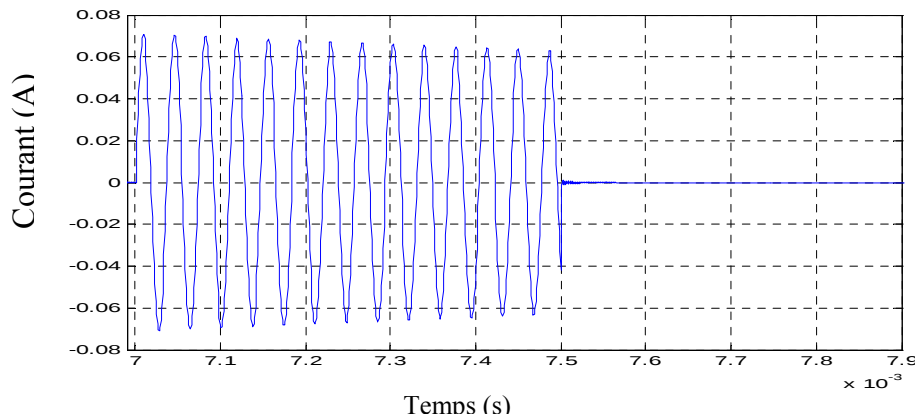


Figure. I.6 : Phénomène de résonance électrique dans le circuit

Les bancs alimentant les enroulements de la phase **C** et **B** l'instant $t/3$ et $2t/3$; la figure. (I.7):

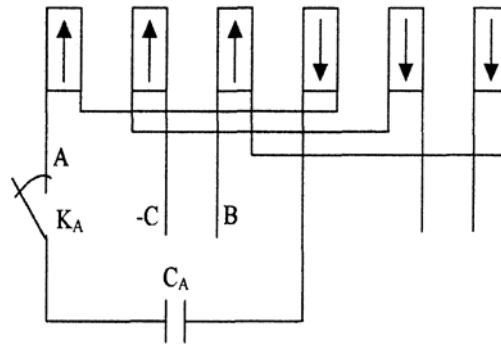


Figure I.7 : Schéma de mode d'alimentation par bancs de condensateurs

I.3. propulseur à rail [7].

Ce propulseur électromagnétique est constitué de deux conducteurs, parcourus par un courant électrique **I**, entre lesquels se trouve un projectile comportant une ou plusieurs parties conductrices et pouvant glisser sur le long des rails.

Sous l'action du champ magnétique créé par le courant continu **I**, le projectile est soumis à une force de Laplace telle que

$$\vec{F} = I dL \wedge \vec{B} \quad (\text{I.13})$$

Où **I** est la largeur du projectile, **B** l'induction magnétique au niveau du projectile.

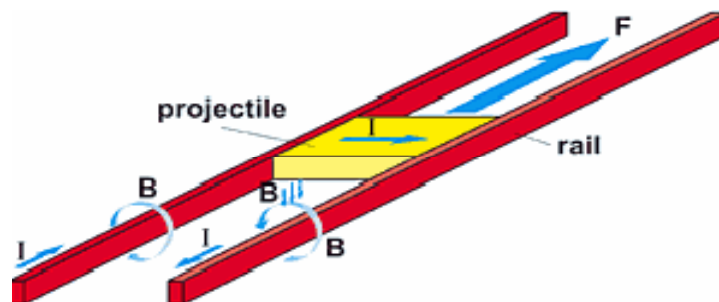


Figure. I.8: Représentation schématique de propulseur à rails

La valeur de **F** appliquée au projectile est donnée par la relation fondamentale

$$F = (1/2) I^2 (dL/dZ) \quad (\text{I.14})$$

Où (dL/dZ) représente la variation de l'inductance des rails selon la direction du déplacement projectile.

Dans le propulseur électromagnétique à rails l'accélération du projectile est directement proportionnelle au carré de l'amplitude du courant.

Le propulseur électromagnétique à rails présente l'intérêt de permettre d'augmenter sensiblement la vitesse initiale des projectiles. De tels propulseurs expérimentaux, 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 en Europe qu'aux Etats-Unis, et les recherches les plus actives lui sont consacrées pour le recherché civile.

I.4. L'MHD

La MHD a étendu les phénomènes électromagnétiques des propulsions, et il peut être aussi considéré comme un phénomène de propulsion électromagnétique [8].

La magnétohydrodynamique (MHD) est une discipline scientifique qui décrit le comportement d'un fluide conducteur du courant électrique (liquide ou gaz ionisé appelé plasma) en présence de champs électromagnétique

Moteur magnétohydrodynamique linéaire à conduction est constituée d'un canal dans lequel s'écoule un fluide électriquement conducteur à la vitesse "**V**". Le fluide traverse un champ magnétique "**B**" qui induit un courant "**J**" collecté par des électrodes en contact direct avec le fluide.

Le fluide est freiné par la force de la place "**F**", la figure (I.9) représenté le principe de fonction aiment et force électromagnétique est donnée par :

$$\vec{F} = (\vec{J}_{ind} \wedge \vec{B}) \quad (I.15)$$

Alors l'équation de courant induit est :

$$\vec{J}_{ind} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}) \quad (I.16)$$

Tell que :

B : champ magnétique	σ : Conductivité électrique [S/m]	V : la vitesse
J ; un courant induit.	F : la force de la place.	

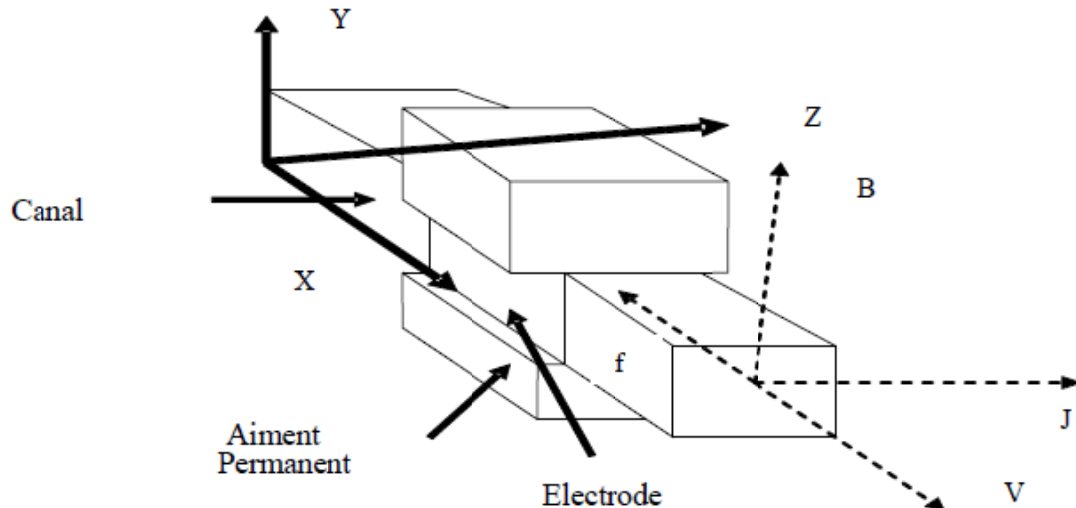


Figure. I.9 : Système MHD

I.5. propulseur à poudre [9]

C'est une combustion chimique d'un matériau solide capable d'entretenir sa combustion une fois initiée et libérant des gaz chauds qui engendrent la poussée.

Propergol : composite, mélange pulvérulent compact de 3 éléments :

- oxydant : Perchlorate d'ammonium 68%
- réducteur : Aluminium 18%
- liant/combustible : Polybutadiène PBHT 14%

masse volumique : 1750 kg.m^{-3}

Energie spécifique : $3,0 \text{ MJ/kg}$

La figure suivant représente de principe d'une fusée à carburant solide (booster)

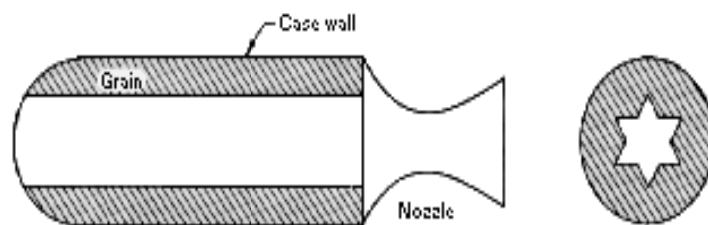


Figure I.10 : principe d'une fusée à carburant solide (booster)

I.6. Les lois de magnétisme

Pour but de comprendre la conception des systèmes de propulsion écrite avant on a fait rappeler quelque lois de magnétisme dans cette deuxième partie .

I.6.1. Loi de Lenz : phénomène d'induction[10]

Lorsqu'on approche un aimant d'une bobine connectée sur un galvanomètre, on détecte un courant électrique créé dans la bobine.

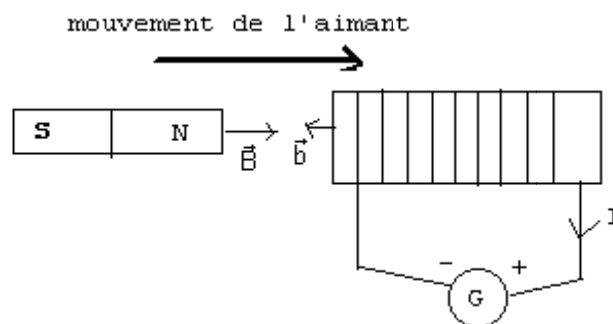


Figure. I.11:schéma de mouvement de l'aimant d'une bobine

Le sens de ce courant dépend de la façon dont on déplace l'aimant :

- si on approche le pôle nord suivant l'axe le courant est dans le sens représenté sur la figure : il génère lui-même un champ magnétique b induit qui tend à s'opposer au champ magnétique B , son sens et sa direction sont donnés par le bonhomme d'Ampère (on " couche " le bonhomme d'Ampère sur le circuit , le courant lui rentrant par les pieds , lui sortant par la tête , son regard est tourné vers le point où on cherche à déterminer le champ magnétique induit par le courant , son bras gauche tendu indique le sens et la direction de ce vecteur)
- si on recule le pôle nord, I s'inverse
- si on approche le pôle sud, cela a le même effet que si on recule le pôle nord

Dans tous ces cas, on vérifie que I crée un champ b qui s'oppose à la variation du champ magnétique que tend à provoquer le déplacement de l'aimant, au sein de la bobine.

Le phénomène est d'autant plus important que le mouvement de l'aimant est rapide .Il est d'autant plus important que l'aimant est présenté axialement devant la bobine (il est imperceptible si on approche l'aimant perpendiculairement à l'axe de la bobine) .

I.6.2. Loi de Lenz- Faraday

Elle permet d'exprimer la force électromotrice (FEM) qui apparaît aux bornes de la bobine lors de l'expérience puisqu'elle devient alors équivalente à un générateur, cette FEM permet la circulation du courant dans le circuit lorsqu'il est refermé grâce au galvanomètre.

Soit Φ le flux du vecteur, champ magnétique $\vec{B}$ au travers d'une surface S :

$$\Phi = N \cdot B \cdot S \quad (I.17)$$

N : est le nombre de spires dont est constituée la bobine.

Le vecteur $\vec{S}$ est défini de la façon suivante :

Sa norme est $\vec{S}$ son sens et sa direction sont donnée par la règle du bonhomme d'Ampère à partir d'un sens de circulation positif choisi arbitrairement sur la spire de surface S .

Exemple:

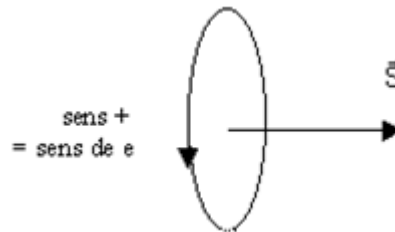


Figure. I.12:sens de circulation dans le courant

Unité du flux : B en "tesla" , S en " m^2 " dans le système international Φ est donc en " $T.m^2$ " ou en weber (symbole Wb)

La FEM est orienté dans le sens arbitraire choisi pour définir S .

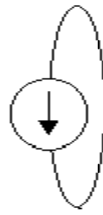


Figure. I.13:Schéma de générateur équivalent FEM

I.6.3.Loi quantitative de Lenz faraday

$$E = - d\Phi/dt \quad (I.18)$$

cette relation traduit bien tous les phénomènes observés expérimentalement

I.7.Théorème d'Ampère [11]

En magnétostatique le théorème d'Ampère permet de déterminer la valeur du champ magnétique grâce à la donnée des courants électriques. Ce théorème est une forme intégrale de l'équation de Maxwell-Ampère. Il a été découvert par André-Marie Ampère, et constitue l'équivalent magnétostatique du théorème de Gauss. Pour être appliqué analytiquement de manière simple, le théorème d'Ampère nécessite que le problème envisagé soit de symétrie élevée. Énoncé du théorème d'Ampère

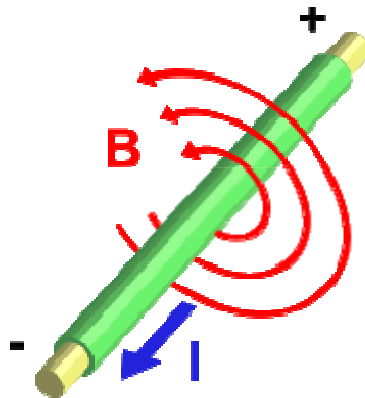


Figure. I.14:sens de courant I et de champ

Un courant électrique I produit un champ d'induction électromagnétique .
En régime quasi-permanent ou permanent, dans le vide, le théorème d'Ampère énonce que la circulation le long d'un circuit fermé du champ magnétique engendré par une distribution de courant est égale à la somme algébrique des courants qui traversent la surface définie par le circuit orienté, multipliée par la perméabilité du vide

$$(\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}).$$

$$\oint_{\tau} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum I \text{ traversant} \quad (\text{I.19})$$

où :

$\oint$ Représente l'intégrale curviligne sur le contour fermé τ ,

$\vec{B}$ est l'induction magnétique,

$d\vec{l}$ est l'élément infinitésimal de déplacement le long du contour τ ,

μ_0 est la perméabilité du vide,

$\sum I$ traversent est la somme algébrique des intensités des courants enlacés par le contour τ .

D'un point de vue mathématique, il s'agit d'une application du théorème de Stokes.

I.7.1.Intensité enlacée

On peut distinguer plusieurs cas concernant l'intensité enlacée par le circuit.

si le circuit enlace un courant volumique j , alors l'intensité enlacée aura la forme suivante :

$$I_{\text{traversant}} = \iiint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} \quad (\text{I.20})$$

si le circuit enlace plusieurs circuits filiformes alors on peut dire que l'intensité enlacée s'écrira :

$$I_{\text{traversant}} = \sum I_i \quad (\text{I.21})$$

avec I_i l'intensité d'un fil du circuit filiforme.

Telle que, il s'agit d'une somme algébrique : il faut orienter le contour d'Ampère, et donc donner une normale à la surface, d'où une convention de signe concernant les courants enlacés, comptés positivement ou négativement selon leur sens.

si le circuit enlace un courant surfacique k , alors l'intensité enlacée aura la forme suivante :

$$I_{\text{traversant}} = \int_1 \vec{k} \cdot d\vec{l} \quad (\text{I.22})$$

I.8. L'Électromagnétisme [12].

L'électricité et le magnétisme sont indissociables (ce qui revient à parler d'«électromagnétisme»). Que ce soit à travers les « équations de Maxwell », pour la mise en ouvre d'expériences ou l'aimantation de matériaux, le magnétisme provient ainsi toujours de la circulation d'un courant électrique. Un aimant dit « permanent » est un matériau capable d'attirer les objets ferreux et de produire un ensemble de phénomènes associés.

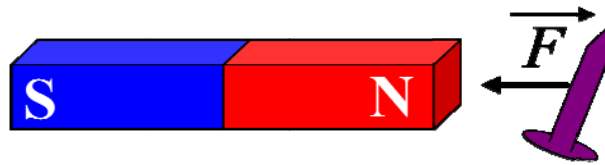


Figure. I.15: Un aimant permanent

Un bobinage parcouru par un courant électrique, et pratiqué sur un matériau adapté, peut exercer le même ensemble de phénomènes.

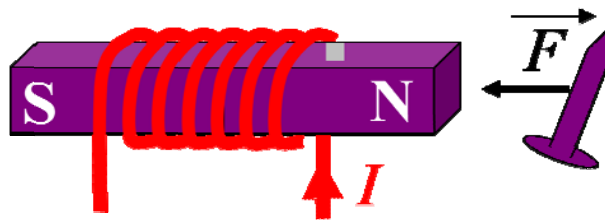


Figure. I.16: Un aimant avec bobine

NB: Si ces deux dispositifs sont ainsi équivalents, en Physique et en Électrotechnique les champs magnétiques sont le plus souvent produits par des bobinages.

I.8.1. Les grandeurs du magnétisme

Dès lors qu'un bobinage est parcouru par un courant électrique il est possible de faire apparaître certaines grandeurs qui permettent de quantifier les phénomènes liés au magnétisme.

Au point **M**, la circulation du courant **I** dans l'enroulement crée :

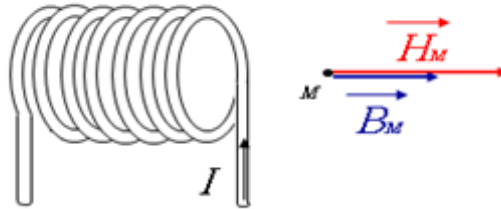


Figure. I.17:sens de champ et induction magnétique $\vec{B}$

Dans le vide, le vecteur à induction est en tout point colinéaire au champ magnétique (aussi appelé « Excitation »). On retiendra :

$$\vec{B}_{\text{vide}} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (\text{I.23})$$

Le coefficient μ_0 est la « perméabilité magnétique du vide »

NB : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

Lorsque le point considéré se trouve au sein d'une matière ou d'un matériau quelconque, il se rajoute à $\mu_0 \cdot H_M$ un vecteur « d'aimantation » de la matière .

Au point **M**, la circulation du courant **I** dans l'enroulement crée aussi

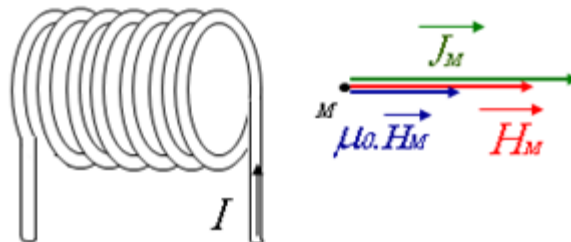


Figure. I.18:sens de champ $\vec{H}_M$ et induction magnétique $\vec{B}_M$ et courant d'induit $\vec{J}_M$

Dans la matière, l'induction magnétique est ainsi la résultante de l'aimantation de la matière et du vide.

On retiendra

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) \quad (I.24)$$

Avec

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H} \quad (I.25)$$

C'est-à-dire

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu \vec{H} = \vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \vec{H} \quad (I.26)$$

et

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (I.27)$$

Le coefficient μ_r est la « perméabilité relative du matériau ». χ est la « permittivité magnétique ».

Au point N, le champ magnétique n'est pas forcément colinéaire à celui du point M.

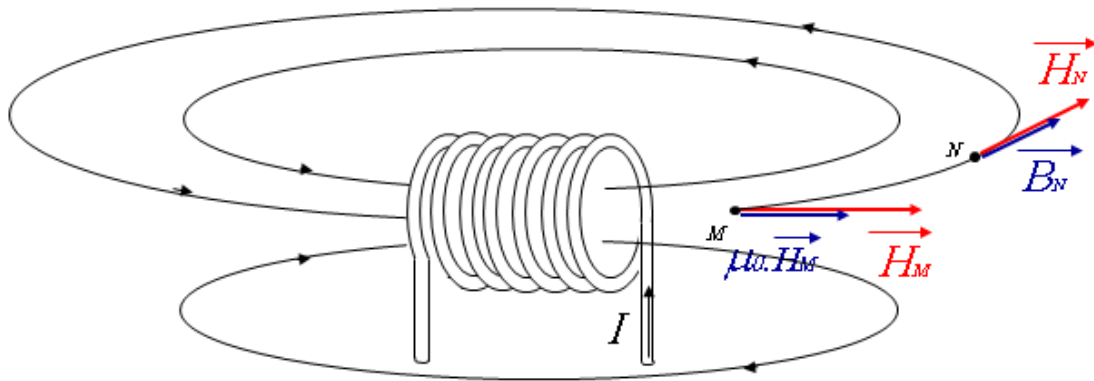


Figure. I.19: le champ magnétique n'est pas forcément colinéaire à celui du point M.

Pour représenter les « trajets » des vecteurs, on représente les « lignes de champ », c'est à dire les courbes tangentes en tout point au champ magnétique.

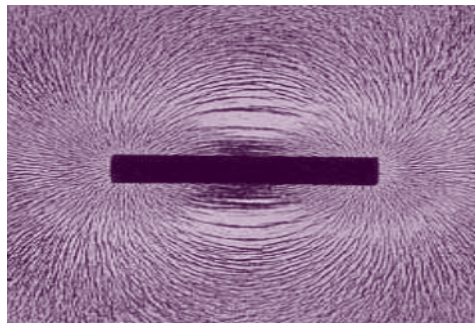


Figure. I.20: lignes de champ

NB : Les lignes de champ, comme le champ magnétique, « sortent » par le pôle Nord et « rentrent » par le pôle Sud. Pour les identifier, utiliser la « règle de la main droite ».

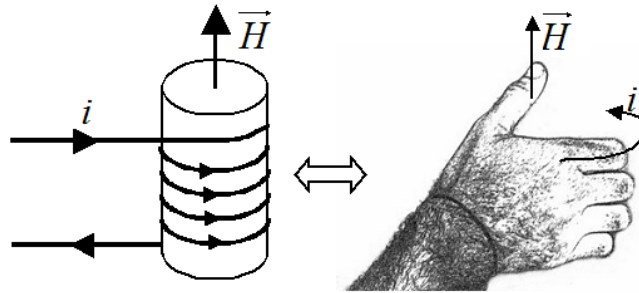


Figure. I.21:règle de la main droite

I.9.L'interaction « courant / excitation »

La circulation du courant électrique suffit à la création d'un champ magnétique, aussi appelé « excitation magnétique ». Leur interaction est formalisée par deux formules fondamentales de l'électromagnétisme :

La relation (I.11) de Maxwell-Ampère dans le vide (en statique):

Le Théorème D'Ampère sous forme intégrale :

$$\int_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \sum i_{\text{traversant le contour}} \quad (\text{I.28})$$

Ces deux formules sont analogues en régime statique, le théorème d'Ampère est simplement la formulation intégrale de l'équation de Maxwell.

La formule de Maxwell-Ampère (I.27) traduit le fait que le champ et l'induction magnétique représentent une distribution de vecteurs qui « s'enroulent » autour du courant qui les créent. Il est assez facile de mieux « ressentir » cette formule en considérant deux cas simples :

Si le courant circule en ligne droite, en l'absence de matériau magnétique à proximité, on montre que le champ magnétique s'enroule sur des cercles concentriques

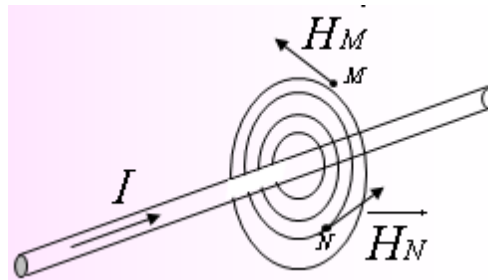


Figure .I.22:le champ magnétique s'enroule sur des cercles concentriques

Si le courant circule dans un bobinage, on montre alors que le champ magnétique intérieur est parallèle à l'axe de « l'enroulement ».

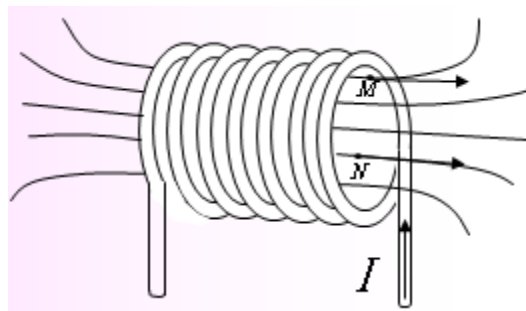


Figure .I.23: le champ magnétique intérieur est parallèle à l'axe de l'enroulement

Le théorème d'Ampère (I.28) traduit le fait qu'un courant qui traverse un contour fermé crée un champ magnétique dont la composante tangentielle au contour n'est pas nul.

Dans les cas qui présentent une symétrie intéressante, ce théorème permet la détermination directe de l'expression du champ.

Si le courant circule en ligne droite et que le champ magnétique s'enroule sur des cercles concentriques,

$$\int_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot 2\pi \cdot r = i \quad (I.29)$$

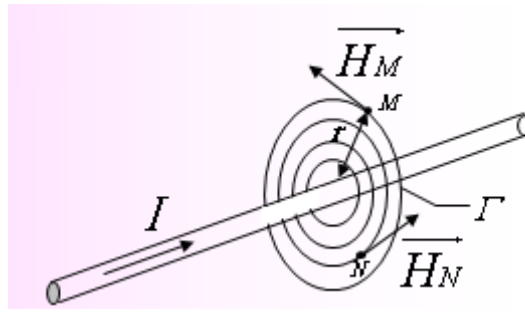


Figure. I.24:le champ magnétique s'enroule sur des cercles concentriques

Ou encore :

$$H_M = \frac{i}{2\pi.r} \quad (I.30)$$

$$\int_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} \cong H.L = N.i \quad (I.31)$$

Si le courant circule dans un solénoïde, on montre que :

Ou encore :

$$H_M = \frac{N.i}{L} \quad (I.32)$$

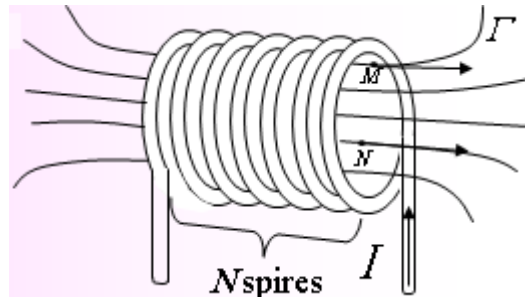


Figure .I.25:le champ magnétique intérieur est parallèle à l'axe de l'enroulement

I.10.Classification des matériaux magnétiques

Le coefficient χ est appelé « susceptibilité magnétique » du matériau. La classification des matériaux magnétiques se base sur le signe et la valeur de la susceptibilité magnétique. On distingue ainsi :

- Les matériaux paramagnétiques : $\chi > 0$ de 10^{-3} à 10^{-7}

Commentaire : rares et d'aimantation quasiment négligeable.

- Les matériaux diamagnétiques : $\chi < 0$ de 10^{-4} à 10^{-6}

Commentaire : très abondants et d'aimantation quasiment négligeable, forment la masse des matériaux qu'on appellera « non magnétiques », comme le bois, le plastique, etc...

- Les matériaux ferrimagnétiques : $\chi > 0$ de 10^3

Commentaire : Aussi dits « Ferrites ». Utilisés, malgré leur faible aimantation, en raison de leur forte résistivité (vis à vis des courants de Foucault en particulier). Prépondérants dans les applications haute-fréquence et l'électronique de puissance.

- Les matériaux ferromagnétiques : $\chi > 0$ de 10^4 à 10^6

Commentaire : Les matériaux ferromagnétiques (Fe, Ni, Co) sont à la base d'un grand nombre d'appareillages en électrotechnique. Leur aimantation est importante mais limitée (on parlera de saturation).

I.10.1. Les matériaux ferromagnétiques

Les matériaux ferromagnétiques (Fe, Ni, Cr) sont caractérisés par une aimantation organisée en « domaines » dits « de Wien ».

En l'absence d'excitation, ces matériaux présentent une aimantation résultante très faible : $B \approx 0$

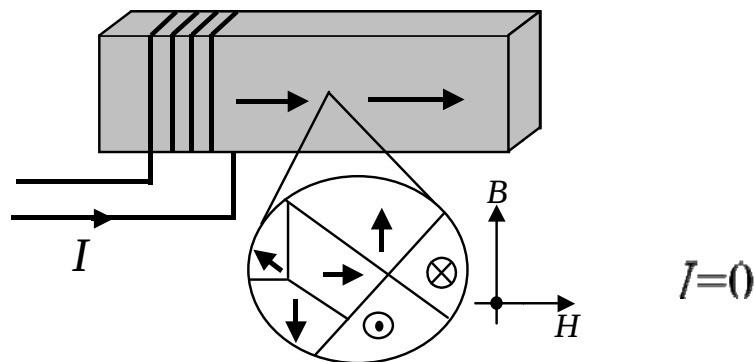


Figure I.26: circulation le courant I dans la matériaux ferromagnétique.

Lorsque l'excitation augmente, les domaines dont l'aimantation est dans le bon sens grandissent... les autres diminuent. L'induction résultante augmente : $B \approx \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

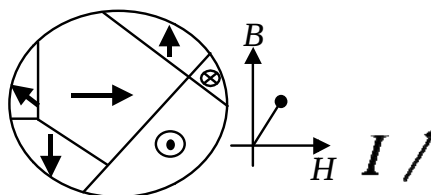


Figure I.27: schéma de domaines dont l'aimantation

Lorsque tous les domaines sont confondus en un seul, l'induction n'augmente presque plus. C'est la « saturation » et $B \approx Cte = B_{sat} + \mu_0 \cdot H$

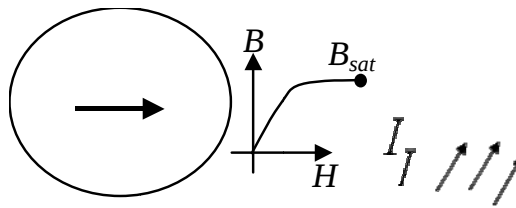


Figure I.28: schéma représente la domaines de confondus en un seul.

I.11.Utilisation des matériaux magnétiques

Les matériaux magnétiques, et ferromagnétiques en particulier, sont utilisés pour la production d'inductions importantes. Ces dernières permettent d'envisager des « conversions d'énergie » passant par le magnétisme.

I.11.1.Canalisation des lignes de champ

Tout comme un bon conducteur électrique représente un cheminement privilégié pour le courant électrique, un bon matériau magnétique ($\mu_r \gg 1$) « canalise » les lignes de champ magnétique.

Pour observer ce phénomène, considérons une bobine de 20 cm de long, 50 spires et parcourue par un courant de 5 Ampères.

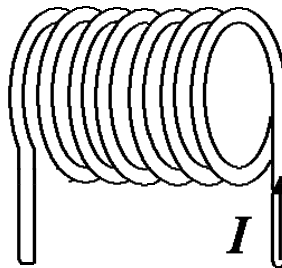


Figure I.29: la circulation le courant I dans la bobine

On s'intéresse à la simulation, réalisée à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis, des grandeurs magnétiques en deux dimensions [12].

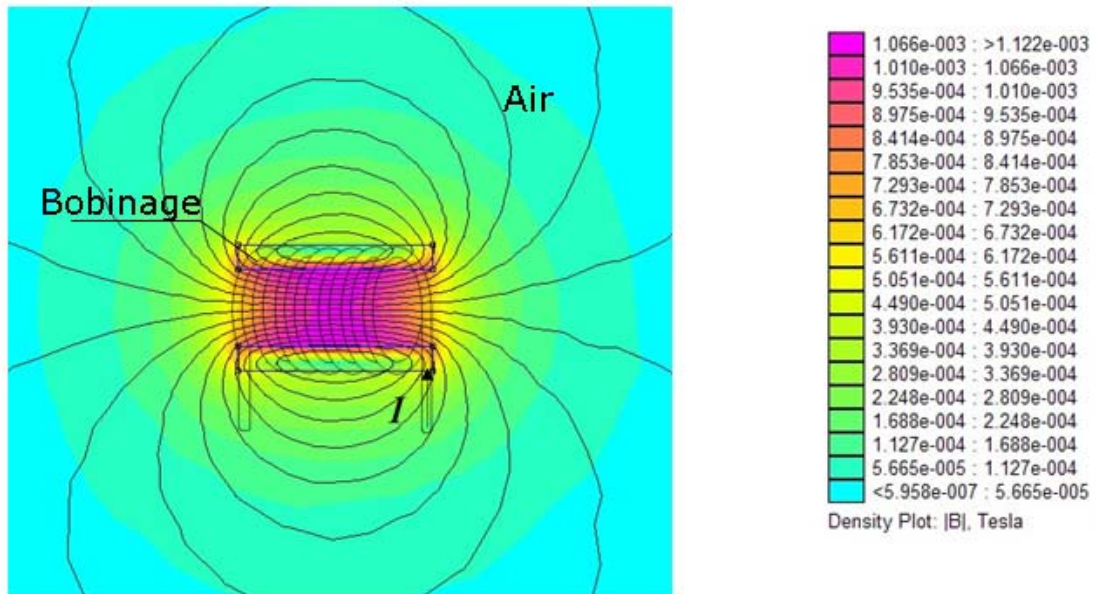


Figure. I.30 : allure l'induction magnétique $\vec{B}$ dans la bobine

La bobine utilisée pour la simulation présente 50 spires et est parcourue par un courant continu de 5 A.

Introduisons maintenant un barreau de fer dans la bobine...

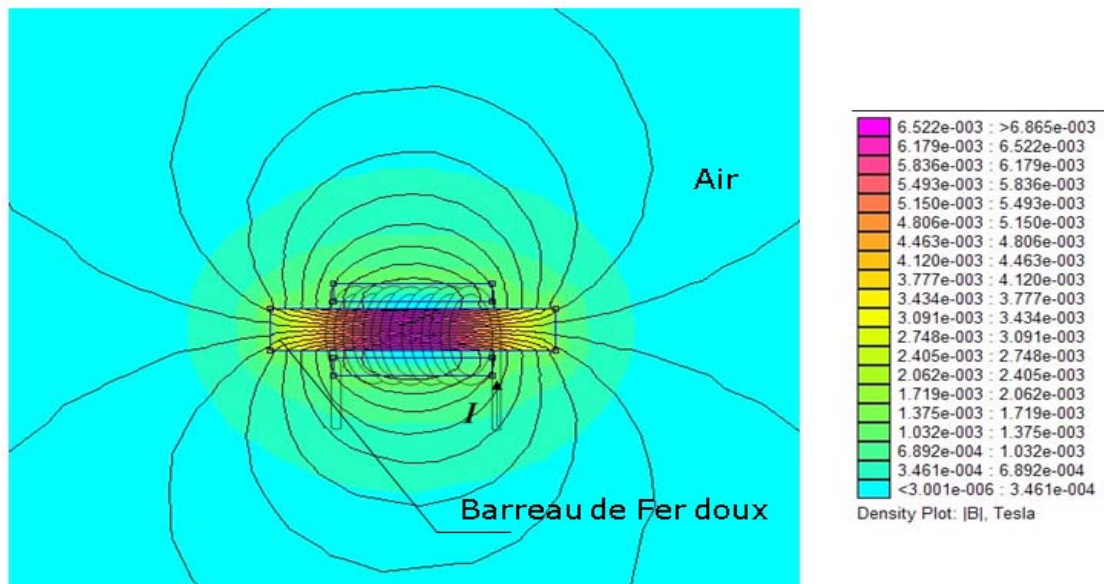


Figure. I.31 : allure l'induction magnétique $\vec{B}$ dans un barreau de fer dans la bobine

Le fer a « canalisé » les lignes de champ. L'induction au centre du solénoïde est plus importante. Mais encore très faible... Amenons une masse de fer à proximité.

I.11.2.Utilisation des matériaux magnétiques

I.11.2.1 Production d'induction importante

Sans augmenter la valeur du courant, il est possible de produire dans le barreau de fer doux une induction importante. Pour cela, il faut « fermer le circuit magnétique », tout comme on ferme un circuit électrique pour laisser circuler un courant.

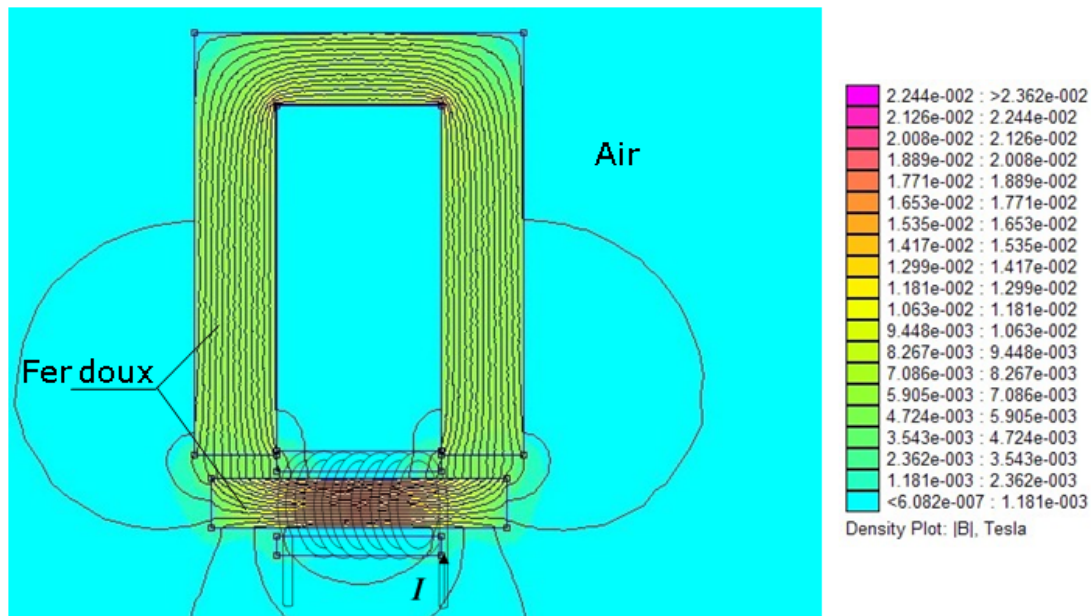


Figure. I.32 : allure l'induction magnétique $\vec{B}$ dans un barreau de fer sur la forme « U »

Ici le « U » en fer ferme presque le « circuit magnétique ». Le quasi intégralité des lignes de champ est canalisé par le fer. L'induction est bien plus importante qu'avant.

I.11.2.2. Notions importantes à retenir à partir des observations précédentes

Les matériaux magnétiques ont tendance à attirer, on dit « canaliser », les lignes de champ.

Lorsque ces lignes sont très concentrées, l'induction est importante. L'induction est en réalité la « densité du flux du champ magnétique ».

Pour obtenir des valeurs importantes de flux et d'induction, il est nécessaire de réaliser des « circuits magnétiques » fermés .

I.12.Lignes de champ d'un solénoïde [13] :

Une autre façon pour déterminer les pôles d'une bobine est de la placer selon son axe et d'observer

le sens de rotation du courant

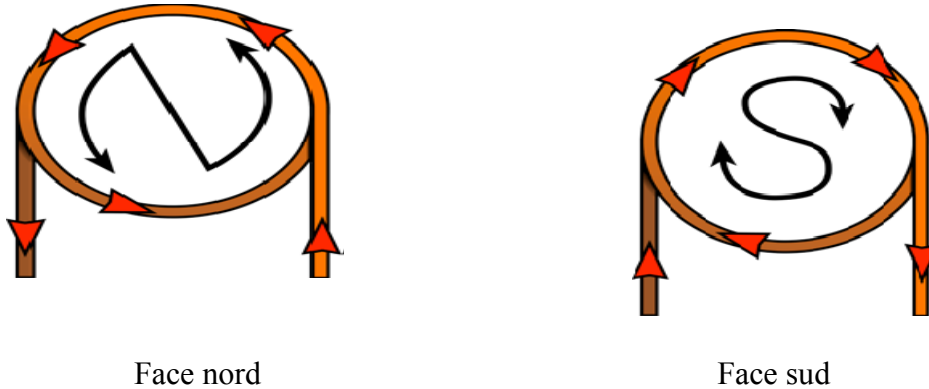


Figure. I.33: le sens de rotation du courant

I.12.1.Champ magnétique au milieu d'un solénoïde

Un solénoïde est une bobine qui possède une longueur l et une répartition uniforme de spires.

Nous avons vérifié expérimentalement que le champ magnétique s'exprimait de la façon suivante :

$$B = \mu_0 \cdot N \cdot I / L \quad (I.17)$$

L en mètres (m) ; I en ampères (A)

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ u.s.i} = 1,275 \cdot 10^{-6} \text{ u.s.i}$$

μ_0 est la perméabilité du vide (ou de l'air) :

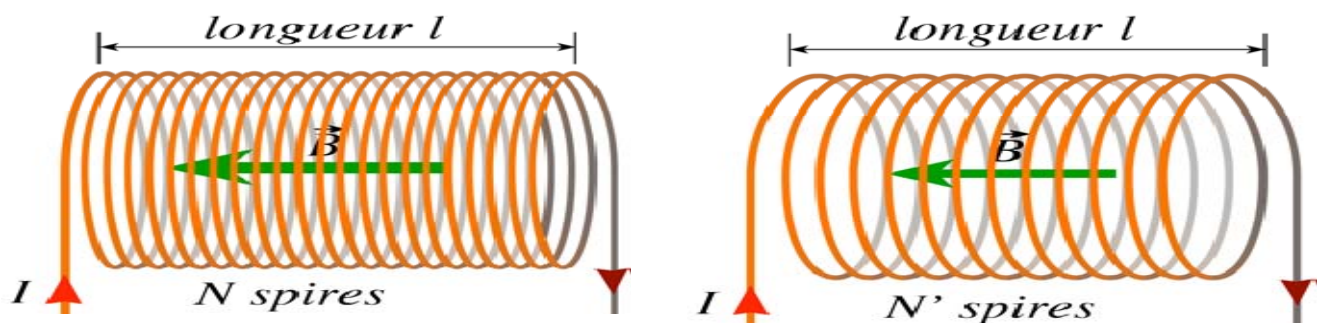


Figure .I.34: champ produit par ce solénoïde que celui-ci. Sera plus intense [13.]

I.13.CONCLUSION

Il reste plus de type des propulseurs, mais on a pas l'intérêt pour représenté tous, le propulseur à rail reste le type le plus intéressant dans les recherches civiles et militaires.

Nous avons essayés d'abord les techniques utilisés dans ce mode de propulsion ainsi les différentes catégories d'alimentation.

CHAPITRE II

Contribution à l'étude du propulseur à rails

II.1. Introduction

Le propulseur électrique, connu aussi sous le nom anglais de **railgun** - ou **rail gun** - d'où la traduction propulseur à rails - est une arme à projectile accéléré par une force électromagnétique, semblable à celle qui fait tourner le moteur homopolaire[14].

II.2. Le principe de fonctionnement

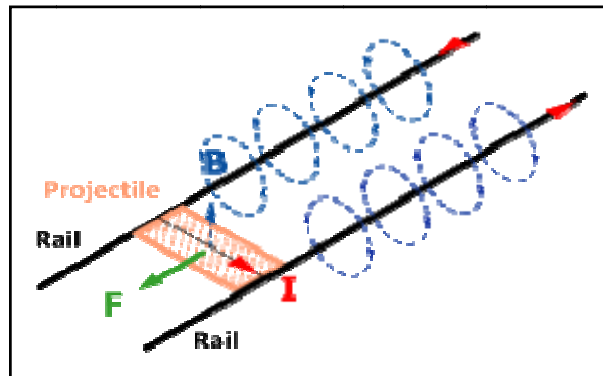


Figure .II.1 : schéma de principe d'un propulseur à rail.

Le courant I et le champ magnétique B traversant le projectile produisent une force F . Le concept sous-jacent est probablement aussi ancien que la découverte de la force de Laplace (avec une proposition en France dès 1884, puis 1908, et une tentative de développement pendant la Première Guerre mondiale qui fut abandonnée faute de résultat probant. Sa réalisation opérationnelle n'est toujours pas d'actualité. Il n'existe actuellement que des prototypes utilisables en laboratoire [14].

Le concept est on ne peut plus simple : on établit une différence de potentiel électrique entre deux rails parallèles conducteurs de l'électricité et on insère entre eux un projectile conducteur et pouvant glisser, 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 –autour les rails-), Figure. II.1.

Le propulseur électrique, à propulsion électromagnétique, ne doit cependant pas être confondu avec une autre forme, le propulseur magnétique, où le champ magnétique est parallèle à l'axe, et où le projectile, au lieu d'être parcouru par un courant est ferromagnétique.

On peut néanmoins, pour augmenter la force du propulseur électrique, renforcer le champ magnétique en ajoutant, de part et d'autre du plan formé par les deux rails, des aimants créant un champ magnétique, perpendiculaire à l'axe, et de sens approprié pour s'ajouter au champ engendré par le courant.

II.3. architecture du système

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, le courant électrique passe de la partie positive de générateur vers la partie négative du générateur [14].

Ce courant crée dans la boucle ainsi formée un champ magnétique de valeur $\mathbf{B}$, qui s'enroule autour de chaque élément conducteur d'après la loi de Biot et Savart ou le théorème d'Ampère. En supposant la boucle dans un plan horizontal, le champ magnétique créé va donc être vertical dans le plan de la boucle. Il est donc perpendiculaire au courant d'intensité $\mathbf{I}$ et exerce donc sur lui, d'après la loi de Laplace une force d'intensité $\mathbf{B} \times \mathbf{I}$ par unité de longueur.

Cette force, agissant sur le projectile, va le propulser le long des rails, et on peut montrer qu'il s'éloigne du générateur, agrandissant ainsi la surface de la boucle. C'est une conséquence de la loi de Lenz, plus générale. La force de Laplace propulse le projectile et exerce aussi de fortes contraintes sur les rails, le générateur et, éventuellement, sur l'aimant.

Comme le champ magnétique $\mathbf{B}$ est proportionnel à l'intensité $\mathbf{I}$ du courant, la force de Laplace est proportionnelle au carré de l'intensité.

Une intensité d'un million d'ampères pourrait exercer sur le projectile une force inouïe, et il pourrait atteindre de très hautes vitesses. On a réussi à atteindre 20km/s avec de petits projectiles projetés sur les rails par une explosion.

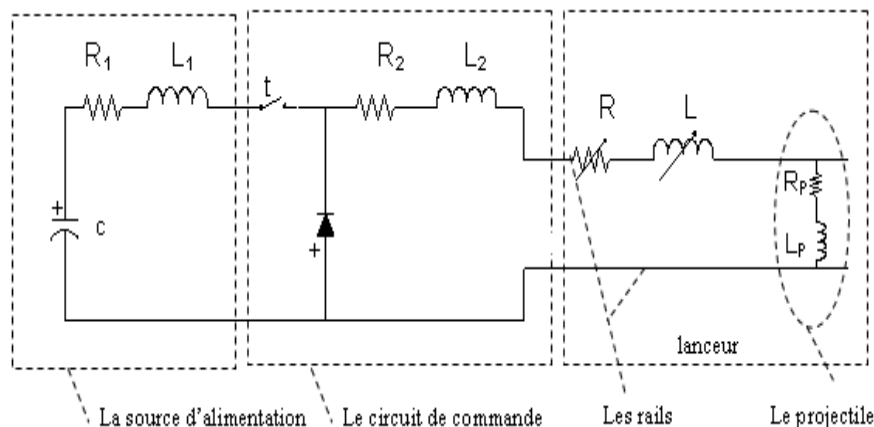


Figure .II.2. Schéma représenté le propulseur avec son alimentation

II.4. Technique Choix des matériaux

Les Rails et le projectile doivent être construits en matériaux résistants et conductrices. Ils doivent résister à la violence du projectile accéléré, et à la chaleur développée par l'effet Joule du courant très élevé, aux frottements, et aux décharges électriques des contacts mobiles, qui provoquent des dégâts sérieux aux surfaces [14].

Le propulseur doit aussi encaisser le recul dû à l'accélération du projectile, comme dans n'importe quelle arme. Le point d'application exact de cette force de recul est encore sujet à controverse. Les traditions de l'artillerie veulent que ce soit sur la culasse de l'arme, c'est-à-dire la partie du circuit qui ferme la boucle en regard du projectile, mais certains s'appuient sur le théorème de Maxwell-Ampère pour affirmer qu'il est réparti tout au long des rails. C'est probablement vrai stricto sensu, mais si l'on néglige les vitesses en jeu par rapport à celle de la lumière, l'approximation des artilleurs reste convenable.

Un problème plus important est que, par unité de longueur, les rails se repoussent de côté exactement comme le projectile est poussé vers l'avant (toujours perpendiculairement). Il leur faut donc résister à cette contrainte sans se tordre, et donc être très solidement fixés sur un bâti indéformable, mais isolant pour éviter l'induction de courants qui représenteraient une perte.

Matériau	Tc en °C
nickel	358
fer	770
cobalt	1115

Tab (II.1) : représenté quelque caractéristique de matière [14].

II.5. Rendement de la propulsion

L'effet Joule, en chauffant les rails et le projectile consomme une partie de l'énergie, aux dépens du rendement de l'installation. La chaleur développée par cet effet, ainsi que par les frottements du projectile, présente trois inconvénients principaux :

1. la fusion au moins partielle du propulseur,
2. la sécurité du personnel de tir,
3. la facilité de détection par l'ennemi.

En pratique, dans la plupart des réalisations, les rails s'usent extrêmement rapidement. Les projectiles aussi, mais ils ne servent par principe qu'une seule fois. L'usure des rails limite le temps de vie du propulseur, et leur échange standard est difficile compte tenu de la solidité nécessaire de leur fixation et de la qualité exigée des contacts avec le générateur.

L'emploi de matériaux supraconducteurs est imaginable, mais pour le moment bien peu réaliste (température, résistance mécanique, etc.). D'autre part l'inductance du circuit limite le temps de montée de l'intensité du courant, limitant également le rendement moyen sur le temps total d'accélération.

Un arc électrique peut jaillir entre les rails, faisant ainsi un court-circuit destructeur et annulant l'effet sur le projectile. Certaines versions tentent d'exploiter cet effet d'arc électrique : un plasma est amorcé par une simple feuille de métal conducteur vaporisé par l'effet Joule ; ce plasma pousse alors le véritable projectile, non conducteur, comme les gaz d'un propulseur ordinaire, mais sans les problèmes liés à l'étanchéité et à la résistance mécanique nécessaires (le confinement étant réalisé par le dispositif électromagnétique) [14].

II.6. Le générateur d'alimentation

Le générateur doit être capable de délivrer de très forts courants, contrôlés et durant le temps nécessaire à l'accélération du projectile. Pour mesurer l'efficacité du générateur, il faut essentiellement savoir l'énergie qu'il peut fournir, mesurée en joules. L'énergie maximale utilisée pour un propulseur électrique a été 10 millions de joules (MJ). Il suffit de savoir, pour avoir une idée rapide des chiffres, qu'un projectile de masse m kg, lancé à une vitesse v km/s possède une énergie cinétique de $0,5 m v^2$ MJ. Les formes usuelles de générateurs utilisés pour les propulseurs électriques sont des générateurs impulsionsnels à volant d'inertie, et des capacités [14].

II.6.1. Utilisation du propulseur à rails

II .6.1.1.Des applications de propulseur à rail

Les propulseurs électriques dans le domaine militaire sont envisagés pour les applications qui requièrent une vitesse initiale du projectile plus élevée [15 ,16 ,17].

Les applications des propulseurs électriques sont nombreuses. En voici quelques exemples :

- Accélérations de petits projectiles (2.5 g) à des vitesses très élevées (8.5 km/s) afin d'étudier les équations d'état des matériaux à ultra haute pression, figure (II.3) [18].

- La photo ci-après montre une pénétration de projectile de l'ordre de 6.2 mm et d'une masse de 2.5 g pour une vitesse de 8.5 km/s [18].

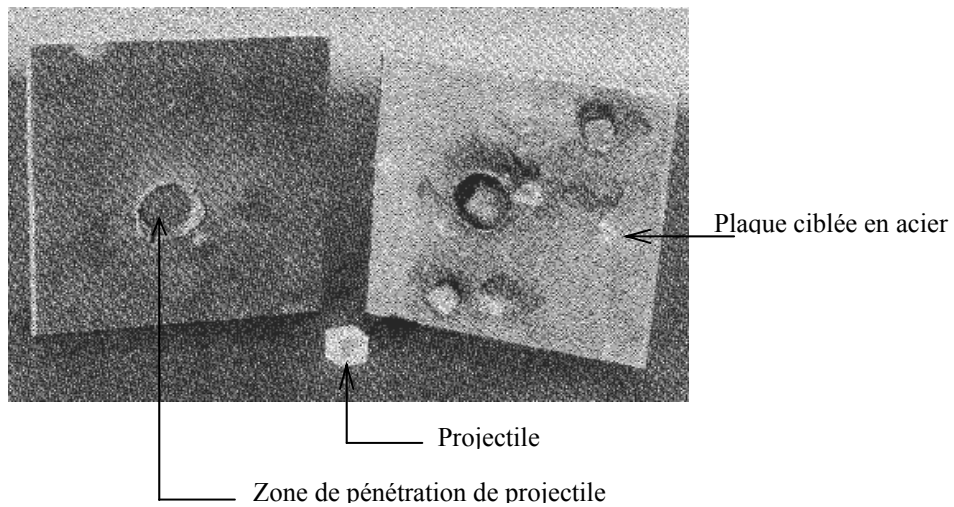


Figure. II.3: Pénétration de projectile dans une cible plaque en acier

- 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.

L'utilisation des propulseurs électriques est également envisagée pour la mise sur orbite terrestre d'objets tels que petits satellites.

II.7.état de recherche autour le propulseur à rails.

Les États-Unis (DARPA) depuis les années 70, dans le cadre de l'« initiative de défense stratégique », la « guerre des étoiles » du président Ronald Reagan, financent des expériences de propulseur électrique.

L'Institut de technologie avancée de l'Université du Texas à Austin a construit des propulseurs électriques capables d'envoyer des obus perforants en tungstène d'une énergie de 9 MJ. Cette énergie est suffisante pour lancer un obus de 2 kg à 3 km/s, et à cette vitesse, une tige de tungstène ou autre métal dense, peut facilement pénétrer dans un char, et peut-être passer à travers.

Le Centre de guerre navale de surface des États-Unis à Dahlgren (Virginie) y a testé un prototype de propulseur électrique, livré par BAe Systems, qui a accéléré un obus de sept livres (3,17kg) à Mach 7, conçu pour être poussé jusqu'à 32 ou peut-être même 64 MJ.[19].

Le principal problème auquel la marine doit faire face dans ses mises au point est l'usure rapide des rails provoquée par l'énorme chaleur du tir. Ce genre d'armes devrait être assez puissant pour provoquer un peu plus de dommages qu'un missile BGM-109 Tomahawk conventionnel, pour une fraction du coût⁸.

En février 2008, la marine états-unienne a testé un propulseur électrique avec complément magnétique : il a tiré un obus à 2 500 m/s avec 10 MJ. On prévoit d'augmenter sa vitesse initiale jusqu'à 8 300 m/s, avec une précision suffisante pour toucher une cible de 5 m à 360 km, avec une cadence de tir de 10 coups/mn. On pense le réaliser vers 2020–2025⁹.

II.8. Structure de l'alimentation d'un propulseur à rail

II.8.1. Alimentation simple

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 du condensateur et dans lequel le courant est du type impulsif à haute amplitude pouvant atteindre des MA.

Pour notre modèle on distingue de phases pour le technique de décharge men.

Les figures montrent le principe de la décharge dans le lanceur à rail.

II.8.1.1. phase (1)

La figure (II.4) représente le principe de l'alimentation de lanceur à rail

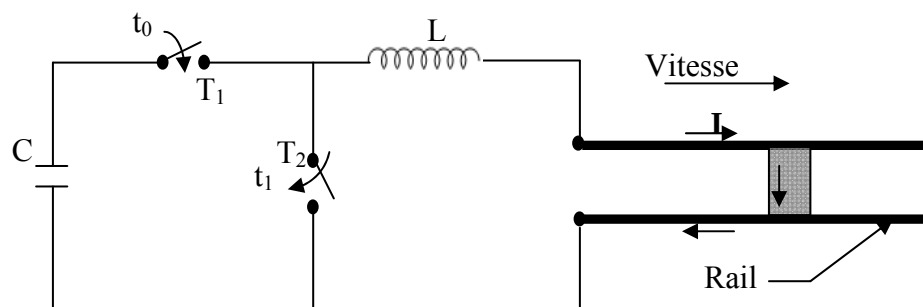


Figure. II.4 : Principe de l'alimentation de lanceur à rail.

La figure (II.5) montre que l'allure de courant en fonction de temps

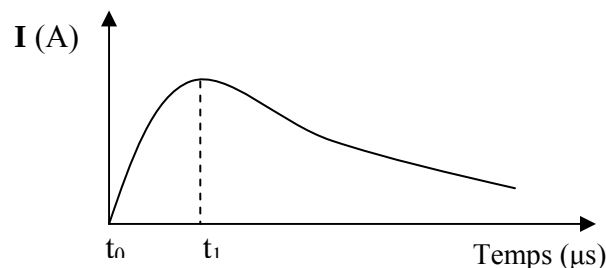


Figure II.5 : le courant en fonction temps.

II.8.1.2.phase (2)

La figure (II.6) représente Phase d'amorçage d'interrupteur T_2 (à $t = t_1$)

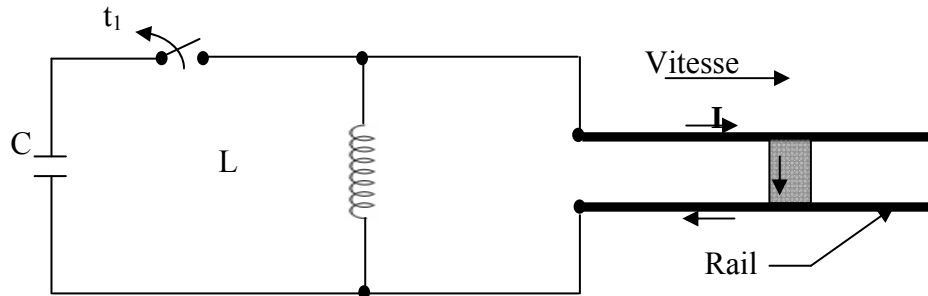


Figure. II.6 : Phase d'amorçage d'interrupteur T_2 (à $t = t_1$).

La figure (II.7) montrée que l'allure de courant en fonction de temps

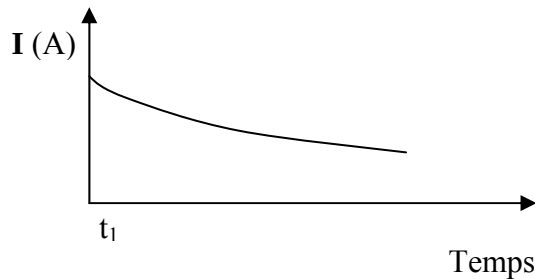


Figure :II.7 :le courant en fonction temps .

La force de propulsion dans le propulseur à rail dépend fortement de la source d'énergie alimentant les rails. On distingue deux types d'alimentation de lanceurs à rails [20].

II.8.1.3.Décharge simple

Dans ce type d'alimentation, un seul banc de condensateur est déchargé dans le rail, on distingue deux types de décharge (voir les figures II.4.et.II.8) :

II.8.1.3.1.Simple courant

Le courant injecté dans le rail résulte d'une seule décharge du banc de condensateur (figure. II.5).

II.8.1.3.2. Multiple courant

L'alimentation multiple courant consiste à une alimentation distribuée de l'énergie électrique stockée dans une bobine. 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.

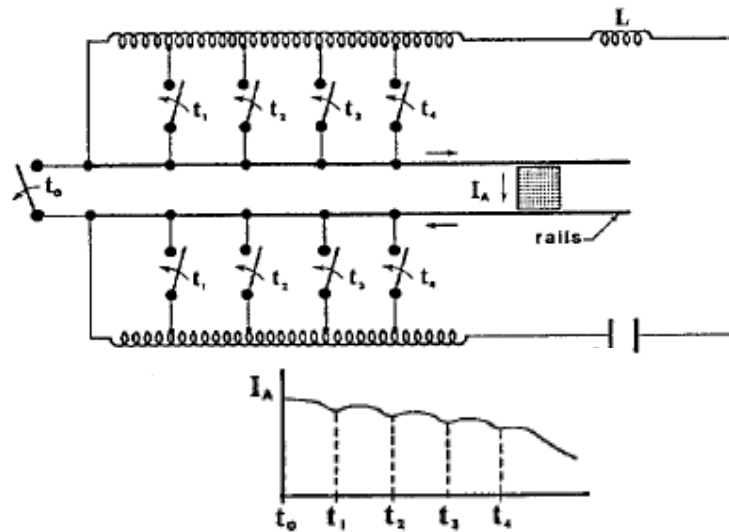


Figure. II.8: Décharge de multiple courant

II.8.1.4. décharges augmentées

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

II.8.2. Alimentation par décharge successive

Par un seul interrupteur, les bancs peuvent alimenter le propulseur. La décharge des bancs se fait d'une manière successive (voir la figure II.9).

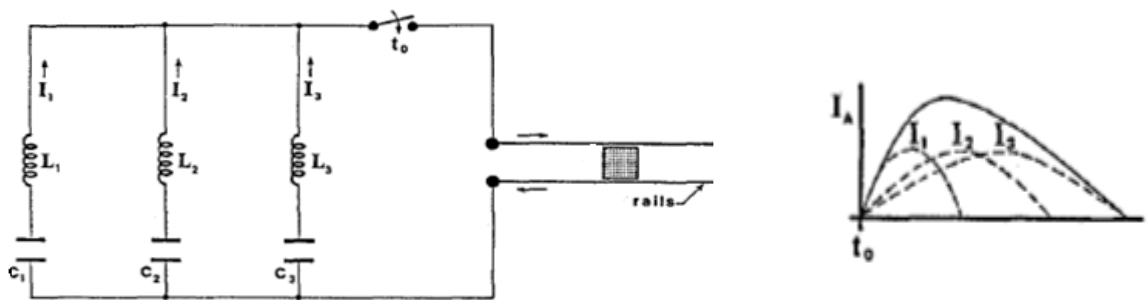


Figure. II.9 : Alimentation par décharges successives

II.8.3. Alimentation distribuée le long de rail

Ce dernier type est le plus utilisé et où les bancs de condensateur sont distribués le long des rails illustrés sur la figure suivante Comme le montrera la figure (II.10) [18].

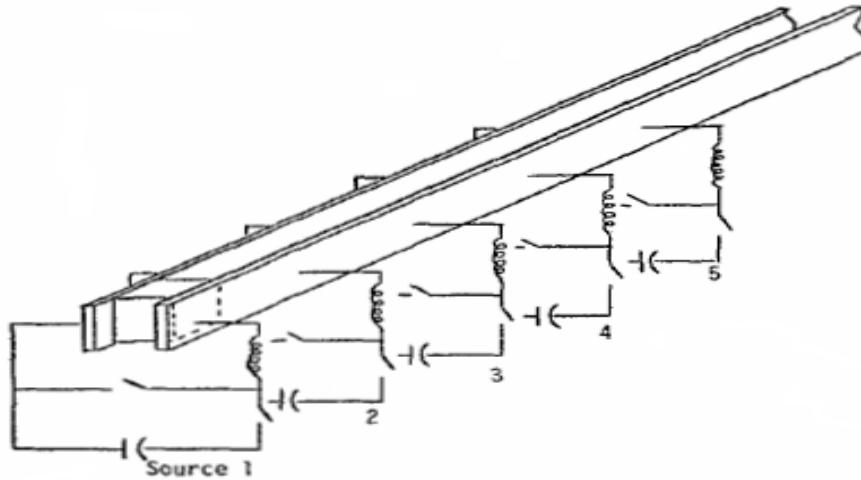


Figure. II.10 : Distribution d'énergie le long de rail.

La figure (II.11) montre le schéma électrique de la distribution d'énergie avec l'allure du comportement du courant.

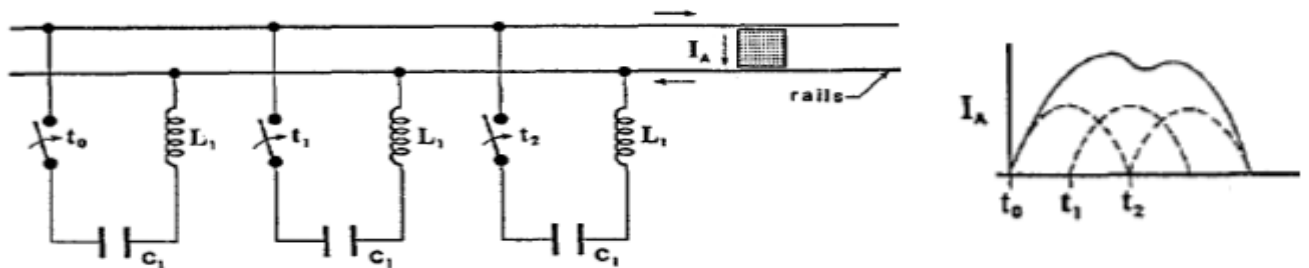


Figure. II.11 : Schéma électrique de l'alimentation augmentée et distribuée

Les avantages de ce type d'alimentation sont [18][20]:

- 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.9. Description du lanceur à rail

On peut distinguer deux principaux éléments composant un lanceur électromagnétique à rail.

- Le tube de lancement.
- Le projectile.

II.9.1. Le tube de lancement

Parmi les trois types des propulseurs électriques, le propulseur à rails est, de par son principe, le plus simple à mettre en œuvre. Il est constitué d'un tube de lancement, lui-même composé de deux rails conducteurs, séparés par un isolant et insérés dans un bâti de maintien, figure (II.12)

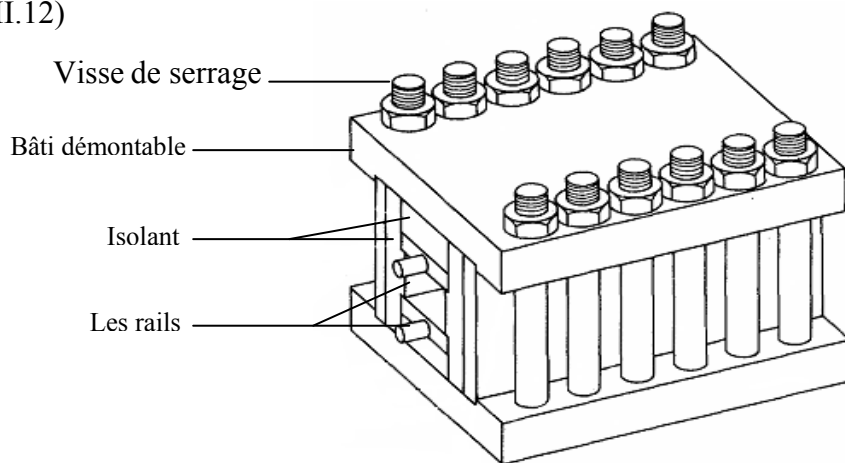
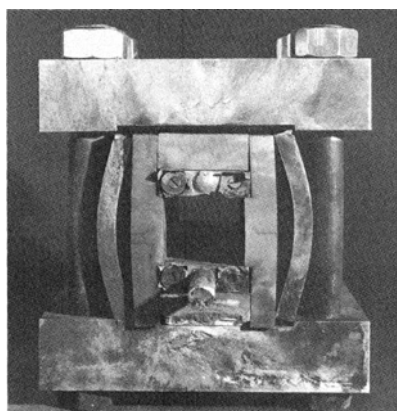


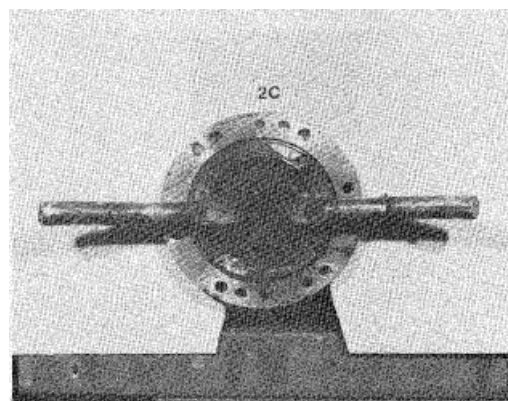
Figure. II.12: Ensemble du tube de lancement du propulseur à rails.

II.9.2. Le bâti

Selon le type de propulseur carré ou rond, on distingue deux géométries de bâtis Figure (III.13) [21].



a)



b)

Figure .II.13: Types des propulseurs à rail : a) propulseur de forme carrée, b) propulseur d'une forme ronde

Le rôle de bâti est le maintien et la limitation de l'écartement des rails due aux forces répulsives pendant le lancement. Il existe différents types de bâtis et parmi lesquels, on cite :

- Bâti en acier.
- Bâti en céramique.
- Bâti en matériaux composites.
- Si le bâti en acier contribue à une meilleure tenue mécanique des rails, il peut être par contre siège de courants de Foucault entraînant ainsi des pertes qui réduiront le rendement du propulseur.
- Le bâti en céramique peut s'avérer comme un premier substituant mais reste assez vulnérable par rapport aux efforts de traction malgré l'importance de sa rigidité mécanique.
- Le bâti en matériaux composite se présente comme une solution aux deux inconvénients cités dans les deux premiers cas. Ce matériau qui est constitué de résine et renforcé par la fibre de verre sous efforts précontraints est caractérisé par une bonne isolation électrique et conforté par une grande plasticité. Ainsi, le problème des courants de Foucault et de l'écartement du tube de lancement est évité [22].

II.10. Les rails

Les rails sont généralement en cuivre et peuvent avoir des formes variables selon la forme de la section du propulseur (ronde ou carrée). Ils sont séparés du bâti par un isolant qui supporte une tension allant jusqu'à 10 kV. Ce dernier est constitué généralement d'un matériau composite.

II.11. Le projectile

Un choix judicieux de la forme en U du projectile permet d'assurer un meilleur contact entre ce dernier et les rails. A cet effet on propose le modèle représenté sur la figure(III.14), tel que :

- F_R est la force appliquée sur le rail à travers le projectile (la brosse de contact) ;
- F_z est la force de propulsion (responsable sur le déplacement du projectile).

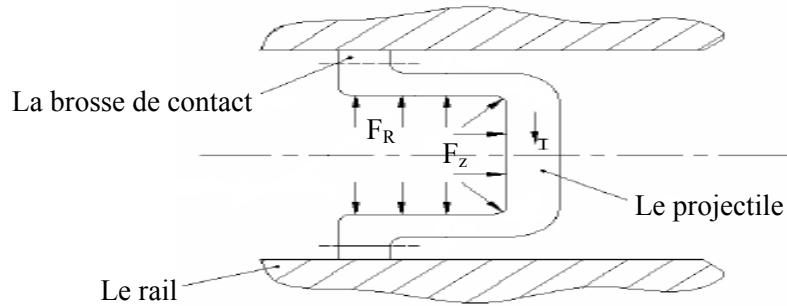


Figure. II.14 : Forces dans un projectile en forme de U.

La forme générale du projectile est déterminée par le choix du type de son contact avec les rails:

- Sabot (les ponts de courant)

C'est la partie arrière du projectile qui contient des éléments conducteurs assurant la circulation du courant entre les rails (le contact).

- Isolant

Il constitue la grande partie du projectile. Il assure l'isolation entre les ponts et maintient le perforant.

- Perforant

Généralement en acier dur, le perforant constitue la tête du projectile pour pénétrer dans la cible.

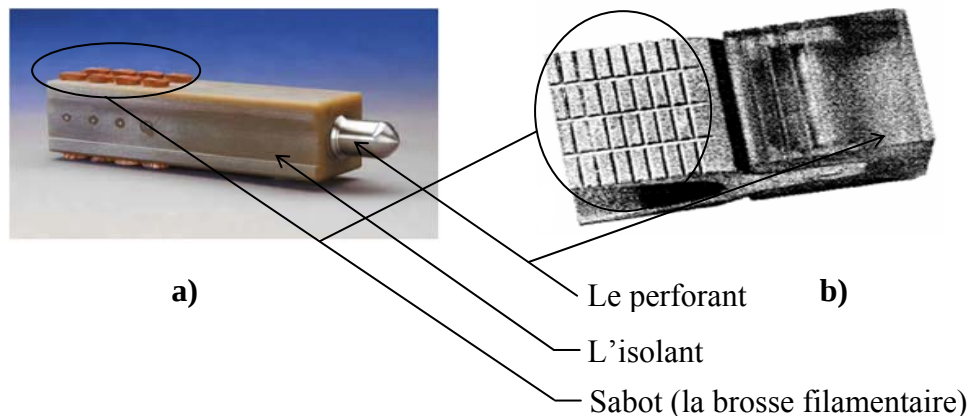


Figure. II.15 : a) Projectile carré, b) Projectile de forme U en aluminium [23].

Les deux types de projectile a) et b) peuvent être insérés dans un tube de lancement carré, la figure ci-dessous illustre le projectile rond inséré dans le tube de lancement rond.

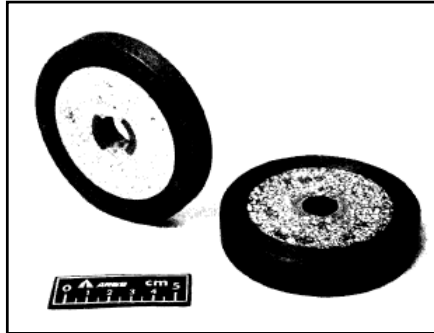


Figure. II.16 : Projectile du propulseur de forme ronde [24].

II.12.Conclusion

D'après la connaissance Parmi les trois types des propulseurs électromagnétiques, le propulseur à rail se présente comme un système de propulsion simple par son architecture et son alimentation. Une attention particulière doit être accordée au mode d'alimentation. Ce type de propulseur sollicite des courants d'amplitude élevée.

CHAPITRE III

METHODES DE CALCUL DE LA FORCE

III.1. INTRODUCTION

Le propulseur à rail étant un système électromagnétique constitué de conducteur baignant dans un milieu homogène. Il est donc géré par les équations de Maxwell.

Le fonctionnement de ce système résulte des interactions entre l'induction magnétique **B** et le courant **I**.

Les rails constituent la source du champ et le projectile matérialisé le support de courant.

L'outil utilisé pour l'étude des paramètres qui conditionnent la force de propulsion tels que le courant et plus particulièrement sa répartition fait appel à la méthode des éléments finis. Cette méthode présente une très grande souplesse dans l'analyse des systèmes électromagnétiques.

III.2. Les équations électromagnétiques

Quatre équations de Maxwell sont à la base de tout phénomène électromagnétique.

III.2.1. Les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell, complétées par la loi de la force de Lorentz permettent de faire une description complète de toutes les interactions électromagnétiques [25].

Nous disposons alors le système d'équations suivant :

- Equation de Maxwell-Faraday

$$\overrightarrow{Rot}E = -\partial B / \partial t \quad (III.1)$$

- Equation de Maxwell-Ampère

$$\overrightarrow{Rot}H = \vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t \quad (III.2)$$

- Equation de conservation du flux magnétique

$$Div \vec{B} = 0 \quad (III.3)$$

- Equation de Maxwell-Gauss

$$Div \vec{D} = \rho \quad (III.4)$$

Nous pouvons ajouter l'expression de la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (III.5)$$

Suivant la loi d'ohm on obtient :

$$\vec{J} = \overrightarrow{J_{ind}} + \overrightarrow{J_S} \quad (III.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) + \overrightarrow{J_S}$$

Les équations (III.1) et (III.2) sont les équations de couplage électromagnétique.

Les équations (III.3) et (III.4) sont les équations de conservation. Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut joindre à ces dernières des relations qui définissent la matière ou le milieu à étudier.

Elles sont définies par :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{III. 7})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{III. 8})$$

Avec $\mu = \mu_r \mu_0$

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

III.2.2. Modèle magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient dans le temps (le cas de fonctionnement du propulseur à rail). C'est à dire que le terme $\partial \vec{B} / \partial t$ n'est pas nul, les champs électriques et magnétiques sont alors couplés par la présence des courants induits.

Ecrivons les deux équations (III.1) et (III.3) de Maxwell qui se présentent sans terme

Source :

$$\text{Rot } \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t \quad (\text{III. 9})$$

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (\text{III. 10})$$

La deuxième équation indique que $\vec{B}$ est un champ de rotationnel. Ceci implique qu'il existe un vecteur $\vec{A}$, tel que:

$$\vec{B} = \text{Rot } \vec{A} \quad (\text{III. 11})$$

Ce vecteur $\vec{A}$ est appelé le potentiel vecteur magnétique.

La substitution de (11) dans (12) donne:

$$\text{Rot } (\vec{E} + \partial \vec{A} / \partial t) = \vec{0} \quad (\text{III. 12})$$

Ceci nous permet de constater que le champ $(\vec{E} + \partial \vec{A} / \partial t)$ est un champ conservatif, il vient alors que:

$$(\vec{E} + \partial \vec{A} / \partial t) = - \text{Grad } V \quad (\text{III. 13})$$

$$\text{Soit : } \vec{E} = - \partial \vec{A} / \partial t - \text{Grad } V \quad (\text{III. 14})$$

V : est le potentiel électrique scalaire du champ électromagnétique; on remarque qu'en régime variable, l'expression de E dépend à la fois de V et de $\vec{A}$.

D'après l'équation:

$$\vec{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{J}_t \quad (\text{III. 15})$$

Or $\vec{J}_t = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B})$

$$\vec{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{III. 16})$$

$$\Rightarrow \vec{\text{Rot}} (\nu \vec{\text{Rot}} \vec{A}) = -\sigma \partial \vec{A} / \partial t - \sigma \vec{\text{Grad}} V + \vec{J}_s \quad (\text{III. 17})$$

Pour que la solution soit unique, on doit fixer la divergence de $\vec{A}$.
On obtient :

$$\begin{cases} \vec{\text{Rot}} (\nu \vec{\text{Rot}} \vec{A}) = -\sigma \partial \vec{A} / \partial t - \sigma \vec{\text{Grad}} V - \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) + \vec{J}_s \\ \text{Div} \vec{A} = 0 \end{cases} \quad (\text{III. 18})$$

$$(\text{III. 19})$$

Dans le cas où les courant induits par mouvement sont nuls et aussi le $\vec{\text{Grad}} V$ en axisymétrique est nul l'équation du système devient:

$$\vec{\text{Rot}} (\nu \vec{\text{Rot}} \vec{A}) + \sigma \partial \vec{A} / \partial t = \vec{J}_s \quad (\text{III. 20})$$

L'utilisation de ce modèle est très répandue dans l'étude des machines électriques des dispositifs du chauffage par induction, des transformateurs...etc.

Pour son mode de fonctionnement, l'alimentation du propulseur est une alimentation en courant transitoire, le traitement du système d'équations caractéristiques, nécessite une discrétisation en pas à pas dans le temps (Échantillonnage temporel).

Si un algorithme du type Euler explicite est adopté, nous aurons à chaque pas de temps :

$$\Delta t_i : J_i = (J_i - J_{i-1}) / \Delta t_i$$

$$\text{Ainsi : } \partial A / \partial t = (A_i - A_{i-1}) / \Delta t_i$$

Les calculs seront être effectués à chaque pas du temps t_i .

III.3.Méthode de calcul des forces magnétiques

Pour évaluer les forces magnétiques, nous pouvons procéder par diverses méthodes. Parmi celles-ci, on peut citer :

- La méthode de variation de l'énergie et de la coénergie magnétiques ;
- La méthode du tenseur de Maxwell ;
- La méthode des travaux virtuels.

III.3.1.Méthode de variation de la coénergie et de l'énergie magnétique

La force magnétique dans ce cas est la dérivée de l'énergie magnétique par rapport au déplacement à flux constant ou c'est la dérivée de la coénergie à courant constant (figure.III.1).

Si F représente la composante de la force magnétique totale suivant une direction donnée S on aura :

$$F_S = \frac{\partial \overline{W}}{\partial S} / i=cst \quad (III.22)$$

$$F_S = \frac{\partial W}{\partial S} / \Phi=cst \quad (III.23)$$

$$\overline{W} = \int_{\Omega} \left(\int_0^H B dH \right) , \quad W = \int_{\Omega} \left(\int_0^B H dB \right) \quad (III.24)$$

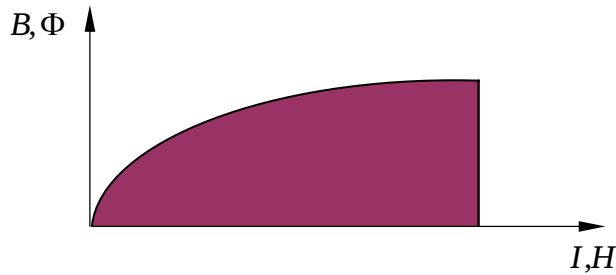


Figure III.1 Courbe d'aimantation

Numériquement, les dérivations peuvent être obtenues par les relations suivantes:

$$F_S = \frac{\overline{W}_{S+\Delta S} - \overline{W}_S}{\Delta S} / i=cst \quad (III.25)$$

$$F_S = \frac{W_{S+\Delta S} - W_S}{\Delta S} / \Phi=cst \quad (III.26)$$

III.3.2.Méthode du tenseur de Maxwell

Considérons un barreau conducteur parcouru par un courant j , ce barreau est placé dans une zone où règne un champ magnétique.

D'après la loi de Laplace ce barreau sera soumis à une force magnétique découlant de l'interaction entre le courant circulant dans le barreau et le champ magnétique extérieur, figure(III.2).

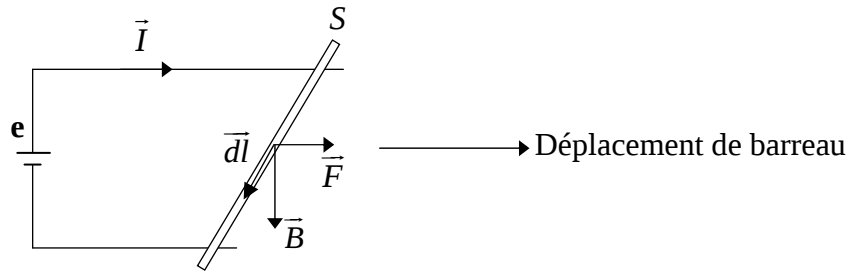


Figure.III.2 Principe de la loi de Laplace

dl : Élément de longueur

S : La section du barreau

L'équation de Laplace découle des équations de Maxwell. Elle donne l'expression de la force s'exerçant sur un conducteur idéal placé dans un champ d'induction magnétique.

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (\text{III.27})$$

Cette équation peut être exprimée sous sa forme locale $\vec{J}$ donnée par:

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

La force globale est présentée par

$$\vec{F} = \int_V \vec{f} dV = \int_V (\vec{J} \wedge \vec{B}) dV \quad (\text{III.29})$$

En utilisant l'équation de Maxwell (III.2) nous aurons:

$$\vec{f} = \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{H} \wedge \vec{B} = \mu \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{H} \wedge \vec{H} \quad (\text{III.30})$$

En utilisant le symbole Nabla (∇), l'équation de l'approximation de formule Runge-Kutta Devient [26].

$$\vec{f} = \mu \left\{ (\vec{H} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} - \frac{1}{2} \nabla (H^2) \right\} \quad (\text{III.31})$$

Pour la composante f_x nous avons:

$$f_x = \mu \left\{ H_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + H_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + H_z \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (H_x^2 + H_y^2 + H_z^2) \right\} \quad (\text{III.32})$$

Le tenseur de Maxwell permettra d'étudier la force s'exerçant sur un matériau de volume V , en connaissant seulement la répartition du champ aux différents points d'une surface fermée entourant le volume V .

$$F_x = \int_V \text{Div}(\vec{T}_1) dV \quad (\text{III.33})$$

$\vec{T}_1$ Est l'une des composantes du tenseur de Maxwell.

En transformant l'intégrale de volume à une intégrale de surface par le théorème de la divergence nous aurons:

$$F_x = \oint_S \vec{T}_1 \cdot \vec{n} ds \quad (\text{III.34})$$

$\vec{n}$: Vecteur normal à la surface S entourant le volume V .

$$T_1 \begin{pmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \end{pmatrix} \quad (\text{III.35})$$

$$t_{11} = \mu H_x^2 - \frac{1}{2} H^2 \quad (\text{III.36})$$

$$t_{12} = \mu H_x H_y$$

$$t_{13} = \mu H_x H_z$$

$$F_x = \oint_S \left\{ \left(\mu H_x^2 - \frac{1}{2} H^2 \right) n_x + \mu H_x H_y n_y + \mu H_x H_z n_z \right\} ds \quad (\text{III.37})$$

Où (n_x, n_y, n_z) sont les composantes du vecteur unitaire $\vec{n}$.

La formule générale de la force est donc:

$$F_x = \oint_S \vec{T}_1 \cdot \vec{n} ds \quad (\text{III.38})$$

Tel qu'est le tenseur de Maxwell :

$$\vec{T} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{Bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

La méthode du tenseur de Maxwell est économique et rapide puisque la force est calculée seulement sur la surface fermée, qu'on choisit arbitrairement. Entourant l'objet à étudier. Cette méthode ne tient pas compte de la saturation [27].

III.3.3.Méthode des travaux virtuels

Elle est basée sur la méthode des éléments finis pour évaluer directement la force magnétique totale. Le domaine \ déformé est décomposé en sous domaines $\mathbf{V}$ (éléments finis) sur les quels. Toute intégration est conduite en fonction des coordonnées locales (u y w).En faisant appel à la coénergie.

$$F_s = \frac{\partial}{\partial S} \left(\int_v \left(\int_0^H B dH \right) dV \right) \quad (\text{III.40})$$

$$F_s = \frac{\partial}{\partial S} \sum_e \left(\int_{v_e} \left(\int_0^H B dH \right) d\Omega_e \right) \quad (\text{III.41})$$

En introduisant le système de coordonnées locales l'équation devient

$$F_s = \frac{\partial}{\partial S} \sum_e \left(\int_{v_{e\text{locales}}} \left(\int_0^H B dH \right) |G| dudvdw \right) \quad (\text{III.42})$$

$|G|$ Est le déterminant de la matrice Jacobine de transformation de coordonnées. Un arrangement de (III. 43) permet d'obtenir l'expression suivante :

$$F_s = \frac{\partial}{\partial S} \sum_e \int_{v_{e\text{locales}}} \left[-B^T \cdot G^{-1} \cdot \frac{\partial G}{\partial S} \cdot H + \int_0^H B dH \cdot |G|^{-1} \frac{\partial |G|}{\partial S} \right] dudvdw \quad (\text{III.43})$$

Seule la matrice Jacobine et son déterminant varient en fonction du déplacement. La méthode des travaux virtuels a été prouvée rapide, exact et fiable.

III.4.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, les formulations ainsi que les différents modèles mathématiques régissant les phénomènes électromagnétiques.

L'objectif de ces formulations est le calcul des forces d'origine magnétique qui caractérisent notre système de propulsion.

CHAPITRE IV

Etude électrique du propulseur à rail

IV.1. INTRODUCTION

Dans notre étude, nous avons fait appel au logiciel de simulation (MATLAB) qui a été utilisé en tant qu'outil d'analyse. Ce logiciel basé sur la méthode de Runge-kutta avec pas de 10^{-4} , et permet le calcul des états mécaniques et électriques du système. Ces états permettent d'accéder à des nombreuses grandeurs globales ou locales : courant, force, vitesse et déplacement.

IV.2. Analyse le circuit d'alimentation

La figure (IV.1) montre la structure d'alimentation électrique pour propulseur à rail, il est actionné avec deux phases pour " k " = 0 et " k " = 1, au premier lieu on prend " k " = 0 (l'ouverture de " K ") et on étudie l'allure du courant dans la partie de déchargement, l'inductance décharge sa propre énergie, on distingue que toutes les impédances existant dans le circuit sont représentées; l'ensemble (rails-projectile) et l'alimentation.

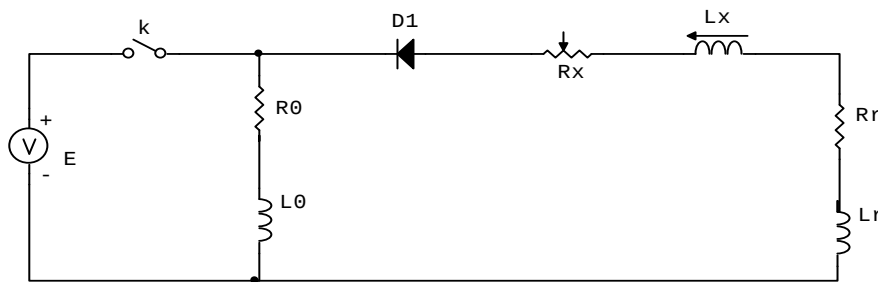


Figure .IV. 1 : Circuit électrique d'alimentation de propulseur

En terme simple la fermeture de " K " pour but de charger l'inductance d'alimentation L_0 , par contre l'ouverture de " K " exige le déchargement de l'inductance dans le circuit des rails qui entraîne la poussée du système.

IV.2.1. Cas de chargement

Comme nous avons dit dans le premier paragraphe, la fermeture de " k " nous permettons de calculer le courant de chargement.

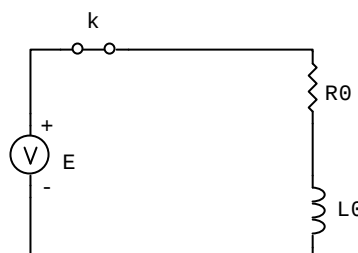


Figure .IV. 2 : Circuit électrique active avec " K "=1, chargement de L_0

L'application de la loi de "Kirchhoff" dans la première maille donne :

$$E = R_0 i + L_0 \frac{di}{dt} \Rightarrow \text{Com}=1 \quad (\text{IV.1})$$

On note que la l'action sur "k" est correspond d'une point de commande (T)

T = COM = commande de circuit.

IV.2.2. Cas de déchargement

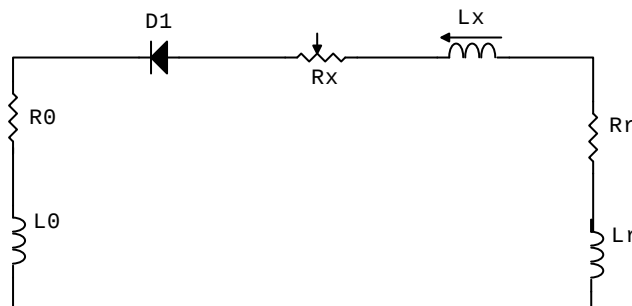


Figure. IV. 3 : Circuit électrique active "k" = 0 déchargement L_0

L'analyse du circuit électrique, figure (IV.3), donne :

$$\text{COM}=0 \Rightarrow R_0 i + L_0 \frac{di}{dt} + L_1 \frac{di}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{L_x i}{dt} \right) + (R_x X + R_1) i = 0 \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Si COM} = 1 \Rightarrow T = 1 \quad D=0 \Rightarrow D = (1-\text{COM}) \text{ avec } d : \text{DIODE}$$

$$\text{Si COM} = 0 \Rightarrow T = 0 \quad D=1 \Rightarrow T = \text{COM}$$

En multiplier la relation (IV.1) par (T) on trouve :

$$-ET + (R_0 i + L_0 \frac{di}{dt})T = 0 \quad (\text{IV.3})$$

La relation (IV.2) devient :

$$(1-T)[(R_0 i + L_0 \frac{di}{dt}) + L_1 \frac{di}{dt} + \frac{d}{dt} (L_x i) + (R_x X + R_1) i] = 0 \quad (\text{IV.4})$$

D'après les équations (IV.3) et (IV.4) on trouve :

$$-E(T) + (T+1-T)(R_0 i + L_0 \frac{di}{dt}) + (1-T)(L_1 \frac{di}{dt} (R_x X + R_1) i) + (1-T) \frac{d}{dt} (L_x i) = 0 \quad (\text{IV.5})$$

En simplifier l'équation (IV.5) on a :

$$R_0 i + L_0 \frac{di}{dt} + (1-T) L_1 \frac{di}{dt} + (1-T) (R_x X + R_1) i = E(T) + (1-T) \frac{d}{dt} (L_x i) \quad (\text{IV.6})$$

Alors :

$$[R_0 + (1-T)(R_x X + R_1)]i + [L_0 + (1-T)L_1] \frac{di}{dt} = E(T) + (1-T) \frac{d}{dt}(L_x i) \quad (IV.7)$$

La tension résistive V_R et inductive V_L sont montrés sur les relations (IV.8) (IV.9) respectivement:

$$[R_0 + (1-T)(R_x X + R_1)]i = V_R \quad (IV.8)$$

$$[L_0 + (1-T)L_1] \frac{di}{dt} = V_L \quad (IV.9)$$

$$E(T) + (1-T) \frac{d}{dt}(L_x i) = V_{LX} \quad (IV.10)$$

IV.3.L'allure des grandeurs électriques et mécaniques

Pour avoir l'allure des grandeurs électriques et mécaniques régissant le système, on fait appel au logiciel de simulation "SIMILINK" sous MATLAB. Ces grandeurs sont identifiées par l'équation (IV.7).

Cette équation est composée de trois termes qui sont : les chutes de tension résistives et inductives ainsi que l'alimentation.

IV.3.1.partie électrique

Le déchargement de L_0 crée une variation de courant en fonction du temps, pour produire une variation de l'induction magnétique ($\partial B / \partial t \neq 0$), les chutes de tension résistives R_r , R_L représentant les résistances résiduelles dans le projectile et les rails respectivement, la figure (IV.4) montre la simulation de l'équation (IV.8).

I : le courant.

T : com.

X : déplacement.

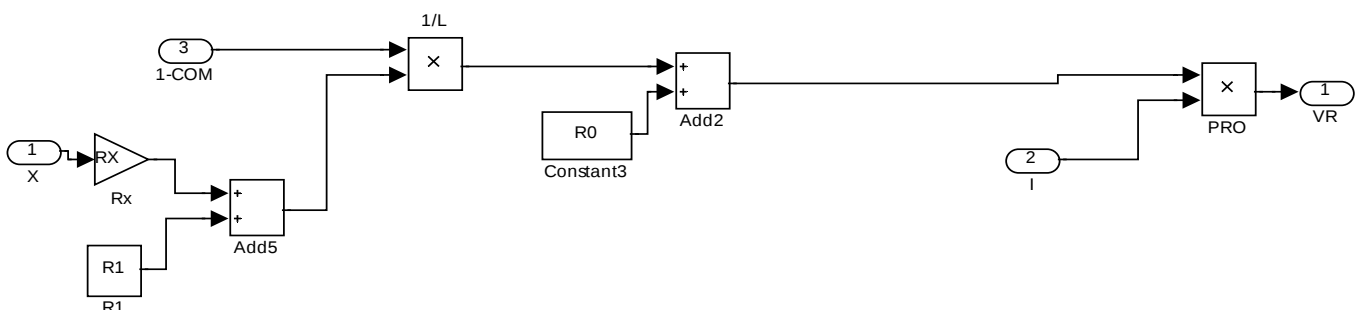


Figure .IV.4 : Représentation le terme résistive (V_R)

Comme la figure ci-dessous la représentation schématisée de l'équation (IV.8) de la partie inductive est montrée sur la figure (IV.5).

$$V_L = [L_0 + (1 - T)L_1] \frac{di}{dt} \quad (IV.11)$$

La variation du courant $I(t)$ par rapport au temps c'est une fonction de V_{LX} et provoque par la fermeture et l'ouverture de "k".

La figure (IV.5) schématise la fonction $\frac{di}{dt}$

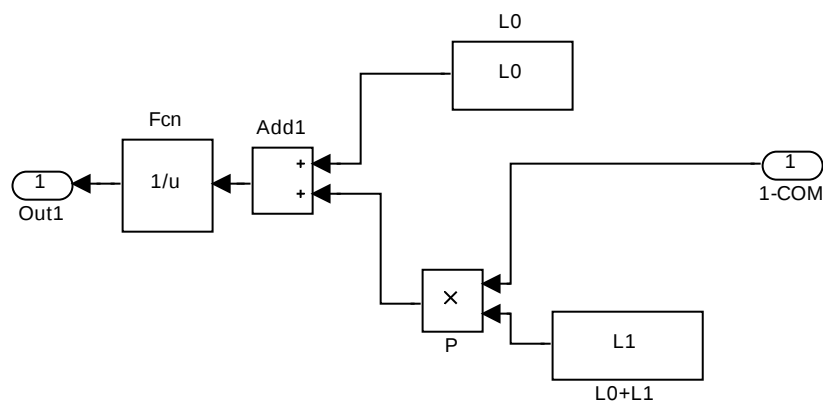


Figure .IV.5 : Représentation le terme inductif (V_L)

Les chutes de tension inductive, notées par V_L sont répressif sur la figure ci-dessus

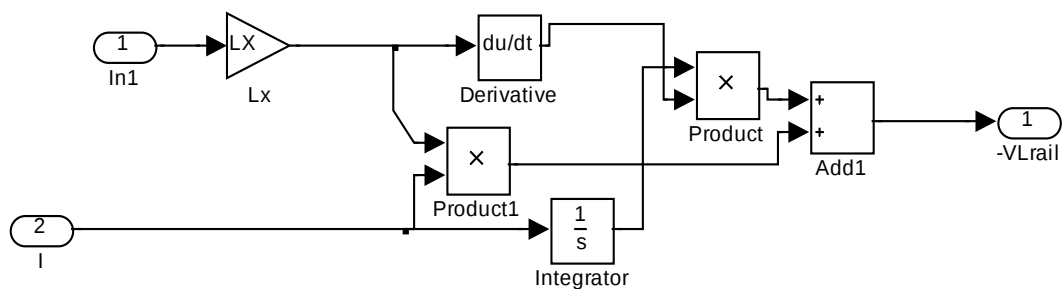


Figure .IV.6 : Représentation inductive (V_{LX}) (rail)

L'ensemble des chutes de tension inductives et résistives a été simulé dans la figure (IV.5) comme suite :

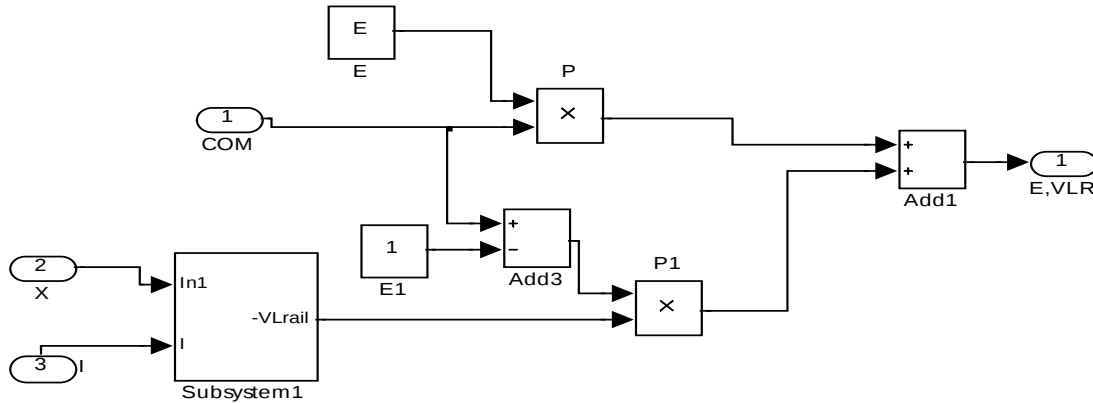


Figure. IV.7 : Circuit inductive

IV.3.2. partie mécanique

On peut trouver l'équation de la force par la dérivée de l'énergie, qui est une méthode standard pour le calcul des forces dans toutes les propulseurs.

L'équation de mouvement peut être facilement calculée, en tenant en compte, les forces résistives comme le frottement et la résistance d'air, mais on a négligé ces forces dans notre analyse, alors la deuxième loi de Newton donne :

$$[d^2x(t)/dt^2] = \frac{1}{2m} L' I(t)^2, \frac{dx(0)}{dt} = 0, x(0)=0 \quad (IV.13)$$

La réintégration de l'équation (IV.13) par rapport au temps donne l'équation de la vitesse $v(t)$ et de position $x(t)$ respectivement:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \int \frac{1}{2m} L' I(t)^2 dt \quad (IV.14)$$

Pour avoir le déplacement $x(t)$ on fait une deuxième intégration à l'équation (IV.14) par rapport au temps

$$X(t) = \int_0^t \int_0^t \frac{1}{2m} L' I(t)^2 dt dt \quad (IV.15)$$

$$i_E = 0 \quad T = 0$$

$$i_E = i_0 \quad T = 1$$

$$i_0 = i_1 \quad T = 0 \Rightarrow i_1 = (1-T)i_0$$

$$i_1 = 0 \quad T = 1 \Rightarrow i_E = T i_0$$

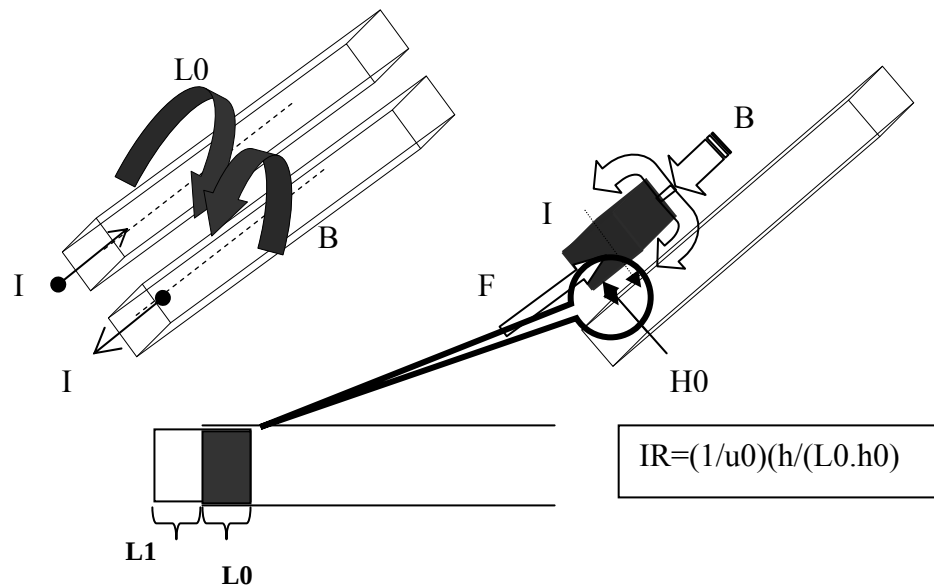


Figure. IV.8 : Position initiale du projectile

La force de propulsion c'est une fonction de l'inductance L et le courant I le calcul de cette force est montré sur la référence [32] et donner par la relation (IV.16) comme suit:

$$F = \frac{1}{2} \frac{dL(x)}{dx} (i_1)^2 = \frac{1}{2} \frac{dL(x)}{dx} [(1-T) i_0]^2 \quad (IV.16)$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{dL(x)}{dx} (i_1)^2 (1-T) \quad (IV.17)$$

La figure ci-dessus schématisée l'équation mécanique du système:

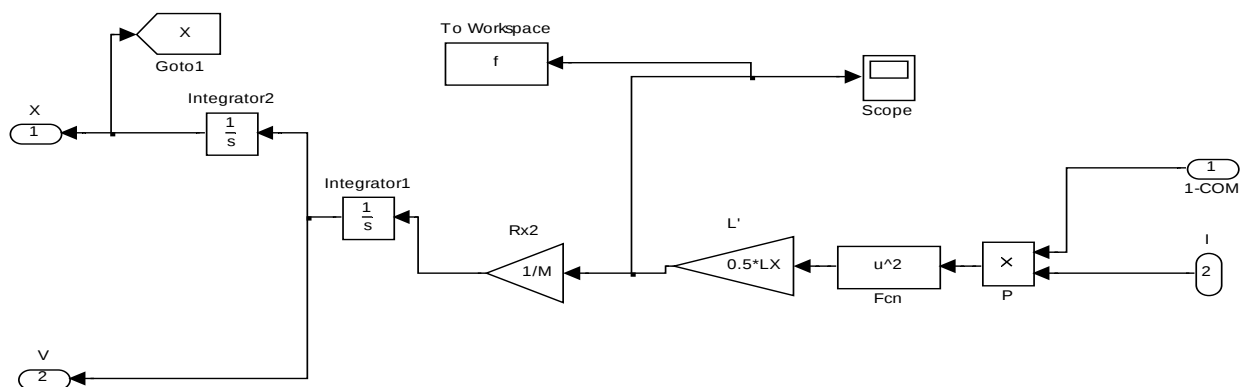


Figure .IV.9 : Modèle de l'équation mécanique

The diagram illustrates the internal components of Subsystem4:

- Inputs:** A signal from "From1" enters a port labeled "[i]".
- COM Block:** Receives input from the "[i]" port and outputs "In1" and "1-COM". The "1-COM" output is distributed to several other blocks.
- MEC Block:** Receives "1-COM" and outputs "I" and "V". The "V" output passes through a gain block "v" before reaching the "X" block.
- X Block:** Receives inputs from "MEC" and "1-COM resistance". It outputs "VR" and feeds into the "Integrator".
- Integrator (1/s):** Processes the signal from the "X" block and outputs to the "Goto" block.
- Goto Block ([i]):** Receives feedback from the "Integrator" and provides a feedback path to the "MEC" block.
- Control Signal Path:** The output of the "Integrator" also branches off to feed into the "Add3" block and the "1/L" block.
- Add3 Block (+/-):** Sums multiple signals (including one from the "COM" block) and outputs to the "1/L" block.
- 1/L Block:** Represents the inverse of inductance; its output is fed back into the "Integrator" and also branches off to feed into the "COM" block.
- COM Block (Right):** Receives inputs from the "Add3" block and the "1/L" block. It outputs "X E, VLr" and "E, Vlr".
- Final Output:** The output of the "COM" block is multiplied by "1/L1" to produce the final output "1-COM Out1".

Electromécanique - 2009

La figure (IV.11) montre le courant en fonction de temps:

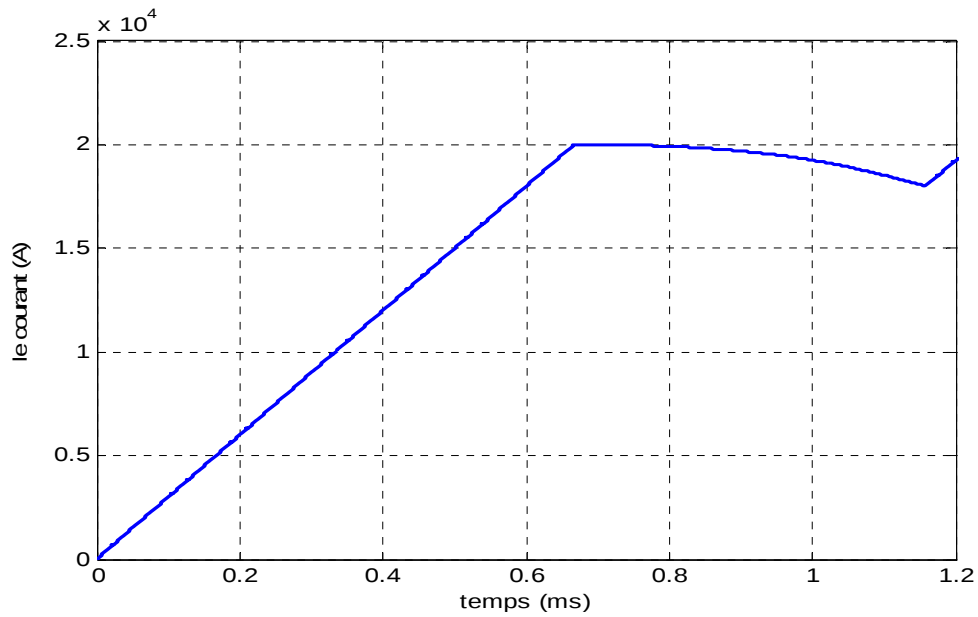


Figure. IV.11 : Le courant en fonction de temps.

La figure ci-dessus présentée la force en fonction de temps

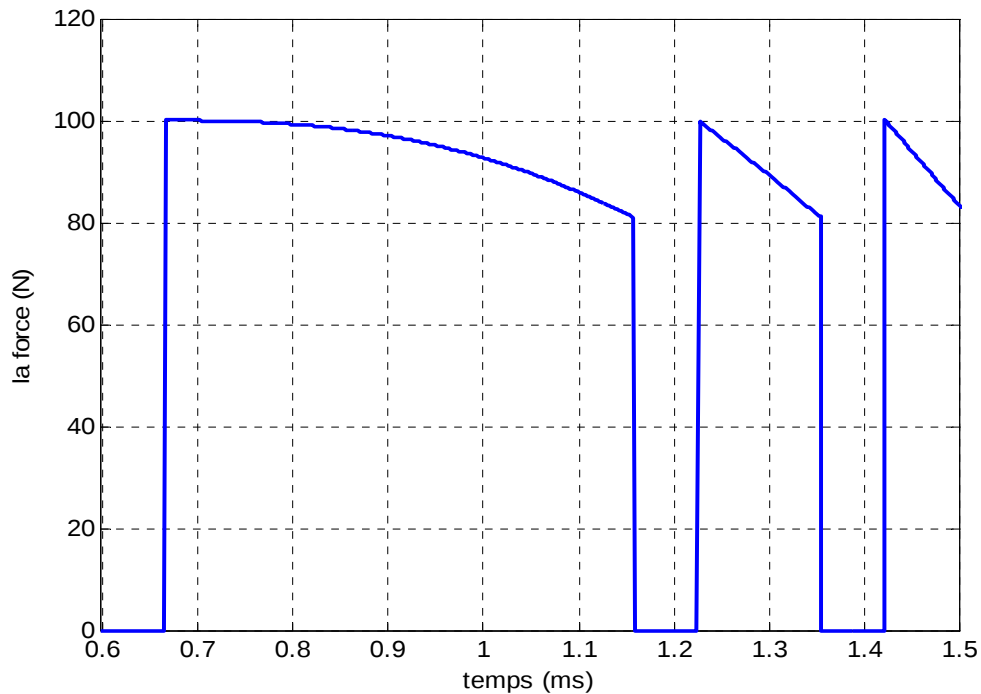


Figure. IV.12 : la force en fonction de temps

L'allure du $v(t)$ est présente sur la figure suivant.

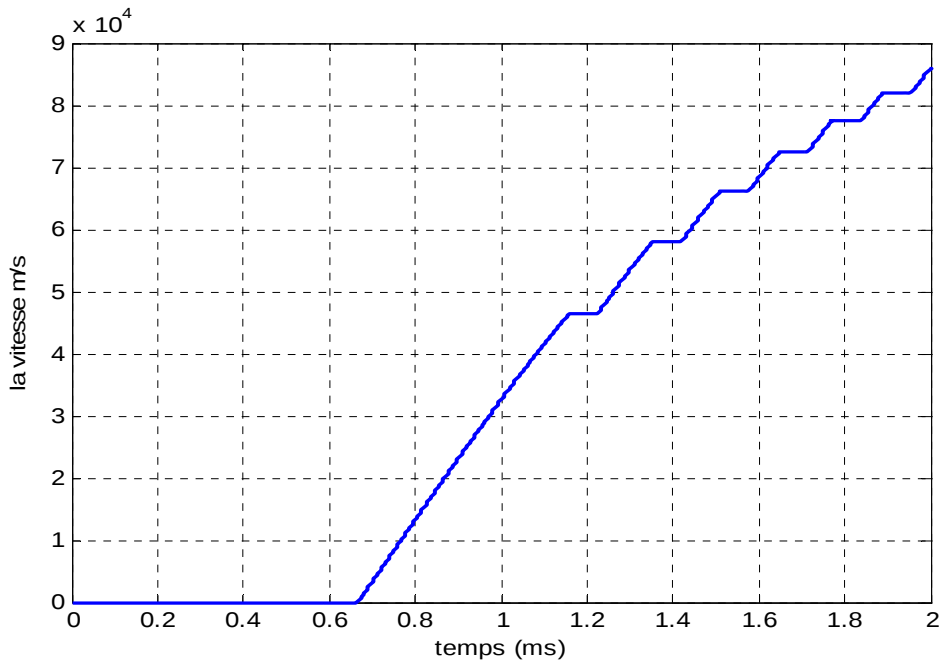


Figure. IV.13 : la vitesse en fonction de temps

La figure (IV.14) présenté le déplacement en fonction de temps.

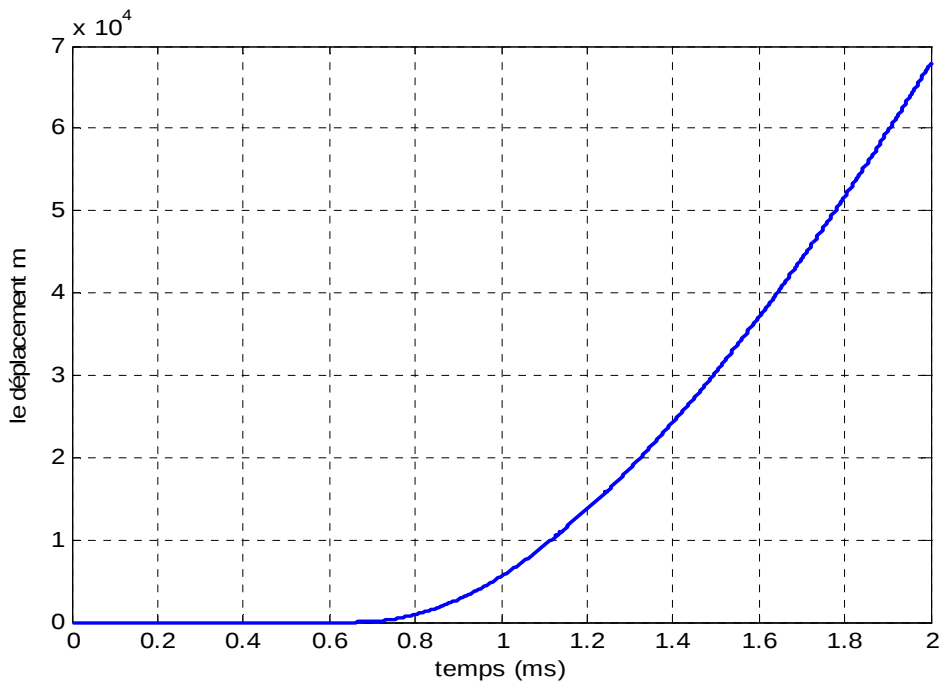


Figure. IV .14 : Le déplacement en fonction de temps

La figure ci-dessus présentée l'accélération en fonction de déplacement.

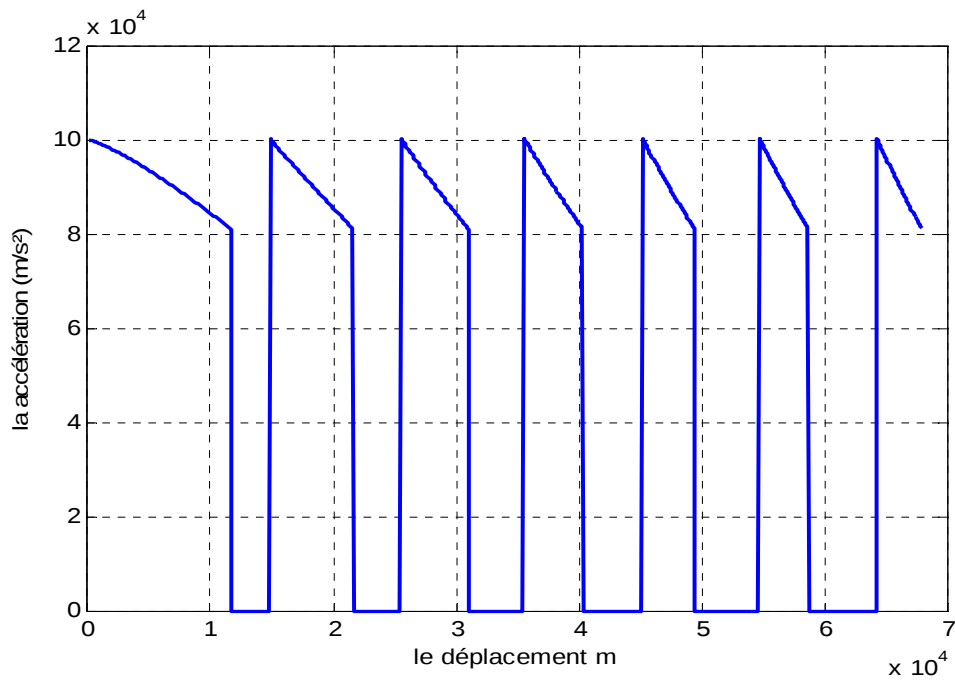


Figure .IV.15 : l'accélération en fonction de déplacement

La figure (IV.16) présentée la vitesse en fonction de déplacement.

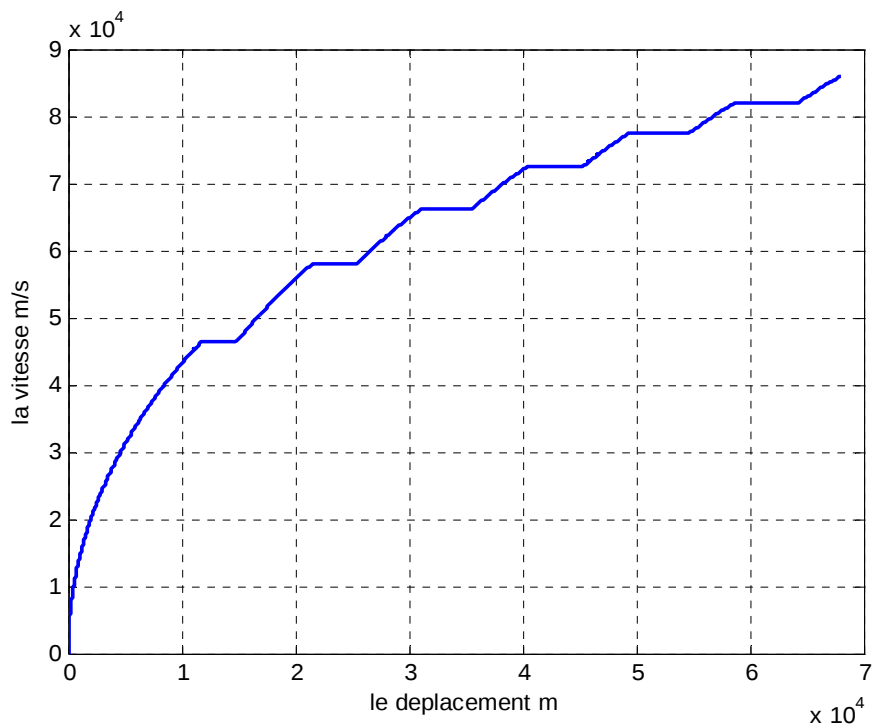


Figure. IV.16 : la vitesse en fonction de déplacement

IV.4. Interprétation

La résolution des l'équation électrique et mécanique du système, à l'aide de simulink, nous a permis de montrer les différentes allures des grandeurs mécanique et électrique qui sont régies par le système.

La figure (IV. 11) représente l'allure du courant en fonction du temps, l'onde de courant présente un pic de l'ordre de 20 kA. Ce pic est dû à la décharge produite par L_0 . Ce courant nous permet de générer un champ magnétique important qui sera traduit par une force électromagnétique suivant l'axe du mouvement.

La figure (IV.12) représente l'allure de la force en fonction du temps, la force atteint une valeur maximale de 100N en 0.6 ms correspondant à un courant 20kA, cette force c'est une la moire d'une vitesse rapide et court comme une impulsion de mouvement, cette technique est utilisé par la majorité du lanceur électromagnétique et l'intérêt de l'action de lancement [5].

La figure (IV.13) représente l'allure de la vitesse en fonction du temps, le projectile atteint une vitesse de 2Km/S pendant 1.5 ms, on note que la première phase de chargement reste en dureté de 0.5 ms, et la deuxième durée 1ms correspond au déchargement de L_0 qui provoque une force de 100N.

Cette force est suffisamment puissante pour libérer le projectile à ces rails et la vitesse correspondante devient 2km/s; dans la première action, on note que des effets mécaniques et des frottements sont résultés à cette action.

La figure (IV.14) représente l'allure du déplacement axial du projectile, ce dernier entraîne à propulser et quitter rails pendant une phase d'accélération de 0.55 ms, c'est-à-dire jusqu'à ce que le projectile quitte les rails.

La nature de l'alimentation permet d'avoir des forces de poussée considérables, donc des vitesses assez grandes. Les résultats fournis par le modèle de couplage concernant le courant, la vitesse, le déplacement et la force sont acceptables.

Si en ajustant les paramètres électriques on trouve une bonne concordance de la force simulée avec celle fournie en référence [29], et cela pour une inductance $L = 2H$, et une résistance $R = 160e-6$, cette confrontation nous a permis de valider les résultats obtenus.

IV.5.Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons intéressés à la mise en simulation des équations électriques et mécaniques régissant le comportement dynamique du système, dans le but de trouver Une alimentation fiable, permet a nous de augmenter la poussé et la vitesse au moment déplacement de projectile dans les rails.

Le temps de chargement et de déchargement de l'inductance d'alimentation, jeu le rôle d'un facteur d'incrémentatation de la force dans une période très court.

Il faut noter que, les recherches actuelles sur ces types d'alimentation sont nombreuses.

CHAPITRE V

ETUDE NUMERIQUE

(Application et résultats de simulation)

V.1.INTRODUCTION

Dans notre étude, nous avons fait appel au logiciel FEMLAB qui sera donc utilisé en tant qu'outil d'analyse. Ce logiciel basé sur la méthode des éléments finis permet le calcul des états magnétique et électrique du propulseur. Ces états permettent d'accéder à des nombreuses grandeurs globales ou locales : champ, potentiel, flux, énergie et force. Ces grandeurs ont été déterminées pour différents prototypes. Ces derniers sont constitués d'un canon formé du bâti et des rails. Ils se distinguent par :

- la forme des rails ;
- les caractéristiques du bâti, des rails et du projectile ;
- le mode d'injection des courants dans les rails.

La démarche d'étude avec le code de calcul FEMLAB associé au code MATLAB sera décrite à travers l'analyse des différents prototypes.

Les résultats obtenus par cette étude sont résumés et illustrés sous forme graphique.

V.2. EQUATIONS ELECTROMAGNETIQUES DU SYSTEME

Le propulseur est régi par les équations de Maxwell qui définissent son comportement électromagnétique :

$$\nabla \wedge \vec{H} = \vec{j} \quad (V. 1)$$

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

$$\nabla \bullet \vec{B} = 0 \quad (V. 3)$$

L'équation (V. 2a) prend en compte le mouvement de projectile dans une induction $\vec{B}$. En effet le projectile, lors de la propulsion, acquiert une vitesse linéaire axiale.

Pour notre cas cette équation est limitée à :

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (V. 2b)$$

Les équations de continuité :

$$\text{Div } \vec{j} = 0 \quad (V. 4)$$

Loi d'aimantation

$$\vec{B} = \mu(\vec{H})\vec{H} \quad (V. 5)$$

Loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (V. 6)$$

Conditions aux limites :

Quand il n'existe pas de sources de courant le long des interfaces séparant deux matériaux, les conditions aux frontières sont :

$$\text{Continuité de la composante normale} \quad \vec{B}_1 \vec{n}_1 + \vec{B}_2 \vec{n}_2 = 0 \quad (V. 7)$$

$$\text{Continuité de la composante tangentielle} \quad \vec{H}_1 \wedge \vec{n}_1 + \vec{H}_2 \wedge \vec{n}_2 = 0 \quad (V. 8)$$

Les indices 1 et 2 sont affectés à deux milieux adjacents du système. $\vec{n}_i$ Est la normale unitaire au milieu considéré.

L'équation du mouvement du projectile est obtenue par application de la loi de Newton :

$$m \frac{dv_z}{dt} = \int_{\Omega_3} (\vec{J} \times \vec{B})_z d\Omega \quad (V. 9)$$

m : La masse du projectile occupant le domaine Ω_3 ;

v_z : La vitesse linéaire suivant l'axe Z ;

$\vec{J} \times \vec{B}$: La force de Lorentz.

V.3. DISCRETISATION PAR ELEMENTS FINIS

La méthode des éléments finis est bien adaptée pour l'analyse numérique du propulseur électromagnétique à rails.

Le propulseur à rail a une géométrie très complexe, Pour simplifier la modélisation, les domaines sont divisés en plusieurs éléments finis, qui ont des dimensions et caractéristiques plus simples. Les propriétés des matériaux sont considérées comme uniformes pour chacun des éléments.

La méthode des éléments finis consiste donc à remplacer un problème continu par un problème discret équivalent. La discrétisation se fait sur deux axes, d'une part le domaine est subdivisé en sous domaines de géométries simples appelés éléments, et d'autre part les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations algébriques à l'aide du

calcul variationnel ou des méthodes de minimisation de l'erreur comme la méthode des résidus pondérés.

La solution finale s'obtient en résolvant les équations algébriques obtenues sur tous les éléments constituant le domaine

La méthode des éléments finis comme une méthode de discrétisation des formes intégrales de type Galerkin : elle remplace la forme intégrale globale par la somme de formes intégrales élémentaires puis discrétiser celles-ci en utilisant une approximation par éléments finis.

La formulation intégrale peut être de deux types:

- Variationnelle
- Résidus pondérés

V.3.1 Formulation variationnelle

La méthode variationnelle exige la connaissance au préalable de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Cette fonctionnelle est déterminée à partir du principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle de type intégrale définie par:

$$F(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (V. 10)$$

L : Fonction de Lagrange qui résulte de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentielle.

Ω : Domaine de résolution.

Résoudre le problème variationnel défini par la fonctionnelle d'énergie $F[A]$ revient à minimiser cette fonctionnelle.

La minimisation est effectuée en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire que:

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0 \quad (V. 11)$$

A_i : Inconnue au nœud i du domaine.

V.3.2 Méthodes des résidus pondérés

Les méthodes des résidus pondérés sont des méthodes numériques permettant de résoudre un système d'équations aux dérivées partielles en approximant la solution exacte par une solution approchée.

En remplaçant la solution exacte par la solution approchée, nous commettons une erreur appelée résidu R .

$$R = L(u) - f_v \neq 0 \quad (V. 12)$$

A l'aide des fonctions de pondération β bien choisies, nous imposons à l'intégrale du résidu de s'annuler en n points de Ω :

$$W_i = \int_{\Omega} \beta_i R d\Omega = 0 \quad \text{Pour } i = 1, \dots, n \quad (V.13)$$

Les fonctions de pondération B sont indépendantes et leur nombre doit être égal au nombre de paramètres de l'approximation.

V.3.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites permettent de simuler l'environnement du propulseur et de définir les symétries. On distingue trois conditions figure (V.1) :

1. Le champ est tangent à la section aux extrémités du propulseur (côté injection et côté bouche).
2. Le champ est tangent à l'infini (boît délimitant l'air autour du propulseur).
3. Le champ est tangent à la face intérieure du modèle (qui correspond en fait au milieu du propulseur)

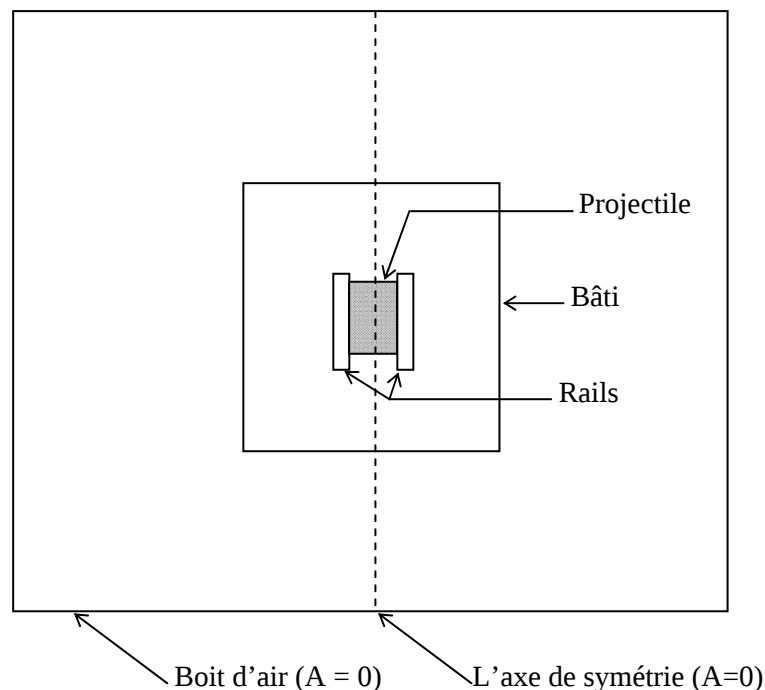


Figure .V.1.Les conditions aux limites sur le modèle.

V.4. APERÇU SUR L'ARCHITECTURE DU LOGICIEL

Le logiciel Femlab est un logiciel de conception assisté par ordinateur, basé sur la méthode des éléments finis, il calcule sur des sections planes, les états magnétiques et électriques des dispositifs. Ces états permettent d'accéder à des nombreuses grandeurs globales ou locales : champ, potentiel, flux, énergie, force... etc.

Les grandeurs obtenues seront difficiles à déterminer par d'autres méthodes (calcul analytique, prototype, mesure, essais) et, en tout état de cause, elles sont obtenues avec un coût et des délais très inférieurs à ceux des autres méthodes.

Nous avons aussi exploité la souplesse de transformation des données par les options d'exportation et importation de et au MATLAB. Ces options facilitent l'analyse des cas particuliers du problème.

L'organigramme suivant représente les étapes de résolution du problème par la méthode des éléments finis.

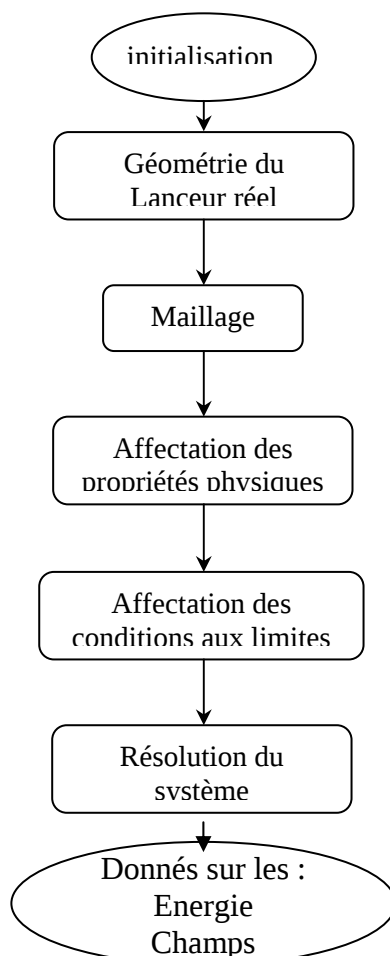


Figure .V.2 : Organigramme de la résolution

Les principales phases de la simulation des prototypes figure (V.4) se résument comme suit.

- Description de la géométrie et génération de maillage ;
- Description des matériaux utilisés ;
- Affectation des propriétés physiques et des conditions aux limites ;
- Résolution ;
- Exploitation des résultats.

V.5. PROPULSEUR A RAIL DE FORME CARREE

V.5.1 Présentation du prototype

Le premier prototype étudié est le propulseur à rails de forme carrée simple pont. Les sections des rails et du projectile sont rectangulaires. Pour bien comprendre le modèle du propulseur à rail de forme carrée simple pont, on le représente sur la figure (V.3) et les deux coupes (AA) et (BB) qui lui correspondent sur les deux figures (V.4) et (V.5).

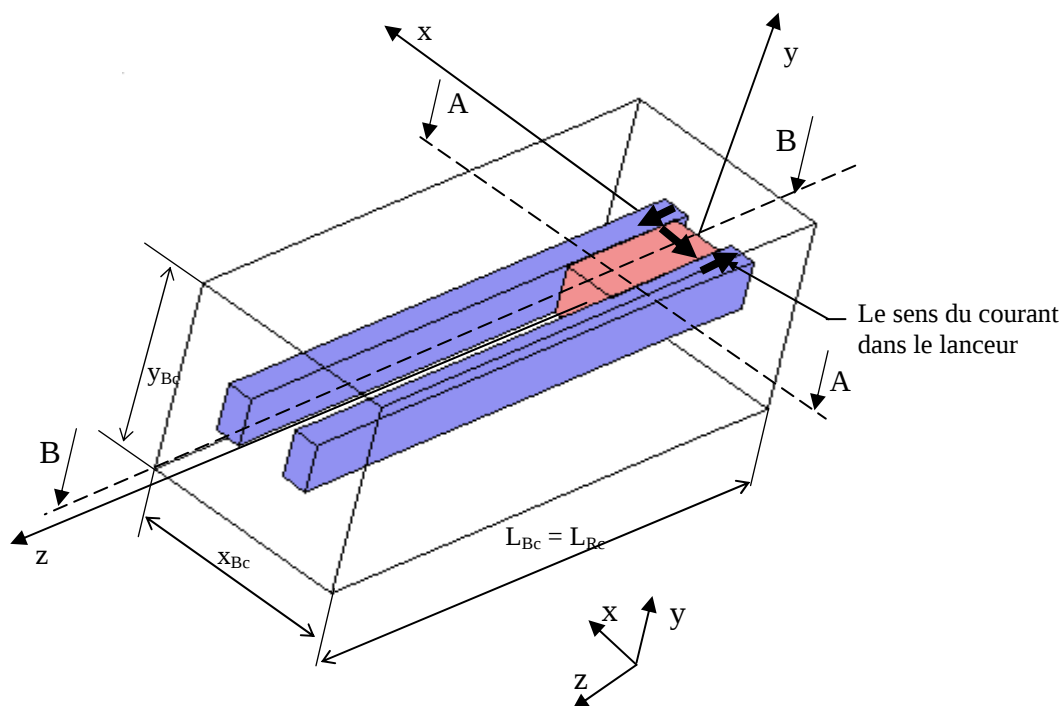


Figure .V.3 : Prototype de propulseur de forme carrée

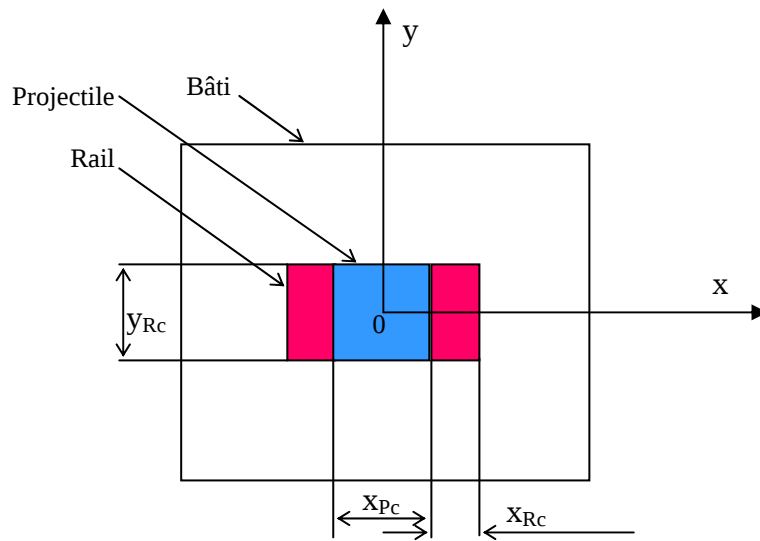


Figure .V.4 : Vue de prototype suivant l'axe z (coupe (AA))

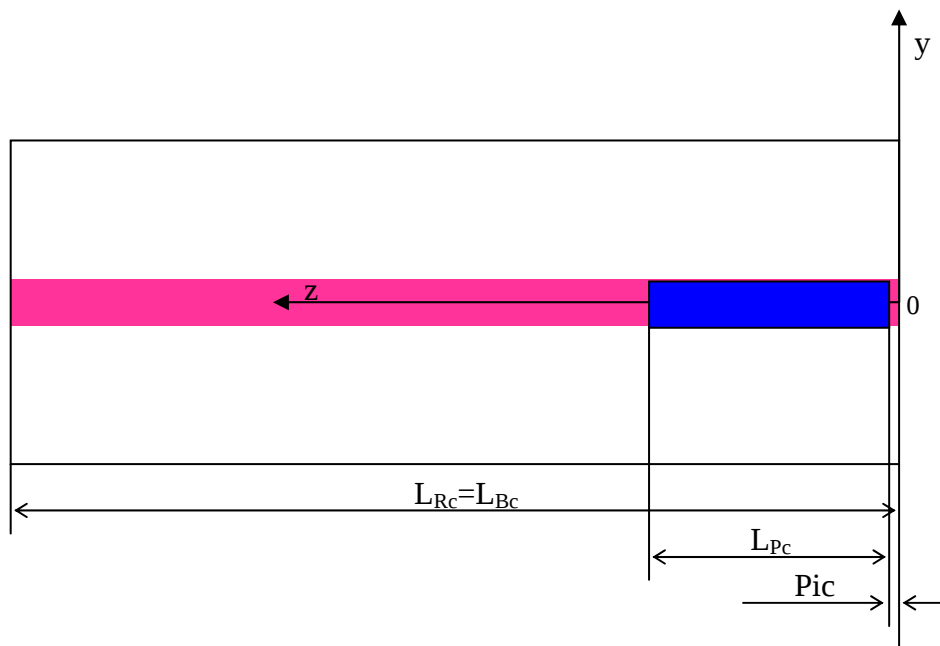


Figure .V.5 : Vue de prototype suivant l'axe x (coupe (BB))

V.5.2 Caractéristiques du prototype

a) Caractéristiques géométriques

On note : B pour le bâti, C pour la forme carrée, R pour le rail, P pour le projectile, L pour la longueur, Pi pour la position, et x, y selon les axes donc :

- $x_{Bc} = y_{Bc} = 40 \text{ mm}$
- $L_{Bc} = L_{Rc} = 200 \text{ mm}$

- $x_{Rc} = (\frac{1}{2}) x_{Pc} = 5\text{mm}$
- $y_{Pc} = y_{Rc} = 10\text{ mm}$
- $Pic = 2\text{ mm}$

La section S_R du rail qui peut supporter un courant impulsionnel de 5 kA est de 50 mm^2 :

$S_R = x_{Rc} \times y_{Rc} = 50\text{mm}^2$. Cette section peut supporter un courant impulsionnel de 5kA.

b) Caractéristiques physiques

- Le tube de lancement de ce premier prototype est constitué d'un bâti supportant les rails. Ce dernier doit présenter de bonnes caractéristiques mécaniques et dont la perméabilité est équivalente à celle de l'air ;
- Le rail et le projectile sont en cuivre de conductivité $\sigma = 5.98 \cdot 10^7$;
- Dans notre étude, le courant d'alimentation des rails qui est du type impulsionnel a été fixé à 3,5 kA ;
- Le spectre de fréquence du courant impulsionnel couvre 1 kHz.

V.5.3 Répartition de l'induction magnétique B dans le propulseur

Pour mener l'étude nous avons adopté des hypothèses suivantes :

- le projectile est fixe;
- l'effet de peau dû à la vitesse est négligeable;
- l'effet thermique est négligeable;
- le contact électrique entre les rails et le projectile est considéré comme étant parfait.

Par raison de symétrie, on ne considère que la géométrie d'un demi propulseur. Cette approche est suffisante pour mener l'étude. Les résultats pour l'ensemble du propulseur se déduisent par symétrie) ce qui présente l'avantage de réduire considérablement la taille du modèle, en divisant par deux le nombre d'éléments. Le modèle est donc constitué d'un rail et de la moitié du projectile entourés d'isolant et d'air.

Les figures (V.6) et (V.7) montrent respectivement la représentation du propulseur en 2D et de son maillage. L'opération d'affinage du maillage a concerné les régions actives, les rails et le projectile. Le modèle maillé est constitué de 5202 éléments et 2602 nœuds.

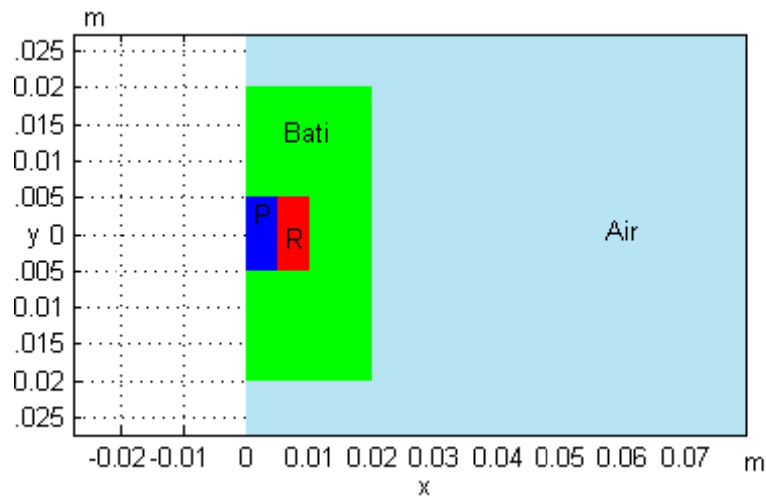


Figure .V.6 : Modèle simulé suivant le plan (x, y)

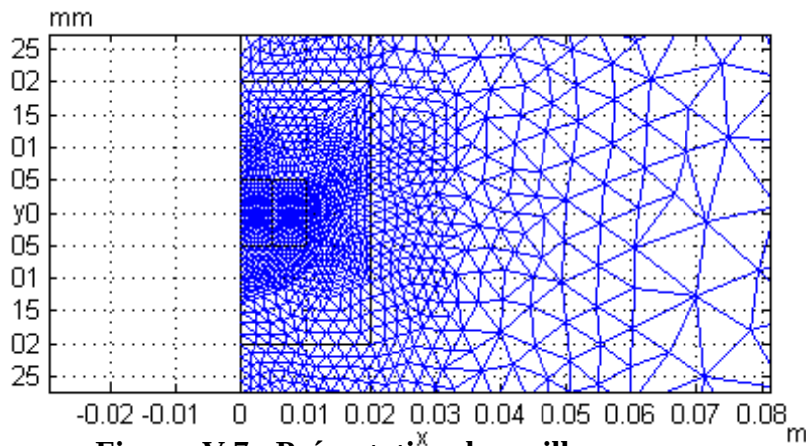


Figure .V.7 : Présentation du maillage

Les figures (V.8) et (V.9) montrent respectivement la répartition de l'induction B dans le projectile et sa variation selon l'axe X .

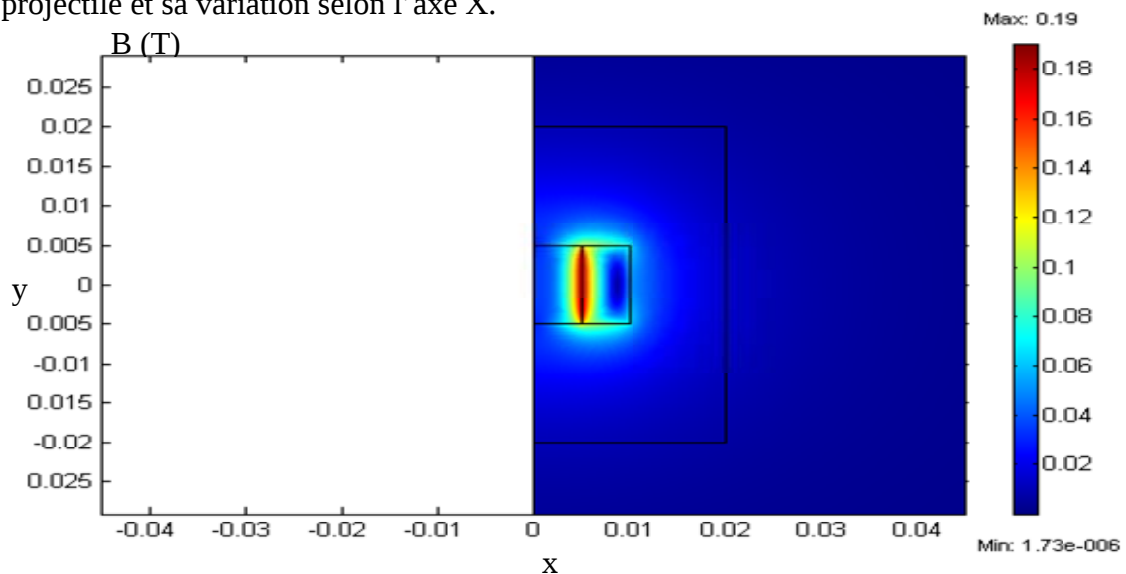


Figure .V.8 : Les iso valeurs de l'induction B_y dans le projectile

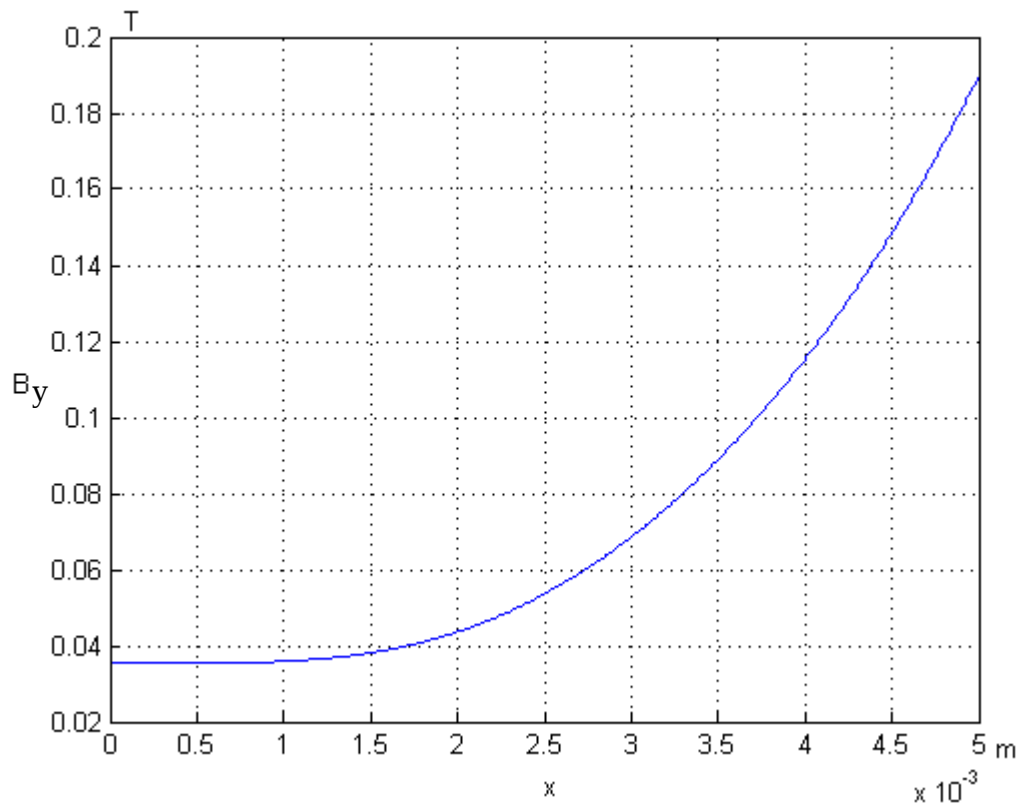


Figure .V.9 : La variation de (B_y) suivant l'axe x dans le projectile

La représentation de la configuration magnétique montrant le comportement de la composante B_y de l'induction qui est responsable de la force dans le projectile renseigne sur la concentration de cette dernière sur les extrémités du projectile proches des contacts.

On en déduit une forte concentration de la force dans ces zones. Celles-ci qui prennent naissance d'une façon impulsionnelle peuvent causer des contraintes de frottement brutales pouvant endommager le projectile.

V.5.4 Répartition de la densité de courant dans le propulseur

La figure (V.10) représente l'allure de la densité du courant dans le projectile selon l'axe Z.

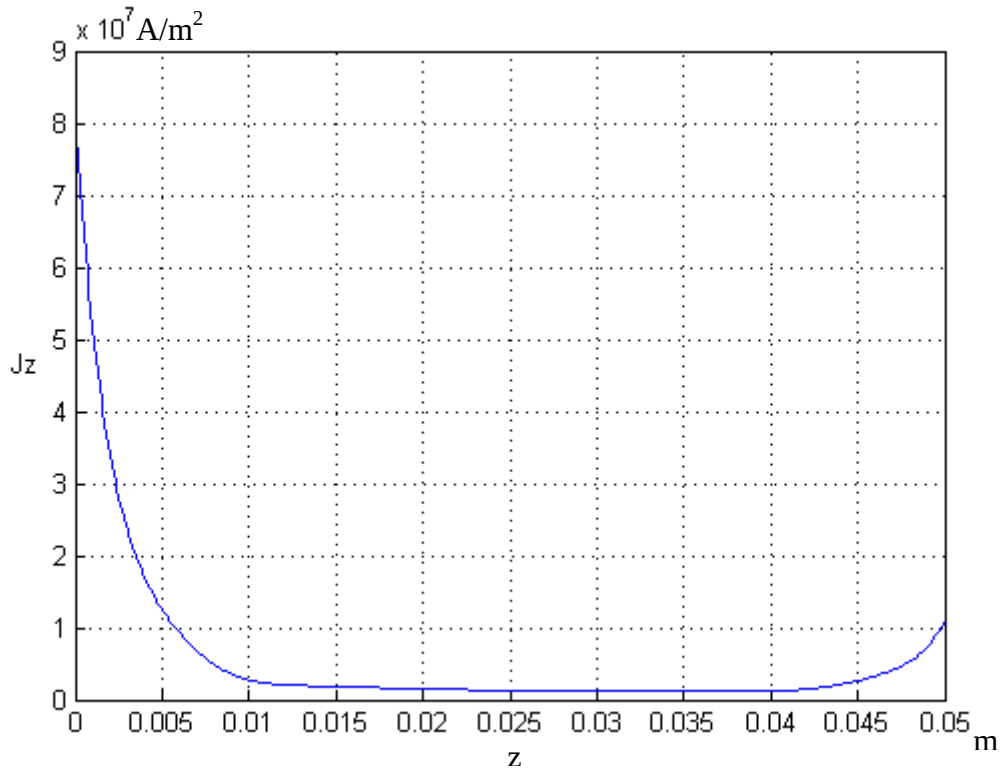


Figure .V.10: Variation de (Jz) le long du projectile suivant l'axe z.

L'étude de la répartition du courant dans le projectile selon la direction Z montre qu'il y'a en effet une forte concentration du courant à la partie arrière du projectile. Cette concentration occupe environ 20% de la largeur du projectile. Elle correspond à 10 mm.

V.5.5 Répartition de la force de propulsion sur le projectile

La figure (V.11) représente schématiquement les différents paramètres magnétique et électrique qui sont à l'origine de la force F_z

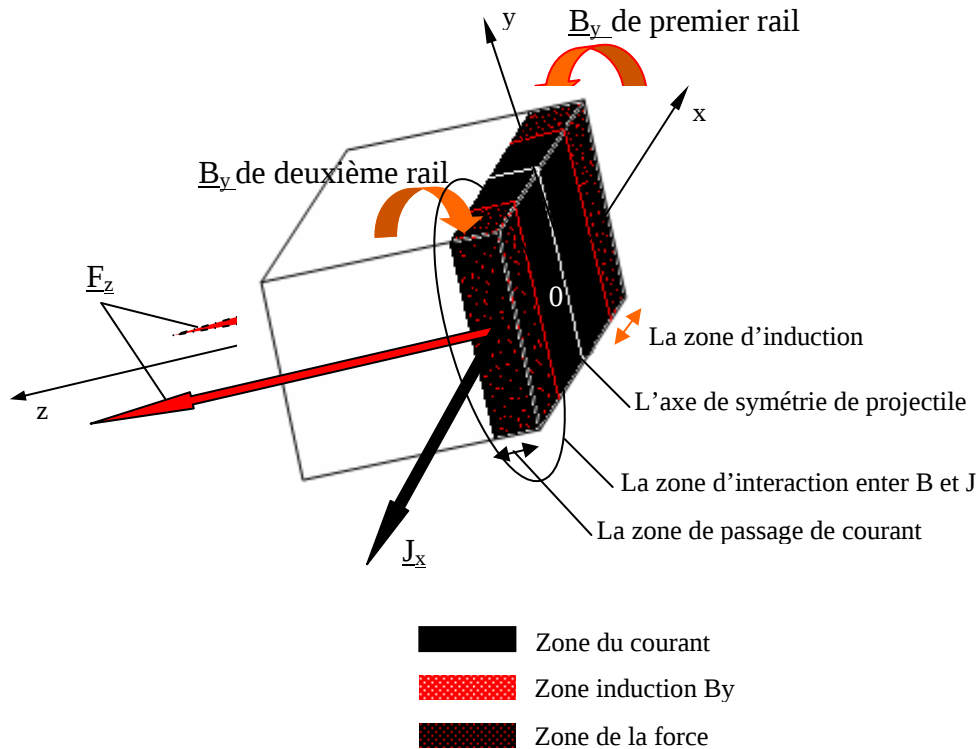


Figure .V.11 : Présentation des différents paramètres responsables de la force.

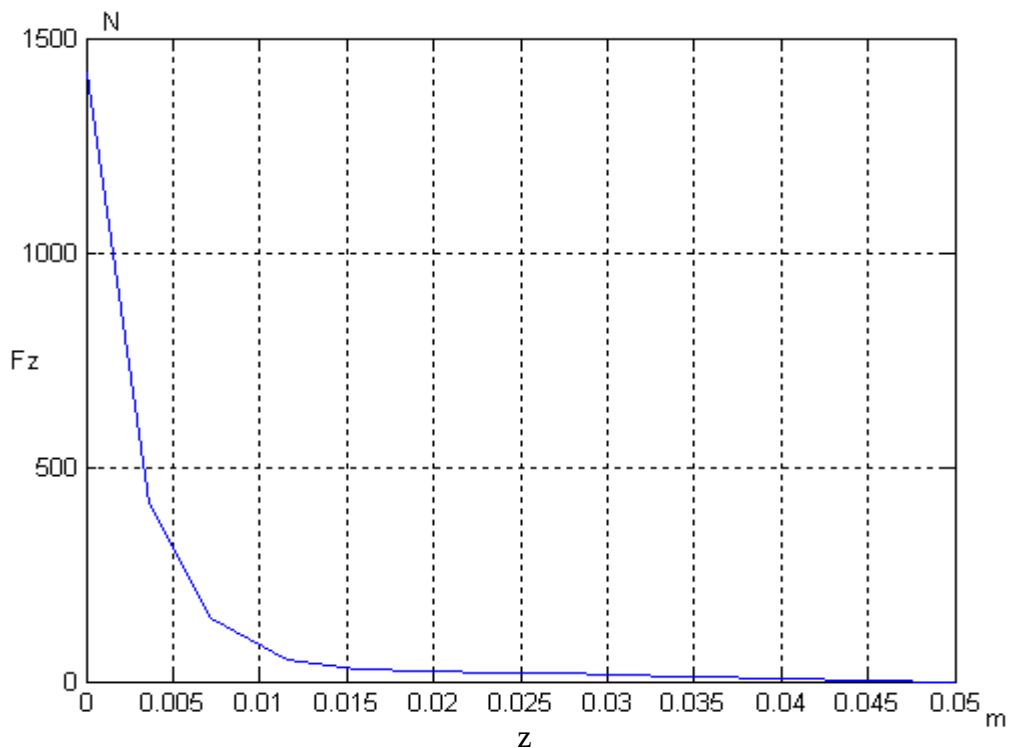


Figure .V.12 : La force en fonction de z dans le projectile

La figure (V.12) représentant le comportement de la force F_z de propulsion dans le projectile montre sa concentration à l'arrière du projectile. En effet, la force traduit le comportement de l'induction et des courants au niveau du projectile. Elle atteint une valeur de 1500 Newtons.

V.5.6 CONCLUSION

On peut conclure que les forces de propulsion appliquées à un projectile sont composées d'un bloc conducteur qui est concentré à l'arrière du projectile et dont les régions correspondant aux surfaces de contact du projectile avec les rails. L'allure de la force traduit en effet le comportement de l'induction et du courant dans les zones actives du projectile

V.6. PROPULSEUR A RAIL DE FORME RONDE

V.6.1. Présentation du prototype

L'influence de la forme des rails et du projectile sur la diffusion du courant et la répartition de l'induction magnétique dans le projectile sont étudiés en considérant un deuxième prototype dont les rails ont une forme ronde.

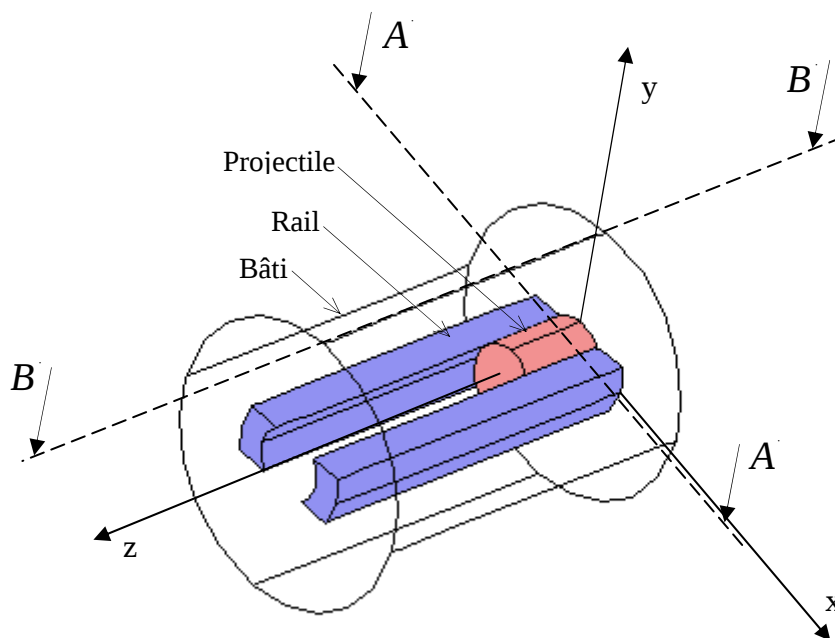


Figure .V.13 : Prototype de propulseur de forme carré

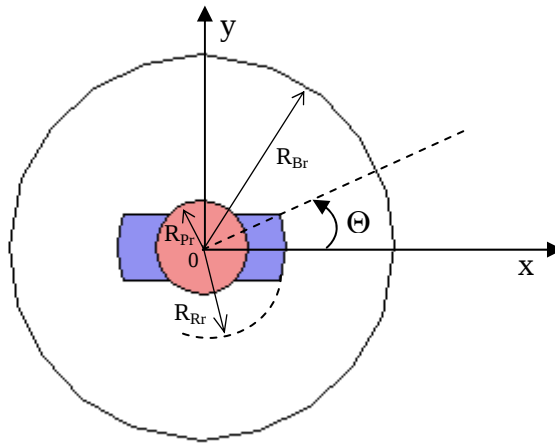


Figure .V.14 : Vue de prototype suivant l'axe z (coupe (A'A'))

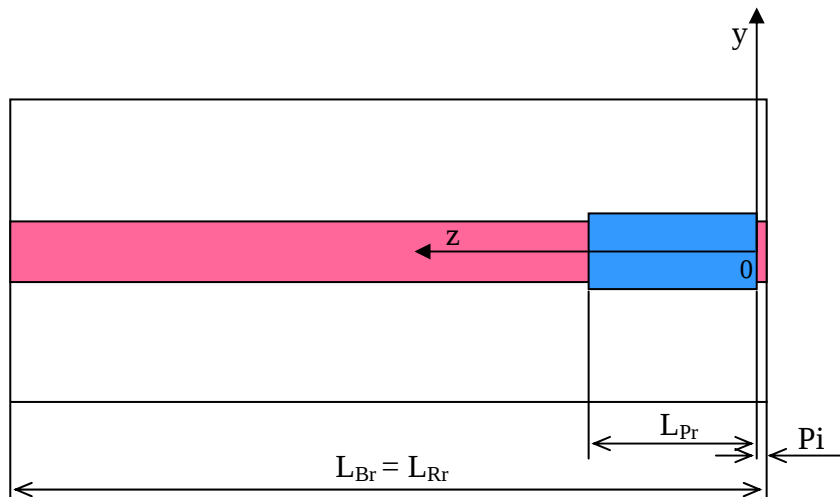


Figure .V.15 : Vue de prototype suivant l'axe x (coupe (B'B'))

V.6.2. Caractéristiques du prototype

a) Caractéristiques géométriques

- $L_{Br} = L_{Rr} = 200 \text{ mm}$
- $R_{Pr} = 6 \text{ mm}$
- $\Theta = 45^\circ$
- $L_{Pr} = 50 \text{ mm}$
- $R_{Rr} = 11 \text{ mm}$
- $R_{Br} = 50 \text{ mm}$
- $Pir = 2 \text{ mm}$ (la position initiale du projectile dans le tube de lancement)

b) Caractéristiques physiques

- Le bâti aux caractéristiques de l'air ;
- Les rails et le projectile celles de cuivre de conductivité $\sigma = 5.98 \cdot 10^7$;
- On garde le même courant d'excitation que dans le premier prototype. Ce dernier vaut 3,5 kA.

Ce deuxième prototype est de même constitution que le premier, seul la forme des rails et du projectile qui diffère. Les mêmes caractéristiques physiques sont alors adoptées. Le courant d'alimentation des rails est maintenu à 3,5 kA.

V.6.3 Répartition de l'induction B dans le propulseur

La figure (V.16) montre le maillage de la moitié du dispositif selon le plan (x, y) . Il est constitué de 6742 éléments totalisant 3454 nœuds.

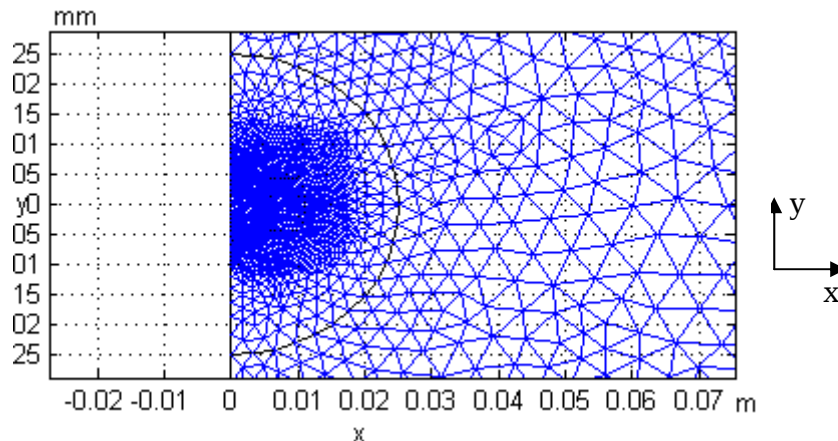


Figure .V.16 : Modèle simulé suivant le plan (x, y)

Les figures (V.17) et (V.18) montrent respectivement la répartition de l'induction B dans le projectile et sa variation selon l'axe X .

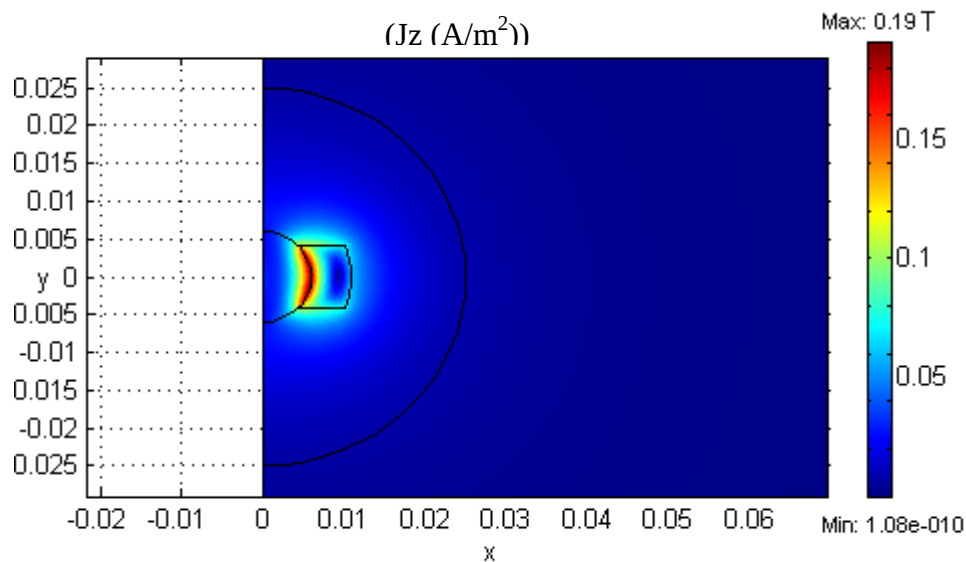


Figure .V.17 : Les iso valeurs de l'induction (B_y) dans le modèle

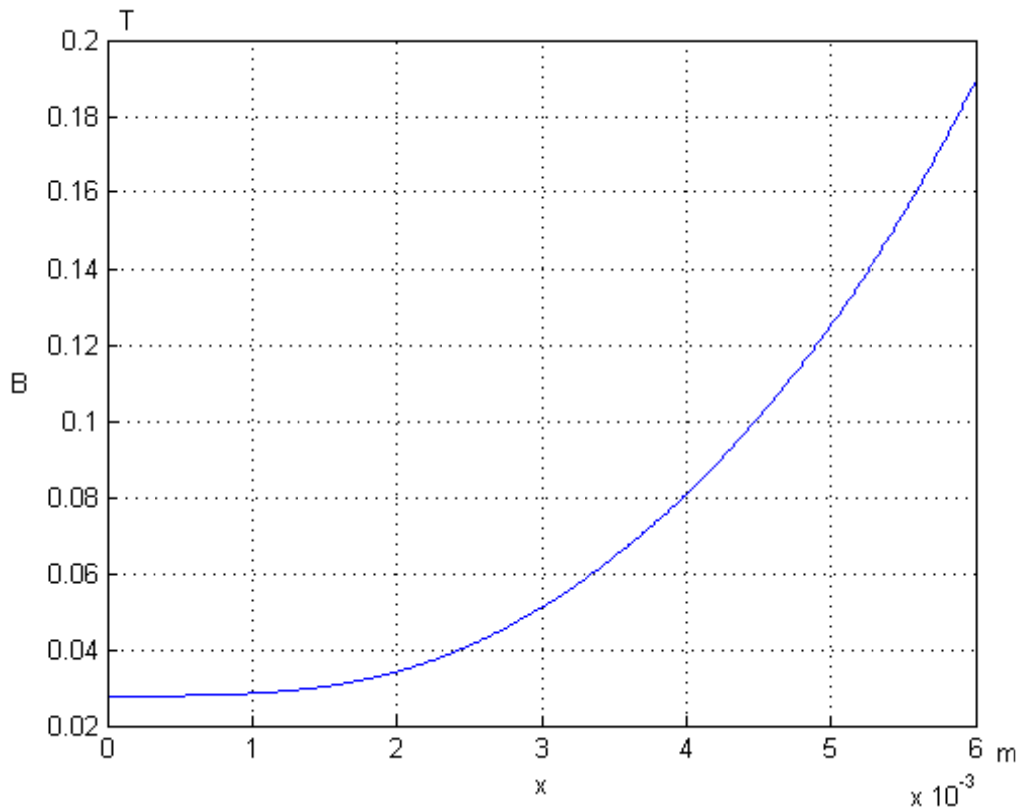


Figure .V.18 : Variation de (By) suivant l'axe x dans le projectile

La cartographie et la courbe montre la concentration de l'induction magnétique à la surface du projectile et où l'induction peut atteindre 0.19 Tesla.

V.6.4 Répartition de la densité de courant dans le propulseur

V.6.4.1 .Répartition de la densité de courant dans les rails

Les figures qui suivent représentent la diffusion de courant dans les rails pour les deux formes (carrée, ronde), elles nous permettent de faire une comparaison sur la répartition du courant entre les deux formes.

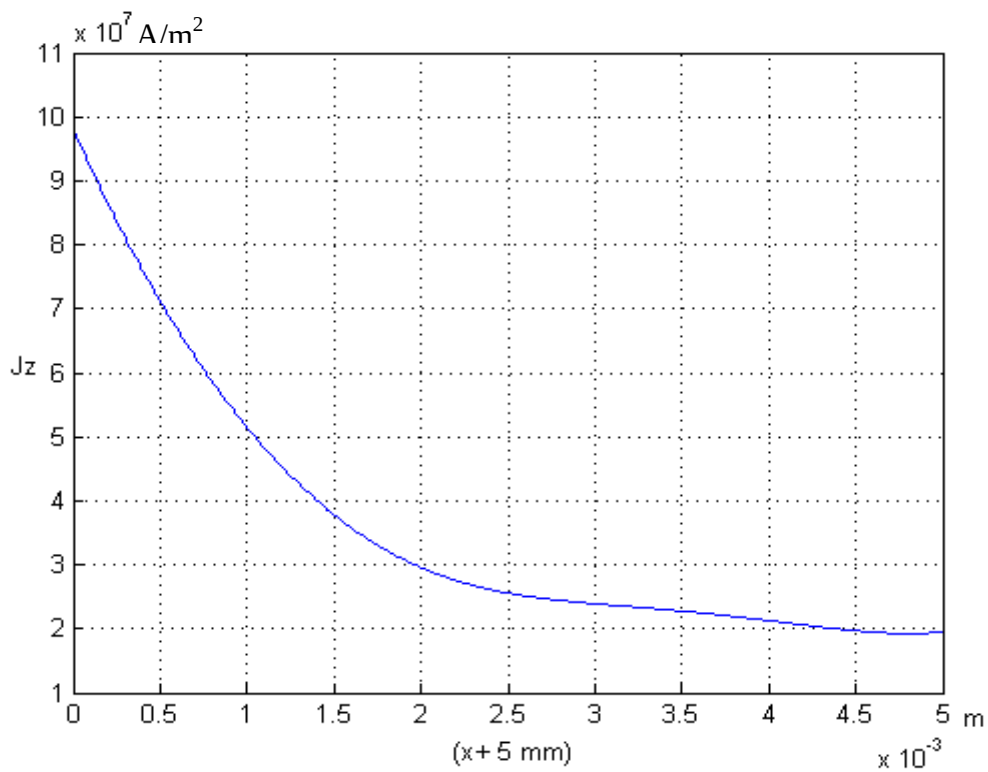


Figure .V.19 : Variation de la densité du courant (J_z) suivant l'axe x du rail de forme carrée

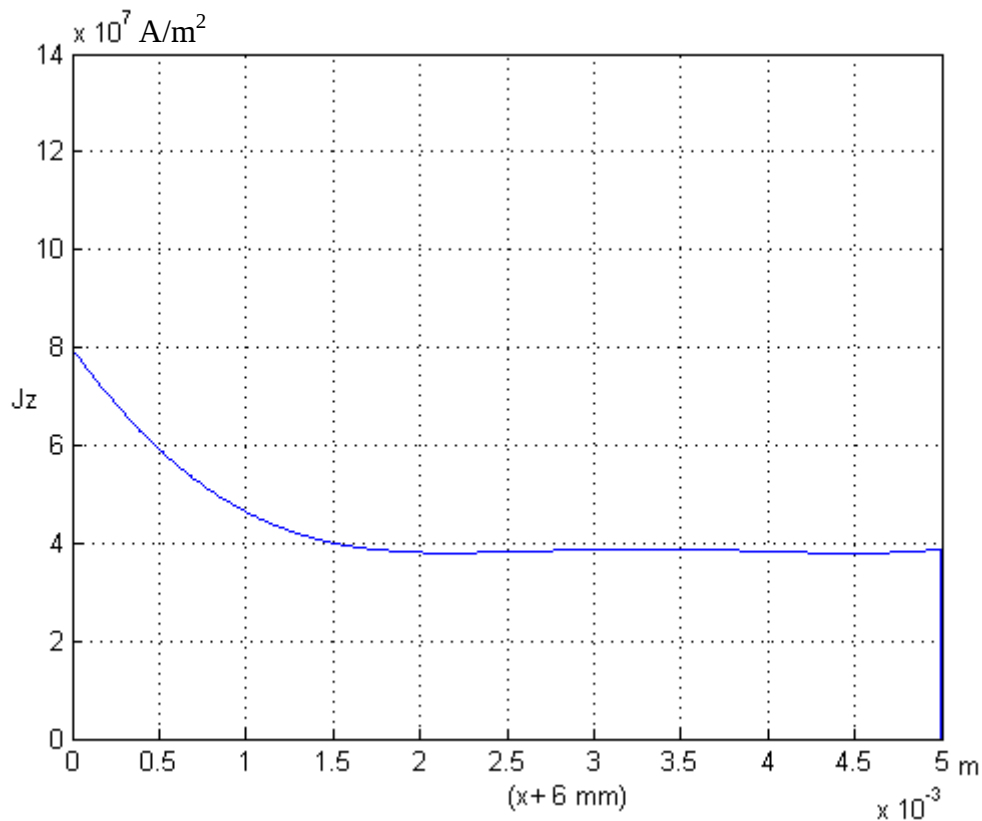


Figure .V.20 : Variation de la densité du courant (J_z) suivant l'axe x de rail de forme ronde

De la comparaison des allures des densités pour les deux formes de rails, carrée et ronde, il ressort que la diffusion du courant est plus homogène dans le deuxième.

V.6.4.2 Répartition de la densité de courant dans le projectile

Les deux figures suivant représentent la densité du courant, la première donne les iso valeurs et la deuxième sa variation suivant l'axe z du projectile.

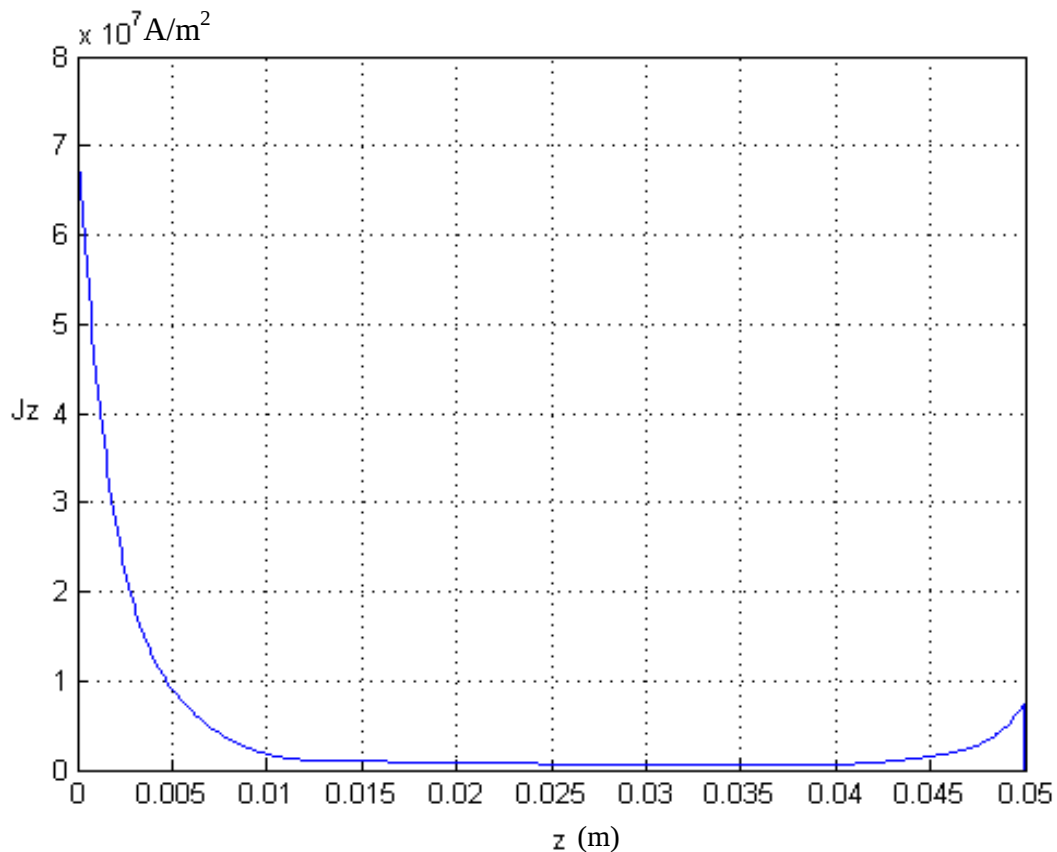


Figure .V.21: Variation de la densité du courant (Jz) suivant l'axe z dans le projectile rond

Le courant dégrade suivant l'axe z de projectile de manière similaire à celle de propulseur de forme carrée, ici la géométrie n'influe pas sur la diffusion du courant.

La répartition du courant dans le projectile suivant l'axe Z se présente de la même manière que pour le cas du propulseur à rails de forme carrée.

V.6.5 La répartition de la force

La figure (V.22) présente le projectile de forme ronde avec les différents paramètres électrique et magnétique qui sont à l'origine de sa force de propulsion.

Cette dernière est aussi représentée suivant l'axe Z correspondant à la longueur du projectile figure (V.23).

Comme pour le cas du propulseur à rails de forme carrée, nous notons une concentration de la force (F_z) à l'arrière du projectile.

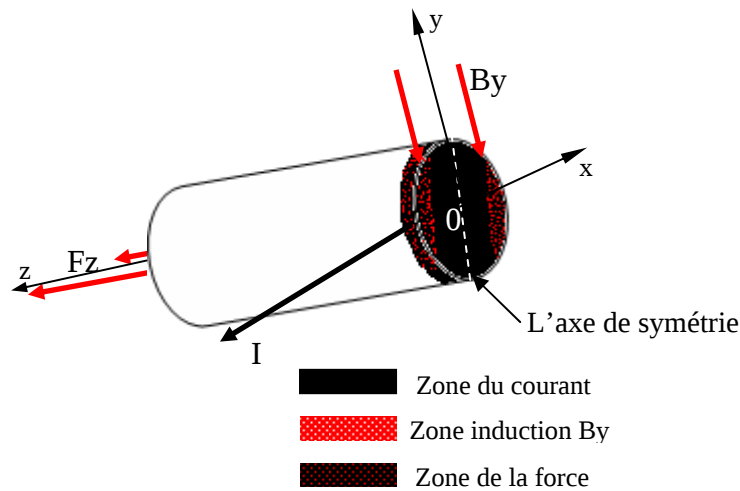


Figure .V.22 : Définition de la force appliquée sur un projectile rond

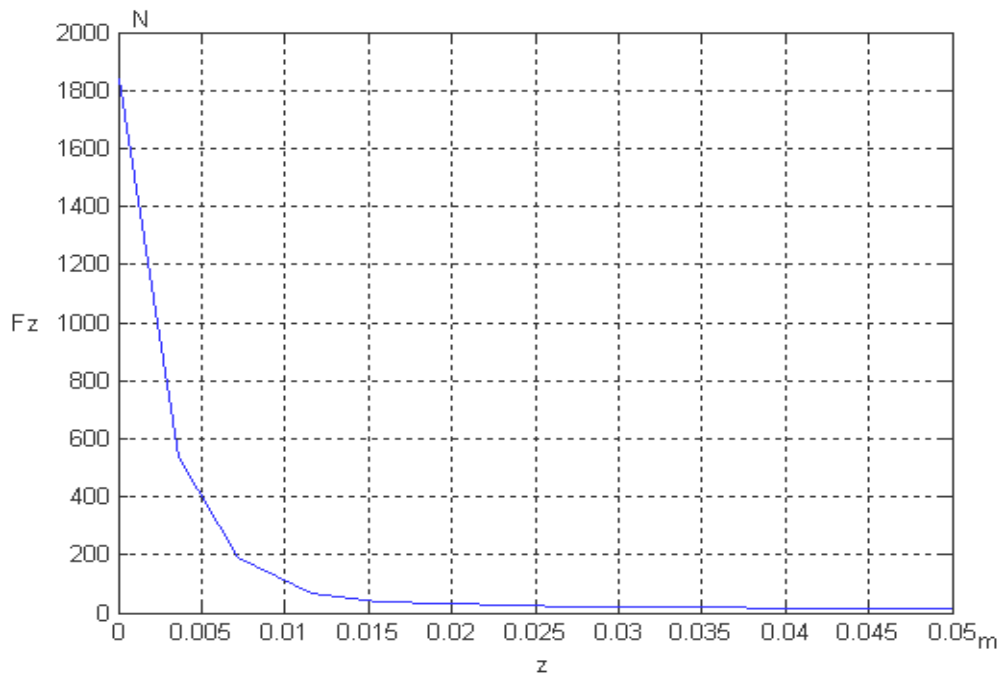


Figure .V.23 : Répartition de la force appliquée sur le projectile rond

V.6.6 CONCLUSION

Les résultats obtenus ont montré que le propulseur à rails de forme ronde présente des avantages comparativement à celui à rails de forme carrée. Il s'agit essentiellement de :

- La diffusion plus homogène de la densité de courant dans les rails ;
- L'amélioration de l'amplitude et de la répartition de la force de propulsion sur le projectile.

Il est à noter en fin de compte que bien qu'on assiste à une meilleure diffusion du courant dans les propulseurs à rails de forme ronde, le problème de la concentration du courant au niveau du contact entre les rails et le projectile reste toujours posé.

V.7. propulseur à rail de forme carree à double injections

Nous avons analysé ce dernier prototype pour l'étude de la distribution du courant le long de projectile, à fin de répartir la force de propulsion.

V.7.1 Présentation du prototype à doubles ponts

Les figures (V.24) représentent le prototype à doubles ponts :

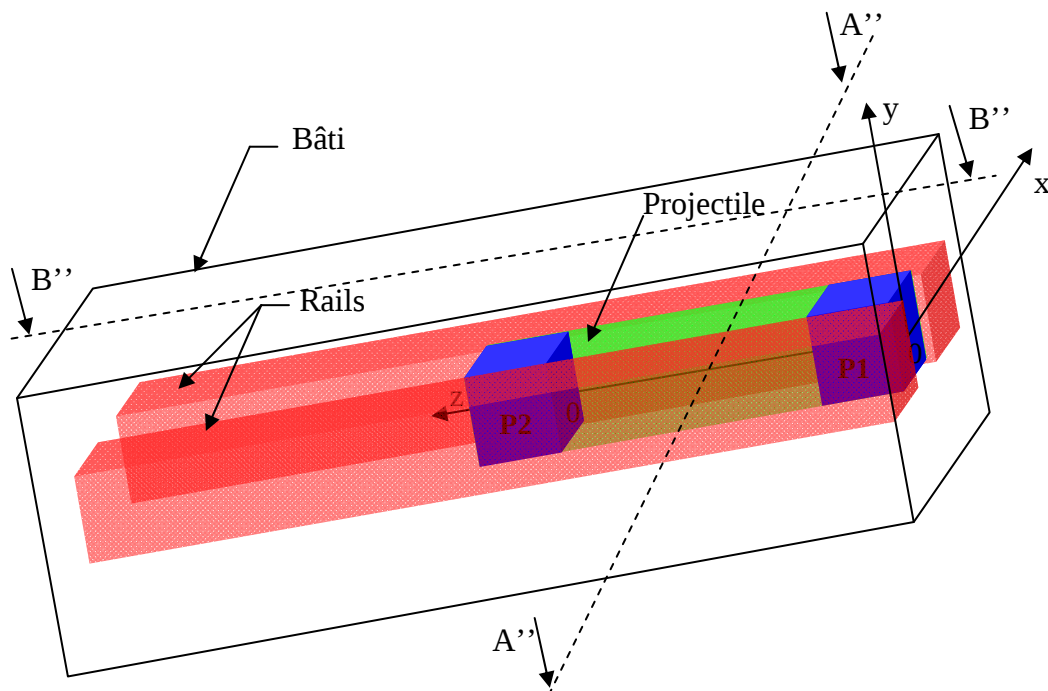


Figure .V.24 : Présentation du propulseur à rail de forme carrée avec un projectile équipé de deux ponts d'injection

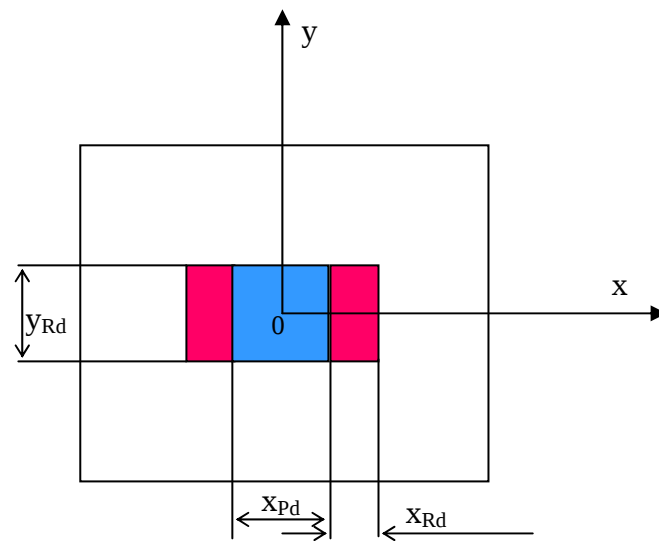


Figure .V.25 : Vue de prototype suivant l'axe z (coupe (A''A''))

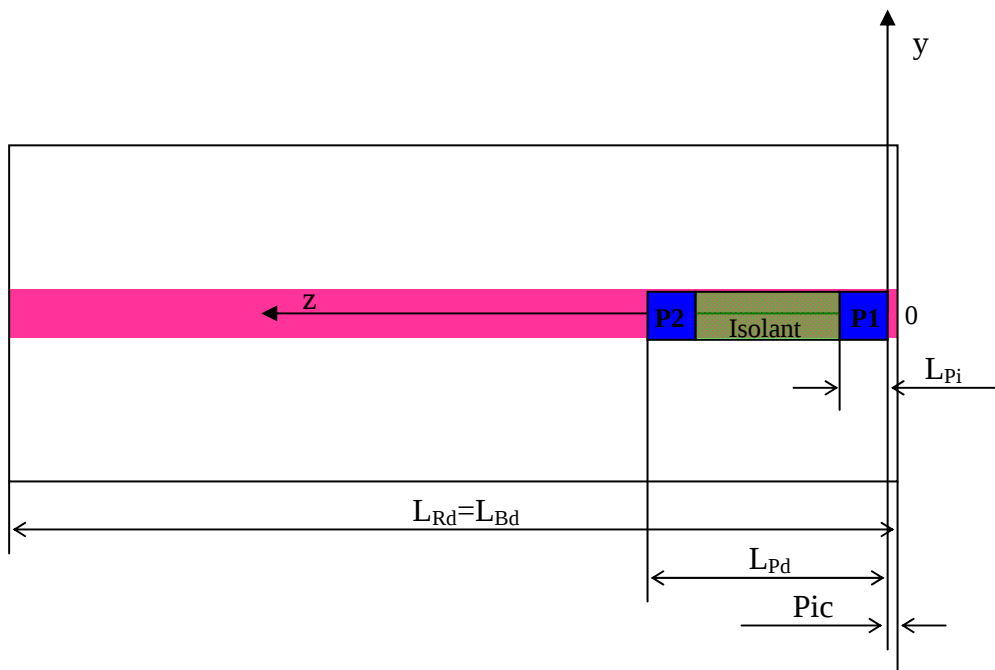


Figure .V.26 : Vue de prototype suivant l'axe x (coupe (B''B''))

V.7.2 Caractéristiques du prototype

a) Caractéristiques géométriques

On prend les mêmes caractéristiques du tube de lancement de premier prototype mais avec un autre projectile (projectile double injections), les ponts ont des caractéristiques géométriques identiques telles que :

- $x_{Pd} = 2 x_{Rd} = 10\text{mm}$
- $L_{Rd} = L_{Bd} = 200\text{mm}$

- $y_{Pd} = y_{Rd} = 10\text{mm}$
- $L_i = 20\text{mm}$
- $L_{Pi} = 5\text{mm}$
- $P_i = 2\text{mm}$ (la position initiale du projectile dans le tube de lancement)

b) Caractéristiques physiques

On garde les mêmes caractéristiques du premier prototype, sauf que cette fois-ci le projectile est constitué de deux blocs d'un même matériau conducteur. Les deux ponts qui présentent des caractéristiques géométriques identiques peuvent être soit en cuivre soit en titane. La conductivité de ce dernier est $T = 1.25 \cdot 10^6$.

Les ponts sont contenus dans un matériau isolant dont les caractéristiques sont similaires à celles de l'air.

Le contact entre les ponts et les rails est supposé être parfait.

V.7.3 Prototype à ponts en cuivre

V.7.3.1. Répartition de l'induction B_y dans le propulseur

Pour la même raison que dans les prototypes précédents, l'étude du prototype est réduite à la moitié du projectile avec un rail.

La figure (V.27) représente le modèle simulé en trois dimensions du propulseur à rails double ponts.

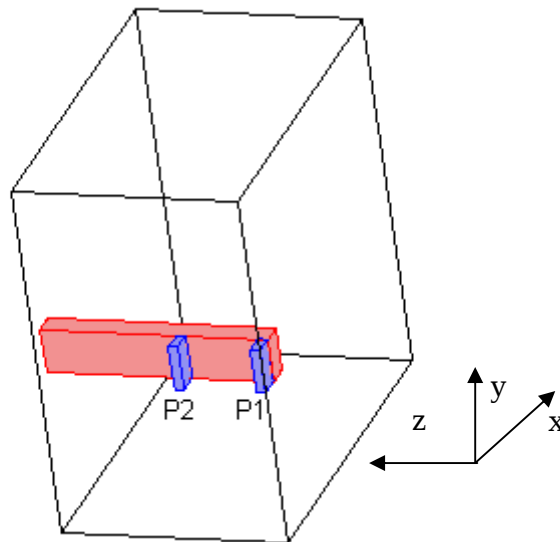


Figure .V.27 : Schéma du lanceur avec projectile équipé de deux ponts

Ce modèle est maillé par 68377 éléments et de 13448 nœuds, le maillage de ce modèle est représenté sur la figure suivante :

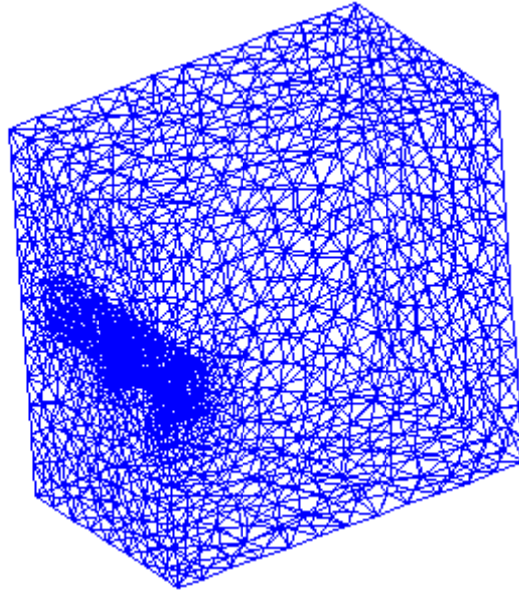


Figure .V.28 : Schéma représentatif du maillage en 3D

La figure (V.29) représente les iso valeurs d'induction pour les quatre plans coupant le modèle suivant l'axe z.

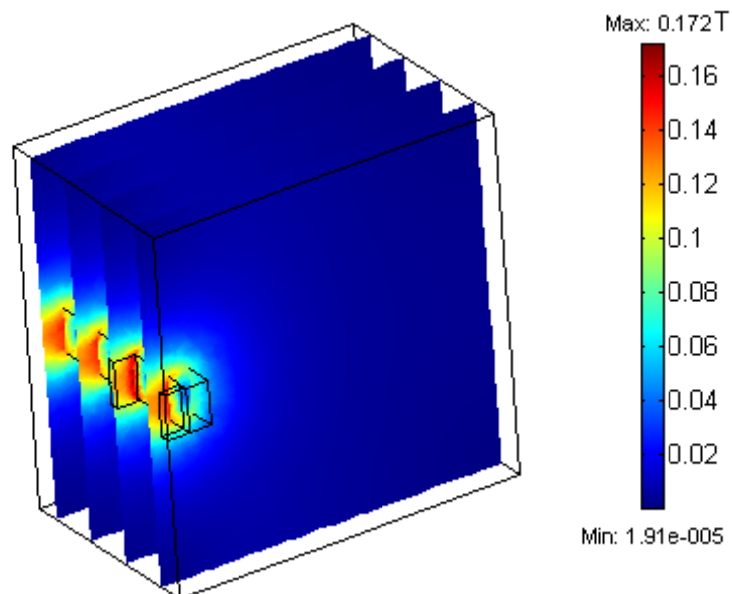


Figure .V.29 : Les iso valeurs de l'induction B_y (T) à 4 plans coupant le modèle suivant l'axe z

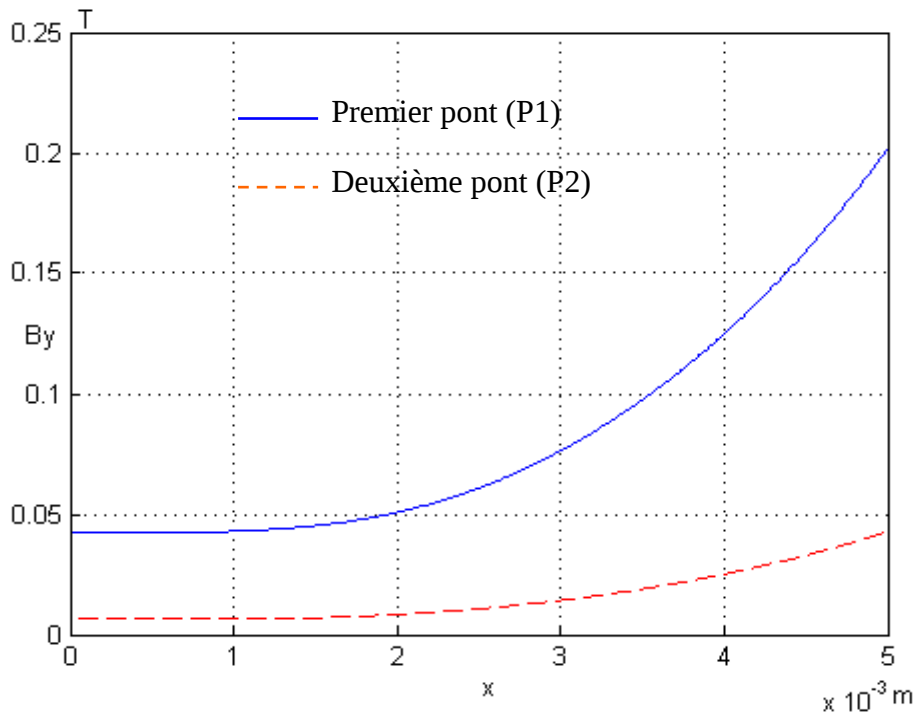


Figure .V.30 : Variation d'induction B_y suivant l'axe x dans les deux ponts

On constate que l'induction (B_y) est concentrée dans le premier pont est atteint sa valeur maximale 0.2 T à $x = 5$ mm.

V.7.3.2 La diffusion du courant dans le projectile

Les iso valeurs de la densité de courant dans le rail pour les quatre plans qui divisent notre modèle suivant l'axe z sont représentés sur la figure (V.31). Ces plans montrent clairement que le courant se concentre dans une petite région du côté du contact avec le projectile (dans les coins du rail).

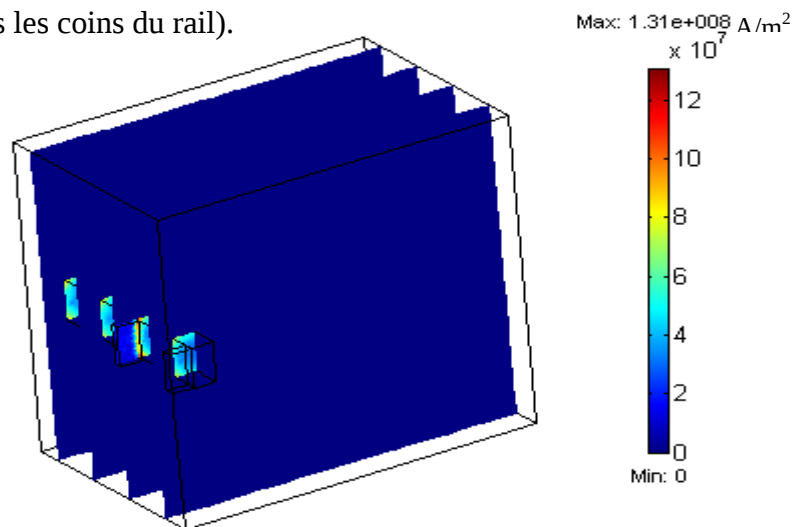


Figure .V.31 : les iso valeurs de la densité du courant dans le rail par A/m^2

Dans la figure (V. 32), on représente la variation de la densité du courant suivant l'axe z dans le projectile.

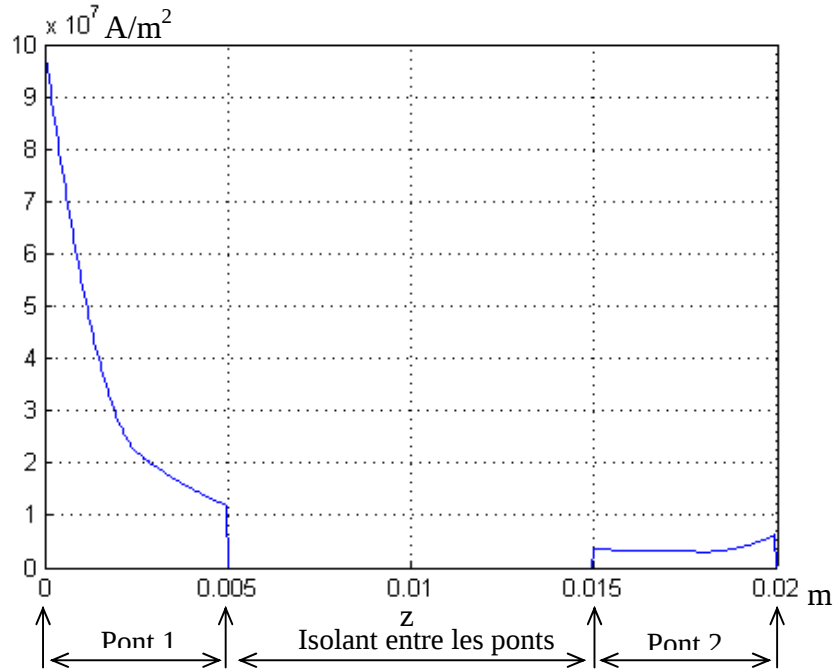


Figure .V.32 : Diffusion du courant suivant l'axe z dans les ponts en cuivre

On remarque que la plupart de courant passe dans le premier pont (P1) avec un pourcentage d'environ de 95% et 5% pour le deuxième pont (P2).

V.7.3.3 Répartition de la force dans le prototype

La répartition de la force suivant l'axe z dans le projectile à ponts en cuivre, est illustré sur la figure (V.33)

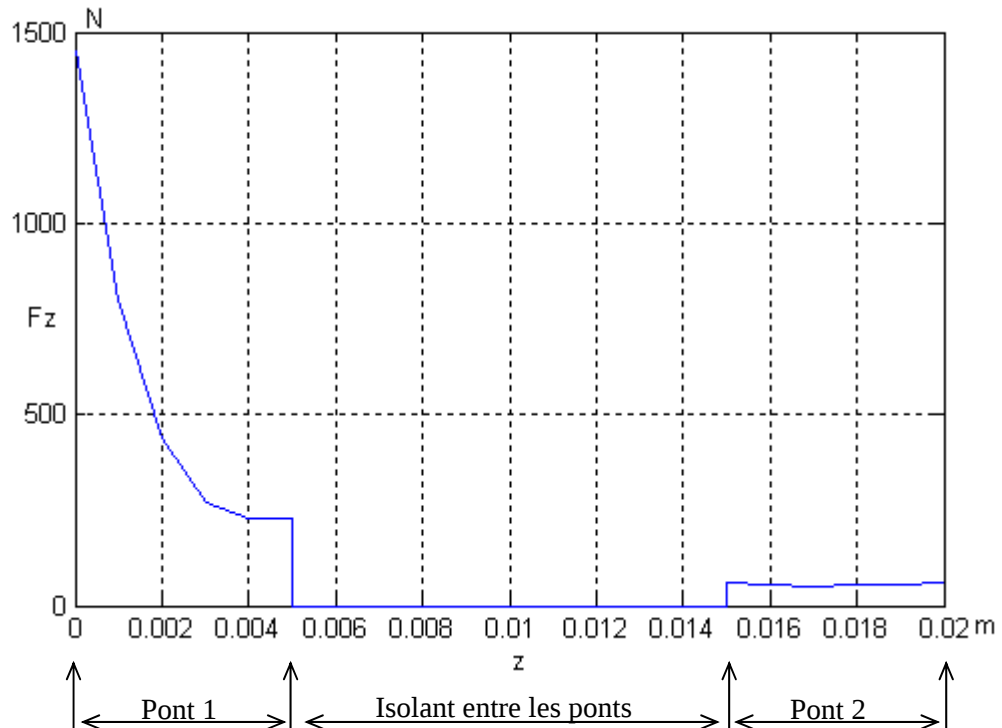


Figure. V.33 : Répartition de la force dans le projectile double ponts (cuivre)

La force de propulsion est répartie sur les deux ponts en présentant une concentration dans le premier avec une faible densité.

V.7.4 Prototype à ponts en titane

V.7.4.1 Répartition de l'induction B_y dans le propulseur

Dans le cas du projectile à deux ponts en titane, l'allure de la même simulation a été réalisée avec deux ponts de courant en titane, ayant des caractéristiques géométriques identiques à celles des ponts en cuivre.

La figure (V.34) représente la courbe de la variation du champ B_y suivant l'axe x .

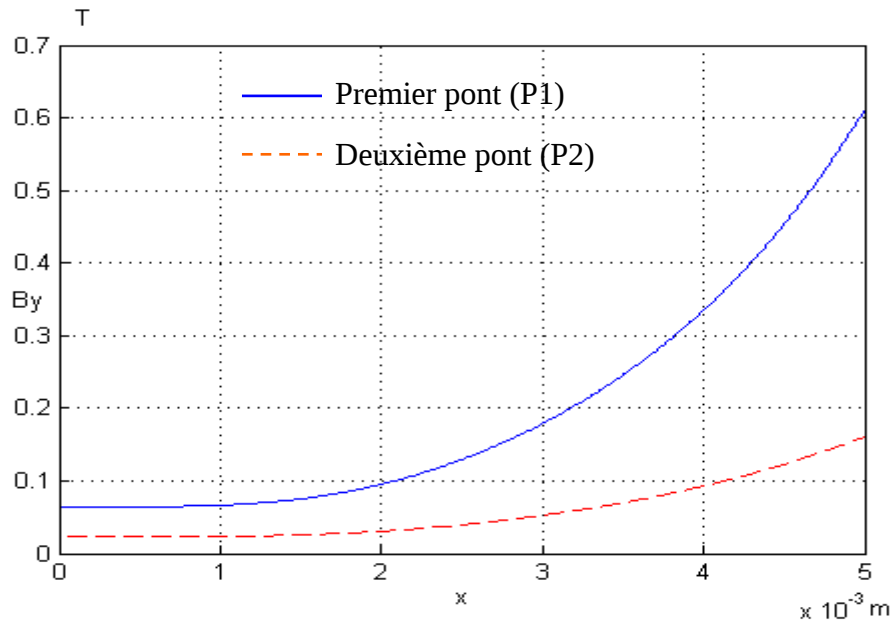


Figure .V.34 : Variation d'induction B_y suivant l'axe x dans les deux ponts

L'induction B_y dans le projectile est la même que le projectile le même comportement comme le double pont favorise l'induction dans le deuxième pont où le courant est réduit par rapport à celui du premier pont en cuivre mais avec des valeurs différentes. Elle atteint premier pont 0.17 T et la valeur maximale dans le deuxième pont 0.61 T une valeur de 0.17 T dans le premier pont et une valeur de 0.61 T dans le deuxième pont.

V.7.4.2 La diffusion du courant dans le projectile

La variation de la densité du courant suivant l'axe z dans le projectile est représentée sur la figure (V.35)

Nous pouvons constater que lorsque les ponts sont en titane, la répartition du courant est plus homogène. Environ de 68% du courant total circule dans le pont arrière et 32% dans le pont avant.

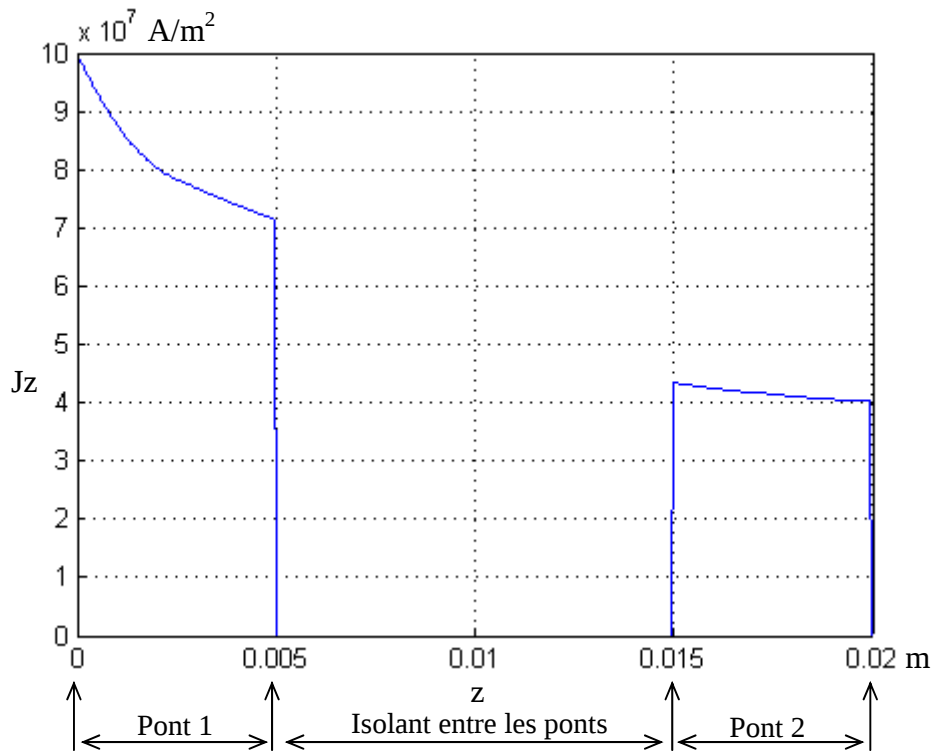


Figure .V.35 : Diffusion du courant suivant l'axe z dans les ponts en titane

V.7.4.3 Répartition de la force dans les ponts

La figure (V.36) représente la variation de la force dans les ponts en titane

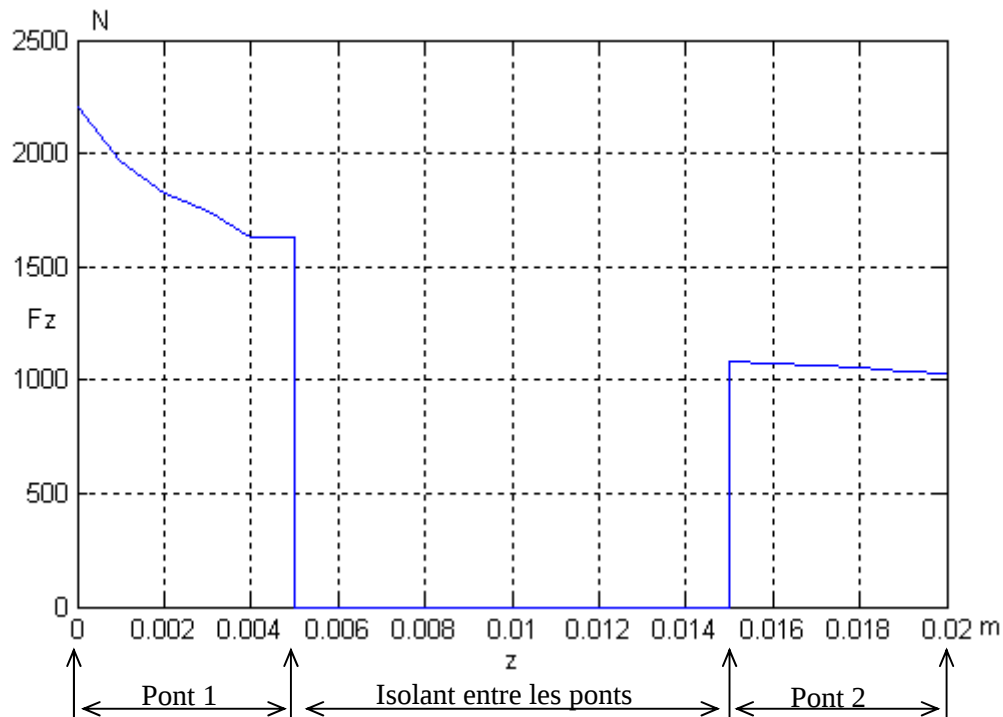


Figure .V.36 : Variation de la force suivant l'axe z dans le projectile (ponts en titane) :

En comparant les forces des deux types de projectiles à double ponts qui diffèrent que par le matériau qui les constituent, on constate que la force de propulsion est mieux répartie dans les ponts en titane et atteint une valeur appréciable allant de 2200 N. dans le premier pont jusqu'à 1080 N dans le deuxième pont.

V.7.5 CONCLUSION

La multiplication des ponts injection du courant dans le projectile s'avère une solution insuffisante sans tenir compte de la nature du matériau. Cette différence est liée à la conductivité du matériau, la conductivité à une influence sur l'effet de peau. Ce dernier est important quand le courant et le l'induction B magnétique sont bien répartis. Ainsi, une meilleure répartition de la force est assurée tout en remédiant relativement au problème d'échauffement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La force de propulsion produit par l'interaction entre le courant I circulant dans le pont, projectile-rails, et l'induction magnétique B créée par le courant I pour but de lancer une petite masse a grand vitesse et devient l'interet des chercheurs civils et militaires.

Pour distribuer ces forces électromagnétiques, il faut agir sur la répartition du courant circulant dans le projectile. Une distribution homogène suppose que la même force appliquée en chaque point soit égale. C'est dans cette optique que s'inscrit l'objet de cette étude sur le propulseur à rails, elle concerne essentiellement l'évaluation des forces électromagnétiques exercées sur le projectile.

Nous avons montré que dans un projectile constitué d'un seul pont de courant, le courant se concentre à l'arrière du projectile, et par conséquent, presque toute la force est appliquée à cette partie en question. Il a été aussi mis en exergue que la forme géométrique des rails et du projectile influe sur la répartition de la force sur le projectile. La forme ronde contribue à l'amélioration de cette dernière.

Les propulseurs en terme général sont des dispositifs électromagnétiques créé par l'interaction **courant – champ** une force de propulsion faille.

Le contrôle de cette force et l'augmentation du rendement de propulseur était l'intérêt de notre étude dans cette présente mémoire.

Dans ce faire, une étude autour le comportement des ces grandeurs mécaniques, électriques ainsi magnétiques évité menace dans une partie de cette mémoire.

L'exploitation d'un prototype de propulseur, nous à permet, de connaître le comportement du système ainsi formé, c'est à dire, avoir l'influence de la partie géométrique et la structure d'alimentation sur le comportement du système et la fiabilité de celle-ci.

Il reste comme un grande problème comment alimenté le système pour trouver un comportement idéal ; un système de propulsion stable, commandable, avec fort lancent,

Et a cause l'action d'interaction (force de Laplace, propulsion court et rapide), le temps de propulsion et très court et in contrôlable, pour ce faire, on a essai dans notre étude, a l'aide de SIMULINK, d'améliorer la forme de la force et la vitesse sur le projectile.

On a basé sur la référence [5] pour avoir les mêmes allures et valeurs du courant dans les rails.

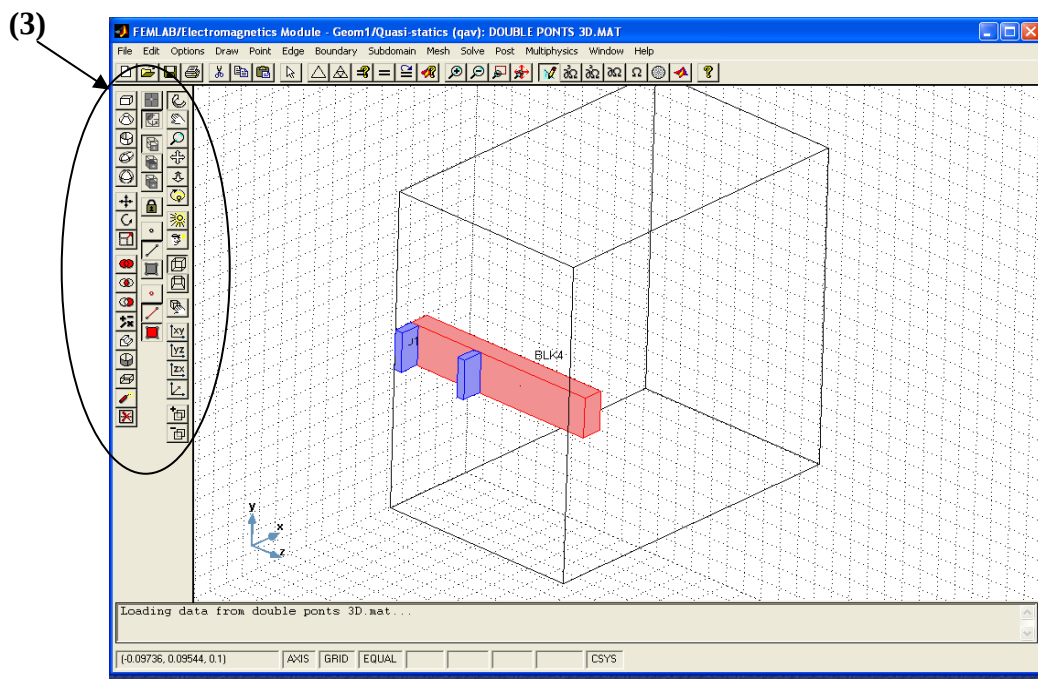
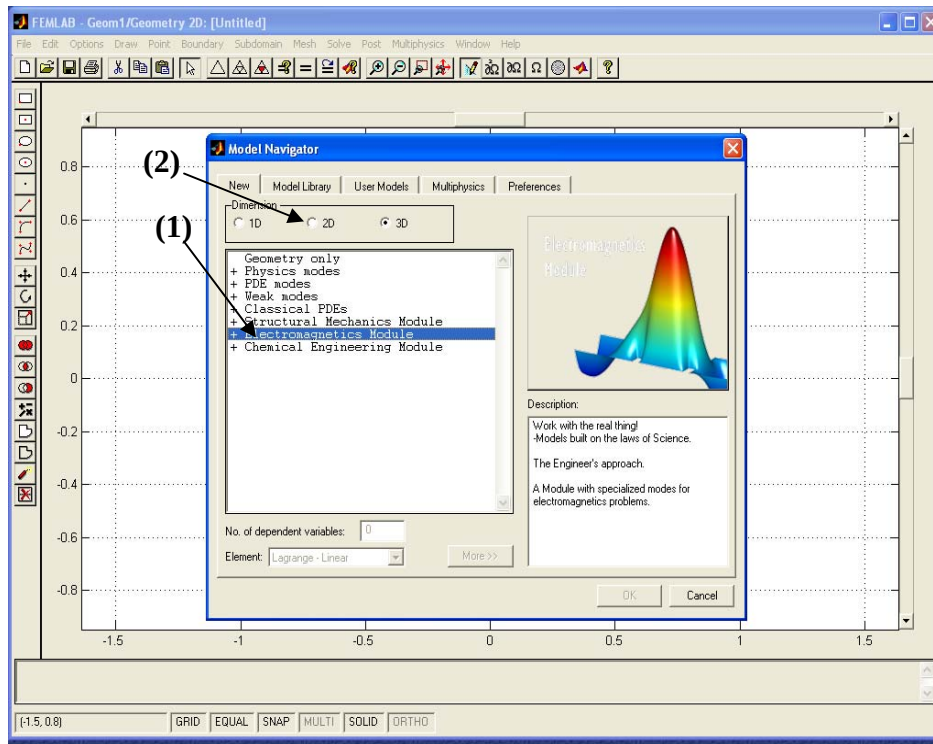
CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de FAMLAB, nous à permet, de visueler les différants grandeurs magnétiques et électriques ainsi ces valeurs.

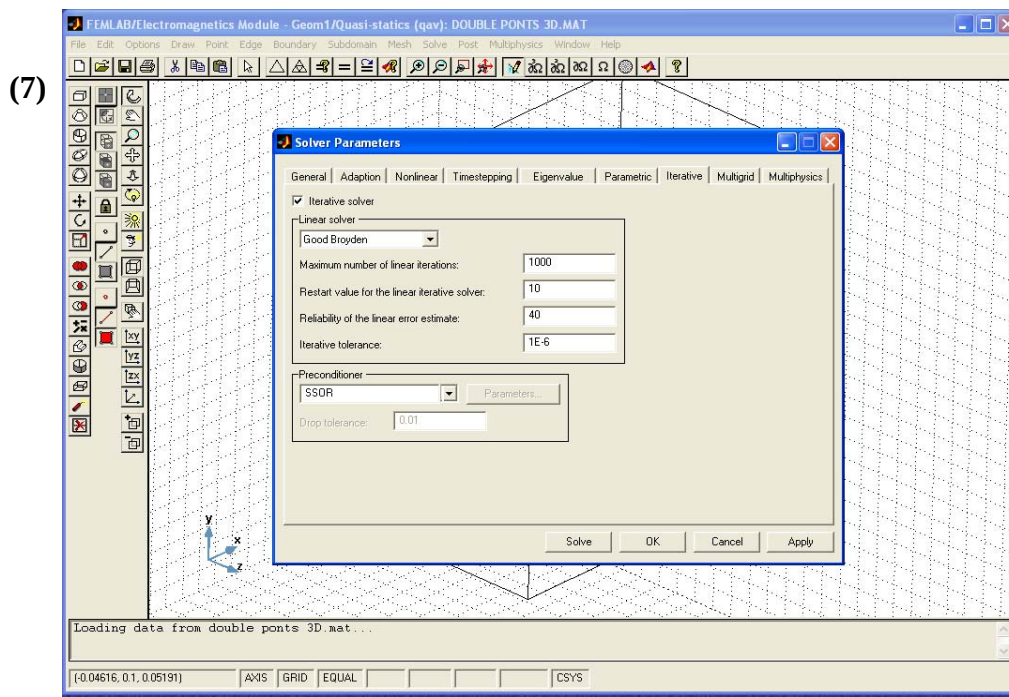
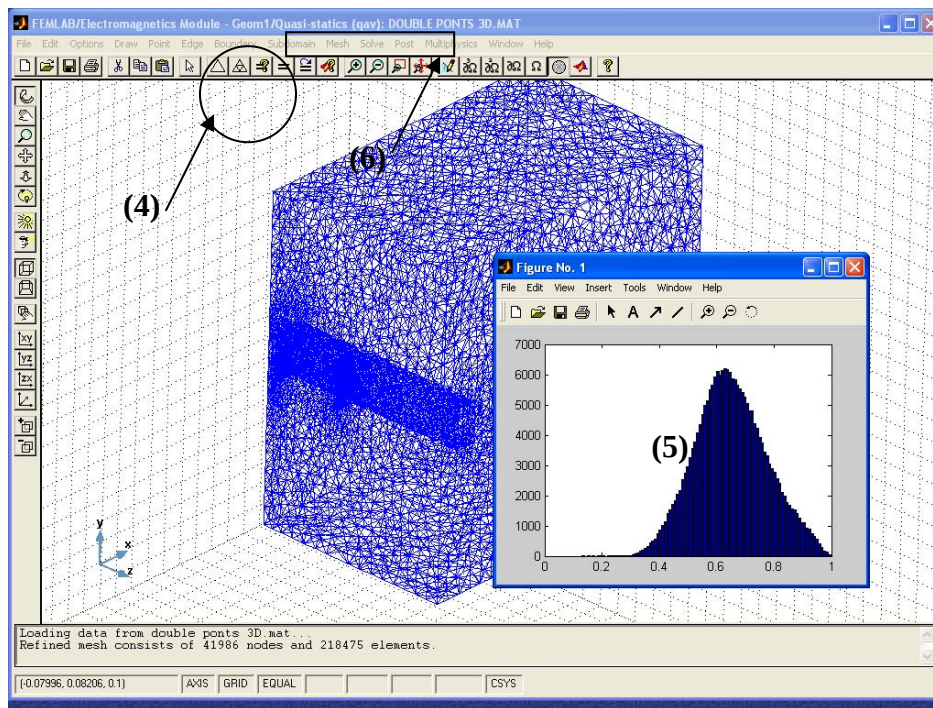
En fin, des laboratoires militaires et civils, sont encore en recherche et essais pour dimensionner le propulseur à rail qui peut lancer des petite masse ci des grande vitesse, dans le cadre de finalisé et commercialisé cette technique.

ANNEXES

Annexe : Les étapes de la résolution sur le Femlab



- (1) : Commandes pour choisir les dimensions de la géométrie
- (2) : Le domaine physique
- (3) : Commandes pour dessiner la géométrie



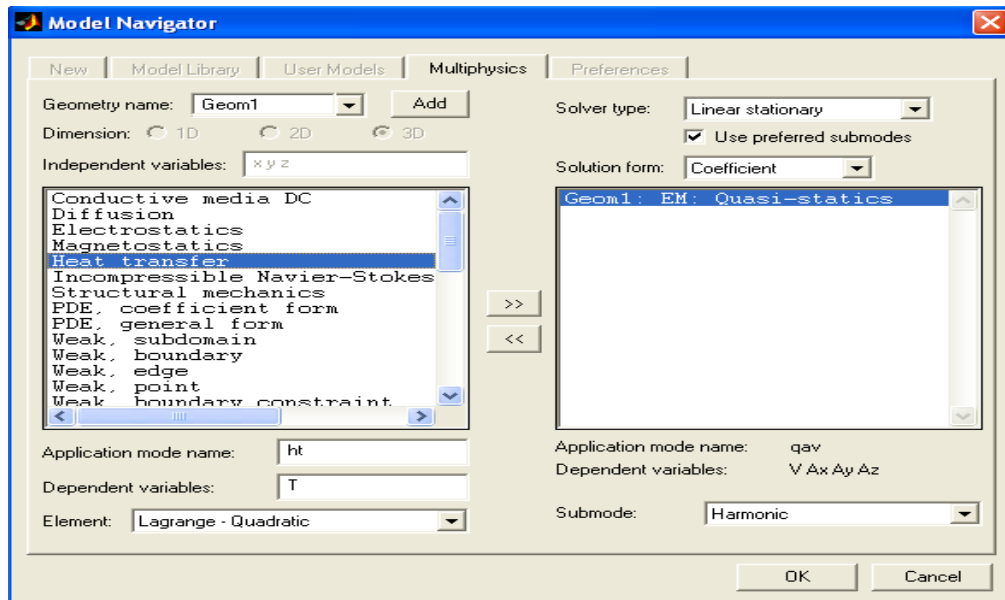
(4) : Commandes pour faire le maillage

(5) : La qualité du maillage

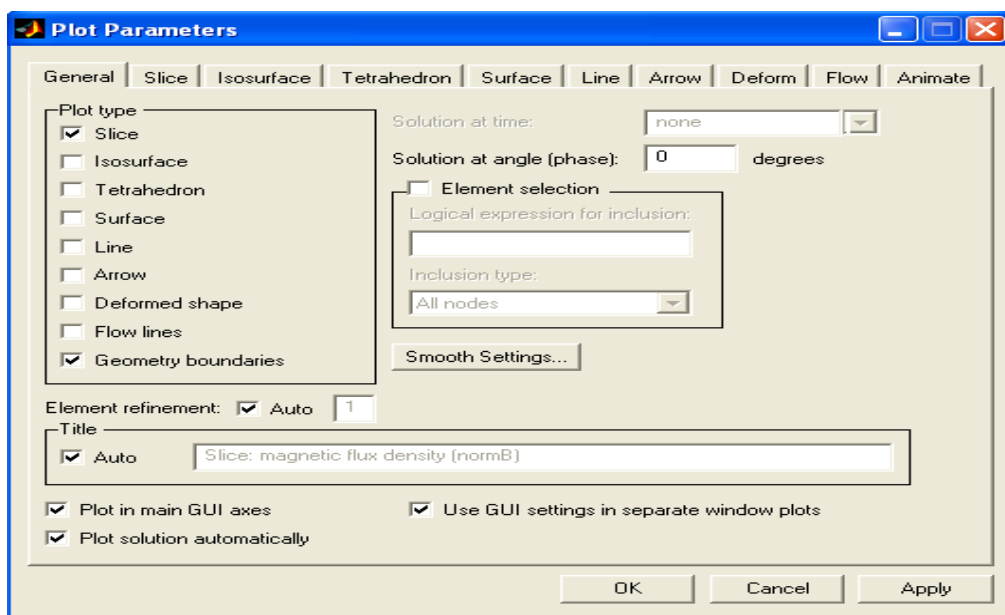
(6) : Commandes pour effectuer les conditions aux limites et les matériaux

(7) : Boite de paramètres de la résolution

(8)



(9)



(8) : Boite des couplages entre les domaines physiques

(9) : Boite d'affichage du résultat

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **I.R. McNab**, "Early Electric Gun Research," IEEE Trans. Mag., vol. 35, no. 1, pp. 250–261, 1999.
- [2] **A. Egeland**, "Birkeland's Electromagnetic Gun: A Historical Review," IEEE TRANS. PLASMA SCI., VOL. 17, NO. 2, PP.73–82, 1989.
- [3] **H.D. Fair**, "Electromagnetic Launch: A Review of the U.S. national Program," IEEE Trans. Mag., vol. 33, no. 1, pp.11–16, 1997.
- [4] **O.Letaieur** 'Modélisation des Systèmes Magnéto-Mécaniques Couplés Par La Méthode De Para métrisation ' Rapport de stage du D.E.A Génie électrique de l'Université Paris VI et ParisXI , septembre 1993.
- [5] **HOCINI Farid** ' Mise en Oeuvre d'un Modèle de Couplage Magnétique-Mécanique Pour L'étude du Régime Dynamique de Lanceurs Electromagnétiques Par La Méthode des Eléments Finis'. Thèse de magister EMP, 2003.
- [6] **E.Cagniot** 'Algorithmes Data-Parallèles Irréguliers Appliqués à la simulation Electromagnétique Tridimensionnelle' Thèse de Doctorat de L'université des Sciences et Technologie de Lille, 2001.
- [7] **Y. BENCHEIKA**, « Contribution a L'étude du Lanceur Inductif Linéaire».Mémoire de Ingienura, EMP1999. Etude Electromagnétique D'une Pompe.
- [8] **A.G.SCHMITT**, « Evaluation des Force des Exercées sur des Projectile Accélérés par un Propulseur Electromagnétique à rail ».Thèse de docteur L'université de Haute Al.
- [9] <http://www.elwingcorp.com>.
- [10] **ressources nationales de chimie** ([http://www.educnet.education.fr/rn chimie](http://www.educnet.education.fr/rn_chimie)).
- [11] **John David Jackson**, *Électrodynamique classique* (trad. de **(en)** Classical Electrodynamics.
- [12] **Le livre : « Electrotechnique »** Luc Lasne, éditions Dunod www.dunod.com (disponible à la bibliothèque et en librairie) détaille l'étude des matériaux et des circuits magnétiques. Un chapitre est par ailleurs dédié à l'expression des forces et des puissances liées au magnétisme.
- Les simulations de ce diaporama ont été réalisées à partir du logiciel *femm* : <http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage> .
- [13] **sacs.Charles Kittel** (trad. Nathalie Bardou, Évelyne Kolb), Physique de l'état solide (Solid state physics) . L. P. Lévy, Magnétisme et Supraconductivité (EDP Sciences) Lev Landau et Evguéni Lifchitz, Physique théorique, tome 8 : Électrodynamique des milieux continus, éd. MIR, Moscou . Neil W. Ashcroft, N. David Mermin, Physique des solides.

[14] Réponse à « Electrodynamic force law controversy » « Le canon électrique de PowerLabs »
« Un canon électromagnétique : programme naval innovant » **David Adams**, « Naval Railguns Are Revolutionary » University of Texas, « EM Systems » Technology Review: - « Electromagnetic Railgun Blasts Off » Erik Sofge, Popular Mechanics, - « World's Most Powerful Rail Gun Delivered to Navy » 14/11/2007 - **Michael Zitz**, Fredericksburg.com, « A missile punch at bullet prices », 17/1/2007 - Image et commentaires .

[15] **T. J. Burgess, E. C. Cnare, W. L. Oberkamp, S. G. Beard and M. Cowan**, « The Electromagnetic θ Gun and Tubular Projectiles » IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, JANUARY 1982.

[16] **HARRY D. FAIR, JR.**, « Electromagnetic Propulsion: A New Initiative » IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, JANUARY 1982.

[17] **M HAMEL Ammar**, Etude des performances Dynamiques du Lanceur Inductif Linéaire, de memoire de magister, EMP 2003.

[18] **Michael M. Tower and Charles H. Haight** 'Development of a High-Energy Distributed Energy Source Electromagnetic Railgun With Improved Energy Conversion Efficiency'
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. MAG-20, NO. 2, pp 298-301. 1984.

[19] shock compression technology and material science ,edited by A,B sawaoka ,pp.67-85 (c)1992 KTK .scientific publishers/Terra scientific publishing company ,Tokyo.

[20] **L. D. Holland** 'Distributed-Current-Feed and Distributed-Energy-Store Railguns'
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. MAG-20, NO. 2, pp 272-275 MARCH 1984.

[21] **A. L. Brooks, R. S. Hawke, J. K. Scuddert, and C. O. Wozynski**, 'Design And Fabrication Of large- And Small-Bore Railguns' IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. MAG-18, NO. 1, JANUARY 1982.

[22] **Anne-Gabrielle SCHMITT**, 'Evaluation Des Forces Exercées Sur Des Projectiles Accélérés Par Un Lanceur Electromagnétique A Rails', thèse de doctorat. Université de Haute Alsace 1998.

[23] **Rachel Monfredo Gee and Chadee Persad**, 'The Response of Different Copper Alloys as Rail Contacts at the Breech of an Electromagnetic Launcher' IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 37, NO. 1, JANUARY 2001 263.

- [24] **J.A. Pappas, C.L. Dunham, I.W. Chin, G.R. Colombo, T.J. Coradeschi, W.H. Davis, W.P. Dunn, T. Gora, K.E. Van Camp, M.J. Wie**, 'Experimental Progress at The ARDEC Electromagnetic Launch Facility' IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 25, NO. 1, JANUARY 1989.
- [25] **Serway**, PHYSIQUE 2, Electricité et Magnétique, 3 ème édition, Canada, 1992.
- [26] **J.P.Nougier**, 'Méthodes de calcul numériques', Edition Masson. 1987.
- [27] **K.Srairi**, 'Modélisation D'actionneurs Electromagnétiques Alimentés en Régime Transitoire' Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1997, France.
- [28] **G. W. Wellman and K. W. Schuler**, « Structural consequences of railgun augmentation » IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, JANUARY 1989.
- [29] Ali Kalantarnia, Asghar Keshtkar "**Increasing of railgun inductance gradient by using tapered I shaped rail** ", university of Tabriz, Iran.
- [30] **DHATT.G ; TOUZOT.G** 'Une présentation de la méthode des éléments finis' MaloineS.A Editeur 1984.
- [31] **J.L.Coulomb et J.C Sabonnadiere** 'CAO en électrotechnique' Hermès publishing 1985.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES D'INGENIORATE EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Proposé et dirigé par:

Mr .TORKI ZOHIR

Etudié par:

W.MAAROUF & M.DJEGHAM

THEME:

**CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UN
PROPULSEUR
ELECTROMAGNETIQUE**

RESUME:

Les recherches consacrées à l'accélération de projectiles ont révélé depuis de nombreuses années les limitations des propulseurs à poudre. Les systèmes de propulsion électromagnétiques sont l'objet de plusieurs études et recherches, parmi ces systèmes, les propulseurs à rails qui sont mis en oeuvre pour remplacer certains propulseurs classiques.

Le présent travail consiste en une contribution à l'étude d'un système de propulsion électromagnétique, Une approche d'aide à la conception et à la prédiction des performances de ce type de propulseur et mis au point.

Dans ce faire,des calculs analytiques et des simulation numérique sont effectués.

La résolution est effectuée grâce au calcul numérique basé sur la méthode des éléments finis ; les codes utilisés sont FEMLAB et MATLAB. L'étude a été menée sur plusieurs prototypes des propulseurs à rails.

MOTS CLES :

La force électromagnetique, propulseur à rail, la propulsion électromagnetiques.