

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Option : **Electrotechnique industrielle**

Présenté par
TAZEROUT Rafik
Et
TIMSILINE Amrane

Thème
**Evaluation de la force de lévitation magnétique
associée à la machine linéaire**

Mémoire soutenu publiquement le 24/09/2018 devant le jury composé de :

Mr Hassane MOHELLEBI
Professeur, UMMTO, Président

Mme Zehor MOHELLEBI eps OUDNI
MCB, UMMTO, Encadreur

Mme Nadia RADJA
MCA, UMMTO, Examineur

Résumé :

L'objet de ce travail est d'évaluer la force de lévitation magnétique qui permettrait à un objet de léviter.

Dans notre travail nous avons établi un programme sous Matlab nous permettant d'évaluer la force magnétique générée, la vitesse et le déplacement, et ce en lui introduisant les valeurs du champ magnétique relevés à partir des simulations.

Nous nous sommes intéressé également à l'effet de la dégradation des matériaux en variant la valeur de la perméabilité magnétique. D'autre part nous avons aussi vu l'intérêt du choix d'un entrefer adéquat.

MOTS CLES :

Lévitacion magnétique, machine linéaire, éléments finis, pdetool, simulation, force magnétique, lévitation répulsive

Dédicace

A tous ceux qui nous sont chers...

Remerciement

Nous remercions vivement les membres de jury qui nous ont honoré en jugeant
notre mémoire de fin d'étude.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement notre encadreur
Mme OUDNI.Z, mine de savoir et d'expérience, pour son grand
soutien au travail.

Nous n'oublierons pas de remercier tous nos enseignants du département, pour
les efforts qu'ils ont fournis durant notre cursus afin de
nous amener jusqu'au bout de la formation.

Enfin, un grand merci à nos familles respectives et nos amis et à tous ceux qui
ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

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

Chapitre I : Etude de l'état de l'art de la lévitation magnétique

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction | 2 |
| I.2 Théorème d'Earnshaw | 2 |
| I.3 Classification des lévitations magnétiques | 3 |
| I.3.1 Lévitation magnétique active (ou lévitation électromagnétique) | 3 |
| I.3.2 Lévitation magnétique utilisant le circuit LC | 9 |
| I.3.3 Lévitation supraconductrice | 10 |
| I.3.4 Lévitation électrodynamique à champs alternatifs | 17 |
| I.3.5 Lévitation pour corps diamagnétiques..... | 18 |
| I.3.6 Lévitation stabilisée par l'effet gyroscopique | 19 |
| I.3.7 Les suspensions magnétiques passives..... | 20 |
| I.4 Conclusion..... | 20 |

Chapitre II : Histoire et présentation de la machine linéaire

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction | 21 |
| II.2. Historique | 21 |
| II.2.1. Le Transrapid..... | 23 |
| II.2.2. Le Maglev | 24 |
| II.3. Présentation du moteur linéaire | 24 |
| II.3.1. Différences essentielles entre les moteurs linéaires et tournants | 25 |
| II.3.2. Topologie des moteurs linéaires..... | 25 |
| II.3.3. Classification des moteurs linéaires | 26 |
| II.4. Géométries des machines linéaires..... | 27 |
| II.5. Différents types de moteurs linéaires et leurs principes de fonctionnement | 29 |
| II.5.1. Moteur à inducteur simple sans circuit de retour | 30 |
| II.5.2. Moteur à induit en forme d'échelle | 30 |
| II.5.3. Moteur linéaire à induit composite..... | 31 |
| II.5.4. Moteur linéaire à induit massif | 31 |

| | |
|--|----|
| II.5.5. Moteur linéaire à aimants permanents..... | 32 |
| II.5.6. Moteurs pas à pas linéaires | 32 |
| II.6. Effets d'extrémités..... | 33 |
| II.7. Frein linéaire..... | 33 |
| II.8. Quelques domaines d'application du moteur linéaire | 34 |
| II.8.1. Transports | 34 |
| II.8.2. Applications domestiques | 34 |
| II.8.3. Applications fort couple..... | 35 |
| II.9. Avantages et inconvénients | 35 |
| II.10. Conclusion | 36 |

Chapitre III : Méthodes numériques de résolution

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 37 |
| III.2. Les modèles..... | 37 |
| III.2.1. Modèle analytique | 37 |
| III.2.2. Modèle intermédiaire..... | 37 |
| III.2.3. Modèle numérique..... | 38 |
| III.3. Méthodes d'analyse numérique du moteur linéaire à induction..... | 38 |
| III.3.1. Méthode des différences finies [2]..... | 38 |
| III.3.2. Méthode des intégrales de frontières | 39 |
| III.3.3. Méthode des éléments finis | 39 |
| III.4. Présentation de la méthode des éléments finis 2D | 40 |
| III.4.1. Principe de la méthode des éléments finis | 40 |
| III.4.2. Formulation éléments finis des équations électromagnétiques | 40 |
| III.4.3. Discrétisation du domaine d'étude..... | 43 |
| III.5. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis..... | 46 |
| III.5.1. Les avantage | 46 |
| III.5.2. Les inconvénients | 46 |
| III.6. Force magnétique | 46 |
| III.6.1. La force déduite à partir de la méthode de l'énergie magnétique totale | 46 |
| III.6.2. La force déduite à partir de la méthode de la Co-énergie..... | 47 |
| III.6.2. La force déduite à partir de la méthode des travaux virtuels..... | 47 |
| III.6.4. La force déduite à partir de la méthode du tenseur de Maxwell..... | 47 |
| III.6.5. La force déduite à partir de la méthode de LORENTZ..... | 48 |
| III.7. Conclusion..... | 48 |

Chapitre IV : Application et résultats

| | |
|--|------------|
| IV.1. Introduction..... | 49 |
| IV.2. Présentation de pdetool | 49 |
| IV.3. Etapes de la simulation sous pdetool | 49 |
| IV.3.1. Dessin du domaine | 49 |
| IV.3.2. Dessin de la structure..... | 50 |
| IV.3.3. Spécification des dimensions | 50 |
| IV.3.4. Spécification des paramètres des équations | 52 |
| IV.3.5. Génération du maillage..... | 53 |
| IV.3.6. Résolution..... | 54 |
| IV.4. Présentation des résultats | 55 |
| IV.5. Conclusion..... | 62 |
| | |
| Conclusion générale..... | 63. |

Listes des figures

Chapitre I :

Figures :

Page

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Principe de la suspension électromagnétique :a) Configuration physique b) Caractéristique (Force- distance) | 4 |
| Figure I.2 : Les schémas des brevets de Greiminger sur les suspensions commandées : a) Système de commande utilisant un rouleau mécanique raccordé avec un potentiomètre b) Configuration modifiée ; variation de la reluctance magnétique | 5 |
| Figure I.3 : Véhicule à suspension électromagnétique, réalisé à l'université de Sussex | 6 |
| Figure I.4 : a) tunnel sous vide dans lequel se déplaceront les navettes Hyperloop b) model de navettes Hyperloop (pod) | 7 |
| Figure I.5 : Trains à suspension magnétique : a) Train Suissmetro ; b) Transrapid | 8 |
| Figure I.6 : Stator d'un centreur magnétique | 8 |
| Figure I.7 : Configuration des paliers actifs tournant | 9 |
| Figure I.8 : Principe de la suspension électromagnétique à circuit résonant a) Configuration physique b) Caractéristique (Force- distance) | 10 |
| Figure I.9 : Un aimant flottant au-dessus d'un supraconducteur | 11 |
| Figure I.10 : Réseau de vortex dans un supraconducteur. Le champ magnétique peut pénétrer dans les zones "normales" entourées par les courants supraconducteurs | 12 |
| Figure I.11 : Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée. | 12 |
| Figure I.12 : Schéma représentant les forces sur l'aimant et le champ magnétique autour du supraconducteur | 13 |
| Figure I.13 : Principe de « Frozen-image magnet » | 14 |
| Figure I.14 : Boucle de courant supraconductrice en mouvement au-dessus d'une plaque conductrice | 14 |
| Figure I.15 : Résultats classiques obtenus pour la force de lévitation (Lift) et de guidage (Drag) | 15 |
| Figure I.16 : Les systèmes de train à lévitation magnétique : a) EML système (forces attractives) b) EDL, Maglev système (forces répulsives) | 16 |
| Figure I.17 : Système d'Halbach pour la lévitation électrodynamique | 17 |
| Figure I.18 : Expérience de Thompson. Une bobine suspendue au-dessus d'une plaque en aluminium | 18 |
| Figure I.19 : Une grenouille en lévitation | 19 |

Listes des figures

Figure I.20 : Toupie Levitron 19

Chapitre II :

Figures

Page

Figure II-1 : Brevet de Zehen en 1902 sur rails [ZEH_1902 22

Figure II.2 : schéma transrapid 23

Figure II.3 : prototype d'un Maglev 24

Figure II.4 Transformation d'un moteur rotatif en moteur linéaire 24

Figure II.5 : Topologie du moteur linéaire. 25

Figure II.6 : Classification des moteurs linéaires. 26

Figure.II.7 : Moteur linéaire tubulaire à stator long. 27

Figure II.8 : Moteur linéaire plat bilatéral à stator court 27

Figure II.9 : Structure à inducteur solidaire du rail fixe. 28

Figure II.10 : Structure à inducteur solidaire du rail mobile. 28

Figure II.11 : Structure à induit fixe et inducteur mobile 29

Figure II.12 : Moteur linéaire à inducteur simple. 29

Figure II.13 : Moteur linéaire à inducteur simple sans circuit magnétique de retour. 30

Figure II.14 : Moteur linéaire à induit en forme d'échelle. 30

Figure II.15 : Moteur linéaire à induit composite. 31

Figure II.16 : Moteur linéaire à induit magnétique massif. 31

Figure II.17 : Moteur linéaire à aimants permanents 32

Figure II.18 : Métro à moteur linéaire sur roues. 34

Figure II.19 : exemple d'application domotique 35

Chapitre IV :

Figure IV.1 : interface d'accueil pdetool 49

Figure IV.2 : Affichage boundary mode 50

Figure IV.3 : Boite de dialogue boundary conditions 50

Figure IV.4 : modèle d'étude pour un entrefer de 5mm 50

Figure IV.5 : architecture du modèle d'étude 50

Listes des figures

| | |
|---|----|
| Figure IV.6 : boîte de dialogue pour l'introduction des dimensions et de la position du bloc R5 | 51 |
| Figure IV.7 : Boîte de dialogue PDE specification | 52 |
| Figure IV.8 : Maillage du domaine d'étude | 54 |
| Figure IV.9 : Résultat obtenu pour $e=5\text{mm}$ | 54 |
| Figure IV.10 : répartition du potentiel vecteur A pour $e=1\text{mm}$ et $\mu_r=500$ | 55 |
| Figure IV.11 : répartition de l'induction magnétique B pour $e=1\text{mm}$ et $\mu_r=500$ | 56 |
| Figure IV.12 : répartition du champ magnétique H pour $e=1\text{mm}$ et $\mu_r=500$ | 56 |
| Figure IV.13 : courbe du champ magnétique H en fonction de la variation de l'entrefer pour $\mu_r = 1$ | 58 |
| Figure IV.14 : courbe du champ magnétique H en fonction de la variation de l'entrefer pour $\mu_r = 500$ | 58 |
| Figure IV.15 : courbe de $F_m(e)$ $\mu_r=1$ et $\mu_r=500$ | 59 |
| Figure IV.16 : courbe de $v(t)$ $\mu_r=1$ et $\mu_r=500$ | 59 |
| Figure IV.17 : courbe de $dz(t)$ $\mu_r=1$ et $\mu_r=500$ | 59 |
| Figure IV.18 : Courbe $F_m(e)$ $\mu_r=1000$ et $\mu_r=500$ | 61 |
| Figure IV.19 : Courbe $v(t)$ $\mu_r=1000$ et $\mu_r=500$ | 61 |
| Figure IV.20 : Courbe $dz(t)$ $\mu_r=1000$ et $\mu_r=500$ | 61 |

Dans sa quête de la perfection, l'homme à travers les âges a tenté d'exploiter et de tirer profit du moindre phénomène susceptible de lui apporter un quelconque intérêt. Le feu, ou encore l'électricité furent parmi les découvertes les plus marquantes dans l'histoire de l'humanité.

Plus récemment, la découverte du phénomène de la lévitation magnétique a suscité un très grand engouement dans l'univers scientifique, en effet, grâce à ses propriétés étonnantes et aux nombreuses possibilités qu'elle peut offrir notamment au quotidien, la lévitation magnétique est devenue l'une des priorités majeures des scientifiques, particulièrement à travers la recherche liée à la supraconductivité qui est une discipline intimement liée à la lévitation. Pour souligner l'importance de ces disciplines, 13 prix Nobel ont été décernés à des scientifiques travaillant sur ces sujets depuis le début du siècle dernier. [1]

Dans l'absolu, léviter désigne l'action d'un objet qui s'élève au-dessus d'une surface sans contact avec celle-ci et contre l'action de la pesanteur. Physiquement, on définit cela comme étant l'action de soustraire un objet à l'effet de la gravité. Pour se faire, une force est logiquement nécessaire à cet objet afin de contrer cette dernière.

L'objet de notre travail est d'évaluer la force de lévitation magnétique qui permettrait à un objet de léviter. Pour cela, nous avons choisis de le répartir en quatre chapitres.

Dans un premier lieu, nous parlerons de la lévitation magnétique en faisant un état de l'art puis en présentant ses différents types.

Dans un second temps, nous traiterons de la machine linéaire et on verra son développement à travers le temps, puis nous ferons une présentation de cette dernière sous différents types et nous terminerons par déterminer ses principaux domaines d'application.

Le troisième chapitre sera consacré aux différentes méthodes de calcul notamment la méthode des éléments finis.

Le dernier chapitre portera sur la simulation d'un modèle de lévitation sous l'environnement Matlab via l'outil pdeTool, et par la suite sur la présentation de nos résultats ainsi que leur interprétation.

Nous terminerons naturellement par conclure sur le travail effectué, et nous citerons éventuellement quelques perspectives.

L'objectif initial de ce travail était d'évaluer la force de lévitation magnétique liée à une machine linéaire

Nous avons entamé notre travail en élaborant un état de l'art sur la lévitation magnétique, nous avons parlé des différents types de lévitations magnétiques en nous accentuant sur la lévitation magnétique active.

Dans un second temps, nous avons traité la machine linéaire où nous avons d'abord parlé de son développement à travers le temps puis nous avons expliqué son principe de fonctionnement et sa conception avec les différentes géométries existantes.

Par la suite nous avons fait une brève présentation des méthodes de résolutions, nous avons conclu que les méthodes numériques notamment la méthode des éléments finis, sont les plus adéquates dans le cas de notre étude et des cas des phénomènes magnétiques.

Enfin, nous sommes passé à une simulation de notre modèle d'étude via l'outil pdeTool de Matlab, nous avons commencé par expliquer en détail les étapes à suivre dans pdeTool afin d'introduire tous les paramètres de notre modèle, par la suite nous sommes passé à la résolution puis à la présentation et l'interprétation des différents résultats obtenus.

Notre étude a été faite en variant deux paramètres à savoir l'entrefer et la perméabilité magnétique relative du matériau utilisé, nous avons choisi deux valeurs de la perméabilité qui se trouvent dans la plage standard des matériaux magnétiques et une autre qu'on a pris comme cas extrême à savoir $\mu_r = 1$ qui équivaut à un matériau démagnétisé.

Durant notre travail, nous avons constaté, premièrement, que l'augmentation de l'entrefer agit négativement sur la force de lévitation magnétique en la faisant diminuer. L'optimisation de la force magnétique passe donc inévitablement par un choix adéquat de la dimension de l'entrefer.

Deuxièmement nous avons observé qu'avec l'utilisation de matériaux de différentes perméabilités, on obtient des résultats assez différents qui nous permettent de dire que la perméabilité magnétique du matériau joue un rôle important dans la génération de la force magnétique, il est donc plus intéressant de choisir des matériaux magnétiques ayant une grande perméabilité magnétique.

Conclusion générale

En effet nous avons observé des résultats médiocres en simulant avec un matériau ayant une perméabilité relative égale à 1, tant dis qu'avec des valeurs concordantes avec des matériaux magnétiques, on obtient des résultats et des grandeurs de la force magnétique satisfaisants et en adéquation avec la dimension de notre système.

Cela nous permet de conclure que la dégradation du matériau magnétique utilisé peut être néfaste à un système de lévitation magnétique.

1. ALLAG.H « Modèle et calcul des systèmes de suspension magnétique passive. » Thèse Doctorat. Université de GRENOBLE, 2010
2. DELAMARE J., « Suspensions magnétiques partiellement passives », *Thèse de Doctorat*, soutenue au LEG – INP Grenoble, 1994.
3. CHIBA A., FUKAO T., ICHIKAWA O., OSHIMA M., TAKEMOTO M. and DORRELL D., “Magnetic Bearing and Bearingless Drives,” *Newnes, An imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford*
4. FILATOVE A. V., “Null-E Magnetic Bearings”, *Phd Thesis*, University of Virginia, 2002.
5. CHARPENTIER J. F. AND LEMARQUAND G., “A comparative analysis of permanent magnet-type bearingless synchronous motors for fully magnetically levitated rotors,” *Journal of Applied Physics*, vol. 83, no. 11, pp. 7121–7123, 1998
6. MATSUMURA F., OKADA Y., FUJITA M. and NAMERIKAWA T. “State of the art of magnetic bearings,” *JSME International Journal*, vol. 40, no. 4, pp. 553–560, 1997.
7. BREAZEALE J. B., MCILWRAITH C. G. and DACUS E. N. “Factors limiting a magnetic suspension system,” *Journal of Applied Physics*, vol. 29, pp. 414, 1958.
8. GRAEMINGER B., “*British Patent*” No 74499, 24541, 1912.
9. JAYAWANT B. V., “Electromagnetic suspension and levitation”, *Edward Arnold*, London, 1981.
10. SINHA P. K., “Electromagnetic Suspension, Dynamics and Control”. *Peter-Peregrinus Ltd*, London, United Kingdom, 1987.
11. KEMPER H., “*German Patent*” No 643316, 644302, 1937.

12. FAURE F., “Suspension magnétique pour volant d’inertie”, *Thèse de Doctorat*, soutenue au LEG – INP Grenoble, 2003.
13. MOON F. C., “Superconducting Levitation, Applications to Bearings and Magnetic Transportation.” *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co*, KGaA, Weinheim, Germany, 2004.
14. F. T. HOLMES & J. W. BEAMS “Frictional Torque of an Axial Magnetic Suspension”, *nature*, 140, pp. 30-31, 03 July 1937.
15. FRAZIER R. H., GILINSON P. J., and OBERBECK G. A., “Magnetic and Electric Suspensions”, MIT Press, 1974.
16. JIN J. and HIGUCHI T., “Dynamics and stabilization of magnetic suspension using tuned LC circuits,” Proceedings of the IV International Symposium on Magnetic Bearings, ETH, Zurich, Switzerland, 1994.
17. TIXADOR P., “Matériaux Supraconducteurs”. Lavoisier, Hermes Sciences Publication, Paris, 2003.
18. TINKHAM M., “Introduction to Superconductivity”. McGraw-Hill, Inc, New York, 2nd edition, 1996.
19. SAINT-JAMES D., SARMA G., and THOMAS E. J., “Type II Superconductivity”, Pergamon Press, New York, 1969.
20. BEDNORZ J. G. and MULLER K. A., “Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system,” *Zeitschrift für Physik B- Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189–193, 1986.
21. WU M. K., ASHBURN J. R., TORNG C. J., HOR P. H., MENG R. L., GAO L., HUANG Z. J., WANG Y. Q. and CHU C.W., “Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure,” *Physical Review*

- Letters, vol. 58, no. 9, pp. 908–910, 1987.
22. FILATOV A. V., S. F. KONOVALOV, “Low-hysteresis interaction of a hard type II superconductor with a permanent magnet,” *Physica C*, vol. 271, no. 3–4, pp. 225–229, 1996.
 23. YANG Y., “Vertical and lateral forces when a permanent magnet above a superconductor traverses in arbitrary directions”, *Superconducting Sciences and Technology*, Vol.21, pp:5,2008.
 24. RICHARD F., POST, “Magnetic Levitation for Moving Objects,” U.S. Patent No. 5,722,326 March 3, 1998
 25. POST, RICHARD F., “Inductrack Demonstration Model,” Report UCRL-ID-129664, February 3, 1998.
 26. HALBACH, K., “Applications of permanent magnets in accelerators and electron storage rings,” *Journal of Applied Physics*, vol. 57, p. 3605, 1985.
 27. POST, RICHARD F., “Inductrack Magnet Configuration,” U.S. Patent No. 6,633,217 B2, October 14, 2003.
 28. FUNK D., GETSLA’S K., “Senior Project Magnetic Levitation Train”, Final Report, Electrical & Computing Engineering, Bradley University, 2005.
 29. SIMON M. D., HEFLINGER L. O., RIDGWAY S. L., “Spin stabilized magnetic levitation,” *American Journal of Physics*, vol. 65, no. 4, pp. 286–292, 1997.
 30. GANS R. F., JONES T. B., WASHIZU M., “Dynamics of the Levitron,” *Journal of Physics,D-Applied Physics*, vol. 31, no. 6, pp. 671–679, 1998.
 31. YONNET J. P., “Etude des paliers magnétiques passifs”, Thèse de Doctorat d’état Es Sciences, Grenoble, 1980.

32. ADJINA Miloud, "Contribution à l'étude d'un moteur synchrone linéaire à aimant permanent", Thèse Magister, Université de Batna 2011.
33. GONG Jinlin, "Modélisation et conception optimale d'un moteur linéaire à induction pour système de traction ferroviaire, Ecole national de Lille ,2011
34. GHORAB Olga, "Performances d'un moteur asynchrone linéaire cylindrique", Thèse Doctorat, Université Annaba, 2007.
35. KHOUANE Boulanouar, "Etude et commande d'un moteur synchrone linéaire", Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2012
36. HAMANI Sadek, ZEGHOUANI, "Etude de la lévitation magnétique des trains à levitation magnétique". Master en electrotechnique, Université Béjaia 2016
37. Reda BELKHIR, Houda LAHLOU and all, "Propulsion à lévitation magnétique". Projet physique, INSA Rouen, 2011.

I.1 Introduction

La lévitation dite magnétique est de loin le principe de lévitation le plus universalisé. Ses avantages majeurs sont principalement d'ordre économique avec un coût relativement réduit, mais aussi d'ordre technique avec une grande aisance de mise en œuvre et un haut niveau de robustesse. Autre grand intérêt de la lévitation magnétique : les différentes formes sous lesquelles peut se décliner cette dernière, ce qui rend son utilisation d'autant plus intéressante. Ces formes variées sont le fruit des études de nombreux chercheurs dans le but de contourner l'impossibilité qu'impose le théorème d'Earnshaw.

I.2 Théorème d'Earnshaw

« un ensemble de charges ponctuelles ne peut être maintenu dans un équilibre stable uniquement par des interactions d'ordre électrostatique entre les charges. ». Ceci fut l'énoncé du théorème d'Earnshaw publié en 1839 par Samuel Earnshaw. Ce théorème a été étendu par la suite à divers corps magnétiques.

Le docteur Jérôme Delamare [2] dans l'une de ses thèses en 1994 a expliqué comment obtenir, ou non, une stabilité lors de la lévitation d'un corps magnétique tel un aimant permanent, un matériau ferromagnétique, un diamagnétique ou encore un conducteur. A partir de cette thèse on a pu tirer les conclusions suivantes [1].

- **Aimants dans des champs statiques**

Si un aimant d'aimantation rigide est plongé dans un champ statique, l'étude de la stabilité par le biais des raideurs confirme qu'au moins l'un des trois axes de translation de l'aimant sera instable. Du fait, il n'est pas possible de réaliser une suspension stable uniquement à base d'aimants. Ces propriétés s'appliquent également aux bobines qui s'apparentent aux aimants une fois parcourues par un courant constant.

- **Matériaux à aimantation non constante dans des champs statiques**

D'un point de vue de stabilité, les matériaux peuvent être classés en deux catégories :

- Les matériaux dont la perméabilité relative μ_r est supérieur à 1 qui correspond à une susceptibilité magnétique χ positive. Ces matériaux sont les ferromagnétiques et les paramagnétiques.

- Les matériaux dont la perméabilité relative μ_r est inférieure à 1 qui correspond à une susceptibilité magnétique χ négative. Ces matériaux sont les diamagnétiques.

- Si la susceptibilité magnétique χ est positive, le corps ne peut trouver une position d'équilibre stable vu qu'il y a instabilité suivant au moins une des trois directions.

- Si la susceptibilité magnétique χ est négative, la somme des raideurs sera positive, toutefois il est impossible d'établir une conclusion générale de stabilité ou d'instabilité, chaque système étant un cas particulier.

- **Matériaux conducteurs dans un champ statique**

Dans ce cas de figure, pour obtenir une stabilité il doit y avoir un conducteur qui ferait circuler un courant permanent en champ statique, chose que seuls les supraconducteurs peuvent assurer. Nous parlerons alors de la lévitation supraconductrice.[12]

- **Matériaux conducteurs dans un champ magnétodynamique**

Tout conducteur se trouvant dans un champ magnétodynamique est soumis à des raideurs dont la somme est toujours positive. Chacune des raideurs peut donc être positive et engendrer du fait une stabilité sur les trois axes de translation. Nous pouvons donc déduire qu'un conducteur peut être stable dans un champ magnétodynamique.

Bien que le théorème d'Earnshaw ait été publié au XIX^{ème} siècle pour l'électrostatique et étendu au magnétisme en 1940, certains scientifiques tentent toujours de concevoir des suspensions constituées uniquement de matériaux à aimantation rigide ou de matériaux ferromagnétique. Néanmoins, et malgré les quelques brevets déposés à propos des systèmes de lévitation, aucun prototype n'a pu les valider et mettre en défaut le dit théorème.

Les nombreux et récents travaux sur les systèmes de lévitation ont conduit à l'élaboration de plusieurs catégories permettant ainsi de les classer.

I.3 Classification des lévitations magnétiques

I.3.1 Lévitation magnétique active (ou lévitation électromagnétique)

Dans la plupart des actionneurs que nous utilisons, les champs magnétiques sont utilisés pour générer des forces. Généralement, ces actionneurs ne fonctionnent que suivant un seul degré de liberté (ddl). En prenant l'exemple d'une machine tournante, seuls les efforts magnétiques permettant la rotation de l'arbre sont exploités. Par contre, pour un objet en lévitation dans un

champ magnétique, les efforts doivent être générés et contrôlés suivant six degrés de libertés.

Le terme contrôle en génie électrique nous conduit souvent à penser à des solutions de type électronique ou électronique de puissance. C'est pour cela que les auteurs ont appelé les lévitations utilisant ce principe : lévitations magnétiques actives, ou plus souvent : paliers magnétiques actifs (PMA). Les paliers magnétiques actifs emploient des systèmes de commande pour contrôler le champ magnétique afin de produire les forces de rappel qui agissent directement sur le corps suspendu. Généralement, le courant variable contrôlé est généré par des bobines [3] [4][5] [6][7].

Les paliers magnétiques actifs peuvent produire des capacités de charges et des raideurs élevées, mais ils ont aussi des inconvénients majeurs dont certains proviennent du principe même de leur fonctionnement. En effet, la compensation des charges élevées nécessite un champ magnétique puissant associé à de grandes quantités d'énergie.

Si les charges sont dynamiques, elles doivent être rapidement contrôlées via des procédés d'électronique de puissance. Les contrôleurs de paliers magnétiques sont relativement chers vu qu'ils sont destinés à de grandes puissances, ils sont également assez encombrants et ont une fiabilité réduite. Par ailleurs, les PMA ont aussi besoin d'une source d'alimentation externe et de fils de connexion, cela a souvent pour conséquence de complexifier leur intégration dans un dispositif final.

Pour comprendre le fonctionnement d'un système de lévitation magnétique, l'exemple le plus basique est celui d'un électroaimant avec un corps ferromagnétique (Figure I.1.a), la force verticale d'attraction dans ce cas est inversement proportionnelle à la distance entre les objets (Figure I.1.b)

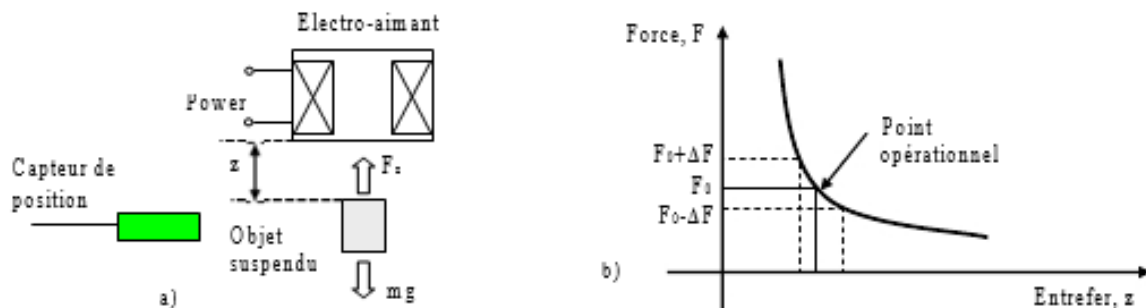


Figure I.1 : Principe de la suspension électromagnétique

a) Configuration physique

b) Caractéristique (Force- distance)

Dans ce type de suspensions, le plus grand inconvénient reste la stabilité (théorème d'Earnshaw).

Pour y remédier, on a fréquemment eu recours à des solutions particulières dont certaines sont de longues dates. Des méthodes de contrôle explicites qui diffèrent par la manière de commande du champ magnétique ont été ainsi employées par plusieurs auteurs.

Le premier travail notable à ce sujet fut proposé pour la première fois en 1912 par Graeminger [8][9][10], avec son révolutionnaire système de transport de lettres, ce dernier est composé d'un électro-aimant sous forme de U suspendu au-dessus d'un rail ferromagnétique. Des capteurs mécaniques permettent de maintenir une distance constante entre les deux parties en agissant sur des résistances qui forment des potentiomètres de commandes (Figure I.2.a). Une autre configuration modifiée basée sur le principe de variation de la reluctance magnétique a été réalisée plus tard par Graeminger (Figure I.2.b).

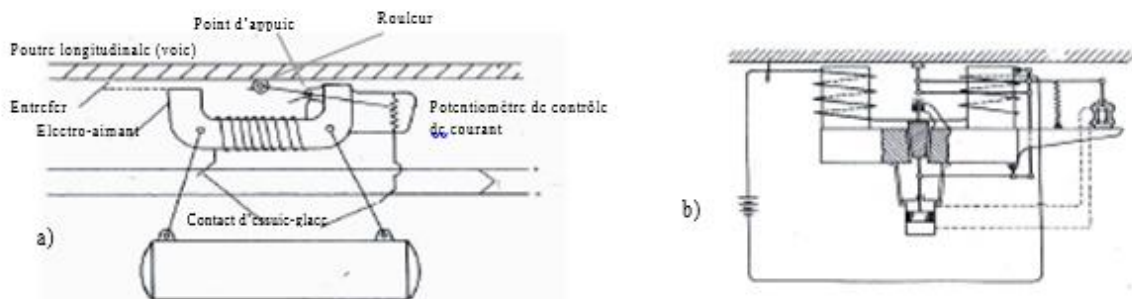


Figure I.2 : Les schémas des brevets de Graeminger sur les suspensions commandées

- a) Système de commande utilisant un rouleau mécanique raccordé avec un potentiomètre
- b) Configuration modifiée ; variation de la reluctance magnétique

Vingt-cinq ans plus tard, Kemper réalise le premier prototype de suspension électromagnétique qui a pu soulever 210Kg avec une puissance de 270W à une hauteur de 15 millimètres d'entrefer, ce dernier a été mesuré par le biais d'un capteur de déplacement capacitif. Pour pouvoir piloter l'électroaimant, des valves thermoïoniques ont aussi été utilisées [9] [11].

Les travaux de Kemper furent jugés intéressants pour une application ferroviaire (train sans roues) sauf que le poids des contrôleurs de puissance (valves thermoïoniques) employés pour mettre en application le système électromagnétique de Kemper constituait un obstacle majeur. A cette époque, l'utilisation des électroaimants contrôlés a été considéré non viable.

Cependant, le potentiel des suspensions électromagnétiques dans le domaine du transport a été reconsidéré favorablement, avec l'avènement de la technologie des transistors capables de manipuler des niveaux de puissances élevés. Plusieurs prototypes ont été réalisés en laboratoires vers la fin des années soixante mais la réalisation la plus remarquable fut celle mise en œuvre par le staff Krauss-Maffei à l'université de Sussex [9] [10] (Figure I.3).



Figure I.3 : Véhicule à suspension électromagnétique, réalisé à l'université de Sussex

Après cette réussite, plusieurs universités à travers le monde ont dépensé beaucoup de moyens et d'efforts pour des recherches exhaustives dans ce qui jusque-là n'était qu'un rêve fou, le train en lévitation allait connaître une révolution.

Les travaux les plus récents et sans doute les plus révolutionnaires sont ceux de l'Hyperloop de Dubaï de l'entreprise américaine Hyperloop one (figure I.4). Né d'une idée d'Elon Musk, ce projet révolutionnaire dévoilé en février 2018 est un train subsonique qui va circuler dans des tubes hermétiques comprenant des navettes autonomes appelées « Pods » qui permettront aux voyageurs de se déplacer à des vitesses allant jusqu'à 1200km/h ne laissant ainsi aucun champ à la comparaison avec le temps de trajet actuel. Ce projet relevant de la science-fiction modifiera complètement la dynamique derrière le transport de marchandise et de voyageurs.



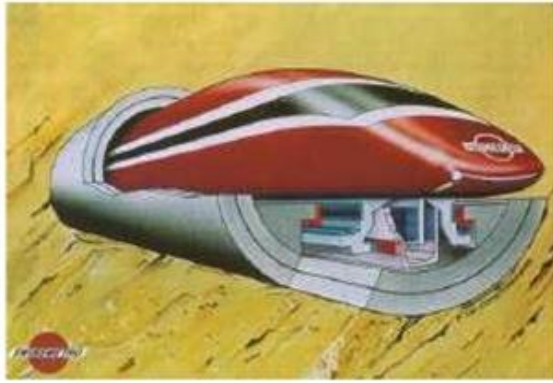
(a)

(b)

Figure I.4 : a) tunnel sous vide dans lequel se déplaceront les navettes Hyperloop
b) model de navettes Hyperloop (pod)

L'ancêtre de l'Hyperloop est irrévocablement le Swissmetro, qui lui aussi fut un projet fascinant et tout aussi révolutionnaire avant qu'il ne soit abandonné comme tous les projets de trains à lévitation dans le monde entier principalement à cause de leurs coûts prohibitifs. Dans ce projet les ingénieurs ont eu à faire face à un grand nombre de contraintes : le roulis le tangage, le lacet, la hauteur et la position latérale du train. Le sixième degré de liberté correspond au déplacement du train, pris en charge par un moteur linéaire. La lévitation du Swissmetro est complexe car excepté le déplacement du train, tous les autres degrés de libertés sont instables. Plus concrètement, sans un contrôle très précis de tous les électroaimants servant à sa sustentation, le train a une forte tendance naturelle à venir se coller à son rail [12].

De par le monde, un seul projet commercialement exploitable a pu voir le jour et c'est la ligne de 30 kilomètre reliant le centre de Shanghai et son aéroport international de Pu Dong qui a été inaugurée en 2002 et dont le premier trajet commercial a eu lieu en mars 2004 [13].



(a)



(b)

Figure I.5 : Trains à suspension magnétique

a) Train Suissmetro ; b) Transrapid

Tous les développements connus dans le monde des trains à sustentations électromagnétiques, constituent des systèmes contrôlés pour des déplacements linéaires. En parallèle il y avait des réalisations en lévitation active pour des objets en rotation. Une grande partie de travaux après ceux de Graeminger et Kemper sur le développement de la suspension électromagnétique utilisant le même principe de commande, ont été réalisés et publiés à l'Université de Virginie (University of Virginia), particulièrement sur les suspensions des rotors. Des travaux récents, concernent la création et le développement des paliers tournant comprenant des bobinages semblables à ceux des machines. La Figure I.6 présente le stator avec son bobinage d'un centreur industriel.

**Figure I.6 :** Stator d'un centreur magnétique

Une autre possibilité pour simplifier la construction des paliers magnétique est d'utiliser trois pôles seulement [3], Trois sources de champ magnétique présentent le nombre minimal

nécessaire d'électro-aimant pour la lévitation du rotor du palier (Figure I.7.a). L'avantage est de minimiser la taille du dispositif ainsi que les circuits électroniques associés. Mais le domaine d'instabilité augmente par rapport à des systèmes avec un nombre plus grand d'électro-aimants (Figure I.7.b).

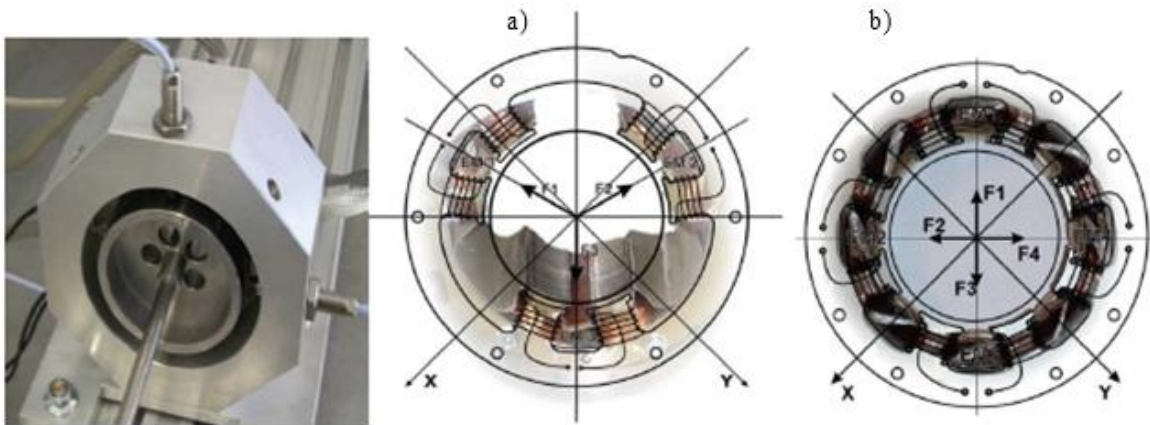


Figure I.7 Configuration des paliers actifs tournant

Dans les domaines de la biologie et de la médecine, les suspensions électromagnétiques ont eu un très grand intérêt. Les travaux effectués par [14] portaient sur des rotors de centrifugeuses à grande vitesse, allant jusqu'à 77 000 tr/min pour un rotor de diamètre 3,97mm. Ces centrifugeuses grâce à leur vitesse de rotation extrêmement élevée permettent de séparer des substances de différentes densités. Elles rendent possible l'enrichissement de l'uranium à un taux que peu d'autres méthodes peuvent atteindre. Là encore, l'intérêt du palier magnétique vient du fait qu'il permet d'atteindre des vitesses importantes. Bien qu'on a confirmé l'emploi des paliers actifs dans ce domaine, ce sont essentiellement les paliers passifs qui sont les plus utilisés [12].

I.3.2 Lévitation magnétique utilisant le circuit LC

Pour les suspensions électromagnétiques explicites, un capteur extérieur est utilisé pour mesurer la distance ou l'entrefer entre le corps suspendu et l'électro aimant, contrairement à la méthode implicite, on profite de la variation d'impédance due à l'éloignement ou l'approchement de l'objet suspendu pour la création d'un circuit résonnant à l'aide d'un condensateur déjà existant dans le circuit électrique (Figure I.8).

Le point de fonctionnement doit coïncider avec la pente ascendante de la courbe de résonance

du courant afin de pouvoir l'attirer. L'allure de la force en Figure I.8 est celle de la force sans circuit résonant.

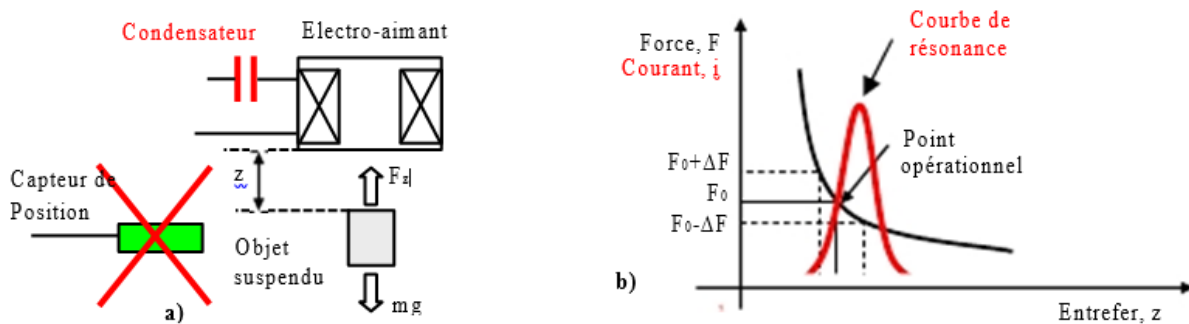


Figure I.8 : Principe de la suspension électromagnétique à circuit résonant

a) Configuration physique

b) Caractéristique (Force- distance)

Cette technique a été appliquée de façon sérieuse à partir de 1960 à l'MIT, à l'université de Virginie et aussi par le groupe industriel General Electric plus récemment [15] [16]. Le circuit LC est appliqué aussi aux paliers magnétiques tournants qui sont, en effet, très proches des paliers magnétiques actifs (PMA) dans le sens où ils s'appuient également sur des bobines avec des courants qui varient selon la position du rotor et qui exigent également des câblages externes et des alimentations. Par contre, le plus grand avantage par rapport à la plupart des PMA, c'est que les paliers à circuit "LC" sont simples et n'ont pas de capteurs de position, mais les inconvénients résident surtout dans la faiblesse du rendement, dans la capacité de charge et dans la rigidité. En outre les PMA peuvent aussi être conçus de manière à fonctionner sans capteurs de position explicites. Enfin, Pour toutes ces raisons, les paliers à circuit "LC" ne peuvent pas rivaliser avec les PMA.

I.3.3 Lévitation supraconductrice

Une autre approche pour réaliser une lévitation stable sans contact consiste à utiliser des corps magnétiques avec lesquels le théorème d'Earnshaw peut être facilement contourné. Il s'agit des matériaux supraconducteurs. Dans la littérature, les auteurs ont décrit que la lévitation supraconductrice se réalise sous deux formes différentes. La première utilise un effet spécifique aux supraconducteurs : le piégeage du flux magnétique dans l'état mixte, et la seconde concerne

la création des forces répulsives entre les aimants supraconducteurs et des courants induits -par mouvement- dans des plaques conductrices. Ce deuxième principe est le plus utilisé, notamment dans le domaine de transport de passagers [9][10][13].

Un autre effet propre aux supraconducteurs permet également d'obtenir un phénomène de lévitation : il s'agit de l'effet Meissner. Dans les supraconducteurs de type I et au-dessous d'une valeur de champ dite première valeur critique H_{c1} pour les supraconducteurs de type II, le matériau devient parfaitement diamagnétique, expulsant complètement vers l'extérieur les champs magnétiques provenant d'autres sources [17][18][19].

a- Lévitation utilisant le piégeage du flux magnétique

Au-dessus de H_{c1} le matériau commence à perdre sa supraconductivité permettant ainsi au champ magnétique de pénétrer partiellement. Pour observer le phénomène de la lévitation pour le fameux système composé d'un aimant et une pastille supraconductrice (Figure I.9), on utilise des supraconducteurs de type II, dans lesquels l'état Meissner n'est présent que pour des champs magnétiques très faibles [17].



Figure I.9 : Un aimant flottant au-dessus d'un supraconducteur

En plus des avantages déjà cités, l'utilisation des supraconducteurs de type II, travaillant au-dessus de H_{c1} présente des capacités de charge et une rigidité plus élevées que celles qu'on peut obtenir avec des supraconducteurs de type I. La découverte récente des supraconducteurs à haute température critique HTC tels que les YBaCuO -qui sont typiquement des supraconducteurs de type II- restent dans l'état supraconducteur à des températures beaucoup plus élevées -bien au-dessus du point d'ébullition de l'azote liquide [20] [21].

Pour ces raisons, des efforts importants ont été toujours dédiés à la conception des paliers magnétiques à supraconducteurs de type II à HTC [22].

Un supraconducteur de type II, n'expulse pas totalement les lignes de flux. Il est formé de zones supraconductrices -où circulent les courants- et de zones dans l'état normal dans lesquelles le champ magnétique peut pénétrer (Figure I.10). Les zones, où pénètrent les flux magnétiques, sont appelées des **vortex** car ce sont les courants supraconducteurs circulant autour d'elles qui stabilisent le champ magnétique. On dit que le supraconducteur est dans un état "mixte" pour le distinguer de l'état Meissner [17].

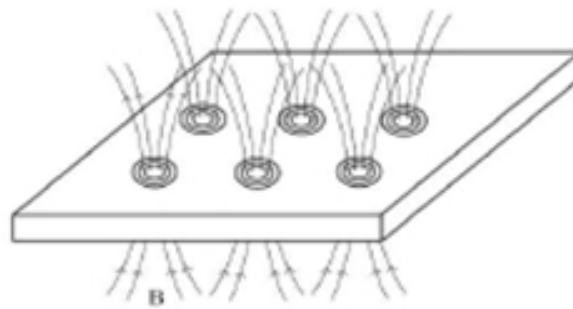


Figure I.10 Réseau de vortex dans un supraconducteur. Le champ magnétique peut pénétrer dans les zones "normales" entourées par les courants supraconducteurs

Quand les supraconducteurs de type II sont utilisés et quand ils interagissent avec des champs magnétiques dépassant H_{c1} , les caractéristiques (force de lévitation - déplacement) présentent des formes d'hystérésis (à cause des phénomènes de piégeages), ce qui rend le mouvement des rotors des paliers tournants imprévisible et provoque des défaillances issues des vibrations engendrées. Ce phénomène d'hystérésis nuisible pour les paliers tournant joue un rôle très important dans la stabilité de la lévitation pour le système de l'aimant et la pastille supraconductrice. La Figure I.11, présente la courbe expérimentale de la force de lévitation qui montre l'état attractif et répulsif dus au comportement hystérésis du supraconducteur YBaCuO. [13][17].

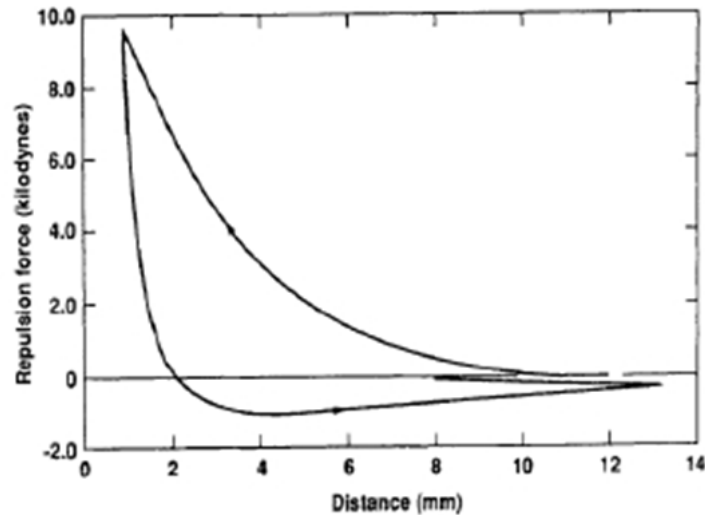


Figure I.11 : Force en fonction de la distance pour un Aimant Supraconducteur [1].

Afin d'illustrer les forces et la stabilité d'une manière simplifiée, on peut assimiler le moment magnétique de l'aimant à celui d'une spire parcourue par un courant. L'expulsion du champ magnétique généré par l'aimant au voisinage d'un supraconducteur détermine une variation dans l'espace de ce champ (gradient), ce qui produit une force sur le moment magnétique de l'aimant. Le champ d'induction magnétique B créé par l'aimant dévie autour du supraconducteur et il exerce sur un segment de la spire fictive une force de Lorentz donnée par:

$$d\vec{F} = i \oplus \left(d\vec{L} \cdot \vec{B} \right) \tag{I.1}$$

Tenant compte de la symétrie axiale du problème, on peut décomposer les vecteurs de l'induction magnétique et du courant en leur composante axiale et radiale. Les forces agissant sur la spire, calculées selon l'équation (I.1) ont également une composante axiale et une composante radiale (Figure I.12).

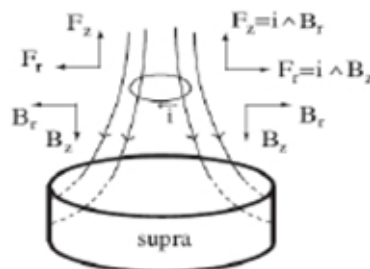


Figure I.12 : Schéma représentant les forces sur l'aimant et le champ magnétique autour du supraconducteur

L'effet d'attraction entre le supraconducteur et l'aimant est un effet caractéristique des supraconducteurs de type II. Plusieurs travaux sur la stabilité dynamique de lévitation d'aimant avec le supraconducteur ont été présentés par Davis. D'autres études sur les modes de fréquences naturelles ont été réalisées en Norvège [23] et en Pologne. A cause de l'effet de piégeage des méthodes d'image sont employés et la plus connue est celle appelée « Frozen-image magnet » [23] (Figure I.13). Par voie numérique le comportement des supraconducteurs est implémenté souvent en éléments finis, afin de déterminer les forces et même l'effet mécanique.

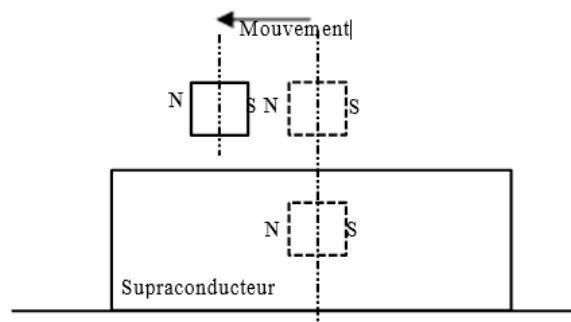


Figure I.13 : Principe de « Frozen-image magnet »

b- Lévitation à base des courants de Foucault induits par le mouvement des aimants supraconducteurs (lévitation électrodynamique).

Cette technique de lévitation magnétique est basée sur la répulsion provoquée par exemple, par un aimant supraconducteur qui bouge au-dessus d'une surface conductrice ou l'inverse.

Les électroaimants ou les aimants permanents classiques sont également capables de jouer le même rôle que les supraconducteurs mais ils produisent des champs magnétiques nettement inférieurs, pas suffisamment efficaces pour soulever des objets lourds comme, par exemple, les véhicules de transport de passager. Les aimants supraconducteurs en raison de leur champ magnétique intense ont rendu cela possible. Ce phénomène est appelé « lévitation électrodynamique ou plus souvent EDL (electrodynamic levitation) ». Plusieurs chercheurs pensèrent à un système de guidage composé de boucles ou de bobines supraconductrices parcourues par un courant continu (aimants supraconducteurs) et des plaques planes conductrices et amagnétiques (Figure I.14), [9].

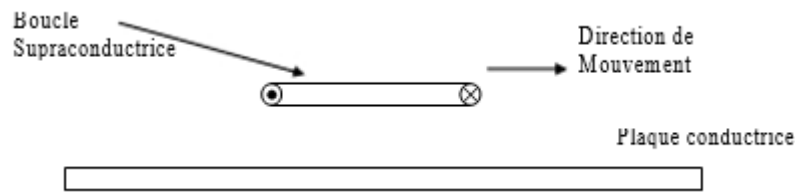


Figure I.14 : Boucle de courant supraconductrice en mouvement au-dessus d'une plaque conductrice

Tant que la bobine est à l'arrêt le champ magnétique n'est pas affecté par la réaction de la plaque. Si maintenant la bobine commence à se déplacer, des courants induits se développeront au niveau de la plaque provoquant ainsi une force de lévitation qui va repousser la bobine vers le haut (loi de Lenz). En augmentant la vitesse, ce phénomène devient de plus en plus intense provoquant l'augmentation de la force verticale. Des essais expérimentaux ont prouvé que cette force n'augmente pas indéfiniment mais elle va se stabiliser à un seuil limite

(Figure I.15) [13].

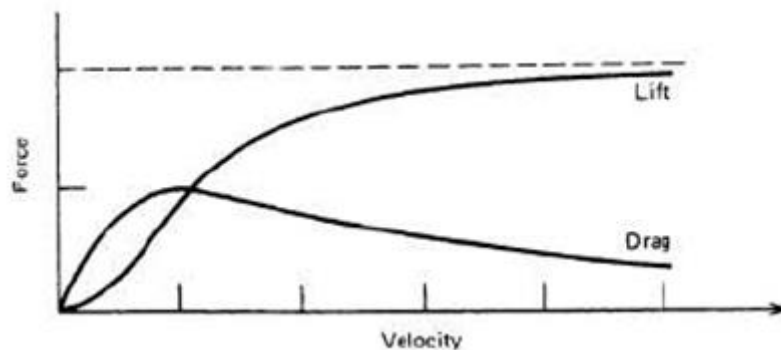


Figure I.15 : Résultats classiques obtenus pour la force de lévitation (Lift) et de guidage (Drag)

Les caractéristiques principales de la lévitation électrodynamique ont été expliquées après confirmation par des résultats expérimentaux [10]. Si une bobine parcourue par un courant, accélère à une hauteur constante au-dessus d'une voie de guidage, le système génère au départ une force de lévitation verticale proportionnelle au carré de la vitesse, pour qu'à la fin cette force atteigne une valeur limite. Quant à la force horizontale de traînée, elle est d'abord proportionnelle à la vitesse et passe par un sommet, pour diminuer ensuite d'une façon

inversement proportionnelle à la vitesse. On peut trouver dans la littérature des courbes expérimentales des forces de lévitation et de guidage en fonction de la vitesse (Figure.I.16), [9][10].

À haute vitesse, la résistance diminue plus lentement à cause de l'effet de peau. Les courants de Foucault induits sont essentiellement limités à une mince couche à la surface de la plaque et par conséquent la voie de guidage semble avoir plus de résistivité.

La traînée électromagnétique, contrairement à la traînée aérodynamique, diminue avec l'augmentation de la vitesse. Elle présente une caractéristique remarquable pour la stabilité des sustentations électrodynamiques [13].

En raison des avantages que présente ce type de lévitation notamment à vitesse élevée, on peut comprendre pourquoi les chercheurs se sont autant acharnés pour réaliser des prototypes de lévitation électrodynamique. Un prototype de train à lévitation électrodynamique supraconductrice –appelé couramment **Maglev** ou aussi **véhicule à moteur linéaire (Linear Motor Car)**, est basé sur le principe de lévitation répulsive, contrairement aux systèmes de lévitation électromagnétique tels que les Transrapids, les Suissmetro...etc., qui utilisent le principe de lévitation attractive. D'après ce qu'on a vu sur les deux modèles on peut imaginer leurs configurations les plus simples, comme elles sont présentées sur la Figure I.16.a et la Figure I.16.b, [10].

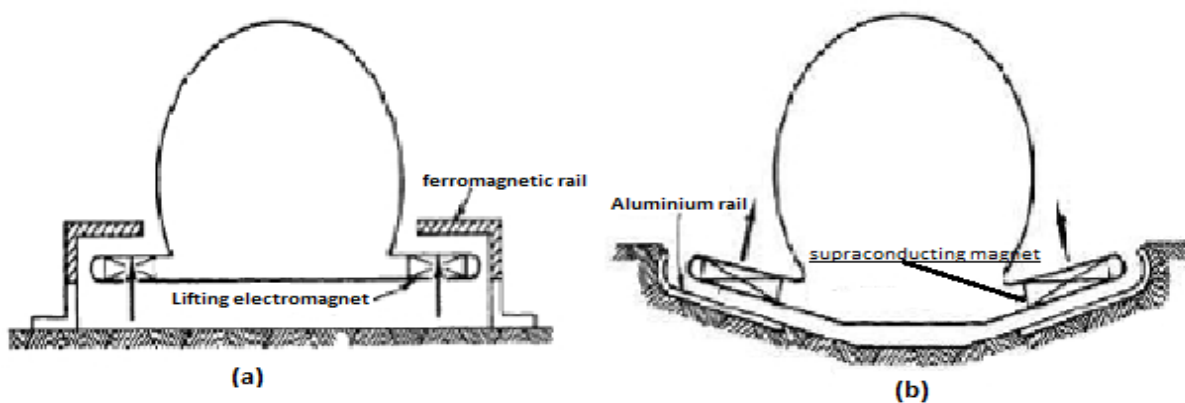


Figure I.16 : Les systèmes de train à lévitation magnétique

a) EML système (forces attractives)

b) EDL, Maglev système (forces répulsives)

L'inconvénient majeur des trains Maglev à supraconducteurs est qu'ils nécessitent de grandes quantités d'énergie et leurs prix sont très élevés. Pour pallier à ce problème, des solutions ont été proposées. Richard et Poste du laboratoire LLNL (Lawrence Livermore

National Laboratory) ont développé une nouvelle méthode pour les Maglev vers la fin des années 1990 [24][25], cette dernière est appelée Inductrack Maglev. Elle est basée sur un arrangement d'aimants permanents modernes sous forme de blocs d'Halbach (appelée ainsi, car elle a été inventée par Klaus Halbach pour l'utilisation en accélération de particules [26]. La configuration d'aimants d'Halbach linéaire –telle qu'elle est présentée en Figure I.17-, est une disposition spéciale d'aimants utilisée pour créer un champ magnétique sinusoïdal intense au-dessous des aimants, tout en annulant presque les champs magnétiques au-dessus.

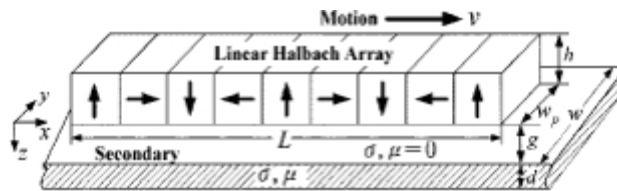


Figure I.17 : Système d'Halbach pour la lévitation électrodynamique

Ces blocs sont placés sous le train, en face du rail formé de matériau conducteur et dont la lévitation électrodynamique est induite par le mouvement de guidage horizontal. Le premier train à l'échelle des laboratoires en utilisant la méthode Inductrack a été réalisé en 1998 par [25]. Ils ont réussi à créer un chariot d'essai, mais il est encore au stade de développement. Aussi, dans le cadre des programmes proposés par les sociétés « Maglev US Department of Transportation, Federal Transit Administration et General Atomics (GA) », des projets de création des trains à sustentation magnétique utilisant ce principe sont lancés et de nombreuses personnes travaillent déjà sur les sujets [27] [28].

I.3.4 Lévitation électrodynamique à champs alternatifs

Le principe électrodynamique est basé sur la génération des forces répulsives dues aux courants induits (loi de Lenz). Ce type de lévitation électrodynamique est mieux adapté aux supraconducteurs qui sont capables de fournir des champs intenses par rapport aux conducteurs normaux (cuivre, aluminium...). Les procédés de refroidissement et le coût des supraconducteurs eux-mêmes, nous conduisent souvent à chercher des solutions alternatives. Or pour avoir des courants induits dans des objets conducteurs, il suffit de les placer à proximité des bobines en cuivre alimentées par des sources de tension ou de courant variables.

L'inconvénient majeur de cette méthode vient de la puissance importante qu'il est nécessaire de fournir à la bobine. Cette puissance engendre un échauffement important de la

partie suspendue et de l'inducteur. L'expérience de Thompson prouve qu'on peut obtenir la lévitation à partir de 60 Hz et un fort courant issu du circuit résonnant.

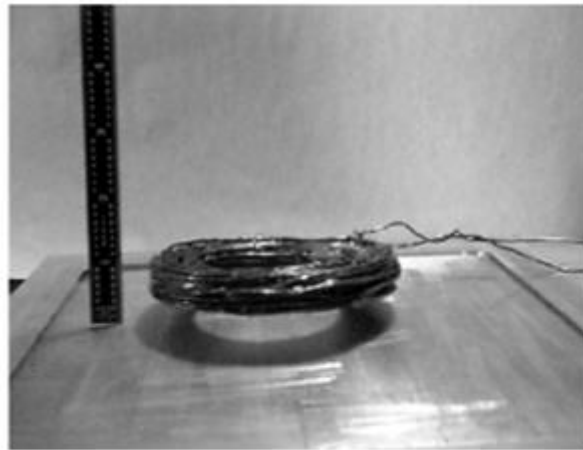


Figure I.18 : Expérience de Thompson.

Une bobine suspendue au-dessus d'une plaque en aluminium

Cette méthode n'est utilisée de manière industrielle que dans des fours à induction. En effet, lorsque le matériau conducteur à chauffer est soumis à des champs variables, il se crée en son sein une force qui a tendance à le repousser loin de l'inducteur. Ceci permet de ne pas avoir de contact entre le métal en fusion et le creuset qui risque de le polluer.

I.3.5 Lévitation pour corps diamagnétiques

Pour comprendre ce phénomène, il faut rappeler quelques principes. Toute matière réagit à un champ magnétique mais elle le fait différemment selon qu'elle est diamagnétique, paramagnétique ou ferromagnétique. La plupart des substances, et en particulier tous les composés organiques (bois, plastiques, tissus animaux), sont diamagnétiques, c'est-à-dire que, dans un champ magnétique, leur orientation est contraire à celle de ce champ. Les matériaux paramagnétiques sont moins courants : ce sont quelques gaz, dont l'oxygène, quelques métaux, dont le chrome et l'aluminium, ils s'aimantent dans le même sens que le champ, mais de façon beaucoup plus faible. Enfin, les ferromagnétiques sont encore plus rares, ce sont le fer, le nickel le cobalt, et certains alliages dont la réaction à un champ magnétique est très marquée ; ils s'orientent en accord avec le champ. Avec les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques, il faut des champs très intenses pour que les effets soient manifestes.



Figure I.19 : Une grenouille en lévitation

Le type de lévitation par diamagnétisme est stable (théorème d'Earnshaw), puisque la lévitation est totalement passive, sans apport d'énergie extérieur, contrairement à la sustentation fondée sur le ferromagnétisme (lévitation électromagnétique).

L'inconvénient principal de ce type de lévitation est que la force en question est faible, et il faut un champ intense appliqué à des objets de masse réduite pour que les effets se manifestent. De plus, l'intensité du champ diminue beaucoup dès qu'on s'éloigne du centre des bobines, et l'expérience se limite donc à une très petite zone à l'intérieur du tube inducteur.

I.3.6 Lévitation stabilisée par l'effet gyroscopique

Il a été démontré qu'une suspension dynamiquement stable peut être réalisée en utilisant uniquement des aimants permanents [29] [30]. Cela ne contredit pas le théorème d'Earnshaw qui est valable uniquement pour les systèmes fixes et ne considère pas des effets dynamiques causés par la rotation. La rotation est capable de stabiliser la lévitation, cet effet est connu sous le nom de « l'effet **gyroscopique** ».



Figure I.20 : Toupie Levitron

Malheureusement, les suspensions ou les lévitations utilisant ce principe, ont été jugées difficile à mettre en œuvre en pratique, en raison d'un rendement et d'une capacité de charge faibles, de plus, la stabilité est très sensible aux variations de nombreux paramètres incluant le poids du rotor, l'aimantation rémanente des aimants et surtout la vitesse de rotation. La suspension est stable que dans une étroite plage de vitesse [12].

I.3.7 Les suspensions magnétiques passives

Les paliers magnétiques passifs sont les plus simples à réaliser. Ils sont autonomes et leur fonctionnement ne nécessite aucun apport d'énergie venant de l'extérieur (à l'inverse des paliers magnétiques actifs), et ne nécessite pas un refroidissement non plus (à l'inverse des paliers supraconducteurs). Néanmoins, ils ne peuvent être utilisés seuls pour des raisons de stabilité (théorème d'Earnshaw) [31]. Les paliers magnétiques passifs doivent donc être associés à un système mécanique (roulement, palier hydrodynamique, butée à aiguille...) ou à un autre type de paliers magnétiques. Les paliers magnétiques passifs sont de deux types : les paliers à aimants permanents et les paliers à réluctance variable.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi un état de l'art sur les différents types de lévitations magnétiques, et présenté quelques réalisations avec leurs avantages et inconvénients vis-à-vis de la stabilité et du coût principalement.

II.1. Introduction

Dans le domaine des entraînements électriques, la machine linéaire est considérée comme l'une des plus grandes innovations technologiques et cela depuis 1970 mais son réel essor n'a été considéré qu'à partir de 1990, car c'est durant cette période que ce type de machine a connu un développement considérable.

Comment expliquer que ce principe attractif et simple à implémenter, n'ait pas connu un essor très rapide ?

Afin de pouvoir se développer significativement sur un marché industriel, une « nouvelle technologie » doit répondre à des critères précis :

- Apporter des avantages technologiques répondant aux attentes du marché.
- Etre fiable, avoir une maturité technologique suffisante.
- Etre compatible avec les standards du marché.
- Etre économiquement concurrentielle avec les autres technologies disponibles.

Si toutes ces conditions ne sont pas remplies, l'utilisation de la technologie se limite à des marchés «de niche », demandeurs des performances spécifiques à la technologie, conduisant systématiquement à des conceptions dédiées à une application. Les critères de « standard » et de « compétitivité économique » sont alors secondaires, l'essor industriel de la technologie reste limité [32].

II.2. Historique

Le premier concepteur de machine linéaire fut l'allemand Alfred Zehen après avoir déposé un brevet d'application industrielle au Etats-Unis en 1902 concernant la mise en application de la machine linéaire dans le domaine ferroviaire.

Ce type d'application utilise des roues et des rails traditionnels. Le train est propulsé par des forces magnétiques provenant de courants induit dans une bande conductrice située entre les rails. La première apparition de moteur linéaire pour la traction ferroviaire débute en 1905 grâce à l'idée de Zehen. C'est un moteur linéaire polyphasé enserrant une plaque disposée verticalement entre les deux rails. La Figure 1-1 présente le brevet. Ce type de train peut avoir des roues en acier ou pneumatique. Le circuit inducteur est sur le véhicule et le circuit induit

est constitué par le 3^{ème} rail. Le circuit induit est réalisé à partir d'une plaque de cuivre ou d'une plaque composite aluminium-cuivre [32].

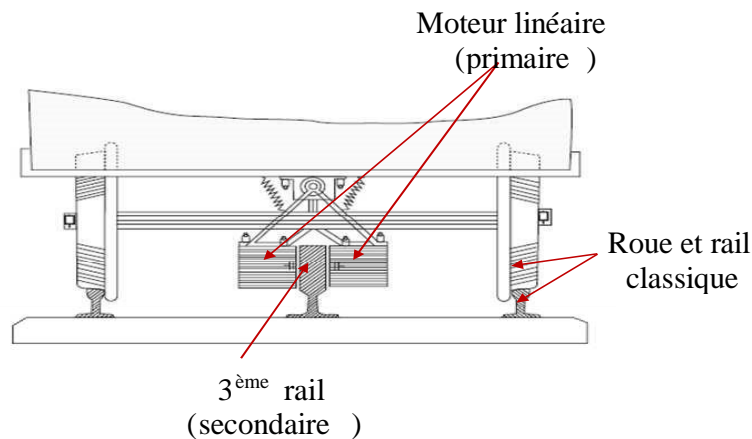


Figure II.1 : Brevet de Zehen en 1902 sur rails

Les débuts des recherches sur les trains à sustentation magnétique commencèrent en 1922 avec les travaux de l'Allemand Hermann Kemper. Celui-ci déposa un brevet le 14 août 1934. Ses travaux furent cependant interrompus à cause de la Seconde Guerre mondiale.

- 1962 : Le Japon se lance dans des recherches sur le Maglev qui bat régulièrement de nouveaux records de vitesse ;
- 1973 : L'Allemagne reprend les recherches à la Technische Universität de Braunschweig ;
- 1979 : Le Transrapid 05 fut mondialement le premier train à sustentation magnétique à transporter des passagers à l'occasion de l'exposition internationale des moyens de transport à Hambourg ;
- 1983 : Une ligne de 1,6 km fut construite à Berlin destinée à un service commercial de type métro (Kabinentaxi). Malgré le succès de cette ligne, elle fut fermée en 1992 ;
- De 1984 à 1995 : une liaison de 600 mètres fut construite nentre l'aérogare principale de l'aéroport international de Birmingham jusqu'à la station de chemin de fer à une vitesse de 15 km/h. L'une des raisons de son échec est le poids trop important de la voiture à cause d'une coque trop épaisse.
- 1984 : Mise en service de la ligne d'essai pour le Transrapid en Allemagne;

- 2003 : Mise en service commerciale du Transrapid de Shanghai.
- 2006 : Accident sur la ligne d'essai en Allemagne. Le train percute à près de 200 km/h un véhicule d'entretien stationné sur la voie. La technologie semble hors de cause (problème de manque de communication entre les services), le train n'a cependant pas déraillé.
- 2008 : Au terme d'une réunion de crise à Berlin, le dernier projet de Transrapid en Allemagne, portant sur la construction d'une ligne entre la gare principale et l'aéroport de Munich, a été enterré. Par suite, ThyssenKrupp et Siemens ont décidé la dissolution de la société de commercialisation Transrapid International. Une nouvelle tentative de projet de Transrapid en Allemagne n'est pas attendue [32].

II.2.1. Le Transrapid

Est un projet allemand réalisé par plusieurs sociétés dont MBB qui avait réalisé le premier prototype dans les années 70. Ce projet de liaison de la gare centrale de Munich avec l'aéroport a été abandonné en 2008. Un projet de ligne Berlin-Hambourg avait été approuvé en 1994 mais a aussi été abandonné par la suite, faute de soutien financier de l'État. En mars 2006, le lancement d'une nouvelle ligne de 175 kilomètres est annoncé : elle doit prolonger la ligne existante jusqu'à la ville touristique de Hangzhou. Cependant, l'avenir de cette ligne est menacé en raison de plaintes liées à l'impact du Transrapid sur la santé des populations voisines de la ligne [36].

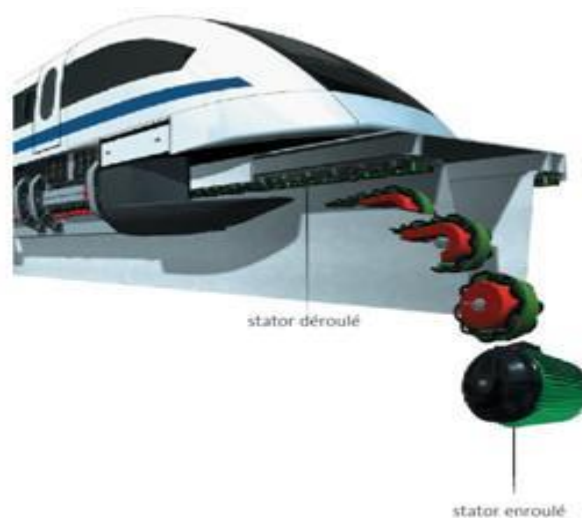


Figure II.2 : schéma transrapid

II.2.2. Le Maglev

De l'anglais Magnetic Levitation est un projet japonais, une ligne expérimentale a été construite au Japon, sur laquelle la vitesse record de 581 km/h a été atteinte en 2003. L'objectif était de construire une ligne assurant la liaison Tokyo-Osaka (environ 400 km) en une heure [36].



Figure II.3 : prototype d'un Maglev

II.3. Présentation du moteur linéaire

Le moteur électrique a été envisagé initialement sous la forme linéaire puis, presque aussitôt, sous la forme rotative. Un moteur linéaire peut être considéré comme un moteur rotatif qui est coupé selon la direction radiale et déroulé à plat.

La figure II.4 présente le passage d'un moteur rotatif à un moteur linéaire.

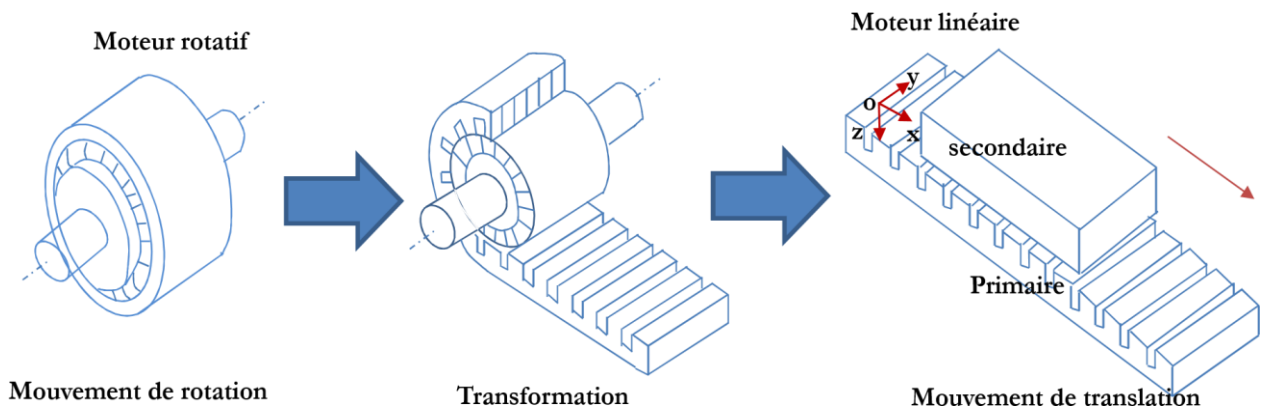


Figure II.4 Transformation d'un moteur rotatif en moteur linéaire

II.3.1. Différences essentielles entre les moteurs linéaires et tournants

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

- circuit magnétique (inducteur) ouvert aux deux extrémités, ce qui donne en outre la possibilité d'y loger soit un nombre pair, soit un nombre impair de pôles.
- induit constitué, par une masse conductrice, généralement homogène et isotrope, où des conducteurs isolés transportent les courants dans des directions imposées.
- entrefer important et occupé, dans sa majeure partie, par l'induit.

II.3.2. Topologie des moteurs linéaires

Les moteurs linéaires peuvent être soit synchrones ou asynchrones avec un flux transversal ou longitudinal. Ils sont caractérisés par plusieurs topologies ; stator court ou stator long, tubulaire ou non. Ces différentes variantes offrent une multitude de possibilités pour effectuer un mouvement linéaire [33].

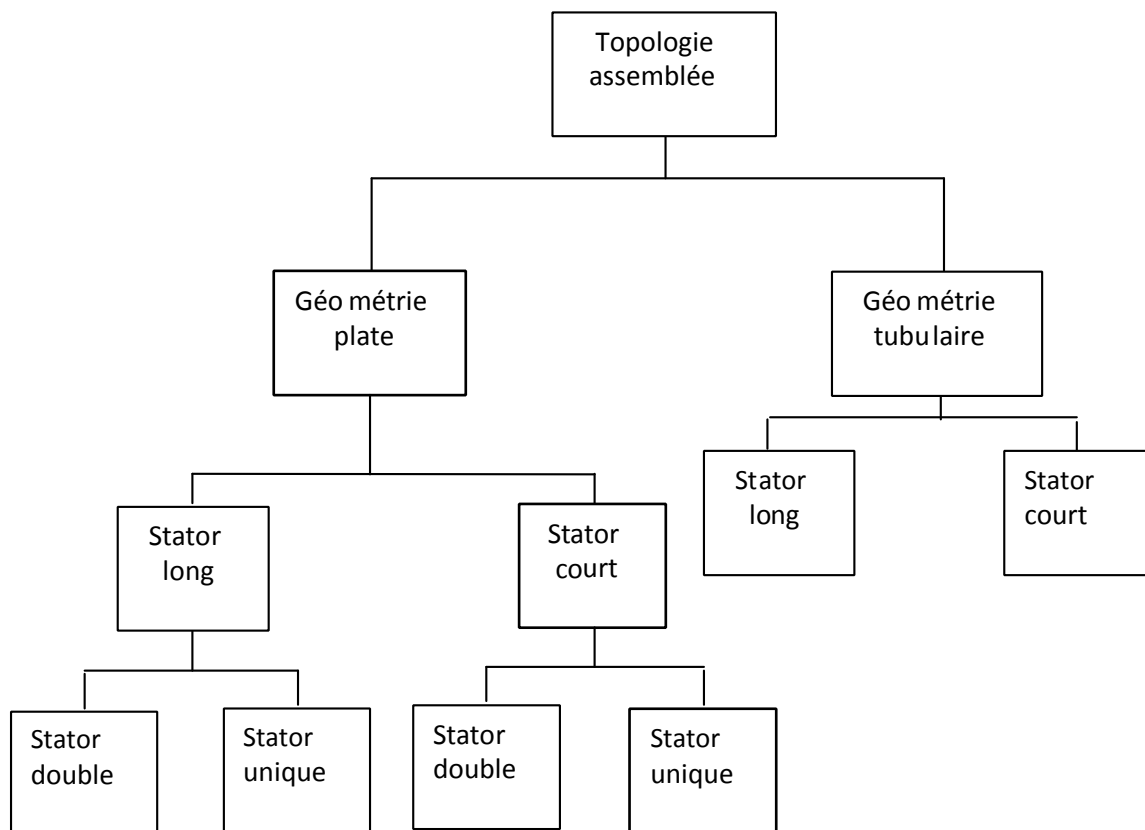


Figure II.5 : Topologie du moteur linéaire.

II.3.3. Classification des moteurs linéaires

Il existe principalement quatre différentes approches pour produire un mouvement linéaire par les moyens électriques. La première solution est d'utiliser les propriétés électrostatiques pour un mouvement de glissement. La seconde consiste à produire un mouvement électromagnétique. La troisième et quatrième, sont basées sur la friction mécanique utilisant les propriétés piézo-électrique ou magnéto-restrictive pour agir avec l'induit. Ces deux variantes différentes par leurs matériaux respectifs, pour le premier, la force est produite par une source de champ électrique (piézo-électrique). Pour l'autre, c'est une source de champ magnétique. La force maximale développée par ces deux moteurs peut être très grande et dépend principalement de la construction, cependant les frottements dans ces moteurs sont très petits. Une classification générale des moteurs linéaires est présentée sur la Fig. II.6 [34].

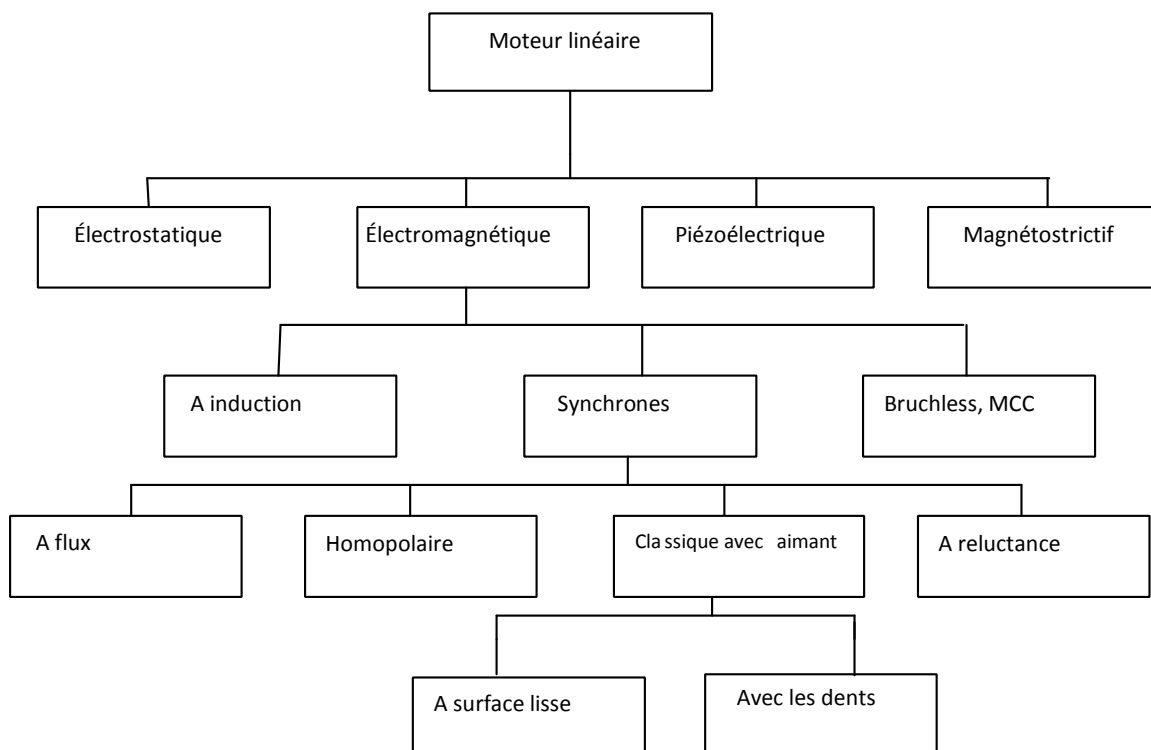


Figure II.6 : Classification des moteurs linéaires.

La différence de construction réside dans sa structure géométrique, qui peut être soit tubulaire, soit plate. Ces deux géométries peuvent être construites en un long stator ou un court stator. Pour la géométrie plate, les moteurs peuvent être à un seul côté ou bien, assemblés en opposition pour constituer un moteur à deux côtés.

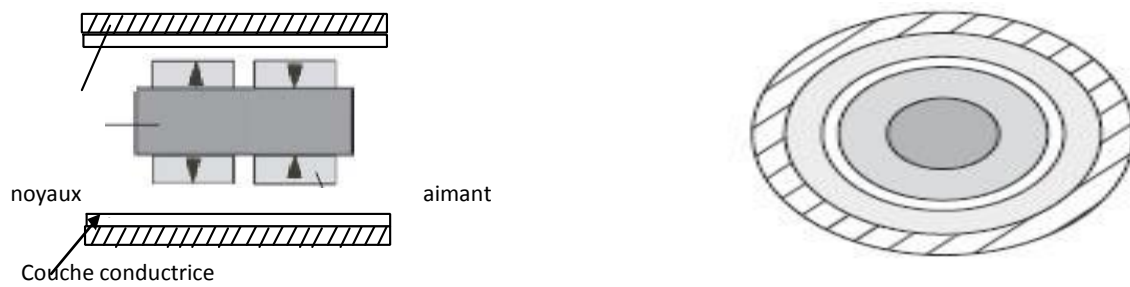


Figure.II.7 : Moteur linéaire tubulaire à stator long.

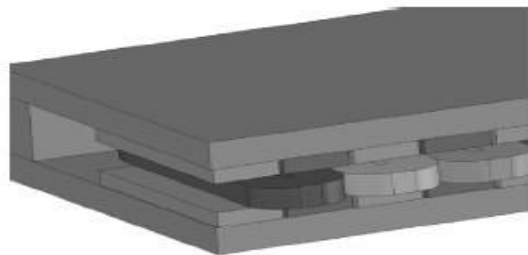


Figure II.8 : Moteur linéaire plat bilatéral à stator court

II.4. Géométries des machines linéaires

Sans aborder les principes de conversion électromécanique, trois familles d'architectures peuvent être distinguées [33]:

- a.** Inducteur solidaire du rail, donc fixe, et induit mobile dont l'alimentation peut s'effectuer par un câble souple (mouvement limité) ou par transmission d'énergie sans contact, l'énergie peut être également embarquée, figure II.9.

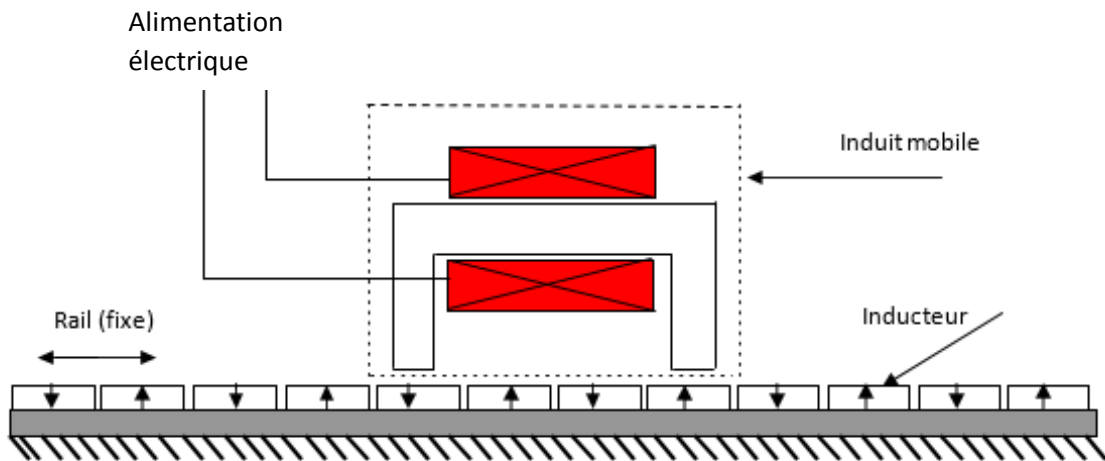


Figure II.9 : Structure à inducteur solidaire du rail fixe.

- b.** Inducteur solidaire du rail (ex. table de machine-outil) mobile et induit fixe localisé (alimentation facilitée), figure II.10.

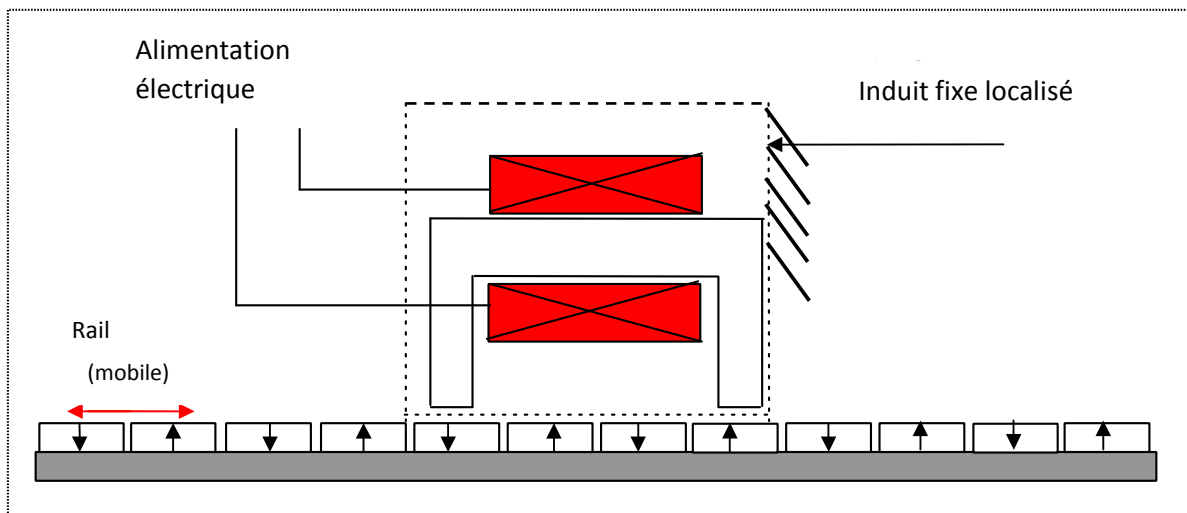


Figure II.10 : Structure à inducteur solidaire du rail mobile.

- c.** Induit fixe, figure (II.10) et distribué sur la longueur du rail (voie active dans le cas des trains), la partie mobile supporte uniquement l'inducteur. Dans ce cas, l'énergie est amenée à la partie fixe ce qui évite les difficultés de transmission, mais le système d'alimentation est complexe et coûteux.

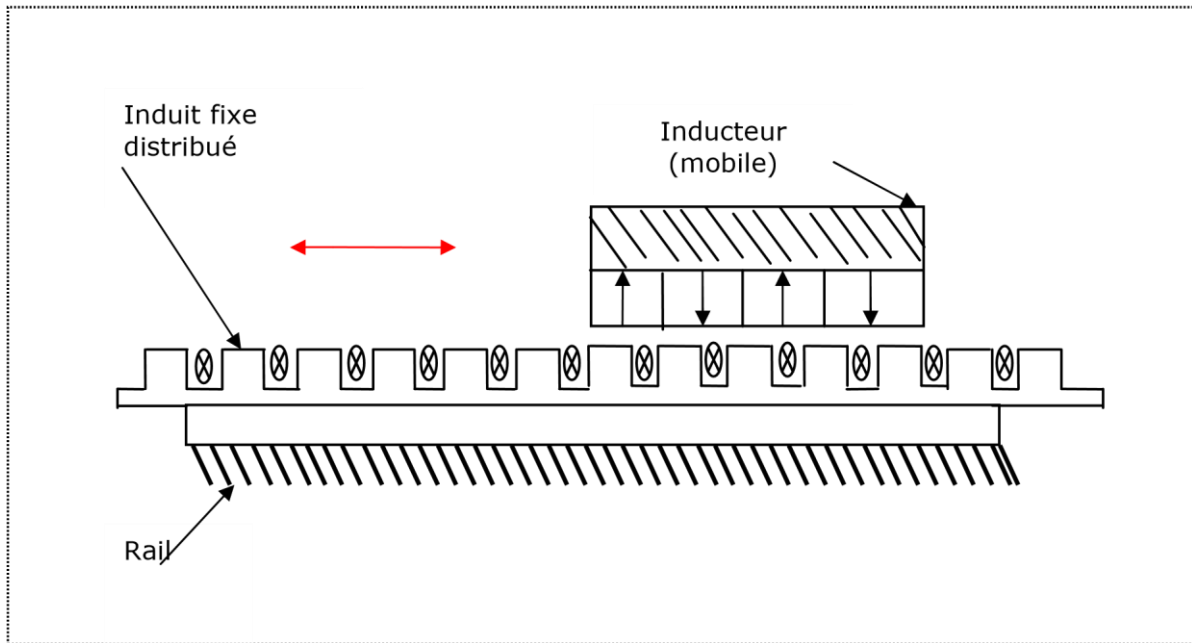


Figure II.11 : Structure à induit fixe et inducteur mobile.

II.5. Différents types de moteurs linéaires et leurs principes de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est celui du couplage magnétique : les bobines de l'inducteur traversées par le courant de l'alimentation créent un champ magnétique qui engendre dans l'induit des f.é.m., donc des courants. L'interaction des courants induits et du champ inducteur se traduit par une force de poussée. Ce type de moteur comporte un circuit magnétique de retour, figure II.12.

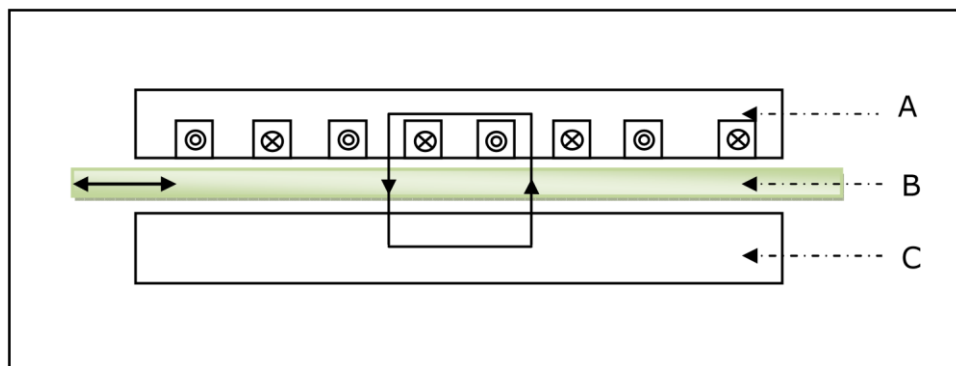


Figure II.12 : Moteur linéaire à inducteur simple.

- A : inducteur.
- B : induit.
- C : circuit magnétique de fermeture.

II.5.1. Moteur à inducteur simple sans circuit de retour

Le même principe que le précédent, sauf que les lignes d'induction se ferment dans l'air, figure II.13 :

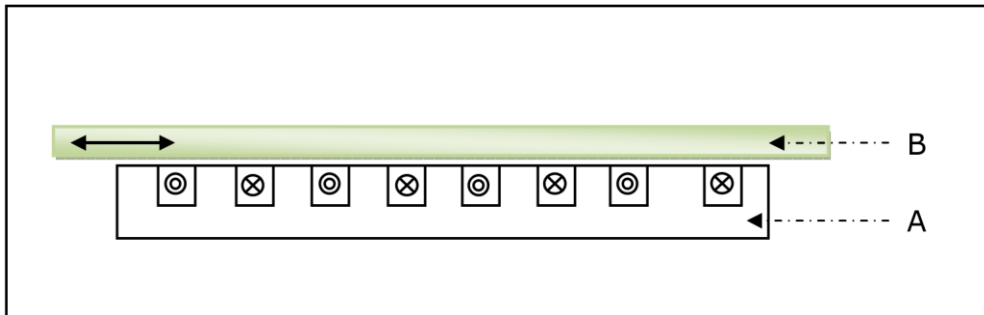


Figure II.13 : Moteur linéaire à inducteur simple sans circuit magnétique de retour.

A : inducteur.

B : induit.

II.5.2. Moteur à induit en forme d'échelle

Dans lequel on dispose, dans les encoches de l'induit ferromagnétique, une échelle conductrice, dont les barreaux sont équivalents aux barres des moteurs à cage et les montants aux anneaux de court-circuit, figure II.14.

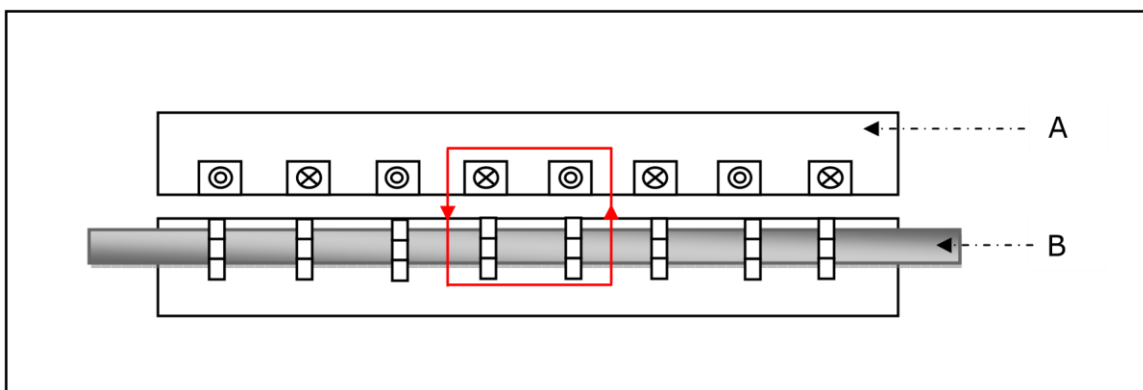


Figure II.14 : Moteur linéaire à induit en forme d'échelle.

A : inducteur.

B : induit ferromagnétique des barreaux conducteurs.

II.5.3. Moteur linéaire à induit composite

Le courant est induit dans une couche conductrice généralement en aluminium appliquée sur une plaque d'acier magnétique assurant le retour du flux, figure II.15.

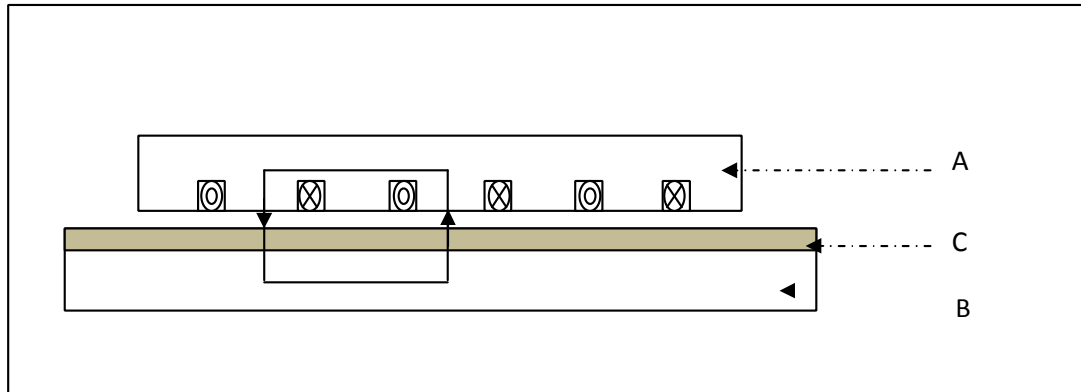


Figure II.15 : Moteur linéaire à induit composite.

- A : inducteur.
- B : plaque d'acier magnétique.
- C : couche conductrice.

II.5.4. Moteur linéaire à induit massif

L'inducteur peut être soit simple soit double.

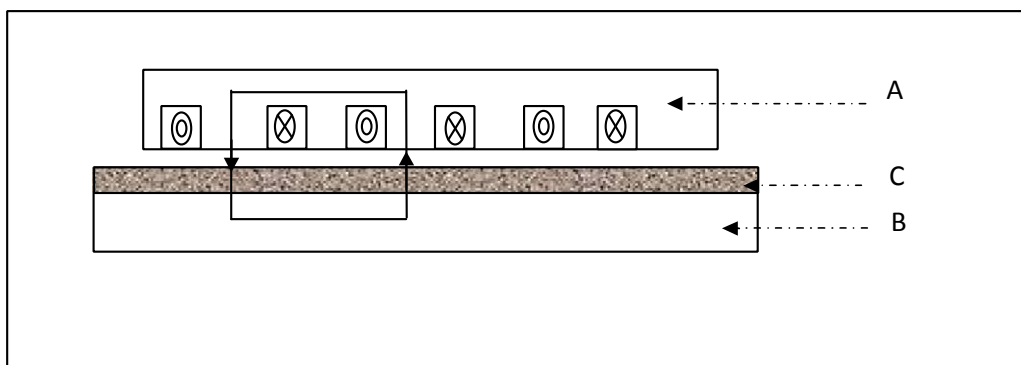


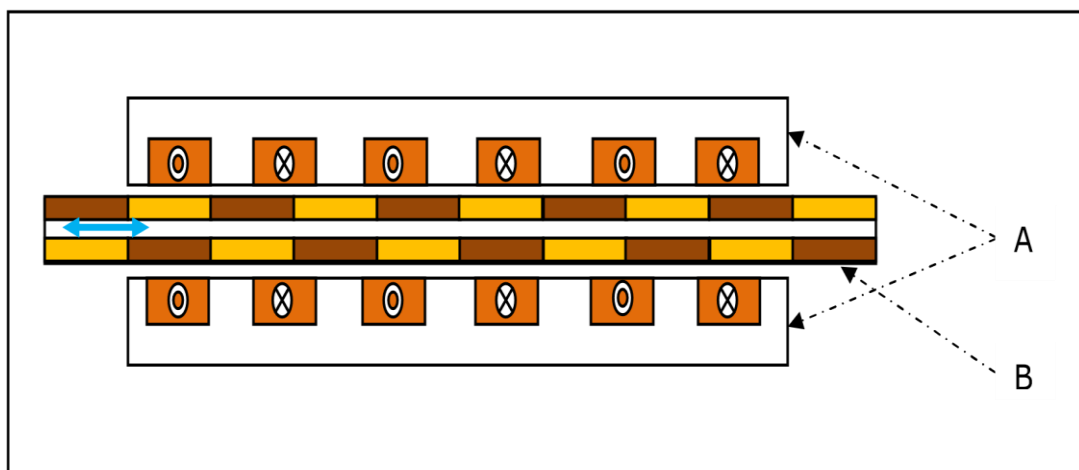
Figure II.16 : Moteur linéaire à induit magnétique massif.

- A : inducteur.
- B : induit magnétique.
- C : zone pelliculaire de circulation du courant.

II.5.5. Moteur linéaire à aimants permanents

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

Les moteurs linéaires à aimants permanents sont souvent alimentés en bipolaire ainsi les enroulements, sont mis en série pour former deux phases décalées de l'angle $\pi/2$. L'alimentation des deux phases par des courants positifs et négatifs provoque un mouvement linéaire appliqué sur l'induit [36].



A : Inducteur

B : Induit

 Aimant permanent sens inverse

 Aimant permanent sens direct

 Bobine conductrice

Figure II.17 : Moteur linéaire à aimants permanents

II.5.6. Moteurs pas à pas linéaires

Le moteur pas à pas linéaire se compose d'un stator portant le bobinage et d'une partie mobile se déplaçant linéairement.

Cette partie mobile peut être réalisée à partir d'une pièce ferromagnétique dentée, dans ce cas la structure est dite à réluctance ou passive ; ou alors la partie mobile est maniée d'aimants permanents et dans ce cas la structure est dite polarisée ou active [35].

II.6. Effets d'extrémités

Le stator d'un moteur rotatif est fermé sur lui-même. Il assure donc la continuité des phénomènes électromagnétiques contrairement à tout moteur linéaire caractérisé par une discontinuité à ses extrémités. Cette discontinuité crée des différences de trajets pour les lignes de champs circulant dans le fer, ces effets d'extrémités sont classés en deux catégories [37] :

a- L'effet de longueur finie : Qui est dû principalement :

- À la variation de la perméabilité à l'entrée et à la sortie.
- Aux flux parasites se fermant aux extrémités et sur les côtés.
- Aux f.é.m. à l'entrée et à la sortie dues au courants d'induit, qui se ferment en dehors de la carcasse magnétique de la machine.
- Aux f.é.m. dues à la discontinuité de l'induction à l'entrée et à la sortie.

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

II.7. Frein linéaire

Pour générer une force de freinage soit :

- Avec un moteur linéaire alimenté en sens inverse. Le moteur linéaire peut facilement se transformer en frein.
- En alimentant le primaire par une source de courant continu qui crée un champ magnétique fixe. L'interaction entre les courants induits dans le rail et le champ magnétique du primaire fixe engendre une force de freinage. Toutefois cette force dépend de la vitesse du véhicule qui se déplace et devient très faible à basse vitesse.

II.8. Quelques domaines d'application du moteur linéaire

II.8.1. Transports

- **Metro à moteur linéaire**

Dans la très grande majorité des cas, les trains et métros sont motorisés par des motoréducteurs tournants placés dans des boggies. Lorsque l'on cherche de plus grandes performances (plus grandes vitesses, accélérations élevées et freinage efficaces quelles que soient les conditions d'adhérence, confort, suppression du bruit de roulement, plus faible rayon de courbure des lignes...), une traction par moteurs linéaires peut se révéler intéressante [36].



Figure II.18 : Métro à moteur linéaire sur roues.

- **Trains à grande vitesse**

Dans le domaine des trains à grandes vitesses et à sustentation magnétique, les avantages attendus, en traction ferroviaire résident dans l'absence d'usure par frottements, la réduction du bruit (particulièrement en zone urbaine et à vitesse modérée), le confort, maintenance réduite, un plus faible bruit et un plus haut rendement. Pour l'instant le coût des trains à voie active se révèle très élevé. Les grandes vitesses (> 400 km/h) au niveau du sol posent des problèmes difficiles de bruit aérodynamique [36].

II.8.2. Applications domestiques

- **Réfrigérateurs**

Dans le cas des compresseurs de réfrigérateur, un système à piston du compresseur entraîné par un moteur linéaire à aimants a été réalisé et testé, il permet un plus grand silence de fonctionnement.

- **Rideaux électriques**

Dans le domaine de la domotique, une application des moteurs linéaires est à signaler, il s'agit des tringles de rideaux. L'intégration dans des tringles standards (par exemple 24 sur 16 mm de section) ainsi que la discrétion acoustique (pas de système mécanique de conversion rotation translation) a conduit à la réalisation de moteurs linéaires spéciaux tirant actionnant directement les rideaux. Les ordres de grandeurs des caractéristiques sont quelques 10 N pour des vitesses de moins de 1 m/s (puissance utile de l'ordre de 10 W) et pour des fonctionnements de courte durée (moins d'une minute).

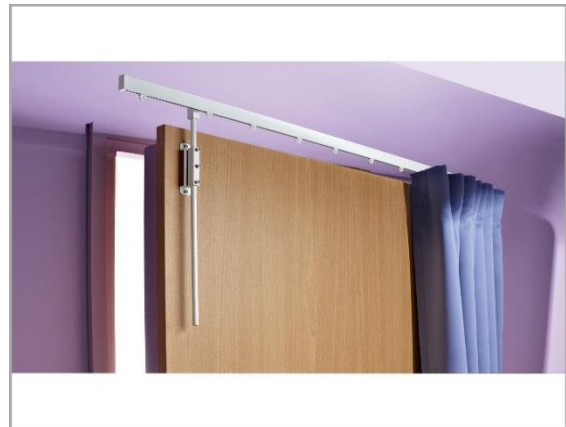


Figure II.19 : exemple d'application domotique

II.8.3. Applications fort couple

- **Entraînements de bras des robots industriels**

Ce genre d'entraînement nécessite de grandes accélérations et une très grande répétabilité. Les meilleures performances sont obtenues avec des moteurs directs de type synchrones à aimants ou à réluctance variable. La précision est alors liée à la qualité du capteur de position utilisé pour l'autopilotage et pour le contrôle de position. Les grands télescopes demandent également des grandes performances sur le plan de la qualité du mouvement à très basse vitesse et de la précision [37].

II.9. Avantages et inconvénients

➤ **Avantages**

- Aménagement mécanique simple et un nombre minimum de pièces en mouvement.
- Une poussée directe, peu d'usure.

- Grande force de déplacement.
- Libre accès au moteur pour effectuer la maintenance (pas de pièces internes en mouvement).
- Faible réactance de magnétisation et faible inertie mécanique.

➤ Inconvénients

- Un faible rendement (entre 30 et 40%).
- Le jeu mécanique et les difficultés associées de précision de positionnement.
- Bruit acoustique élevé.
- Difficultés d'intégration de l'actionneur au système complet (encombrement).

II.10. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation du moteur linéaire, nous avons également traité ses différentes géométries et ses différents types existants. Par la suite nous avons exposé certaines applications de ces moteurs puis nous avons terminé en citant certains de leurs avantages et inconvénients.

III.1. Introduction

Les méthodes de résolution sont classées en trois modèles : les modèles analytiques, les modèles hybrides et les modèles numériques.

III.2. Les modèles

Un modèle permet de décrire les performances d'un dispositif, il est souvent composé d'un assemblage de modèles provenant des éléments d'un système. D'un autre point de vue, un modèle peut aussi représenter un phénomène physique à simuler, et des modèles de plusieurs phénomènes physiques peuvent être assemblés afin d'aboutir à un modèle multi-physique [1].

III.2.1. Modèle analytique

Un modèle analytique est un ensemble d'équations mathématiques déduit des phénomènes physiques liés à un dispositif. Il permet de connaître les performances à partir des paramètres d'entrées. Le modèle analytique donne des résultats très rapidement, il est utile dans un processus d'optimisation pour construire un modèle analytique. Le processus de construction d'un modèle analytique est long. Des hypothèses et des simplifications sur certains phénomènes doivent être bien souvent intégrés.

Les résultats donnés par le modèle analytique sont moins précis que ceux du modèle numérique. Les modèles analytiques sont fréquemment utilisés lors de la première étape du dimensionnement pour fournir une géométrie préliminaire puis un modèle numérique est utilisé pour valider ou ajuster quelques éléments.

III.2.2. Modèle intermédiaire

Les modèles analytiques et numériques peuvent être mariés pour former un modèle hybride. Ce type de modèle a des performances intermédiaires en termes de temps de calcul et de précision et il permet notamment de coupler de nombreux phénomènes physiques [1].

III.2.3. Modèle numérique

Le modèle numérique est sans doute le plus performant, il permet en outre de traiter des géométries complexes, de prendre en compte la non-linéarité des matériaux et de répondre aux exigences en matière de précision.

La méthode des éléments finis a été proposée dans les années 1940 et appliquée presque dix ans plus tard dans la conception aéronautique. Aujourd'hui elle est incontournable en électromagnétisme. Il existe d'autres méthodes numériques tel que la méthode des éléments finis de frontière et la méthode des volumes finis. Le principe de ces méthodes est de diviser l'objet à étudier en petits éléments grâce à la génération d'un maillage. Les équations différentielles sont discrétisées sur le maillage et résolues numériquement. Grâce à ces méthodes, la précision des résultats est fortement améliorée. De plus, les modèles numériques peuvent être couplés entre eux pour l'étude des systèmes multi-physiques [1].

Vu la complexité de la modélisation analytique des moteurs linéaires à induction, le choix s'est naturellement porté sur la résolution via les modèles numériques (éléments finis).

III.3. Méthodes d'analyse numérique du moteur linéaire à induction

Avec l'avènement des ordinateurs qui sont de plus en plus puissants, rapides et peu coûteux, l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution des problèmes de champs électromagnétiques, devient une évidence.

Ce type de problèmes est modélisé fondamentalement, en partant des équations de Maxwell, qui sont manipulées pour aboutir à une équation différentielle globale régissant le fonctionnement du dispositif électromagnétique dans un cadre d'hypothèses restreint et bien déterminé.

III.3.1. Méthode des différences finies [2]

C'est une méthode numérique simple à mettre en œuvre, elle est utilisée pour la résolution des équations différentielles, en particulier celles aux dérivées partielles concernant les problèmes de champs électromagnétiques.

Cette méthode est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences, où chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue déterminée en un certain nombre de points du domaine de résolution.

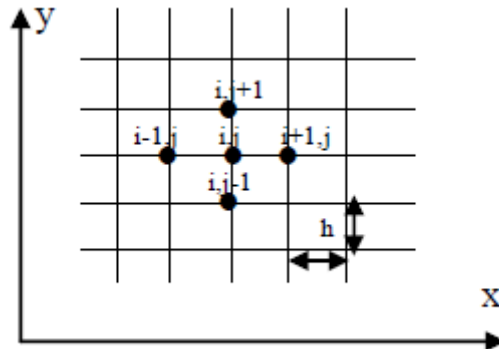


Figure III.1 maillage type différences finis.

III .3.2. Méthode des intégrales de frontières

La méthode des intégrales de frontières a été utilisée dans le domaine numérique pour la résolution des équations de Maxwell par Trowbridge et son groupe. Elle permet la détermination des grandeurs inconnues sur la frontière du domaine et ne s'applique que dans le cas où le milieu considéré est linéaire [31].

Cette méthode a l'avantage de traiter des domaines infinis, des tailles de systèmes algébriques réduites et donc un temps de calcul minime. Néanmoins, elle présente l'inconvénient de ne résoudre que les problèmes linéaires ainsi qu'une imprécision due à la considération des courants surfaciques [31].

III.3.3. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à subdiviser le volume ou la surface constituant le domaine de résolution en éléments finis interconnectés. D'habitude, ce sont des triangles ou des quadrilatères pour les problèmes 2D, et des tétraèdres ou des hexaèdres pour les problèmes 3D. Le vecteur potentiel magnétique sur chaque sommet ou nœud d'un élément est calculé [12].

La méthode des éléments finis est basée sur une formulation intégrale, qui remplace l'équation différentielle aux dérivées partielles qui modélise le dispositif et les conditions aux limites requises par le phénomène. Parmi les formulations intégrales utilisées, on cite l'approche projective appelée aussi la méthode des résidus pondérés [12].

Quel que soit la méthode utilisée, le résultat est toujours une discrétisation de l'équation différentielle aux dérivées partielles modélisant initialement le dispositif étudié qui permet, après résolution, d'obtenir une approximation de la solution exacte dont la précision dépend du nombre d'éléments utilisés pour mailler le domaine de résolution [12].

III.4. Présentation de la méthode des éléments finis 2D

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques.

La grande souplesse d'adaptation de cette méthode à modéliser des phénomènes stationnaires ou non stationnaires, linéaire ou non linéaire, dans des géométries complexes, a permis son utilisation dans la quasi-totalité des problèmes de champs aux dérivées partielles.

Cette méthode s'applique à des domaines très variés de la physique de façon générale et à l'électromagnétisme en particulier. Le moteur linéaire englobe des phénomènes électriques et magnétiques couplés par la présence des courants induits. La méthode des éléments finis est tout à fait adaptée pour modéliser et tenir compte de ces phénomènes interdépendants non linéaires [12].

III .4.1. Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à rechercher une fonction globale décrivant les phénomènes étudiés, sur un domaine de résolution préalablement subdivisé en parties finies adjacentes appelées éléments finis [12].

Cette solution globale sera construite sur chacun des éléments du maillage et doit vérifier les équations aux dérivées partielles qui modélisent le phénomène et les conditions aux limites requises. Sur chaque élément finis, la solution est décrite par une interpolation, en fonction des valeurs nodales de l'inconnue.

III.4.2. Formulation éléments finis des équations électromagnétiques

La méthode des éléments finis est basée sur une formulation intégrale, qui remplace l'équation différentielle aux dérivées partielles modélisant le dispositif et les conditions aux limites requises par le phénomène, Cette formulation intégrale peut être de deux types :

- Formulation variationnelle.
- Formulation projective (résidus pondérés).

A. Formulation variationnelle

Cette formulation consiste à construire une fonctionnelle représentant l'état énergétique du système à étudier [12].

Cette fonctionnelle est déterminée à partir du principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle de type intégrale [32] Elle est définie par :

$$F(A) = \int_{\Omega} L.d\Omega \quad \text{III.1}$$

Avec :

Ω : domaine d'étude.

L: fonction de LAGRANGE déduite de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentiel du système.

Dans le Cas d'un problème électromagnétique la fonction L est donnée par l'expression :

$$L = \int_0^B vBdB - JA \quad \text{III.2}$$

Avec :

L : fonction de LAGRANGE.

A : Potentiel vecteur magnétique. T.m.

J : densité de courant. A/m²

v : Reluctivité magnétique. [H/m]⁻¹.

B : induction magnétique. T.

L'expression de la fonctionnelle de l'énergie est donnée par la fonction suivante :

$$F(A) = \int_{\Omega} \left[\int_0^B vBdB - JA \right] d\Omega \quad \text{III.3}$$

La résolution du problème variationnel défini par la fonctionnelle d'énergie $F(A)$ revient à minimiser cette fonctionnelle, en utilisant le principe de RAYLEIGH-RITZ qui s'énonce comme suite :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0 \quad \text{III.4}$$

avec $i = 1, 2, 3, \dots, n$

Ou :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \dots = \frac{\partial F(A)}{\partial A_n} = 0 \quad \text{III.5}$$

Avec :

n : nombre de nœuds du domaine d'étude.

A_i: inconnu aux nœuds i du domaine.

B. Formulation résidus pondérés

La méthode projective dite des résidus pondérés, consiste à projeter le résidu des équations différentielles aux dérivées partielles du modèle à traiter, sur un ensemble de fonctions indépendantes appelées fonctions de pondération [12].

Pour obtenir la solution recherchée, il faut que l'intégrale du résidu de l'équation différentielle projetée sur la base des fonctions de test soit nulle. Sachant que le domaine de résolution est subdivisé en triangle linéaire, la formulation intégrale sur un élément s'écrit de la manière suivante [12].

$$\int_{\Omega} R \Phi_i d\Omega = 0 \quad \text{III.6}$$

$$R = L(A) - F \quad \text{III.7}$$

R : représente le résidu de l'approximation.

L(A): opérateur différentiel.

F : fonction définie sur le domaine d'étude Ω .

A : inconnu du problème.

Φ_i : fonction de projection.

Les valeurs de A permettent d'annuler l'intégrale représentant la solution du système algébrique obtenu.

III.4.3. Discrétisation du domaine d'étude

Quand l'équation aux dérivées partielles est transformée en une forme intégrale, on passe à l'étape de discrétisation, qui consiste en la subdivision du domaine en un nombre fini de sous domaine appelé élément, dont la géométrie est préalablement choisie.

L'approximation de l'inconnu se fait en chaque élément par des fonctions d'interpolation, qui se déterminent en fonction des valeurs de l'inconnu aux nœuds de cet élément. C'est ce qu'on définit par l'interpolation nodale, ce qui est très important dans l'analyse par élément finis [2].

A. Eléments de références

Le maillage consiste à discrétiser le domaine de l'objet analysé, qui peut être à une, deux ou trois dimensions, en un ensemble d'éléments finis de forme simple. Ces éléments peuvent être des segments, des triangles, des quadrilatères, des parallélépipèdes, des prismes... etc, selon le domaine à discrétiser [32].

A.1. Élément à une dimension 1D

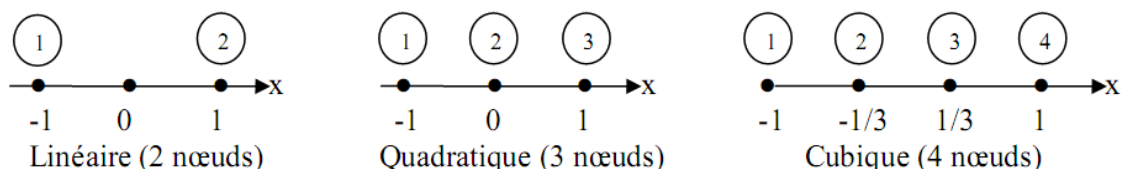


Figure III.2 Différents éléments 1D.

A.2. Élément à deux dimensions 2D

➤ **Éléments triangulaires :**

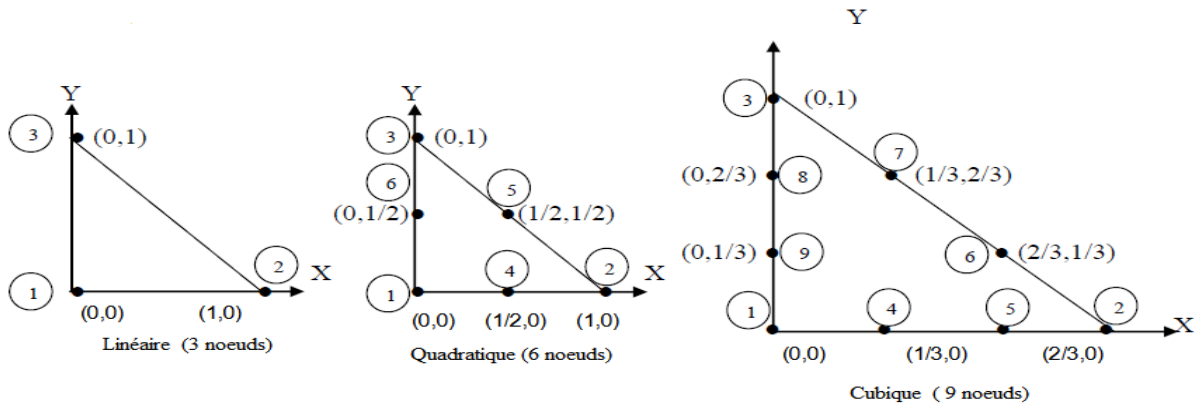


Figure III.3 Différents éléments 2D triangulaires.

➤ **Éléments carrés :**

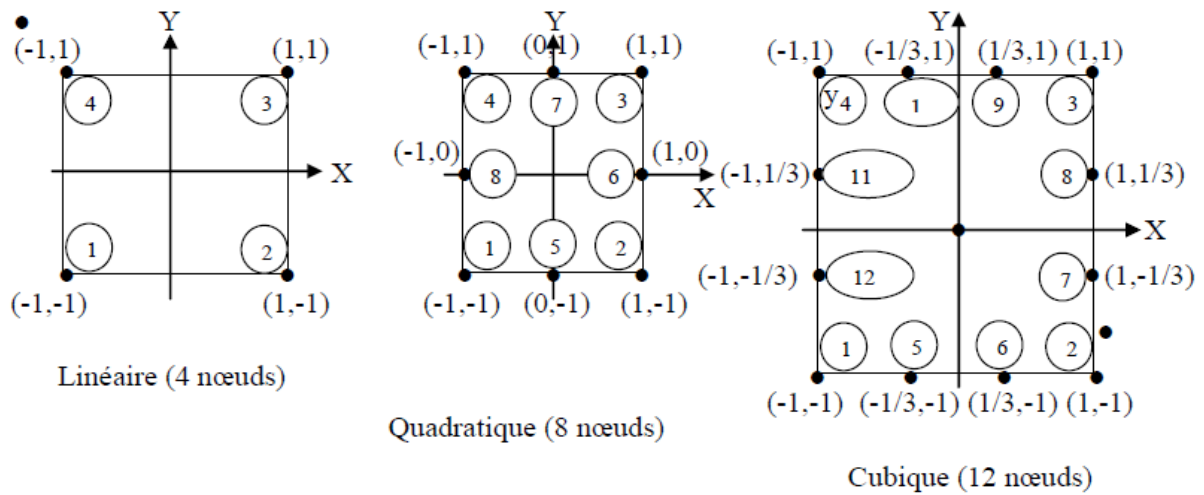


Figure III.4 Différents éléments 2D carrés.

A.3.Éléments à trois dimensions 3D

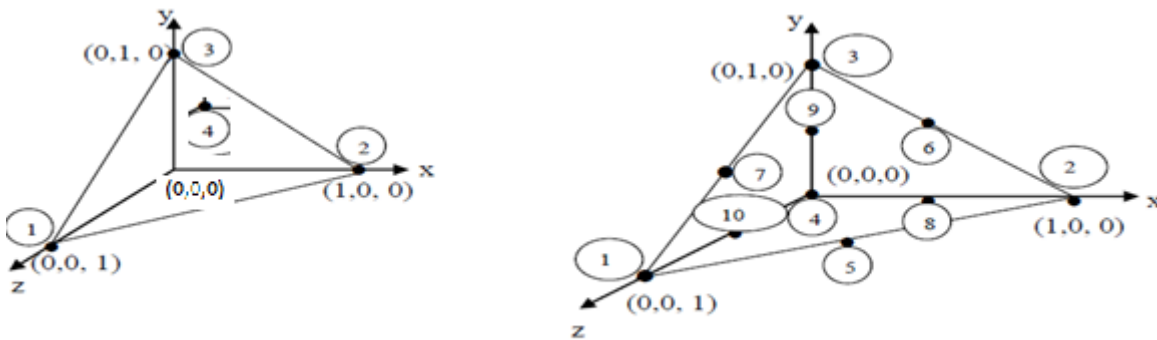


Figure III.5 Différents éléments 3D.

B. fonctions d'interpolations

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de PASCAL, donné ci-dessus :

| | | | | | |
|----------------|------------------|-----------------|----------------|---------|---------|
| 1 | _____ | ordre 0 | | | |
| U | V | _____ | ordre 1 | | |
| U ² | UV | V ² | _____ | ordre 2 | |
| U ³ | U ² V | UV ² | V ³ | _____ | ordre 3 |

Figure III.5 Triangle de PASCAL.

La construction de ces fonctions doit vérifier les conditions suivantes :

- Principe de l'état complet.
- Principe de compatibilité.

B.1.Principe de l'état complet

- La fonction doit contenir un terme constant.
- Le nombre de termes de la fonction doit être égal au nombre de nœuds de l'élément.

B.2. Principe de compatibilité

- La fonction doit être continus (c'est-à-dire la première dérivée existe).

III.5. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

III.5.1. Les avantages

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités.
- Temps de calcul relativement avantageux.

III.5.2. Les inconvénients

- La non-prise en considération des domaines infinis.
- Impuissante en présence de singularités dans le domaine d'étude.

III.6. Force magnétique

C'est la force électromagnétique et le travail mécanique que cette force exerce sur le dispositif, en termes de déplacement ou de déformation.

Pour calculer la force magnétique on peut utiliser les quatre méthodes suivantes :

- La méthode de la force de Lorentz.
- La méthode du tenseur de Maxwell.
- La méthode des travaux virtuels.
- La méthode de la variation de la Co-énergie ou de l'énergie magnétique.

III.6.1. La force déduite à partir de la méthode de l'énergie magnétique totale

Dans ce cas la force magnétique est obtenue en calculant la dérivée de l'énergie magnétique par rapport au déplacement en maintenant le courant constant [32].

$$F_m = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{\Omega} \left(\int_0^B H dB \right) d\Omega \right] \quad \text{III.8}$$

Avec :

x: la variation spatiale de la coordonnée.

III.6.2. La force déduite à partir de la méthode de la Co-énergie

La dérivée de la Co-énergie magnétique par rapport au déplacement, tout en maintenant le flux constant, fournit la force magnétique dont l'expression est la suivante [32] :

$$F_{co} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{\Omega} \left(\int_0^H B dH \right) d\Omega \right] \quad \text{III.9}$$

Dans le chapitre suivant, on se basera sur cette méthode pour générer un programme qui nous calculera la force magnétique.

III.6.2. La force déduite à partir de la méthode des travaux virtuels

Le principe de calcul de la force dans cette méthode consiste à l'utilisation de la méthode des éléments finis.

Un domaine Ω_d déformé est subdivisé en sous-domaines Ω_e , sur lesquels toutes les intégrales effectuées par rapport à un système de coordonnées locales (u,v,w.) [2]. Elle est déterminée par l'expression suivante :

$$F = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_v \left(\int_0^H B dH \right) dv \right] \quad \text{III.10}$$

$$F = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{\Omega_e} \left(\int_0^H B dH \right) d\Omega_e \right] \quad \text{III.11}$$

x: représente la coordonnée liée au déplacement.

Cette méthode présente un avantage ; elle s'adapte à la méthode des éléments finis et fournit une bonne précision.

III.6.4. La force déduite à partir de la méthode du tenseur de Maxwell

Dans des milieux non parcourus par des courants, les forces et les couples pouvant être calculés par l'application de cette méthode, alors que la méthode des travaux virtuels est basée sur la variation de l'énergie, le tenseur de Maxwell définit les forces directement en terme de champ magnétique. Elle est déterminée par l'expression suivante [2] :

$$F = \oint_S \left[(\vec{B}_n \vec{H}_t) \vec{t} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\mu_0} B_n^2 - \mu_0 H_t^2 \right) \vec{n} \right] ds \quad \text{III.12}$$

Avec :

\vec{B}_n : La composante normale de l'induction magnétique.

\vec{H}_t : La composante tangentielle du champ magnétique.

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

\vec{t} : Le vecteur unitaire tangent à la surface d'intégration.

S: La surface d'intégration contenant le milieu où la force doit être calculé.

III.6.5. La force déduite à partir de la méthode de LORENTZ

La force électromagnétique de LORENTZ, résulte de la coexistence d'une induction magnétique résultante d'une source d'excitation et d'une densité de courant induite dans un milieu conducteur. L'expression de cette force est la suivante :

$$F = \iiint_v (\vec{J} \wedge \vec{B}) dv \quad \text{III.13}$$

$(\vec{J} \wedge \vec{B})$: Densité de force magnétique, qui est souvent utilisée à la place de la force magnétique.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes de résolutions des équations aux dérivées partielles en nous allongeons sur la méthode des éléments finis.

Ensuite, nous sommes passé à la présentation de divers moyens de calcul de la force électromagnétique.

IV.1. Introduction

Comme cité dans le chapitre 3, la méthode des éléments finis est la plus adéquate pour la résolution de notre problème, pour ce nous avons choisis l'outil pdeTool de Matlab.

IV.2. Présentation de pdeTool

Le pdeTool Sous Matlab est un outil informatique permettant le traitement des équations aux dérivées partielles en utilisant la méthode des éléments finis.

IV.3. Etapes de la simulation sous pdeTool

Pour pouvoir réaliser notre modèle d'étude sous Matlab nous avons procédé comme suit ; Après avoir appelé l'outil pdeTool dans matlab commande, une interface graphique s'affiche sur laquelle on trouve toutes les fonctionnalités disponibles. (Figure IV.1).

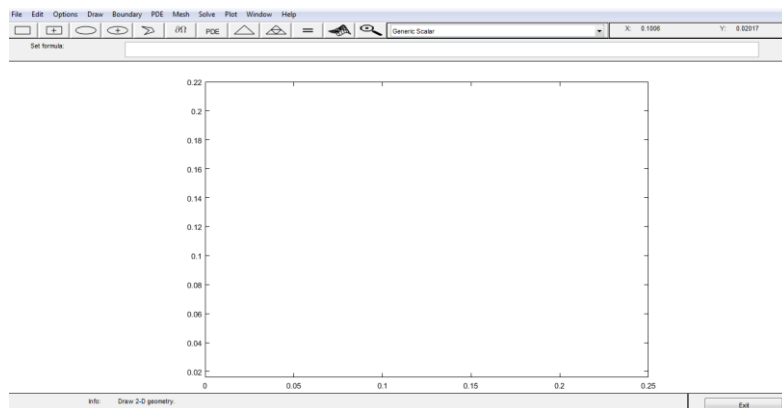


Figure IV.1 : interface d'accueil pdeTool

Premièrement nous avons défini la dimension de notre espace de travail en allant dans «options» puis « axes limits... ». Nous lui avons donné les valeurs suivantes :

$$x[0, 0.25] ; y[0, 0.22]$$

IV.3.1. Dessin du domaine

Par la suite on détermine un domaine dans lequel nous génèrerons notre modèle qui est un moteur linéaire, de sorte à ce que les lignes du potentiel vecteur A n'atteignent pas ses extrémités, il sera noté $R1$. La valeur de ' A ' à ces bords est automatiquement égale à zéro en

choisissant la méthode de Dirichlet dans l'onglet « Boundary » puis « Specify Boundary conditions... » (Figure IV.2).

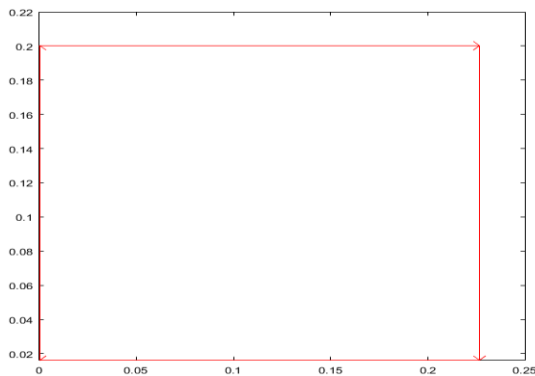


Figure IV.2 : Affichage boundary mode

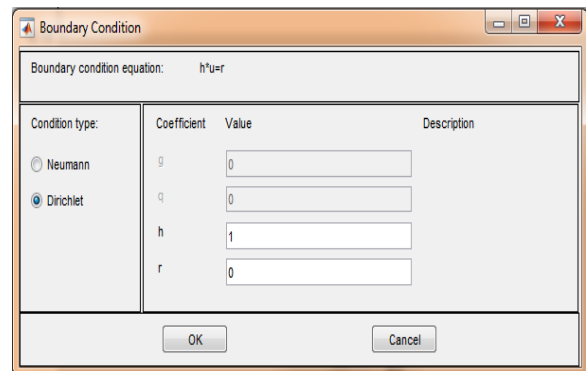


Figure IV.3 : Boite de dialogue boundary conditions

IV.3.2. Dessin de la structure

Ensuite pour réaliser la structure de notre model nous allons dans l'onglet « Draw » puis « Draw mode » de là nous traçons les blocs qui formeront notre modèle. Dans notre cas présent chaque bloc est sous forme d'un rectangle noté Ri.

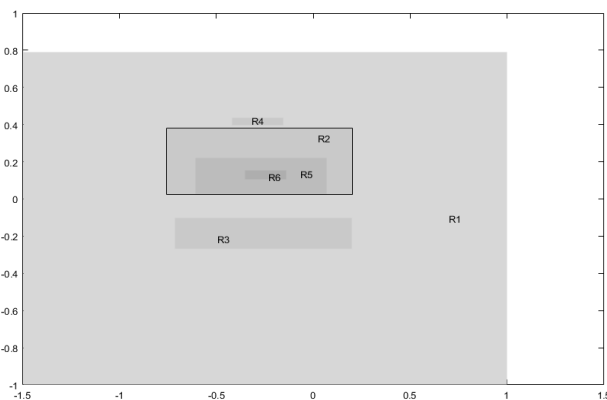


Figure IV.4 : modèle d'étude pour un entrefer de 5mm

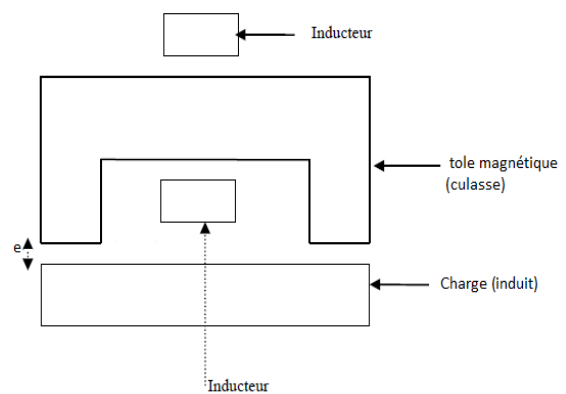


Figure IV.5 : architecture du modèle d'étude

IV.3.3. Spécification des dimensions

Nous déterminons les dimensions et la position d'un bloc en cliquant dessus. La boite de dialogue (figure IV.6) nous demande d'introduire les quatre valeurs suivantes ; « left », « bottom », « width », et « high » qui représentent respectivement ; la limite à gauche, la limite

inferieur, la largeur et la hauteur de chaque bloc. Les valeurs attribuées à chaque bloc sont dans le tableau ci-dessous (TableauIV.1).

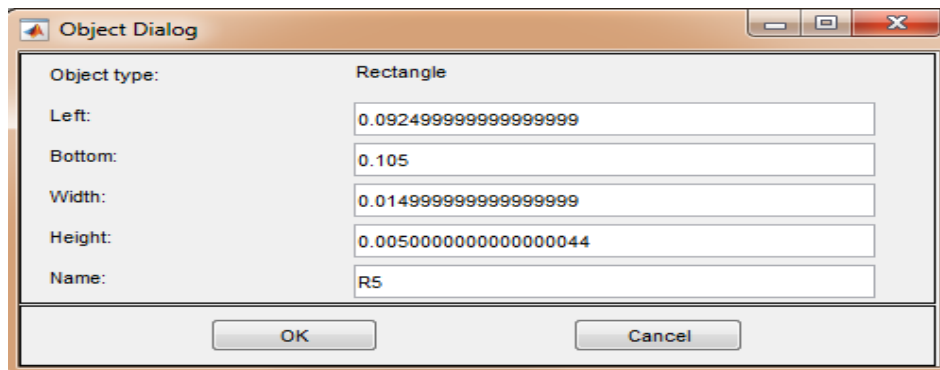


Figure IV.6 : boite de dialogue pour l’introduction des dimensions et de la position du bloc R5

| | Left | Bottom | Widh | high |
|-----------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| R1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.18 |
| R2 | 0.075 | 0.070 | 0.050 | 0.030 |
| R3 | 0.080 | 0.070 | 0.040 | 0.015 |
| R4 | 0.0925 | 0.075 | 0.015 | 0.005 |
| R5 | 0.0925 | 0.105 | 0.015 | 0.005 |
| R6 | 0.075 | 0.049-0.059 | 0.050 | 0.010 |

Tableau IV.1 : dimension de chaque bloc

Dans notre travail, nous avons fait varier l’entrefer de 1mm jusqu’à 10mm et ce en changeant la position de l’induit de 0.049m à 0.059m.

Chaque partie notée Ri que nous appelons bloc représente un élément de notre moteur linéaire ou bien l’air, ces parties sont :

- R1 : l’air
- R2 : la culasse
- R3 : l’air
- R4 : l’inducteur
- R5 : l’inducteur
- R6 : l’induit

IV.3.4. Spécification des paramètres des équations

L'étape suivante est la spécification des paramètres des équations PDE, pour ce, on choisit dans le menu « PDE » la fonction « PDE specification... ». Une boîte de dialogue s'affiche nous demandant d'introduire les valeurs de c, a et f (figure IV.7).

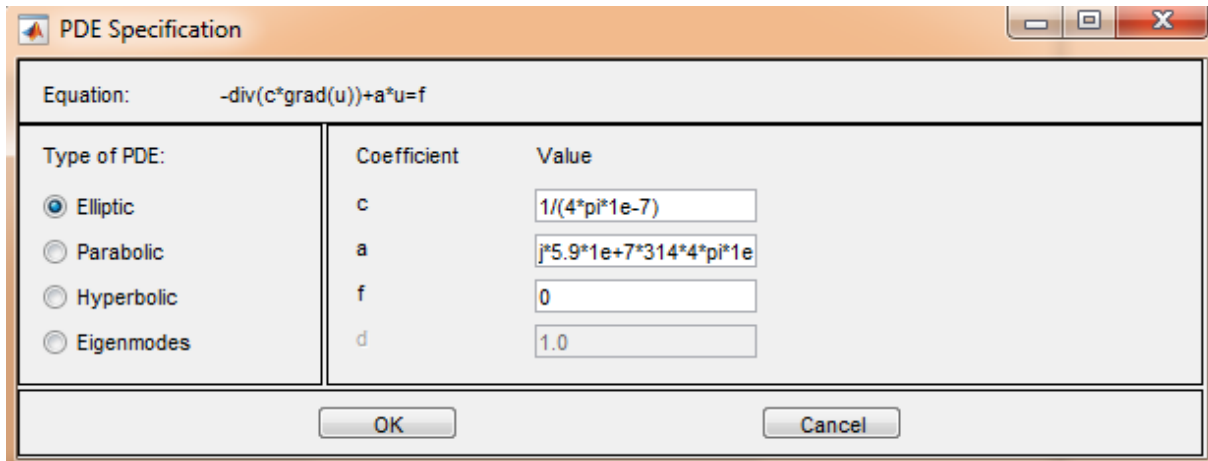


Figure IV.7 : Boite de dialogue PDE spécification

Le tableau suivant (tableau IV.2) nous donne les équations de c, a et f attribuées à chacune des parties du modèle.

| Ri | variables | c | a | f |
|----|-----------|-----------------|-------------------------------|----|
| R1 | | $1/\mu_0$ | 0 | 0 |
| R2 | | $1/\mu_0$ | $j*\sigma*\omega*\mu_0$ | 0 |
| R3 | | $1/\mu_0$ | 0 | 0 |
| R4 | | $1/\mu_0$ | 0 | J |
| R5 | | $1/\mu_0$ | 0 | -J |
| R6 | | $1/\mu_0*\mu_r$ | $j*\sigma*\omega*\mu_0*\mu_r$ | 0 |

Tableau IV.2 : tableau des équations attribuées aux différentes parties de la machine.

- **Propriétés physiques considérées :**

Conductivité électrique : $\sigma = 5.9*1e+7 \text{ S.m}^{-1}$

Perméabilité absolue : $\mu_0 = 4*\pi*10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

Perméabilité relative : $\mu_r = (\text{varie})$

Fréquence d'alimentation : $f = 50\text{Hz}$

Densité de courant d'excitation : $J = 1.6*1e+6 \text{ A.m}^{-2}$

- **Equation magnétodynamique 2D**

A partir des équations de Maxwell et après développement nous obtenons l'équation(IV.1).

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) \quad (\text{IV.1})$$

$$-div \left(c \ grad \vec{U} \right) + aU = f \quad (\text{IV.2})$$

$$\Delta A = div \left(grad \vec{A} \right) \quad (\text{IV.3})$$

$$-C \ div \left(grad \vec{U} \right) + aU = f \quad (\text{IV.4})$$

$$-\frac{1}{\mu} \ div \left(grad \vec{A} \right) + j\sigma\mu\omega A = J_s \quad (\text{IV.5})$$

Par identification :

$$C = \frac{1}{\mu} \quad (\text{IV.6})$$

$$a = j\sigma\mu\omega \quad (\text{IV.7})$$

$$f = J_s \quad (\text{IV.8})$$

IV.3.5. Génération du maillage

Après avoir attribué les équations à chaque partie, vient alors l'étape du maillage. Le maillage consiste à subdiviser le domaine étudié en plusieurs petites parties. Pour ce faire, on procède par le menu « Mesh » puis « initialize mesh » puis « refine mesh ».

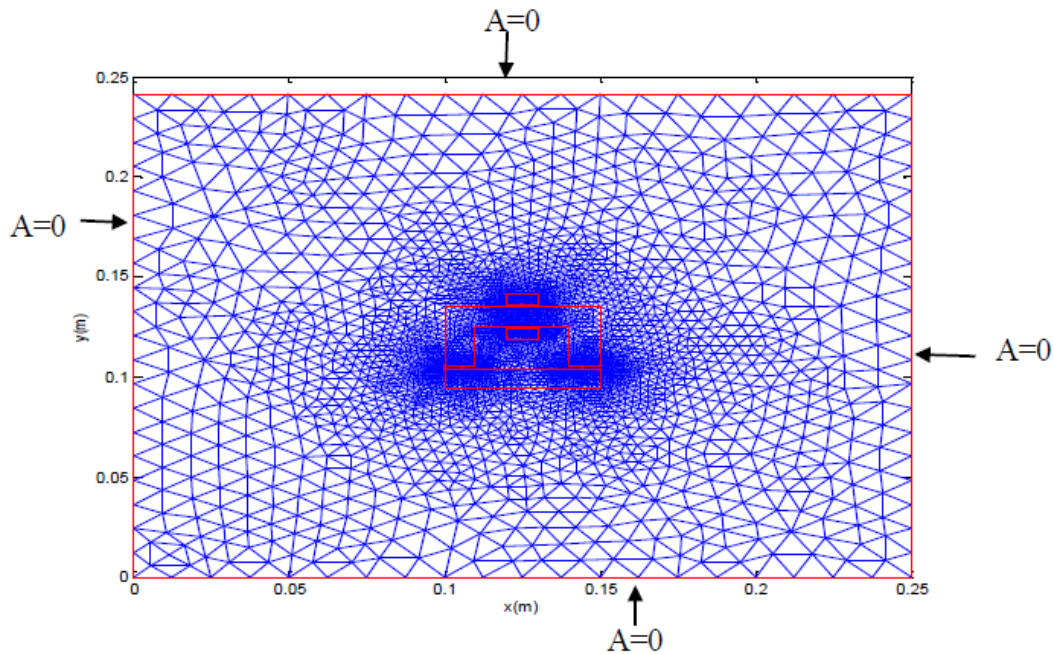


Figure IV.8 : Maillage du domaine d'étude

IV.3.6. Résolution

Après le maillage vient la dernière étape qui est celle de la résolution, on y procède en sélectionnant « solve PDE » dans le menu « solve ».

Le résultat obtenu pour le champ magnétique par exemple est représenté dans la (figureIV.9).

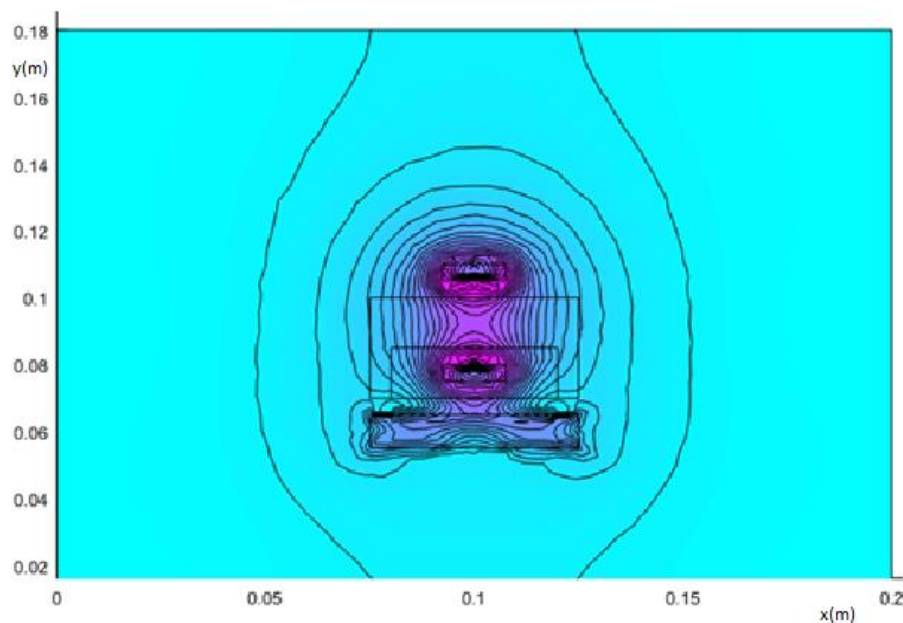


Figure IV.9 : résultat obtenu pour un entrefer de 5

IV.4. Présentation des résultats

Après l'étape de résolution vient celle de la collecte des résultats, nous avons choisis dans notre travail de traiter avec trois valeurs de la perméabilité à savoir $\mu_r=1000$, $\mu_r=500$ et $\mu_r=1$.

Pour chaque valeur de μ_r , nous avons effectué 10 simulations correspondant à la variation de l'entrefer de 1mm jusqu'à 10mm. A chacune des 30 simulations nous avons tiré 3 grandeurs qui sont ; le potentiel vecteur A, l'induction magnétique B et le champ magnétique H.

Pour pouvoir comparer ces résultats et observer leurs variations en fonction de μ_r et de l'entrefer nous avons choisi un point fixe dans l'entrefer de façon arbitraire qui a pour coordonnées [0.11, 0.0695] auquel nous relevons à chaque fois les valeurs de A, de B et de H.

Les figures obtenues après résolution de ces trois grandeurs avec un entrefer $e=1\text{mm}$ et une perméabilité relative $\mu_r=500$ sont représentées ci-dessous :

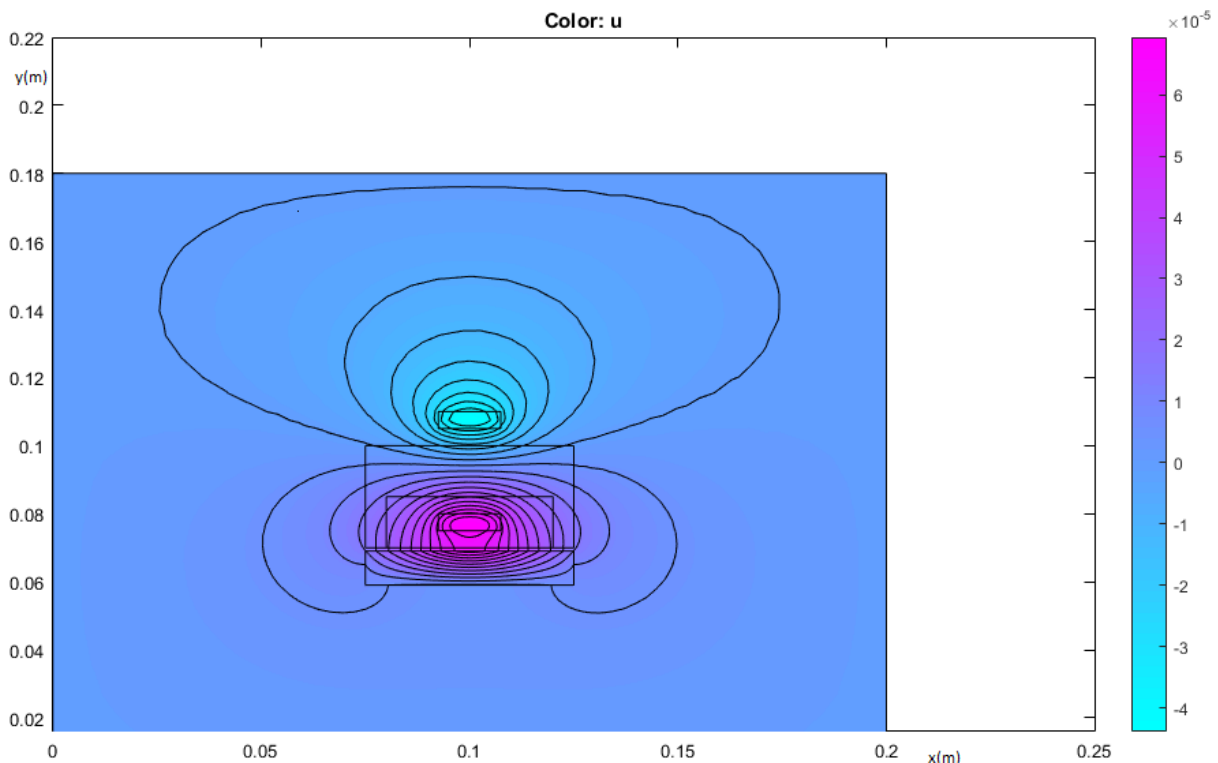


Figure IV.10 : répartition du potentiel vecteur A pour $e=1\text{mm}$ et $\mu_r=500$

Dans la (figure IV.10) nous voyons clairement que les lignes du potentiel vecteur A n'atteignent pas les bords du domaine prédéfini, nous déduisons donc que nous lui avons donné les bonnes proportions.

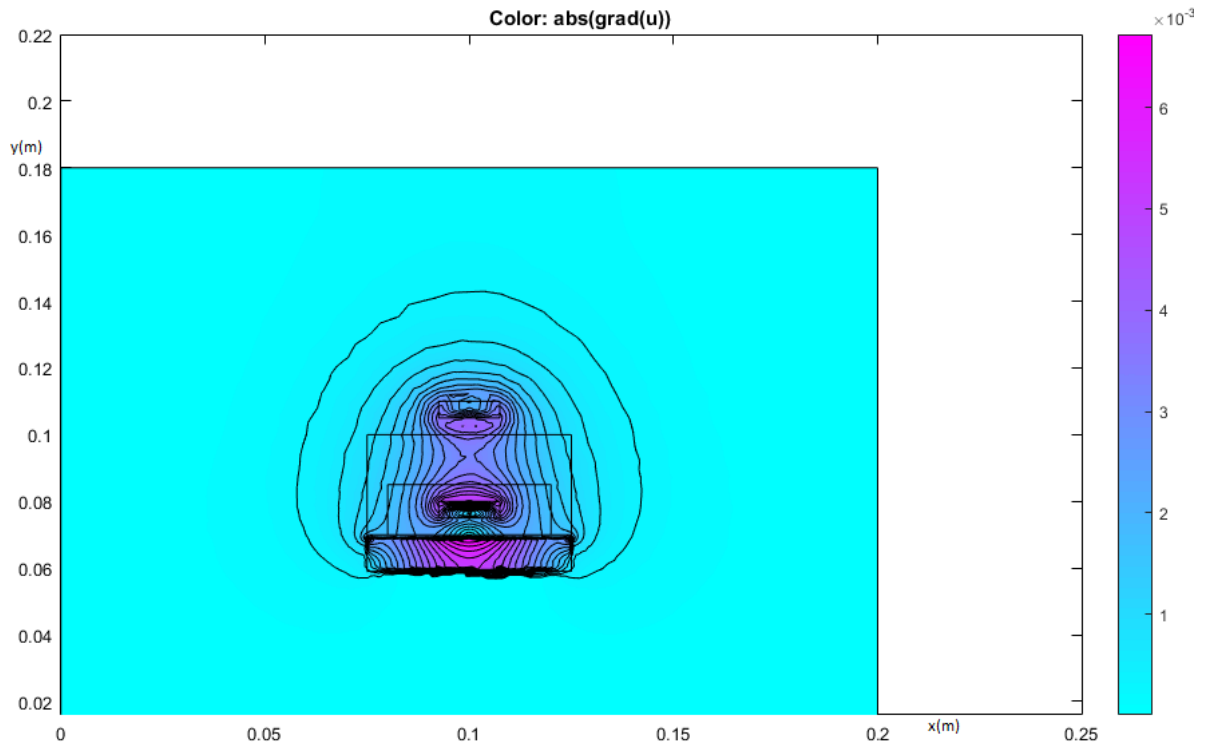


Figure IV.11 : répartition de l'induction magnétique B pour $e=1\text{mm}$ et $\mu_r=500$

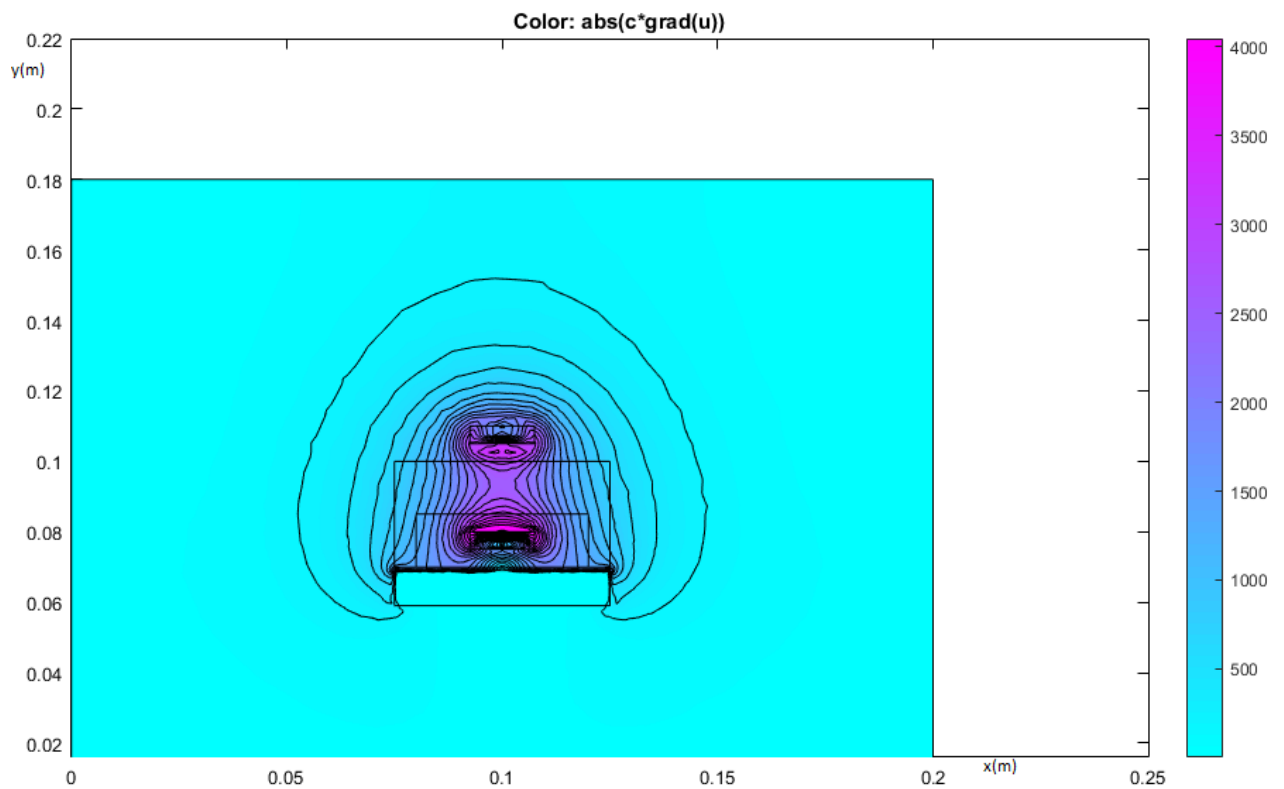


Figure IV.12 : répartition du champ magnétique H pour $e=1\text{mm}$ et $\mu_r=500$

Cette approche nous a permis de constituer le tableau suivant (Tableau IV.3)

| e (mm) | A(*10 ⁻⁵) | | | B(T) | | | H(A/m) | | |
|-----------|-----------------------|-------------|--------------|------------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
| | $\mu_r=1$ | $\mu_r=500$ | $\mu_r=1000$ | $\mu_r=1$ | $\mu_r=500$ | $\mu_r=1000$ | $\mu_r=1$ | $\mu_r=500$ | $\mu_r=1000$ |
| 1 | 2.57640 | 4.62187 | 4.62432 | 0.00149454 | 0.00233492 | 0.00234483 | 1186.14 | 1848.54 | 1849.18 |
| 2 | 2.57203 | 4.45705 | 4.74810 | 0.00147038 | 0.00210786 | 0.00211063 | 1171.13 | 1678.28 | 1679.59 |
| 3 | 2.57051 | 4.32770 | 4.32179 | 0.00147028 | 0.00199684 | 0.00197141 | 1170.09 | 1566.75 | 1568.80 |
| 4 | 2.56703 | 4.18085 | 4.17929 | 0.00146882 | 0.00183339 | 0.00183593 | 1169.84 | 1456.92 | 1458.51 |
| 5 | 2.56612 | 4.04819 | 4.06161 | 0.00146080 | 0.00176174 | 0.00175352 | 1163.95 | 1394.12 | 1395.41 |
| 6 | 2.56200 | 3.93219 | 3.93950 | 0.00145394 | 0.00167364 | 0.00167638 | 1162.53 | 1331.84 | 1332.31 |
| 7 | 2.56180 | 3.86615 | 3.82214 | 0.00145260 | 0.00162175 | 0.00162189 | 1159.45 | 1292.90 | 1293.55 |
| 8 | 2.56130 | 3.74487 | 3.74165 | 0.00144003 | 0.00158737 | 0.00158835 | 1154.66 | 1263.21 | 1254.01 |
| 9 | 2.56094 | 3.65203 | 3.65902 | 0.00143960 | 0.00156100 | 0.00156248 | 1149.21 | 1242.21 | 1242.72 |
| 10 | 2.56057 | 3.57233 | 3.58381 | 0.00143675 | 0.00153770 | 0.00153649 | 1143.33 | 1223.38 | 1223.18 |

Tableau IV.3 : Résultats obtenus de A, B et H pour les 30 simulations effectuées.

A partir du tableau IV.3, nous avons pu tracer les courbes du champ magnétique H pour deux différentes valeurs de la perméabilité relative à savoir $\mu_r = 1$ et $\mu_r = 500$.

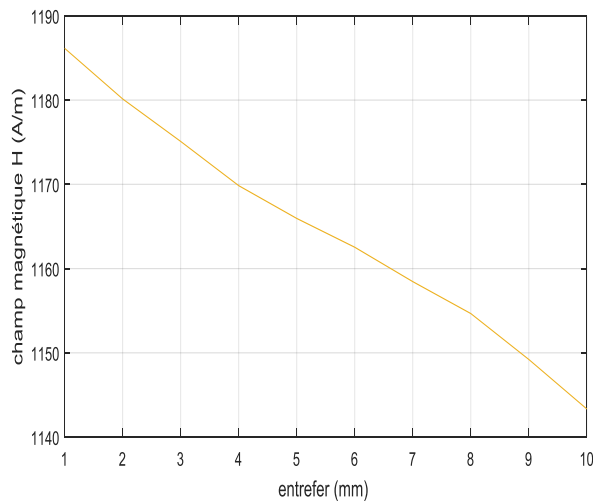


Figure IV.13 : courbe du champ magnétique H en fonction de la variation de l'entrefer pour $\mu_r = 1$

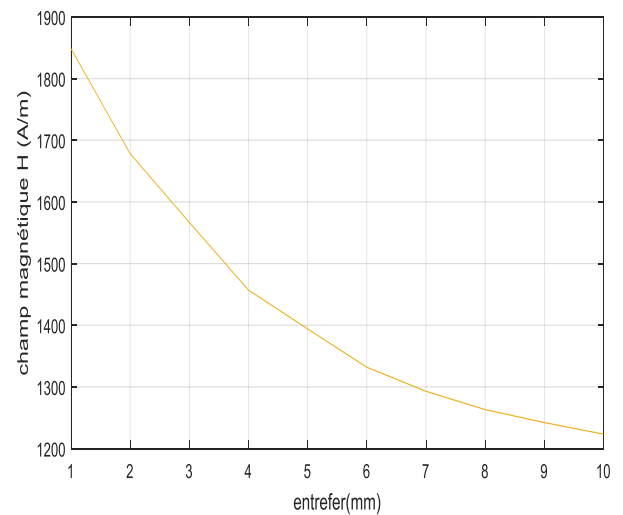


Figure IV.14 : courbe du champ magnétique H en fonction de la variation de l'entrefer pour $\mu_r = 500$

Les figures IV.13 et IV.14 ont toutes les deux une allure décroissante, en outre nous remarquons que la valeur du champ est plus importante lorsque μ_r est grand et/ou lorsque l'entrefer est petit.

Dans ce qui suit une présentation des différents résultats obtenus sous forme de courbes avec différentes valeurs de μ_r . Nous présenterons ci-dessous les courbes de la force magnétique, de la vitesse ainsi que le déplacement.

Dans notre travail nous avons établi un programme sous Matlab nous permettant d'évaluer les grandeurs citées, néanmoins on présentera les résultats sous forme de courbe dans un souci de comparaison entre les matériaux de différentes perméabilités magnétiques.

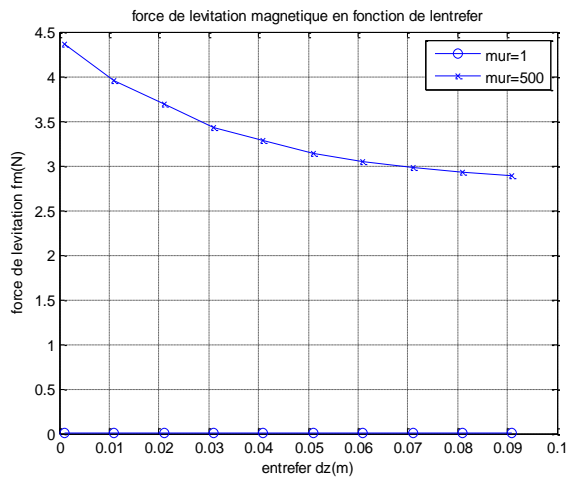


Figure IV.15 : courbe de $F_m(e)$
 $\mu_r=1$ et $\mu_r=500$

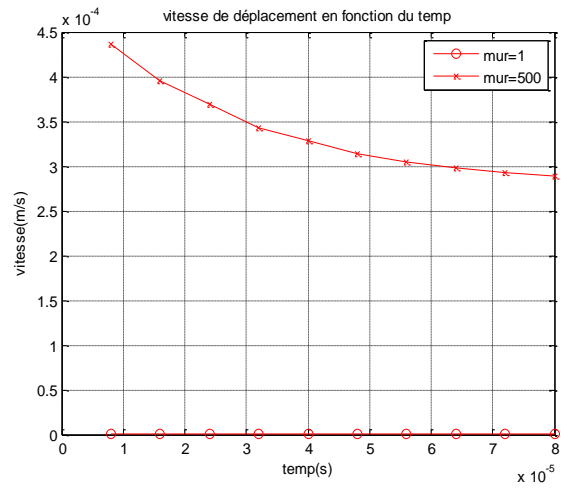


Figure IV.16 : courbe de $v(t)$
 $\mu_r=1$ et $\mu_r=500$

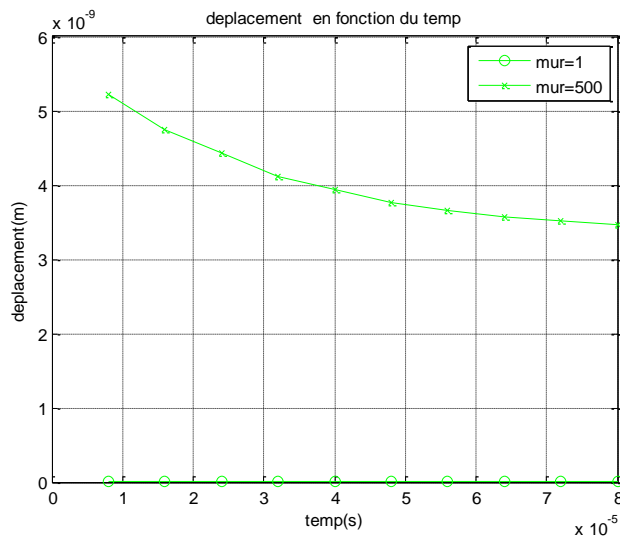


Figure IV.17 : courbe de $dz(t)$
 $\mu_r=1$ et $\mu_r=500$

F_m : force de lévitation magnétique

v : vitesse de déplacement

dz : déplacement

e : entrefer

t : temps

On observe sur les figures représentées ci-dessus que les courbes obtenues avec la valeur de $\mu_r=500$ sont toutes décroissantes et suivent le comportement du champ magnétique en fonction de l'entrefer, ceci s'explique par le fait que les équations de ces grandeurs sont dépendantes du champ magnétique tel que :

$$\omega = 0.5 * H * \mu * S \quad (\text{IV.9})$$

ω : énergie

μ : perméabilité magnétique

H : champs magnétique

S : aire

$$Fm = \frac{\omega}{dz} \quad (\text{IV.10})$$

Aussi nous avons :

$$Fm = m * \gamma \quad (\text{IV.11})$$

Et :

$$v = d/dt * \gamma \quad (\text{IV.12})$$

Les courbes pour $\mu_r=1$ sont quasiment nulles devant celle de $\mu_r=500$, cette énorme différence vient du fait qu'avec $\mu_r=1$ le matériau est totalement démagnétisé et devient donc amagnétique et ne peut du fait canaliser les lignes du champ magnétique. La force générée est naturellement trop faible.

Par la suite, nous avons refait le même travail que précédemment sauf que cette fois-ci nous avons traité les cas où $\mu_r=1000$ et $\mu_r=500$. Les résultats obtenus sont également sous forme de courbes.

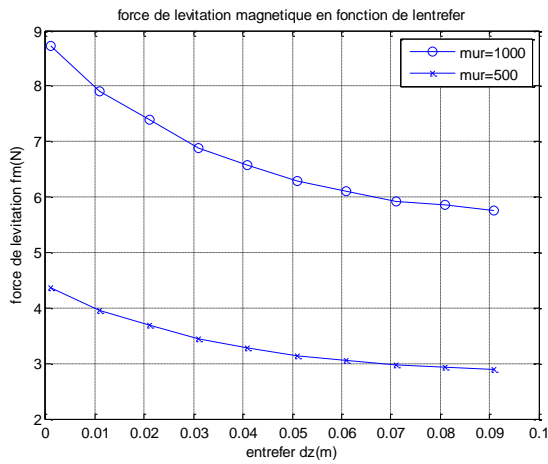


Figure IV.18 : Courbe $F_m(e)$
 $\mu_r=1000$ et $\mu_r=500$

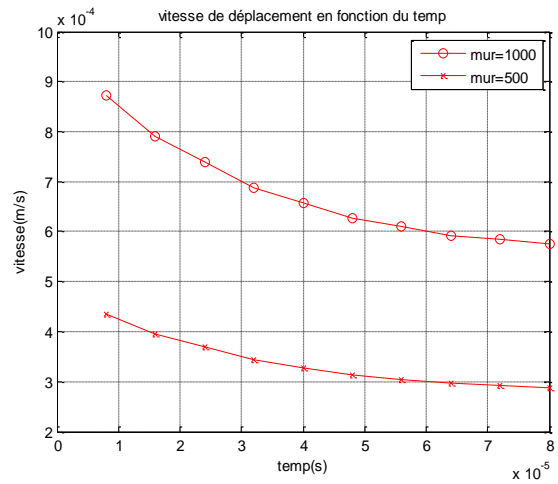


Figure IV.19 : Courbe $v(t)$
 $\mu_r=1000$ et $\mu_r=500$

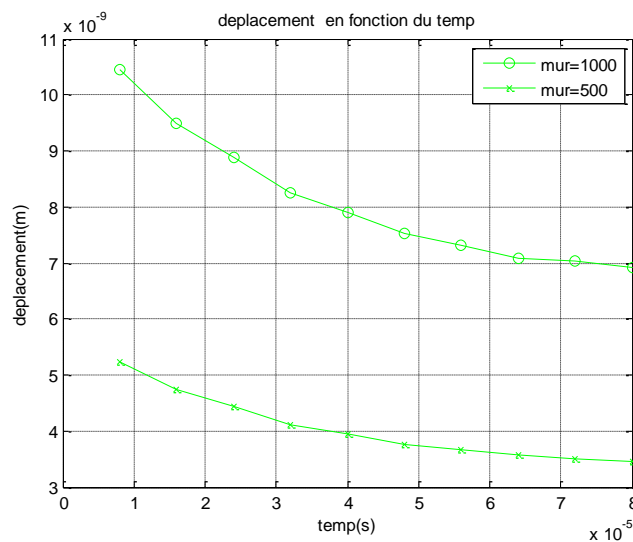


Figure IV.20 : Courbe $dz(t)$
 $\mu_r=1000$ et $\mu_r=500$

On remarque sur les figures ci-dessus que les courbes sont décroissantes pour les deux valeurs de μ_r et pour les 3 grandeurs représentées. Nous voyons également qu'avec $\mu_r=1000$ on obtient des valeurs supérieures à celles avec $\mu_r=500$.

On constate que plus la perméabilité magnétique relative du matériau est grande plus la force de lévitation générée est importante.

L'objectif initial de ce travail était d'évaluer la force de lévitation magnétique liée à une machine linéaire

Nous avons entamé notre travail en élaborant un état de l'art sur la lévitation magnétique, nous avons parlé des différents types de lévitations magnétiques en nous accentuant sur la lévitation magnétique active.

Dans un second temps, nous avons traité la machine linéaire où nous avons d'abord parlé de son développement à travers le temps puis nous avons expliqué son principe de fonctionnement et sa conception avec les différentes géométries existantes.

Par la suite nous avons fait une brève présentation des méthodes de résolutions, nous avons conclu que les méthodes numériques notamment la méthode des éléments finis, sont les plus adéquates dans le cas de notre étude et des cas des phénomènes magnétiques.

Enfin, nous sommes passé à une simulation de notre modèle d'étude via l'outil pdeTool de Matlab, nous avons commencé par expliquer en détail les étapes à suivre dans pdeTool afin d'introduire tous les paramètres de notre modèle, par la suite nous sommes passé à la résolution puis à la présentation et l'interprétation des différents résultats obtenus.

Notre étude a été faite en variant deux paramètres à savoir l'entrefer et la perméabilité magnétique relative du matériau utilisé, nous avons choisi deux valeurs de la perméabilité qui se trouvent dans la plage standard des matériaux magnétiques et une autre qu'on a pris comme cas extrême à savoir $\mu_r = 1$ qui équivaut à un matériau démagnétisé.

Durant notre travail, nous avons constaté, premièrement, que l'augmentation de l'entrefer agit négativement sur la force de lévitation magnétique en la faisant diminuer. L'optimisation de la force magnétique passe donc inévitablement par un choix adéquat de la dimension de l'entrefer.

Deuxièmement nous avons observé qu'avec l'utilisation de matériaux de différentes perméabilités, on obtient des résultats assez différents qui nous permettent de dire que la perméabilité magnétique du matériau joue un rôle important dans la génération de la force magnétique, il est donc plus intéressant de choisir des matériaux magnétiques ayant une grande perméabilité magnétique.

Conclusion générale

En effet nous avons observé des résultats médiocres en simulant avec un matériau ayant une perméabilité relative égale à 1, tant dis qu'avec des valeurs concordantes avec des matériaux magnétiques, on obtient des résultats et des grandeurs de la force magnétique satisfaisants et en adéquation avec la dimension de notre système.

Cela nous permet de conclure que la dégradation du matériau magnétique utilisé peut être néfaste à un système de lévitation magnétique.

1. ALLAG.H « Modèle et calcul des systèmes de suspension magnétique passive. » Thèse Doctorat. Université de GRENOBLE, 2010
2. DELAMARE J., « Suspensions magnétiques partiellement passives », *Thèse de Doctorat*, soutenue au LEG – INP Grenoble, 1994.
3. CHIBA A., FUKAO T., ICHIKAWA O., OSHIMA M., TAKEMOTO M. and DORRELL D., “Magnetic Bearing and Bearingless Drives,” *Newnes, An imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford*
4. FILATOVE A. V., “Null-E Magnetic Bearings”, *Phd Thesis*, University of Virginia, 2002.
5. CHARPENTIER J. F. AND LEMARQUAND G., “A comparative analysis of permanent magnet-type bearingless synchronous motors for fully magnetically levitated rotors,” *Journal of Applied Physics*, vol. 83, no. 11, pp. 7121–7123, 1998
6. MATSUMURA F., OKADA Y., FUJITA M. and NAMERIKAWA T. “State of the art of magnetic bearings,” *JSME International Journal*, vol. 40, no. 4, pp. 553–560, 1997.
7. BREAZEALE J. B., MCILWRAITH C. G. and DACUS E. N. “Factors limiting a magnetic suspension system,” *Journal of Applied Physics*, vol. 29, pp. 414, 1958.
8. GRAEMINGER B., “*British Patent*” No 74499, 24541, 1912.
9. JAYAWANT B. V., “Electromagnetic suspension and levitation”, *Edward Arnold*, London, 1981.
10. SINHA P. K., “Electromagnetic Suspension, Dynamics and Control”. *Peter-Peregrinus Ltd*, London, United Kingdom, 1987.
11. KEMPER H., “*German Patent*” No 643316, 644302, 1937.

12. FAURE F., “Suspension magnétique pour volant d’inertie”, *Thèse de Doctorat*, soutenue au LEG – INP Grenoble, 2003.
13. MOON F. C., “Superconducting Levitation, Applications to Bearings and Magnetic Transportation.” *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co*, KGaA, Weinheim, Germany, 2004.
14. F. T. HOLMES & J. W. BEAMS “Frictional Torque of an Axial Magnetic Suspension”, *nature*, 140, pp. 30-31, 03 July 1937.
15. FRAZIER R. H., GILINSON P. J., and OBERBECK G. A., “Magnetic and Electric Suspensions”, MIT Press, 1974.
16. JIN J. and HIGUCHI T., “Dynamics and stabilization of magnetic suspension using tuned LC circuits,” Proceedings of the IV International Symposium on Magnetic Bearings, ETH, Zurich, Switzerland, 1994.
17. TIXADOR P., “Matériaux Supraconducteurs”. Lavoisier, Hermes Sciences Publication, Paris, 2003.
18. TINKHAM M., “Introduction to Superconductivity”. McGraw-Hill, Inc, New York, 2nd edition, 1996.
19. SAINT-JAMES D., SARMA G., and THOMAS E. J., “Type II Superconductivity”, Pergamon Press, New York, 1969.
20. BEDNORZ J. G. and MULLER K. A., “Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system,” *Zeitschrift für Physik B- Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189–193, 1986.
21. WU M. K., ASHBURN J. R., TORNG C. J., HOR P. H., MENG R. L., GAO L., HUANG Z. J., WANG Y. Q. and CHU C.W., “Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure,” *Physical Review*

- Letters, vol. 58, no. 9, pp. 908–910, 1987.
22. FILATOV A. V., S. F. KONOVALOV, “Low-hysteresis interaction of a hard type II superconductor with a permanent magnet,” *Physica C*, vol. 271, no. 3–4, pp. 225–229, 1996.
 23. YANG Y., “Vertical and lateral forces when a permanent magnet above a superconductor traverses in arbitrary directions”, *Superconducting Sciences and Technology*, Vol.21, pp:5,2008.
 24. RICHARD F., POST, “Magnetic Levitation for Moving Objects,” U.S. Patent No. 5,722,326 March 3, 1998
 25. POST, RICHARD F., “Inductrack Demonstration Model,” Report UCRL-ID-129664, February 3, 1998.
 26. HALBACH, K., “Applications of permanent magnets in accelerators and electron storage rings,” *Journal of Applied Physics*, vol. 57, p. 3605, 1985.
 27. POST, RICHARD F., “Inductrack Magnet Configuration,” U.S. Patent No. 6,633,217 B2, October 14, 2003.
 28. FUNK D., GETSLA’S K., “Senior Project Magnetic Levitation Train”, Final Report, Electrical & Computing Engineering, Bradley University, 2005.
 29. SIMON M. D., HEFLINGER L. O., RIDGWAY S. L., “Spin stabilized magnetic levitation,” *American Journal of Physics*, vol. 65, no. 4, pp. 286–292, 1997.
 30. GANS R. F., JONES T. B., WASHIZU M., “Dynamics of the Levitron,” *Journal of Physics,D-Applied Physics*, vol. 31, no. 6, pp. 671–679, 1998.
 31. YONNET J. P., “Etude des paliers magnétiques passifs”, Thèse de Doctorat d’état Es Sciences, Grenoble, 1980.

32. ADJINA Miloud, "Contribution à l'étude d'un moteur synchrone linéaire à aimant permanent", Thèse Magister, Université de Batna 2011.
33. GONG Jinlin, "Modélisation et conception optimale d'un moteur linéaire à induction pour système de traction ferroviaire, Ecole national de Lille ,2011
34. GHORAB Olga, "Performances d'un moteur asynchrone linéaire cylindrique", Thèse Doctorat, Université Annaba, 2007.
35. KHOUANE Boulanouar, "Etude et commande d'un moteur synchrone linéaire", Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2012
36. HAMANI Sadek, ZEGHOUANI, "Etude de la lévitation magnétique des trains à levitation magnétique". Master en electrotechnique, Université Béjaia 2016
37. Reda BELKHIR, Houda LAHLOU and all, "Propulsion à lévitation magnétique". Projet physique, INSA Rouen, 2011.