



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH  
جامعة الشهيد لاربي التبسي - تبسة  
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa



كلية العلوم و التكنولوجيا

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

## MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN  
ÉLECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

### THEME

## Etude d'un système de lévitation magnétique

Présenté par le binôme :

- JOUINI Rahma
- RAIS Sabrina

Devant le jury :

-SOUFI Youcef	PR	Président
-DJEBBAR Mohamed Salah	MCA	Examineur
-NEHAL Ouassila	MAA	Encadreur

2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Remerciement*

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

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

*Nous te remercions la directrice de mémoire :NEHAL OUASSILA d'avoir accepté de diriger ce travail, merci pour votre sympathie et vos encouragements et pour avoir partagé vos compétences avec nous tout au long de ces mois ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps que vous avez bien voulu nous consacrer et sans que mémoire n'aurait vu le jour, que vous trouvez ici l'expression de notre plus profond respect et nos sincères gratitude.*

*Nous souhaitons également remercier M. SOUFI YUCEF et M. DJEBBAR MOHAMED SALAH, pour leur contribution en tant que membres de jury. Leurs commentaires et leurs suggestions ont grandement amélioré la qualité de ce mémoire.*

*Nous remercions mes collègues, tous les enseignants au département génie électrique à l'université de Tébessa.*

*Enfin, nous tenons remercions tous les gens qui ont contribué à nos réussites tout au long de nos parcours d'études.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire*

*À mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé Que DIEU les protège.*

*À mon cher frère : Abd Aljabar.*

*À mes chères sœurs : Karima, Mariem, Jihane et les enfants de mes sœurs Mohamed al-amine, Joud, Jasser et Fahad.*

*À mon cher fiancé : Badis et ma deuxième famille.*

*À tous mes amis : oumayma, zayneb, fatma, Salma, esraa, istabraQ, kawther.*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*À tous ceux qui m'aiment.*

*À tous ceux que j'aime.*

*Jouini Rahma*

## إهداء:

إلى الذي لديه القدرة على فك المستحيل، إلى صانع الأقدار، إليك يا الله أقدم لك جهدي وشكري، فالحمد لله الذي يحكم بالحق ويجزي كل نفس بما تسعى والصلاة والسلام على سيدنا محمد خاتم الأنبياء والمرسلين.

إلى ما عاش فينا قبل أن نعيش فيه، وعرفناه في دفاتر التضحيات إلى وطننا الثاني وكل شهدائه الأبرار فلسطين، قبلتنا الأولى، ومسرى حبيبنا ونبينا الكريم. جمعنا الله في أقصاها فاتحين مهللين مكبرين، وليس ذلك على الله بعسير.

إلى هند ويوسف وروح الروح.

إلى كل زملائي في غزة، الذين منعتهم الحرب أن يكونوا مكاني.

إلى من قال فيهما الله تعالى : (وقضى ربك ألا تعبدوا إلا إياه وبالوالدين إحسانا) إلى ملاكي الطاهر، وقوتي بعد الله داعمتي الأولى والأبدية "أمي" أهديك هذا الإنجاز الذي لولا تضحياتك لما كان له وجود، إلى من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل "أبي" إلى من قيل فيه: (سَنَسُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ)، "أخي" أدامك الله ضلعا ثابتا لي.

إلى كل من أحب، إلى من ساندني عند ضعفي إلى صديقات المواقف لا السنين ، إلى أصحاب الشدائد وملهمين نجاحي إلى من رسموا بسمتي وقت الصعاب وذكروني بمدى قوتي واستطاعتي .

رايس صبرينة

## Abstract :

The high-speed train project looks very promising! Like the Maglev and Transrapid. Also using electromagnetism to reduce friction and increase speed is an innovative and potentially revolutionary approach.

In the present work, we will begin modeling a magnetic levitation system. We will first introduce this system, explain its operating principle, and discuss its types, domains, and applications. The objective of this work is to develop a program using Matlab to evaluate the generated magnetic force that the train levitates.

**Keywords: magnetic levitation, train, Transrapid, Maglev, Magnetic suspension, Electromagnet.**

## Résumé :

Le projet de train à grande vitesse semble très prometteur ! Comme le Maglev et le Transrapid. L'utilisation de l'électromagnétisme pour réduire la friction et augmenter la vitesse est également une approche innovante et potentiellement révolutionnaire.

Dans le présent travail, nous commencerons à modéliser un système de lévitation magnétique. Nous présenterons d'abord ce système, expliquerons son principe de fonctionnement et discuterons de ses types, domaines et applications. L'objectif de ce travail est de développer un programme utilisant Matlab pour évaluer la force magnétique générée que le train lévite .

**Mot clés : lévitation magnétique, train, Transrapid, Maglev, Suspension magnétique, Electro-aimant.**

## ملخص :

مشروع القطار فائق السرعة يبدو واعدًا جدًا! مثل ماجليف وترانسرايد.

كما أن استخدام الكهرومغناطيسية لتقليل الاحتكاك وزيادة السرعة هو نهج مبتكر وربما ثوري.

في العمل الحالي، سنبدأ في نمذجة نظام الرفع المغناطيسي. سنقدم هذا النظام أولاً، ونشرح مبدأ التشغيل، ونناقش أنواعه ومجالاته وتطبيقاته. الهدف من هذا العمل هو تطوير برنامج باستخدام Matlab لتقييم القوة المغناطيسية المتولدة التي يرفعها القطار.

**الكلمات المفتاحية: الرفع المغناطيسي، القطار، ترانسرايد، ماجليف، التعليق المغناطيسي، المغناطيس الكهربائي.**

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I Généralités sur la lévitation magnétique.....	3
I.1-Introduction .....	4
I.2-La lévitation magnétique .....	4
I.3-Théorème d'Earnshaw .....	5
I.3.1-Corps a aimantation rigide.....	5
I.3.2-Corps a aimantation non rigide .....	5
I.3.3-Corps conducteur non magnétique .....	5
I.3.4-Viabilité du théorème d'earnshaw .....	5
I.4-Lévitation magnétique et champs applicatifs.....	6
I.5- Composition du système à lévitation magnétique .....	6
I.6-Principe de fonctionnement .....	6
I.7-Classification des lévitations magnétiques .....	7
I.7.1-Les lévitations magnétiques passives .....	7
I.7.2-Lévitation magnétique active (ou lévitation électromagnétique) .....	7
I.7.3-Lévitation supraconductrice .....	8
I.7.4-Lévitation électrodynamique à champs alternatifs .....	9
I.7.5-Lévitation stabilisée par l'effet gyroscopique .....	10
I.7.6-Lévitation des corps diamagnétiques.....	11
I.7.7-Lévitation magnétique utilisant un circuit LC .....	12
I.8-Domains d'utilisation des suspensions magnétiques .....	12
I.9- Applications des suspensions magnétiques .....	13
I. 10-Avantages et inconvénients de la lévitation magnétique.....	18
I.11-CONCLUSION .....	18
Chapitre II Les trains à lévitation magnétique.....	19
II.1-Introduction.....	20
II.2-Historique et description .....	20
II.3-Train a lévitation magnétique .....	20
II.3.1-Le Transrapid .....	21
II.3.2-Le Maglev .....	22
II.4-Les trains à lévitation électromagnétique (EMS) .....	22
II.5- Le système de Maglev basé sur la suspension magnétique (EMS).....	24
II.5.1-Principe de fonctionnement .....	24

<b>II.6-Les trains à lévitation électrodynamique (EDS)</b> .....	25
<b>II.7-Le système de Maglev basé sur la répulsion Électrodynamique (EDS)</b> .....	26
<b>II.7.1-Principe de fonctionnement</b> .....	26
<b>II.7.2-Technique de la lévitation</b> .....	27
<b>II.7.3-La propulsion du véhicule</b> .....	28
<b>II.7.4- Le guidage latéral</b> .....	29
<b>II.8-Comparaissant entre l'EDS et l'EMS</b> .....	29
<b>II.9-Avantages des trains à lévitation magnétique</b> .....	31
<b>II.10- Inconvénients des trains à lévitation magnétique</b> .....	31
<b>II.11-Conclusion</b> .....	32
<b>Chapitre III Modélisation d'un train à lévitation magnétique</b> .....	33
<b>III .1-Introduction</b> .....	34
<b>III .2- Equations de Maxwell et lois de comportement des milieux</b> .....	34
<b>III .3- Conditions de passage entre deux milieux différents</b> .....	35
<b>III .4- Méthodes fondées sur le tenseur de Maxwell</b> .....	36
<b>III .4.1- Méthode du tenseur de Maxwell avec intégration surfacique (TMS)</b> .....	36
<b>III .4.2- Méthode du tenseur de Maxwell avec intégration volumique</b> .....	38
<b>III .5- Méthodes numériques</b> .....	39
<b>III .5.1-Méthode des éléments finis</b> .....	39
<b>III.6-L'organigramme de la méthode de la corde</b> .....	42
<b>III.7-Conclusion</b> .....	42
<b>CHAPITRE IV Résultat obtenus de la modélisation d'un train de lévitation magnétique</b> .....	44
<b>IV .1-Introduction</b> .....	45
<b>IV.2- Le problème d'étude</b> .....	45
<b>IV.3- Le domaine d'étude</b> .....	45
<b>IV.4-Résultats obtenus</b> .....	47
<b>IV.5-Conclusion</b> .....	52
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	53

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1:</b> La lévitation magnétique.....	5
<b>Figure I.2 :</b> Le système à lévitation magnétique.....	7
<b>Figure I.3:</b> Principe de fonctionnement du système à lévitation magnétique.....	7
<b>Figure I.4 :</b> Principe de la lévitation électromagnétique.....	8
<b>Figure I.5 :</b> Boucle de courant supraconductrice en mouvement au-dessus d'une plaque conductrice.....	9
<b>Figure I.6 :</b> Lévitation électrodynamique à courant alternatif.....	10
<b>Figure I.7 :</b> Exemple de Lévitation électrodynamique par courant alternatif.....	10
<b>Figure. I.8 :</b> Toupie Léviseront.....	11
<b>Figure .I.9 :</b> Grenouille en lévitation.....	12
<b>Figure. I.10 :</b> Principe de la lévitation électromagnétique à circuit résonant.....	12
<b>Figure I.11 :</b> Fraise sur paliers magnétiques.....	14
<b>Figure I.12 :</b> Pompe turbo moléculaire sur suspension magnétique (d'après Alcatel DTV).....	15
<b>Figure I.13:</b> Choppers de particule.....	16
<b>Figure I.14 :</b> Stockage d'énergie par volant d'inertie (Active Power).....	16
<b>Figure II.1 :</b> Transrapid.....	22
<b>Figure II.2 :</b> SCMaglev.....	22
<b>Figure II.3 :</b> schéma Transrapid.....	23
<b>Figure II.4:</b> prototype d'un Maglev.....	23
<b>Figure II.5:</b> Véhicule a suspension électromagnétique, réalisé à l'université Sussex.....	24
<b>Figure II.6:</b> Train à suspension magnétique.....	25
<b>Figure II.7:</b> Véhicule TRANSRAPID.....	26
<b>Figure II.8:</b> Position de l'Électro-aimant .....	27
<b>Figure II.9 :</b> Système de suspension magnétique (Le Transrapid).....	27
<b>FigureII .10:</b> Principe de fonctionnements de Maglev.....	29

<b>Figure II-11:</b> Technique de lévitation dans les systèmes de répulsion Électrodynamique.....	29
<b>Figure II.12:</b> Technique de lévitation dans les systèmes EDS, cas de l'équilibre.....	30
<b>Figure II.13:</b> Technique de lévitation dans les systèmes EDS Cas de décalage le véhicule vers le bas.....	30
<b>FigureII.14:</b> Technique de propulsion dans les systèmes de répulsion électrodynamique.....	31
<b>Figure II.15:</b> Technique de guidage latérale dans les systèmes de répulsion électrodynamique...	31
<b>Figure II.16:</b> Les systèmes de train à lévitation magnétique.....	32
<b>Figure II.17:</b> Le train Maglev ML100.....	32
<b>Figure III.1:</b> les formes possibles des éléments élémentaires en (2D).....	44
<b>Figure III.2:</b> Organigramme de la mise en œuvre des méthodes de Calcul les forces magnétiques.	46
<b>Figure IV.1 :</b> La géométrie d'un électroaimant.....	49
<b>Figure IV.2 :</b> paramètres d'un électroaimant dans le cas de décalage ( $x \neq 0$ ).....	50
<b>Figure IV.3 :</b> les composantes de la force magnétique résultante.....	51
<b>Figure IV.4 :</b> Maillage du domaine d'étude.....	52
<b>Figure IV. 5 :</b> La distribution des lignes équipotentielle du potentiel vecteur magnétique ( $\vec{A}$ ).....	52
<b>Figure IV. 6 :</b> Distribution de l'induction magnétique $\vec{B}$ .....	53
<b>Figure IV.7:</b> distribution de la force et la force résultante a la position du partie mobile ( $x = 0$ ).54	
<b>Figure IV. 8:</b> La distribution des lignes équipotentielle du potentiel vecteur magnétique ( $\vec{A}$ )( $x=0.05$ ).....	55
<b>Figure IV. 9:</b> Distribution de l'induction magnétique $\vec{B}$ ( $x=0.05$ ).....	55
<b>Figure IV. 10 :</b> Distribution des forces et la force résultante sur la pièce fixe ( $x=0.05$ ).....	56

# INTRODUCTION GENERALE

---

## INTRODUCTION GENERALE

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. La lévitation magnétique est une technique qui permet la suspension d'objets par l'effet champ électromagnétique sans support mécanique.

Il y a plusieurs applications qui ont vu le jour dans les années 90 avec l'avènement d'aimants supraconducteurs, et les facilités de la commande introduite par l'électronique de puissance et les techniques de régulation qui ont contribué au développement des techniques de la lévitation magnétique. Elle a investi le système de transport terrestre (le maglev et le trains-rapide, Swissmetro).

Notre travail consiste en une contribution à l'étude de la lévitation magnétique tout en faisant ressortir les différents éléments intervenant dans la conception de système de lévitation magnétique.

Pour cela on organisera notre mémoire en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons le principe de la lévitation magnétique tout en donnant un aperçu sur les différentes techniques permettant ce type de fonction, les techniques sont appuyées par des exemples d'applications.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les types des trains à lévitation magnétique et proposons une structure assurant les trois fonctions ; la lévitation, le guidage et la propulsion de l'objet avec une analyse fonctionnelle des différents éléments qui les composent, à la fin de chapitre Nous avons mentionné les avantages et les inconvénients des maglev.

le troisième chapitre, sera consacré à l'étude statique de la suspension choisie dans le chapitre deux, nous abordons les équations qui régissent le phénomène électromagnétique.

En tenant compte des hypothèses simplificatrices, en utilisant les équations de Maxwell. Nous examinerons également le calcul des forces magnétiques engendrées. Ensuite, nous donnons les différentes méthodes numériques pour le calcul des forces magnétiques et nous avons expliqué la méthode des éléments finis.

Dans le quatrième chapitre, nous nous concentrerons sur le développement de notre algorithme pour le calcul des forces magnétiques. À cette fin, nous utiliserons un (train+rail) comme exemple d'application.

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

Le calcul de la force sera réalisé en utilisant la méthode du tenseur de Maxwell. Nous mettrons en œuvre cette étude en utilisant une approche de calcul en éléments finis, réalisée dans l'environnement MATLAB.

Nous terminerons notre mémoire par une conclusion général.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur la lévitation magnétique*

## I.1-Introduction

La lévitation est un phénomène physique bien réel permettant la suspension dans l'air d'un objet, obtenue par différents procédés la lévitation requiert beaucoup d'énergie et des contraintes techniques importantes.

Les technologies magnétiques sont les plus prometteuses pour la réalisation d'un moyen de transport à lévitation. La science et la technologie des supraconducteurs ont fait qu'il est devenu possible de faire léviter de nombreux objets. Toutefois, ce phénomène est parfois perçu comme un événement paranormal.

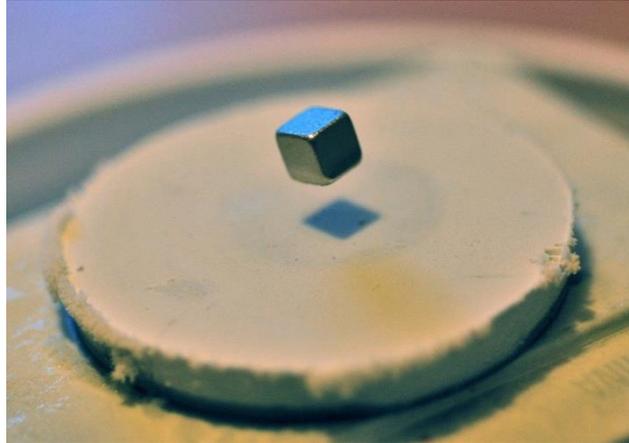
La lévitation magnétique est un principe de lévitation fondé sur les champs magnétiques. Il est largement utilisé en raison de son faible coût, de sa facilité d'implantation et de sa robustesse. La lévitation magnétique se décline sous plusieurs formes différentes, telles que la lévitation par champ magnétique, la lévitation électrodynamique à champs alternatifs, la lévitation pour corps diamagnétiques et la lévitation stabilisée par l'effet gyroscopique. Les lévitations magnétiques actives ou électromagnétiques sont également courantes, ainsi que les lévitations utilisant un circuit LC et la lévitation supraconductrice. La lévitation magnétique a été utilisée dans des applications diverses, notamment dans les monorails et les trains à lévitation magnétique.

Dans ce chapitre, nous verrons la classification de la lévitation magnétique, ses avantages et inconvénients, en plus de ses domaines d'application, et surtout, nous présenterons la définition de la lévitation magnétique.

## I.2-La lévitation magnétique

La lévitation ou la suspension magnétique, qu'elle concerne un être ou un objet, se manifeste lorsque celui-ci se déplace ou reste en suspension au-dessus du sol, grâce à une force, connue ou inconnue, équivalente ou supérieure à la gravité. Cette définition englobe un sens plus large que celui de la sustentation, offrant différents niveaux de liberté de mouvement selon les applications. Les termes lévitation, suspension, sustentation et paliers sont souvent utilisés de manière interchangeable par de nombreux auteurs, sans distinction claire. La lévitation peut se produire dans divers milieux tels que l'air, le vide ou les liquides, mais elle est le plus souvent observée dans l'air. Ses origines peuvent être magnétiques, aérodynamiques, électrostatiques ou acoustiques.

Parmi celles-ci, la lévitation magnétique est la plus répandue en raison de son faible coût, de sa facilité de mise en œuvre et de sa robustesse. De plus, la diversité des formes de lévitation magnétique découle des efforts des chercheurs pour contourner les limitations imposées par le théorème d'Earnshaw.



**Figure I.1:** La lévitation magnétique

### I.3-Théorème d'Earnshaw

Ce théorème a été publié par Earnshaw en 1839, il démontre qu'une particule polarisée plongée dans un champ électrostatique ne peut pas trouver une position d'équilibre stable, ce théorème a été étendu à différents corps magnétiques [8].

#### I.3.1-Corps a aimantation rigide

Le théorème d'Earnshaw peut aisément être étendu aux matériaux à aimantation rigide (aimant permanent), plongés dans un champ magnétostatique [6].

#### I.3.2-Corps a aimantation non rigide

Si la susceptibilité magnétique  $\chi$  est positive ( $\mu_r > 1$ ), la redistribution des Aimantations s'effectue toujours par une diminution de l'énergie magnétostatique emmagasinée, Globalement, la variation d'énergie est plus faible que si l'aimantation avait été rigide, à l'intensité d'aimantation identique, les forces et les raideurs sont donc inférieures ou égale aux précédentes, la relation entre les raideurs est alors:  $K_x + K_y + K_z < 0$ , le corps ne peut toujours trouver une Position d'équilibre stable puisque il n'y a instabilité suivant au moins une des trois directions.

Si la susceptibilité magnétique  $\chi$  est négative (matériau diamagnétique), il est impossible d'aboutir à une conclusion générale de stabilité ou d'instabilité, chaque système étant encas particulier [6].

#### I.3.3-Corps conducteur non magnétique

Un conducteur placé dans un champ magnétodynamique est soumis à des raideurs dont la somme est toujours positive en moyenne, chacune des raideurs peut donc être positive et entraîner la stabilité suivant les trois axes de translation, un conducteur peut donc être stable dans un champ magnétodynamique [6].

#### I.3.4-Viabilité du théorème d'earnshaw

Bien que ce théorème ait été publié *XIX<sup>ème</sup>* siècle, certains de nos contemporains essaient encore de concevoir des suspensions constituées uniquement des matériaux a aimantations rigides ou des matériaux ferromagnétiques, il parait ainsi de temps en temps une publication ou un brevet consacré à ce type de

système, jusqu'à aujourd'hui, aucun prototype n'a pu valider ces conceptions et mettre en défaut le théorème d'Earnshaw [8].

## I.4-Lévitation magnétique et champs applicatifs

La fascination pour la lévitation a toujours été présente chez les hommes, souvent associée à la sorcellerie ou à la magie au fil des siècles. Aujourd'hui, la plupart de ses manifestations sont bien comprises, bien que le terme "lévitation" soit souvent mal utilisé, ce qui entraîne la confusion. Une définition non exhaustive pourrait être formulée ainsi : "Tout objet, quelle que soit sa nature, lévite s'il est suspendu en équilibre stable sous l'action de forces sans être en contact direct avec son environnement proche."

La lévitation peut se produire dans différents milieux (air, vide, milieux liquides), mais elle est plus couramment observée dans l'air. Elle peut prendre différentes formes selon l'origine des forces qui interviennent pour stabiliser l'objet. Ainsi, la lévitation peut être d'origine magnétique, aérodynamique, électrostatique, acoustique ou lumineuse.

## I.5- Composition du système à lévitation magnétique

Le système à lévitation magnétique est composé de (figure I.2):

- **Electroaimant:** C'est une simple bobine enroulée sur un noyau de fer (un boulon d'acier par exemple).
- **Le corps à lévité:** Le corps à lévité est soit une boule métallique ou bien une boule magnétique.
- **Capteur de position:** plusieurs capteurs sont utilisés, comme le capteur à effet Hall, le capteur optique (source lumineuse plus diode photoconductrice) et le capteur ultrason [7].

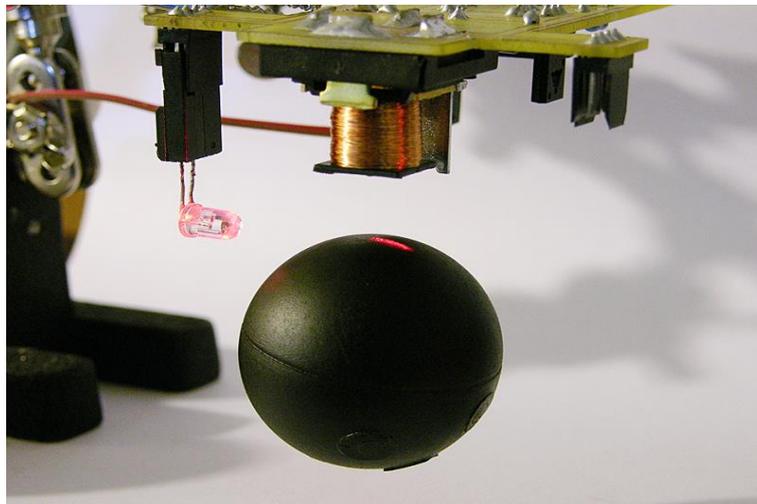


Figure I.2 : Le système à lévitation magnétique.

## I.6-Principe de fonctionnement

Le processus consiste contrôler la position verticale de la balle, en ajustant le courant dans l'électroaimant par l'intermédiaire d'une tension d'entrée. La position de la balle est lue par un transducteur optique qui peut discriminer les mouvements verticaux de la balle des horizontales.

La balle, dans les conditions normales, est soumise à une unique force qui est son propre poids  $P$ . Cette force a pour effet d'attirer la balle vers le sol (voir figure I.3). Pour compenser cette force, on utilise le champ magnétique créé par la bobine. Cette force  $F_B$  va agir dans le sens inverse du poids et attirer la balle vers la bobine. [7]

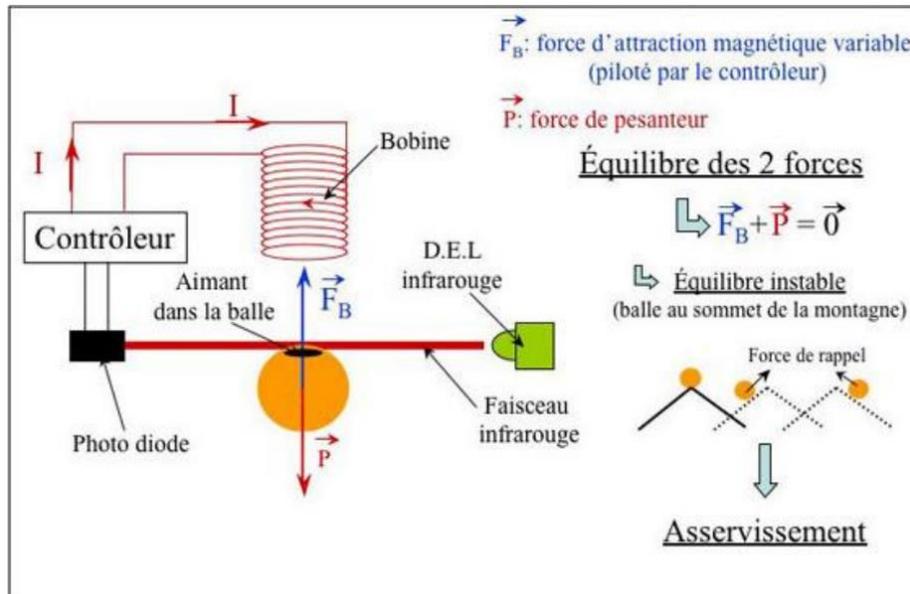


Figure I.3: Principe de fonctionnement du système à lévitation magnétique.[7]

## I.7-Classification des lévitations magnétiques

### I.7.1-Les lévitations magnétiques passives

Les lévitations magnétiques passives sont les plus simples à réaliser. Ils sont autonomes et leur fonctionnement ne nécessite aucun apport d'énergie venant de l'extérieur, ni un refroidissement.

Néanmoins ils ne peuvent être utilisés seuls pour des raisons de stabilité (théorème d'Earnshaw). Les lévitations magnétiques passives doivent donc être associées à un système mécanique (roulement, palier hydrodynamique, butée à aiguille...) ou à un autre type [2].

### I.7.2-Lévitation magnétique active (ou lévitation électromagnétique)

Les lévitations actifs PMA sont des électro-aimants dont le courant est asservi pour maintenir la partie mobile du circuit magnétique dans une position fixe, ils ont besoins d'un apport d'énergie pour fonctionner, Pour alimenter chacun des actionneurs constituant un palier actif, il faut une alimentation de puissance, une commande et un capteur de position.

Les lévitations actives permettent de supporter de très fortes contraintes dans toutes les directions, c'est la raison pour laquelle certains machines de plusieurs tonnes utilisées dans l'industrie lourde sont équipées de paliers actifs .Pour ce type d'application aucun palier magnétique passif ne peut prétendre remplacer le palier actif [2].

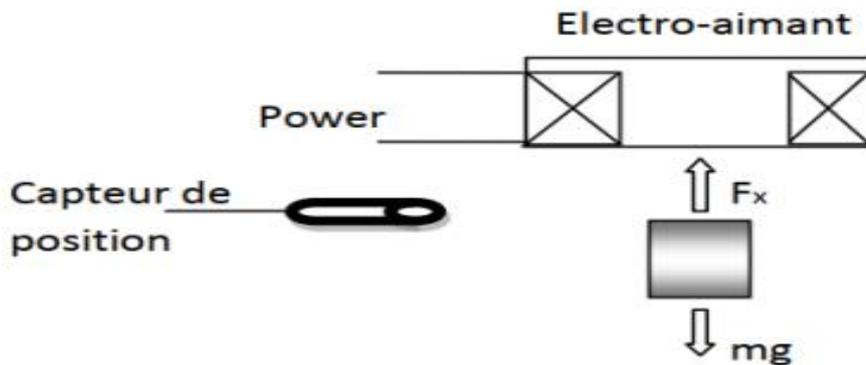


Figure I.4 : Principe de la lévitation électromagnétique.

### I.7.3-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. . La lévitation supraconductrice se réalise sous deux formes différentes. La première utilise un effet spécifique aux supraconducteurs: l'effet Meissner, tandis que 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 [2].

Les aimants supraconducteurs en raison de leur champ magnétique intense ont rendu cela possible. Ce phénomène est appelé «lévitation électrodynamique ou plus souvent EDL (électrodynamique lévitation)». 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.5).

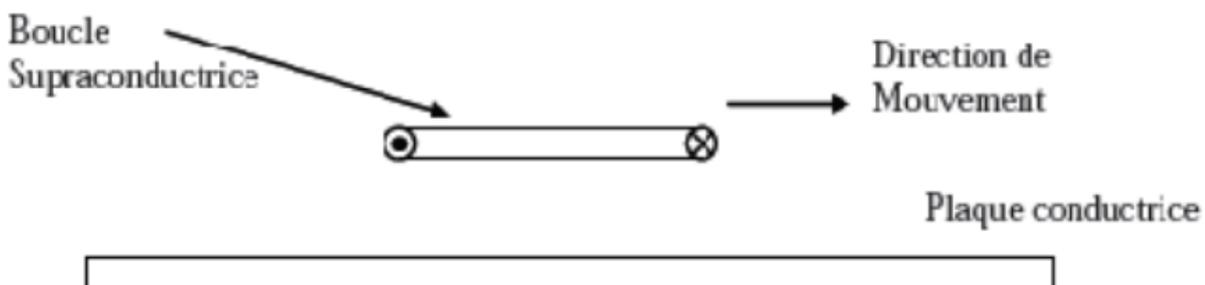
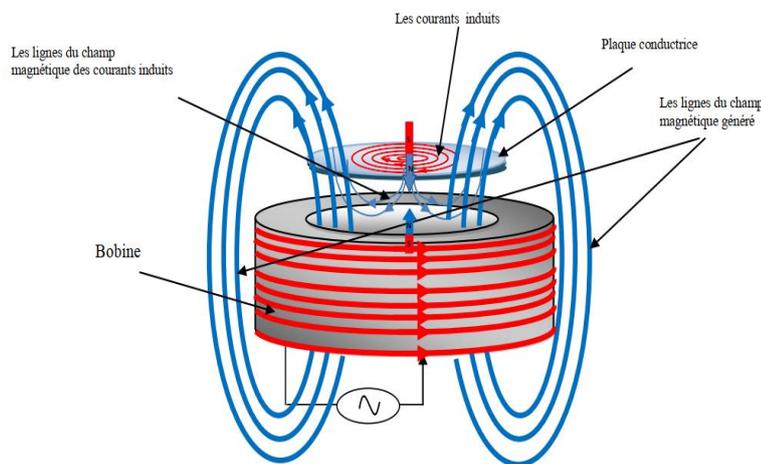


Figure I.5 : Boucle de courant supraconductrice en mouvement au-dessus D'une plaque conductrice

### I.7.4-Lévitation électrodynamique à champs alternatifs

La Lévitation électrodynamique est applicable aux matériaux conducteurs, comme l'aluminium et le cuivre. Selon le principe de Lenz, tout conducteur soumis à un champ alternatif (un champ magnétique alternatif généré par un courant alternatif, ou par le mouvement d'un aimant permanent) est parcouru par des courants produisant un champ induit tendant à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Des interactions naissent alors entre la partie induite et la partie inductrice (la création des forces répulsives). Ce type de lévitation est mieux adapté aux supraconducteurs qui sont capables de fournir des champs intenses par rapport aux conducteurs normaux (cuivre, aluminium, etc.). 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 alimentées par des sources de tension ou de courant variables.



**Figure I.6** : Lévitation électrodynamique à courant alternatif

L'inconvénient majeur de cette méthode vient de la puissance importante qu'il est nécessaire de à la bobine. Cette puissance engendre un échauffement important de la partie suspendue et de l'inducteur [3].

Le meilleur exemple de cette technique est celui d'un disque de cuivre qui flotte au-dessus d'une bobine exposée au Palais de la Découverte à Paris (Figure I.7).



**Figure I.7** : Exemple de Lévitation électrodynamique par courant alternatif.

### **I.7.5-Lévitation stabilisée par l'effet gyroscopique**

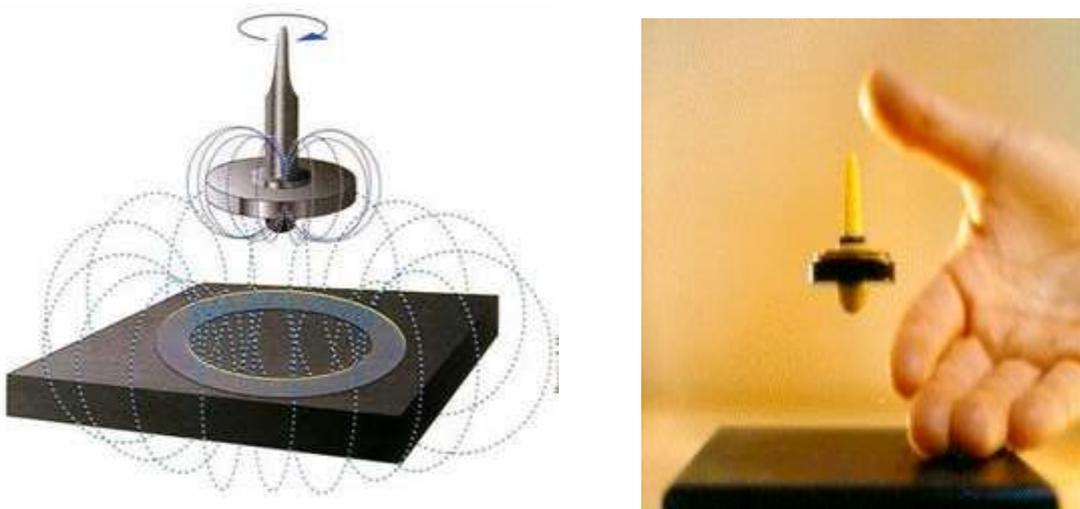
Il a été démontré récemment, que la lévitation dynamiquement stable peut être réalisée en utilisant uniquement des aimants permanents. Cela ne contredit pas le théorème d'Earnshaw qui est valable uniquement pour les systèmes fixes et ne considère pas des effets dynamiques causés par la rotation.

La rotation est capable de stabiliser la lévitation, cet effet est connu sous le nom de l'effet gyroscopique.

Ainsi que nous pouvons trouver dans le commerce, des toupies capables de tourner quelques minutes à plusieurs centimètres au-dessus d'un socle magnétique (Fig. I.8).

Ce type de lévitation est donc très simple à mettre en œuvre, mais a deux inconvénients:

- L'équilibre obtenu n'est pas très stable, la stabilité est très sensible aux variations de nombreux paramètres incluant le poids du rotor, l'aimantation rémanente des aimants et la vitesse de rotation. La lévitation est stable que dans une étroite plage de vitesse.
- La partie en lévitation doit obligatoirement être en rotation [2] [4].



**Figure. I.8** : Toupie Léviteront

### **I.7.6-Lévitation des 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. Avec les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques, il faut des champs très intenses pour que les effets soient manifestes. Des travaux très remarquables ont été réalisés. Il s'agit bien de faire léviter des grenouilles (Fig. I.9), sauterelles et d'autres petites créatures, soumis à un gradient de champs intense environ 16T.



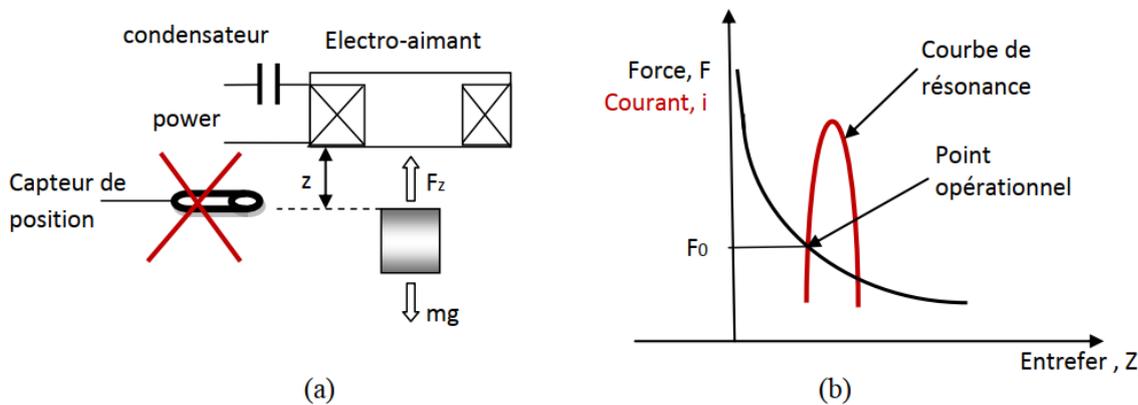
**Figure .I.9** : Grenouille en lévitation.

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 soient manifestés.

Déplus, 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 [2][4].

**I.7.7-Lévitation magnétique utilisant un circuit LC**

Un capteur extérieur est utilisé pour mesurer la distance ou l'entrefer entre le corps suspendu et l'électroaimant, contrairement à la méthode implicite, dans cette dernière méthode, 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 (Fig.I.10.a). Le point de fonctionnement doit coïncider avec la pente ascendante de la courbe de résonance du courant afin de pouvoir l'attirer (Fig. I.10.b) [2].



a) Configuration physique.

b) Caractéristique (Force- distance).

**Figure. I.10 :** Principe de la lévitation électromagnétique à circuit résonant. [2]

**I.8-Domains d'utilisation des suspensions magnétiques**

Les suspensions magnétiques sont utilisées dans des domaines où les systèmes mécaniques atteignent leurs limites:

**-Domaine des hautes vitesses :**

La vitesse de rotation d'un roulement à billes est limitée sous peine de problèmes mécaniques et d'échauffements.

L'absence de contact dans un palier magnétique permet d'atteindre des vitesses bien supérieures. La limite est définie par la rupture mécanique du rotor du fait de la force centrifuge engendrée par la rotation. Une suspension mécanique pose un problème d'équilibrage à haute vitesse. Mécaniquement, il est impossible de faire coïncider exactement l'axe de rotation d'un palier avec l'axe d'inertie de la partie tournante. Il en résulte un balourd qui, même s'il est très faible, peut entraîner des vibrations importantes.

L'utilisation de paliers magnétiques permet de s'affranchir de tels problèmes d'équilibrage car l'axe d'inertie peut s'aligner sur l'axe de rotation [9].

## **-Domaine des atmosphères spécifiques ou du vide :**

Dans ce cas, il n'est absolument pas possible d'utiliser un gaz ou un lubrifiant pour permettre le fonctionnement d'un palier. Les roulements à billes lubrifiés ou les paliers hydrodynamiques sont donc prohibés [9].

## **-Domaine dans lequel les frottements doivent être minimisés :**

Les frottements sont totalement inexistantes sur une suspension entièrement magnétique car il n'y a aucun contact entre les pièces mobiles et les pièces statiques. Cependant, des variations de champ vues par la pièce en rotation peuvent donner naissance à des pertes par courants induits et des pertes par hystérésis [5].

## **-Domaine dans lequel l'usure doit être minimisée :**

Comme il n'y a aucun contact entre la partie fixe et la partie mobile, la durée de vie du palier est illimitée (sauf accident). Cet avantage peut être appréciable dans un dispositif tel qu'un satellite où les paliers d'un système tournant ne peuvent être remplacés régulièrement. L'absence d'usure est aussi intéressante en atmosphère spécifique car elle n'engendre aucune poussière [5].

## **-Domaine dans lequel une grande précision est requise :**

Un palier magnétique actif, contrôlé par un asservissement permet de positionner la partie mobile avec beaucoup de précision. Celle-ci dépend essentiellement de la qualité des capteurs utilisés et n'est donc pas sujette aux modifications des contraintes extérieures [9].

## **I.9- Applications des suspensions magnétiques**

Les lévitations magnétiques sont utilisées dans des domaines très différents. Elles peuvent supporter des pièces d'à peine quelques grammes telles que des disques de compteur électrique jusqu'à des machines de plusieurs tonnes telles que certains compresseurs. Les parties sustentées peuvent être immobiles (télescopes) ou soumises à des vitesses élevées (centrifugeuses, turbines...). Les principales applications sont les suivantes :

**- Le spatial :** Une partie des recherches effectuées dans le domaine des paliers magnétiques a été menée par des entreprises telles que l'Aérospatiale en France ou la NASA aux Etats-Unis. La principale application des suspensions magnétiques dans le spatial concerne la mise en œuvre des volants d'inertie permettant de stabiliser un satellite ou bien d'emmagasiner de l'énergie. Les paliers magnétiques sont aussi utilisés dans certains dispositifs de prise de vue [5].

**- L'usinage :** Les suspensions magnétiques permettent d'équiper des broches d'usinage et de faire tourner des outils de coupe (rectification et fraisage) à des vitesses de rotation difficilement accessibles avec des broches à roulements plus conventionnelles (figure I.11).

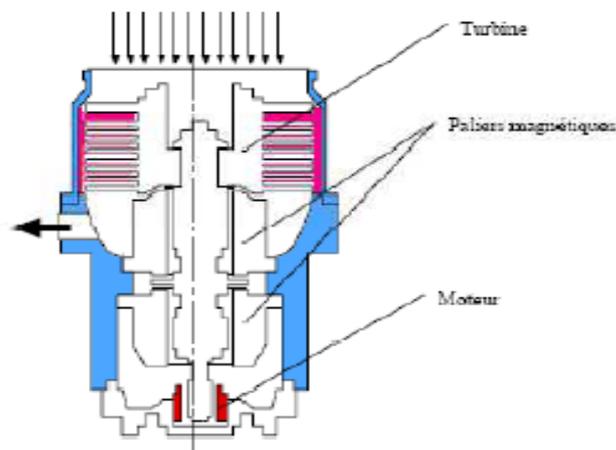
De telles broches tournent à des vitesses allant de 15.000 à 150.000 tr/mn pour des puissances respectives de 50 kW à quelques centaines de Watt (source S2M). En dehors de leurs performances dans le domaine des vitesses élevées les paliers magnétiques apportent une grande précision en rotation lors de l'usinage [6].



**Figure I.11** : Fraise sur paliers magnétiques.

- **Les turbocompresseurs** : Ce sont souvent des machines de grande puissance : il existe des 7.000 tr/mn. Ils sont utilisés dans l'industrie du gaz, en production, transport et stockage ainsi qu'en pétrochimie. Les paliers magnétiques actifs apportent une solution aux problèmes de vibration, d'alignement, de joint et de maintenance [5].
- **Les turboexpanders** : Ce sont des machines rapides permettant la détente des gaz. Ils sont utilisés dans des opérations de traitement, de refroidissement, de purification, de séparation ou de liquéfaction. Ces machines sont généralement puissantes et rapides : de 10.000 à 50.000 tr/mn et quelques centaines de KW ou plusieurs MW [5].
- **Les pompes turbo moléculaires** : Elles permettent d'obtenir un vide très poussé grâce à une turbine tournant à grande vitesse (Figure I.12).

Le vide obtenu peut atteindre 10<sup>-10</sup> mbar. Les paliers magnétiques sont employés dans les pompes turbo moléculaires car ils permettent d'atteindre des vitesses élevées (100.000 tr/mn) sans polluer l'atmosphère environnante avec un lubrifiant. La suspension peut être active ou partiellement passive : les deux solutions existent industriellement [5].



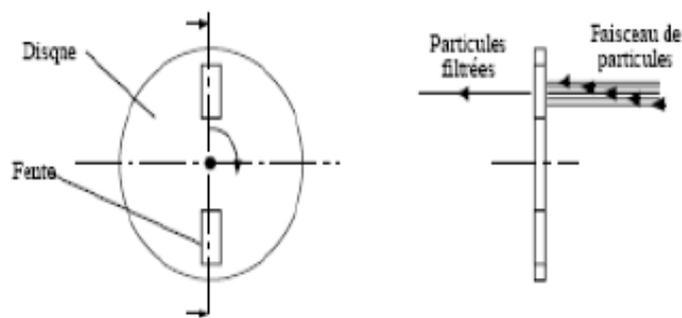
**Figure I.12 :** Pompe turbo moléculaire sur suspension magnétique (d'après Alcatel DTV)

- **Les centrifugeuses :** Elles permettent grâce à leur vitesse de rotation extrêmement élevée de séparer des substances de densités différentes.

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 tout en étant compatible avec le milieu environnant. Ce sont essentiellement des paliers passifs qui sont utilisés pour cette application [5].

- **Les "choppers" de particules :** Ils sont utilisés dans les Laboratoires de Physique pour filtrer des particules d'énergies différentes. Ils sont constitués d'un disque muni de fentes tournant à grande vitesse (Figure I.13).

Selon la largeur des fentes, l'épaisseur du disque et la vitesse de rotation, le "chopper" ne laisse passer que des particules ayant une énergie donnée. Les particules trop lentes ou trop rapides sont déviées par les bords des fentes ou les autres disques [5].



**Figure I.13:** Choppers de particules

**-Les volants d'inertie :** Ils permettent de stocker de l'énergie sous forme d'énergie cinétique (Figure I.14). Ils sont constitués d'un rotor à grande inertie, d'un moteur et de paliers permettant la rotation à grande vitesse de l'ensemble. Le moteur permet d'accélérer ou de ralentir le rotor et donc de stocker ou restituer l'énergie. Les paliers doivent permettre la rotation de l'ensemble avec le moins de pertes possible et sans usure prématurée.

Des sociétés américaines proposent des systèmes de stockage de ce type. Ce procédé est propre (pas de pollution chimique), à une grande durée de vie (pas d'usure) n'est pas sensible à la température, et permet dans certains cas d'offrir un coût inférieur à celui des batteries [6].



**Figure I.14 :** Stockage d'énergie par volant d'inertie (Active Power)

### **-Autre application des suspensions magnétiques :**

Les microsystemes, tel qu'on l'entend en Europe, sont des systèmes intégrant des capteurs, des actionneurs ainsi que des fonctions de traitement de l'information (l'acronyme MST est aussi quelque fois employé). Le terme 'MEMS' (micro electro mechanical systems) est employé préférentiellement aux Etats-Unis. Les termes 'micro machines' ou mécatroniques sont également employés au Japon [11,12].

La multidisciplinarité est une caractéristique forte des activités du développement des microsystemes. Aujourd'hui, la quasi-totalité des disciplines scientifiques ou techniques est impliquée : électronique, mécanique, science des matériaux, robotique, optique, optoélectronique télécommunication, thermique, fluide, chimie, médecine, biologie...etc.

L'intérêt grandissant pour le microsysteme en termes de recherche et de marché réside dans le fait qu'au-delà de la diminution des tailles et des coûts de fabrication des dispositifs, la miniaturisation permet de multiplier les fonctionnalités intégrées aux systèmes et de répondre à de nouveaux besoins [12].

Les microsystèmes offrent donc potentiellement des applications dans des domaines très variés. Cependant ils ne s'imposeront à terme que dans les domaines où leurs caractéristiques sont de réels avantages : dimensions micrométriques (encombrement restreint, sensibilité accrue, fiabilité mécanique, basse consommation...), possibilité de fabrication collective (bas coût, répétitivité des performances ...), intégration avec les circuits intégrés. Les inconvénients actuels des microsystèmes sont l'inaccessibilité pour le contrôle pour la réparation, la fiabilité à long terme et les problèmes de mise en boîtier et d'encapsulation. Prenons l'exemple de domaine biomédical, qui est l'un des domaines où l'intérêt pour les microsystèmes est maximal du fait de la biocompatibilité de silicium de la taille des microsystèmes. Il est envisageable de créer des systèmes de capteurs et d'actionneurs qui seraient implantés à l'intérieur du corps humain et éventuellement interroger à distance [11] [12].

### **a -Micromoteur à aimants permanents :**

Le moteur fit l'objet d'une étude de modélisation. Finalement, sa suspension lui permet d'opérer en toute position. Malgré les piètres propriétés magnétiques de l'aimant NdFeB utilisé, ce moteur peut développer un couple de 50  $\mu Nm$ , pour un courant maximal de 5 A. Un capteur optique de position se trouve sur la face opposée du rotor. Ce moteur pas à pas ne peut démarrer tout seul. Alimenté par 1,5 A, il atteint 8 000 tr/min [13].

### **b- Les micro-actionneurs :**

Les technologies actuelles permettent de fabriquer des micro-aimants et de construire des microsystèmes magnétiques. Les déplacements sont alors possibles. Ces micro-actionneurs sont en phase de développement. Bien que des actionneurs basés sur des principes physiques différents existent, les actionneurs magnétiques présentent des avantages tels que des valeurs plus importantes des déplacements [10] [13].

### **c- La micro-robotique :**

Certaines applications robotiques nécessitent une taille très petite de l'élément à asservir. Actuellement, des études et des projets se font sur la réalisation d'insectes artificiels (la libellule par exemple) pour des buts militaires et d'espionnage, l'élément essentiel pour réussir cette réalisation est d'asservir la trajectoire d'une (ou plusieurs) petite bille aimantée attachée à des ailes, et en interaction avec des petits électroaimants. Un autre domaine figure dans l'utilisation des paliers magnétiques dans les VADs (Ventricular Assist Devices) pour les cœurs artificiels, c'est une application très intéressante qui utilise la suspension magnétique dans de pompes centrifugeuses pour remplacer totalement le cœur humain dans le cas de défaillance [10].

### **d- Lévitation de billes de latex :**

Une méthode de transport et de micro- positionnement de microparticules sans contact (en lévitation) a été présentée par Yellen. Le dispositif est constitué de patterns de cobalt d'une épaisseur de 70 nm,

déposés au-dessus d'un substrat de silicium ou de verre. En l'absence du champ magnétique externe, les nanoparticules magnétiques présentes dans le fluide, exercent une force de répulsion sur des billes de latex et les maintiennent ainsi en lévitation au-dessus de la surface du dispositif. Lorsque le champ magnétique externe est activé, les nanoparticules sont attirées vers les positions dans lesquelles les gradients du champ magnétique sont plus intenses appelés « pièges magnétiques ». Les pièges magnétiques peuvent être déplacés dynamiquement en changeant l'orientation du champ magnétique externe par rapport à l'aimantation des micro-aimants du dispositif. Ainsi chaque bille de latex se déplace en suivant son piège magnétique [13].

### I. 10-Avantages et inconvénients de la lévitation magnétique

#### **-Avantages de la lévitation magnétique :**

\*Applicabilité multiple : La lévitation magnétique peut être utilisée dans divers environnements, notamment dans l'air, le vide et même dans des environnements aqueux.

\*Facilité de mise en œuvre : Sa mise en place est relativement simple, ce qui facilite son utilisation dans différents contextes.

#### **-Inconvénients de la lévitation magnétique :**

\*Lévitation asservie : La lévitation magnétique nécessite souvent un contrôle continu pour maintenir l'objet en lévitation, ce qui peut être contraignant.

\*Limitation aux objets aimantables : Elle est restreinte aux objets qui peuvent être magnétisés, ce qui limite son application à certains matériaux.

\*Système non linéaire : Le système de lévitation magnétique est souvent non linéaire, ce qui peut compliquer sa modélisation et son contrôle.

\*Coût relativement bas : Malgré ses avantages, la lévitation magnétique peut nécessiter des investissements significatifs, bien que son coût soit généralement inférieur à d'autres technologies de lévitation.

### I.11-CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les définitions de lévitation magnétique et de voir la viabilité du théorème d'Earnshaw. Différentes classifications de la lévitation magnétique (actifs, passifs, etc...), ainsi que le domaine d'utilisation et applications de ces derniers. Nous avons terminé ce chapitre par les avantages et les inconvénients la lévitation magnétique.

## *Chapitre II*

### *Les trains à lévitation magnétique*

### II.1-Introduction

Aujourd'hui, le respect et la protection de la planète deviennent des enjeux de plus en plus importants de notre société. C'est pourquoi les pays tendent à devenir indépendants des énergies.

Nous avons donc créé un domaine (qui symbolise un train) et qui peut être comparé à un TGV (Train à Grande Vitesse).

Très prometteur tandis que le train appelé Maglev est déjà en service, c'est un train à qui utilise les forces magnétiques pour assurer sa sustentation (lévitation) et pour avancer. Il en résulte des vitesses incroyables ce qui est dû à l'absence de frottements avec l'air ou le sol.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les types de ce train, principe et technologies et les projets de développement aussi ses avantages et inconvénients.

### II.2-Historique et description

Le désir d'augmenter la vitesse des engins de transport collectifs terrestres, notamment pour concurrencer l'avion sur les liaisons entre les cœurs de villes, a suscité de nombreuses recherches. On a longtemps considéré que la vitesse sur rail connaîtrait une limite critique impossible à dépasser sur roues, en particulier pour des problèmes d'adhérence. Cependant les vitesses de 350 Km/h sont désormais faisables sur voies traditionnelles.

Quoi qu'il en soit, la recherche de vitesse s'est orientée, à la fois vers de nouveaux modes de sustentation (Lévitation) et vers de nouveaux modes de propulsion. Les nouveaux modes de sustentation tendaient à supprimer le contact entre le véhicule et son support. On a eu recours à de nouvelles techniques [14].

### II.3-Train à lévitation magnétique

Un train à sustentation magnétique ou Maglev aussi appelé JR-Maglev, c'est le train le plus rapide du monde développé depuis 1962 par la compagnie ferroviaire Japan Railway. Il utilise les forces magnétiques pour se déplacer et le phénomène de sustentation électromagnétique et n'est donc pas en contact avec des rails, contrairement aux trains classiques.

Ce procédé permet de supprimer la résistance au roulement et d'atteindre des vitesses plus élevées : le record est de 603 km/h obtenu en avril 2015[15].

Il existe actuellement deux types de trains à grande vitesse à sustentation magnétique :

— un train à lévitation électromagnétique (EMS) dans lequel le train lévite par attraction grâce à des aimants (Transrapid développé en Allemagne) ; Utilise des électroaimants sous forme de bobines.

— un train à lévitation électrodynamique (EDS) dans lequel le train lévite par répulsion grâce aux courants de Foucault induits par le déplacement du train (SCMaglev développé au Japon) ; Utilise la supraconductivité pour faire léviter un train.



Figure II.1 : Transrapid



Figure II.2 :SCMaglev

### II.3.1-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. [16]



Figure II.3 : schéma Transrapid

### II.3.2-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 [16].



**Figure II.4:** prototype d'un Maglev

### II.4-Les trains à lévitation électromagnétique (EMS)

Le premier travail remarquable a été proposé pour la première fois en 1912, par Graeminger [17], avec son fameux système de transport de lettres, celui-ci est composé d'un électroaimant sous forme de U suspendu au-dessous d'un rail ferromagnétique, une distance est maintenue constante entre les deux parties à l'aide des capteurs mécaniques qui agissent sur des résistances formant des potentiomètres de commandes

Une autre configuration modifiée en se basant sur le principe de variation de la reluctance magnétique a été réalisée aussi par Graeminger [2].

Vingt-cinq ans après, Kemper a réalisé le premier prototype de suspension électromagnétique qui a soulevé 210 kilogrammes à un entrefer de 15 millimètres avec une puissance de 270 W.

Un capteur de déplacement capacitif a été utilisé pour mesurer l'entrefer. Des valves thermoïoniques ont été aussi utilisées pour pouvoir piloter l'électro-aimant [18].

Le travail de Kemper a été jugé intéressant pour l'utilisation dans le transport (l'idée d'un train sans roues), mais le poids des contrôleurs de puissance et les valves thermoïoniques employés pour mettre en application le système électromagnétique de Kemper ont été vraiment un très grand obstacle. A cette époque, l'utilisation des électro-aimants contrôlés a été considérée non viable [2].

Cependant, avec l'arrivée de la technologie des transistors vers les années soixante capable de manipuler des niveaux de puissance élevés, le potentiel des suspensions électromagnétiques dans le domaine de transport commence à être réaliste. Plusieurs prototypes de laboratoires ont été réalisés vers la fin des

années soixante (fin 1960- début 1970) et la plus grande réalisation à l'époque, été celle construite par le staff technique de Krauss-Maffei et à l'université de Sussex [19].



**Figure II.5:** Véhicule a suspension électromagnétique, réalisé à l'université Sussex

Après cette réussite, plusieurs universités et pays dans le monde ont dépensé beaucoup d'argent pour faire des recherches exhaustives dans ce qui été un rêve d'autrefois, le domaine des trains en lévitation. Parmi les travaux récents les plus connus, on peut citer le projet Swissmetro, un train en sustentation magnétique dans un tunnel sous vide (Figure II.6.a) [2].

Dans ce projet, les concepteurs doivent gérer le roulis, le tangage, le lacet, la hauteur et la position latérale du train. Le sixième degré de liberté correspond au déplacement du train, géré par un moteur linéaire. La lévitation du Swissmetro est complexe car, à part le déplacement du train, tous les degrés de libertés sont instables. Plus concrètement, sans un contrôle très précis de tous les électroaimants servant à sa sustentation, le train à une forte tendance naturelle à venir se coller à son rail [20].



**Figure II.6:** Train à suspension magnétique

a) Train Swissmetro

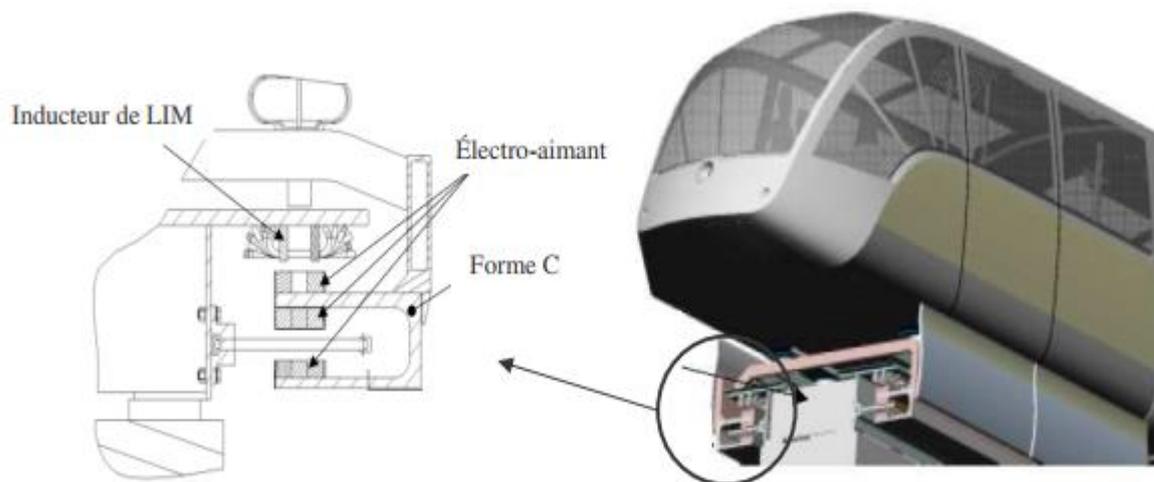
b) Transrapid

Il n'y a pas que le Swissmetro qui utilise le principe de lévitation électromagnétique, le Transrapid aussi en fait partie (Figure II.6.b). Il est lancé sur un seul rail (train monorail). La mise au point de l'actuel Transrapid débuta en 1969. Sa piste d'essai se trouve à Lathen, en Allemagne, et elle date de 1987. La seule réalisation commerciale du Transrapid est à l'heure actuelle la ligne de 30 kilomètres entre Shanghai et son aéroport international de Pu Dong, inaugurée en 2002 et dont le premier trajet commercial a eu lieu en mars 2004. En 2008 et à nos jours, presque la majorité des projets Transrapid ont été abandonné par le gouvernement allemand à cause de leurs coût prohibitif [3].

### II.5- Le système de Maglev basé sur la suspension magnétique (EMS)

Une autre architecture [25] figure (II.7) de Maglev est proposée qui assure donc :

- La lévitation magnétique ;
- La propulsion ;
- Le guidage ;



**Figure II.7:** Véhicule TRANSRAPID [25]

Ce type de système est composé de :

- Electro-aimants : Ils sont commandés électroniquement, et sont placés sur les deux côtés du véhicule.
- Chariot solidaire au véhicule : ce chariot est maintenu en sustentation grâce à des électroaimants qui les portes.
- La partie du circuit magnétique qui solidaire au rail de guidage (armature plat) assurant la fermeture du flux.
- Le chariot comporte plusieurs modules assurant la lévitation, le guidage, la propulsion.
- Chaque module est compose de quatre électro-aimants. [25]

#### II.5.1-Principe de fonctionnement

Au repos, quand les électro-aimants ne sont pas excités le chariot qui porte le véhicule repose sur le rail. Par contre il est soulevé après excitation des Électro-aimants.

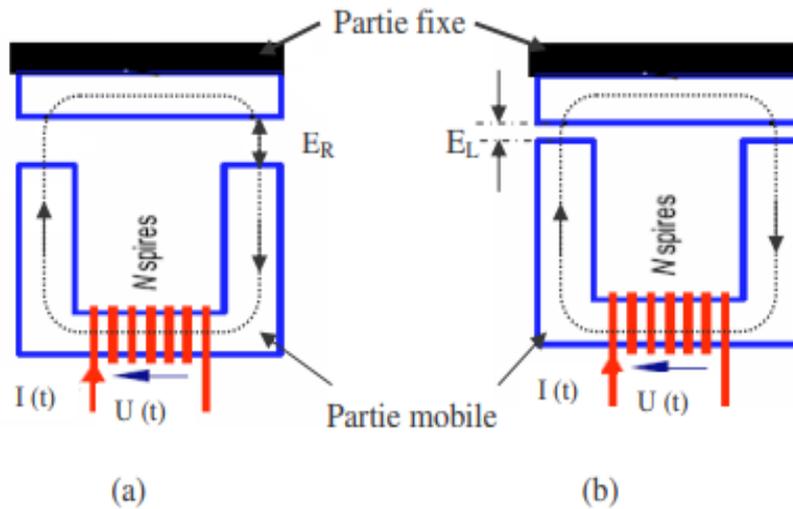


Figure II.8: Position de l'Électro-aimant

(a) sans excitation

(b) avec excitation

La lévitation du chariot est traduite par la valeur de l'entrefer entre le corps principal de l'électro-aimant et le circuit de fermeture de flux magnétique.

Cet entrefer de lévitation ( $E_L$ ) qui est moins important que celui correspondant au repos ( $E_R$ ) est de l'ordre de 10mm.

Ont représenté un système de sustentation magnétique, appliquée à la traction électrique en allemand (le Transrapid) figure (II-9).

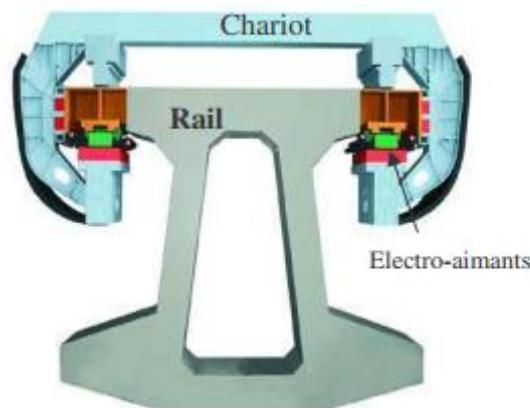


Figure II.9 : Système de suspension magnétique (Le Transrapid).

### II.6-Les trains à lévitation électrodynamique (EDS)

Cette approche de lévitation magnétique est fondée 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.[2]

Ce phénomène est appelé « lévitation électrodynamique ou plus souvent EDL (electrodynamic levitation)»

Les caractéristiques principales de la lévitation électrodynamique ont été expliquées après confirmation par des résultats expérimentaux [21]. 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.[19] [3] [21].

À grande 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.

Le rapport « Lévitation/guidage » est proportionnel au rapport de la composante parallèle à la composante normale du champ magnétique. [19] [3].

### **II.7-Le système de Maglev basé sur la répulsion Électrodynamique (EDS)**

#### **II.7.1-Principe de fonctionnement**

La répulsion Électrodynamique est basée sur la répulsion entre les éléments embarqués sur le train et des plaques conductrices (ou des bobines court-circuitées) situées sur la voie de guidage figure (II .10), l'avantage de ces bobines est de réduire la puissance dissipée.

L'entrefer (la distance sol train) peut être égale 10 cm si les aimants supraconducteurs sont suffisamment puissants.

Pour bien expliquer le principe de Maglev, on y décrit trois principes fondamentaux qui assurent la fonction de Maglev.

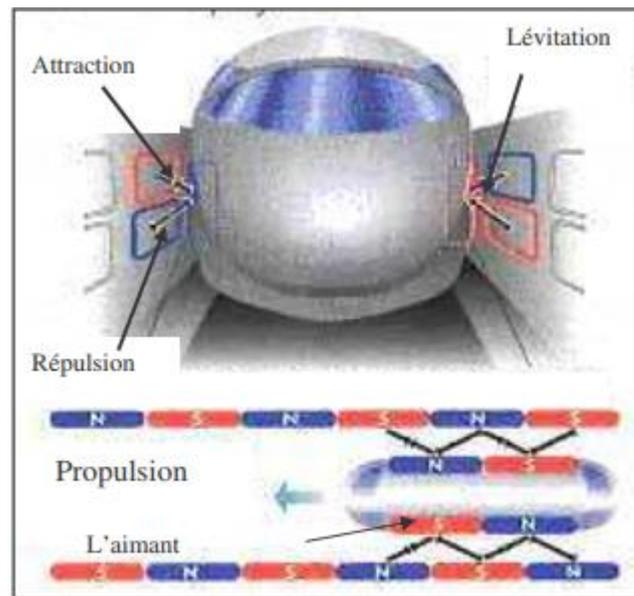


Figure II.10: Principe de fonctionnements de Maglev.

II.7.2-Technique de la lévitation

Les enroulements en forme de huit ont la particularité de créer deux pôles Nord et sud. Ces polarités sont corés par les courants induits qui y circulant lors du passage de l'aimant supraconducteur.

La lévitation est assurée par un doublet effet d'interaction entre l'aimant supraconducteur et l'enroulement " 8 ". Il s'agit d'une répulsion et une attraction verticale simultanément figure (II.11), cette double action verticale permet de maintenir le véhicule en position d'Équilibre de lévitation. [22]

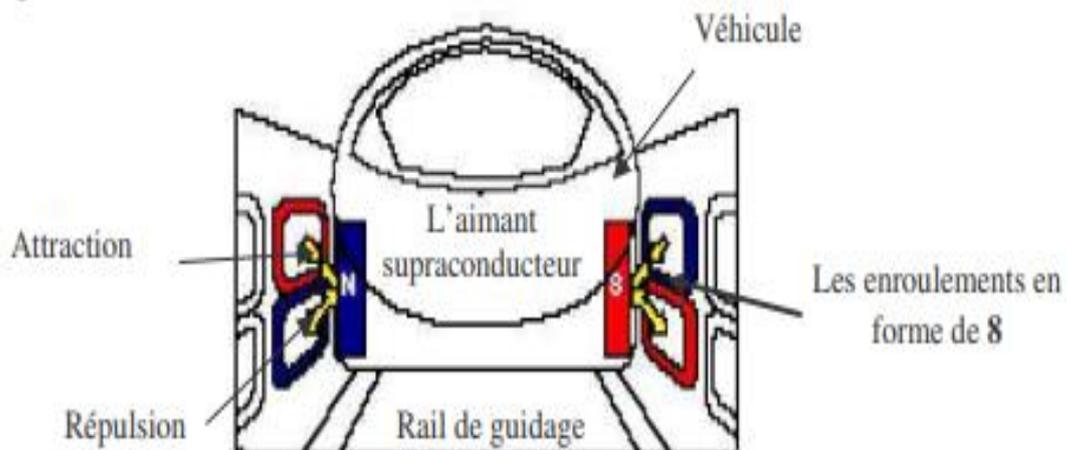


Figure II-11: Technique de lévitation dans les systèmes de répulsion Électrodynamique

Phase A

À l'état d'équilibre ; les deux flux produits par le circuit huit sont égaux, et la somme de ces flux est nulle, donc Force d'attraction = Force de répulsion, et maintenir le véhicule en lévitation stable à distance de 10 cm [22].

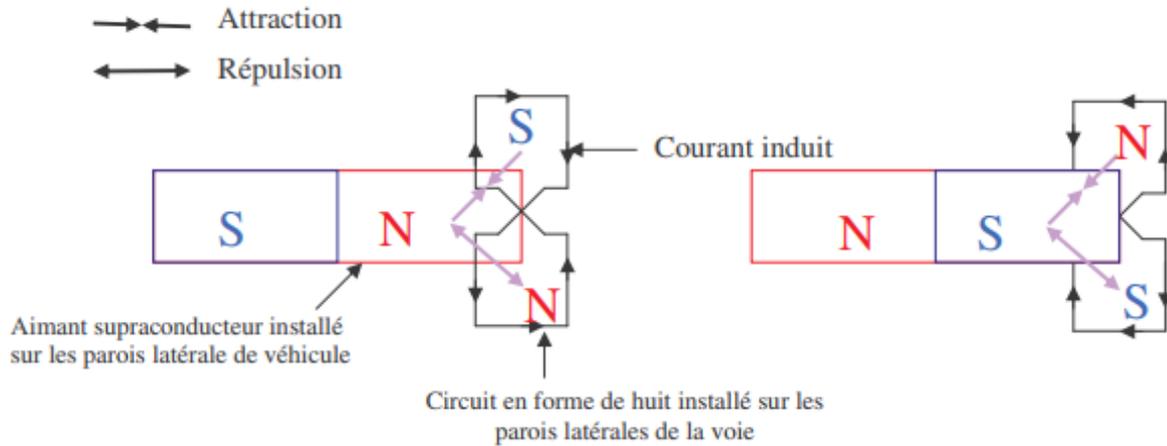


Figure II.12: Technique de lévitation dans les systèmes EDS, cas de l'équilibre.

Phase B

Lorsque le véhicule soumis à la force de pesanteur, il faut noter que toujours le chariot de véhicule cherche à la basse position de la position d'équilibre.

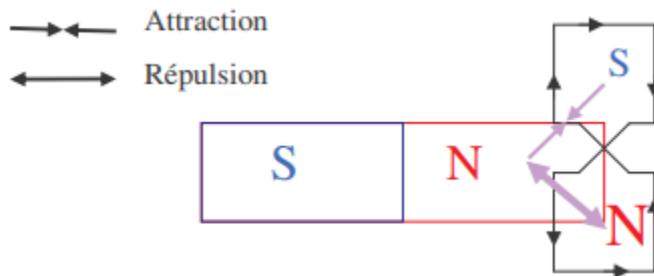


Figure II.13: Technique de lévitation dans les systèmes EDS Cas de décalage le véhicule vers le bas.

II.7.3-La propulsion du véhicule

Les enroulements de propulsion situés sur les parois latérales des deux côtés de la voie de guidage figure (II-14) sont alimentées par courant alternatif triphasé, créant un champ magnétique glissant sur la voie de guidage. Une force répulsive et une force d'attraction induite entre les aimants supraconducteurs sont responsables de la propulsion du véhicule.

Les aimants de supraconducteurs à bord, sont attirés et poussés par le champ glissant pour propulser le véhicule de Maglev. Il s'agit d'un fonctionnement similaire à celui du LSM [23].

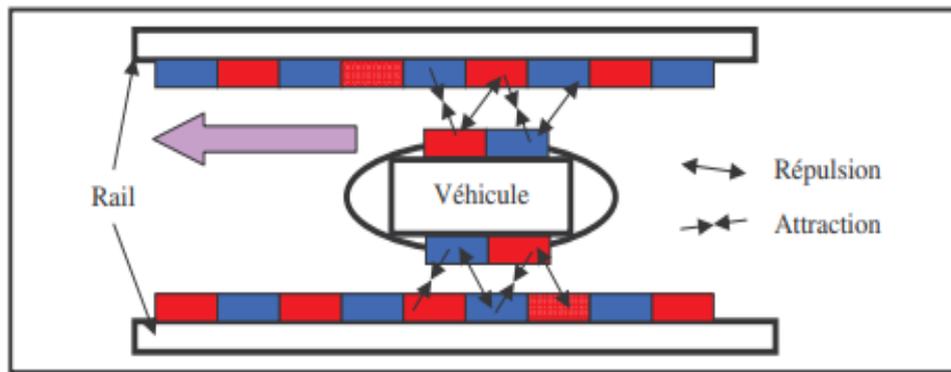


Figure II.14: Technique de propulsion dans les systèmes de répulsion électrodynamique.

II.7.4- Le guidage latéral

L'interaction de l'aimant supraconducteur avec les enroulements en forme de '8' se traduit aussi par une action latérale qui assure le guidage du véhicule le long de la voie.

Cette force de guidage est produite par la composante horizontale de l'induction magnétique résultant de la réaction des enroulements [23].

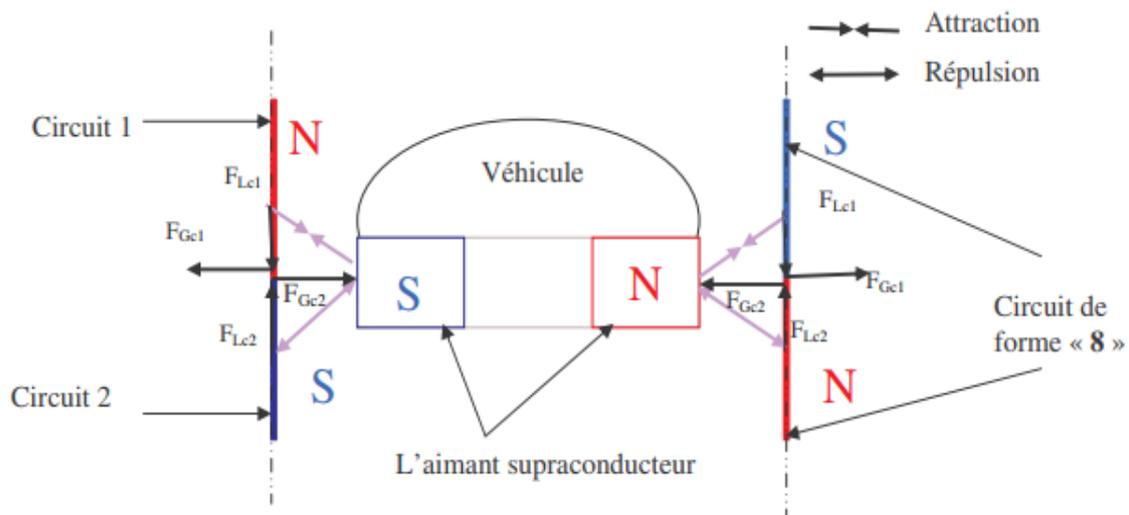


Figure II.15: Technique de guidage latéral dans les systèmes de répulsion électrodynamique.

II.8-Comparaissant entre l'EDS et l'EMS

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 Transrapid, Les Swissmetro...etc., qui utilisent le principe de lévitation attractive.

Depuis ce qu'on a vu sur les deux modèles on peut imaginer leurs configurations les plus simples, comme elles sont présentées sur la (Figure II-16.a) et la (Figure II-16.b) [3] [21].

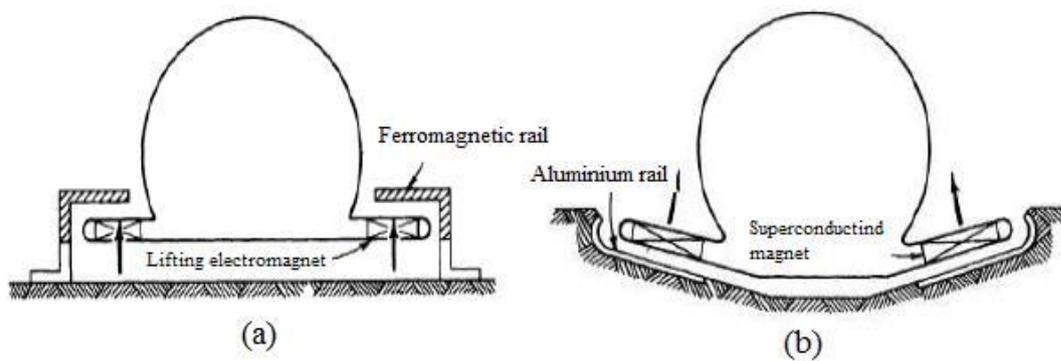


Figure II.16: Les systèmes de train à lévitation magnétique

a) EML système (forces attractives)

b) EDL (forces répulsives)

Au Japon, au début des années 1970, Y. Kyotani - du laboratoire de recherche de la Japanese National Railway (JNR), a présenté un prototype (EDL) de grande importance, le ML100, composé de quatre aimants supraconducteurs (Figure II-17).

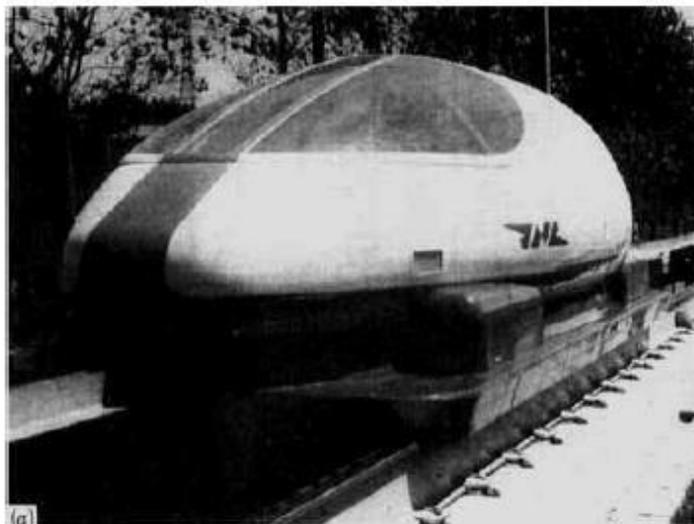


Figure II.17: Le train Maglev ML100

Après le ML100 et juste vers la fin des années soixante-dix, le JNR a mis au point le ML500, un véhicule qui a atteint un record mondial de 517 km/h sur 7 km de piste à Miyazaki, dans la Préfecture de Kyushu dans le sud du Japon. La voie de guidage est en forme de "T" inversé.

Plusieurs véhicules ont été réalisés depuis à ce jour, en jouant sur la forme (des prototypes en forme de U réalisés en 1982 atteignant les 305 km/h), l'amélioration des supraconducteurs, leurs dispositions,....etc. [3] [19].

### II.9-Avantages des trains à lévitation magnétique

**Vitesses de pointe et de croisière plus élevées:** Les trains à lévitation magnétique peuvent atteindre des vitesses beaucoup plus élevées que les trains conventionnels. Cela est possible car il n'y a pas de contact direct entre les roues et les rails, réduisant ainsi la friction et permettant des performances supérieures.

**Meilleures accélérations et relances:** En raison de l'absence de frottement mécanique entre les roues et les rails, les trains Maglev peuvent accélérer et ralentir de manière plus efficace. Cela permet des déplacements plus rapides et des temps de trajet plus courts.

**Franchissement de pentes plus fortes:** Les trains Maglev peuvent gravir des pentes plus abruptes par rapport aux trains conventionnels, ce qui réduit la nécessité de construire des tranchées profondes ou des ouvrages d'art coûteux. Cela peut entraîner des économies importantes lors de la construction de l'infrastructure ferroviaire.

**Franchissement de courbes plus importantes:** Les trains Maglev peuvent négocier des courbes plus serrées que les trains traditionnels, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la conception des itinéraires. Cela peut être particulièrement avantageux dans les zones urbaines où l'espace est limité.

**Risque presque nul de déraillement:** Étant donné que les trains Maglev ne reposent pas sur des roues qui peuvent dérailler, le risque de déraillement est considérablement réduit. Cela améliore la sécurité globale du système, en particulier dans des conditions météorologiques extrêmes ou sur des terrains difficiles.

**Meilleur rendement énergétique sur de longues distances:** Les trains Maglev peuvent offrir un rendement énergétique supérieur sur de longues distances par rapport aux trains conventionnels, en raison de la réduction de la friction et de l'efficacité accrue de la lévitation magnétique.

### II.10- Inconvénients des trains à lévitation magnétique

**Coût élevé de construction des voies:** Les systèmes de lévitation magnétique nécessitent des infrastructures spécifiques, notamment des voies équipées de dispositifs magnétiques. La mise en place de ces infrastructures peut être coûteuse, en particulier dans le cas des systèmes à sustentation électrodynamique.

**Difficulté de conception des aiguillages:** La conception d'aiguillages pour les trains Maglev est un défi technique. La plupart des systèmes Maglev fonctionnent mieux sur des lignes droites, et la mise en place d'aiguillages complexes est difficile. Cela limite la flexibilité des itinéraires et peut nécessiter des solutions alternatives pour permettre des changements de direction.

**Incompatibilité avec les réseaux traditionnels:** Les trains à lévitation magnétique sont généralement incompatibles avec les réseaux ferroviaires traditionnels. Cela signifie qu'ils nécessitent des infrastructures distinctes et ne peuvent pas partager les mêmes voies, ce qui peut entraîner des problèmes d'intégration et de connectivité avec les réseaux ferroviaires existants.

**Adaptation limitée au fret lourd:** Les trains Maglev sont généralement conçus pour le transport de passagers et ne sont pas aussi adaptés au transport de fret lourd. Leur conception axée sur la lévitation et la

rapidité peut rendre difficile le transport efficace de marchandises volumineuses et lourdes, ce qui limite leur utilisation dans le domaine du transport de marchandises.

### **II.11-Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre un état de l'art de la lévitation magnétique, et les différents types de train lévitation magnétique ou de suspension magnétique, présentant quelques réalisations, les avantages et les inconvénients vis-à-vis de la stabilité, du coût...etc.

Par la suite on a vu les différents avantages de ces trains; déplacement à très grande vitesses (ce qui raccourcit la durée des trajets), ils n'usent pas les voies (pas de contact direct). Les contraintes des trains sur rails (contact pantographe-caténaire, adhérence, freinage, signalisation).

## *Chapitre III*

### *Modélisation d'un train à lévitation magnétique*

### III.1-Introduction

La modélisation d'un problème physique repose fréquemment sur l'utilisation d'un modèle mathématique, qui se traduit par la formulation d'équations. Ce modèle est élaboré en se basant sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices. Dans le domaine de l'électromagnétisme, les équations de Maxwell sont couramment employées, accompagnées de lois de comportement pour prendre en considération les propriétés physiques des matériaux.

Une fois le modèle mathématique établi, il convient de l'exploiter pour calculer les différentes grandeurs physiques. En électromagnétisme, les équations fondamentales décrivant les grandeurs électriques et magnétiques sont définies par les équations de Maxwell. La résolution directe de ce système, comprenant des équations différentielles, s'avère généralement complexe. Ainsi, on recourt à des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis pour approximer au mieux la solution exacte du modèle mathématique.

### III.2- Equations de Maxwell et lois de comportement des milieux

Les équations de Maxwell utilisées dans tous les phénomènes électromagnétiques, dans ce chapitre on les accepte sans démonstration. Leur forme générale est comme suit

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (\text{équation de Maxwell-Faraday}). \quad (\text{III-1})$$

$$\text{Div}\vec{B} = 0 \quad (\text{équation de conservation de flux}) \quad (\text{III-2})$$

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (\text{équation de Maxwell-Ampère}) \quad (\text{III-3})$$

Le terme  $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$  représente le courant de déplacement. Il est généralement négligeable dans les cas quasi statiques des dispositifs de l'électrotechnique.

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (\text{équation de Maxwell Gauss}) \quad (\text{III-4})$$

Avec:

$\vec{E}$  : Champ électrique [v/m]

$\vec{B}$  : Induction magnétique [T]

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m]

$\vec{D}$  : Induction électrique [A.s/m<sup>2</sup>]

$\rho$  : Densité de charge volumique [c/m<sup>3</sup>]

$\vec{j}$  : Densité de courant surfacique [ $A/m^2$ ], elle est donnée par :

$$\vec{j} = \vec{j}_c + \vec{j}_d \quad (III-5)$$

$\vec{j}_d$  : La densité du courant de déplacement.

$\vec{j}_c$  : la densité du courant de conduction électrique induit ou inducteur donnée par:

$$\vec{j}_c = \vec{j}_s + \vec{j}_{IND} \quad (III-6)$$

$\vec{j}_s$  : est la densité de courant source et  $\vec{j}_{IND}$  est la densité de courant résultant de phénomène induit.

Les cinq vecteurs précédents sont liées entre eux par leurs milieux (conductivité électrique, perméabilité magnétique, etc.) à travers les équations exprimant les lois du comportement du milieu.

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{Loi d'ohm}) \quad (III-7)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{Relation magnétique}) \quad (III-8)$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{Relation diélectrique}) \quad (III-9)$$

$$\mu = \mu_0 \epsilon_r \quad (III-10)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (III-11)$$

Avec:

$\mu_0$  : Perméabilité du vide

$\mu_r$  : Perméabilité relative

$\epsilon_0$  : Permittivité du vide

$\epsilon_r$  : Permittivité relative

[26] [27] [28]

### III.3- Conditions de passage entre deux milieux différents

Chaque deux milieux magnétiques de propriétés physiques différentes ont leurs conditions de passage d'un milieu à l'autre, ces conditions sont traduites par les équations [26] [27].

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (III-12)$$

La discontinuité de la composante normale de l'induction magnétique

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III-13})$$

La discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent.

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{III-14})$$

$J_s$  : Densité du courant surfacique à l'interface.

La discontinuité de la composante normale de l'induction électrique due aux charges surfaciques ( $q_s$ ) si elles existent.

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{III-15})$$

$\rho_s$  : Densité de charge électrique surfacique à l'interface.

$\vec{n}$  : Le vecteur normale à la surface.

### III.4- Méthodes fondées sur le tenseur de Maxwell

Ces méthodes sont de deux types :

- avec intégration surfacique
- avec intégration volumique

#### III.4.1- Méthode du tenseur de Maxwell avec intégration surfacique (TMS)

Avec cette méthode, la force globale exercée sur le matériau est calculée sur la surface qui entoure ce dernier.

On sait que tout matériau ferromagnétique peut être remplacé par un équivalent où il n'y a plus de fer et plus d'aimant, mais seulement des densités de courant. Dans ce cas les forces sont exprimées par le produit ( $\vec{J} \times \vec{B}$ ).

A partir de cette expression de la force on peut parvenir à l'expression du tenseur de Maxwell.

On peut, avec l'aide des équations de Maxwell en régime quasi statique poser

$$\vec{F} = \vec{J} \times \mu_0 \vec{H} = \mu_0 \vec{J} \times \vec{H} = \mu_0 \text{rot} \vec{H} \times \vec{H} \quad (\text{III-16})$$

En utilisant l'équivalence mathématique

$$\text{rot} \vec{H} \times \vec{H} = \vec{H} \cdot \text{grad} \vec{H} - 1/2 \text{grad}(\vec{H} \cdot \vec{H}) \quad (\text{III-17})$$

L'équation (III-16) devient:

$$F = \mu_0 (\vec{H} \cdot \text{grad} \vec{H}) - 1/2 \mu_0 \text{grad}(\vec{H} \cdot \vec{H}) \quad (\text{III-18})$$

Qui s'écrit sous la forme matricielle:

$$F = \mu_0 \cdot \begin{bmatrix} H_x \cdot \frac{\partial H_x}{\partial x} + H_y \cdot \frac{\partial H_x}{\partial y} + H_z \cdot \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{1}{2} [H_x^2 + H_y^2 + H_z^2] \\ H_x \cdot \frac{\partial H_y}{\partial x} + H_y \cdot \frac{\partial H_y}{\partial y} + H_z \cdot \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{1}{2} [H_x^2 + H_y^2 + H_z^2] \\ H_x \cdot \frac{\partial H_z}{\partial x} + H_y \cdot \frac{\partial H_z}{\partial y} + H_z \cdot \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{1}{2} [H_x^2 + H_y^2 + H_z^2] \end{bmatrix} \quad (III-19)$$

En écrivant chaque composante de (III-19) sous forme condensée, elle devient :

$$F_i = \mu_0 \cdot \left( \sum_{xyz} H_j \cdot \frac{\partial H_i}{\partial j} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i} H^2 \right) \quad i = x, y, z, \quad j = x, y, z \quad (III-20)$$

$$H^2: \text{est donné par : } H_x^2 + H_y^2 + H_z^2$$

Par l'utilisation de symbole de KRONECKER  $\delta_{ij}$  on peut écrire:

$$F_i = \left[ \sum_j \frac{\partial}{\partial j} (H_j \cdot H_i - \frac{1}{2} \delta_{ij} H^2) - H_i \frac{\partial H_i}{\partial j} \right] \quad (III-21)$$

$$\text{Avec : } \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{Si } i \neq j \\ 1 & \text{Si } i = j \end{cases} \quad (III-22)$$

Pour un matériau non saturable le deuxième terme s'écrit:

$$\mu_0 \sum_j H_i \frac{\partial H_j}{\partial j} = \sum_j H_i \frac{\partial (\mu_0 \cdot H_j)}{\partial j} = H_i \cdot \text{div} \vec{B} \quad (III-23)$$

L'expression de la force se simplifie alors comme suit:

$$F_i = \mu_0 \sum_j \left[ \frac{\partial}{\partial j} (H_i \cdot H_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} H^2) \right] \quad (III-24)$$

La composante du tenseur de Maxwell sont définies par:

$$\tau_{ij} = \mu_0 \left( H_j \cdot H_i - \frac{1}{2} \delta_{ij} H^2 \right) \quad (III-25)$$

On peut écrire la composante  $F_i$  de la force:

$$F_i = \sum_j \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial j} = \text{div} T_i \quad (III-26)$$

Le vecteur  $T_i$  est défini par trois composantes du tenseur de maxwell tel que:

$$\tau_{ij} = \tau_{ix} \vec{i} + \tau_{iy} \vec{j} + \tau_{iz} \vec{k} \quad (III-27)$$

Le tenseur de Maxwell prend alors la forme suivante:

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (III-28)$$

La force globale qui s'exerce sur le matériau de volume  $d\Omega$  est donnée par:

$$F = \int_{\Omega} F d\Omega = \int_{\Omega} \text{div} T d\Omega \quad (III-29)$$

Par le biais du théorème de divergence, la force dans une direction  $i$  s'écrit:

$$F_i = \oint T_i \cdot n \cdot ds \quad (III-30)$$

Ou  $n$  est le vecteur normal à la surface fermée qui entoure le matériau. On remarque que par cette méthode:

- la force magnétique sur l'objet peut être déterminée si on connaît la distribution du champ magnétique et la perméabilité du milieu entourant l'objet.
- d'autre part, le fait de calculer la force à partir de la solution de la MEF, donc d'une solution approchée, le choix de la surface joue un rôle important sur la précision de calcul des forces. L'indépendance des résultats par rapport aux choix de la surface n'est donc plus vraie [27] [28].

### III.4.2- Méthode du tenseur de Maxwell avec intégration volumique

Cette méthode a l'avantage par rapport à la (TMS) de l'élimination de la surface d'intégration.

L'intégrale volumique peut donc dans certaines conditions être plus simple à mettre en œuvre par la MEF.

La force sur un nœud  $k$  d'un élément dans le maillage, est donné par:

$$F_k = - \int [B_k]^t \cdot \{\tau\} d\Omega \quad (III-31)$$

Où : concerne les éléments qui contiennent le nœud, les termes de (III-31) sont données par:

$$[B_k] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial y} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial z} \\ \frac{\partial \alpha_k}{\partial y} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial y} \\ \frac{\partial \alpha_k}{\partial z} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial z} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} \\ \frac{\partial \alpha_k}{\partial z} & \mathbf{0} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (III-32)$$

$$\tau = \begin{Bmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (III -33)$$

Ou les termes  $\tau_{ij}$  du tenseur de Maxwell sont donnés par (III-23) et  $\alpha_k$  sont les termes des fonctions d'interpolations du nœud  $k$  de l'élément considéré (élément à  $k$  nœud) On obtient ainsi, les forces sur les nœuds du maillage du matériau, les forces sur un nœud étant données par la somme de chaque contribution nodale des éléments qui contiennent le nœud.

La force globale exercée sur le matériau est donnée par la sommation de tous les nœuds de l'objet [27] [28].

### **III.5- Méthodes numériques**

Tous les modèles obtenus sont à équations aux dérivées partielles dont la résolution analytique n'est pas souvent évidente, aussi pour s'affranchir de cette difficulté des méthodes numériques ont été développées [29].

L'évolution actuelle de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères et pour dominer ces projets, l'ingénieur a besoin de modèles qui lui permettent de simuler le comportement de systèmes physiques complexes, il peut ainsi prévoir l'influence de ses décisions au moment de la conception du système [30].

Il arrive aussi d'associer une solution analytique à une méthode numérique pour réduire le temps de calcul et augmenter la précision des résultats. En effet, une solution analytique est plus précise qu'une solution numérique parce que cette dernière est une approximation de la solution réelle [29].

Les méthodes numériques passent toujours par des discrétisations des problèmes analytiques en des problèmes numérique et qu'il existe une infinité' des méthodes de discrétisation d'une équation, Nous ne pouvons jamais les énumérer mais les plus couramment utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles sont:[31]

- La méthode des différences finis,
- La méthode des volumes finis,
- La méthode des éléments finis,

#### **III.5.1-Méthode des éléments finis**

##### **- Introduction :**

C'est une méthode qui a été utilisée en premier lieu en génie civil et en mécanique et n'a trouvé sa place en génie électrique que vers les années soixante. Dans cette méthode on cherche à exprimer une formulation intégrale basée soit sur la méthode des résidus pondérés soit sur la méthode variationnelle. La méthode des éléments finis consiste à subdiviser le domaine d'étude en domaines élémentaires appelés éléments finis et à représenter l'inconnue sur chaque élément par les fonctions d'interpolation simples en

fonction des valeurs de l'inconnue en chacun des sommets de cet élément. L'inconnue devra vérifier globalement les conditions de continuité à l'interface et au passage d'un milieu à un autre.

L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle demande une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important [32].

Elle est utilisée pour les matériaux non linéaires et pour une géométrie complexe, cette dernière est constituée de :

- 1-la méthode des résidus pondérés
- 2-la méthode variationnelle

#### **A- la Méthode des résidus pondérés**

Si on prend l'exemple d'une équation différentielle de type:

$$L(\varnothing) = 0 \quad (\text{III -34})$$

Sachant que :

$\varnothing^*$  : La solution exacte

$\varnothing$  : La solution approximative

Le résidu est:

$$R = L(\varnothing) - L(\varnothing^*) \quad (\text{III -35})$$

Cette méthode donc consiste à minimiser le résidu  $R = 0$ .

#### **B- la Méthode variationnelle:**

Elle consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système à résoudre.

Pour la mise en œuvre de la méthode, il faut suivre étapes suivantes :

- le maillage (discrétisation du domaine)
- choix de la fonction d'interpolation
- choix de la fonctionnelle
- la minimisation : c'est-à-dire mettre le système sous la forme  $[k] \cdot [u] = [B]$ .
- résolution du système algébrique.
- exploitation des résultats.

#### **C- Maillage élément finis**

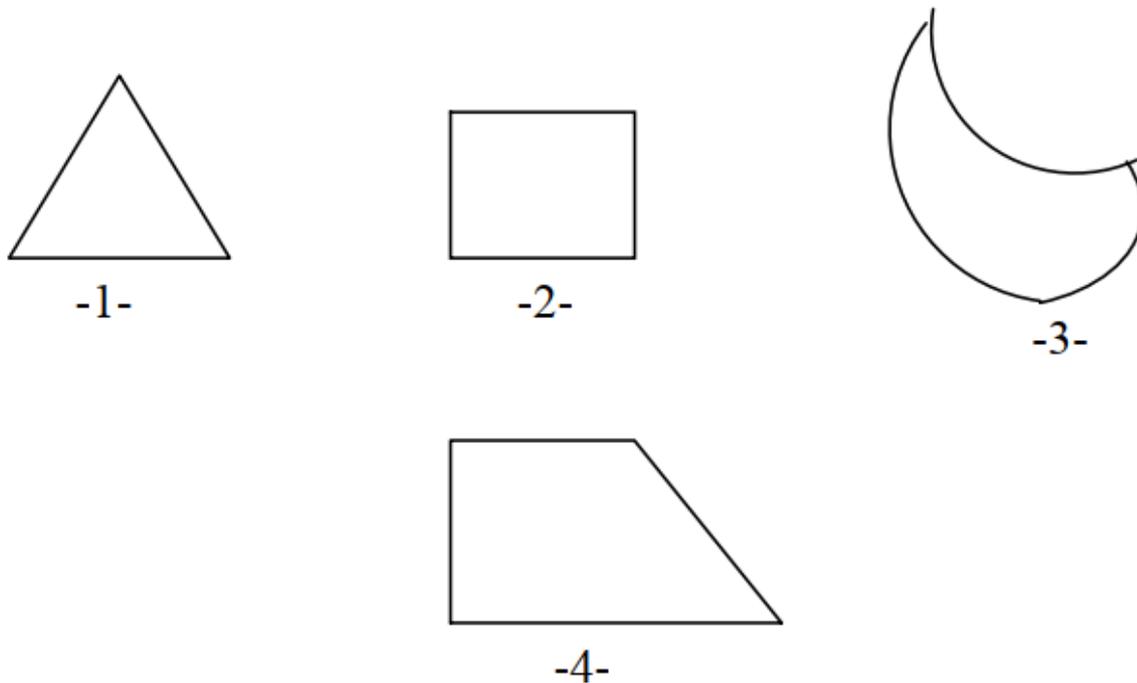
Consiste à découper la géométrie en un nombre fini du domaine (domaine élémentaires).

Il existe différents types d'éléments :

- élément linéique (1D).
- élément surfacique (2D).
- élément volumique (3D).

[27] [28].

Pour les structures en (2D) les éléments de maillage sont souvent des triangles mais il peut être aussi en d'autre forme, les formes possibles dans ce cas sont les suivantes:



**Figure III.1:** les formes possibles des éléments élémentaires en (2D).[8]

#### - Principe de la méthode :

La résolution d'un problème par la méthode des éléments finis suit le procédé suivant :

- Traduire le problème physique sous forme d'un modèle mathématique (équations aux dérivées Partielles) avec des conditions aux limites aux bords du domaine d'étude ( $\Omega$ ), nécessaires et Suffisantes pour l'unicité de la solution.
- Construire une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ses conditions aux limites : c'est la formulation intégrale du système.
- Diviser ( $\Omega$ ) en sous domaines (maillage), les sous domaine sont appelés éléments.
- Choisir la famille des champs locaux, c'est-à-dire à la fois la position des nœuds dans les sous domaines et les polynômes qui définissent le champ local en fonction des valeurs aux nœuds, la maille complétée par ces informations est alors appelée élément
- Ramener le problème à un problème discret, c'est la discrétisation.
- On résout le problème discret.
- Construire la solution approchée à partir des valeurs trouvées aux nœuds et en déduire d'autres grandeurs.
- Visualiser et exploiter la solution pour juger sa qualité numérique et de la satisfaction des critères de cahier des charges. [6]

## III.6-L'organigramme de la méthode de la corde

L'organigramme suivant résume toutes les étapes nécessaires et successives pour appliquer le principe de la méthode de la corde.

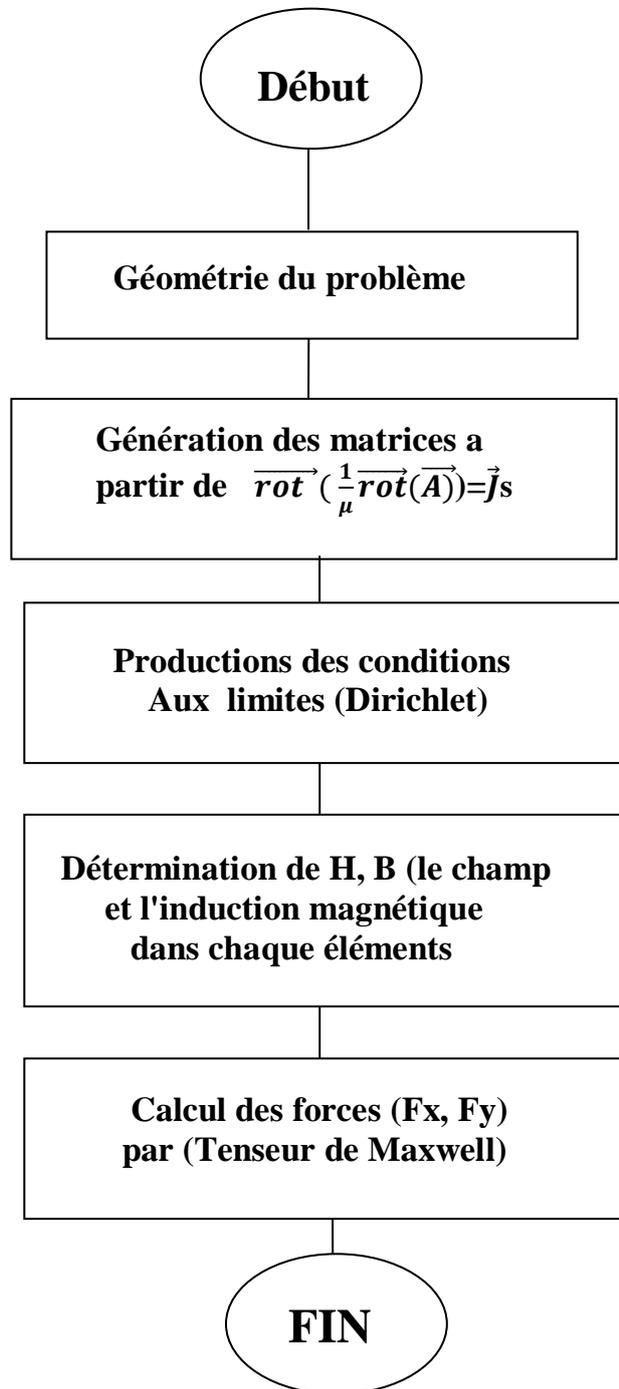


Figure III.2: Organigramme de la mise en œuvre des méthodes de Calcul les forces magnétiques

## III.7-Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre nous avons présenté les équations de Maxwell qui sont la base de l'étude d'un dispositif électromagnétique, ensuite nous en avons expliqué un des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis pour le calcul des forces électromagnétiques.

## ***CHAPITRE IV***

***Résultats obtenus de la modélisation d'un  
train de lévitation magnétique***

## IV.1-Introduction

Notre étude portera sur la modélisation par élément finis d'un dispositif à lévitation magnétique, ainsi que sur le calcul des forces électromagnétiques d'un domaine en régime linéaire. Pour effectuer ce calcul on a appliqué la méthode du tenseur de Maxwell par la méthode des éléments finis. L'exemple d'application est un électroaimant d'un train à lévitation magnétique, qui est supposé de longueur infinie, cela nous permet d'étudier ce modèle dans un plan de coordonnées cartésiennes (x, y).

## IV.2-Le problème d'étude

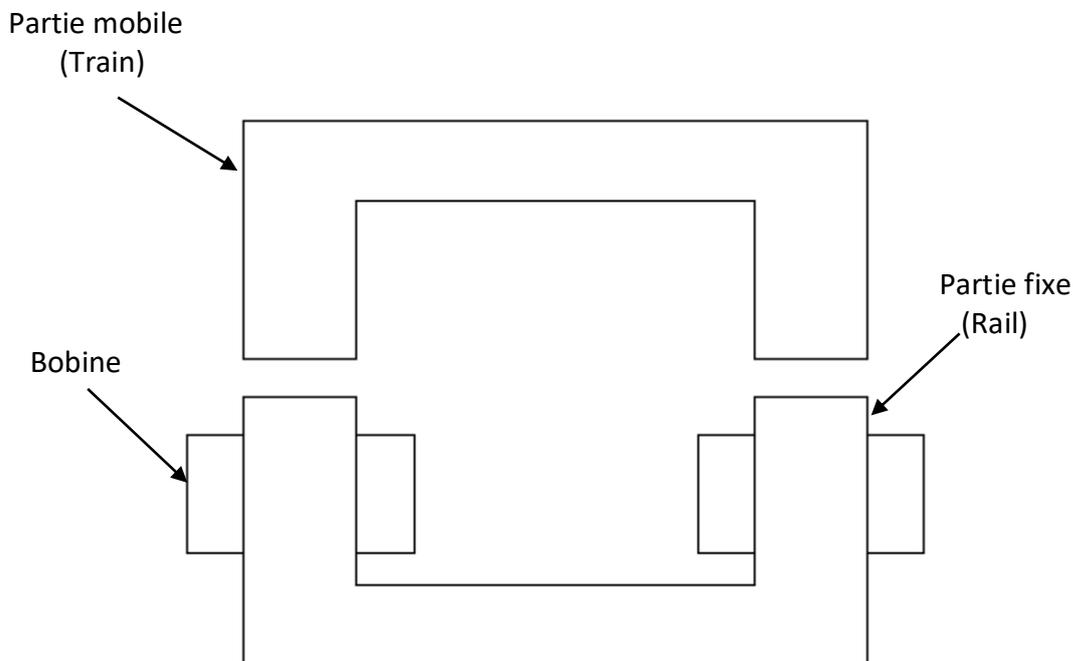
Pour déterminer le champ magnétique sur lequel repose la force électromagnétique, il est nécessaire de résoudre l'équation fondamentale qui régit le comportement électromagnétique.

Dans notre étude, nous nous concentrons sur un dispositif alimenté en courant continu (régime magnétostatique). L'équation clé à résoudre dans ce contexte est l'équation de Poisson.

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{A})\right) = \overrightarrow{j_s} \quad (\text{IV-1})$$

## IV.3-Le domaine d'étude

En se penchant sur les symétries et les invariances par translations observables dans le dispositif, nous restreindrons notre analyse à un domaine bidimensionnel. La configuration géométrique de ce domaine est représentée dans la figure (IV-1).



**Figure IV.1** : La géométrie d'un électroaimant

L'électroaimant doit supporter une force de lévitation verticale constante pour compenser le poids du train. Comme l'électroaimant est l'actionneur du système de lévitation, il doit maintenir une position verticale constante afin de générer une force de lévitation constante.

Si on étudie la force de guidage dans ces conditions, on peut noter qu'elle est plus grande que dans le calcul direct. En effet, lorsque l'électroaimant est maintenu à une distance constante du rail, la force de guidage latérale augmente.

Dans la suite de notre étude, nous nous intéressons à deux aspects : La force de lévitation résultante

Nous analyserons en détail la force de lévitation verticale générée par l'électroaimant pour contrer le poids du train. Cette force doit être précisément contrôlée pour assurer une lévitation stable.

La force de guidage créée par le rail

Nous examinerons également la force de guidage latérale exercée par le rail sur l'électroaimant lorsque celui-ci est maintenu à une distance constante. Cette force de guidage est cruciale pour stabiliser latéralement le train en lévitation.

En étudiant ces deux composantes de la force, nous pourrons mieux comprendre le fonctionnement global du système de lévitation magnétique et optimiser ses performances.

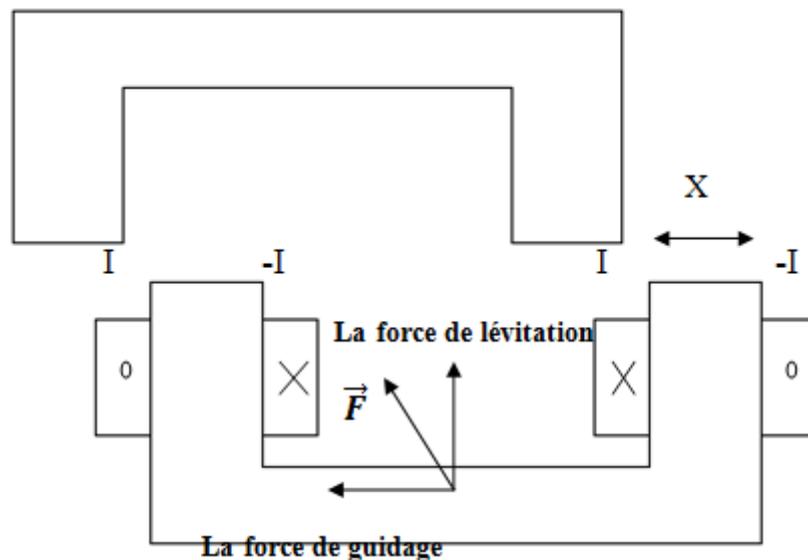


Figure IV.2 : paramètres d'un électroaimant dans le cas de décalage ( $x \neq 0$ )

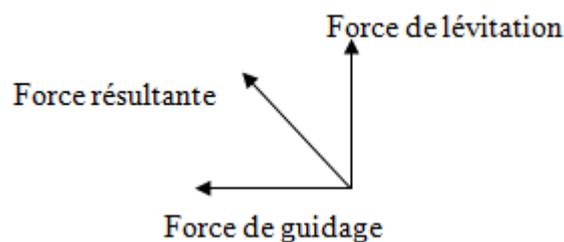


Figure IV.3 : les composantes de la force magnétique résultante

A la position ( $x=0$ ) du partie mobile la seule force magnétique existante est la force de lévitation (d'attraction).

Si la partie mobile se décale par une position  $x$ , la force magnétique résultante sera constitué de deux forces: la force de lévitation et la force de guidage.

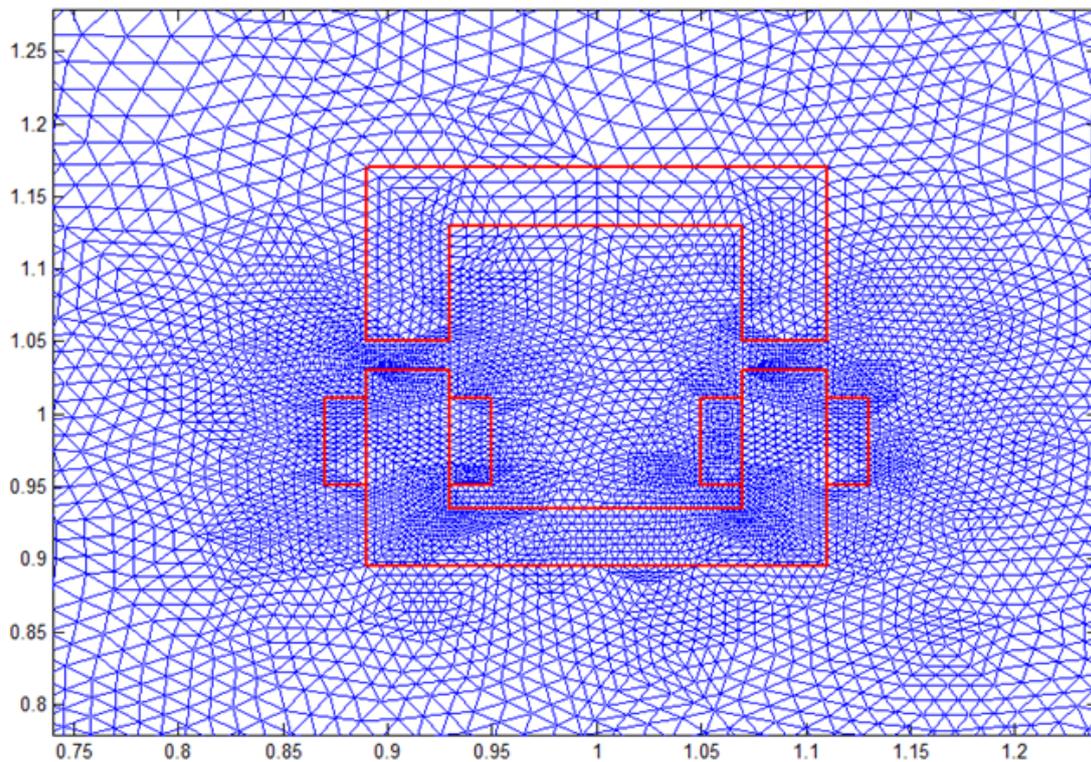
#### ➤Le régime linéaire

Dans cette étude, nous examinons le cas des matériaux linéaires ou l'électro-aimant est alimenté par un courant continu ( $I=40A$ ), ainsi qu'une perméabilité des matériaux constante ( $\mu r=1938$ ).

### IV.4-Résultats obtenus

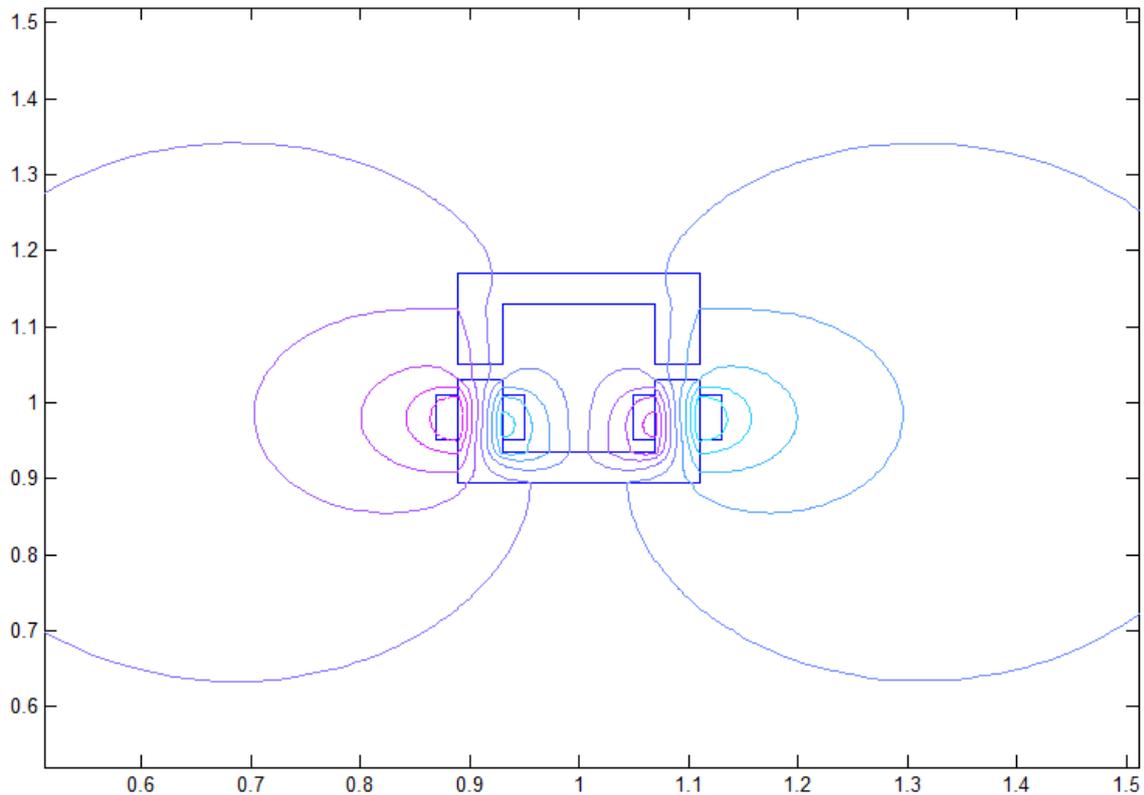
Le programme élément fini réalisé sous Matlab, a permis, après discrétisation du domaine, le calcul du potentiel vecteur magnétique ( $A$ ) en tous points du domaine d'étude. Le programme a permis aussi les grandeurs dérivées, telles que l'induction magnétique ( $B$ ) ainsi que le champ magnétique ( $H$ ).

Le maillage du domaine d'étude est montré à la figure suivante :



**Figure IV.4:** Maillage du domaine d'étude(train +rail)

La distribution du champ en termes de potentiel vecteur magnétique est représentée à la figure suivante :



**Figure IV. 5 :** La distribution des lignes équipotentiels du potentiel vecteur magnétique ( $\vec{A}$ )

L'induction magnétique a été calculée à partir de la relation :  $\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A}$

Dans un repère (x, y) on aura les composantes suivantes:

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y} \quad , \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \text{(IV -2)}$$

Pratiquement, l'induction magnétique a été calculée au centre des éléments du maillage, pour ce faire, la fonction pdegrad de pdeool à été utilisée.

Cette méthode permet d'obtenir précisément les valeurs de l'induction magnétique en chaque point du maillage. Les résultats obtenus sont donc fiables et représentatifs du phénomène étudié.

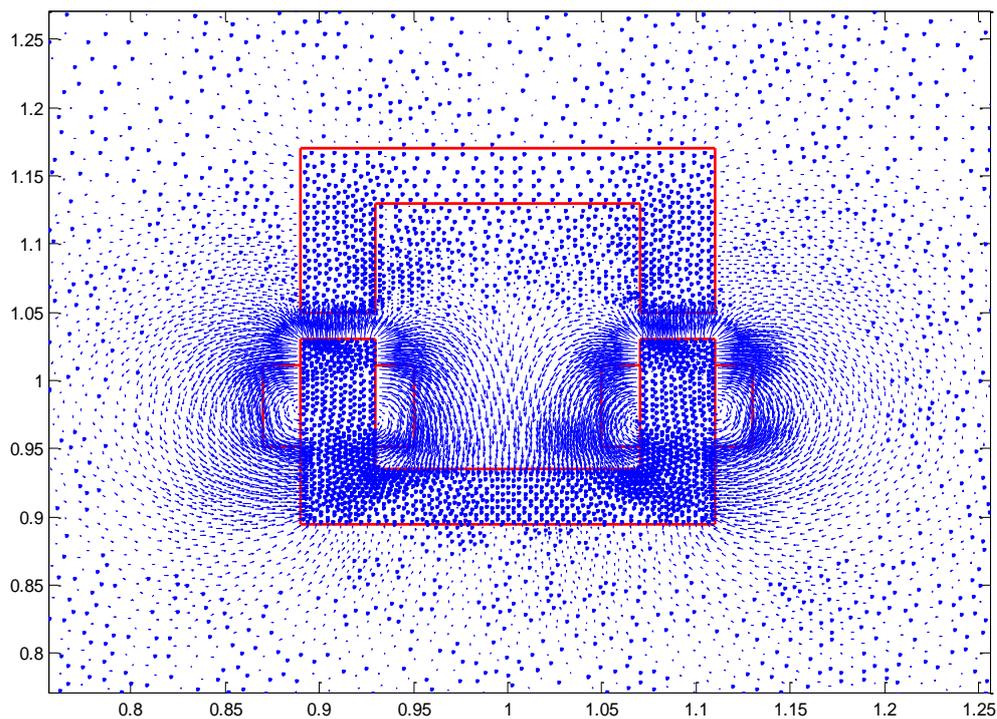


Figure IV. 6: Distribution de l'induction magnétique  $\vec{B}$

L'objectif de notre étude est d'analyser et illustrer la force électromagnétique. Les schémas ci-dessous illustrent la répartition de cette force ainsi que sa composante résultante.

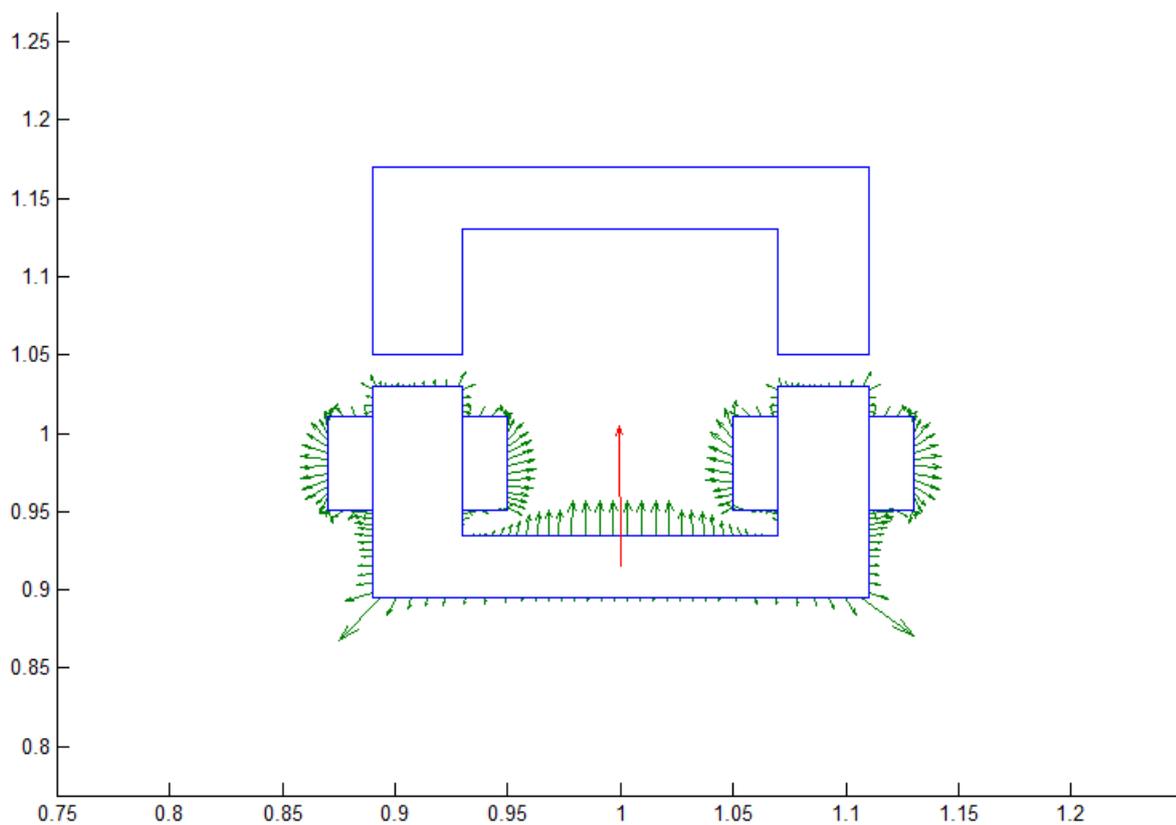


Figure IV.7: distribution de la force et la force résultante a la position du partie mobile  $x = 0$  [tenseur de maxwell]

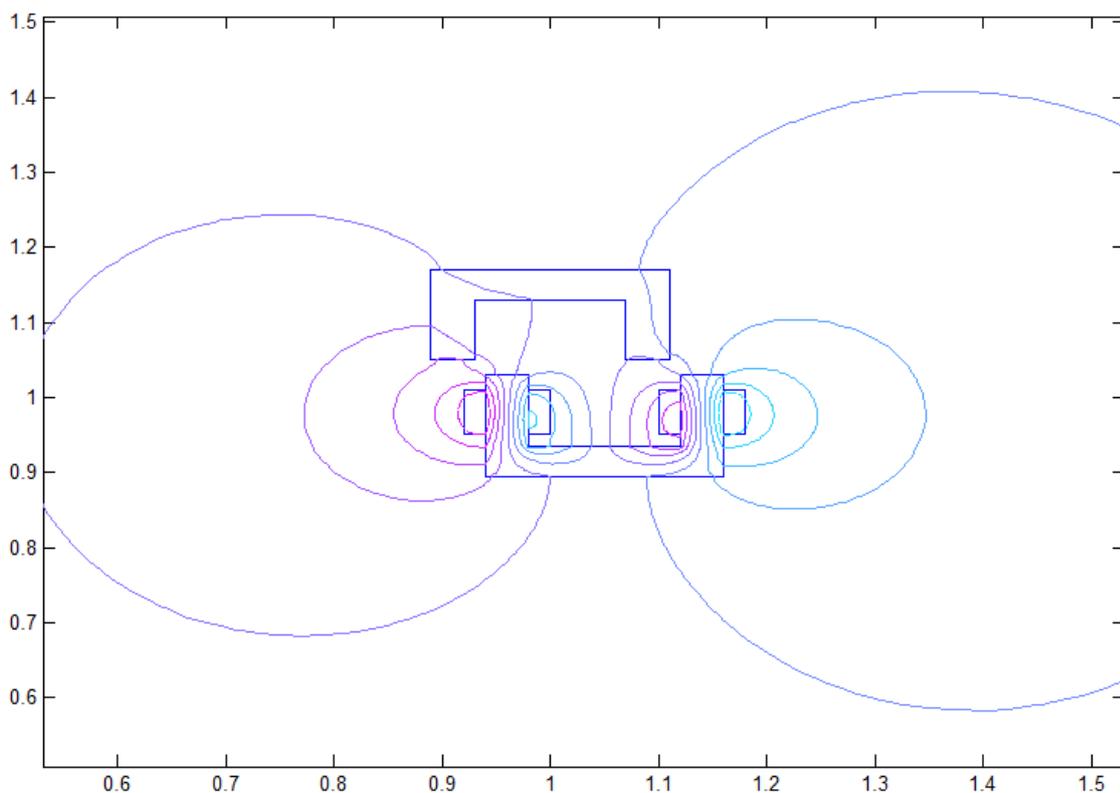
Le schéma présenté dans la Figure IV.7 illustre la répartition des forces le long des différentes arêtes de la partie fixe, ainsi que la force globale déterminée à l'aide de la méthode du tenseur de Maxwell.

De plus, il met en évidence la direction des forces résultantes entre les forces de lévitation ( $F_y$ ) et les forces de guidage ( $F_x$ ) agissant sur la surface inférieure de la partie fixe.

A partir de notre étude au programme Matlab nous l'avons trouvé que:

$$F_x = -5.4374e-08 \text{ [N]} \quad ; \quad F_y = 8.9425e-06 \text{ [N]}$$

Les valeurs des forces de lévitation et de guidage varient en fonction de la position de l'électroaimant ( $x$ ), dans ce cas précis, avec  $x=0.05$  m, et en maintenant l'entrefer constant. Les résultats détaillés sont présentés dans les figures suivantes :



**Figure IV. 8:** La distribution des lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique ( $A$ ) ( $x=0.05$ )

Selon la Figure IV.8, il est observé que les lignes de champ magnétique traversent le matériau en direction du vide, indiquant ainsi une diminution de la perméabilité magnétique. Dû aux déplacements de l'électro-aimant par rapport au premier cas.

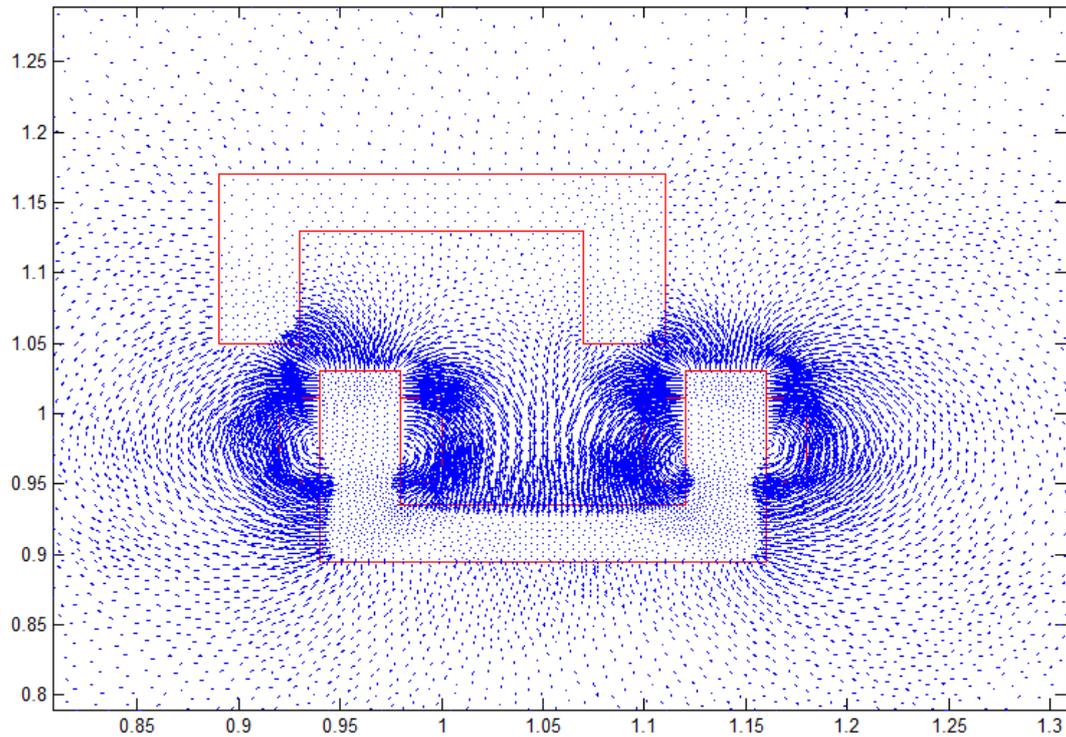


Figure IV. 9: Distribution de l'induction magnétique  $\vec{B}(x=0.05)$

Dans la Figure IV.9, il est également observé que les composantes de la distribution de l'induction magnétique présentent des formes identiques aux lignes du champ.

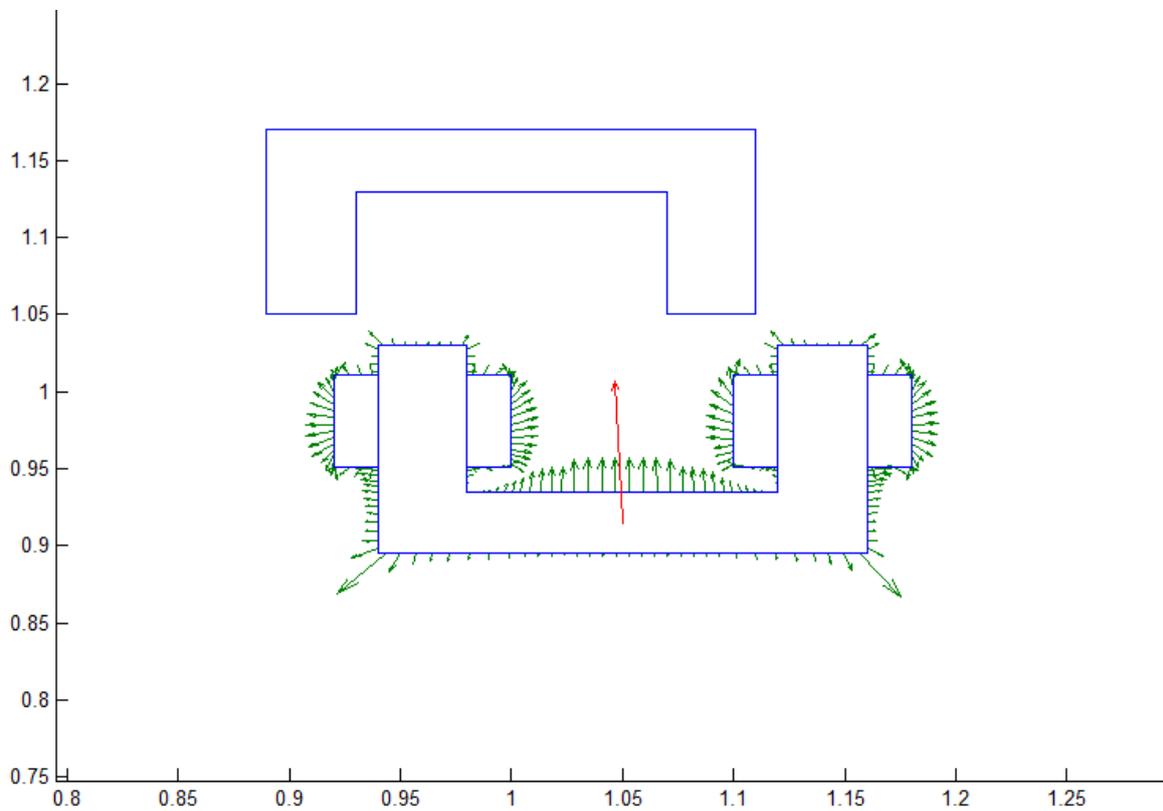


Figure IV. 10: Distribution des forces et la force résultante sur la pièce fixe( $x=0.05$ )

Dans la Figure IV.10, il est observé que la force résultante varie en fonction de la position de déplacement. Peu importe la position ( $x_0$ ), cette force est toujours dirigée vers le centre de l'électro-aimant. De plus, l'orientation de cette force vise à ramener la partie mobile à son point d'équilibre.

A partir de notre étude au programme Matlab nous l'avons trouvé que:

$$F_x = -3.2487e-07 \text{ [N]} \quad ; \quad F_y = 9.2291e-06 \text{ [N]}$$

### IV.5-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé une configuration cartésienne d'un train+rail, à l'aide d'un programme éléments finis réalisé sous Matlab. L'objectif est de calculer les forces magnétiques dans le régime linéaire.

Le calcul des forces magnétiques a été effectué en utilisant un sous-programme Matlab basé sur la méthode du tenseur de Maxwell.

La modélisation des systèmes électromagnétiques, où le fonctionnement repose sur l'interaction magnétique entre les parties fixes et mobiles, peut se baser sur le calcul de la force globale. Cette approche présente l'avantage de déterminer l'influence de la force sur la stabilité de l'ensemble (rail, train).

## CONCLUSION GENERALE

---

### CONCLUSION GENERALE

Un des objectifs de ce travail était de calculer la force qui permet de léviter un train, en mettant en œuvre une des méthodes numériques qu'est la méthode des éléments finis.

Ce travail vise à exposer l'importance du train à lévitation magnétique, une technologie qui implique un savoir-faire conséquent. En effet, il faut assurer la surveillance du train tout au long du trajet, avec des réglages extrêmement précis en temps réel pour garantir un niveau de sécurité optimal. La vitesse, le freinage et le guidage sont les éléments clés à contrôler. De plus, ce train a une consommation énergétique plus faible, un entretien moindre et une pollution quasi nulle, grâce à l'absence de frottement. Cependant, sa construction nécessite une infrastructure importante, incompatible avec les réseaux ferrés classiques, ce qui rend cette technologie très coûteuse.

Nous avons pu examiner toutes les formes de lévitation magnétique existantes, distinguant aimants permanents, électroaimants et supraconducteurs. Cela nous a permis de nous renseigner sur les différents projets de pointe en la matière. Les phénomènes électromagnétiques étudiés sont régis par les équations de Maxwell, simplifiées en une seule équation magnétodynamique. Pour la résoudre, nous avons présenté diverses méthodes de résolution des équations du tenseur de MAXWELL de calcul de la force électromagnétique.

La modélisation a été réalisée grâce au programme éléments finis développé sous Matlab, qui permet de déterminer le potentiel vecteur magnétique et les grandeurs dérivées H et B.

Enfin, nous espérons que ce travail constituera une base solide pour d'éventuelles améliorations futures.

# BIBLIOGRAPHIE

---

## BIBLIOGRAPHIE

[1] Y. SHTESEL, C. EDWARDS, L. FRIDMAN, A. LEVANT, livre « Sliding Mode Control and Observation », Springer Science+Business Media New York, 2014.

[2] Mr Hicham ALLAG « Modèles et Calcul des Systèmes de Suspension Magnétique Passive- Développements et Calculs Analytiques en2D et 3D des Interactions entre les Aimants Permanents ->> Thèse Doctorat 21 JUIN 2010 Université de GRENOBLE.

[3] F. C. Moon, livre "Superconducting levitation, applications to bearings and magnetic transportation", Wiley, Germany, 2004.

[4] J. Delamare, "Suspensions magnétiques partiellement passives", Thèse de doctorat, Soutenue au LEG – INP Grenoble, 1994.

[5] Mr Fabien FAUR « Suspension Magnétique Pour Volant d’Inertie » Thèse Doctorat 2003.

[6] Mr L . BELHIMER, A . GHANEM « Etude et Réalisation d’un Dispositif de Lévitiation Magnétique » Mémoire de Master 2013 UMMTO.

[7] Mr. L. ABDELOUEL « Commande d’un système à l’évitiation magnétique » Mémoire de Master 2016.

[8] NEHAL OUASSILA « Etude et modélisation des paliers planaires » mémoire du magistère 2009.

[9] Jérôme delamare, Fabien Faure (paliers magnétiques) laboratoire d’électrotechnique de grenoble. [www-leg.ensieg.inpg.fr](http://www-leg.ensieg.inpg.fr).

[10] Mohamad EL-ACHKAR « conception d’un micro-actionneur magnétique a grande échelle pour les expériences de commande ».

[11] NAIT OUSLIMANE AHMED « Etude tridimensionnelle d’une structure micro électromécanique (MEMES) en régime dynamique (Thèse du magistère 2008).

[12] P. MINOTTI A. FERREA, ouvrage « Les micromachines “ Edition Hermès Paris 1998” ».

[13] Hicham LAMARI CHATOUANI « microsystèmes et micromanipulation a la lévitation diamagnétique, conception, réalisation et application a la micro-fluidique digitale.

[14] Mr: A. BOUZIDI « Etude de la lévitation magnétique des trains à lévitation magnétique » mémoire de MASTER 2015-2016.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [15] A. ZEHDEN, New Improvement in Electric Traction Apparatus, U.S. Patent n° 88145, 04/06/1902.
- [16] HAMANI Sadek, ZEGHOUANI, "Etude de la lévitation magnétique des trains à lévitation magnétique". Master en électrotechnique, Université Béjaia 2016.
- [17] GRAEMINGER B., "British Patent", No 74499, 24541, 1912.
- [18] KEMPER H., "German Patent", No 643316, 644302, 1937.
- [19] JAYAWANT B. V., ouvrage "Electromagnetic suspension and levitation", Edward Arnold, London, 1981.
- [20] FAURE F., "Suspension magnétique pour volant d'inertie", Thèse de Doctorat, soutenue au LEG – INP Grenoble, 2003.
- [21] SINHA P. K., ouvrage "Electromagnetic Suspension, Dynamics and Control", Peter-Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, 1987.
- [22] S. ANTOINE, STURTZER "LE TRAIN MAGLEVE" projet de basse tension, annØe 2001.
- [23] KENT R, DAVEY, article "Designing with mull flux coils" IEEE transaction on magnetic, VOL.33, No 5, September 1997.
- [24] A.R. EASTHAN, W.F HAYES, article "Maglev systems development status» IEEE magazine, January 1998.
- [25] FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION , rapport "low speed maglev technology development program" U. S. department of Transportation, report number: DOC – CA-26-7025-02.1, MARCH 2002.
- [26] Lotfi. Chouikhi (palier à lévitation magnétique:modélisation et optimisation) mémoire de magistère .université de constantine.2002.
- [27] Ali.rezik (étude comparative des différents modèles éléments finis pour le calcul des forces d'origine magnétique) mémoire de magistère 'université de Jijel ,2002.
- [28] Hichem. Allag.. (Étude et élaboration d'un calcul magnétique en 3D pour un système de lévitation) mémoire de magistère Constantine2002.

## BIBLIOGRAPHIE

---

[29] OULD OUALI SAMY HASSANI « Intégration de l'hystérésis magnétique dans un calcul éléments finis en vue de l'estimation des pertes dans les tôles des machines électriques».

[30] GOURI DHATT, GILBERT TOUZOT EMMANUEL LE FRANCOIS « Méthode des éléments finis » Edition LAVOISIER 2005.

[31] Cours AN3 LST-M « Equation aux dérivées partielles, Méthodes des différences finis ».

[32] M. L. Khene, "Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les structures a géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis", Thèse de Magister, Spécialité électrotechnique, Université de Batna, 2006.