

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA Bejaia



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Automatismes industriels

Thème

**Récupération d'énergie électromécanique vibratoire des
amortisseurs électromagnétiques des véhicules**

Présenté par :

- AROUA Mohamed Lamine
- MEDJEBAR Mehdi

Encadré par :

- Pr MAOUCHE Bachir
- Mr BOUCHEBBAH Badis

2020/2021

Remerciement

En préambule à ce mémoire, nous adressons nos remerciements les plus sincères tout d'abord au « Bon Dieu » le plus puissant de nous avoir guidé vers le chemin de savoir et de nous avoir donné le courage, la patience et la santé qui nous ont été utile tout au long de nos parcours.

*Toute notre estime et notre respectueuse gratitude et remerciement vont au Professeur **MAOUCHE Bachir** d'avoir accepté d'être notre promoteur, malgré ses multiples occupations, il a dirigé ce travail avec rigueur et objectivité. Nous le remercions profondément pour son encouragement continue et aussi d'être toujours là pour nous écouter, nous aider et nous guider à retrouver le bon chemin par sa sagesse et ses précieux conseils.*

*Nos remerciements les plus sincères s'adressent de même à **Mr BOUCHEBBAH Badis** pour ses conseils, son aide cruciale dans notre étude ainsi que pour le temps qu'il nous a réservé.*

*Nous remercions aussi **Mr MELLAHI Ahmed** pour son aide précieuse dans la partie simulation et pour ses conseils précieux,*

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

Dédicaces

Je dédie ce travail à mon père et ma mère pour leurs sacrifices durant toute ma vie, que dieu leur prête une longue vie.

Je dédie aussi ce modeste travail à mon grand père paternel AHMED et maternel MOHAMED et à ma grande mère maternelle DJAMILA et paternelle ZOHRA.

Je dédie aussi ce travail à mes oncles, mes tentes, mes cousins et cousines et à mes professeurs et enseignants et surtout à mon Co-promoteur Mr BOUCHEBBAH BADIS pour son aide précieuse durant toutes les parties de notre travail.

Je dédie aussi ce travail à mon frère YACINE et à mes sœurs FAHIMA et LAMIA.

Une dédicace spéciale aux honorables membres du jury et à tous mes amis WASSIM, YANIS, AMAR, LAMINE, SABRINA, WALID et NABIL et à tous les étudiants de ma promotion qui ont partagés avec moi de très bons souvenirs.

Mehdi

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui m'ont soutenus durant toutes les périodes de ma vie, que dieu le tout puissant les protègent et les gardent.

Je dédie ce travail aussi à toute ma famille surtout mes grands parents qui m'ont appris la modestie des anciens, que ALLAH les protège et leur donne une longue vie.

Une dédicace spéciale à mes meilleurs amis KHAMIS ISLEM et à la mémoire de mon meilleur ami défunt HAMIDI MASSINISSA (Allah yrahmou) avec qui je partage de bons souvenirs que je n'oublierai jamais et aussi pour leurs aides précieuses durant les étapes les plus difficiles de ma carrière universitaire et de ma vie.

Je dédie aussi ce travail à toutes les personnes qui ont contribués de prêt ou de loin à ce que je suis aujourd'hui.

Mohamed Lamine

Liste des figures

Figure I.1 un exemple des systèmes de suspension des véhicules	2
Figure I.2 Exemple d'un système de suspension active.....	3
Figure I.3 Système ABC dans sa nouvelle version	4
Figure I.4 Exemple d'un système de suspension passive.....	5
Figure I.5 Exemples d'amortisseurs semi-actifs à contrôle électronique, en utilisant trois différentes technologies.....	5
Figure I.6 Architectures de suspension des trains arrière.....	7
Figure I.7 Architectures de suspension des trains arrière.....	8
Figure I.8 Ressort à lames	9
Figure I.9 Exemple d'un ressort à spirale cylindrique	10
Figure I.10 Ressort de torsion	10
Figure I.11 Aperçue d'un amortisseur monté sur une roue.....	11
Figure I.12 Exemple d'un amortisseur hydraulique.....	12
Figure I.13 Exemple d'un amortisseur hydraulique à ressort	13
Figure I.14 Schéma d'un amortisseur oléopneumatique	13
Figure I.15 Schéma d'un amortisseur hydraulique à levier	15
Figure I.16 Exemple d'un amortisseur pneumatique	15
Figure I.17 Exemple d'un amortisseur à inertie.....	16
Figure I.18 Amortisseur magnéto-rhéologique	16
Figure I.19 Amortisseur électromagnétique.....	17
Figure II. 1 Courbe de désaimantation.....	19
Figure II. 2 Familles des aimants permanents métalliques (Alnico).	20
Figure II. 3 Familles des aimants permanents un exemple en ferrites	20
Figure II. 4 Familles des aimants permanents en terre rare	21
Figure II. 5 Courbe de désaimantation B(H) des principaux types d'aimants.....	22
Figure II. 6 Les interactions entre les pôles d'un aimant permanent.....	23
Figure II. 7 Cycle B(H) d'un matériau magnétique hystérétique.	24
Figure II. 8 Influence de la température sur la courbe de désaimantation.	25
Figure II. 9 Tableau Comparatif des niveaux énergétiques des différents aimants.	25

Figure II. 10 Avantage (couple-vitesse) d'un inducteur à aimant permanent.....	26
Figure II. 11 Disque dur d'un ordinateur.	29
Figure II. 12 Exemple d'utilisation des aimants permanents.....	29
Figure II. 13 Moments magnétiques orbital et de spin	30
Figure II. 14 Spire de courant de moment magnétique.....	31
Figure II. 15 Modèle ampérien d'un aimant permanent	31
Figure III. 1 Schéma du système	34
Figure III. 2 Schéma de récupération de l'énergie électrique générée par l'aimant.....	39
Figure III. 3 Modèle mécanique d'un système libre.....	42
Figure III. 4 Allure caractéristique de la solution générale	43
Figure III. 5 Modèle mécanique du système amorti	43
Figure III. 6 Réponse pseudopériodique.....	45
Figure III. 7 Modèle physique d'un système forcé.....	45
Figure III. 8 Chaussée recouverte en pavé.....	47
Figure III. 9 Profil sinusoïdal.....	48
Figure III. 10 Obstacle de type dos-d'âne.....	49
Figure III. 11 Organigramme des calculs	52
Figure IV 1 Coupe faciale simplifiée d'un aimant et d'une bobine	56
Figure IV 2 Dos d'âne	56
Figure IV 3 Schéma équivalent du circuit à vide	57
Figure IV 4 Tension de source à vide	57
Figure IV 5 Position de l'aimant à vide.....	57
Figure IV 6 Vitesse de l'aimant	58
Figure IV 7 Circuit en court circuit.....	58
Figure IV 8 Position de l'aimant dans le cas d'un court circuit	58
Figure IV 9 Force de Laplace dans le cas d'un court circuit	59
Figure IV 10 Puissance dissipée en court circuit	59
Figure IV 11 Densité de courant induite en court circuit.....	59
Figure IV 12 Tension induite en court circuit.....	60
Figure IV 13 Coefficient d'amortissement	60
Figure IV 14 Vitesse de l'aimant	60

Figure IV 15 circuit équivalent en charge	61
Figure IV 16 Densité de courant dans la bobine en charge.....	61
Figure IV 17 Force de Laplace en charge	62
Figure IV 18 Puissance électrique dissipée en charge	62
Figure IV 19 Tension induite en charge.....	62
Figure IV 20 Coefficient d'amortissement	63
Figure IV 21 Position de l'aimant cas en charge sur capacité.....	63
Figure IV 22 la tension aux bornes de la capacité.....	63
Figure IV 23 Vitesse de l'aimant dans le temps	64

Liste des Tableaux

Tableau I.1 Comparaison des performances des trois types de suspension.....	6
Tableau II.1 quatre classes principales des aimants avec leurs caractéristiques techniques générales.....	26
TableauIV.1 Paramètres de la simulation	55

Notation et symboles

B_r : Induction rémanente [T].

H_C : Champ coercitif [kA/m].

B(H) : courbe de désaimantation.

T : température [C⁰].

\vec{A} : Potentiel vecteur.

M : Aimantation du milieu considéré.

$\vec{\nabla}$: Nabla.

$d\vec{s}$: Elément de surface [m²].

$d\vec{l}$: Elément de longueur [m].

ϕ : flux magnétique.

\vec{E} : Champ électrique[V/m].

\vec{B} : Induction magnétique [T].

\vec{H} : Champ magnétique [A/m].

\vec{J} : Densité de courant [A/m²].

ρ : Densité de charge volumique [C/m³].

$\frac{d\vec{D}}{dt}$: Densité de courant de déplacement [C/m³].

\vec{m} : Moment magnétique [A/m²].

\vec{M} : Aimantation magnétique [A/m].

\vec{P} : Polarisation magnétique [T].

τ : Volume de l'aimant [mm³].

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [$4 * \pi * 10^{-7}$ H.m⁻¹].

\vec{F} : Force de Laplace.

r_a : Rayon de l'aimant [mm].

r_b : Rayon de la bobine [mm].

σ : La conductivité [Ω .m⁻¹].

R : Résistance électrique [Ω]

k : Raideur du ressort [N/m].

m : Masse de la voiture [kg].

α : Coefficient d'amortissement.

C : Célérité [m/s].

f_0 : Fréquence propre [s^{-1}].

ω_0 : Pulsation propre [rad/s].

T : Période du signal [s].

v : Vitesse du véhicule [km/h].

y_m : Amplitude.

λ : Longueur d'onde [m].

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
I Généralités sur les amortisseurs	2
I.1 Introduction	2
I.2 Systèmes de suspension.....	2
I.2.1 Définition d'un système de suspension.....	2
I.2.2 Rôle de la suspension :.....	3
I.2.3 Différents systèmes de suspension.....	3
I.2.3.1 La suspension active	3
I.2.3.2 La suspension passive	4
I.2.3.3 La suspension semi-active	5
I.3 Comparaison des performances des trois types de suspension.....	6
I.4 Différentes architectures de suspension.....	6
I.5 Composantes principales d'une suspension	8
I.5.1 Ressorts	8
I.5.1.1 Définition générale du ressort	8
I.5.1.2 Rôle d'un ressort	8
I.5.1.3 Types de ressorts.....	9
I.5.1.3.1 Ressorts à lames	9
I.5.1.3.2 Ressorts hélicoïdaux	9
I.5.1.3.3 Le ressort de torsion.....	10
I.5.2 Amortisseurs d'un véhicule	10
I.5.2.1 Définition d'un amortisseur	10
I.5.2.2 Rôle de l'amortisseur	11
I.5.2.3 Fonctionnement d'un système d'amortissement.....	11
I.5.3 Types d'amortisseurs d'un véhicule	12

I.5.3.1	Amortisseurs à fluide	12
I.5.3.1.1	Amortisseurs hydrauliques à ressort	13
I.5.3.1.2	Amortisseurs oléopneumatiques ou hydropneumatiques.....	13
I.5.3.2	Amortisseurs hydrauliques.....	14
I.5.3.2.1	Amortisseurs hydrauliques à palettes.....	14
I.5.3.2.2	Amortisseurs hydrauliques à levier.....	14
I.5.3.2.3	Amortisseur pneumatique	15
I.5.3.2.4	Amortisseur à inertie.....	15
I.5.3.3	Amortisseurs à effet magnétique.....	16
I.5.3.3.1	Amortisseurs magnéto-rhéologique	16
I.5.3.4	Amortisseurs électromagnétiques	17
I.5.3.4.1	Définition	17
I.5.3.4.2	Principe de fonctionnement	17
I.6	Conclusion	18
II	Généralités sur les aimants permanents	19
II.1	Introduction	19
II.2	Définition d'un aimant permanent.....	19
II.3	Types d'aimants permanents	20
II.3.1	ALNiCo	20
II.3.2	Ferrites	20
II.3.3	Terres rares	21
II.4	Puissance magnétique des aimants	22
II.5	Caractéristiques générales d'un aimant permanent	22
II.5.1	La polarité de l'aimant permanent.....	22
II.5.2	Caractéristiques techniques générales	23
II.6	Les avantages et les inconvénients des aimants permanents.....	26
II.6.1	Les avantages des aimants permanents.....	26

II.6.2	Les inconvénients des aimants permanents	27
II.7	Domaines d'application des aimants permanents.....	28
II.7.1	Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique	28
II.7.2	Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique	28
II.7.3	Conversion d'énergie mécanique à une autre forme d'énergie	28
II.7.4	Conversion d'énergie mécanique en énergie thermique.....	28
II.7.5	La création d'un champ magnétique fixe	29
II.8	Modélisation des aimants permanents	30
II.8.1	Principe d'équivalence.....	30
II.8.2	Modélisation ampérienne d'un aimant	30
II.8.3	Modélisation Coulombienne.....	31
II.8.4	Modèles analytiques	31
II.9	Conclusion	32
III	Modélisation électromagnétique	34
III.1	Introduction.....	34
III.2	Modèle géométrique	34
III.3	Modèle général de l'électromagnétisme	35
III.3.1	Les équations électromagnétiques.....	35
III.3.2	Comportement des milieux	35
III.4	Mise en équations du modèle ampérien.....	36
III.4.1	Composantes normale et tangentielle de l'induction magnétique.....	38
III.4.2	Champ électromoteur E.....	38
III.4.3	Force de Laplace	39
III.5	Le circuit électrique	39
III.5.1	Le principe de fonctionnement.....	39
III.6	Modélisation mécanique du système	42
III.6.1	Oscillations linéaires libres non amorties.....	42

III.6.2	Système avec oscillations linéaires libres amorties.....	43
III.6.3	Système amorti et forcé.....	45
III.7	Types des forces extérieures	46
III.7.1	Relation entre le profil de la chaussée et la vitesse du véhicule	46
III.7.2	Vitesse de propagation	46
III.7.3	Déformation de la chaussée.....	47
III.7.3.1	Chaussée recouverte en pavé de pierre.....	47
III.7.3.2	Profil de la chaussée avec une irrégularité sinusoïdale	48
III.7.3.3	Profil de dos-d'âne	49
III.7.4	Couplage électromécanique	50
III.8	Discrétisation temporelle	51
III.9	Processus du calcul numérique	52
III.10	Conclusion	53
IV	Application et résultats.....	55
IV.1	Données mécaniques et électromagnétiques.....	55
IV.2	Modèle géométrique	56
IV.3	Force excitation.....	56
IV.4	Circuit électromagnétique à vide	57
IV.5	Système sans récupération d'énergie	58
IV.6	Système avec récupération d'énergie.....	61
IV.7	Conclusion	64
	Conclusion Générale	65
	Bibliographie	66

INTRODUCTION GENERALE

Grâce aux avancées technologiques réalisées dans les dernières années, l'homme a créé et amélioré des moyens pour faciliter et améliorer sa vie quotidienne dans tous les domaines en surmontant quelques problèmes les plus récurrents, et parmi ces problèmes, on cite ceux liés aux chocs, aux bruits et aux vibrations rencontrés dans les machines industrielles, les ponts et les immeubles mais aussi dans les moyens de transport particulièrement dans les véhicules.

Les amortisseurs sont devenus un élément indispensable de la structure mécanique du véhicule. Ils permettant de réduire les vibrations de l'objet ou d'isoler l'objet des vibrations en dissipant de l'énergie afin d'améliorer son niveau de vie en garantissant un fonctionnement plus efficace et par la même occasion assuré la sécurité et le confort des passagers.

L'amortisseur électromagnétique qui fait l'objet du présent travail est un dispositif qui vise à minimiser l'amplitude des vibrations résultantes des irrégularités de la route par attraction magnétique et récupérer l'énergie vibratoire sous forme d'énergie électrique.

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre a pour objectif de situer le contexte du travail et de ses enjeux en mettant en évidence la diversité des concepts généraux sur la suspension automobile.

Le deuxième chapitre consiste à la présentation des aimants permanents et l'étude de leurs différentes caractéristiques ainsi que leur modélisation.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation électromagnétique de la suspension et la modélisation mécanique des oscillations et des forces de répulsion et d'attraction.

Le dernier chapitre est réservé à la simulation par logiciel MATLAB de la suspension mécano-électromagnétique.

Chapitre I

Généralités sur les amortisseurs

I Généralités sur les amortisseurs

I.1 Introduction

Ce chapitre définit un plan sur l'état de l'art de la conception et la modélisation des différents types de systèmes de suspension. Un aperçu est mis en œuvre sur le principe des suspensions, leurs constitutions et diversités, et les plus utilisées dans le domaine des véhicules. Après, on citera les différents types de suspensions tel que la suspension active, passive et semi-active, et les différents types d'amortisseurs tel que les amortisseurs hydrauliques, pneumatiques et électromagnétiques.

I.2 Systèmes de suspension

I.2.1 Définition d'un système de suspension



Figure I.1 un exemple des systèmes de suspension des véhicules

Les suspensions d'un véhicule sont des éléments permettant de relier les masses non suspendues (typiquement la roue, les pièces d'entraînement de roue, souvent les systèmes de freinage) aux masses suspendues (typiquement le châssis, le moteur et tous les composants du véhicule fixés au châssis). L'utilisation de la suspension est imposée par les irrégularités de la surface sur laquelle se déplace le véhicule. Elle en diminue l'impact sur l'engin et réduisant la fatigue mécanique, améliore le confort des passagers et maintien le contact entre les roues et le sol malgré ces irrégularités. Par ailleurs, la masse du véhicule nécessite l'utilisation d'un mécanisme de rappel pour éviter que le système ne se détruise indéfiniment au fur et à mesure des aspérités du terrain. Ainsi, la suspension se compose d'un dispositif de liaison (ressort et amortisseur) entre les masses non suspendues et les masses suspendues [1].

I.2.2 Rôle de la suspension :

La suspension d'un véhicule a pour rôle de :

- **Porter le véhicule** : par définition même, la suspension doit supporter les masses suspendues et maintenir la valeur de la hauteur relative du châssis par rapport au sol dans un intervalle prédéterminé.
- **Assurer un contact permanent** : sur un véhicule dépourvu de suspension, le pneumatique ne peut pas suivre rigoureusement et en permanence le profil de la chaussée, c'est le mouvement global du véhicule qui conditionne la position des pneumatiques par rapport au sol.
- **Isoler des perturbations extérieures** : outre l'intérêt sur la durée de vie des composantes mécaniques, la fonction d'isolation opérée par la suspension doit également concourir à procurer un bon confort d'utilisation aux occupants du véhicule

I.2.3 Différents systèmes de suspension

On trouve trois types de systèmes de suspension ; active, semi-active et passive. Cette classification est obtenue selon la méthode et le principe de contrôle requis et aussi l'ensemble des éléments mécaniques qui relient les roues à la structure principale (châssis) du véhicule [2].

I.2.3.1 La suspension active



Figure I.2 Exemple d'un système de suspension active

La suspension active est l'ensemble des connaissances techniques en mécanique et en électronique, on peut dire que c'est un appareil de haute technologie plus complexe. Elle est caractérisée par le besoin de source extérieure d'énergie représentante par l'inertie générée est provoquée par la déformation du ressort suivant l'état de la route. Cette énergie permet d'activer le système de contrôle qui contrôlera la force produite par le système de suspension, et à partir d'un actionneur commandé, le système produira donc une force d'inertie contre la force extérieure, afin de réduire les vibrations et les changements de position de véhicule. Cette

nouvelle technologie de suspension nous offre de meilleures performances de tenue de route et de confort [1].

D'ailleurs, de nombreuses études ont été menées sur le contrôle et le développement des suspensions actives. A titre d'exemple, il existe le système Active Body Control (ABC) de Mercedes qui est constitué par des vérins hydrauliques placés au niveau des suspensions de chaque roue et qui compensent l'écrasement des ressorts pour mieux contrôler le mouvement du châssis (figure I.3). Deux lasers intégrés aux phares avant, balaient continuellement l'avant de la voiture à la recherche d'imperfections et d'aspérités de la chaussée. Le système transmet ensuite l'information au système de contrôle de l'ABC qui contrôle le débit d'huile dans des pistons directement en contact avec le ressort de chaque roue et de façon indépendante [3].

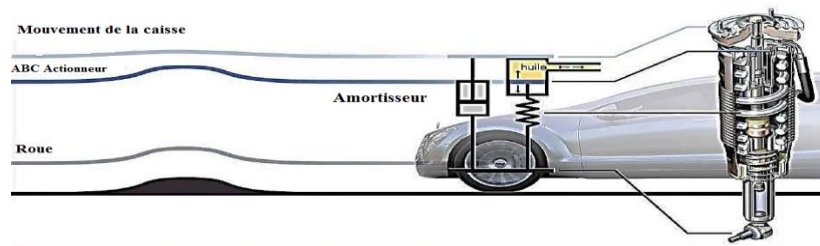


Figure I.3 Système ABC dans sa nouvelle version

Plus récemment, la suspension développée par Bose™ (Linear Electromagnetic Suspension) associe un moteur électromagnétique linéaire ainsi qu'un amplificateur de puissance à chaque roue. En dépit de leurs très bonnes performances, les suspensions actives sont à ce jour peu répandues à cause de leur complexité, de leur coût, de leur consommation d'énergie et du risque potentiel d'instabilité inhérent à tout système actif [3].

I.2.3.2 La suspension passive

Les suspensions passives sont à la fois les plus connues et les plus répandues. Une suspension passive est constituée d'un ensemble ressort-amortisseur, l'amortisseur étant monté en parallèle avec le ressort. Ces deux éléments de base ne nécessitent aucun apport direct d'énergie de la part du véhicule sur lequel ils sont montés. Le système fonctionne quand le ressort absorbe les reliefs de la route, cependant lors de cette absorption, le ressort accumule de l'énergie cinétique qu'il doit restituer. L'amortisseur est alors l'organe qui module cette dissipation d'énergie [1].

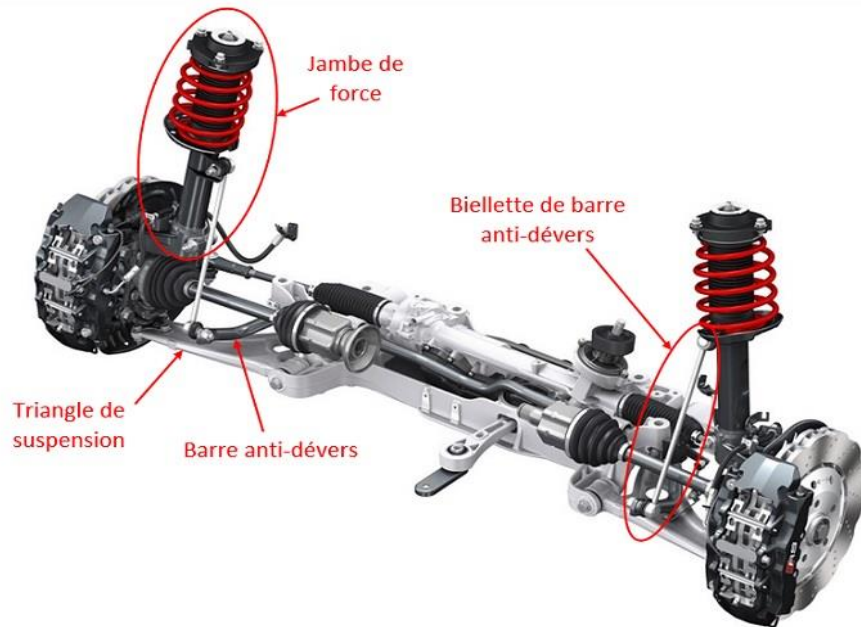


Figure I.4 Exemple d'un système de suspension passive

I.2.3.3 La suspension semi-active

Une suspension semi-active consiste en un dispositif permettant de moduler les caractéristiques de l'amortisseur sans agir sur le ressort de suspension.



Figure I.5 Exemples d'amortisseurs semi-actifs à contrôle électronique, en utilisant trois différentes technologies

Les suspensions passives ne peuvent que réaliser un compromis figé entre les impératifs du confort vertical pur, et ceux relevant de la tenue de route et du contrôle du véhicule. On peut comprendre l'avantage technique incontestable des suspensions semi-actives qui permettent de

moduler les paramètres d'amortissement en fonction du contexte. Cette modulation s'accompagne d'une perte de puissance minimale, puisqu'elle se limite à l'activation des commutateurs. Cependant, ces systèmes se contentent seulement de restituer l'énergie emmagasinée aux sollicitations extérieures.

Si nous regardons à l'intérieur d'un amortisseur semi-actif, aujourd'hui il y a trois principales technologies disponibles, qui permettent une modification rapide-réagissant électroniquement contrôlée du rapport d'un amortisseur (La figure 1.5) [4].

I.3 Comparaison des performances des trois types de suspension

On résume les trois différents systèmes pour bien les comparer dans le tableau suivant

Tableau I.1 Comparaison des performances des trois types de suspension

Type de système de suspension	suspension passive	suspension semi-active	suspension active
L'élément d'amortissement	Amortisseur ordinaire	Amortisseur ajustable	Un système hydraulique/servomoteur
La méthode de control	Rien	Automatique Electronique Hydraulique	Electronique Magnétique Hydraulique
L'action principale	Coefficient d'amortissement fixe.	Amortissement réglable instantanément	Force entre châssis/roue réglable
La consommation d'énergie	Zéro	Très petite	Grande
La bande passante	Inconnu	Plus de 20Hz	Moins de 15Hz
Caractéristique de la dynamique verticale	Non	Moyenne	Bon
Caractéristique de la dynamique latérale	Non	Moyenne	Bon
Les coûts	Plus bas	Moyenne	Plus haut

I.4 Différentes architectures de suspension

Il existe beaucoup de types des systèmes de suspensions et se classent suivant leur situation sur les trains avant ou arrière du véhicule. Dans les deux cas, on peut diviser l'ensemble de ces systèmes en deux catégories : les suspensions à essieu rigide et les suspensions à essieu indépendant. Généralement, le train avant est équipé d'une suspension indépendante tandis que

celui d'arrière est équipé d'un essieu rigide. Pour le train avant, trois configurations sont courantes:

- **Macpherson**: c'est la suspension la plus utilisée en automobile. Le combiné ressort-amortisseur est ici un élément à part entière du train avant puisqu'il assure la liaison entre le moyeu et la caisse, à même titre que le triangle inférieur (liaison Rotule au niveau du moyeu et pivot avec la caisse). Dans cette situation, il faut alors être vigilant quant au dimensionnement du combiné car il doit subir des efforts importants. (figure I.6.a) [3].

- **Double triangulation**: Cette architecture est utilisée sur les véhicules à tendance sportive ou haut de gamme car elle est plus coûteuse, mais aussi plus efficace quant à la conservation de la géométrie initiale du train (parallélogramme déformable). (figure 1.6.b).

Dans cette situation, le combiné ressort amortisseur n'a plus à assurer à lui seul la rigidité et la robustesse du train puisque c'est le rôle des deux triangles.

- **Le Multilink**: c'est la configuration la plus récente, elle est utilisée sur certains modèles de voitures de luxe. On retrouve toujours deux triangles mais la partie supérieure est composée de plusieurs parties articulées afin d'augmenter les possibilités de réglages du train pour optimiser la tenue de route. On remarque également que dans ce cas l'amortisseur et le ressort forment deux pièces distinctes contrairement aux modèles précédents. (figure I.6.c) [3].

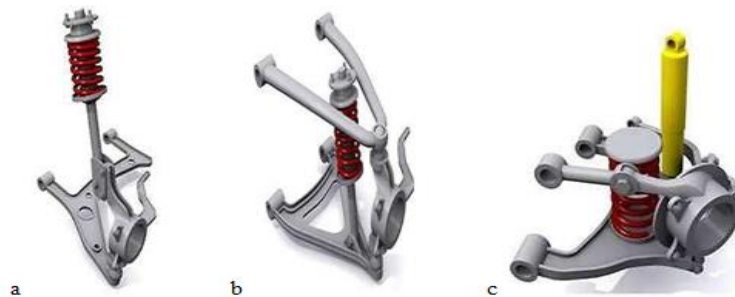


Figure I.6 Architectures de suspension des trains arrière

Pour le train arrière, de multiples configurations existent du fait des différents modes de transmission (traction, propulsion, 4x4), cependant, certaines sont plus couramment utilisées, en particulier [3]:

- **Essieu de torsion**: il fait partie de la classe des essieux à roues dépendantes. En effet, les roues sont reliées par une barre qui admet une certaine flexibilité, une barre rigide appelée barre Panhard qui fait la liaison entre une extrémité de l'essieu et la carrosserie sert à maintenir la

caisse latéralement au-dessus de l'essieu et limite ainsi ses mouvements horizontaux. Cette configuration est très populaire pour les véhicules à traction avant car c'est une solution simple, robuste et peu coûteuse. (figure I.7.a)

• **Le train multi bras:** il veille à une répartition équilibrée de la charge.

L'architecture complexe du guide d'essieu garantit un appui optimal à la carrosserie et une direction précise qui renforcent la stabilité du véhicule. (figure I.7.b)

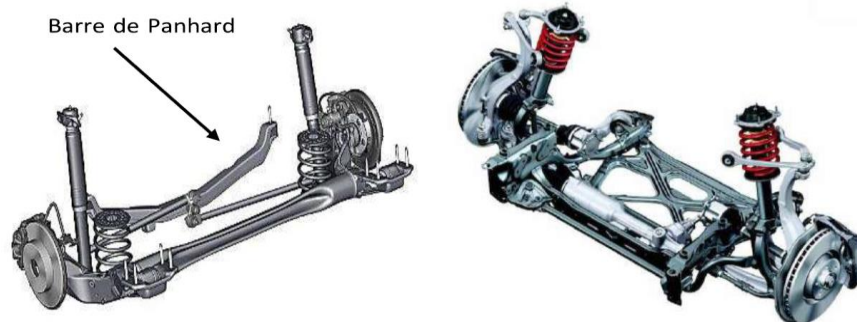


Figure I.7 Architectures de suspension des trains arrière

I.5 Composantes principales d'une suspension

Les amortisseurs et les ressorts représentent les deux parties fondamentales d'une suspension. Ils sont situés entre la masse non-suspendue (roues, axes, moyeux) et la masse suspendue (carrosserie et superstructure) d'un véhicule. Afin de maîtriser les mouvements de ces deux masses distinctes, les ressorts et les amortisseurs fonctionnent en mutualisme, comme dans une unité inséparable. Malgré son nom, qui suggère le contraire, ce n'est pas l'amortisseur mais le ressort qui amortit les chocs [2].

I.5.1 Ressorts

I.5.1.1 Définition générale du ressort

Un ressort est un système dont la fonction est de se déformer sous l'action d'une force ou d'un couple puis de restituer l'énergie emmagasinée à la reprise de sa forme initiale.

I.5.1.2 Rôle d'un ressort

Le rôle des ressorts est d'atténuer les chocs provoqués par les inégalités de la route sur l'une des roues qui se répercutent sur l'autre roue fixée sur le même essieu, donnant ainsi lieu à une variation de carrossage des roues et à un déplacement latéral

Les ressorts contrôlent le mouvement vertical de la roue par rapport à la caisse (le débattement). Plus le ressort est raide, plus il faut un effort important pour que la roue ait un débattement. Lorsqu'une voiture roule en ligne droite, plus ses ressorts sont souples, plus la suspension absorbe les bosses, donc les pneus restent mieux collés à la route. En revanche, le transfert de charge vertical est plus important en cas de freinage, délestant les pneus arrière, ce qui fait perdre de l'efficacité au freinage. Lorsqu'une voiture aborde un virage, là aussi, plus les ressorts sont souples, plus les pneus collent à la route. En revanche, plus ils sont souples, plus l'entrée et la sortie du virage sont difficiles et la voiture devient lente à réagir [1].

Les ressorts les plus utilisés sont les ressorts à spirale cylindrique (hélicoïdaux) dotés de hautes caractéristiques mécaniques. Dans les voitures conventionnelles, les ressorts sont gros et ils englobent les amortisseurs afin d'assurer le confort le plus optimal possible [1].

I.5.1.3 Types de ressorts

I.5.1.3.1 Ressorts à lames

La suspension avec des ressorts à lames est très ancienne et était déjà largement utilisée par les véhicules hippomobiles. L'avantage de cette solution est la simplicité de l'installation, l'essieu étant directement tenu et guidé par le ressort. Le ressort à lames est constitué en une série de lames superposées de longueur de plus en plus faible et disposées selon la forme d'une pyramide inversée [1].



Figure I.8 Ressort à lames

I.5.1.3.2 Ressorts hélicoïdaux

Appelés aussi ressorts à boudin, ces ressorts sont les plus répandus aujourd'hui. Leur géométrie et la gamme de matériaux disponible permettent une bonne compacité. De plus, il est facile de les associer à un amortisseur disposé axialement et ancré aux mêmes points que le

ressort. Nécessairement, ils doivent être couplés à un mécanisme de suspension liant la roue au châssis, et ne peuvent pas comme dans le cas du ressort à lames assurer seuls cette liaison mécanique.



Figure I.9 Exemple d'un ressort à spirale cylindrique

I.5.1.3.3 Le ressort de torsion

Un ressort de torsion est un composant qui permet à une pièce en rotation de reprendre sa place d'origine lorsque l'effort disparaît. Il faut prévoir que le mouvement répété risque de détériorer de manière définitive un tel ressort, d'où l'importance de la phase d'étude avec la prise en compte de ses caractéristiques physiques et de la matière avec laquelle il est réalisé.



Figure I.10 Ressort de torsion

I.5.2 Amortisseurs d'un véhicule

I.5.2.1 Définition d'un amortisseur

Un amortisseur est un système mécanique destiné à affaiblir la violence d'un choc et diminuer l'amplitude des oscillations d'un objet en amortissant ses vibrations, généralement par dissipation d'énergie [6].



Figure I.11 Aperçu d'un amortisseur monté sur une roue

De nombreux principes physiques peuvent être utilisés pour absorber l'énergie cinétique de l'objet en mouvement ; Pertes de charge d'un fluide, frottement, comportement hystérétique, etc. Cette énergie est souvent transformée en chaleur.

I.5.2.2 Rôle de l'amortisseur

- ✓ **Confort** : L'amortisseur absorbe les chocs dus aux déformations de la chaussée et préserve ainsi le confort du conducteur et ses passagers.
- ✓ **Longévité** : Bien entretenue, l'amortisseur participe à préserver le bon état et l'efficacité des autres éléments du système de suspension et de liaison au sol, favorisant l'adhérence de la voiture à la route.
- ✓ **Sécurité** : Il permet de maintenir les roues de la voiture en contact avec le sol et donc de favoriser la sécurité des usagers, en particulier en cas de virage brutal ou de freinage d'urgence.

I.5.2.3 Fonctionnement d'un système d'amortissement

Le système de suspension est composé d'un ressort et d'un amortisseur à proprement parler. Le rôle des ressorts est de supporter la charge du véhicule. Ils se compressent et se détendent en fonction des mouvements du véhicule.

Cependant, une voiture équipée seulement de ressorts subirait des rebonds sans fin au moindre passage de bosse et le véhicule serait incontrôlable, même à faible vitesse. Le rôle de l'amortisseur est donc de freiner les oscillations des ressorts. L'objectif est de maintenir le contact permanent des roues sur la chaussée de façon à garantir la sécurité et le confort des passagers.

L'amortisseur est constitué d'une tige, d'un piston, d'un tube intérieur où coulisse le piston et d'un tube extérieur servant de réservoir lors de la phase de compression. Ce système fonctionne à l'aide d'un fluide hydraulique appelé « huile ». Quand le véhicule roule, le ressort

se comprime et met en mouvement la tige et le piston à l'intérieur du cylindre rempli d'huile. Ce piston alors fait pression sur l'huile qui est chauffée du tube intérieur via le clapet dans le tube extérieur. Lorsque le ressort se détend, c'est l'action inverse qui se produit.

Avec le déplacement de la tige vers le haut du cylindre et l'huile est transféré du tube extérieur dans le tube intérieur, ces mouvements transforment l'énergie cinétique (les oscillations du véhicule) en chaleur. L'amortisseur permet de compenser le mouvement du ressort et donc d'adapter la souplesse du véhicule au relief de la route. Il limite la fréquence et l'ampleur des oscillations générées par la voiture en mouvement [5].

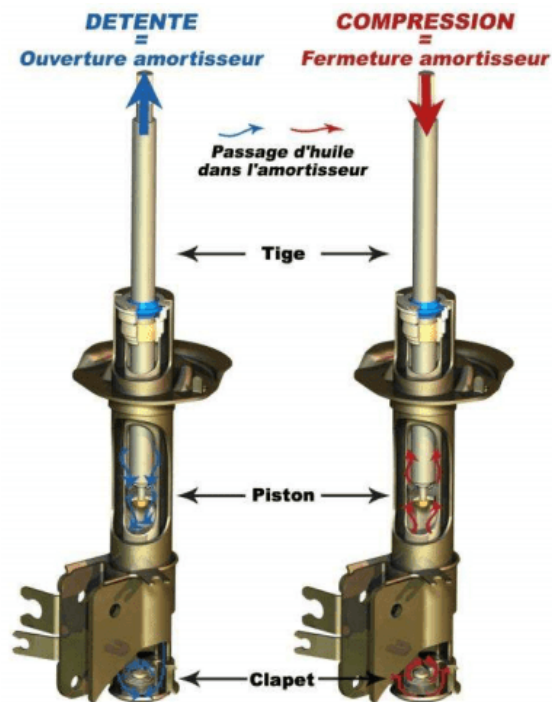


Figure I.12 Exemple d'un amortisseur hydraulique

I.5.3 Types d'amortisseurs d'un véhicule

On distingue deux types d'amortisseurs les plus utilisés dans un véhicule qui sont les amortisseurs à fluide et les amortisseurs à effet magnétique

I.5.3.1 Amortisseurs à fluide

Les amortisseurs à fluide représentent la très large majorité des systèmes actuels, on trouve plusieurs modèles dont les plus connus sont :

I.5.3.1.1 Amortisseurs hydrauliques à ressort



Figure I. 13 Exemple d'un amortisseur hydraulique à ressort

Il s'agit du modèle le plus courant, équipant la quasi-totalité des automobiles actuelles. Le mouvement de la tige provoque celui d'un piston à travers un fluide visqueux tel que l'huile, qui est forcé de traverser le piston par de petits orifices. Cet écoulement forcé dissipe de l'énergie sous forme de chaleur, qui est à son tour dissipée dans l'atmosphère. D'autre part, cela résiste au mouvement du piston d'autant plus fortement qu'il se déplace vite. Des systèmes sophistiqués de valves permettent pour certains modèles d'autoriser le fluide à s'écouler différemment dans un sens, ce qui permet d'avoir une résistance au mouvement différente à l'extension et à la compression.

I.5.3.1.2 Amortisseurs oléopneumatiques ou hydropneumatiques

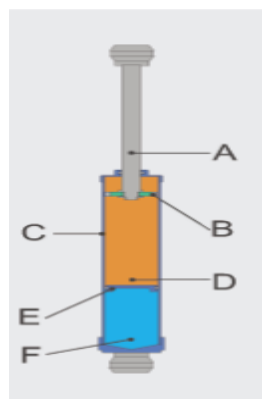


Figure I.14 Schéma d'un amortisseur oléopneumatique

Ils se déclinent en de nombreuses variations qui comportent toutes au moins une chambre (F) contenant un gaz comprimé (air ou azote), ainsi qu'une chambre (D) contenant un fluide visqueux tel que de l'huile.

Les deux chambres sont séparées le plus souvent par un piston flottant interne (E) qui évite le mélange du gaz et l'huile.

Lorsqu'on appuie sur la tige (A), elle entre dans le corps (C) et diminue le volume disponible pour les fluides. Les liquides étant quasi incompressibles, le gaz se comprime et sa pression augmente, ce qui tend à repousser la tige en position étendue ; Le gaz agit comme un ressort, mais présente l'avantage de résister plus progressivement à l'enfoncement. Le mouvement de la tige force l'huile à traverser le piston (B) à travers de petits orifices qui y sont percés, freinant le déplacement d'autant plus fort qu'il est rapide, de la même manière qu'un amortisseur classique. Ce système équipe la très grande majorité des avions de ligne moderne car s'il est plus cher et complexe que l'amortisseur à ressort, il est à la fois très compact, fiable, léger et robuste. Ce système a été repris et transformé en une version active par Citroën pour la suspension hydropneumatique montée sur ses modèles moyen-haut et haut de gamme.

I.5.3.2 Amortisseurs hydrauliques

I.5.3.2.1 Amortisseurs hydrauliques à palettes

Ancien système d'un fonctionnement similaire au vérin rotatif, il est constitué d'un corps dans lequel une palette immergée dans un bain d'huile freine par l'intermédiaire de clapets tarés le passage d'une chambre à l'autre. Cette palette est reliée fixement à un bras lui-même relié à l'essieu. Différentes solutions permettent d'avoir une règle d'amortissement pour la compression et une autre pour la détente. Ce dispositif équipera des automobiles de grandes séries et de compétition jusqu'aux années 1960. La marque Houdain était très connue [6].

I.5.3.2.2 Amortisseurs hydrauliques à levier

Même technique que le vérin rotatif à pignon-crémaillère, C'est un corps de vérin rempli d'huile dans lequel se déplace un piston-crémaillère qui actionne un pignon relié à la suspension. Cet amortisseur fait partie de la suspension avant des véhicules Austin A40.

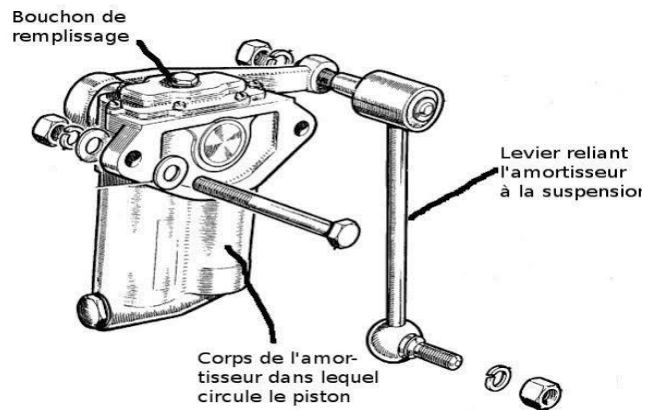


Figure I.15 Schéma d'un amortisseur hydraulique à levier

I.5.3.2.3 Amortisseur pneumatique

Fondé sur le principe du vérin ou du coussin gonflable, cet amortisseur a un emploi très diversifié tant dans le domaine :

- ✓ Dans le transport où on a la suspension des véhicules de transport (modèle Stadia de Berliet) ou suspension de cabines des gros camions.
- ✓ Dans les séismes, pour l'amortissement des mouvements sismiques appliqués aux installations et immeubles. Ces amortisseurs sont placés sous l'installation en position verticale et horizontale



Figure I.16 Exemple d'un amortisseur pneumatique

- ✓ Dans l'isolation des installations fonctionnant avec des systèmes à vibration (grille de décochage de fonderie, transporteur vibrant).

I.5.3.2.4 Amortisseur à inertie

C'est un modèle d'amortisseurs adopté par Citroën pour sa 2 CV. Il est composé d'un cylindre rempli d'huile et dans lequel une masse en fonte (bateur à inertie) se déplace librement entre deux ressorts.



Figure I.17 Exemple d'un amortisseur à inertie

I.5.3.3 Amortisseurs à effet magnétique

I.5.3.3.1 Amortisseurs magnéto-rhéologique

Le système est fondé sur le comportement d'un fluide qui varie par l'action d'un champ magnétique. De microscopiques particules magnétiques sont incorporées au fluide hydraulique (huile de synthèse), dont la viscosité varie en fonction de l'intensité du courant envoyé dans la bobine placée dans le corps du piston. Celui-ci est directement influencé dans son mouvement par l'épaississement du fluide qui s'écoulera plus ou moins lentement par les orifices pour passer d'une chambre à l'autre. Cette fluidité est contrôlée par un dispositif électronique propre à chaque amortisseur, ce qui pour un véhicule automobile, permet de régler la dureté de chaque amortisseur et l'adapter à la conduite désirée.

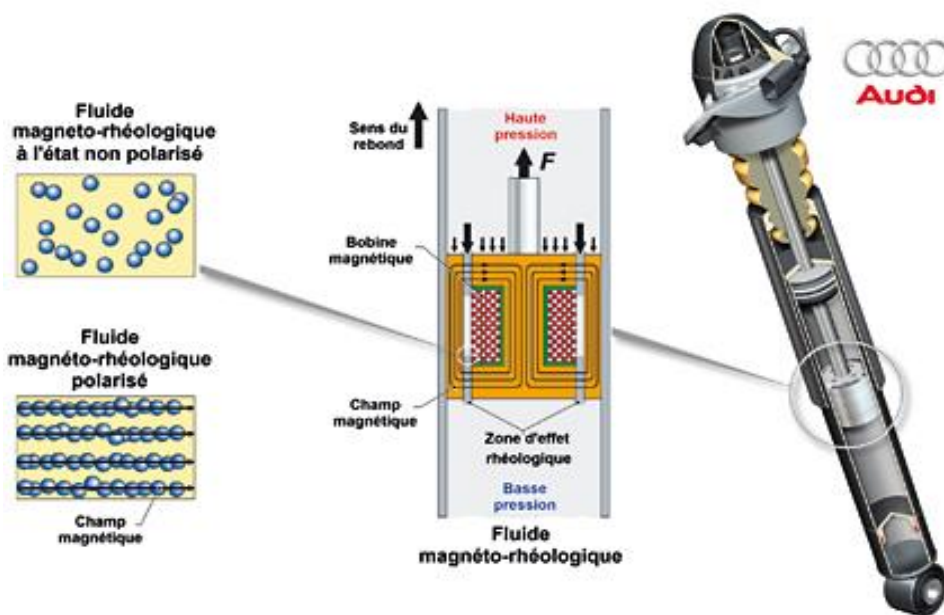


Figure I.18 Amortisseur magnéto-rhéologique

Ce système est utilisé sur certains modèles de véhicules dès 1989 sur Mazda 626 coupé avec trois positions confort/normal/sport. Audi (amortisseur magnétique avec tarage au choix, confort/sport sur TT Coupé 2006 et R8 - de l'équipementier BWI Group).

I.5.3.4 Amortisseurs électromagnétiques

I.5.3.4.1 Définition

L'amortisseur classique peut être complètement remplacé par un amortisseur à moteur linéaire. Ce type de moteur utilise une actuation quasi instantanée de position en fonction d'un signal électronique. Le système le plus connu est celui de la société Bose [6]. Ce système de suspension basé sur des moteurs électriques linéaires permet d'ajuster la souplesse et la dureté de la suspension en fonction du terrain et du souhait de l'utilisateur.

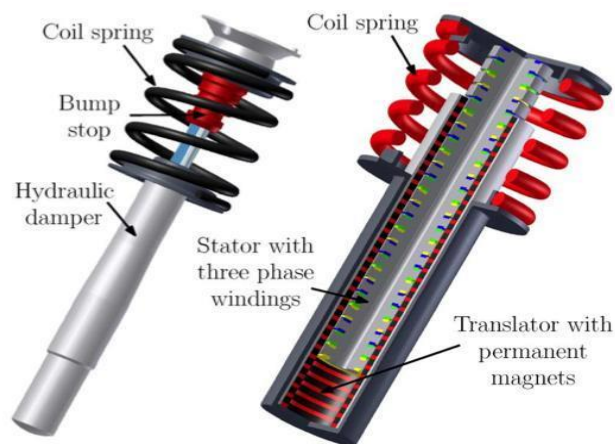


Figure I.19 Amortisseur électromagnétique

I.5.3.4.2 Principe de fonctionnement

Le cœur du système repose sur un moteur électromagnétique linéaire. Celui-ci remplace l'amortisseur et le ressort en acier des suspensions conventionnelles. Ainsi, le bras relié à la roue est mû par un champ électromagnétique, au lieu d'être freiné mécaniquement ou actionné par un fluide visqueux. Créé sous l'effet d'un courant électrique, le champ magnétique provoque non pas une rotation d'un élément à l'intérieur d'un autre, mais un déplacement linéaire de l'un par rapport à l'autre. Des capteurs mesurent en permanence les contraintes qui s'exercent au niveau de chaque roue. Sur la base de ces informations, les algorithmes de contrôle envoient ensuite des instructions aux amplificateurs de puissance qui pilotent les moteurs électromagnétiques linéaires. L'objectif est de réduire, voire d'allonger, les liaisons châssis-

roues suffisamment rapidement pour absorber les bosses, les nids de poule, ou encore l'effet de tangage et de roulis lié à la conduite du véhicule [6].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné un état de l'art sur les différents types de systèmes de suspensions et on a remarqué que les suspensions actives et semi actives peuvent effectuer un bon compromis entre le confort de conduite et la tenue de route. Nous avons aussi vu les différents types d'amortisseurs dans le véhicule automobile, leurs principes de fonctionnement et leurs importances cruciales dans le mécanisme de la structure de la voiture.

Dans le prochain chapitre, on va étudier les aimants permanents en détail en donnant leurs applications et leur rôle dans les systèmes de suspension.

Chapitre II

Généralités

Sur les aimants

permanents

II Généralités sur les aimants permanents

II.1 Introduction

Après l'introduction dans le chapitre précédent de quelques notions sur les amortisseurs en général, nous allons dans ce présent chapitre aborder la théorie des aimants du point de vue de leurs propriétés magnétiques, leurs différentes formes, leur classification et leur modélisation.

Les progrès considérables réalisés dans le domaine des matériaux à aimants permanents se manifestent par leur emploi croissant dans toutes les branches de l'industrie.

Les laboratoires s'occupent d'améliorer encore les aimants existants et d'en découvrir de nouveaux avec des performances plus élevées qui permettent de multiplier leurs applications dans de nombreux domaines.

II.2 Définition d'un aimant permanent

Les aimants permanents sont des matériaux magnétiques durs caractérisés par un cycle d'hystérésis très large. La partie utile de leurs caractéristiques $B(H)$, appelé courbe de démagnétisation est linéaire et située dans le quadrant du plan où $B > 0$ et $H < 0$. Ces matériaux sont généralement distingués selon trois principaux paramètres : l'induction rémanente (B_r), le champ magnétique coercitif (H_c) et la densité d'énergie maximale $(BH)_{max}$. Le choix d'un aimant pour une application donnée dépend de ces derniers paramètres, qui désignent les performances magnétiques ainsi que les contraintes thermiques et le coût [7].

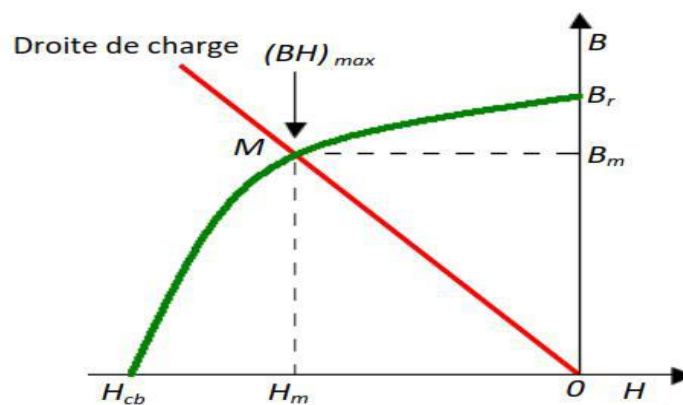


Figure II.1 Courbe de désaimantation.

II.3 Types d'aimants permanents

II.3.1 ALNiCo

Ces alliages sont à base de fer, d'aluminium et de nickel, additionnés de temps en temps de cobalt, de cuivre ou de titane, comme ils peuvent être isotropes ou anisotropes. On rencontre des aimants ayant une induction rémanante B_r avoisinant 0.7 Tesla pour les isotropes et 1.2 Tesla pour les anisotropes, avec une valeur faible de champ coercitif de l'alimentation (H_c) variant de 40 à 80 A/m et une énergie spécifique allant de 10 à 18 kJ/m³. L'amélioration de la coercivité s'obtient par l'ajout de niobium [8][9].



Figure II. 2 Familles des aimants permanents métalliques (Alnico).

II.3.2 Ferrites

Composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium, ces aimants sont obtenus par frittage et sont capables de performances intéressantes. Ils se sont imposés dans de très nombreuses applications pour leur prix compétitif et leur rigidité magnétique élevée.

En raison de leur faible valeur d'aimantation rémanante (environ 0.4 Tesla, voir figure II.5), les ferrites sont plutôt utilisés dans des machines à aimants de faible puissance, nécessairement à faible coût. Ce type d'aimant est beaucoup plus utilisé dans les machines à concentration de flux (pour atteindre des couples massiques plus élevés).



Figure II. 3 Familles des aimants permanents un exemple en ferrites

II.3.3 Terres rares

Les terres rares telles que le samarium-cobalt et le néodyme-fer-bore, sont beaucoup plus performants en termes de densité volumique d'énergie que d'autres types d'aimants (voir Figure II.5). Le samarium-cobalt autorise une température de fonctionnement élevé (jusqu'à 350 °C), mais la présence du cobalt dans sa composition entraine un coût onéreux, voire carrément l'interdiction en domaine d'automobiles notamment où les normes environnementales s'opposent à son emploi. Le composé néodyme-fer-bore (NdFeB) est réputé pour ses performances supérieures au composé samarium-cobalt, tout en étant nettement moins couteux, il est cependant moins résistant à haute température (pas plus de 160 °C). Le choix d'aimants permanents utilisés dans les machines électriques est relatif aux types d'applications. Sur les machines où sont employées les applications à haute température, on recourt aux aimants samarium-cobalt. Dans les machines à puissance élevé, compte tenu du volume d'aimants utilisé et du coût associé, on préfère employer les aimants néodyme-fer-bore (Nd-Fe-B). Dans le cadre de notre travail, une nuance de ce type d'aimants est employée dans les machines doublement saillantes à aimants permanents et à plots dentés[10][11][12].

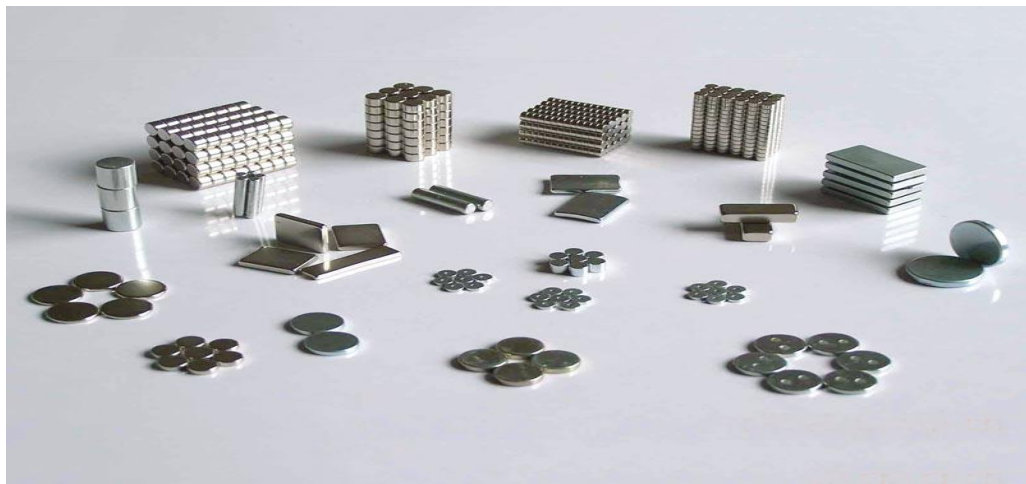


Figure II. 4 Familles des aimants permanents en terre rare

- ❖ Une courbe des principaux types d'aimants :

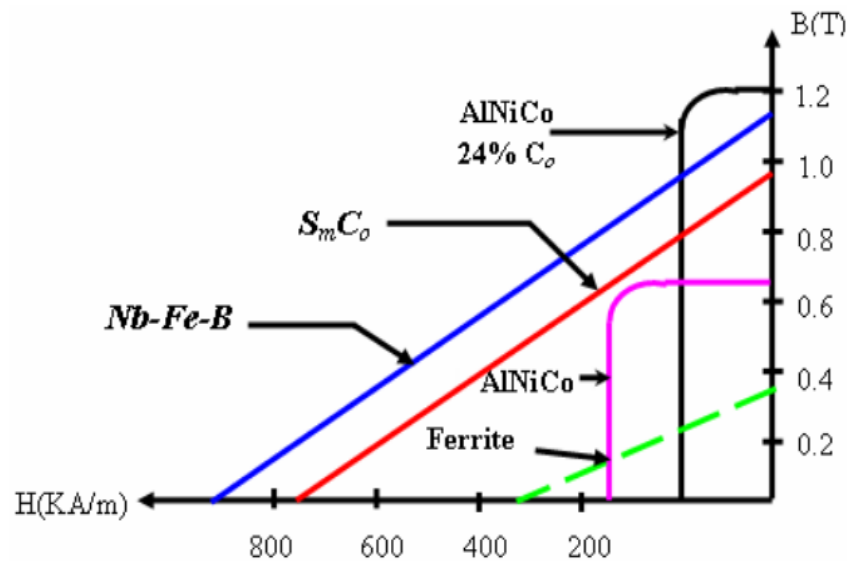


Figure II.5 Courbe de désaimantation $B(H)$ des principaux types d'aimants.

II.4 Puissance magnétique des aimants

La puissance d'un aimant c'est-à-dire son attraction est mesurée en Newton, cette force diffère selon la matière de l'aimant

- Un aimant en ferrite isotrope possède en moyenne une force d'attraction de 0,9 N tandis qu'un aimant en ferrite anisotrope a une force d'attraction de 2,1 N.
- Un aimant en ALNiCo possède une force d'attraction globale de 7,8 N, un aimant en SmCo a une force d'attraction de 10 N et un aimant en néodyme a une force d'attraction de 15 N [13].

II.5 Caractéristiques générales d'un aimant permanent

II.5.1 La polarité de l'aimant permanent

Tous les aimants possèdent deux pôles magnétiques qui sont reliés par un axe dipolaire, les deux pôles nommés « nord » et « sud » en fonction des pôles géographiques terrestres vers lesquels ils sont attirés.

Les aimants interagissent entre eux, deux pôles de même nom se repoussent et deux pôles de noms différents s'attirent. Un aimant crée dans son espace environnant un champ magnétique maximum autour de ces deux pôles, et qui est orienté parallèlement à l'axe, tandis

qu'il décroît avec la distance à l'aimant ; l'effet combiné des deux pôles forme hors de cet axe des lignes de direction du champ magnétique orientées le long de cercles passant par le centre magnétique entre les deux pôles. Si un dipôle magnétique se trouve dans un champ magnétique, chaque pôle subit une force. Elles sont de même valeur, mais de directions contraires ; il en résulte un moment mécanique de rotation [14].

II.5.2 Caractéristiques techniques générales

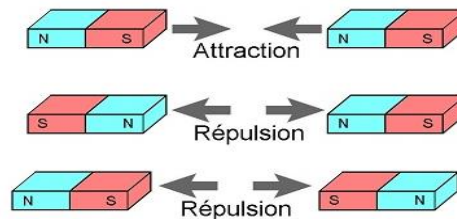


Figure II. 6 Les interactions entre les pôles d'un aimant permanent.

➤ L'induction rémanente ou le champ rémanent (B_r) est le champ magnétique existant dans le matériau en l'absence de courant électrique, donc on fait décroître l'excitation magnétique (H) jusqu'à zéro, on a l'équation permettant de relier l'induction au champ magnétique :

$$B = \mu_0 (H + M) \text{ quand } H = 0 \text{ donc } B = B_r = \mu_0 M$$

- B : induction magnétique en (T).
- H : l'excitation ou le champ magnétique en (A/m).
- M : l'aimantation magnétique en (A/m).
- μ_0 : perméabilité magnétique du vide en (H/m) [14].

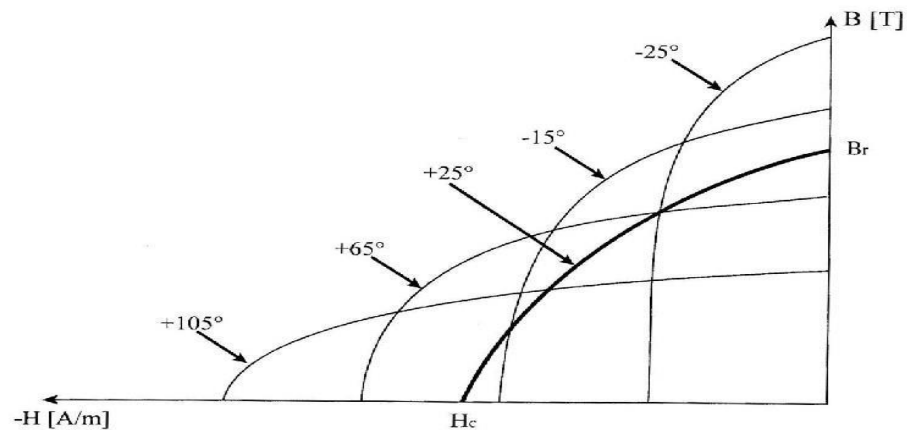


Figure II.8 Influence de la température sur la courbe de désaimantation.

➤ **T coef de B_r** : est le coefficient de température de (B_r) en termes de % par degré centigrade. Cela veut dire comment le flux magnétique change en ce qui concerne la température. La variation due à la température qui est définie par le coefficient de variation de l'induction : $\alpha_B = (\Delta B / B \Delta T^\circ) \cdot 100\%$

Avec : ΔB est la variation de B en fonction de la variation de la température ΔT° [13].

➤ **BH_{max}** : Terme de densité d'énergie complète. Plus haut est le nombre, plus puissant est l'aimant, Ce produit représente l'énergie maximum qui peut être emmagasinée dans un aimant. Le produit énergétique maximum est la surface du plus grand rectangle inscrit dans le cycle d'hystérésis du matériau. L'unité utilisée est le méga Gauss Oersted ($MGOe$) ou ($kJ.m^3$)

➤ **T_{max}** : Température maximale en ($^\circ C$) à laquelle l'aimant fonctionnera sans détérioration (réversible) [13].

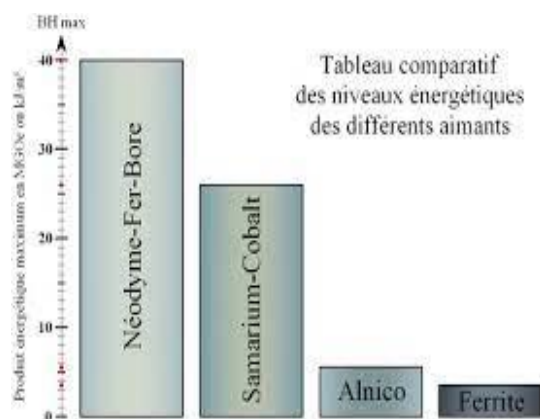


Figure II. 9 Tableau comparatif des niveaux énergétiques des différents aimants

Tableau II.1 Quatre classes principales des aimants avec leurs caractéristiques techniques générales

Classe	Br	Hc	BH max	T coef de Br	T max	T de Curie
Ferrite	0.39 T	0.32 Oe	3.5 MGOe	0.20%	280°C	460°C
Alnico	1.25 T	0.064 Oe	5.5 MGOe	-0.02%	540°C	800°C
SmCo	1.05 T	0.92 Oe	26 MGOe	-0.04%	300°C	750°C
NdFeB	1.28 T	1.23 Oe	40 MGOe	-0.12%	80°C	310°C

II.6 Les avantages et les inconvénients des aimants permanents

II.6.1 Les avantages des aimants permanents

Nous allons préciser ici les avantages des aimants et les types à utiliser. Dans cette application, l'aimant remplace l'inducteur et son bobinage en cuivre, ce qui pour des machines ou un moteur de même puissance amène les avantages suivants:

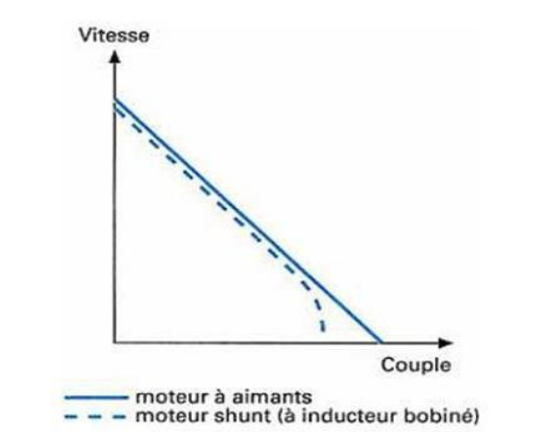


Figure II. 10 Avantage (couple-vitesse) d'un inducteur à aimant permanent.

- L'aimant permanent produit une puissance magnétique (**BH**) *max* importante par rapport à un enroulement bobiné, on a aussi une diminution de phénomène d'élévation de la température à cause d'absence de bobinage en cuivre à l'inducteur [16][17].
- L'amélioration de la fiabilité, car les risques de cassure ou de rupture de fil sont éliminés pour l'inducteur, qu'est un aimant permanent.

- Diamètre de la machine sera plus faible, de l'ordre de (15 à 30 %) avec des ferrites et pouvant dépasser (50 %) avec des aimants (Néodyme-Fer-Bore). Les moteurs à aimants occupe (1/3) d'espace en moins que les moteurs asynchrones donc sont moins encombrants.
- Le champ magnétique créé par un aimant est supérieur à celui créé par un bobinage. On peut ainsi obtenir dans des systèmes fortement miniaturisés des inductions de l'ordre de Tesla avec des aimants de type (Nd-Fe-B), c'est la raison pour laquelle les moteurs de petite dimension sont généralement à aimants permanents [17][18].
- Le montage étant plus facile et plus rapide, la fabrication des moteurs à aimants est plus simple à automatiser que celle des moteurs à inducteur bobiné.

II.6.2 Les inconvénients des aimants permanents

- ❖ Les aimants permanents deviennent plus coûteux pour les machines de plus forte puissance que les machines à inducteurs bobinés. Ils sont alors réservés aux applications où les gains de volume et de poids sont les critères principaux de conception. Les moteurs à aimants en ferrites nécessitent des épaisseurs et donc des volumes plus élevés que les moteurs à aimants (Nd-Fe-B). Ils restent cependant, pour une même puissance, moins chers que les moteurs à aimants (Nd-Fe-B) [18].
- ❖ Le flux inducteur n'est pas réglable dans le cas d'aimants permanents, donc cette non-régulation de flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse.
- ❖ La désaimantation des aimants permanents (réversible ou irréversible) durant l'exploitation. Cela est dû à la variation de l'induction qui modifie la structure de l'alliage qui constitue les matériaux magnétiques, donc le champ magnétique s'annule. La désaimantation des aimants permanents est due ainsi à plusieurs effets :

L'effet thermique : c'est la température d'aimant qui augmente jusqu'à (*T de Curie*) du matériau (les ferrites sont très sensibles aux variations de la température) [13].

Les effets mécaniques : comme les chocs, les vibrations, et les surcharges dynamiques influent directement sur l'induction magnétique de l'aimant [13].

L'effet de vieillissement: les fabricants d'aimants commercialisent en principe des matériaux dont la stabilité physico-chimique est parfaitement établie, mais il peut y avoir néanmoins des signes de vieillissement magnétique, on pourra trouver que le champ magnétique créé par l'aimant dans l'entrefer décroît légèrement et régulièrement au cours du temps. L'aimant permanent a une durée de vie [13][17].

* Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant satirique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes satiriques par effet Joule.

* certains aimants (comme Nd-Fe-B) peuvent se détériorer par désintégration. Les fissures qui se forment lors de la fabrication peuvent conduire à la désintégration à grande vitesse. La désintégration entraîne la perturbation du flux dans l'entrefer causant ainsi le déséquilibre de l'attraction magnétique entre le rotor et le stator [19][20][18].

II.7 Domaines d'application des aimants permanents

Les aimants permanents sont utilisés comme transducteurs d'une forme d'énergie en une autre forme d'énergie sans perdre leur propre énergie. On peut classer les applications en fonction des types d'énergie considérée suivants:

II.7.1 Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique

Il s'agit des systèmes à entrefer fixe, on trouve dans cette catégorie les deux principales applications dans le monde, qui utilise environ 90% du tonnage des aimants fabriqués annuellement : les haut-parleurs et les moteurs électriques. Cette catégorie comprend d'autres applications comme les appareils de mesure et les spectromètres de masse [11].

II.7.2 Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique

Il s'agit des systèmes à entrefer fixe, cette conversion concerne les dispositifs suivants: les générateurs de courant continu, les alternateurs, les dynamos de cycle et les détecteurs magnétiques [17].

II.7.3 Conversion d'énergie mécanique à une autre forme d'énergie

Il s'agit des systèmes à entrefer variable qui permettent l'attraction et la répulsion, ces fonctions sont utilisées dans : la retenue et le levage, les filtres magnétiques, les thermostats, les suspensions magnétiques, les prothèses dentaires, les séparateurs des minerais, etc [17].

II.7.4 Conversion d'énergie mécanique en énergie thermique

Dans une transmission par courants de Foucault, une partie d'énergie mécanique est convertie en énergie thermique, on peut citer comme applications : les compte-tours, les freins magnétiques de poids lourds, les dispositifs d'amortissement d'oscillations, les dispositifs de freinage sans contact et les tachymètres.

II.7.5 La création d'un champ magnétique fixe

On peut citer les applications suivantes : la résonance nucléaire (RMM), les résistances magnétiques et l'influence d'un champ magnétique sur les phénomènes biologiques ou botaniques [17].

*Différentes figures illustratives de l'utilisation des aimants permanents :



Figure II. 11 Disque dur d'un ordinateur.

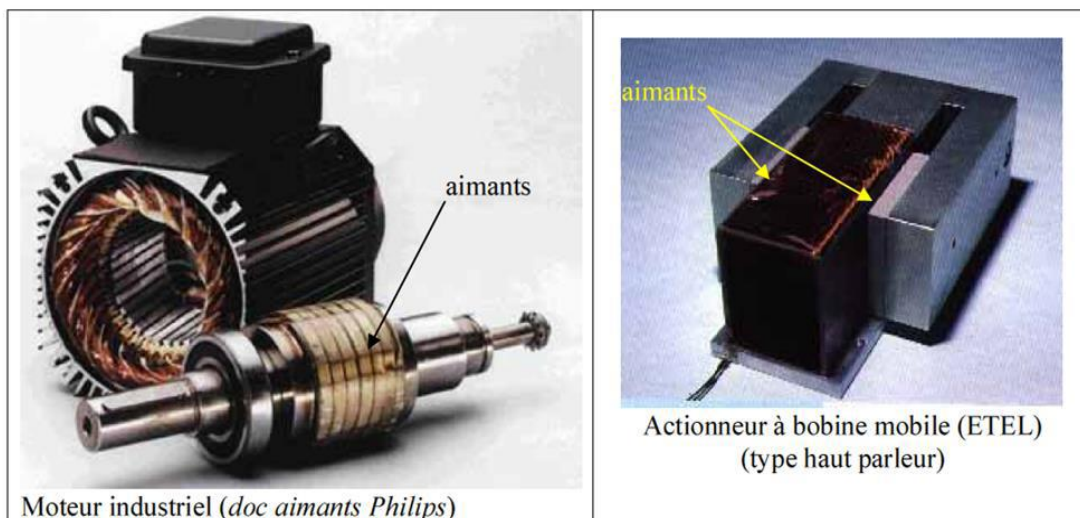


Figure II. 12 Exemple d'utilisation des aimants permanents.

II.8 Modélisation des aimants permanents

Le but de la modélisation est de résoudre mathématiquement l'hystérésis de l'aimant permanent ou du moins sa courbe représentative. Pour l'étude du champ magnétique et de l'hystérésis des aimants permanents et des matériaux magnétiques, plusieurs analyses et modèles dynamiques et électrodynamiques sont nécessaires. Néanmoins, nous nous baserons toujours sur le modèle d'Ampère, dont le résultat sera obtenu en déterminant le potentiel vectoriel \vec{A} obtenu.

II.8.1 Principe d'équivalence

Un aimant génère un champ magnétique, tout comme le champ magnétique généré par un courant électrique à son tour. Si une source de champ magnétique composée d'un conducteur passant le courant produit la même distribution spatiale de champ qu'un aimant, alors ces deux entités sont équivalentes car il n'y a pas de méthode de mesure pour les distinguer.

II.8.2 Modélisation ampérienne d'un aimant

Comprend la considération que le magnétisme des objets est expliqué par les courants élémentaires créés par les électrons autour du noyau. Le modèle est basé sur une analogie entre la boucle de courant, qui produit un champ magnétique, et les nombreux électrons qui décrivent chaque cercle autour d'eux comme illustré la figure ci-dessous :

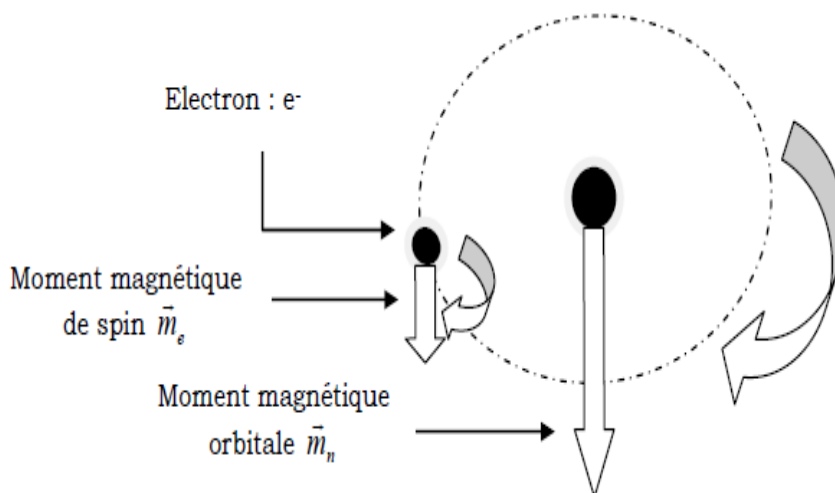


Figure II. 13 Moments magnétiques orbital et de spin

Le moment magnétique \vec{m} a deux origines :

- Mouvement orbital autour du noyau \vec{m}_n .

- Mouvement de rotation de l'électron sur lui-même \vec{m}_e .

Ce moment magnétique est équivalent à celui d'une bobine de surface S portée par le courant I comme le montre la figure ci-dessous :

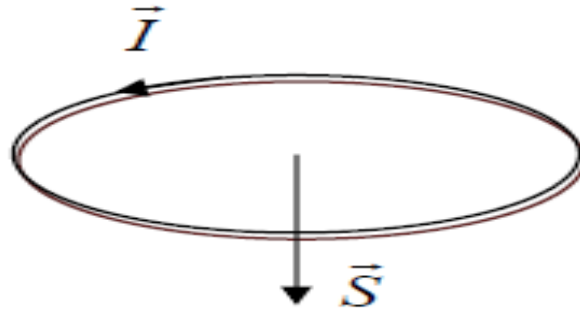


Figure II. 14 Spire de courant de moment magnétique

De façon simplifiée, le modèle ampérien a pour conséquence l'équivalence d'un aimant à une bobine mince fictive de N spires. L'aimantation M est équivalente à une distribution de courants fictifs (courants ampériens) comme illustré dans la figure ci-dessous :

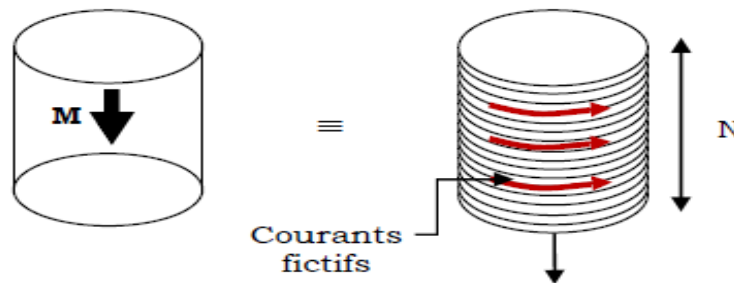


Figure II. 15 Modèle ampérien d'un aimant permanent

II.8.3 Modélisation Coulombienne

Dans l'approche Coulombienne, nous concentrons sur le calcul de H . Cette approche trouve son origine dans le travail des forces générées par les pôles de l'aimant. Il est encore couramment utilisé par les théoriciens. Il s'agit de résoudre l'équation du champ magnétique.

II.8.4 Modèles analytiques

Caractérisés par une description mathématique empirique générale du phénomène, ces modèles ne prennent pas en compte l'historique ou l'état d'aimantation initial du matériau, et ce n'est pas parce qu'ils ne permettent pas de décrire tous les aspects du phénomène d'hystérésis. Parmi ces modèles, nous citerons le modèle de type LANGEVIN, modèle polynomial et le modèle de Frélich.

II.9 Conclusion

Nous avons cité brièvement, dans ce chapitre, les différents types d'aimants permanents, tout en donnant leurs principales propriétés. Nous avons rappelé, en outre, dans quelles circonstances peuvent évoluer celles-ci, en mettant l'accent sur le côté électromagnétique qu'implique la prise en considération de toutes les contraintes, afin d'assurer un fonctionnement durable et optimale de cet aimant.

Plusieurs types d'aimants permanents sont utilisés actuellement dans la technologie. Cependant, les alliages à bases de terres rares possèdent une très grande valeur d'aimantation avec une grande rigidité. Ils présentent ainsi la solution adéquate pour les machines à large entrefer.

Le prochain chapitre, complétant cette étude, précisera le fonctionnement de ces aimants à l'échelle électromagnétique.

Chapitre III

Modélisation

électromagnétique et mécanique

III Modélisation électromagnétique

III.1 Introduction

Les phénomènes électromagnétiques étudiés au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu.

La connaissance du champ électromagnétique permet d'avoir accès au calcul des performances globales et au détail des conditions de fonctionnement de tout appareil électromagnétique que ce soit en régime permanent ou transitoire.

III.2 Modèle géométrique

La forme du système est représentée à partir du modèle géométrique illustré par la figure suivante:

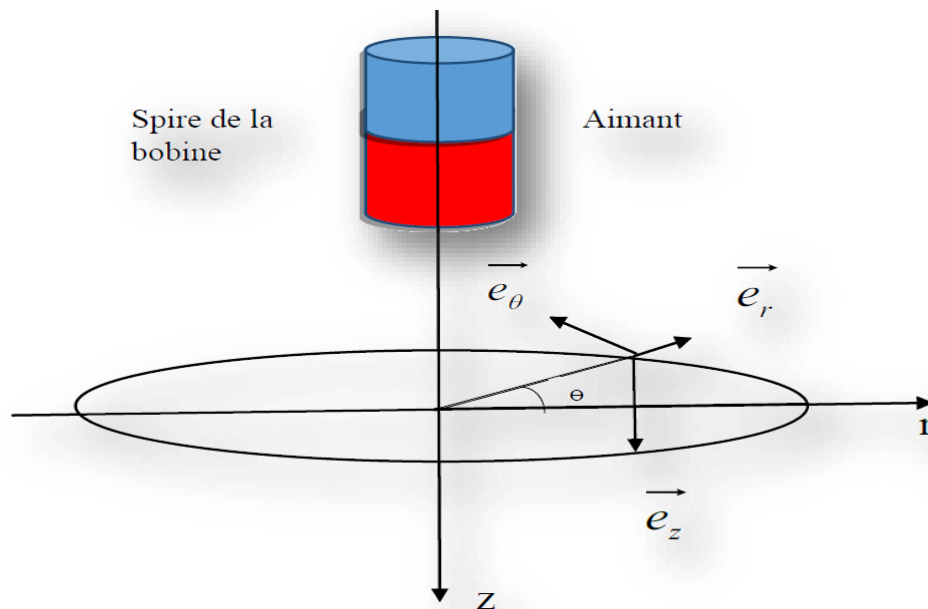


Figure III. 1 Schéma du système

L'aimant est représenté par un moment magnétique \vec{m} , qui au cours du mouvement reste toujours vertical et dirigé vers le bas. Son abscisse au cours de la chute est notée $z(t)$.

La spire est repérée par ses coordonnées cylindriques. Le système est axisymétrique et la densité de courant est dirigée suivant θ .

III.3 Modèle général de l'électromagnétisme

III.3.1 Les équations électromagnétiques

Les quatre équations de Maxwell sont à la base de tout phénomène électrique et magnétique. Elles sont aussi fondamentales en électromagnétisme que les lois de Newton en mécanique. Les équations de Maxwell permettent de faire une description complète de toutes les interactions électromagnétiques [21].

Nous disposons alors du système d'équations suivant :

❖ Equation de Maxwell-Faraday

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

❖ Equation de Maxwell-Ampère

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

❖ Equation de conservation du flux magnétique (Maxwell-Thomson)

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

❖ Equation de Maxwell-Gauss

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (3.4)$$

III.3.2 Comportement des milieux

Pour résoudre les équations de Maxwell, on doit leur associer des équations caractéristiques qui définissent le comportement des différents milieux.

En effet, il existe quatre types de milieux électromagnétiques :

A. Milieu isolant : caractérisé par la permittivité électrique du vide $\varepsilon = \varepsilon_0$ et $\mu = \mu_0$ ($\sigma = 0$) ($\varepsilon_r = 1$) et $\mu_r = 1$

B. Milieu conducteur : caractérisé par la conductivité $\sigma \neq 0$

C. Milieu électrique : caractérisé par la permittivité $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$

D. Milieu magnétique : caractérisé par la perméabilité $\mu = \mu_0\mu_r$

- Dans un milieu isolant :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3.5)$$

- Dans un milieu conducteur :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.6)$$

- Dans un milieu électrique :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.7)$$

- Dans un milieu magnétique :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.8)$$

III.4 Mise en équations du modèle ampérien

On simplifie le théorème d'ampère en négligeant le courant de déplacement dans l'équation de Maxwell-Ampère (3.2), on trouvera [22] :

$$r\vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} \quad (3.9)$$

Comme l'aimant est une matière aimantée et isolante donc la densité de courant est nulle ($\vec{J} = 0$). Dans ce cas, l'équation de Maxwell-Ampère devient :

$$r\vec{\text{rot}}\vec{H} = 0 \quad (3.10)$$

Le comportement de l'aimant est principalement caractérisé par le quart du plan pour lequel ($H < 0, B > 0$) du cycle $B(H)$ décrit par :

$$\vec{P} = \mu_0 \vec{M} \quad (3.11)$$

Où \vec{P} est la polarisation magnétique et \vec{M} est l'aimantation magnétique qui représente la densité volumique des moments magnétique telle que :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dt} \quad (3.12)$$

Dans la matière aimantée, l'induction magnétique s'écrit comme suit :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{P} \quad (3.13)$$

En remplaçant la relation (3.11) dans (3.13), on arrive à

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.14)$$

Donc

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \mu_0\vec{M} \quad (3.15)$$

En multipliant le tout par un $r\vec{0}t$ on arrive à

$$r\vec{0}t\vec{B} = \mu_0r\vec{0}t\vec{H} + \mu_0r\vec{0}t\vec{M} \quad (3.16)$$

De l'équation(3.10) et en remplaçant l'excitation magnétique donnée ci-dessus, on obtient

$$r\vec{0}t\vec{B} = \mu_0r\vec{0}t\vec{M} \quad (3.17)$$

En pratique, l'approche ampérienne est privilégiée dans les situations où il n'y a pas de matière aimantée et le champ est dû exclusivement à un courant équivalent

$$\begin{cases} r\vec{0}t\vec{B} = \mu_0\vec{J}_{\acute{e}q} \\ \vec{J}_{\acute{e}q} = r\vec{0}t\vec{M} \end{cases} \quad (3.18)$$

Potentiel magnétique vecteur déduite de la loi de Biot et Savart

$$\text{div}(\text{grad}A(p)) = -\mu_0J(q) \quad (3.19)$$

Grâce à l'axisymétrie du système, le potentiel vecteur magnétique est donné par la formule de Biot et Savart [23] :

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \frac{\vec{J}(P_0)dv_0}{|\vec{p} - \vec{p}_0|} \quad (3.20)$$

Le développement de l'intégrale de la relation (3.20) aboutie à l'expression du potentiel en fonction des intégrales elliptiques de Legendre respectivement de première $E_1(k)$ et deuxième espèce $E_2(k)$.

$$A(r, z) = \frac{\mu_0}{2\pi} I(r_0, z_0) \sqrt{\frac{r_0}{r}} \left[\frac{(2-k^2)E_1(k) - 2E_2(k)}{k} \right] = \frac{\mu_0 I}{2\pi} G(r, z) \quad (3.21)$$

$$\text{Avec } k = \sqrt{\frac{4rr_0}{(r+r_0)^2 + (z-z_0)^2}} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} E_1(K) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}} \\ E_2(K) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \end{cases} \quad (3.23)$$

III.4.1 Composantes normale et tangentielle de l'induction magnétique

Ces expressions sont des fonctions des coordonnées des spires émettrice et réceptrice. Elles sont appelées intégrales elliptiques de Legendre respectivement de première et deuxième espèce. D'après l'équation de Maxwell-Thomson (3.3), on a définis le potentiel magnétique \vec{A}

$$\vec{B} = r\vec{\omega}t\vec{A} \quad (3.24)$$

Le potentiel vecteur magnétique est angulaire $\vec{A} = A_\theta \vec{e}_\theta$

La relation suivante donne les composantes du champ comme suit :

$$\begin{cases} B_r = -\frac{\partial A}{\partial z} \\ B_\theta = 0 \\ B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r} = \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{A}{r} \end{cases} \quad (3.25)$$

Calcul de l'induction magnétique à partir du potentiel A :

$$EB = \left(\frac{2-K^2}{1-K^2} \right) \times E_2 - 2E_1 \quad (3.26)$$

$$GB = \left(\frac{z-z_0}{r\sqrt{rr_0}} \right) \times K \times EB \quad (3.27)$$

$$B_r = \frac{\mu}{8\pi} \times I_s \times GB \quad (3.28)$$

III.4.2 Champ électromoteur E

Le champ électromoteur est donné par la loi de Lorentz :

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (3.29)$$

$\vec{v} = \frac{dz}{dt} \vec{e}_z$ Vitesse de déplacement.

$$\vec{E} = \frac{dz}{dt} \vec{e}_z \times (B_r \vec{e}_r + B_z \vec{e}_z) = \frac{dz}{dt} \vec{e}_z \times B_r \vec{e}_r = \frac{dz}{dt} B_r \vec{e}_\theta = -\frac{dz}{dt} \frac{dA}{dz} \vec{e}_\theta = -\frac{dA}{dt} \vec{e}_\theta \quad (3.30)$$

D'après la loi d'Ohm, la densité de courant est : $\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \vec{e}_\theta$ (3.31)

III.4.3 Force de Laplace

La densité volumique de la force de Laplace est la force électromagnétique qu'exerce un champ magnétique sur un conducteur parcouru par une densité de courant.

$$\vec{f} = Idl \wedge \vec{B} = \vec{J} \wedge \vec{B} \quad (3.32)$$

On remplace les composantes du courant et du champ, on obtient

$$\vec{f}_L = J \vec{e}_\theta \times (B_r \vec{e}_r + B_z \vec{e}_z) = JB_r \vec{e}_\theta \times \vec{e}_r + JB_z \vec{e}_\theta \times \vec{e}_z = F_z \vec{e}_z + F_r \vec{e}_r \quad (3.33)$$

On s'intéresse à la force axiale, telle que :

$$F_z = JB_r \quad (3.34)$$

III.5 Le circuit électrique

III.5.1 Le principe de fonctionnement

Lorsque l'aimant permanent change de position verticalement, il va créer une variation du champ magnétique qui va induire un courant électrique variable dans la bobine qu'on doit redresser et stocker dans le condensateur.

Le schéma suivant montre les différents cas de fonctionnement du circuit :

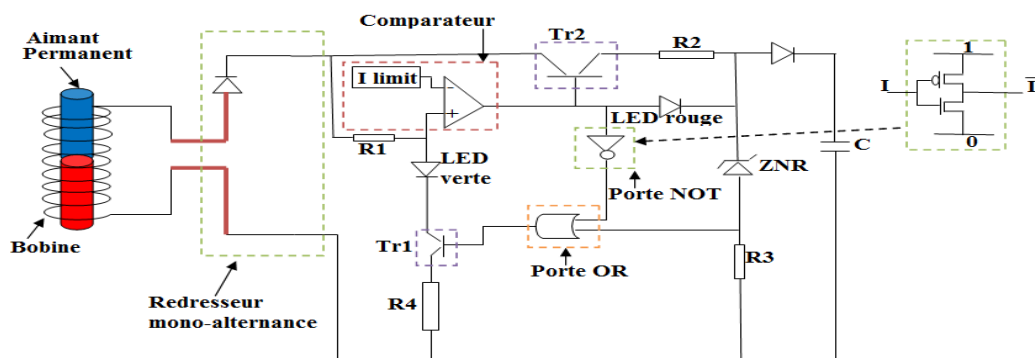


Figure III. 2 Schéma de récupération de l'énergie électrique générée par l'aimant

Dans le processus de stockage, on distingue trois situations :

➤ La première est lorsque la capacité est déchargée et le courant redressé est supérieur à une certaine limite I_L , le transistor $Tr1$ sera fermé et le courant va passer par ce transistor, ce qui va charger la capacité et la LED rouge sera allumée. L'expression de J est donnée par :

$$\frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{dA(p)}{dt} + g\vec{r}adv(p)\vec{e}_\theta = 0 \quad (3.35)$$

L'équation (3.35) définit le phénomène d'induction, telle que la densité de courant $J(p)$ est induite sous la variation temporelle du potentiel magnétique $A(p,q)$ et spatiale du potentiel électrique $V(p)$.

Le gradient du potentiel en coordonnées cylindrique s'écrit :

$$g\vec{r}dV(p) = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta \quad (3.36)$$

Notons que la circulation du courant est angulaire et qu'elle se fait le long du périmètre moyen de la spire. Cela implique que le gradient du potentiel suivant l'axe radial est nul $\partial V/\partial r = 0$, ce qui réduit le gradient du potentiel électrique à :

$$g\vec{r}dV(p) = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta \quad (3.37)$$

Or, tout le long du périmètre moyen, le courant est le même. Nous en déduisons que le gradient du potentiel est constant. En notant par $u(p)$ la tension induite aux bornes du contour, cette déduction nous amène à écrire :

$$\int_0^{u(p)} dV(p) = (g\vec{r}dV(p)\vec{e}_\theta)r(p) \int_0^{2\pi} d\theta \Rightarrow u(p) = 2\pi r(p)(g\vec{r}dV\vec{e}_\theta) \quad (3.38)$$

Enfin, la variation spatiale du potentiel électrique scalaire est exprimée en fonction de la tension induite $u(p)$ aux bornes de la spire et de sa géométrie, comme suit

$$g\vec{r}dV\vec{e}_\theta = \frac{u(p)}{2\pi r(p)} \quad (3.39)$$

En remplaçant l'équation (3.39) dans (3.35), on trouve :

$$\frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{dA(p)}{dt} + \frac{u(p)}{2\pi r(p)} = 0 \quad (3.40)$$

Le courant aux bornes du condensateur est :

$$I = C \frac{du}{dt} \quad (3.41)$$

Avec

$$J = \frac{I}{s} \quad (3.42)$$

Donc

$$Js = C \frac{du}{dt} \quad (3.43)$$

$$J = \frac{C}{s} \frac{du}{dt} \quad (3.44)$$

L'équation de la tension aux bornes du condensateur est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{C}{s\sigma(p)} \frac{du(p)}{dt} + \frac{dA(p)}{dt} + \frac{u(p)}{2\pi r(p)} = 0 \quad (3.45)$$

➤ Le deuxième cas est quand le courant mesuré est inférieur au courant limite I_L , le transistor **Tr1** sera bloqué et le courant passe par le transistor **Tr2**, l'énergie sera donc dissipée par la résistance **R4**, La LED verte sera allumée. L'expression de courant dans ce cas est donnée par l'équation (3.40)

$$\frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{dA(p)}{dt} + \frac{R_4 I(p)}{2\pi r(p)} = 0 \quad (3.46)$$

Donc

$$\frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{dA(p)}{dt} + \frac{R_4 s J(p)}{2\pi r(p)} = 0 \quad (3.47)$$

La solution de cette équation est numérique.

➤ Le troisième cas est lorsque le condensateur est complètement chargé, la diode ZNR sera polarisée en inverse et devient ainsi passante, donc le transistor **Tr2** sera passant et évacuera l'énergie par la résistance **R4**, les LEDs rouge et verte seront allumées. L'expression de \vec{J} est donnée par l'équation (3.47).

III.6 Modélisation mécanique du système

III.6.1 Oscillations linéaires libres non amorties

Nous avons un système composé d'un ressort hélicoïdal de voiture et d'une roue à un degré de liberté fixe qui ne bouge pas. Le système isolé oscille dans un degré de liberté. La coordonnée $z(t)$ indique l'écart d'amplitude par rapport à l'équilibre stable. Nous définissons les oscillations harmoniques par des équations différentielles linéaires du second ordre à coefficients constants suivantes :

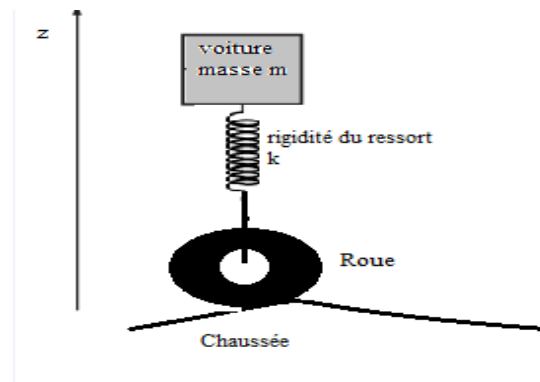


Figure III. 3 Modèle mécanique d'un système libre

Selon le principe de la dynamique :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\ddot{z} \quad (3.48)$$

En projetant selon z on aura :

$$-kz(t) = m\ddot{z}(t) \Rightarrow m\ddot{z}(t) + kz(t) = 0 \quad (3.49)$$

En divisant sur m , on trouve :

$$\ddot{z}(t) + \frac{k}{m} z(t) = 0 \quad (3.50)$$

On peut l'écrire sous la forme suivante :

$$\ddot{z}(t) + \omega_0^2 z(t) = 0 \quad (3.51)$$

Sa pulsation propre est : $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Sa période propre est :

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

Sa solution générale est de la forme suivante :

$$z(t) = z_m \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (3.52)$$

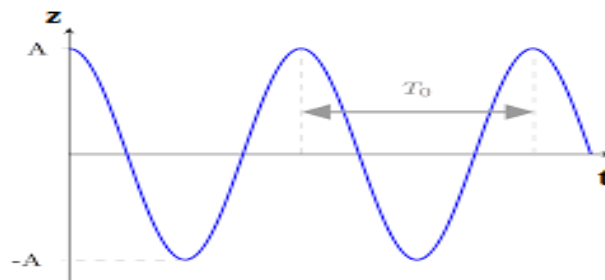


Figure III. 4 Allure caractéristiques de la solution générale

Où l'amplitude z_m et le déphasage φ sont des constantes déterminés avec les conditions initiales suivantes $z(t=0) = z_0$ et $\dot{z}(t=0) = 0$

III.6.2 Système avec oscillations linéaires libres amorties

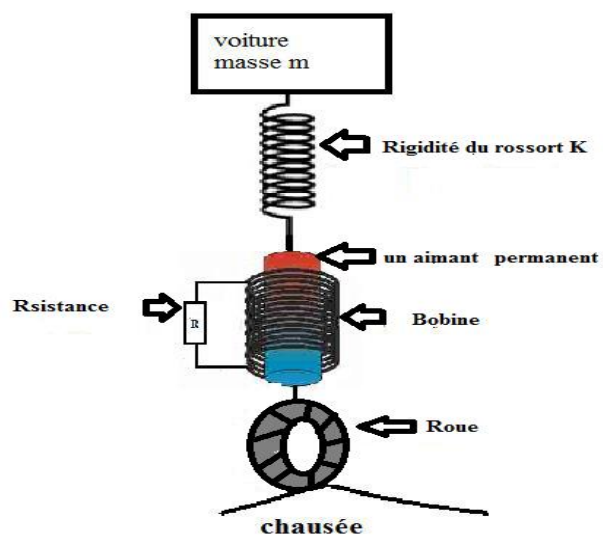


Figure III. 5 Modèle mécanique du système amorti

On rajoute un amortisseur à l'intérieur du ressort à boudin. Cet amortisseur avec le coefficient d'amortissement α intervient dans l'équation suivante :

$$-kz(t) - \alpha\dot{z}(t) = m\ddot{z}(t) \quad (3.53)$$

$$\ddot{z}(t) + \frac{\alpha}{m}\dot{z}(t) + \frac{k}{m}z(t) = 0 \quad (3.54)$$

Que l'on écrit comme suit :

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_{0p}\dot{z}(t) + \omega_{0p}^2 z(t) = 0 \quad (3.55)$$

Avec $2\zeta\omega_{0p} = \frac{\alpha}{m}$ et $\omega_{0p}^2 = \frac{k}{m}$ donc $\zeta = \frac{\alpha}{2\sqrt{mk}}$ et $\alpha = 2\zeta\sqrt{mk}$

$$\Delta = \alpha^2 + 4mk = 4\omega_{0p}^2(\zeta^2 - 1) \quad (3.56)$$

On trouve trois cas possibles :

$\Delta > 0; \zeta > 1$: Amortissement supercritique.

$\Delta = 0; \zeta = 1$: Amortissement critique.

$\Delta < 0; \zeta < 1$: Amortissement sous-critique.

Sa résolution est de la forme suivante:

$$z(t) = z_0 e^{-\zeta t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.57)$$

$\omega_{0p} = \sqrt{1 - \zeta^2}$ est la pseudo-pulsation du système. Les conditions initiales déterminent z_0 et φ .

La solution finale est :

$$z(t) = z_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.58)$$

On voit bien que le système oscille avec une pseudo-pulsation ω_{0p} . Contrairement au cas d'un système libre (sans amortissement), l'amplitude du mouvement est constante, lorsqu'il y a un amortissement (faible) avec diminution exponentielle avec le temps.

On définit aussi le pseudo période du mouvement comme le montre la figure suivante :

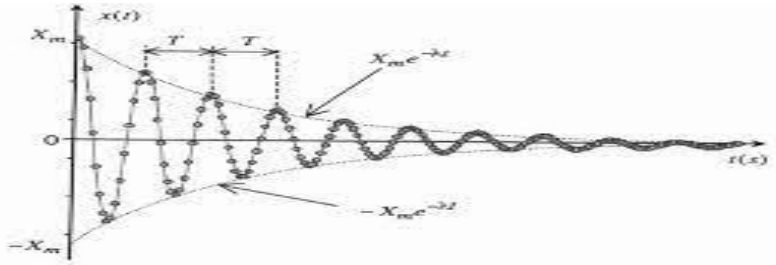


Figure III. 6 Réponse pseudopériodique

III.6.3 Système amorti et forcé

Une oscillation forcée implique tout système en mouvement (déplacement du véhicule) sous l'action d'une force extérieure. Pour un système mécanique, le modèle physique est représenté dans la figure suivante :

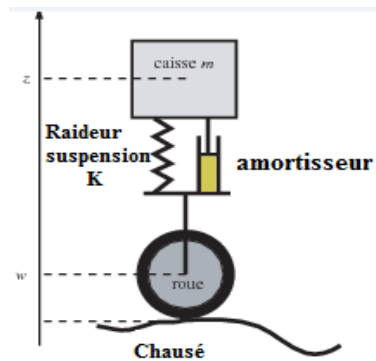


Figure III.7 Modèle physique d'un système forcé

En introduisant la force (la déformation qui est représentée par la fonction $y(t)$) qui est une force créée par le choc et en associant la forme à la vitesse du déplacement, on aura la force F_{ext} .

$$F_{ext}(t) - kz(t) - \alpha \dot{z}(t) = m\ddot{z} \tag{3.59}$$

L'équation de mouvement du système ci-dessus est donnée par :

$$\ddot{z}(t) + \frac{\alpha}{m} \dot{z}(t) + \frac{k}{m} z(t) = \frac{F_{ext}(t)}{m} \tag{3.60}$$

On note que :

$$F_{ext} = ky(t) \quad (3.61)$$

A partir de l'exemple précédent du système amorti, l'équation du mouvement devient :

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{z}(t) + \omega_0^2 z(t) = \frac{F_{ext}}{m} \quad (3.62)$$

$$z(t) = z_l(t) + z_p(t) \quad (3.63)$$

L'équation a deux solutions ; une solution libre $z_l(t)$ que nous avons déjà obtenue dans la solution de l'équation (3.52), et une solution particulière $z_p(t)$ qui suit la force d'excitation.

III.7 Types des forces extérieures

III.7.1 Relation entre le profil de la chaussée et la vitesse du véhicule

La longueur d'onde est une grandeur physique homogène à une longueur, caractéristique d'une onde mono chromatique dans un milieu homogène, définie comme la distance séparant deux maximums consécutifs de l'amplitude. La longueur d'onde dépend de la célérité ou de la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu qu'elle traverse. Lorsque l'onde passe d'un milieu à un autre, dans lequel sa célérité est différente, sa fréquence reste inchangée, mais sa longueur d'onde varie [24].

$$\lambda = \frac{C}{f_0} \quad (3.64)$$

III.7.2 Vitesse de propagation

La vitesse de propagation d'une onde correspond à la vitesse de translation de son profil. Pour une onde harmonique monochromatique, elle est liée à sa longueur d'onde λ , à sa fréquence f et à sa période T par les égalités suivantes:

$$\lambda = \frac{C}{f_0} = CT_0 \quad (3.65)$$

Avec la célérité ou la vitesse de propagation :

$$v = \frac{\lambda}{T_0} = \lambda f_0 \quad (3.66)$$

Dans l'interaction chaussée véhicule, la vitesse de propagation d'onde est égale à la vitesse du véhicule et on obtient :

$$v = v_{\text{propagation}} = v_{\text{véhicule}} = \frac{\lambda}{T_0} \quad (3.67)$$

On déduit la période d'excitation reçu par le véhicule :

$$T_0 = \frac{\lambda}{v}$$

Et la pulsation d'excitation :

$$\omega = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{\lambda} v \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{CT_0} v \quad (3.68)$$

III.7.3 Déformation de la chaussée

Pour chaque forme, on définit la force qui dépend de la vitesse et de la forme de déformation de la chaussée qui est décrite par $y(t)$.

III.7.3.1 Chaussée recouverte en pavé de pierre

Pour une amplitude et une longueur d'onde quelconque, on peut décrire l'expression analytique de la chaussée en pavé en utilisant les séries de décompositions de fourrier:

$$y(t) = \begin{cases} y_m \sin t & 0 \leq t \leq \frac{T_0}{2} \\ 0 & \text{si } \frac{T_0}{2} \leq t \leq T_0 \end{cases} \quad (3.69)$$

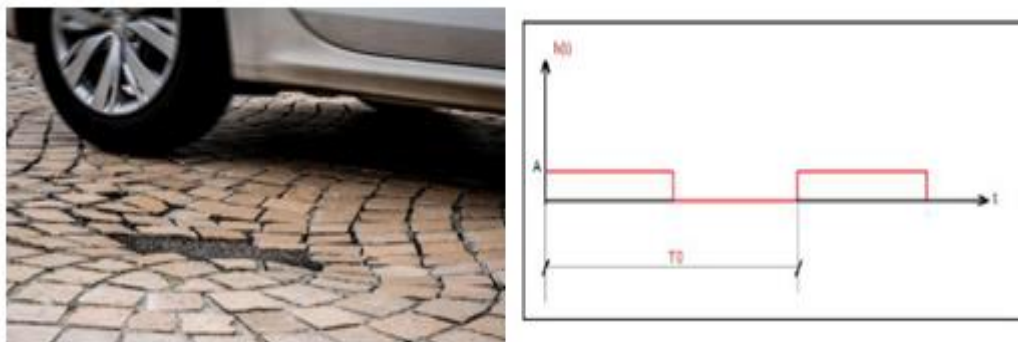


Figure III. 8 Chaussée recouverte en pavé

n : nombre de cycles. On prend $n=5$

$$h(t) = h(t + T_0) = a_0 + \sum_i^{\infty} [a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t] \quad (3.70)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int f(t) dt = \frac{y_m}{2} \quad (3.71)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int f(t) \cos n\omega_0 t dt = \{0,0,0,0,0\} \quad (3.72)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int f(t) \sin n\omega_0 t dt = \left\{ \frac{2y_m}{\pi}, 0, \frac{2y_m}{3\pi}, 0, \frac{2y_m}{5\pi} \right\} \quad (3.73)$$

$$h(t) = \frac{y_m}{2} + \frac{2y_m}{\pi} \left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t \right) \quad (3.74)$$

L'équation $y(t)$ représente une expression analytique décrivant le profil de la surface de la route, et y_m son amplitude. L'irrégularité du contour agit comme une incitation. Le véhicule provoque des vibrations qui dépendent de l'amplitude, de la longueur d'onde et la vitesse du véhicule. L'élastique agissant sur le véhicule est l'élastique dû au contact du réducteur d'arbre avant et arrière, l'analyse montre que :

$$y(t) = \frac{y_m}{2} + \frac{2y_m}{\pi} \left(\sin \omega_0 vt + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 vt + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 vt \right) \quad (3.75)$$

On aura donc la force extérieure suivante:

$$F_{ext}(t) = ky(t) = \frac{ky_m}{2} + \frac{2ky_m}{\pi} \left(\sin \omega_0 vt + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 vt + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 vt \right) \quad (3.76)$$

III.7.3.2 Profil de la chaussée avec une irrégularité sinusoïdale

À une longueur d'onde de 50mm à 500mm et une amplitude verticale allant de 0.1mm à 50mm, on prend l'amplitude maximale, une fois avec la longueur d'onde moyenne et d'autre

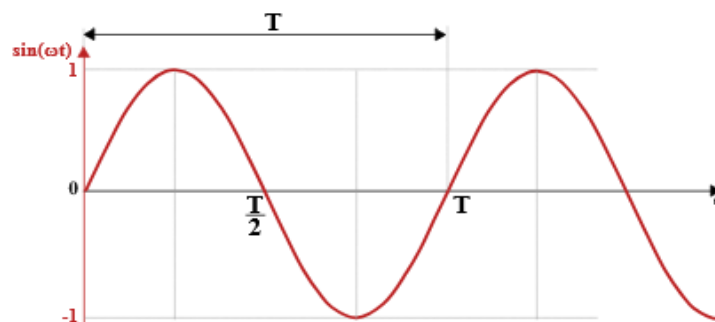


Figure III. 9 Profil sinusoïdal

fois avec la longueur maximale de cette catégorie.

L'expression analytique de ce type de profile est donnée comme suite :

$$y(t) = y_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} \nu t\right) \quad (3.77)$$

La solution de la force extérieure est :

$$F_{ext}(t) = y_0 \cos \omega t \quad (3.78)$$

La vitesse est de la forme suivante :

$$v(t) = v_0 \cos(\omega t - \varphi) \quad (3.79)$$

La solution libre de $z(t)$ est donnée par l'équation (3.52). Sa solution particulière est :

$$z(t) = x_p(t) = y_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (3.80)$$

Soit y_m l'amplitude de la solution et φ son argument.

En remplaçant dans l'équation différentielle et après le calcul, on obtient le module d'amplitude suivant :

$$y_m = \frac{\frac{y_0}{m}}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2\zeta\omega)^2}} \quad (3.81)$$

$$\tan \varphi = \frac{-2\zeta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2} \quad \text{et} \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\zeta^2} \quad \text{et} \quad \zeta = \frac{\alpha}{2\sqrt{mk}} \quad (3.82)$$

III.7.3.3 Profil de dos-d'âne

L'expression analytique qui décrit un ralentisseur de type dos-d'âne est :

$$h(t) = h_0 \sin \frac{\pi}{L_0} t \quad (3.83)$$

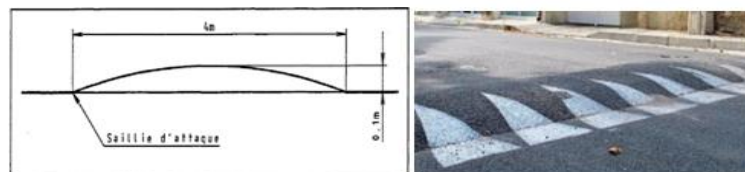


Figure III. 10 Obstacle de type dos-d'âne

La sollicitation provenant de la route dépend de la vitesse du véhicule et elle est définie comme suite :

$$y(t) = h_0 \sin \frac{\pi}{L_0} vt \quad (3.84)$$

$$\text{On aura la force extérieure suivante : } F_{ext} = kh_0 \sin \frac{\pi}{L_0} vt \quad (3.85)$$

$$\text{On peut écrire: } F_{ext} = F_0 \sin(\omega t) \quad (3.86)$$

$$F_0 = kh_0$$

$$\text{Avec } \omega = \frac{\pi}{L_0} v$$

$$T = \frac{2L}{v}$$

III.7.4 Couplage électromécanique

Reprenant l'équation mécanique (3.60) avec un amortissement électromagnétique due à la force de Laplace, telle que :

$$m\ddot{z}(t) + F_L(t) + kz(t) = F_{ext}(t) \quad (3.87)$$

L'expression de la force de Laplace et celle de la force extérieure définissent la déformation de la chaussée, on arrive à :

$$\begin{cases} m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \alpha(t) \frac{dz(t)}{dt} + kz(t) = ky(t) & \text{(a)} \\ \alpha(t) = \sigma sl \left(\frac{d\bar{A}(t)}{dz} \right)^2 & \text{(b)} \end{cases} \quad (3.88)$$

Sous l'action de la chaussée inégale, l'aimant se déplace de la position initiale. Ainsi, un mouvement oscillant est effectué le long de l'axe z dans la bobine. Ce mouvement changera la valeur du potentiel vecteur magnétique et de l'induction. Cette changement produit la densité de courant induit, qui agit avec le champ magnétique de l'aimant ce qui va générer une force d'amortissement électromagnétique.

III.8 Discrétisation temporelle

Pour résoudre numériquement l'équation (3.77), on doit passer par une discrétisation temporelle du déplacement et une discrétisation spatiale du potentiel vecteur magnétique. Dans le cas le plus simple, on adopte le schéma aux différences finis.

On décompose la dérivée seconde de l'équation (3.77) en deux termes en faisant intervenir la vitesse.

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{dv(t)}{dt} + \alpha(t)v(t) + kz(t) = ky(t) \\ v(t) = \frac{dz(t)}{dt} \\ \alpha(t) = \sigma sl \left(\frac{d\bar{A}(t)}{dt} \right)^2 \end{array} \right. \quad (3.89)$$

Pour résoudre ce système d'équations, on adopte le schéma explicite aux différences finies (dérivation arrière) pour l'accélération et le schéma implicite (dérivation avant) pour la vitesse de l'amortissement, soit :

$$m \left(\frac{v(t+dt) - v(t)}{dt} \right) + \alpha(t)v(t) + kz(t) = ky(t) \quad (3.90)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v(t+dt) = \frac{z(t+dt) - z(t)}{dt} \Rightarrow z(t+dt) = v(t+dt)dt + z(t) \\ \alpha(t+dt) = \sigma sl \left(\frac{\bar{A}(t+dt) - \bar{A}(t)}{z(t+dt) - z(t)} \right)^2 \end{array} \right. \quad (3.91)$$

III.9 Processus du calcul numérique

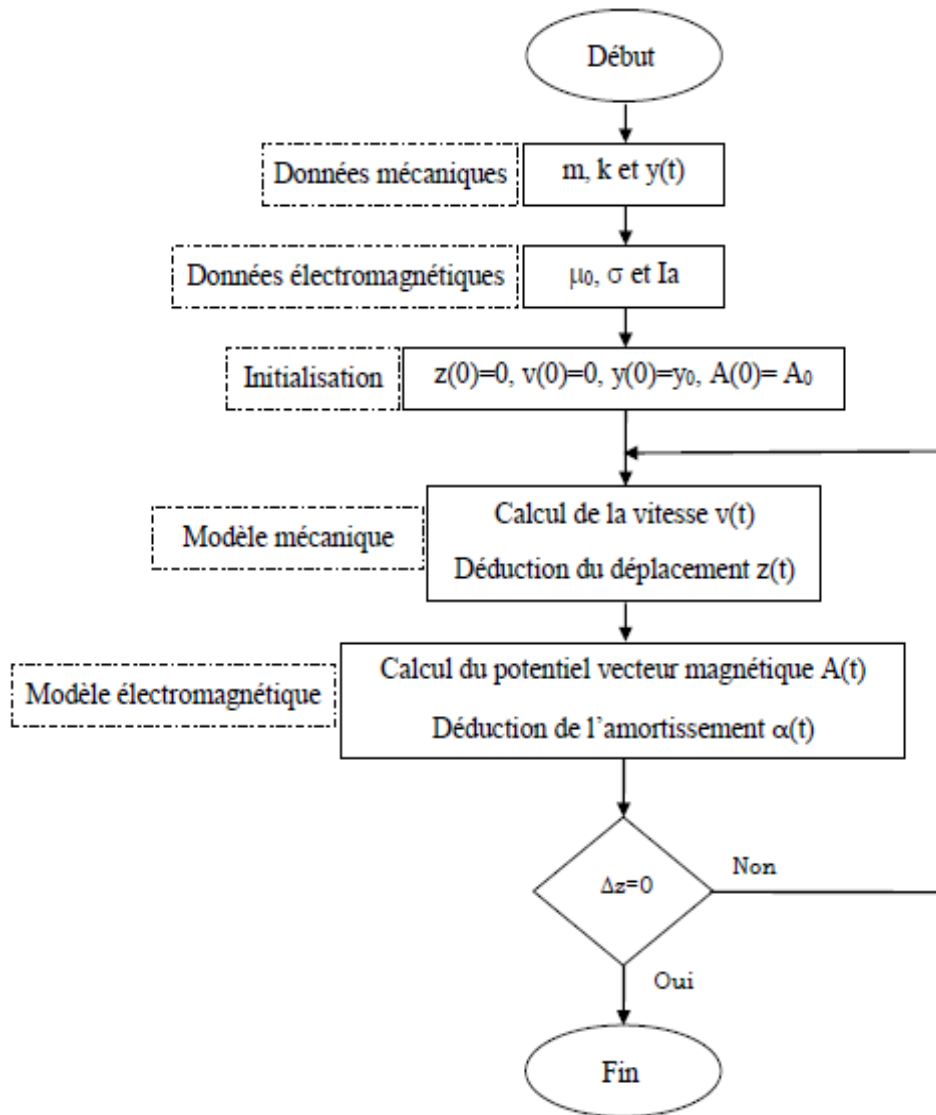


Figure III. 11 Organigramme des calculs

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une modélisation mathématique des différentes formes de déformation de la route, en établissant un modèle électromécanique basé sur les modèles mécaniques et magnétiques de la suspension et de leur couplage.

Chapitre IV

Application et résultats

IV Application et résultats

IV.1 Données mécaniques et électromagnétiques

Dans ce chapitre, on va simuler un exemple d'un amortissement de vibration de la roue à près passage d'un dos d'âne. Pour ce faire, on va exploiter l'équation développée dans le chapitre précédent qu'on va implémenter dans le logiciel MATLAB.

Pour notre exemple, on prendra les paramètres suivants :

Tableau IV 1 Les paramètres de la simulation

	Paramètres	Valeur
Paramètres mécaniques	Longueur de dos d'âne(L_0)	1 m
	Hauteur de dos d'âne (H)	0.2 m
	Vitesse de véhicule (v)	30 km/h
	raideur (k)	$2 \cdot 10^5$ N/m
	Force appliquée à l'amortisseur (F_{ext})	$40000 \cdot \sin(26.17t)$ N
Les paramètres électromagnétiques	Largeur de l'aimant	10 cm
	Longueur de l'aimant (l)	15 cm
	Champ rémanent de l'aimant (B)	2 T
	Le courant équivalent dans l'aimant (I_s)	$2.38 \cdot 10^3$ A
	Rayon moyen de la bobine	10 cm
	Longueur la bobine	25 cm
	Le nombre de spires (N_s)	1750 spires
	Position de la bobine	5.5 cm
	Conductivité de la bobine (σ)	$6 \cdot 10^7$ siemens
	La capacité de la batterie(Condensateur)	36000 F

IV.2 Modèle géométrique

Le schéma utilisé pour représenter la bobine et l'aimant dans MATLAB est illustré dans la figure suivante :

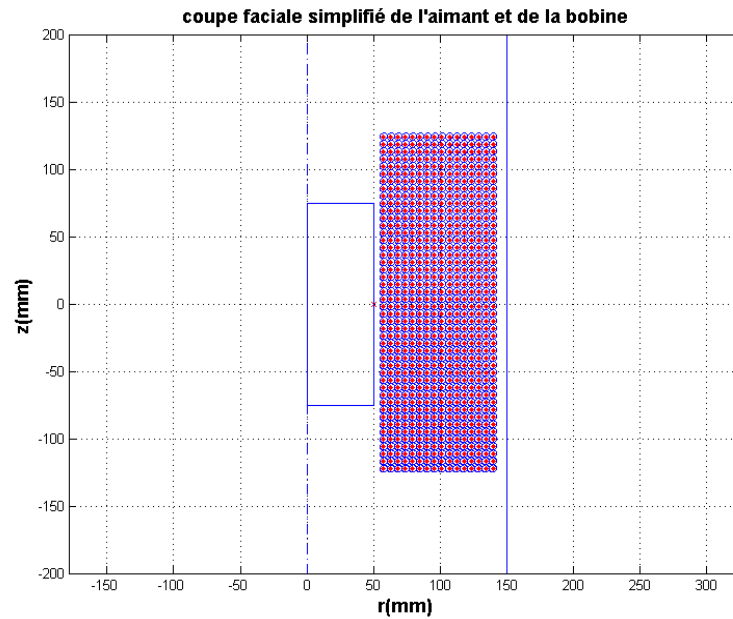


Figure IV 1 Coupe faciale simplifiée d'un aimant et d'une bobine

IV.3 Force excitation

La force due au dos d'âne est représentée dans la figure suivante :

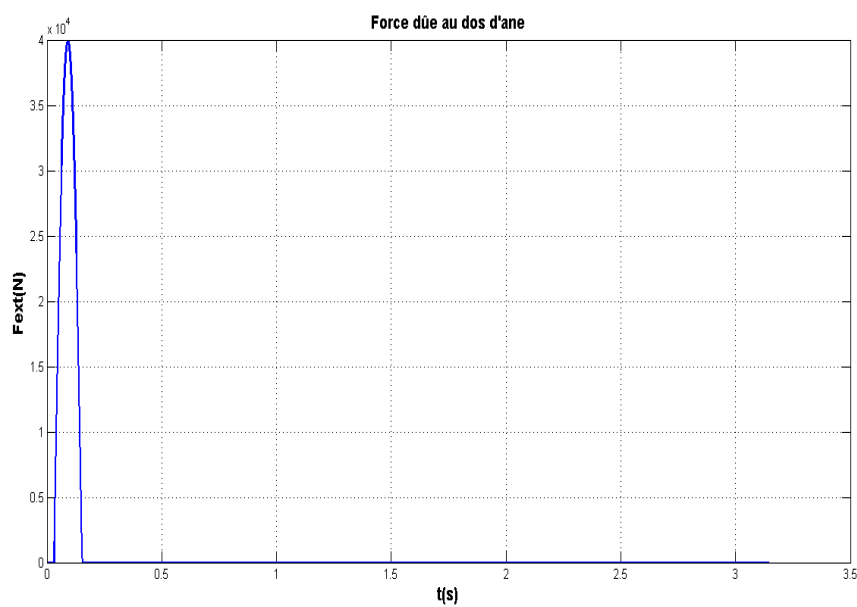


Figure IV 2 Dos d'âne

IV.4 Circuit électromagnétique à vide

Dans ce cas, le circuit se résume à une simple source alternative dépendant de la vitesse de l'aimant comme illustré dans le schéma suivant :

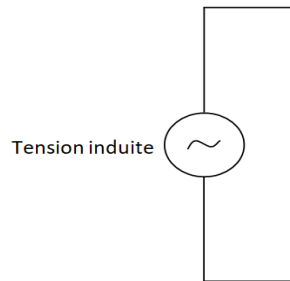


Figure IV 3 Schéma équivalent du circuit à vide

La simulation nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

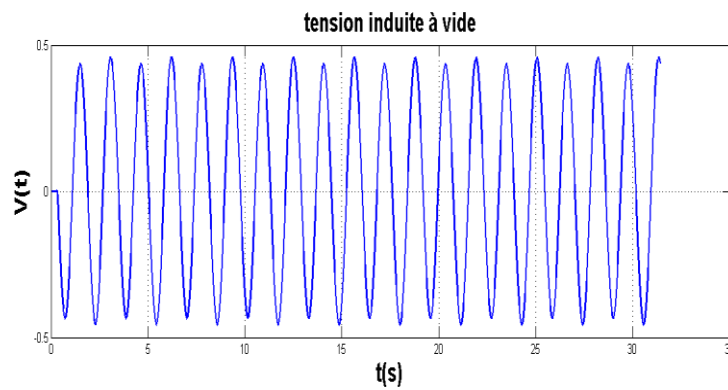


Figure IV 4 Tension de source à vide

La tension maximale induite est de l'ordre de 0,4 V et la fréquence est de l'ordre de 0,6 Hz

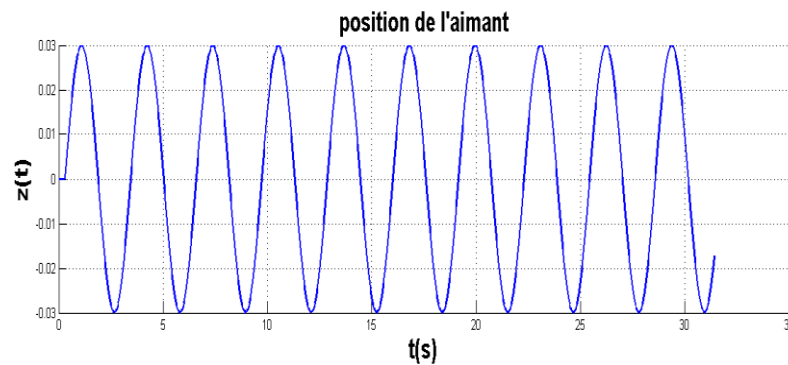


Figure IV 5 Position de l'aimant à vide

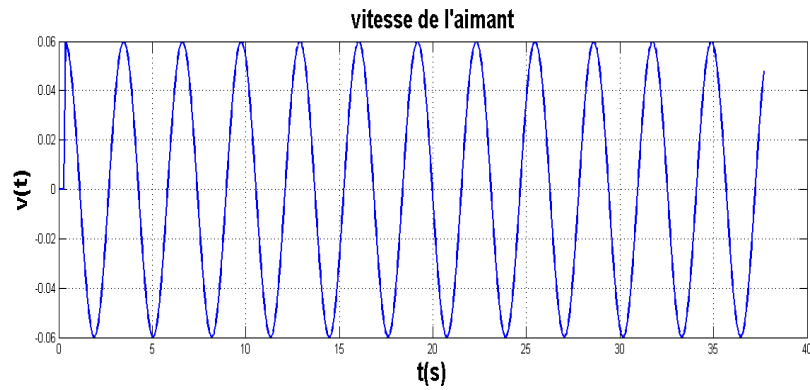


Figure IV 6 Vitesse de l'aimant

L'amplitude du déplacement est de l'ordre de 3 cm et la fréquence est de l'ordre de 0.3 Hz.

IV.5 Système sans récupération d'énergie

Le schéma équivalent dans ce cas est le suivant :

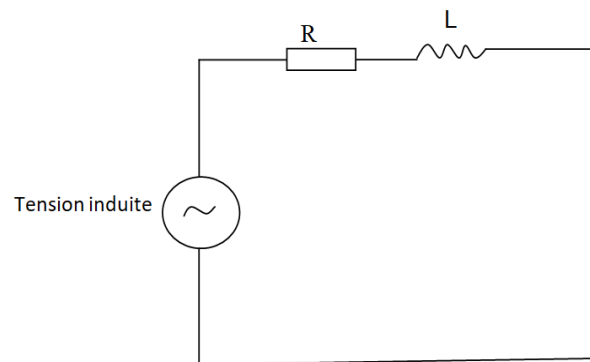


Figure IV 7 Circuit en court circuit

Dans ce cas, le courant est dissipé par effet Joule par la résistance des fils du circuit.

Les résultats obtenus dans la simulation sont représentées dans les figures suivantes :

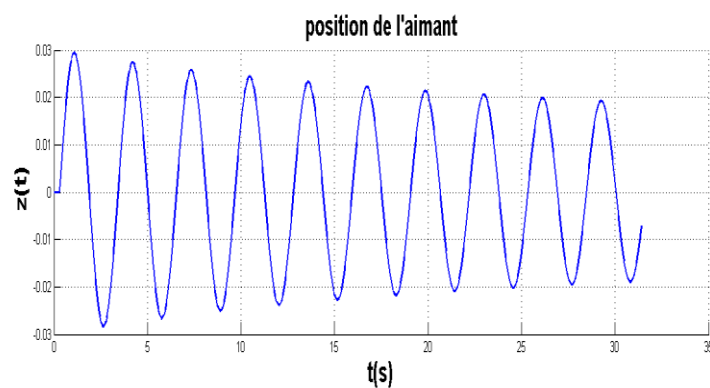


Figure IV 8 Position de l'aimant dans le cas d'un court circuit

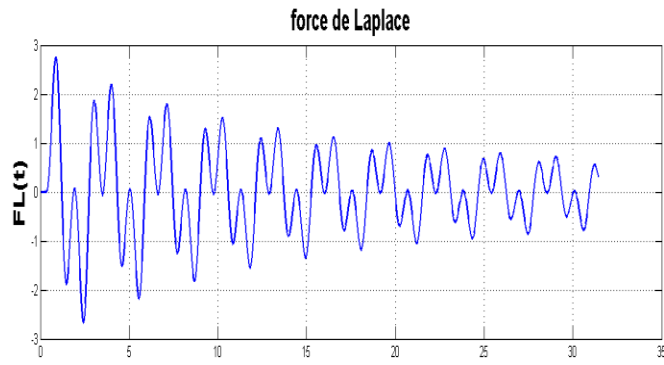


Figure IV 9 Force de Laplace dans le cas d'un court circuit

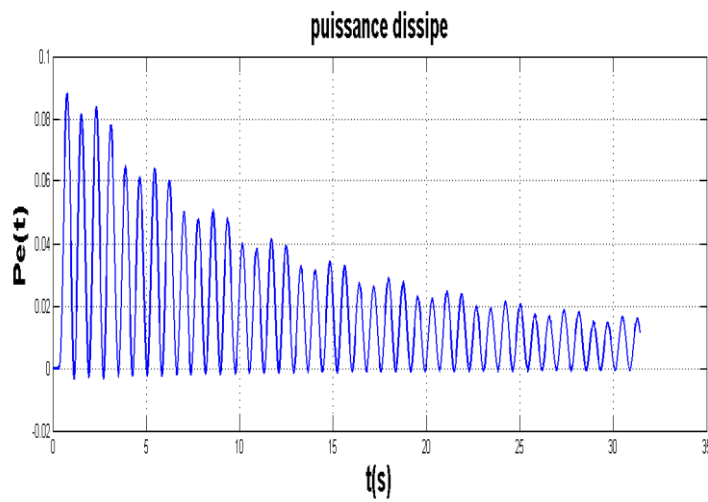


Figure IV 10 Puissance dissipée en court circuit

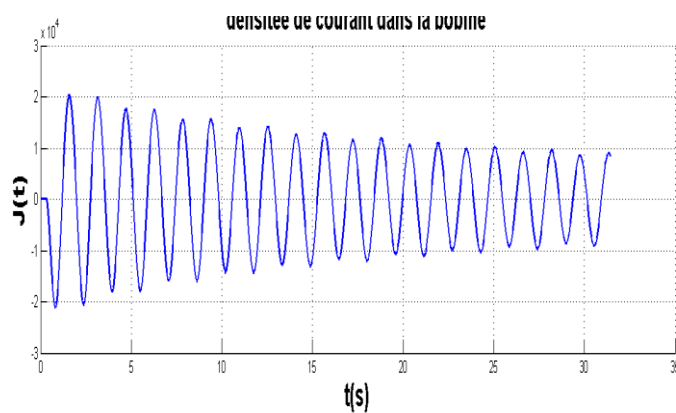


Figure IV 11 Densité de courant induite en court circuit

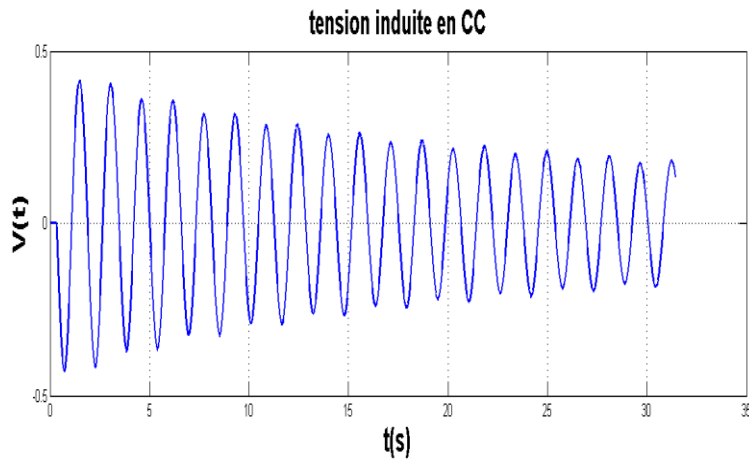


Figure IV 12 Tension induite en court circuit

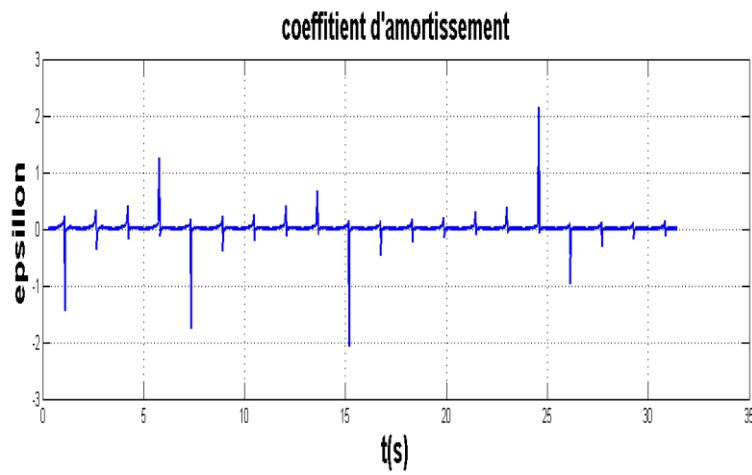


Figure IV 13 Coefficient d'amortissement

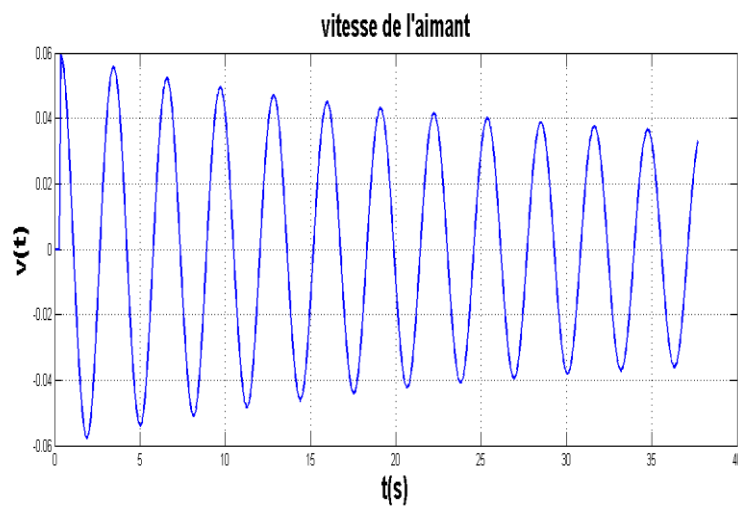


Figure IV 14 Vitesse de l'aimant

Dans ce cas, on observe un amortissement dû à la force de Laplace provoquée par le courant induit. Cependant, l'amortissement n'est pas assez élevé pour éliminer totalement les vibrations.

Comme le montre la figure du coefficient d'amortissement, ce dernier oscille autour de la valeur nulle alors que pour un bon amortissement, on devait avoir un coefficient de l'ordre de 0.7.

IV.6 Système avec récupération d'énergie

Le schéma équivalent dans ce cas est le suivant :

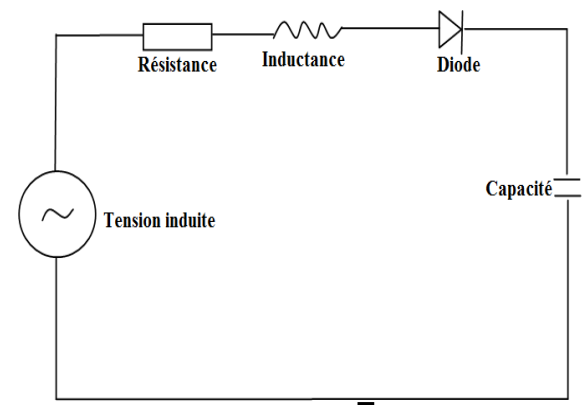


Figure IV 15 circuit équivalent en charge

On remarque que le courant est dans ce cas récupéré par la charge (capacité).

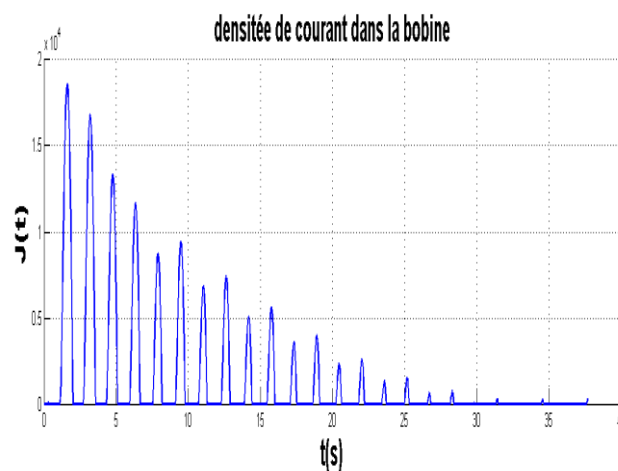
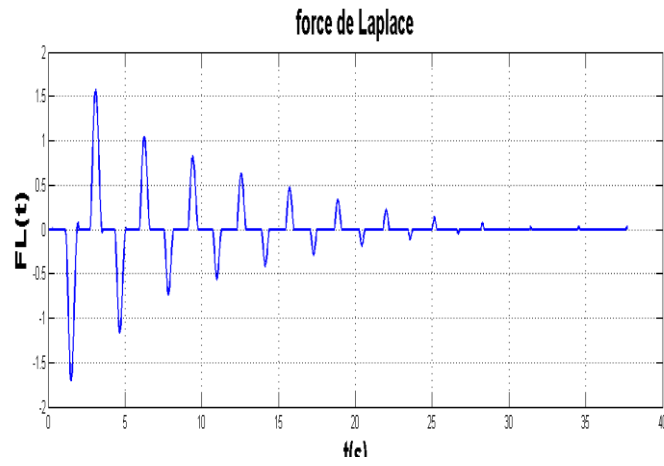
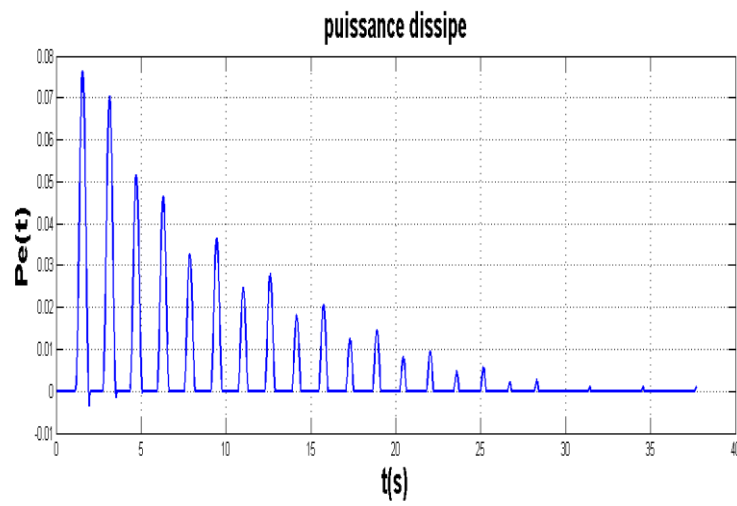
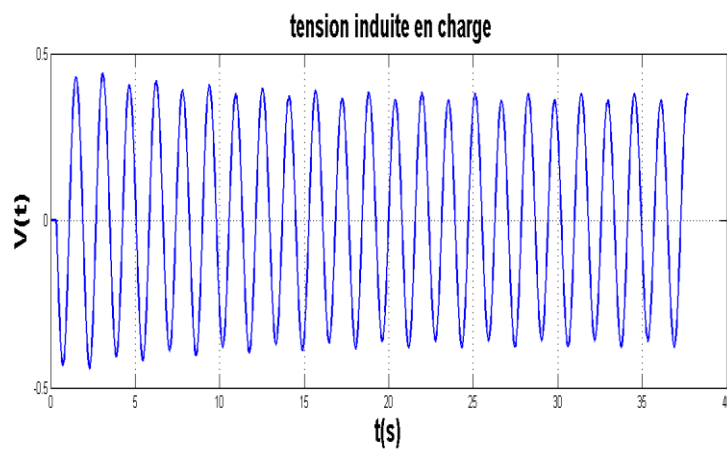


Figure IV 16 Densité de courant dans la bobine en charge

**Figure IV 17** Force de Laplace en charge**Figure IV 18** Puissance électrique dissipée en charge**Figure IV 19** Tension induite en charge

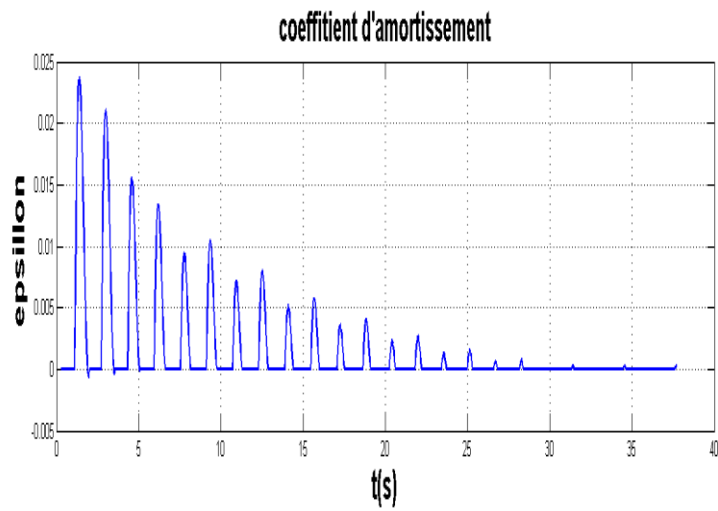


Figure IV 20 Coefficient d'amortissement

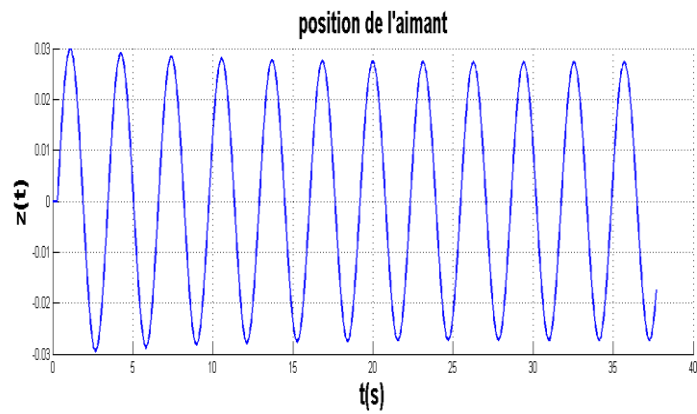


Figure IV 21 Position de l'aimant cas en charge sur capacité

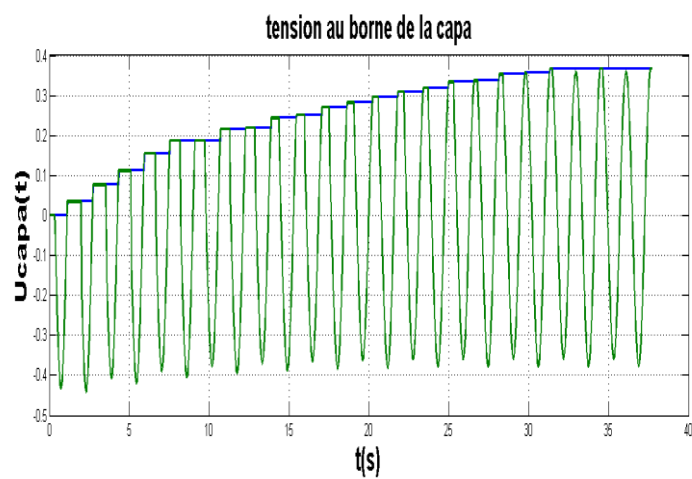


Figure IV 22 la tension aux bornes de la capacité

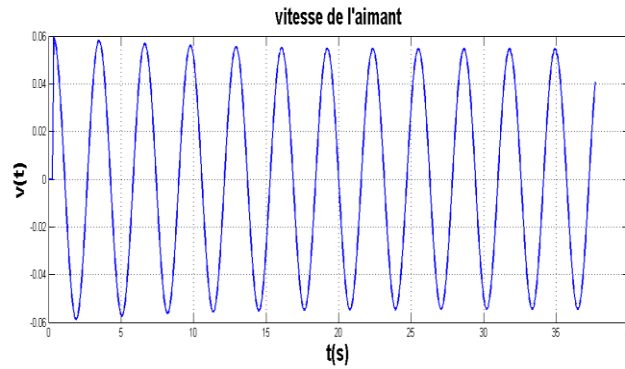


Figure IV 23 Vitesse de l'aimant dans le temps

On observe que dans le cas de chargement sur condensateurs, l'amortissement est plus faible que pour le cas en court circuit. Cela est dû à la diminution de la densité de courant ainsi qu'aux périodes où la tension de la capacité est supérieure à la tension induite, dans ce cas, le redresseur annule les courants négatifs ce qui annule la force de Laplace et le coefficient d'amortissement. Il faudra donc passer en court circuit après chargement de la capacité.

IV.7 Conclusion

Après simulation, on observe bien la présence d'un amortissement dû au courant induit dans la bobine. Cependant, l'amortissement reste très faible et insuffisant pour éliminer totalement les vibrations, il faudra alors penser à optimiser les paramètres du modèle réalisé ou explorer d'autres configurations aimant-bobine.

Conclusion Générale

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire porte sur la récupération d'énergie électromécanique vibratoire des amortisseurs électromagnétique des véhicules.

Le premier chapitre présente des généralités sur les amortisseurs d'une façon générale et le rôle de l'amortisseur très important dans les différents domaines.

Afin de comprendre le principe de ce type d'amortissement, le deuxième chapitre de ce travail est consacré à l'étude théorique des aimants dans lequel on a étudié leurs différentes formes et leurs propriétés magnétiques avant de donner un bref aperçu sur leur modélisation.

A partir du troisième chapitre, on a traité la modélisation magnétique à la base des équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu du système d'amortissement afin de mieux comprendre son fonctionnement à l'échelle électromagnétique.

Dans le dernier chapitre, nous avons simulé un système d'amortissement à l'aide de logiciel MATLAB et on a noté quelques résultats.

.

Bibliographie

- [1] **KOTRANE Asma**, conception, réalisation et caractérisation dynamique d'une amortisseuse magnéto rhéologique, (Mémoire pour l'obtention de la maîtrise en génie mécanique), page 21-27. L'école de technologie supérieure, Montréal, 04 MAI 2007
- [2] **BOUATIA Taqiyeddine**, modélisation, simulation et commande d'un système de suspension active, (thèse de master), page 6-9. Université Badji Mokhtar Annaba, 2019
- [3] **S.Hussein**, « Systèmes de suspension semi-active à base de fluide,» Arts et MétiersParisTech, Paris, 2010.
- [4] **S.M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename et L. Dugard**, Semi-Active Suspension Control Design for Véhicules, Oxford, UK : Elsevier Ltd, 2010.
- [5] **N. Sup and P. Docteur**, « Aimants permanents Matériaux et applications, » Tech. L'ingénieur.
- [6] **Moreau .L**, « Modélisation, conception et commande des génératrices à réluctance variable basse vitesse, » 2005.
- [7] **Yu.C**, « Design, analysis and control of flux-mnemonic permanent magnet brushless machines, » 2010.
- [8] **Yu.C**, « Design, analysis and control of flux-mnemonic permanent magnet brushless machines, » 2010.
- [9] **Brissonneau.P**, « Aimants permanents – Principes et circuits magnétique, » Tech. L'ingénieur, no. D 2 090, pp. 1-30, 1990.
- [10] **Drouen.L**, « Machines électriques intégrées à des hélices marines Contribution à une modélisation et conception multi-physique , « 2010.
- [11] **E. Eric Radaozandry**, « Conception et optimisation des machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique », Pour obtention du grade de maîtrise en Sciences, Université de Laval, 2007.
- [12] **Brissonneau Pierre** « Magnétisme et matériaux magnétique pour l'électrotechnique », Edition Hermès 1997.
- [13] **MULTON Bernard** : « Application des aimants aux machines électriques. », Notes de cours, ENS Cachan-Antenne de Bretagne, 2005.
- [14] **Etienne du Tremolet de Blanchisserie** : « Magnétisme - Tome II - Matériaux et Applications », Editeur(s) : EDP Science.

-
- [15] **F. LEPRINCE RINGUET** - Aimants permanents, Matériaux et applications - Techniques de l'ingénieur – Date de publication : 10 juin 1996.
- [16] **J.P. LOUIS – B. MULTON – Y. BONNASSIEUX – M. LAVABRE** : « Commande des machines à courant continu (mcc) à vitesse variable » Techniques de l'ingénieur, 10 mai 2002.
- [17] **KANT Michel**- Actionneurs à collecteur à aimant permanent -Techniques de l'ingénieur – Date de publication : 10 juin 1991.
- [18] **P. BRISSONNEAU**, « Aimants permanents, Principes et circuits magnétiques
- [19] **OULED AMOR. Y**, « Contribution à la modélisation de l'hystérésis magnétique en vue de l'analyse par éléments finis des systèmes de chauffage par induction »,Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2000.
- [20] **MAUCHE. B**, « Elaboration de modèles par les Grandeurs Electromagnétiques couplées, Application au controle par courant de Foucault », Thèse de doctorat en sciences, Université Farhat Abbas Sétif, 2007
- [21] **MEZOU DJ. M**, « Analyse du comportement vibratoire d'un véhicule a la rencontre d'un obstacle (dos-d'âne) », mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en Mécanique, Université de Batna, Avril 2010.