

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA Bejaia



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



Faculté de la  
Technologie

كلية  
التكنولوجية

Université de Béjaïa

## *Mémoire de fin d'études*

**Présenté par :**

**AIDOUNE Azzedine & AKKOUCHE Amine**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Electrique**

**Option : Machines Electriques**

*Thème*

# **Etude théorique et formulation d'une suspension électromagnétique**

**Encadré par :**

**Pr MAOUCHE Bachir**

**Mr BOUCHABAH Badis**

---

Année universitaire 2019/2020

## Remerciements

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

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

Nous commencerons par remercier **Pr Maouche** qui nous a fait l'honneur d'être notre encadreur.

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

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

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

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

## Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

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

A mon cher professeur et Encadreur **Pr Maouche Bachir** qui nous a vraiment orienter, guider et qui a partagé son savoir pour contribuer à la réalisation de ce mémoire, je souhaite du fond du cœur une longue vie et une bonne santé pour lui, car il est l'un des meilleurs professeurs dans toute l'Algérie.

A monsieur **Bouchabah Badis** qui nous a donné un énorme coup de pouce et pour qui nous souhaitons un meilleur avenir dans sa recherche Scientifique pour sa thèse.

A tous mes professeurs et enseignants qui m'ont enseignés depuis le primaire jusqu'à l'Université.

A mes chers frères et mes amis Salim, Sofiane, Bachir, Karim, Billal, Djebbar, Azwaw, Syphax, Salah, Chafaa, Arezki, Chabane, Hanafi, Mazigh, Mouh, Saci, Nadjib, Marouane, Idris et mon cher binôme Azzedine. Ma sœur Katia, Djohra, Wissam, Sara, Fifi, Maiza, Lynda, Lamia, Lina, Dihia. Mes grands-parents, mes chers cousins et cousins et à tous mes amis. Chaleureux salut au Machinistes sans exceptions

**AMINE,**

## Liste des figures

<b>Figure 1.1-</b> Suspension d'un véhicule automobile .....	5
<b>Figure 1.2-</b> Exemple d'un système de suspension active .....	7
<b>Figure 1.3-</b> Système ABC dans sa nouvelle version .....	7
<b>Figure 1.4-</b> Exemple d'un système de suspension passive.....	8
<b>Figure 1.5-</b> Exemples d'amortisseurs semi-actifs à contrôle électronique, en utilisant trois différentes technologies.....	9
<b>Figure 1.6-</b> Différentes architectures des suspensions des trains avant .....	10
<b>Figure 1.7-</b> Architectures de suspension des trains arrière.....	11
<b>Figure 1.8-</b> Ressort à lames .....	12
<b>Figure 1.9-</b> Exemple d'un ressort cylindrique.....	13
<b>Figure 1.10-</b> Ressort de torsion .....	13
<b>Figure 1.11-</b> Aperçue d'un amortisseur monté sur une roue.....	14
<b>Figure 1.12-</b> Exemple d'un amortisseur hydraulique .....	15
<b>Figure 1.13-</b> Exemple d'un amortisseur hydraulique à ressort.....	16
<b>Figure 1.14-</b> Schéma d'amortisseur oléopneumatique .....	17
<b>Figure 1.15-</b> Schéma d'un amortisseur hydraulique à levier.....	18
<b>Figure 1.16-</b> Exemple d'un amortisseur pneumatique .....	18
<b>Figure 1.17-</b> Exemple d'un amortisseur à inertie .....	19
<b>Figure 1.18-</b> Amortisseur magnéto-rhéologique .....	19
<b>Figure 1.19-</b> Amortisseur électromagnétique .....	20
<b>Figure 2.1-</b> Emplacement du convertisseur d'énergie dans le schéma du système de suspension .....	21
<b>Figure 2.2-</b> Circuit représentant la transformation électromagnétique.....	22
<b>Figure 2.3-</b> Prototype n°1 intégré dans le corps d'un amortisseur .....	25
<b>Figure 2.4-</b> Circuit magnétique (a) intégré à un amortisseur appartenant au prototype n°2 (b) sans souci de réduction des forces magnétiques .....	26
<b>Figure 2.5-</b> Prototype n°3 du convertisseur électromagnétique intégré dans le corps de l'amortisseur.....	26
<b>Figure 2.6-</b> Prototype optimisé n°4 (b) intégré à un amortisseur (a).....	27
<b>Figure 2.7-</b> Proposition d'une nouvelle topologie de circuit magnétique intégrable dans le corps d'un amortisseur prenant en compte la réduction des forces magnétiques .....	27
<b>Figure 3.1-</b> Courbe de désaimantation.....	29
<b>Figure 3.2-</b> Quelques aspects de formes d'aimants .....	30
<b>Figure 3.3-</b> Familles des aimants permanents. (a)- Terre rare. (b)- Aimants métalliques (Alnico). (c)- Ferrites .....	32

<b>Figure 3.4-</b> Courbe de désaimantation $B(H)$ des principaux types d'aimants.....	32
<b>Figure 3.5-</b> Avantage (couple-vitesse) d'un inducteur à aimant permanent .....	34
<b>Figure 3.6-</b> Exemple d'utilisation des aimants permanents.....	35
<b>Figure 3.7-</b> Moments magnétiques orbital et de spin .....	36
<b>Figure 3.8-</b> Spire de courant de moment magnétique.....	36
<b>Figure 3.9-</b> Modèle ampérien d'un aimant permanent .....	37
<b>Figure 4.1-</b> Schéma du système.....	38
<b>Figure 4.2-</b> Représentation des spires émettrice et réceptrice .....	41
<b>Figure 4.3-</b> Modèle mécanique d'un système libre .....	44
<b>Figure 4.4-</b> Allure caractéristiques de la solution générale .....	45
<b>Figure 4.5-</b> Modèle mécanique du système amorti .....	45
<b>Figure 4.6-</b> Réponse pseudo-périodique.....	46
<b>Figure 4.7-</b> Modèle physique d'un système forcé .....	47
<b>Figure 4.8-</b> Chaussée recouverte en pave .....	49
<b>Figure 4.9-</b> Profil sinusoïdal.....	50
<b>Figure 4.10-</b> Obstacle de type dos-d'âne.....	51
<b>Figure 4.11-</b> Organigramme des calculs.....	53

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau 1.1-</b> Comparaison des performances des trois types de suspension .....	9
<b>Tableau 2.1-</b> Synthèse des paramètres prépondérants dans le dimensionnement des aimants au regard de leur influence sur la récupération d'énergie .....	23
<b>Tableau 2.2-</b> Synthèse des paramètres prépondérants dans le dimensionnement des bobines au regard de leur influence sur la récupération d'énergie .....	24
<b>Tableau 3.1-</b> Caractéristiques des aimants .....	33

## NOMENCLATURE

$B_r$  : Induction rémanente [T]

$H_c$  : Champ coercitif [kA/m]

Alnico : Type de la matière d'aimant

SmCo : Type de la matière d'aimant

$B(H)$  : Courbe de désaimantation

$T$  : Température [ $C^0$ ]

$\vec{A}$  : Potentiel vecteur

$M$  : Aimantation du milieu considéré

$\vec{\nabla}$  : Nabla

$\vec{ds}$  : Élément de surface [ $m^2$ ]

$\vec{dl}$  : Élément de longueur [m]

$\vec{E}$  : Champ électromoteur [V/m]

$\vec{B}$  : Induction magnétique [T]

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m]

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  : Densité de courant de déplacement [ $C/m^3$ ]

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

$\phi$  : Flux magnétique [wb]

$\rho$  : Densité de charge volumique [ $C/m^3$ ]

$\vec{m}$  : Moment magnétique [ $A/m^2$ ]

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

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

$\tau$  : Volume de l'aimant [ $\text{mm}^3$ ]

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide [ $4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ ]

$\vec{F}$  : Force de Laplace

$r_a$  : Rayon de l'aimant [mm]

$r_b$  : Rayon de la bobine [mm]

$\sigma$  : La conductivité [ $\Omega.\text{m}^{-1}$ ]

R : Résistance électrique [ $\Omega$ ]

k : Raideur du ressort [N/m]

m : Masse de la voiture [kg]

$\alpha$  : Coefficient d'amortissement

C : Célérité [m/s]

$f_0$  : Fréquence propre ( $\text{s}^{-1}$ )

$\omega_0$  : Pulsation propre [rad/s]

T : Période du signal [s]

v : Vitesse du véhicule [km/h]

$y_m$  : Amplitude

$\lambda$  : Longueur d'onde [m]



# Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	4
I- Généralités sur la suspension automobile .....	5
I.1- Introduction.....	5
I.2- Système de suspension.....	5
I.2.1- Définition d'un système de suspension .....	5
I.2.2- Rôle de la suspension .....	6
I.2.3- Différents systèmes de suspension .....	6
I.2.3.1- Suspension active .....	6
I.2.3.2- Suspension passive.....	8
I.2.3.3- Suspension semi-active .....	8
I.3- Comparaison des performances des trois types de suspension .....	9
I.4- Différentes architectures de suspension.....	10
I.5- Composantes principales d'une suspension .....	11
I.5.1- Ressorts.....	11
I.5.1.1- Définition du ressort.....	11
I.5.1.2- Rôle d'un ressort .....	12
I.5.1.3- Types de ressorts .....	12
I.5.1.3.1- Ressorts à lames.....	12
I.5.1.3.2- Ressorts hélicoïdaux .....	12
I.5.1.3.3- Le ressort de torsion .....	13
I.5.2- Amortisseurs d'un véhicule .....	14
I.5.2.1- Définition d'un amortisseur .....	14
I.5.2.2- Rôle de l'amortisseur .....	14
I.5.2.3- Fonctionnement d'un système d'amortissement .....	15
I.5.3- Types d'amortisseurs d'un véhicule .....	16
I.5.3.1- Amortisseurs à fluide .....	16
I.5.3.1.1- Amortisseurs hydrauliques à ressort.....	16
I.5.3.1.2- Amortisseurs oléopneumatiques ou hydropneumatiques .....	16
I.5.3.1.3- Amortisseurs hydrauliques .....	17
I.5.3.1.3.1 Amortisseurs hydrauliques à palettes .....	17
I.5.3.1.3.2 Amortisseurs hydrauliques à levier .....	17
I.5.3.1.4- Amortisseur pneumatique.....	18
I.5.3.1.5- Amortisseur à inertie .....	18
I.5.3.2- Amortisseurs à effet magnétique.....	19

I.5.3.2.1-	Amortisseur magnéto-rhéologique .....	19
I.5.3.2.2-	Amortisseur électromagnétique .....	19
2.5.3.1.3.1	Définition .....	19
3.5.3.1.3.1	Principe de fonctionnement .....	20
I.6-	Conclusion .....	20
II-	Configuration d'un amortisseur électromagnétique .....	21
II.1-	Introduction .....	21
II.2-	Géométrie du système .....	21
II.2.1-	Intégration du convertisseur électromagnétique à la suspension.....	21
II.2.2-	Cahier des charges et présentation de la configuration choisie .....	22
II.2.2.1-	Recherche d'une configuration adaptée .....	22
II.2.2.2-	Paramètres influents de l'amortisseur électromagnétique .....	22
II.2.2.3-	Etude et analyse des solutions proposées à la configuration .....	25
II.3-	Conclusion .....	28
III-	Aimants permanents .....	29
III.1-	Introduction .....	29
III.2-	Définition d'un aimant permanent .....	29
III.3-	Propriétés magnétiques .....	29
III.4-	Différentes formes d'aimants .....	30
III.5-	Puissance magnétique des aimants .....	30
III.6-	Classification des aimants .....	31
III.6.1-	Aimants en Terres rares .....	31
III.6.2-	Aimants métalliques (Alnico) .....	31
III.6.3-	Aimants en Ferrites .....	31
III.7-	Caractéristiques principales de quelques types d'aimants .....	32
III.8-	Avantages des aimants .....	33
III.9-	Domaines d'application des aimants .....	34
III.9.1-	Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique .....	34
III.9.2-	Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique .....	34
III.9.3-	Conversion d'énergie mécanique a une autre forme d'énergie mécanique	35
III.9.4-	Conversion d'énergie mécanique en énergie thermique .....	35
III.9.5-	La création d'un champ magnétique fixe.....	35
III.10-	Modélisation des aimants permanents.....	35
III.10.1-	Principe d'équivalence : .....	35
III.10.2-	Modélisation ampérienne d'un aimant.....	36

III.10.3-	Modélisation coulombienne.....	37
III.10.4-	Modèles analytiques.....	37
III.11-	Conclusion.....	37
IV-	Modélisation électromécanique de la suspension.....	38
IV.1-	Introduction .....	38
IV.2-	Modèle géométrique.....	38
IV.3-	Modélisation électromagnétique .....	39
IV.3.1-	Equations de Maxwell.....	39
IV.3.2-	Loi de comportement des milieux.....	39
IV.4-	Modélisation Ampérienne de l'aimant.....	40
IV.4.1-	Polarisation magnétique.....	40
IV.4.2-	Aimantation magnétique.....	40
IV.4.3-	Induction magnétique.....	40
IV.4.4-	Potentiel magnétique vecteur déduites de la loi de Biot et Savart.....	41
IV.4.5-	Composantes normale et tangentielle de l'induction magnétique .....	42
IV.4.6-	Champ électromoteur E .....	42
IV.4.7-	Force de Laplace .....	42
IV.5-	Modélisation mécanique du système.....	43
IV.5.1-	Oscillations linéaires libres non amorties .....	43
IV.5.2-	Système avec oscillations linéaires libres amortis .....	45
IV.5.3-	Système amorti et forcé .....	46
IV.6-	Types de forces extérieures .....	47
IV.6.1-	Relation entre le profil de la chaussée et la vitesse du véhicule .....	47
IV.6.2-	Vitesse de propagation.....	48
IV.6.3-	Déformation de la chaussée .....	48
IV.6.3.1-	Chaussée recouverte en pavée de pierre.....	48
IV.6.3.2-	Profil de chaussée avec une irrégularité sinusoïdale .....	50
IV.6.3.3-	Profil dos-d'âne .....	51
IV.6.4-	Couplage électromécanique.....	51
IV.7-	Discretisation temporelle.....	52
IV.8-	Processus des calculs numériques .....	53
IV.9-	Conclusion.....	54
	Conclusion Générale.....	55

# INTRODUCTION GENERALE

Depuis l'évolution de la technologie et surtout dans l'industrie, l'homme essaie toujours de créer et d'améliorer des moyens pour faciliter sa vie quotidienne dans tous les domaines. Quelques-uns de ces problèmes les plus récurrents, on trouve ceux liés aux chocs, aux bruits et aux vibrations qu'on rencontre dans les machines industrielles, les ponts ou dans les immeubles, mais surtout dans les moyens de transports et particulièrement dans les véhicules.

Les amortisseurs sont devenus indispensables dans la conception mécanique d'un véhicule. Ils permettent de limiter les oscillations d'un objet ou à isoler un objet de vibration par dissipation d'énergie, et d'améliorer sa durée de vie en garantissant un fonctionnement plus performant, en parallèle la sécurité et le confort des occupants du véhicule.

L'amortisseur électromagnétique qui fait l'objet du présent travail est un dispositif destiné à minimiser par attraction magnétique l'amplitude des vibrations causées par l'irrégularité de la route.

Vu l'essor de plus en plus grandissant des véhicules électriques. Auquel s'ajoute leurs formes appropriées (poids léger et disponibilité d'espace), les amortisseurs électromagnétiques peuvent très bien être adaptés à ce genre de véhicule. Ce qui fait de ce type d'amortisseur un modèle d'avenir avec de grandes potentialités d'exploitation.

On commence à présenter un système de suspension d'un véhicule d'une manière générale. On définit d'abord un système de suspension, ses différents types que ce soit passif, actif ou semi-actif, les différents types de ses composants et les différentes architectures mécaniques.

Dans le deuxième chapitre, on exposera certaines configurations géométriques existantes de l'amortisseur électromagnétique.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des aimants par leur définition, leurs types, leurs caractéristiques, leurs domaines d'utilisation et leurs modélisations.

Le dernier chapitre est réservé à la formulation de la déformation de la chaussée et à la modélisation de la suspension du point de vue mécanique, électromagnétique et couplage électromécanique.

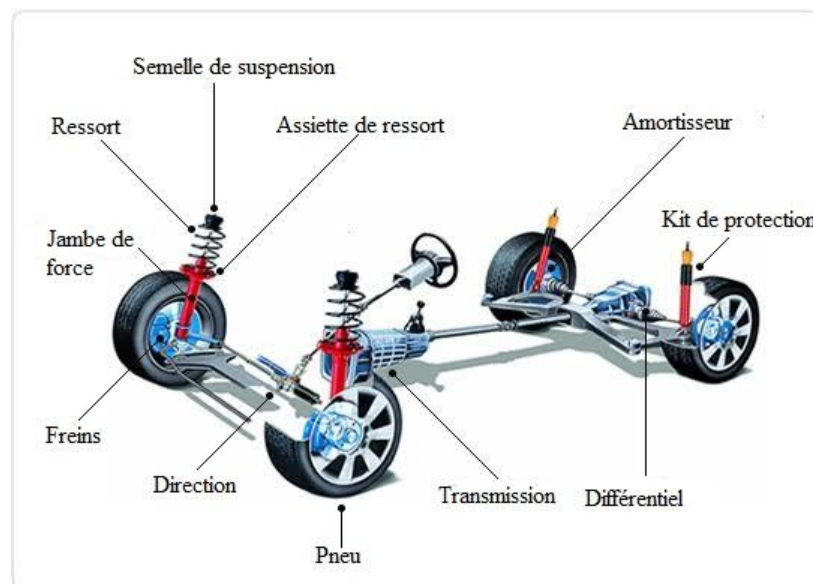
## I- Généralités sur la suspension automobile

### I.1- Introduction

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

### I.2- Système de suspension

#### I.2.1- Définition d'un système de suspension



**Figure 1.1-** Suspension d'un véhicule automobile

Les suspensions d'un véhicule sont les éléments permettant de relier les masses non suspendues (typiquement la roue, les pièces d'entraînement de la 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, réduisant la fatigue mécanique et l'usure excessive, améliore le confort des passagers et maintien le contact entre les roues et le sol malgré ses 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 :

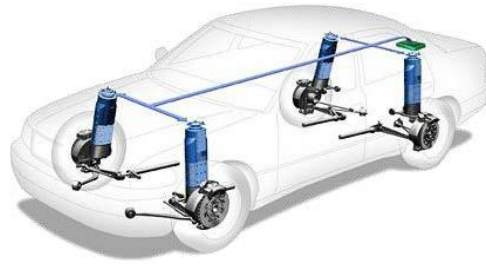
- porter le véhicule : Par définition même, la suspension doit supporter les masses suspendues et maintenir la valeur de la hauteur relative du châssis par rapport au sol dans un intervalle prédéterminé.
- assurer un contact permanent : Sur un véhicule dépourvu de suspension, le pneumatique ne peut pas 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 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]

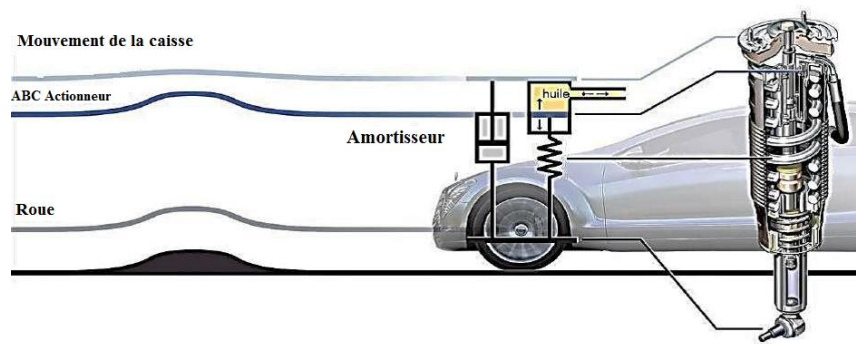
#### **I.2.3.1- Suspension active**

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 représentée par l'inertie générée et 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, 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 des meilleures performances de tenue de route et de confort. [1]



**Figure 1.2-** Exemple d'un système de suspension active

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 1.3). Deux lasers, intégrés aux phares avant, balayent 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]

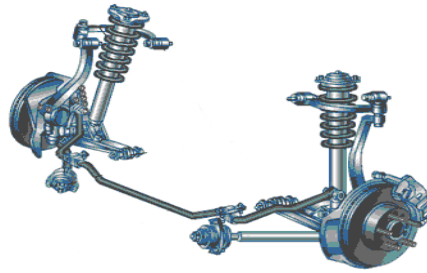


**Figure 1.3-** Système ABC dans sa nouvelle version

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- 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. [1]



**Figure 1.4-** Exemple d'un système de suspension passive

### I.2.3.3- 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.

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 de 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 (figure 1.5). [4]





**Figure 1.5-** Exemples d'amortisseurs semi-actifs à contrôle électronique, en utilisant trois différentes technologies

### 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 1.1-** Comparaison des performances des trois types de suspension

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

#### I.4- Différentes architectures de suspension

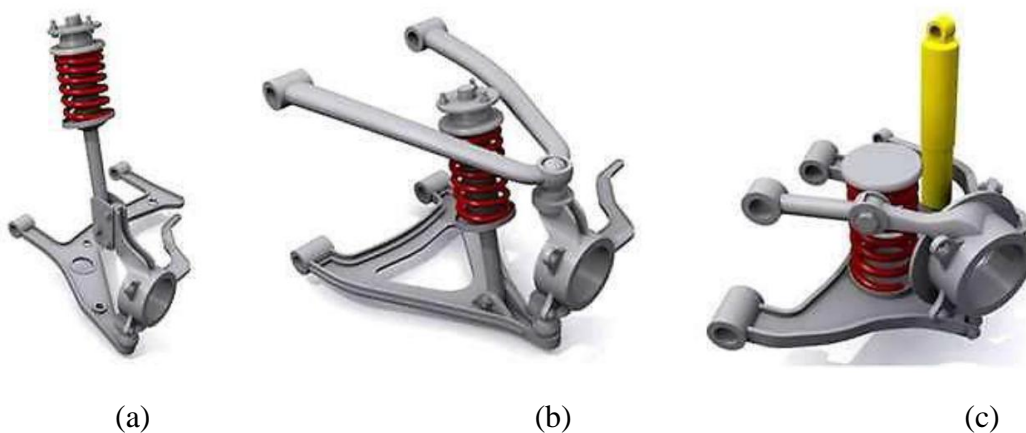
Il existe beaucoup de types de systèmes de suspensions et se classent suivant leur situation sur les trains avant ou arrière du véhicule. Dans les deux cas on peut diviser l'ensemble de ces systèmes en deux catégories : Les suspensions à essieu rigide et à essieu indépendant. Généralement, le train avant 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 garantit 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 attentif quant au dimensionnement du combiné puisque il doit subir de sérieux efforts (figure 1.6.a).

- **Double triangulation** : Cette architecture est utilisée sur les véhicules à tendance sportive ou haut de gamme car plus coûteux, 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.

- **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 1.6.c).

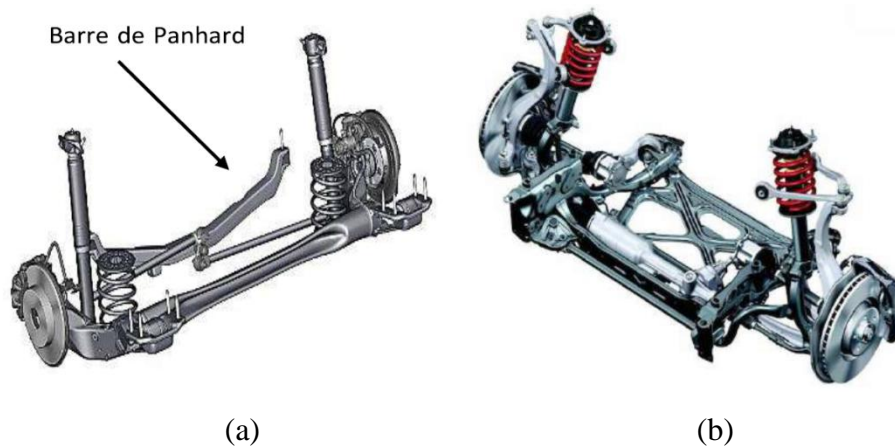


**Figure 1.6-** Différentes architectures des suspensions des trains avant

Pour le train arrière de multiples configurations existent du fait des différents modes de transmission (traction, propulsion, 4x4), cependant certains sont plus couramment utilisés, 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 1.7.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 1.7.b).



**Figure 1.7-** 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. [4]

### I.5.1- Ressorts

#### I.5.1.1- Définition du ressort

Le ressort est un dispositif mécanique conçu pour emmagasiner de l'énergie lorsqu'il est déformé et en restituer la même quantité lorsqu'il est relâché. [1]

### 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 et 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.

### 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 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 1.8-** 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. Ils sont gros et ils englobent les amortisseurs afin d'assurer le confort le plus optimal possible. [1]



**Figure 1.9-** Exemple d'un ressort cylindrique

#### **I.5.1.3.3- Le ressort de torsion**

À part la forme spécifique de ses extrémités, ce ressort est identique à un ressort hélicoïdal de traction-compression à très faible angle d'hélice, ou même à un ressort de traction à spires jointives si l'on recherche un certain frottement interne, par exemple pour favoriser l'amortissement de vibrations.



**Figure 1.10-** Ressort de torsion

Nous supposons que notre ressort a des spires non jointives et très peu inclinées (travaillant en flexion presque pure) et que ses extrémités sont encastrées. Si tel n'était pas le cas la précision des formules serait passablement altérée et la répartition des contraintes modifiée dans un sens nettement défavorable.

Il faut toutefois reconnaître que dans un très grand nombre de mécanismes où les critères de précision sont secondaires, les extrémités sont accrochées ou plus simplement encore appuyées.

Il est assez facile de « bricoler » des ressorts de torsion en hélice cylindrique mais il faut généralement faire plusieurs essais si l'on veut approcher une valeur précise de la raideur. Le

composant de base, que l'on peut trouver dans les bonnes quincailleries ou grandes surfaces, est la corde à piano. Il en existe de différentes sections et de différentes qualités. Pour fabriquer le ressort, on accroche le fil dans le mandrin d'une perceuse mécanique ou d'un tour et on l'enroule autour d'une tige filetée dont le pas est égal ou légèrement supérieur au diamètre du fil. On fait tourner le mandrin dans le sens antihoraire (comme pour dévisser) tout en maintenant fermement le fil avec une pince de manière à le laisser filer « sous contrôle ». Les résultats sont meilleurs si l'on pince le fil entre deux tasseaux de bois dur maintenus, pendant l'enroulement, en appui sur la tige filetée.

## 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, l'amplitude des oscillations d'un objet en amortissant ses vibrations, généralement par dissipation d'énergie.

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.

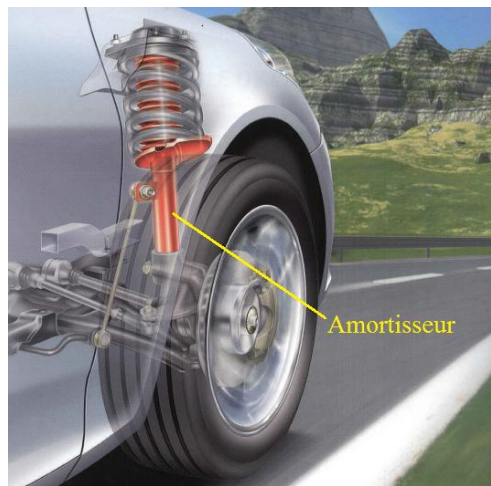


Figure 1.11- Aperçu d'un amortisseur monté sur une roue

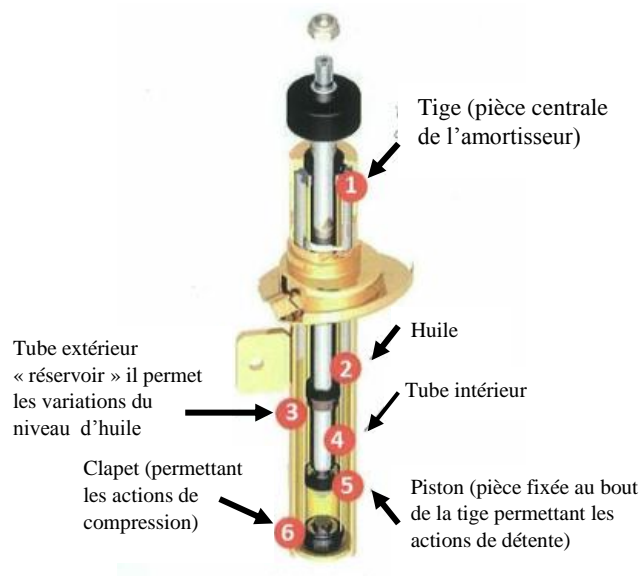
### I.5.2.2- Rôle de l'amortisseur

- **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 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 de l'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.



**Figure 1.12-** Exemple d'un amortisseur hydraulique

L'amortisseur est constitué d'une tige et 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 chassée 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 transférée 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.

### **I.5.3- Types d'amortisseurs d'un véhicule**

On distingue deux types d'amortisseur, 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 connues sont :

##### **I.5.3.1.1- Amortisseurs hydrauliques 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 forcée 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.



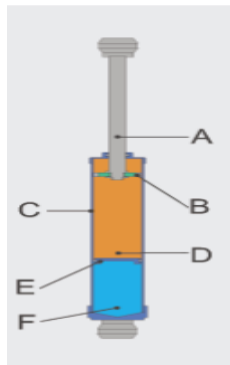
**Figure 1.13-** Exemple d'un amortisseur hydraulique à ressort

##### **I.5.3.1.2- Amortisseurs oléopneumatiques ou hydropneumatiques**

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 de 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.



**Figure 1.14-** Schéma d'amortisseur oléopneumatique

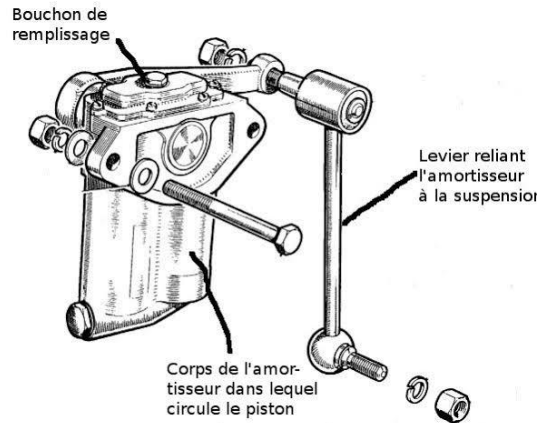
### **I.5.3.1.3- Amortisseurs hydrauliques**

#### **1.5.3.1.3.1 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 une autre pour la détente. Ce dispositif équipera des automobiles de grandes séries et de compétition jusqu'aux années 1960.

#### **1.5.3.1.3.2 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 1.15-** Schéma d'un amortisseur hydraulique à levier

#### I.5.3.1.4- 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 de véhicules de transport (modèle Stradair 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.
- Dans l'isolation des installations fonctionnant avec des systèmes à vibration (grille de décochage de fonderie, transporteur vibrant).



**Figure 1.16-** Exemple d'un amortisseur pneumatique

#### I.5.3.1.5- Amortisseur à inertie

C'est un modèle d'amortisseur 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.

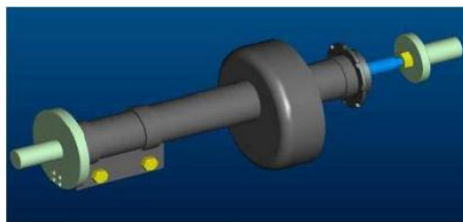


**Figure 1.17-** Exemple d'un amortisseur à inertie

### **I.5.3.2- Amortisseurs à effet magnétique**

#### **I.5.3.2.1- Amortisseur 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. 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). [3]



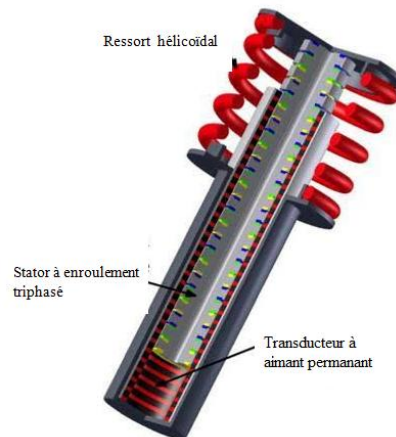
**Figure 1.18-** Amortisseur magnéto-rhéologique

#### **I.5.3.2.2- Amortisseur électromagnétique**

##### **2.5.3.1.3.1 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. Ce système de

suspension basé sur des moteurs électriques linéaires qui permettent d'ajuster la souplesse et la dureté de la suspension en fonction du terrain et du souhait de l'utilisateur. [5]



**Figure 1.19-** Amortisseur électromagnétique

#### 3.5.3.1.3.1 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 les 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. [5]

## I.6- Conclusion

Dans ce chapitre on a donné un état de l'art des 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 et leurs principes de fonctionnements et leurs importances cruciales dans le mécanisme de la structure de la voiture.

## II- Configuration d'un amortisseur électromagnétique

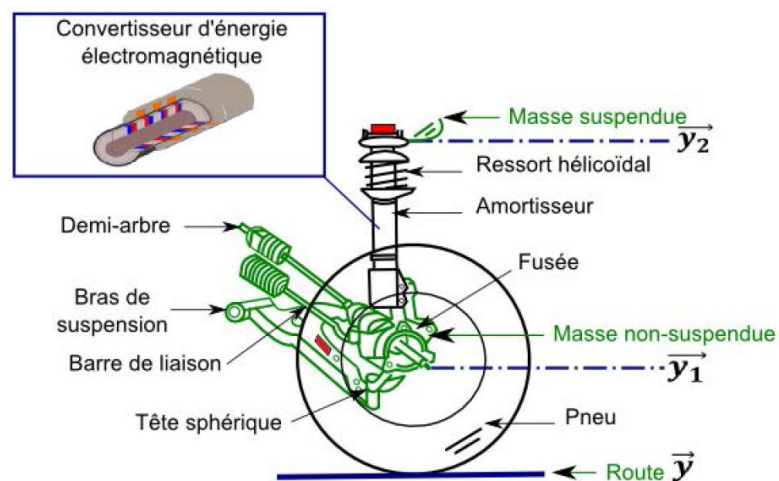
### II.1- Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de la configuration d'un amortisseur électromagnétique d'un véhicule. On mettra en évidence les paramètres essentiels afin d'aboutir à une structure adaptée du convertisseur. Une fois le cahier des charges donné, différentes solutions seront proposées pour permettre de déduire la configuration la plus adaptée. Les grandeurs régissant le modèle sont soumises aux phénomènes de la mécanique, du magnétisme ainsi que de l'électricité, le modèle donc peut porter le nom d'un convertisseur mécano-magnéto-électrique.

### II.2- Géométrie du système

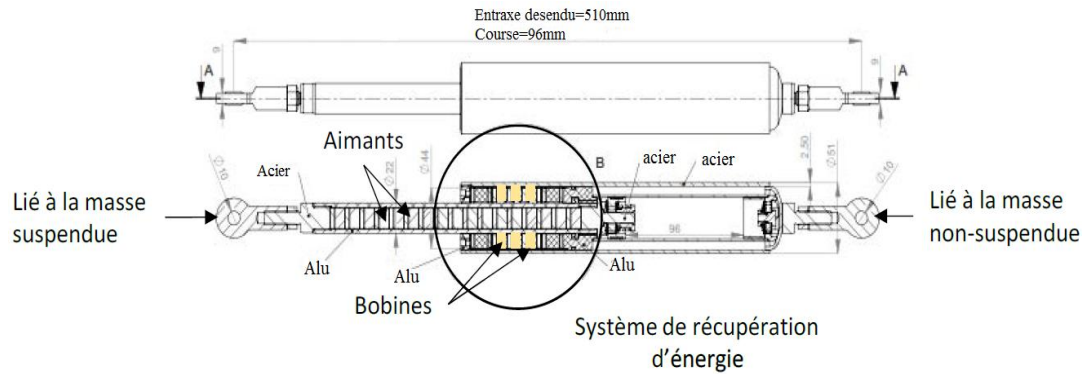
#### II.2.1- Intégration du convertisseur électromagnétique à la suspension

Le système de la suspension peut être décomposé en trois sous-systèmes (Figure 2.1), le premier sous-système correspond à la suspension, le deuxième au convertisseur électromagnétique et le troisième au circuit électrique de gestion et de restitution de l'énergie électrique. Le convertisseur d'énergie est fixé entre la caisse du véhicule (masse suspendue) et la roue (masse non-suspendue). [6]



**Figure 2.1-** Emplacement du convertisseur d'énergie dans le schéma du système de suspension

On s'intéresse à la partie qui a un potentiel énergétique élevé qui est la partie haute du tube extérieur de l'amortisseur (Figure 2.1). On retrouve les aimants ainsi que le circuit magnétique comprenant les bobines du convertisseur qui logent sans embrouiller les autres éléments mécaniques. Le circuit magnétique est un circuit généralement en matériau ferromagnétique qui laisse circuler le flux d'induction magnétique (Figure 2.2).



**Figure 2.2-** Circuit représentant la transformation électromagnétique

Les aimants permanents sont placés à l'intérieur de la tige et les bobines dans le corps de l'amortisseur pour faciliter l'intégration du convertisseur. D'autre part, les positions des aimants sont alternées de manière à conduire le champ magnétique tout autour des bobines. Le circuit magnétique alors entourant les bobines est créé pour optimiser le passage de ce champ magnétique.

La configuration de base qui sera alors intégrée pour cet amortisseur se définit par le mouvement de la masse suspendue par rapport à la masse non-suspendue. Ce mouvement induit une translation du corps de l'amortisseur contenant les enroulements (bobines) vis à vis de l'empilement des aimants permanents logés dans la tige de l'amortisseur.

## II.2.2- Cahier des charges et présentation de la configuration choisie

### II.2.2.1- Recherche d'une configuration adaptée

Pour proposer une configuration adaptée à notre cas d'étude, il est nécessaire de savoir :

- les contraintes constructives attachées à l'intégration du convertisseur dans un amortisseur réel. La conséquence directe de cette contrainte scrute dimensionnement des éléments prédominants comme les bobines et les aimants dans le système complet.
- après les contraintes physiques, le choix du matériau devra être conforme à notre problématique à l'importance de la performance globale de notre système.

### II.2.2.2- Paramètres influents de l'amortisseur électromagnétique

Afin de concevoir ce type d'amortisseur, il faut tenir compte de quelques paramètres, ils dérivent directement du dimensionnement des aimants (Tableau 2.1) et des enroulements (bobines) (Tableau 2.2) connaissant que le dimensionnement de chacun de ces éléments a également une influence directe sur l'autre. Autrement, il convient de travailler de manière assortie à la conception de ces éléments.

**Tableau 2.1-** Synthèse des paramètres prépondérants dans le dimensionnement des aimants au regard de leur influence sur la récupération d'énergie

Paramètres	Contraintes	Conséquences
Volume de l'aimant	Si le volume global est trop faible,	Les aimants ne sont pas fabricables à cause du risque de rupture et du non garanti des propriétés magnétiques
	Si le volume global est trop important,	Les aimants ont un encombrement trop grand par rapport aux autres éléments du système. Il y a une réduction significative du parcours des bobines-aimants lors d'un mouvement de translation de la tige.
Géométrie de l'aimant	Si la géométrie est trop complexe,	Les aimants peuvent ne pas être fabriqués car des moules spécifiques doivent être mis en place. De plus, les propriétés magnétiques ne sont pas toujours garanties.

De façon plus précise, le dimensionnement des enroulements permettant de rendre optimale la conversion d'énergie dépend des paramètres suivants :

- **Matériau ferromagnétique utilisé** : Ce circuit magnétique ne doit pas entraîner la saturation du matériau choisi ni la création de pertes par fuites des lignes de champ.
- **Géométrie des entrefers dans la conception du circuit magnétique** : Pour augmenter la conversion d'énergie, il convient en effet de réduire l'espace entre les bobines et les aimants.
- **Type de fil conducteur employé et son calibre** : Le choix du fil a en effet son importance et son influence aux performances de la bobine tandis que la section choisie pour le fil conducteur est dépendante de la valeur maximale du courant qui va circuler dans le fil.
- **Nombre de spires ( $N_s$ ) contenu dans une bobine** : Il s'agit ici d'optimiser le rendement pour un même volume.

**Tableau 2.2-** Synthèse des paramètres prépondérants dans le dimensionnement des bobines au regard de leur influence sur la récupération d'énergie

Paramètres	Contraintes	Conséquences
<b>Volume du circuit magnétique</b>	Si le circuit magnétique est trop "fin" par rapport à la conduction des lignes de champs	Le matériau du circuit magnétique se sature, ne garantissant plus la conduction des lignes de champ.
	Si le circuit magnétique est trop "épais" par rapport à la conduction des lignes de champs	Le rendement de la conduction des lignes de champ est fortement réduit.
<b>Espace entre les bobines et les aimants (entrefer)</b>	Si l'entrefer est trop important,	Les lignes de champs sont mal conduites ce qui entraîne des pertes, cependant, les forces magnétiques induites par le mouvement de translation sont réduites
	Si l'entrefer est trop faible,	Les forces magnétiques sont fortement augmentées freinant le mouvement de translation de la tige par rapport au corps
<b>Types de fils</b>	Si le fil est constitué d'un matériau non standard comme le cuivre,	Le coût de celui-ci est plus élevé. Cependant, certains d'entre eux ont une meilleure conduction.
	Si la section n'est pas cylindrique	Le coût du fil est plus élevé. Cependant, pour certaines sections, l'espace vide entre les parties conductrices est réduite augmentant ainsi la conduction de la bobine.
<b>Diamètre du fil</b>	S'il est trop faible,	Il y a un risque d'endommagement de la bobine car le courant admissible dans la bobine est plus faible.
	S'il est trop important	L'espace non conducteur est accru. Le rendement de la bobine est plus faible.
<b>Nombre de spires</b>	S'il est faible	Il y a moins de matière conductrice.
	S'il est important	Il y a un risque d'endommagement de la bobine car le courant admissible dans la bobine est plus faible.

D'autres contraintes doivent également être prises en considération comme :

- Le volume total de la bobine, son poids, ses dimensions : Le volume total de la bobine est fortement dépendant de l'espace disponible et il ne peut pas être réduit indéfiniment compte tenu de l'épaisseur des fils.
- Le prix de la bobine choisie : De nombreux fabricants proposent des bobines de cuivre aux dimensions standards à des prix très attractifs. Cependant, des géométries plus complexes ou des dimensions particulières peuvent assurément engendrer des coûts supplémentaires.

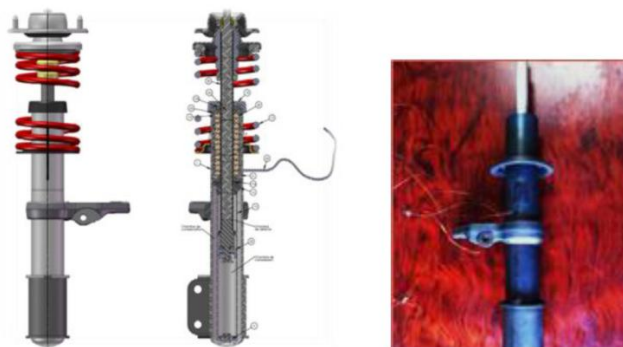
Pour sa part, le dimensionnement des aimants en vue d'une meilleure conversion d'énergie requiert de prendre en considération :



- Le type d'aimants choisi : Certains aimants sont plus adaptés à la récupération d'énergie que d'autres et bénéficient en plus d'une couche protectrice qui permet de les utiliser dans des environnements agressifs.
- La géométrie générale de l'aimant : Un large choix est disponible chez les fabricants (cubique, cylindrique, sphérique,...).
- Le volume total de l'aimant, son poids et ses dimensions : Pour un aimant cylindrique, comme c'est le cas dans cette étude, la hauteur ne peut être réduite indéfiniment. A l'inverse, utiliser des aimants avec une longueur excessive n'a pas non plus d'intérêt vis-à-vis de l'agencement des bobines et de leurs dimensions propres. [6]

### II.2.2.3- Etude et analyse des solutions proposées à la configuration

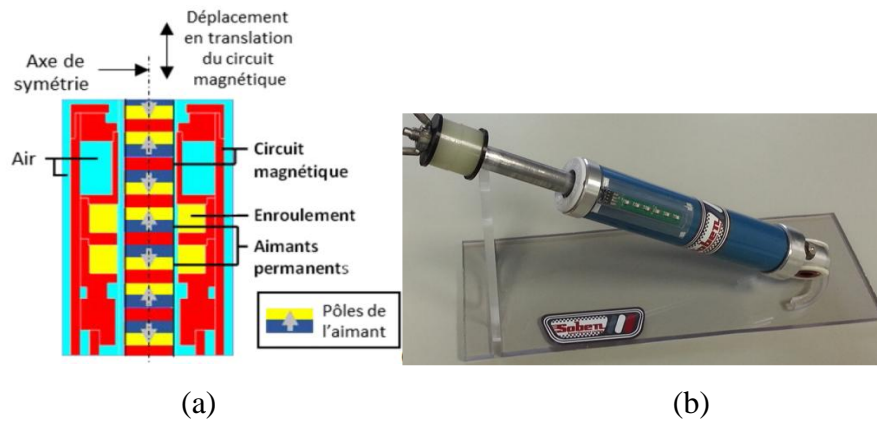
Plusieurs solutions sont envisageables. La première idée naturelle est de concevoir une configuration contenant un nombre important de bobines afin de générer un maximum d'énergie. On la désigne comme étant le prototype n°1. Cette configuration a comme conséquence directe de générer un encombrement important comme illustré sur la (Figure 2.3). Les aimants sont montés en opposition de pôle magnétique à l'intérieur de la tige de l'amortisseur. La hauteur des aimants est de 8mm tandis que l'acier les séparant est de 4mm. En effet, en positionnant les bobines tout le long du corps de l'amortisseur, ces dernières occupent alors une place non négligeable. En conclusion, ce type de configuration requiert des amortisseurs de taille conséquente. Cette solution n'est donc pas adaptée à notre application.



**Figure 2.3-** Prototype n°1 intégré dans le corps d'un amortisseur

Afin de limiter cet encombrement, une seconde configuration de taille réduite facilement intégrable dans la plupart des amortisseurs est proposée (Figure 2.4). Les aimants sont montés en opposition de phase dans la tige ce qui explique l'alternance de couleur rouge et bleue sur la (Figure 2.4). La différence majeure entre le prototype n°1 et le n°2 est la réduction significative du nombre total d'enroulements passant de 12 à 2. La dimension des

aimants et des pièces en acier les séparant est identique. De plus, une attention a été portée quant au choix dimensionnel des éléments constituant le convertisseur électromagnétique afin de les réduire à leur maximum tout en optimisant leur rendement. Un logement dans le circuit magnétique dans la partie haute du tube de l'amortisseur a été prévu afin d'y intégrer une carte électronique pour gérer la gestion de l'énergie récupérée. L'inconvénient majeur directement observable de ce prototype n°2 lorsque l'on le manipule est la présence d'une composante fluctuante élevée de forces magnétiques gênant le mouvement naturel de translation de l'amortisseur en générant des vibrations. Ces forces alternatives sont liées à la structuration du circuit magnétique (circuit + aimant). Bien que l'on cherche à récupérer de l'énergie à l'aide d'un convertisseur électromagnétique, celui-ci ne doit pas engendrer des vibrations parasites de nature à perturber le bon fonctionnement de l'amortisseur. [6]



**Figure 2.4-** Circuit magnétique (a) intégré à un amortisseur appartenant au prototype n°2 (b) sans souci de réduction des forces magnétiques

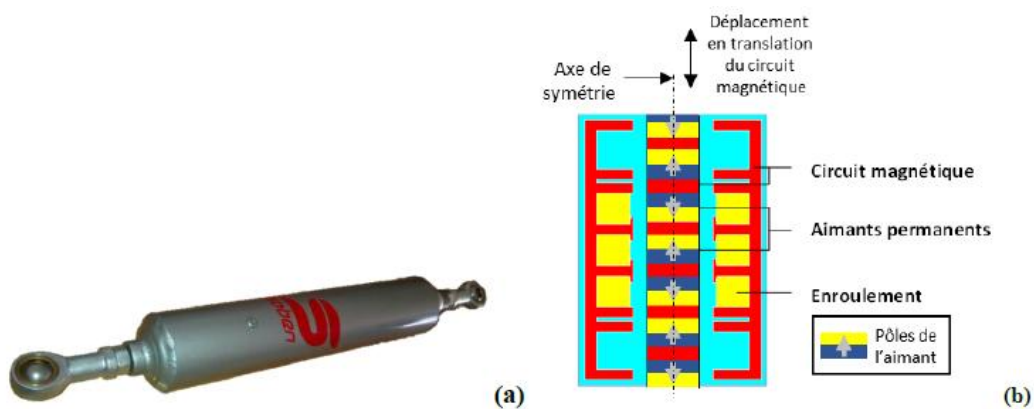
Afin de palier à ce problème, une troisième configuration sera utilisée. Nous avons décidé de regarder l'influence des forces magnétiques sur le convertisseur



**Figure 2.5-** Prototype n°3 du convertisseur électromagnétique intégré dans le corps de l'amortisseur

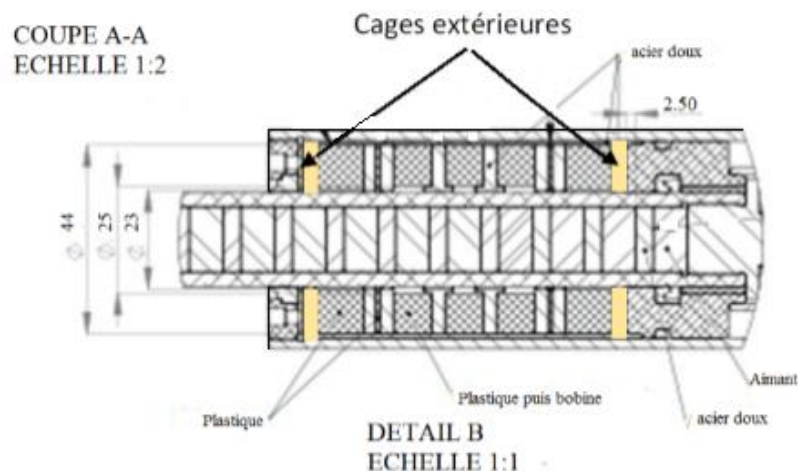
Dans ce but, une configuration simplifiée, c'est-à-dire réduite à une partie du circuit magnétique entourant les bobines et la tige contenant les aimants, a été proposée pour arriver à un compromis de solution. Elle est désignée comme étant le prototype n°3 (Figure 2.5).

En vue de concevoir le récupérateur d'énergie électromagnétique de façon optimale, son intégration ne doit pas gêner le mouvement linéaire de l'amortisseur. Cette valeur est fixée arbitrairement et pourra être abaissée dans des futurs travaux. Pour atteindre cette plage de force, il est possible d'avoir recours à plusieurs techniques, on peut modifier le circuit magnétique et l'implantation des éléments du convertisseur électromagnétique soit en changeant leurs positions ou bien en éloignant les aimants du circuit magnétique.



**Figure 2.6-** Prototype optimisé n°4 (b) intégré à un amortisseur (a)

La solution choisie (Figure 3.6-a) est de jouer sur l'emplacement des éléments du convertisseur électromagnétique et de redessiner le circuit magnétique entourant les enroulements. Cette configuration correspondant au prototype n°4



**Figure 2.7-** Proposition d'une nouvelle topologie de circuit magnétique intégrable dans le corps d'un amortisseur prenant en compte la réduction des forces magnétiques

La conception de cette dernière configuration est la synthèse des améliorations précédentes. Les modifications majeures ont été menées essentiellement sur la conception du circuit magnétique entourant les bobines mais aussi sur l'augmentation de l'espace entre les bobines et les aimants.

Dans ce but, plusieurs techniques sont exploitées comme l'utilisation de dentures coniques en bout de cage, l'augmentation de la distance aimant/circuit magnétique et la modification de certains éléments du convertisseur électromagnétique afin de créer des forces de dentures moindres. De plus, l'encombrement final d'un tel dispositif se doit d'être raisonnable afin de ne pas nuire au comportement général de l'amortisseur mais aussi ne pas entraîner des modifications majeures à la suspension. L'amortisseur dessiné devra donc être facilement insérable dans le système réel de suspension d'un véhicule. [6]

### **II.3- Conclusion**

On a vu dans ce chapitre l'emplacement du convertisseur électromagnétique qui joue le rôle de l'amortisseur électromagnétique dans la suspension, et aussi les différents types de configurations de sa géométrie et les paramètres qui influent à leurs conceptions.

### III- Aimants permanents

#### III.1- Introduction

Les progrès technologiques réalisés au cours des soixante dernières années ont complètement révolutionné les possibilités des aimants permanents. De nouveaux types ont été découverts, synthétisés et industrialisés, avec des performances telles que les applications ont pu se multiplier dans de nombreux domaines, en l'occurrence dans les amortisseurs électromagnétique.

Après avoir introduit dans le chapitre précédent 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 enfin leur modélisation.

#### III.2- Définition d'un aimant permanent

Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieure.

On appelle donc un aimant permanent tout corps ayant la capacité ou la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente et qui est difficile de se désaimanter lorsqu'il est aimanté.

#### III.3- Propriétés magnétiques

Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leur cycle d'hystérésis et leur tenue à la température. Le deuxième quadrant du cycle ( $B > 0$ ,  $H < 0$ ), appelé courbe de désaimantation est le domaine de fonctionnement de l'aimant permanent lorsque ce dernier est soumis à un champ extérieur.

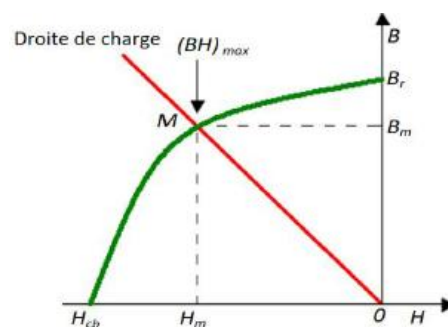


Figure 3.1- Courbe de désaimantation

Cette courbe est caractérisée par :

- L'induction rémanente ( $B_r$ ) : C'est -à-dire l'induction résiduelle au circuit fermé.
- Le champ coercitif ( $H_{cb}$ ) : Caractérise le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée plus l'aimant est stable.
- Produit d'énergie volumique ( $BH$ ) max, cette énergie caractérise la qualité du matériau.

#### III.4- Différentes formes d'aimants

Les aimants permanents sont produits dans des formes géométriques très différentes. Ils peuvent être de différentes formes telles que des aimants en barre, des aimants en fer à cheval, des aimants en disque, des aimants en anneau, entre autres.



**Figure 3.2-** Quelques aspects de formes d'aimants

En raison des différentes formes, les propriétés magnétiques peuvent être influencées de manière significative. Par conséquent, un aimant en disque, en raison de son aspect obtient les faces de ses plus grands pôles sur ses côtés plats, ce qui augmente la force de son champ magnétique. Pour les aimants en fer de cheval (U), La rectification de leurs pôles qui en résulte amplifie leur champ magnétique. Les aimants en barre dont les pôles magnétiques sont face à face, leur force magnétique est plus faible et il est utilisé dans les applications courantes les aimants en anneau ont un fort champ magnétique même avec de petites dimensions.

#### III.5- 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 une force d'attraction de 10 N et un aimant en néodyme une force d'attraction de 15 N. [7]

### III.6- Classification des aimants

On compte trois familles d'aimants permanents dont les propriétés et les applications sont diverses.

#### III.6.1- Aimants en Terres rares

Bien qu'ils soient abondants dans la nature, les terres rares sont les éléments du groupe du Lanthanides auxquels vient s'ajouter l'Yttrium. Ils présentent par rapport aux autres aimants existants une très haute énergie magnétique et une grande résistance à la désaimantation, cette famille d'alliage comprend:

- Aimants samariums cobalt.
- Aimants au néodyme-Fer6Bore.
- Aimants au cobalt avec autres éléments de terres rares.

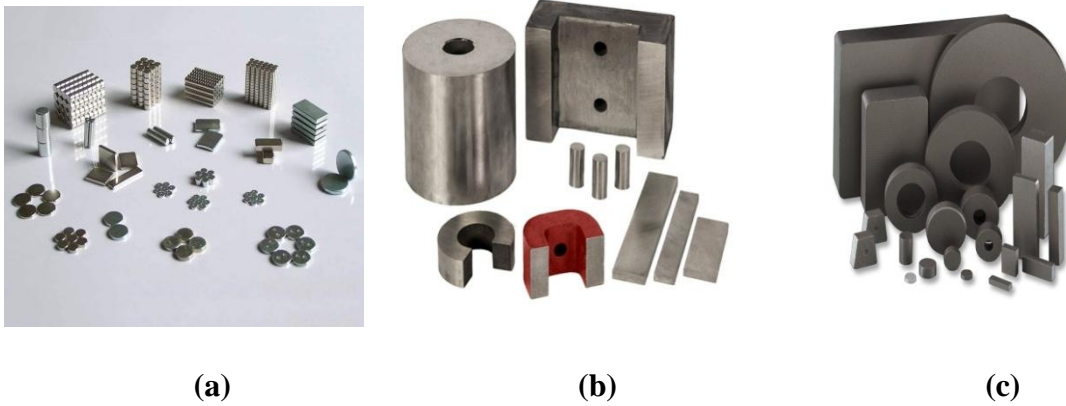
#### III.6.2- Aimants métalliques (Alnico)

Ce sont des alliages à base fer, nickel et Aluminium, auxquels on rajoute du cobalt et du Titane, au vu de leur amélioration de leur propriétés, Ils sont des aimants de faible qualité, il existe trois familles d'aimants obtenues à partir de ces alliages frites ou fondus :

- Alliages isotropes.
- Alliages anisotropes.
- Alliages à cristallisation dirigée ou colonnaire.

#### III.6.3- Aimants en Ferrites

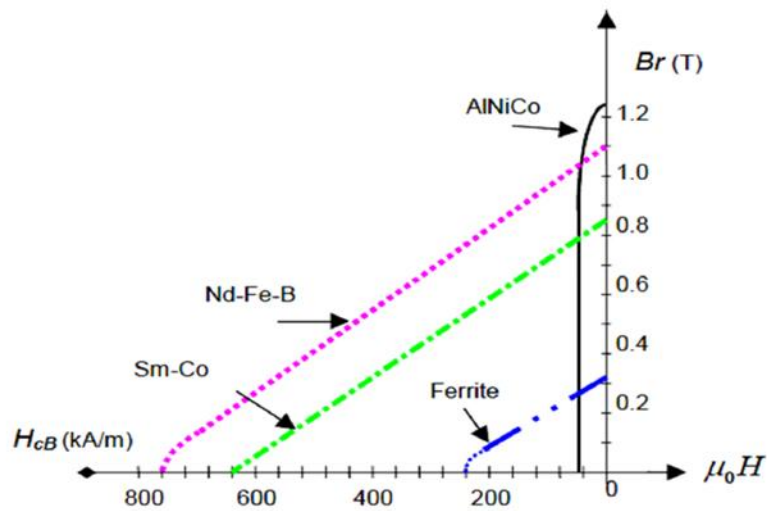
Ce sont des céramiques d'oxydes qui présentent les propriétés générales de l'ensemble des corps céramique, par opposition aux corps métalliques. Parmi tous les aimants industrialisés ce sont les plus utilisés grâce à leur bas prix non couteux.



**Figure 3.3-** Familles des aimants permanents. (a)- Terre rare. (b)- Aimants métalliques (Alnico).  
(c)- Ferrites

### III.7- Caractéristiques principales de quelques types d'aimants

La figure (3.4) présente la caractéristique de désaimantation lorsqu'un champ extérieur est appliqué pour s'opposer à l'aimantation résiduelle pour les principaux types d'aimants. [9]



**Figure 3.4-** Courbe de désaimantation  $B(H)$  des principaux types d'aimants

On peut aussi récapituler dans le tableau (3.1) les caractéristiques des différents aimants précédents : [8]



**Tableau 3.1-** Caractéristiques des aimants

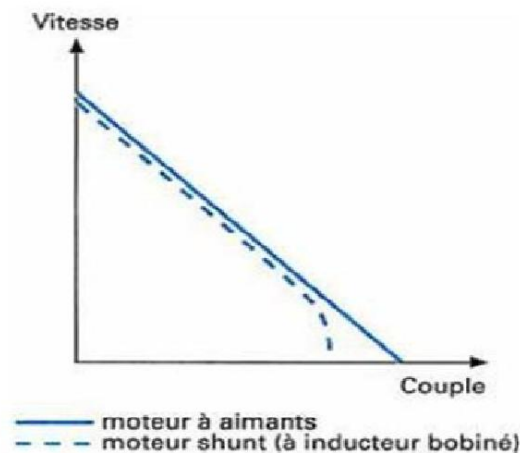
Matériaux	Br (T)	Hc (kA/m)	T° de Curie (C°)	Caractéristiques
<b>Ferrites</b>	0.2 à 0.4	200	300	Les moins chers
<b>Alnico</b>	1.2	50	750 à 850	Se démagnétisent trop facilement
<b>Samarium Cobalt</b>	0.5	800	700 à 800	Prix élevé à cause du cobalt
<b>Néodyme Fer bore</b>	1.3	1500	310	Prix en baisse (brevets), sujet à l'oxydation

### III.8- Avantages des aimants

En remplaçant l'inducteur d'une machine et son bobinage en cuivre par un aimant, nous allons noter les avantages introduits en comparaison à une machine ou un moteur de même puissance : [9] [10]

- Diminution de la masse de (15 à 30 %) avec des ferrites, par rapport à un moteur à induction bobiné, le rapport puissance / poids (puissance par unité de poids), qui dépasse (1 kW/kg), soit une amélioration de (10-20 %) par rapport aux générations précédentes des moteurs (0,8kW/kg).
- 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 occupent (1/3) d'espace en moins que les moteurs asynchrones donc sont moins encombrants.
- La consommation de courant est inférieure puisqu'il n'y a pas de courant inducteur, le rendement énergétique s'en trouve donc amélioré d'environ (10 à 15 %), un moteur à aimant permanent présente également l'avantage d'être (30 à 40 %) plus compact que les moteurs classiques, les aimants qui créent le champ magnétique nécessaire au fonctionnement du moteur éliminent également les pertes d'énergie typiques des moteurs électriques classiques.
- L'amélioration de la fiabilité, car les risques de cassure ou rupture de fil sont éliminés pour l'inducteur, qu'il est un aimant permanent.
- Le montage étant plus facile et plus rapide, la fabrication des moteurs à aimants est plus simple à automatiser que celles des moteurs à inducteurs bobinés.

- 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.
- 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 bobinage en cuivre à l'inducteur.



**Figure 3.5-** Avantage (couple-vitesse) d'un inducteur à aimant permanent

### III.9- Domaines d'application des aimants

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 considérés suivante:

#### III.9.1- Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique

Il s'agit des systèmes entrefer fixe, cette conversion concerne les dispositifs suivants : les générateurs de courants continus, les alternateurs, dynamos de cycle, les détecteurs magnétiques.

#### III.9.2- 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.

### III.9.3- Conversion d'énergie mécanique a une autre forme d'énergie mécanique

Il s'agit des systèmes a 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.

### III.9.4- Conversion d'énergie mécanique en énergie thermique

Dans une transmission par courants de Foucault, une partie de l'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, dispositifs de freinage sans contact, les tachymètres.

### III.9.5- La création d'un champ magnétique fixe

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

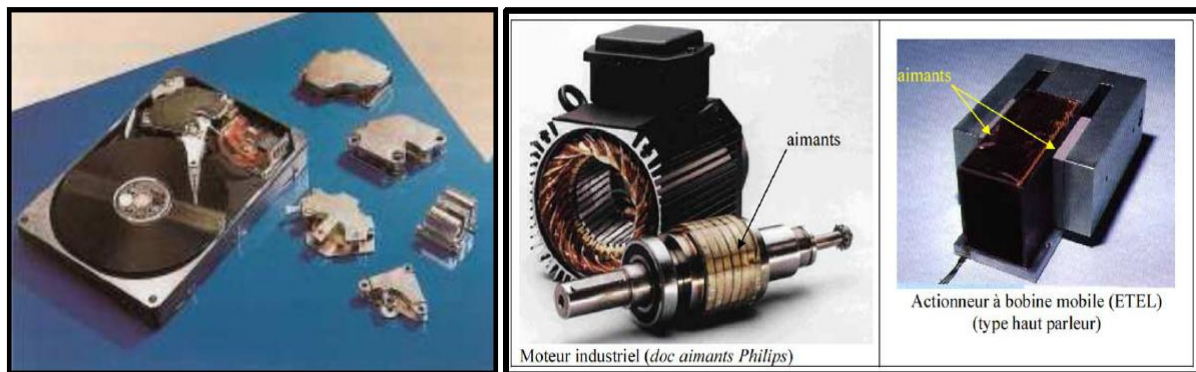


Figure 3.6- Exemple d'utilisation des aimants permanents

## III.10- Modélisation des aimants permanents

L'intérêt de la modélisation est d'approcher mathématiquement le phénomène de l'hystérésis de l'aimant permanent, ou du moins, sa courbe représentative. Il existe plusieurs modèles analytiques et dynamiques, électrodynamique nécessaires à l'étude de champs magnétique et le phénomène hystérésis de l'aimant permanent et les matériaux magnétiques. Nous allons néanmoins nous baser sur le modèle ampérien dont les résultats seront obtenus par la détermination du potentiel vecteur  $\vec{A}$ .

### III.10.1- Principe d'équivalence :

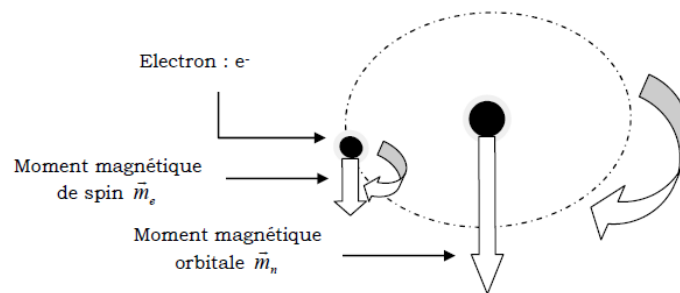
Un aimant engendre un champ magnétique, de même que celui engendré par un courant circulant dans des spires. Si une source de champ magnétique constituée d'un conducteur parcouru par des courants, engendre la même répartition spatiale de champ qu'un aimant, alors ces deux entités sont équivalentes, car aucun moyen de mesure ne peut les différencier.

### III.10.2- Modélisation ampérienne d'un aimant

Consiste à considérer que le magnétisme des corps trouve son explication dans les courants élémentaires créés par les électrons gravitant autour du noyau. Le modèle est basé sur l'analogie entre une boucle de courant, qui crée un champ magnétique et un très grand nombre d'électrons décrivant chacun des cercles autour de leur noyau comme l'illustre la figure ci-dessous : [11]

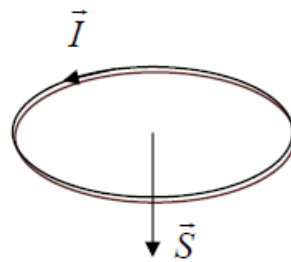
Le moment magnétique  $\vec{m}$  a deux origines :

- Mouvement orbital autour du noyau  $\vec{m}_n$ .
- Mouvement de rotation de l'électron sur lui-même  $\vec{m}_e$ .



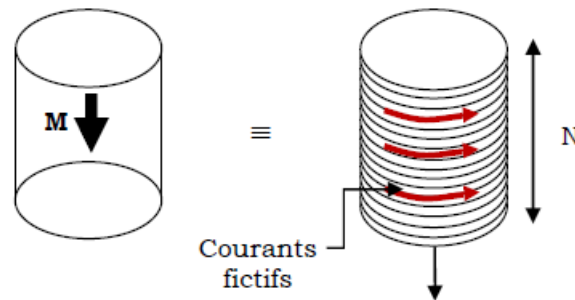
**Figure 3.7-** Moments magnétiques orbital et de spin

Ce moment magnétique est équivalent à celui d'une spire fermée de surface  $S$  parcourue par un courant  $I$  comme le montre la figure (3.8).



**Figure 3.8-** 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 3.9).



**Figure 3.9-** Modèle ampérien d'un aimant permanent

### III.10.3- Modélisation coulombienne

Dans l'approche coulombienne on s'attache au calcul de  $H$ . Cette approche trouve ses racines dans les travaux de Coulomb sur les forces engendrées par les pôles des aimants. Elle est encore couramment employée par les théoriciens. Il s'agit de résoudre les équations de champ magnétique  $H$ .

### III.10.4- Modèles analytiques

Se caractérisent par la description du phénomène par des formulations mathématiques généralement empiriques, ces modèles ne tiennent pas compte de l'histoire ou de l'état d'aimantation initiale du matériau c'est pourquoi ils ne permettent pas de décrire tous les aspects du phénomène d'hystérésis. Parmi ces modèles, nous citerons : le modèle de Rayleigh, les modèles de type LANGEVIN, le modèle polynomial, le modèle de Frôlich. [13]

### III.11- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un bref aperçu sur la théorie des aimants à travers l'étude de leurs caractéristiques magnétiques, leurs différentes formes, leur classification et leur modélisation. Cette étude nous permettra de mieux comprendre leur fonctionnement dans un amortisseur et qui sera l'objet du chapitre suivant.

## IV- Modélisation électromécanique de la suspension

### IV.1-Introduction

A partir des équations de l'électromagnétisme, nous allons élaborer une modélisation électromagnétique puis mécanique de l'amortisseur. Ce qui va nous amener à calculer la force de Laplace, le potentiel vecteur et l'induction magnétique  $B$ . Ensuite, nous allons étudier les différentes formes d'irrégularités de la chaussée dans la partie mécanique de l'étude, pour enfin calculer la déformation de l'amortisseur  $z$ .

### IV.2-Modèle géométrique

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

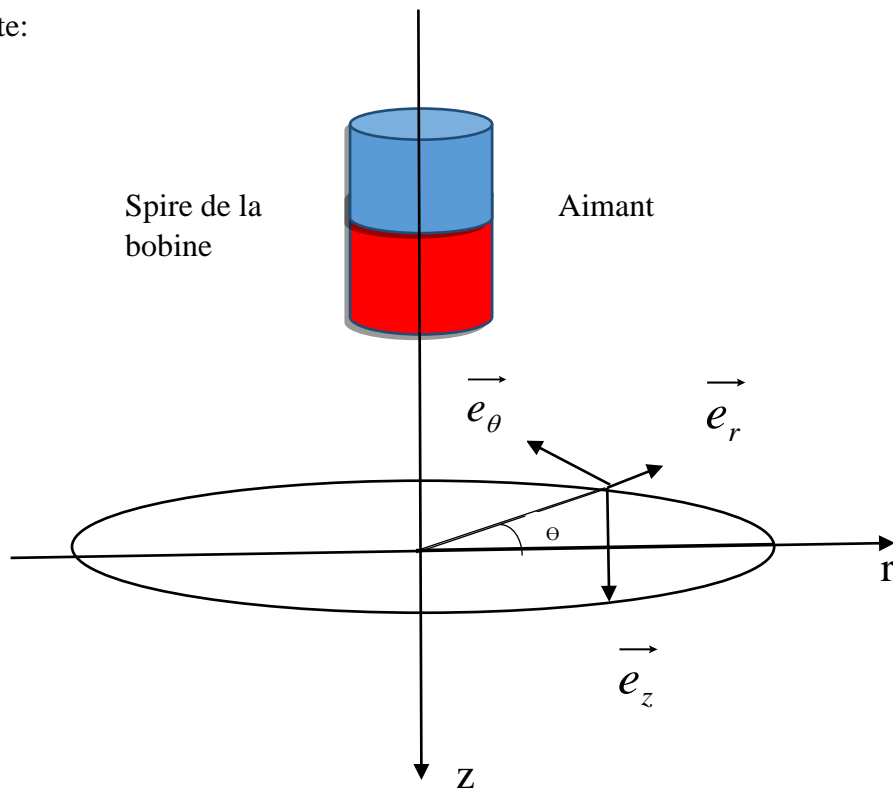


Figure 4.1- Schéma du système

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  $\theta$ .

### IV.3-Modélisation électromagnétique

#### IV.3.1- Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell décrivent le champ électrique et le champ magnétique ainsi que leur interaction avec la matière. Elles doivent donc être adaptées à la région où on veut les résoudre, et par les relations du milieu considéré. [13]

Elles sont quatre et s'expriment sous la forme suivante :

- Equation de Maxwell-Ampère :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.1)$$

- Equation de Maxwell Faraday :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.2)$$

- Equation de Maxwell Thomson :

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (4.3)$$

- Equation de MAXWELL-Gauss :

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (4.4)$$

#### IV.3.2- Loi de comportement des milieux

Des relations supplémentaires doivent venir compléter les équations de Maxwell en fonction des propriétés spécifiques des milieux auxquels on les applique :

- Dans le vide :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (4.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (4.6)$$

- Dans un milieu diélectrique :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (4.7)$$

- Dans un milieu magnétique :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.8)$$

- Dans un milieu conducteur (loi d'Ohm) :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4.9)$$

#### IV.4-Modélisation Ampérienne de l'aimant

On simplifie le théorème d'ampère en négligeant le courant déplacement dans l'équation de Maxwell-Ampère (4.1), on trouvera : [13]

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (4.10)$$

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 :

$$\text{rot} \vec{H} = 0 \quad (4.11)$$

##### IV.4.1- Polarisation magnétique

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

$$\vec{P} = \mu_0 \vec{M} \quad (4.12)$$

##### IV.4.2- Aimantation magnétique

L'aimantation magnétique représente la densité volumique des moments magnétiques telle que :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{d\tau} \quad (4.13)$$

##### IV.4.3- Induction magnétique

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

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{P} \quad (4.14)$$

En remplaçant la relation (4.12) dans (4.14), on arrive :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (4.15)$$

De l'équation (4.11), on écrit :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{M} \quad (4.16)$$

En remplaçant l'excitation magnétique donnée ci-dessus, on obtient :

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \text{rot} \vec{M} \quad (4.17)$$



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 :

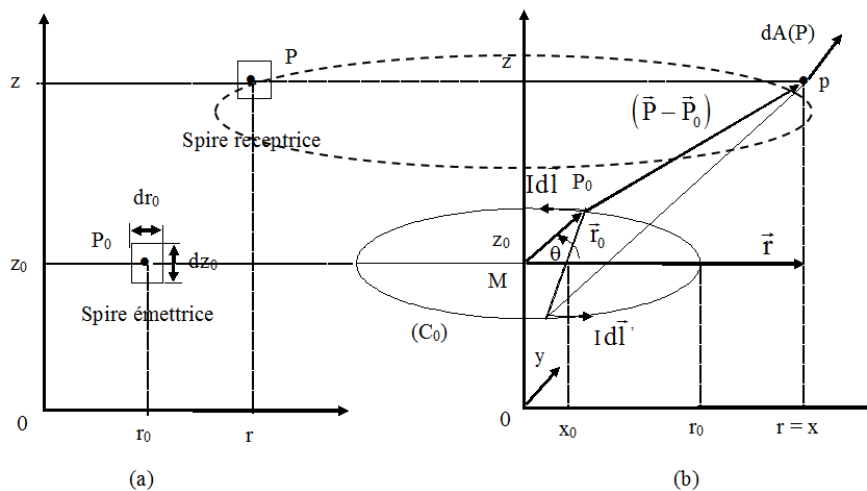
$$\begin{cases} r\vec{\text{rot}}\vec{B} = \mu_0\vec{J}_{\text{éq}} & \text{(a)} \\ \vec{J}_{\text{éq}} = r\vec{\text{rot}}\vec{M} & \text{(b)} \end{cases} \quad (4.18)$$

**IV.4.4- Potentiel magnétique vecteur déduites de la loi de Biot et Savart**

Grâce à l'axisymétrie du système, le potentiel vecteur magnétique est donnée par la formule de Biot et Savart : [14]

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} \frac{\vec{J}(P_0)dv_0}{|\vec{P} - \vec{P}_0|} \quad (4.19)$$

Cette formule exprime le potentiel créé par la spire de contour (C<sub>0</sub>) située au point M de coordonnées (0, z<sub>0</sub>) parcourue par un courant J(P<sub>0</sub>)dv<sub>0</sub>, au point P(r,z).



**Figure 4.2-** Représentation des spires émettrice et réceptrice

On admet par approximation que le courant est constant dans la section de la spire (Figure 4.2.a) :

Le développement de l'intégrale de la relation (4.19) aboutie à l'expression du potentiel en fonction des intégrales elliptiques de Legendre respectivement de première E<sub>1</sub>(k) et deuxième espèce E<sub>2</sub>(k).

$$A(r, z) = \frac{\mu_0 I(r_0, z_0)}{2\pi} \sqrt{\frac{r_0}{r}} \left[ \frac{(2 - k^2)E_1(k) - 2E_2(k)}{k} \right] = \frac{\mu_0 I}{2\pi} G(r, z) \quad (4.20)$$

$$k = \sqrt{\frac{4rr_0}{(r+r_0)^2 + (z-z_0)^2}} \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} E_1(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}} & (a) \\ E_2(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi} . d\varphi & (b) \end{cases} \quad (4.22)$$

#### IV.4.5- Composantes normale et tangentielle de l'induction magnétique

De l'équation (4.3), on définit le potentiel vecteur magnétique A, tel que :

$$\vec{B} = r\vec{\omega}t\vec{A} \quad (4.23)$$

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

La relation suivante donne les composantes du champ comme suit :

$$\begin{cases} B_r = -\frac{\partial A}{\partial z} & (a) \\ B_\theta = 0 & (b) \\ B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r} = \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{A}{r} & (c) \end{cases} \quad (4.24)$$

#### IV.4.6- Champ électromoteur E

Le champ électromoteur est donné par la loi de Lorentz :

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (4.25)$$

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

$$\vec{E} = \frac{dz}{dt} \vec{e}_z \times (B_r \vec{e}_r + B_z \vec{e}_z) = \frac{dz}{dt} \vec{e}_z \times B_r \vec{e}_r = \frac{dz}{dt} B_r \vec{e}_\theta = -\frac{dz}{dt} \frac{dA}{dz} \vec{e}_\theta = -\frac{dA}{dt} \vec{e}_\theta \quad (4.26)$$

D'après la loi d'Ohm la densité de courant est :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4.27)$$

#### IV.4.7- 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.

$$\vec{f}_L = \vec{J} \wedge \vec{B} \quad (4.28)$$

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

$$\vec{f}_L = J\vec{e}_\theta \times (B_r\vec{e}_r + B_z\vec{e}_z) = J\vec{e}_\theta \times B_r\vec{e}_r + J\vec{e}_\theta \times B_z\vec{e}_z = JB_r\vec{e}_z + JB_z\vec{e}_r = F_z\vec{e}_z + F_r\vec{e}_r \quad (4.29)$$

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

$$f_z = JB_r \quad (4.30)$$

Après remplacement, on arrive à :

$$f_z = \left( -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right) = \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \quad (4.31)$$

Pour faire apparaître la vitesse, on multiplie et on divise par  $\partial z$  la relation précédente :

$$f_z = \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial z} = \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial z}{\partial t} \quad (4.32)$$

L'intensité de la force électromagnétique est obtenue en multipliant sa densité par le volume de la bobine, telle que :

$$F_L = f_z Sl = Sl \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial z}{\partial t} = \alpha v(t) \quad (4.33)$$

Où  $S(m^2)$  et  $l(m)$  sont respectivement la section et la longueur de la bobine.

$$v(t) = \frac{\partial z}{\partial t} : \text{vitesse de déplacement de l'aimant.}$$

$\alpha$  est le coefficient d'amortissement, tel que :

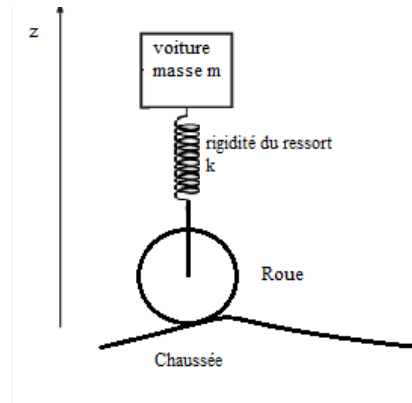
$$\alpha = Sl \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right)^2 \quad (4.34)$$

## IV.5-Modélisation mécanique du système

### IV.5.1- Oscillations linéaires libres non amorties

On a un système composé d'un ressort à boudin d'une voiture et d'une roue à un degré de liberté fixe qui se déplace pas, ce système isolé oscillant à un degré de liberté est déterminé par la coordonnée  $z(t)$  représentant l'écart d'amplitude par rapport à l'équilibre stable. On

définit l'oscillation harmonique par l'équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants suivante : [15]



**Figure 4.3-** Modèle mécanique d'un système libre

Selon le principe de la dynamique :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\ddot{z} \quad (4.35)$$

En projetant selon z on aura :

$$-kz(t) = m\ddot{z}(t) \Rightarrow m\ddot{z}(t) + kz(t) = 0 \quad (4.36)$$

En divisant sur m, on trouve :

$$\ddot{z}(t) + \frac{k}{m} z(t) = 0 \quad (4.37)$$

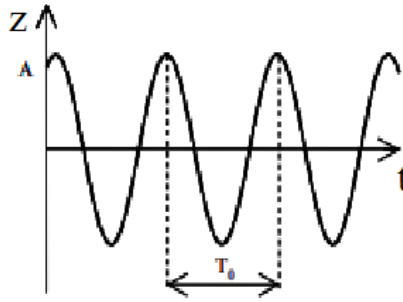
On peut l'écrire sous forme :

$$\ddot{z}(t) + \omega_0^2 z(t) = 0 \quad (4.38)$$

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

Sa période propre  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$

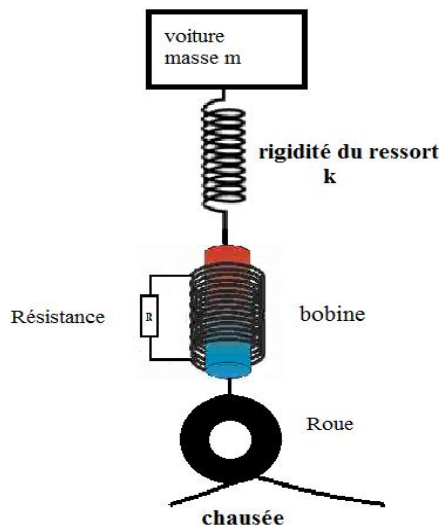
Sa solution générale est de forme :  $z(t) = z_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$  (4.39)



**Figure 4.4-** Allure caractéristiques de la solution générale

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

#### IV.5.2- Système avec oscillations linéaires libres amortis



**Figure 4.5-** Modèle mécanique du système amorti

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

$$-kz(t) - \alpha\dot{z}(t) = m\ddot{z}(t) \quad (4.40)$$

$$\ddot{z}(t) + \frac{\alpha}{m}\dot{z}(t) + \frac{k}{m}z(t) = 0 \quad (4.41)$$

Que l'on écrit comme suit :

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_{0p}\dot{z}(t) + \omega_{0p}^2 z(t) = 0 \quad (4.42)$$

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

On trouve trois cas possibles ou :  $\Delta = \alpha^2 - 4mk = 4\omega_{0p}(\zeta^2 - 1)$  (4.43)

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

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

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

Sa résolution est de forme :  $z(t) = z_0 e^{-\zeta t} \cos(\omega t + \varphi)$  (4.44)

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

La solution finale est :

$$z(t) = z_0 e^{-\zeta t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (4.45)$$

On voit bien que le système fait des oscillations avec un pseudo pulsation  $\omega_{0p}$  sauf que, contrairement au cas d'un système libre (absence d'amortissement), où l'amplitude de mouvement est constante, l'amplitude de mouvement en présence d'amortissement (faible) décroît en exponentielle avec le temps.

On définit aussi la pseudo-période du mouvement comme suit :

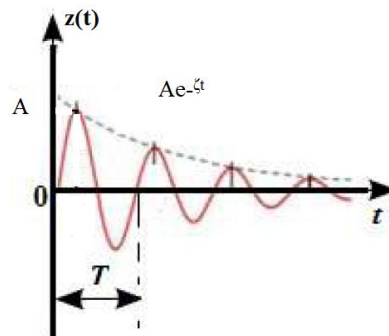
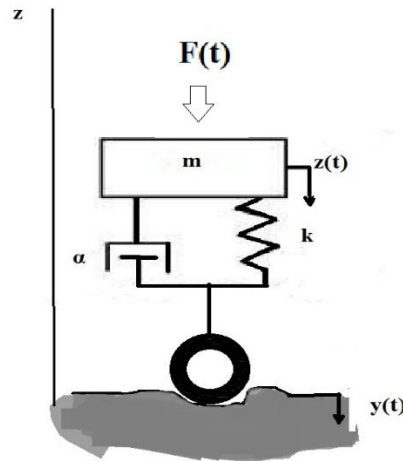


Figure 4.6- Réponse pseudo-périodique

### IV.5.3- Système amorti et forcé

Une oscillation forcée concerne 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 4.7-** 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, en associant la forme à la vitesse de déplacement on aura la force  $F_{ext}$ .

$$F_{ext}(t) - kz(t) - \alpha\dot{z}(t) = m\ddot{z}(t) \quad (4.46)$$

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

$$\ddot{z}(t) + \frac{\alpha}{m}\dot{z}(t) + \frac{k}{m}z(t) = \frac{F_{ext}(t)}{m} \quad (4.47)$$

On note que :  $F_{ext}(t) = k y(t)$  (4.48)

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

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{z}(t) + \omega_0^2 z(t) = \frac{F_{ext}(t)}{m} \quad (4.49)$$

$$z(t) = z_l(t) + z_p(t) \quad (4.50)$$

L'équation a deux solutions : une solution libre  $z_l(t)$  que nous avons déjà obtenue dans la solution de l'équation (4.39), et une solution particulière  $z_p(t)$  qui suit la force d'excitation.

## IV.6- Types de forces extérieures

### IV.6.1- 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 vitesse de propagation de l'onde dans le milieu qu'elle traverse. Lorsque l'onde

passé d'un milieu à un autre, dans lequel sa célérité est différente, sa fréquence reste inchangée, mais sa longueur d'onde varie. [16]

$$\lambda = \frac{C}{f_0} \quad (4.51)$$

#### IV.6.2- 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  $\lambda$ , à sa fréquence  $f$  et à sa période  $T$  par les égalités suivantes:

$$\lambda = \frac{C}{f} = CT_0 \quad (4.52)$$

$$v = \frac{\lambda}{T_0} = \lambda f \quad (4.53)$$

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

$$v = v_{propagation} = v_{véhicule} = \frac{\lambda}{T} \quad (4.54)$$

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

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

$$\text{et la pulsation d'excitation } \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\lambda} v \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{CT_0} v \quad (4.55)$$

#### IV.6.3- 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  $y(t)$ .

##### IV.6.3.1- Chaussée recouverte en pavée de pierre

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



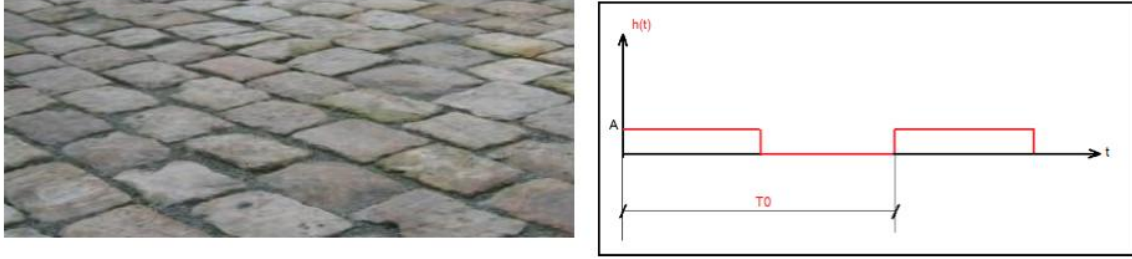


Figure 4.8- Chaussée recouverte en pave

$$y(t) = \begin{cases} y_m & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_0}{2} \\ 0 & \text{si } \frac{T_0}{2} \leq t \leq T_0 \end{cases} \quad (4.56)$$

n : nombre de cycles on prend n=5.

$$h(t) = h(t + T_0) = a_0 + \sum_i^{\infty} [a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t] \quad (4.57)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int f(t) dt = \frac{y_m}{2} \quad (4.58)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int f(t) \cos n\omega_0 t dt = \{0, 0, 0, 0, 0\} \quad (4.59)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int f(t) \sin n\omega_0 t dt = \left\{ \frac{2y_m}{\pi}, 0, \frac{2y_m}{3\pi}, 0, \frac{2y_m}{5\pi} \right\} \quad (4.60)$$

$$h(t) = \frac{y_m}{2} + \frac{2y_m}{\pi} (\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t) \quad (4.61)$$

L'équation  $y(t)$  représente l'expression analytique qui décrit le profil d'une chaussée en pavé, et  $y_m$  son amplitude. L'irrégularité du profil joue le rôle d'une excitation appliquée sur les véhicules et provoque des vibrations qui dépendent de l'amplitude, la longueur d'onde ainsi que la vitesse du véhicule. Les sollicitations provenant de la route et des propriétés élastiques des pneus qui agissent sur le véhicule sont ceux dues au contact ralentisseur essieux avant et arrière et représentés analytiquement par :

$$y(t) = \frac{y_m}{2} + \frac{2y_m}{\pi} (\sin \omega_0 vt + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 vt + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 vt) \quad (4.62)$$

On aura la force :

$$F_{ext}(t) = ky(t) = \frac{ky_m}{2} + \frac{2ky_m}{\pi} (\sin \omega_0 vt + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 vt + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 vt) \quad (4.63)$$

### IV.6.3.2- Profil de 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 fois avec la longueur maximale de cette catégorie.

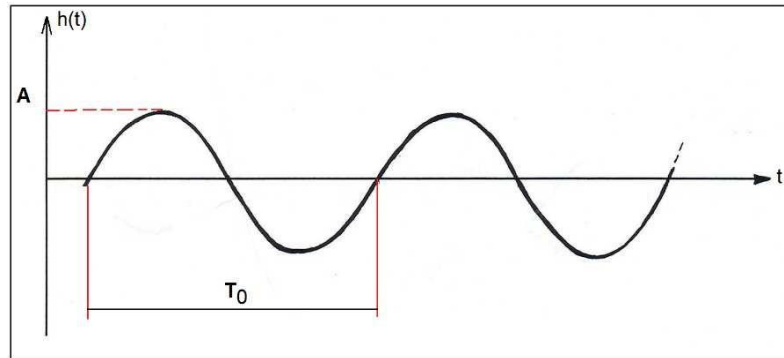


Figure 4.9- Profil sinusoïdal

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

$$h(t) = y_m \sin(\omega_0 t) = y_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right) \quad (4.64)$$

La combinaison entre le profil de la route et la vitesse du véhicule résulte des sollicitations provenant de la route, son expression est défini comme suite :

$$y(t) = y_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} vt\right) \quad (4.65)$$

On aura la force qui sera égale à :  $F_{ext}(t) = ky(t) = ky_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} vt\right)$  (4.66)

La solution de la force est:  $F_{ext}(t) = y_0 \cos \omega t$  (4.67)

Et la vitesse est de forme :  $v(t) = v_0 \cos(\omega t - \varphi)$  (4.68)

Sa solution libre de  $z(t)$  est donnée par l'équation (4.39). Et sa solution particulière sera :

$$z(t) = x_p(t) = y_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (4.69)$$

Soit  $y_m$  l'amplitude de la solution et  $\varphi$  son argument.

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

$$y_m(\omega) = \frac{\frac{y_0}{m}}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2\zeta\omega)^2}} \quad (4.70)$$

$$\tan \varphi = \frac{-2\zeta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2} \text{ et } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\zeta^2} \text{ et } \zeta = \frac{\alpha}{2\sqrt{mk}} \quad (4.71)$$

### IV.6.3.3- Profil dos-d'âne

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

$$h(t) = h_0 \sin \frac{\pi}{L_0} t \quad (4.72)$$

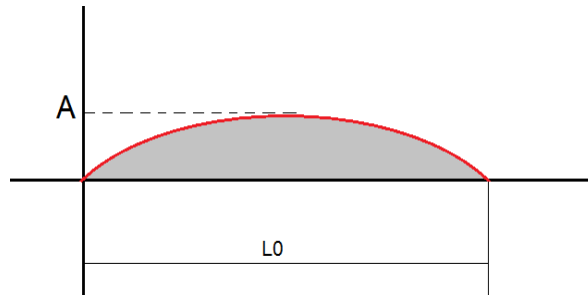


Figure 4.10- Obstacle de type dos-d'âne

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

$$y(t) = h_0 \sin \frac{\pi}{L_0} vt \quad (4.73)$$

On aura la force F :  $F_{ext}(t) = kh_0 \sin \frac{\pi}{L_0} vt$  (4.74)

On peut écrire :  $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$  (4.75)

$$\text{Avec } F_0 = kh_0 \text{ et } \omega = \frac{\pi}{L_0} v \text{ et } T = \frac{2L}{v}$$

### IV.6.4- Couplage électromécanique

Reprenant l'équation mécanique (4.47) avec un amortissement électromagnétique due à la force de Laplace, telle que :

$$m\ddot{z}(t) + F_L(t) + kz(t) = F_{ext}(t) \quad (4.76)$$

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

$$\begin{cases} m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \alpha(t) \frac{dz(t)}{dt} + kz(t) = k y(t) \\ \text{avec } \alpha(t) = \sigma S l \left( \frac{d\bar{A}(t)}{dz} \right)^2 \end{cases} \quad (4.77)$$

Sous l'effet de l'irrégularité de la route, l'aimant se déplace de sa position initiale effectuant ainsi un mouvement oscillatoire à l'intérieur de la bobine suivant l'axe z. Ce mouvement modifie la valeur du potentiel vecteur magnétique et de l'induction. Cette variation crée une densité de courante induite qui agit avec le champ magnétique de l'aimant pour générer une force électromagnétique d'amortissement.

#### IV.7- Discrétisation temporelle

Pour résoudre numériquement l'équation (4.77), on doit passer par une discrétisation temporelle du déplacement et une discrétisation spéciale 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 (4.77) en deux termes en faisant intervenir la vitesse.

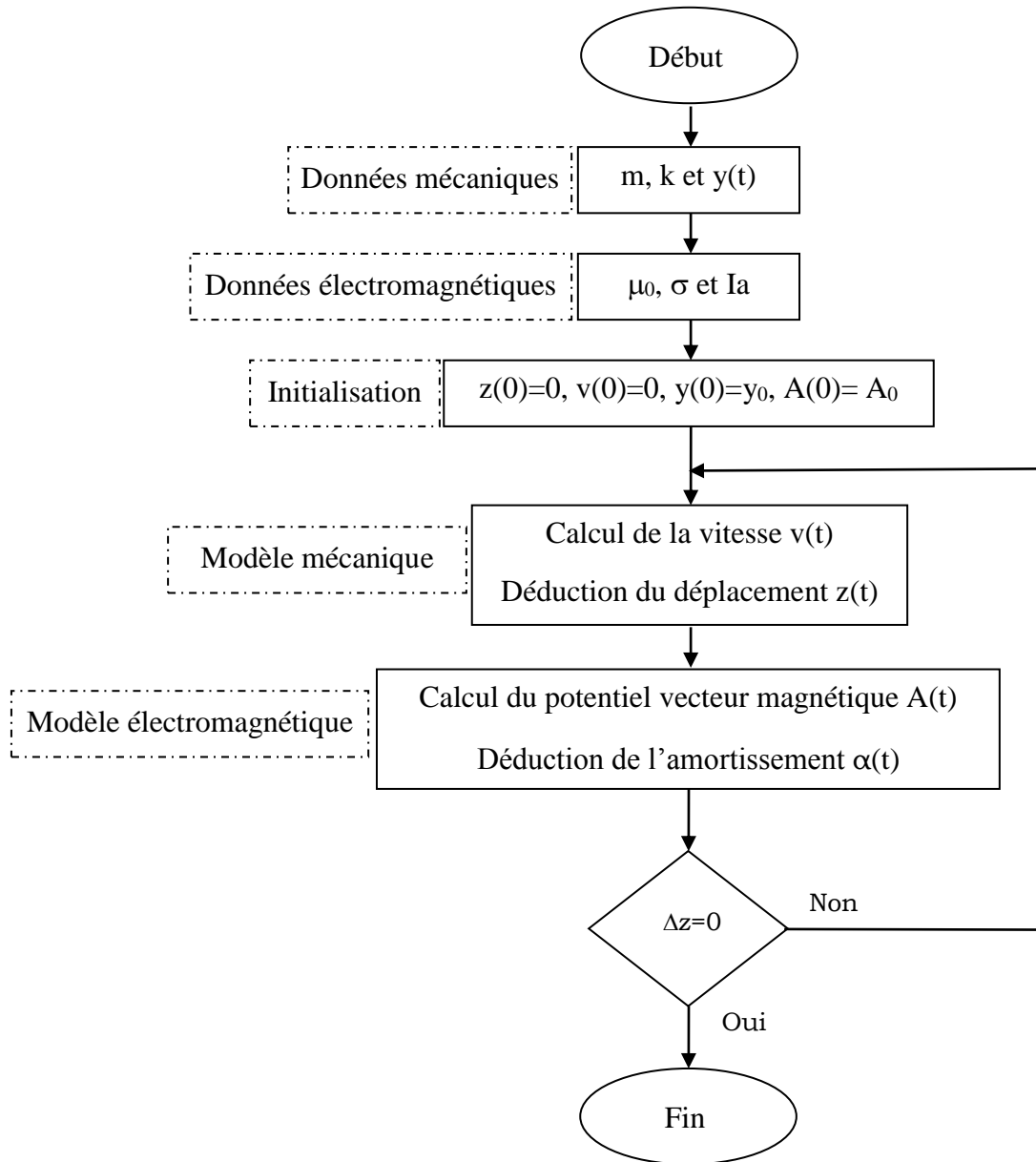
$$\begin{cases} m \frac{dv(t)}{dt} + \alpha(t)v(t) + kz(t) = k y(t) & (a) \\ v(t) = \frac{dz(t)}{dt} & (b) \\ \alpha(t) = \sigma S l \left( \frac{d\bar{A}(t)}{dz} \right)^2 & (c) \end{cases} \quad (4.78)$$

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

$$m \left( \frac{v(t+dt) - v(t)}{dt} \right)_i + \alpha(t)v(t) + kz(t) = k y(t) \quad (4.79)$$

$$\begin{cases} v(t + dt) = \frac{z(t + dt) - z(t)}{dt} \Rightarrow z(t + dt) = v(t + dt)dt + z(t) & \text{(a)} \\ \alpha(t + dt) = \sigma SI \left( \frac{d\bar{A}(t + dt) - \bar{A}(t)}{z(t + dt) - z(t)} \right)^2 & \text{(b)} \end{cases} \quad (4.80)$$

**IV.8- Processus des calculs numériques**



**Figure 4.11-** Organigramme des calculs

**IV.9-Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre une modélisation mathématique des différentes formes de la déformation de la chaussée et établie un modèle électromécanique basé sur le modèle mécanique et magnétique de la suspension ainsi que son couplage

## Conclusion Générale

L'amortisseur électromagnétique est un modèle novateur qui réduit d'une manière optimale les aléas de la route et par conséquent ajoute confort et sécurité au véhicule. Du point de vue de sa conversion, il s'agit d'un modèle mécano-magnéto-électrique.

De prime abord, nous avons présenté un état de l'art sur les modèles de suspension existant avant d'exposer d'autres notions tels que les différents systèmes de suspension et les types de ressorts.

Afin de mieux comprendre le principe de fonctionnement de l'amortisseur électromagnétique. La deuxième partie est pour l'étude des différents types de configurations de sa géométrie et des paramètres qui influent à sa conception, la troisième partie de ce travail est dédié à l'étude des aimants où on a cité leurs différentes formes et leurs propriétés magnétiques, ainsi que leur classification avant de donner un sommaire aperçu sur leur modélisation.

Enfin, une formulation électromécanique est réalisée. Elle est basée d'une part sur la description mathématique de la déformation de chaussée et du mouvement oscillatoire du véhicule et d'une part sur la modélisation de l'aimant et la force d'amortissement induite.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Kotrane. A, « Conception, réalisation et caractérisation dynamique d'un amortisseur magnéto-rhéologique », Ecole de Technologie, Montréal, 2007.
- [2] Mouleeswaran. S, « Development of Active Suspension System for Automobiles using PID controller », Proceeding of the world Cogress on Engineering, London, 2008.
- [3] Hussein. S, « Système de Suspension smi-active à base de fluide Magnéto-rhéologique pour l'automobile », Arts et Métiers Paris-tech, Paris, 29 juin 2010.
- [4] C. Savaresi, « Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles », Oxford: Elsevier Ltd, 2010.
- [5] MORGAN «Les suspensions Bose, magiques mais un destin cruel...».Consulté le 20 octobre 2019, publié le 7 février 2016 sur <http://ubergimzo.com>.
- [6] Lafarge. B, Modélisation, « simulation et mise en oeuvre d'un système de récupération d'énergie », Pour obtenir le grade de Docteur, Université polytechnique hauts-de-France, Valenciennes, 22 juin 2018.
- [7] E. EricRadaozandry, « 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.
- [8] A. ABDELLAOUI, « Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimant permanent par variable électrique », Pour obtension de Masigter en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou.
- [9] P. BRISSONNEAU, « Aimants permanents, Principes et circuits magnétiques ».
- [10] F. L. RINGUET, « Aimants permants, Materiaux et Application ».
- [11] B. Olivier, « Contribution à l'étude des formulations de calcul de la force magnétique en magnétostatique, approche numérique et validation expérimentale », Thèse de Docteur en Genie électrique, Ecole Centrale de Liile et Université des Sciences et technologies de Lille, Décembre 2003.



- [12] KHOV. M, « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2009.
- [13] 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.
- [14] MAOUCHE. 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.
- [15] AIAD. A, « Cours dynamique des structures et systèmes vibratoires », Université de Blida 1, 2016.
- [16] MEZOUDJ. 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.