

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



**UNIVERSITE de JIJEL**



**Département de l'Electrotechnique**

---

**PROJET FIN D'ETUDE**

---

**Filière : Electrotechnique**

**Option : Machines Electriques**

***Thème***

**Modélisation de l'ensemble moteur-véhicule électrique pour la réduction des vibrations et bruits dans un véhicule électrique.**

**Présenté par :**

**\* BENAÏSSA ABDELHADI**

**\* KRIKET MOKHTAR**

**Etudiants de 2<sup>eme</sup> année Master**

**Encadré par :**

**\* Mr. REZIG ALI**

**∞ Promotion 2020/2021 ∞**

# Remerciement

*Au terme de cette étude, nous remercions avant tout « Dieu » le tout puissant, de nous avoir guidés durant nos années d'étude, et de nous avoir permis la réalisation de ce présent travail.*

*Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire. Mes remerciements vont tout particulièrement à « **M. Ali Rezig** » qui a bien voulu assurer mon encadrement, c'est un très grand honneur pour moi qu'il ait accepté d'être mon directeur de mémoire. Je lui dois une immense reconnaissance et un très grand respect.*

*Je remercie également tous les autres membres du jury qui ont acceptés de s'intéresser à mes travaux et m'ont apporté leur jugement d'experts.*

*Enfin, nous tenons à remercier toute personne ayant porté appui dans la réalisation de ce mémoire.*

## *Dédicace*

*A mes très chers parents,*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit  
pour mon éducation*

*Ce travail est le fruit des sacrifices que vous avez  
consentis pour ma formation,*

*Toute ma famille,*

*Mes frères et ma sœur yousra,*

*Mon binôme ; Abdelhadi,*

*Mes amis, tous mes collègues et surtout  
mohammed et djouhaina .*

*Mokhtar*

## *Dédicace*

*A l'issue de ce travail, je remercie avant tout DIEU,  
tout puissant, de m'avoir donné la volonté, le  
courage et patience pour terminer ce travail. Avec un  
énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie.*

*Je dédie ce modeste et ma profonde*

*gratitude à :*

*Ma chère mère, affable, honorable, aimable que je ne  
cesse le de remercier pour tout ce qu'elle m'a donné...*

*Que Dieu le récompense pour tous ces bienfaits.*

*Et mon père pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué ;  
avec tous les moyens et au prix de toutes les sacrifices  
qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir  
qu'ils mon enseigné depuis mon enfance.*

*Je dédie également ce modeste à mon binôme Mokhtar*

*Pour tous mes très chers amis.*

*Abdelhadi*

# SOMMAIRE

**Introduction générale****Chapitre I : Moteurs de propulsion dans les véhicules électriques**

<b>Introduction</b> .....	03
<b>I.1 Présentation du moteur-roue électrique</b> .....	03
I.1.1 Avantages et inconvénients du moteur-roue .....	04
I.1.2 Principes de fonctionnement.....	05
I.1.3 Motorisation avec transmission mécanique.....	05
I.1.3.1 Motorisation sans transmission mécanique. ....	06
I.1.4 Moteur dans la roue ou moteur-roue.....	06
I.1.5 Sécurité de fonctionnement.....	06
I.1.6 Différentes structures envisageables.....	07
I.1.7 Systèmes utilisant un moteur synchrone à réluctance variable.....	07
I.1.7.1 Systèmes utilisant un moteur synchrone.....	07
I.1.7.2 Systèmes utilisant un moteur asynchrone.....	08
<b>I.2 Description de la MRV</b> .....	08
I.2.1 Principe de fonctionnement de la MRV.....	09
I.2.2 Profil de l'inductance et expression du couple.....	11
I.2.3 Modèle mathématique de la MRV.....	14
<b>I.3 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents</b> .....	15
I.3.1 Les aimants permanents.....	16
I.3.1.1 Définition des aimants permanents.....	16
I.3.1.2 Propriété des aimants permanents.....	16

## SOMMAIRE

I.3.1.3 Différents types des aimants permanents.....	17
a-Aimants métalliques (ALNICO) .....	17
b-Aimants en ferrites.....	17
C-Aimants terres-rares.....	17
I.3.2 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents.....	18
I.3.2.1 Structure du stator.....	18
I.3.2.2 Structure du rotor.....	19
I.3.2.3 Différents types de la machine synchrone à aimants permanents.....	19
a-Aimants montés en surface (machine à pôles lisses) .....	19
b-Aimants insérés (machine à pôles saillants) .....	20
c-Aimants enterrés (machine à pôles saillants) .....	20
d-Aimants à concentration de flux (machine à pôles saillants) .....	20
I.3.3 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents.....	21
I.3.4 Avantages des machines à aimants permanents .....	21
I.3.5 Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents.....	22
I.3.6 Domaines d'application.....	22
<b>Conclusion.....</b>	<b>23</b>

**Chapitre II : Force radiale déséquilibrée dans une MRV utilisée dans les véhicules électriques**

<b>Introduction</b> .....	24
II.1 Modélisation de machine à reluctance variable.....	25
II.1.1 Présentation la structure d'une MRV.....	25
II.1.2 Equations électromécaniques.....	25
II.1.3 Equations électromagnétiques.....	26
II.1.4 Equations mécaniques.....	31
II.1.5 Effet moteur-roue MRV sur la dynamique du véhicule.....	33
II.2 Influence du moteur roue sur le comportement dynamique du véhicule.....	33
II.2.1 Equation du mouvement.....	33
II.2.2 Analyse de l'effet de la MRV moteur-roue sur le véhicule.....	34
<b>Conclusion</b> .....	35

**Chapitre III : Modalisation dynamique de l'ensemble moteur-roue VE**

<b>Introduction</b> .....	36
III.1 Description du model.....	36
III.1.2 Description de l'ensemble moteur roue-VE.....	36
III.2.1 Modèle électromagnétique de la MRV .....	37
III.2.2 Modèle mécanique de l'ensemble moteur roue – VE.....	39
<b>Conclusion</b> .....	42
<b>Conclusion générale</b> .....	43

## Liste des figures

Figure 1.1 Technologie du Moteur-Roue du véhicule électrique

Figure 1.2 Structure physique du système de propulsion du type Moteur-Roue

Figure 1.3 structure d'un moteur-roue hybride et à flux axial

Figure 1.4 structure du moteur-roue asynchrone développé pour un bus hybride

Figure 1.5 structure schématique du moteur synchrone à aimants

Figure 1.6 Stator et rotor d'une MRV

Figure 1.7 Machine à réluctance variable : structure élémentaire

Figure 1.8 Position d'opposition (a) et position de conjonction (b)

Figure 1.9 solénoïde (a), caractéristique flux-courant (b)

Figure 1.10 Circuit équivalent d'une phase de la MRV

Figure 1.11 Structure de moteur synchrone à aimants permanents

Figure 1.12 Courbe de désaimantation

Figure 1.13 Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants

Figure 1.14 Schéma de bobinages statoriques

Figure 1.15 Différentes structures rotoriques pour une MSAP

Figure 2.1. Structure d'une MRV

Figure 2.2 circuit équivalent d'une phase de MRV

Figure 2.2 profile de l'inductance en fonction de la position

Figure 2.3 Lignes de flux magnétique, (a) : position d'opposition (b) : position de conjonction

Figure 2.4 Profile de l'inductance obtenue par la méthode des éléments finis

Figure 2.5 Inductance à la position médiane ( $30^\circ$ ) en fonction du courant donner par un calcul EF et par interpolation

Figure 2.6 Inductance à la position de conjonction ( $60^\circ$ ) en fonction du courant donner par un calcul EF et par interpolation

Figure 2.7 Modèle d'un quart du véhicule

*Figure 3.1 Modèle dynamique de la MRV*

*Figure 3.2 contrôleur de vitesse*

*Figure 3.3 convertisseur*

*Figure 3.4 L'influence de la variation de la valeur de degredex sur le courant*

*Figure 3.5 Force radiale déséquilibrée pour différentes degrés d'excentricité*

*Figure 3.6 vibrations du corps du véhicule pour différentes degrés d'excentricité*

*Figure 3.7 vibrations du stator du moteur pour différentes degrés d'excentricité*

*Figure 3.8 vibrations de la roue du véhicule pour différentes degrés d'excentricité*

### Liste des tableaux

Tableau 2.1 Valeurs des coefficients  $a_n$ .

Tableau 2.2 Valeurs des coefficients  $b_n$ .

Tableau 3.1 Paramètres de la machine

Tableau 3.2. Paramètre du system de quart de véhicule.

# INTRODUCTION GENERALE

### INTRODUCTION GENERAL

Une machine électrique est un dispositif électromécanique fondé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité.

Les moteurs rotatifs produisent une énergie correspondant au produit d'un couple par un déplacement angulaire (rotation) tandis que les moteurs linéaires produisent une énergie correspondant au produit d'une force par un déplacement linéaire.

Il existe plusieurs classifications de ces machines, la plus courante se fonde sur le type de courant (continu ou alternatif).

L'utilisation des machines électriques est tellement vaste et variée, et ce qui nous intéresse plus sont les moteurs dans les véhicules électriques ou les moteurs-roue.

Lorsque le conducteur appuie sur l'accélérateur, la batterie de la voiture transmet l'électricité au stator, cela entraîne la rotation du rotor, laquelle génère l'énergie mécanique nécessaire pour faire tourner les engrenages de la voiture. Lorsque les engrenages tournent, les roues tournent aussi donc le déplacement de la voiture est réalisé.

Il existe deux types de moteurs électriques à courant alternatif destinés à la traction d'un véhicule électrique, les moteurs asynchrones et les moteurs synchrones. Dans un moteur asynchrone, le rotor est soumis à une rotation et il essaie constamment de « rattraper » le champ magnétique tournant créé par le stator. Ce type de moteur de voiture électrique est réputé pour sa puissance élevée. Il équipe de nombreux véhicules. Dans un moteur synchrone, en revanche, le rotor tourne à la même vitesse que le champ magnétique. Il génère un couple élevé à vitesse réduite, et est ainsi idéal pour la conduite en milieu urbain. Parmi ses autres atouts, citons sa taille, un moteur synchrone de voiture électrique peut en effet afficher un format compact et un poids peu élevé.

La durée de vie d'un moteur de voiture électrique dépend de tellement de variables qu'il est difficile de l'estimer avec précision. Dans des conditions idéales, on pense que la durée de vie optimale se situe entre 15 et 20 ans. Par rapport à un moteur à combustion, un moteur de voiture électrique comporte moins de pièces, ce qui implique une maintenance moindre et plus facile.

Selon une étude réalisée par Nissan, le véhicule électrique enregistre un taux de satisfaction de 93% chez ses utilisateurs. Le silence, l'impression de glisser sur le bitume sans résistance et la facilité de conduite ont conquis les utilisateurs. Si l'absence de bruit au volant est l'aspect le plus apprécié par les utilisateurs, le plaisir de conduire arrive en seconde place. Ainsi, le véhicule électrique permet aux automobilistes de retrouver le plaisir de la conduite aujourd'hui un peu perdu, comme en témoigne un récent article du Monde « Heureux comme un propriétaire de véhicule électrique ».

Le moteur crée une vibration. Il suffit que cette vibration se situe dans la bande-passante de l'oreille humaine et qu'elle ait une amplitude suffisamment importante pour que nous l'entendions. Le vrai problème du bruit audible d'origine électromagnétique n'est pas son amplitude mais plutôt ses caractéristiques en fréquence qui forment des sons de type sifflements désagréables. Mais si l'amplitude de vibration est trop petite pour que la vibration soit perçue par l'oreille, cela ne signifie pas pour autant qu'il n'y aura pas de bruit, La vibration existe et peut se transmettre à n'importe quelle autre pièce de la voiture. Si une petite pièce de métal, même éloignée du moteur tant qu'elle est reliée mécaniquement, produit une petite vibration, et si cette vibration a une résonance, alors on peut entendre un sifflement. Même pour une force faible, on peut avoir un déplacement important.

On fait de la conversion d'énergie dans un moteur. L'idée, c'est de transformer de l'électricité en force mécanique mais les forces qui nous intéressent, ce sont les forces tangentielles et les forces radiales.

Les forces tangentielles sont orthogonales par rapport au rotor qui tourne (partie centrale du moteur) et produisent du couple.

Mais comme le moteur est en trois dimensions, et le champ magnétique aussi, les forces sont également radiales. Ce sont des forces qui vont de l'intérieur vers l'extérieur, puis l'inverse, et qui font vibrer le stator.

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

Les majeurs facteurs qui ont donné plus d'intérêts pour le développement des véhicules électriques sont : le facteur économique qui mène à une réduction de la consommation de carburant, le facteur environnemental en réduisant le taux de pollution.

Nous intéressons à la technologie M-R du véhicule électrique. Dans cette technologie, le moteur de Propulsion est intégré à l'intérieur de chacune des roues. En comparant celle-ci au véhicule électrique monomoteur les composants mécaniques [4].

Contrairement aux autres types de machines, le couple dans une MRV est créé à partir d'un seul champ magnétique par le principe de l'action de ce dernier sur une pièce ferromagnétique. Le développement de cette machine a connu un grand essor grâce au progrès réalisé dans le domaine de l'électronique puissance.

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

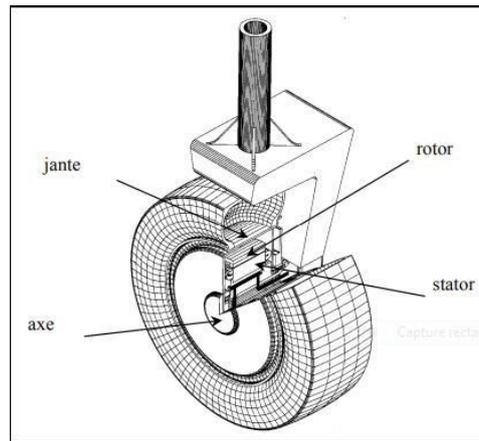
Nous allons présenter les différents types des aimants permanents ainsi que les couples des machines synchrones et leur avantage et l'inconvénient et aussi le domaine d'application ainsi que les différents modes d'alimentation de ces machines.

### I.1 Présentation du moteur-roue électrique

Le M-R électrique représente un nouveau pas vers la mobilité électrique. L'intégration du moteur électrique à la roue offre le double avantage la diminution de consommation du véhicule automobile et la commande indépendante du couple ce qui améliore la sécurité du véhicule.

La motorisation de la roue est assurée par un actionneur synchrone à aimants permanents qui est implanté dans la roue. Cet actionneur est composé par des parties : le stator situé à l'essieu de la roue et le rotor à faible vitesse monté directement sur la jante de la roue.

La figure (1.1) présente la technologie d'un Moteur-Roue pour le véhicule électrique.



*Figure 1.1 Technologie du Moteur-Roue du véhicule électrique*

### **I.1.1 Avantages et inconvénients du moteur-roue**

Commençons par les inconvénients d'une telle structure. Dans ce type de configuration, il est très difficile d'intégrer un réducteur. Par conséquent, le moteur est a priori à attaque directe et il doit fournir un couple élevé, notamment dans les phases de démarrage en pente. Le volume du moteur donc la masse et le coût sont élevés. Il est nécessaire de minimiser au mieux la masse totale des parties actives conformément au cahier des charges imposé. Remarquons aussi que le comportement routier d'un véhicule est lié au rapport des masses non suspendues sur celles suspendues. Ainsi, l'introduction d'un moteur fort couple dans la roue peut avoir tendance à déstabiliser le véhicule. Enfin, il se pose aussi le problème du freinage ; d'une part il faut intégrer au moteur-roue le disque de frein et d'autre part il faut tenir compte des échauffements supplémentaires dus à la dissipation d'énergie calorifique lors des phases de freinage. L'avantage principal du moteur-roue est sa grande compacité.

Nous citons certains avantages : la réduction du bruit, l'amélioration de la sécurité et la contrôlabilité, la diminution des pertes par frottement et une efficacité énergétique meilleure.

La figure (1.2) présente la structure physique du système de propulsion du M-R qui est un système mécatronique. La partie mécanique présente la dynamique du véhicule. La partie électrique se compose de l'ensemble des éléments : source d'alimentation de type batterie actionneur synchrone à aimants permanents; convertisseur DC-AC de type onduleur de tension. En effet, l'actionneur sert à fournir le couple mécanique de la propulsion de la

roue permettant l'avancement du véhicule. Il est alimenté par une batterie d'accumulateurs via un onduleur de tension. La partie électronique de commande permet de contrôler la vitesse du moteur électrique qui est équivalente à la vitesse de la roue et donc à la vitesse du véhicule. La technique adoptée pour le contrôle de la vitesse est la technique Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) de type sinus-triangle qui génère des signaux de commande à l'onduleur.

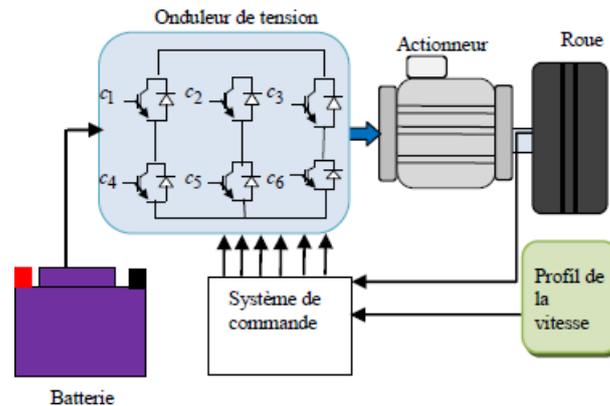


Figure 1.2 Structure physique du système de propulsion du type Moteur-Roue

### I.1.2 Principes de fonctionnement

La fonction de tous les moteurs est de transformer une énergie (thermique ou électromagnétique pour les moteurs usuels) en énergie mécanique. Ils doivent fournir une force ou un couple en même temps qu'ils se déplacent en translation ou en rotation. Au total, ils fournissent une certaine puissance mécanique pour l'entraînement d'une charge à vitesse constante ou variable.

### I.1.3 Motorisation avec transmission mécanique

La voie la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de remplacer le moteur thermique par un moteur électrique. L'architecture mécanique du véhicule est alors totalement conservée et les contraintes de dimensionnement en couple et en vitesse sont les mêmes que celles du moteur thermique. Notamment, on peut conserver la boîte de vitesse et l'embrayage.

Nous allons discuter de l'intérêt d'un tel système quant au dimensionnement du moteur électrique de traction.

Pour cela, supposons que l'on ait à réaliser un système moteur pouvant atteindre un couple maximal (correspondant par exemple au couple nécessaire au démarrage du véhicule) et une vitesse maximale (correspondant par exemple à la vitesse maximale que doit pouvoir atteindre le véhicule). Si on n'utilise pas de réducteur, le couple maximal et la vitesse maximale que doit atteindre le moteur valent respectivement  $\tau_{max}$  et  $v_{max}$ ; on utilise le moteur en attaque directe. Si celui-ci est capable de fournir le couple maximum sur toute la plage de vitesse.

### **I.1.3.1 Motorisation sans transmission mécanique**

La motorisation sans transmission mécanique correspond à une situation où le moteur est proche de la roue. Dans ce cas chaque roue ou au moins chaque roue d'un essieu est équipée de son propre moteur. Il s'agit donc d'une solution multi-moteur. Nous allons décrire les deux cas possibles, puis nous discuterons des intérêts et inconvénients d'une solution utilisant plusieurs moteurs.

### **I.1.4 Moteur dans la roue ou moteur-roue**

C'est a priori la solution la plus élégante et la plus compacte. On intègre directement le moteur dans la roue. On parle aussi du moteur jante ou de roue électrique. Le moteur possède une structure inversée où le rotor est extérieur et le stator intérieur et on dispose la jante sur le rotor. La figure (1.1) montre l'intégration d'un moteur synchrone sans balais dans la jante d'un petit véhicule blindé.

### **I.1.5 Sécurité de fonctionnement**

Il est important de soigner la commande des moteurs afin d'assurer la sécurité du fonctionnement du système. Citons trois exemples de problèmes à prendre en compte. Il faut recréer artificiellement un système équivalent au différentiel afin d'éviter une usure prématurée des pneumatiques. D'autre part, il ne faut en aucun cas que le moteur se bloque, notamment sous l'effet d'un problème électrique (court-circuit par exemple). Enfin, si le moteur utilise une excitation par aimants permanents, il se comporte en générateur dès qu'il tourne. Cela implique par exemple qu'il faut protéger son alimentation en cas de traction de dépannage.

### I.1.6 Différentes structures envisageables

Nous allons passer en revue différentes solutions envisageables. Dans la mesure du possible, L'objet est l'exploitation des différentes possibilités d'implantation d'un moteur électrique dans un véhicule. On passe en revue les solutions avec l'adjonction ou non d'un réducteur, avec un ou plusieurs moteurs, avec un moteur central ou des moteurs dans les roues. En introduction de cette étude, on fait quelques rappels sur le fonctionnement des moteurs électromagnétiques. Dans ce premier chapitre, nous présentant les différents Systèmes qui utilisant un moteur **MRV** et le moteur **MSAP**

### I.1.7 Systèmes utilisant un moteur synchrone à réluctance variable

Il existe de nombreux types de moteurs à réluctance variable. Pour ce qui est des moteurs purement à réluctance, on peut citer les moteurs à bobinages dentaires, que l'on appelle aussi à double saillance, et les machines à bobinage globaux. Les moteurs à réluctance peuvent également associer des aimants : ce sont les moteurs à réluctance hybrides. Enfin, ces moteurs, comme les autres peuvent être à flux radial ou axial. Ils sont souvent alimentés comme les moteurs synchrones sauf pour le moteur à double saillance qui est alimenté en courants unidirectionnels par des demi-points asymétriques.

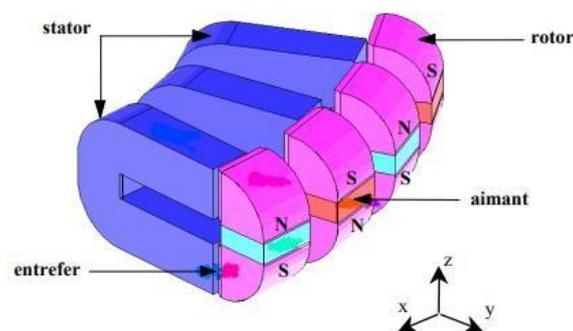


Figure 1.3 structure d'un moteur-roue hybride et à flux axial

#### I.1.7.1 Systèmes utilisant un moteur synchrone

Le moteur synchrone autopiloté à rotor bobiné ou à aimants permanents est de plus en plus utilisé en traction. Il permet un fonctionnement à facteur de puissance proche de l'unité et son contrôle, quoique plus compliqué que celui du moteur à courant continu, paraît plus simple que celui du moteur asynchrone. Nous n'avons pas trouvé d'exemple de moteur à rotor bobiné utilisé dans un système de moteur-roue. A l'inverse, le moteur synchrone à aimants permanents est le moteur le plus utilisé.

### I.1.7.2 Systèmes utilisant un moteur asynchrone

Le moteur asynchrone reste aujourd'hui encore le moteur industriel par excellence et c'est celui où la standardisation est la plus avancée (par exemple, les tôles utilisables sont normalisées). Pour fonctionner à vitesse variable à partir d'une batterie, il doit être associé à un onduleur de tension triphasé.

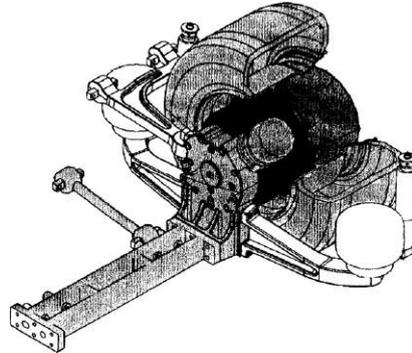


Figure 1.4 structure du moteur-roue asynchrone développé pour un bus hybride.

La figure (1.4) montre l'intégration du moteur dans la roue, sans réducteur. Les performances de ce moteur sont excellentes, mais celui-ci reste essentiellement adapté à un véhicule solaire. Par exemple, le comportement mécanique du moteur en environnement difficile (routes cahoteuses, chocs contre des obstacles tels que les trottoirs...)

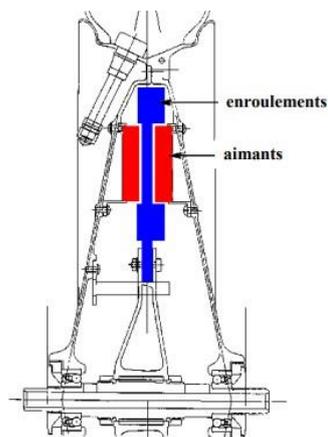


Figure 1.5 structure schématique du moteur synchrone à aimants

## I.2 Description de la MRV

La MRV possède des pôles saillants sur le stator et le rotor. Chaque pôle du stator porte un bobinage concentrique. Le rotor ne porte aucun bobinage. Pour le circuit électrique et au stator, chaque deux pôle diamétralement opposés porte un bobinage relié soit en paire soit

en groupes pour former des phases statiques. Pour chaque phase, un circuit avec un seul commutateur contrôlé est suffisant pour fournir un courant unidirectionnel pendant les intervalles appropriés de rotation du rotor. Pour la conduite à l'avant, l'enroulement de phase statique approprié doit rester excité seulement pendant la période où le taux de changement de l'inductance de phase est positif. Le circuit magnétique d'un moteur à réluctance variable est constitué d'un stator et d'un rotor.

Le stator : est un empilage de tôles découpées, encochées supportant les bobinages ou les phases.

Le rotor : étant la partie passive de la machine, il ne comporte ni conducteur ni aimant permanent.

C'est une masse de tôles d'acier laminé et empilé formant ainsi un nombre de pôles égale à  $N_r$  [5].



Figure 1.6 Stator et rotor d'une MRV

Le nombre des pôles du stator est souvent différent du nombre des pôles rotoriques, pour éviter ainsi que le rotor reste immobile avec un couple de démarrage nul, lorsque les pôles rotoriques se trouvent coincés avec ceux du stator.

### 1.2.1 Principe de fonctionnement de la MRV

Le principe de fonctionnement de la MRV peut être expliqué en se basant sur la figure. Quel que soit le type de la machine à réluctance variable étudié (cylindrique, linéaire, vernier à grosses dents ...) le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables. Il peut être décrit à partir de l'étude d'une structure monophasée élémentaire identique à celle présentée ci-dessous

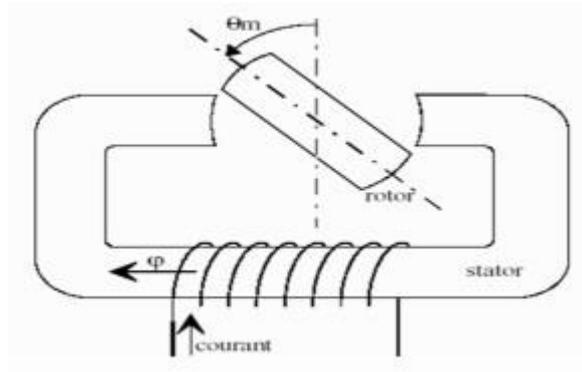


Figure 1.7 Machine à réluctance variable : structure élémentaire

Considérons le circuit magnétique de la figure (1.7) comprenant une culasse ferromagnétique fixe et une pièce ferromagnétique mobile autour d'un axe perpendiculaire au plan de la figure. La pièce mobile possède un plan de symétrie repéré par l'angle  $\theta_m$ , le circuit magnétique est embarrasé par un bobinage fixe. Il s'agit là de la structure de base d'une MRV, dont laquelle la rotation de la pièce mobile produit une variation de l'inductance du bobinage (induit). Sous certaines conditions, la conversion électromécanique de l'énergie est possible. Cette structure de base est caractérisée par deux positions de rotor :

- Une position d'opposition (unaligned position) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale figure.
- Une position illustrée par la figure dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale appelée position de conjonction :

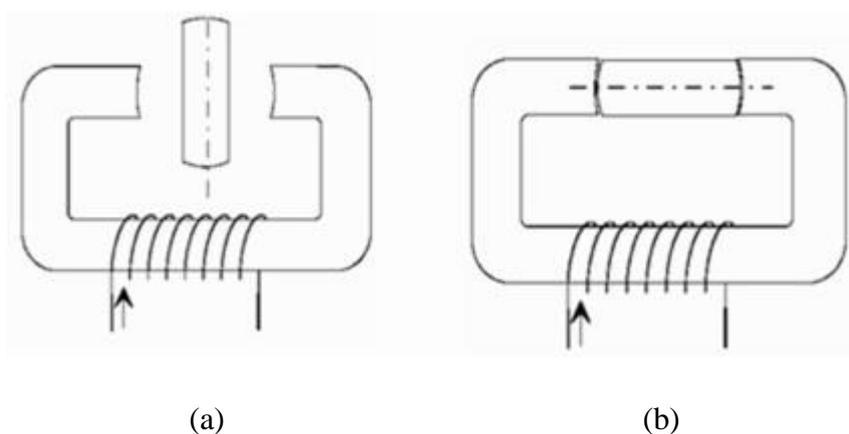


Figure 1.8 Position d'opposition (a) et position de conjonction (b)

Si le système se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction, et que l'on impose un courant dans l'enroulement d'excitation, le système évolue

de façon à présenter une réluctance minimale (un flux maximal) entraînant le rotor vers une position (stable) de conjonction. Si l'énergie cinétique emmagasinée durant cette phase est suffisante, une fois le courant est coupé, pour assurer la rotation du rotor jusqu'à une position d'opposition, il est alors possible de répéter le cycle afin d'obtenir un mouvement de rotation continu. En alimentant le bobinage relativement à la position, on obtient alors un fonctionnement autopiloté synchrone.

Dans l'exemple utilisé pour la description du principe, il apparaît que le système présente, pour un tour mécanique deux fois la même géométrie, on peut donc définir, pour une machine possédant deux dents rotoriques, l'angle électrique  $\theta_e$  :

En générale

$$\theta_e = 2\theta_m \quad 1.1$$

$$\theta_e = N_r \theta_m \quad 1.2$$

Avec  $\theta_m$ : l'angle mécanique

Le moteur à réluctance variable est un moteur électrique à double saillance ; le stator et le rotor sont à pôles saillants. Son principe de fonctionnement se base sur le phénomène de l'attraction du fer par les électroaimants. En effet, lorsque deux pôles opposés du stator sont excités, deux pôles du rotor s'alignent avec eux, mais un autre ensemble de pôles est hors alignement. L'alimentation d'une autre paire de pôles du stator amène encore une fois les pôles du rotor à l'alignement. De la même façon, et en commutant séquentiellement le courant dans les enroulements du stator, le rotor tourne.

### I.2.2 Profile de l'inductance et expression du couple

L'expression du couple d'une MRV peut être développée en se basant sur le dispositif de la figure (1.9) L'énergie électrique fournie au système est donné par :

$$w_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN\Phi}{dt} = \int N i d\Phi = \int FMM d\Phi \quad 1.3$$

Où :

La tension induite, FMM la force magnétomotrice. Cette énergie électrique  $w_e$  est égale à la somme de l'énergie magnétique  $w_f$  stockée dans la bobine et l'énergie mécanique  $w_m$  convertie en travail.

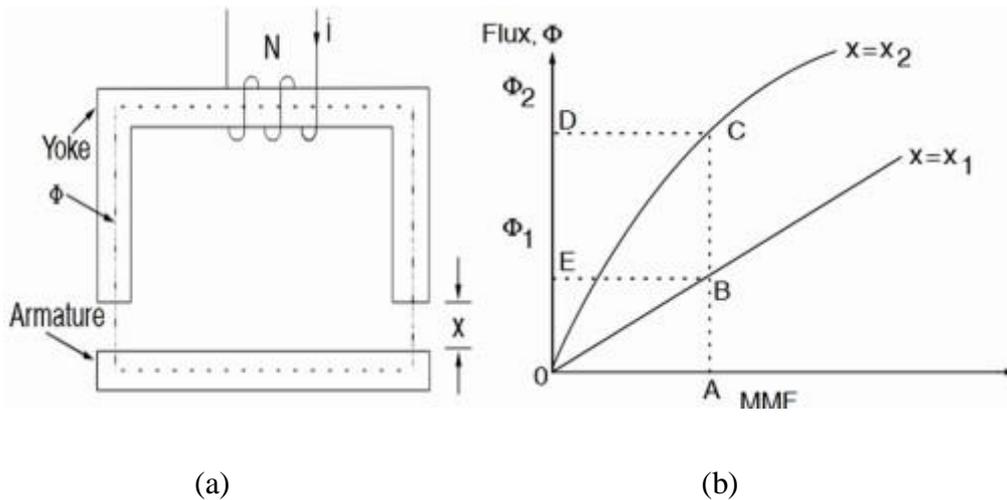


Figure 1.9 solénoïde (a), caractéristique flux-courant (b)

$$w_e = w_m + w_f \tag{1.4}$$

Si la partie mobile est fixe, l'énergie électrique égale dans ce cas l'énergie magnétique. L'énergie magnétique est représentée par la surface OBEO (voir figure 1.9). Le complément de l'énergie magnétique appelé co-énergie est représentée par la surface OBAO. De manière similaire dans la position 2. L'énergie magnétique correspond à la surface OCDO et la Co-énergie à la surface OCAO. La variation de l'énergie électrique est exprimée par : Pour une FMM constante (point A), les différentes énergies sont dérivées comme suit :

$$\delta w_e = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} F_1 d\Phi = F_1(\Phi_2 - \Phi_1) = \text{surface(BCDEB)} \tag{1.5}$$

$$\delta w_f = w_f|x = x_2 - \delta w_f|x = x_1 = \text{Surfa(OBEO)}$$

1.6

Utilisant 1.2 à 1.4, l'incrément de l'énergie mécanique est donnée par :

$$\delta w_m = \delta w_e - \delta w_f = \text{surface(OBCO)} \tag{1.7}$$

Pour les machines tournantes, l'incrément de l'énergie mécanique en terme du couple électromagnétique et la variation de position du rotor est exprimé par :

$$\delta w_m = T_e \delta \theta \quad 1.8$$

Avec  $T_e$  : couple électromagnétique et  $\delta \theta$  l'incrément de la position du rotor.

$$T_e = \frac{\delta w_m}{\delta \theta} \quad 1.9$$

Le travail effectué par la pièce mobile est égal à taux de variation de la Co-énergie, il est donné par cette expression :

$$\delta w_m = \delta w'_f \quad 1.10$$

Avec

$$w'_f = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int (\theta, i) di \quad 1.11$$

Où

$L$  : inductance

$\lambda$  : le Flux (flux linkage) qui est fonction de la position et le courant.

Cette variation de la Co-énergie est effectuée entre deux positions  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . Le couple électromagnétique développé est exprimé comme suit :

$$T_e = \frac{\delta w_m}{\delta \theta} = \frac{\delta w'_f}{\delta \theta} = \left. \frac{\delta w'_f}{\delta \theta} \right|_{i_{\text{constant}}} \quad 1.12$$

Si l'inductance varie linéairement avec la position du rotor pour un courant donné, ce qui n'est pas le cas de façon générale, donc le couple est donné par cette expression :

$$T_e = \frac{(\theta, i) i^2}{d\theta} \frac{1}{2} \quad 1.13$$

Où

$$\frac{(\theta, i)}{d\theta} = \left. \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \right|_{i_{\text{constant}}} \quad 1.14$$

A partir de l'expression du couple, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le couple dépend du carré du courant, donc le signe de ce dernier n'a pas d'important. L'alimentation par un courant unidirectionnel est possible.
- Le couple est proportionnel au carré de l'induction, cette machine ressemble à la machine à courant continu à excitation série, donc elle possède un bon couple de démarrage.
- Le changement de sens de rotation est possible en inversant les séquences des phases du stator.
- L'inductance mutuelle entre phase est faible et par conséquent elle est généralement négligée.

### I.2.3 Modèle mathématique de la MRV

Le circuit équivalent de la MRV est composé d'une résistance et une inductance en série, (voir figure 1.10) les effets de saturation magnétique, flux de fuite et couplage entre phases ne sont pas considérée.

La loi de Kirchhoff des tensions (LKT) appliquée sur le circuit équivalent donne :

$$u = R_s i + \frac{dh(\theta, i)}{dt} \quad 1.15$$

$$(\theta, i) = L(\theta, i) i \quad 1.16$$

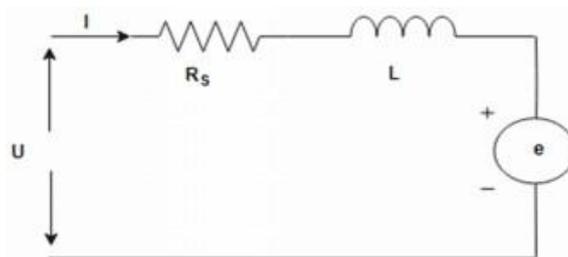


Figure 1.10 Circuit équivalent d'une phase de la MRV

$$u = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \cdot \omega_r \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad 1.17$$

$R_s$  : est la résistance d'une seule phase.

$\omega_r$  : Vitesse de rotation

$L(\theta, i)$  : Inductance d'une phase

Pour une machine avec  $m$  phase, le système d'équations de la machine peut être résumé comme suit :

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{L_k(\theta, i)} [V_{dc} - R_s i_k - i_k \omega_r \frac{dL_k(\theta, i)}{d\theta}] \quad k = 1, 2 \dots m$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (2.22) \quad 1.18$$

$$\frac{d\omega_r}{d\theta} = \frac{1}{J} \left[ \sum_{k=1}^m \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k(\theta, i)}{d\theta} - \beta \omega_r - T_{charge} \right] \quad 1.19$$

Où :

$J$ : l'inertie de machine

$\beta$  : le coefficient de frottement

$T_{charge}$ : couple résistant qui représente l'effet de la charge

### I.3 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation.



Figure 1.11 Structure de moteur synchrone à aimants permanents

### I.3.1 Aimants permanents

#### I.3.1.1 Définition des aimants permanents

On appelle un aimant permanent tout corps ayant la capacité ou la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente et qui est difficile à se désaimanter lorsqu'il est aimanté [6].

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 extérieur [7].

#### I.3.1.2 Propriété des aimants permanents

Le choix des aimants permanents est primordial puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple de la machine.

Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycle d'hystérésis et Plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan (B-H) comme le montre la figure (1.12)

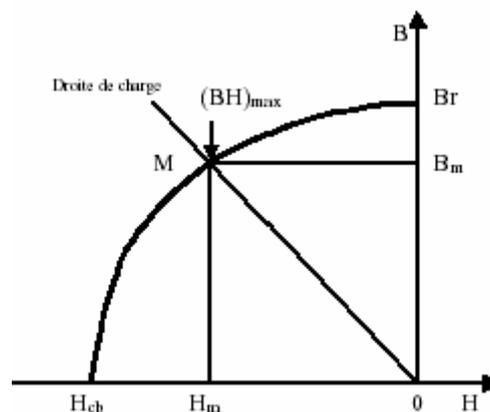


Figure 1.12 Courbe de désaimantation

Cette courbe est caractérisée par :

- L'induction rémanente ( $B_r$ ), c'est -à-dire l'induction résiduelle au circuit fermé, ce qui signifie une induction de la puissance potentielle de l'aimant.

- 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 ( $B_H$ ) max, ce produit est couramment appelé énergie spécifique de l'aimant ; cette énergie caractérise la qualité du matériau.

En effet pour un entrefer donné, le volume est d'autant plus faible, que l'énergie spécifique est élevée [8].

### **I.3.1.3 Différents types des aimants permanents**

#### **a-Aimants métalliques (ALNICO)**

Ce sont des alliages à base d'Aluminium et de Nickel, avec des additions de Cobalt, cuivre ou de Titane. Ils sont caractérisés par un champ rémanent très élevé mais un champ coercitif très faible ce qui pose des gros problèmes de désaimantation. Les aimants ALNICO sont utilisés dans les instruments de mesure où leur grande stabilité thermique constitue un paramètre essentiel.

#### **b-Aimants en ferrites**

Les ferrites sont des composants d'oxyde de Fer, de Baryum et de Strontium. Ils sont obtenus par frittage. Ils sont beaucoup plus robustes et relativement peu coûteux. Les ferrites trouvent l'essentiel de leurs applications dans les moteurs de faible puissance utilisés dans l'industrie automobile.

#### **C-Aimants terres-rares**

##### **- Samarium Cobalt (Sm-Co)**

Ils sont beaucoup plus performants et autorisent une température fonctionnement élevée (jusqu'à 300 C°) mais ils sont très coûteux en raison de la présence du Cobalt dans leur composition. Les  $S_m-C_o$  sont utilisés dans des applications particulières (télécommunication, aéronautique), dont les propriétés de haute températures et la résistance à l'oxydation sont supérieures.

##### **-Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)**

Les aimants ( $N_d-F_e-B$ ) ont des performances supérieures au Samarium Cobalt et ils sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160 °C). Ce type d'aimant est utilisé principalement dans les micro-informatiques et les télécommunications. Ils constituent en particulier l'élément central des têtes de lecteurs. On peut classer les différents types d'aimants en fonction de ces paramètres.

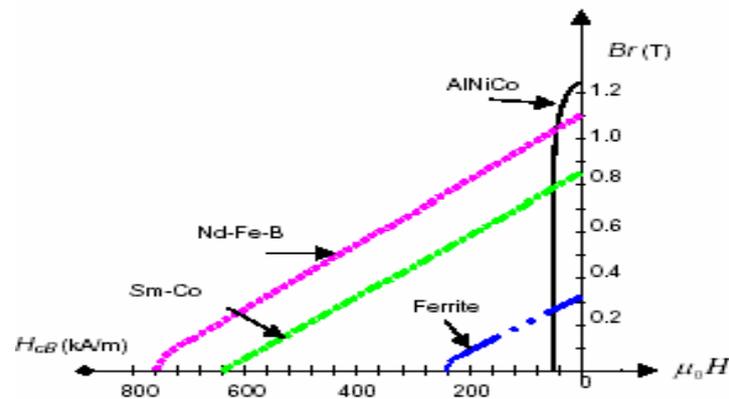


Figure 1.13 Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants [9].

## I.3.2 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents

### I.3.2.1 Structure de stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses.

On distingue deux grandes catégories de bobinage. Les bobinages dits réguliers ou les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les bobinages non réguliers, comme les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches par pôle. On distingue deux grandes catégories de bobinage. Les bobinages dits réguliers ou les et par phase. La Figure (1.13) présente un exemple de bobinage statorique régulier à un seul bobinage à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les voie par phase et deux paires de pôles. Les machines à basse tension sont habituellement bobinées en utilisant du fil cylindrique émaillé non rangé. Chaque conducteur, servant à constituer les spires, est le plus souvent formé de plusieurs fils, ou brins, en parallèle. Les conducteurs ainsi réalisés ne sont pas isolés entre eux. Comme on ne peut pas se fier suffisamment à l'isolation apportée par l'émail, qui peut avoir été altérée par les opérations d'enroulement des spires et d'insertion des bobines dans les encoches, ou présenter intrinsèquement des faiblesses localisées, on doit isoler les bobines par rapport à la masse, c'est-à-dire l'empilage de tôles magnétiques, de même que l'on doit isoler entre elles les bobines appartenant à des phases différentes.

L'isolation des bobines par rapport à la masse est réalisée en plaçant dans les encoches, avant toute opération d'insertion du bobinage, une feuille de matériau isolant en forme de U qui épouse tout le périmètre utile de l'encoche. De plus amples détails sur les topologies et les technologies de bobinages sont largement développées dans les suivantes [10].

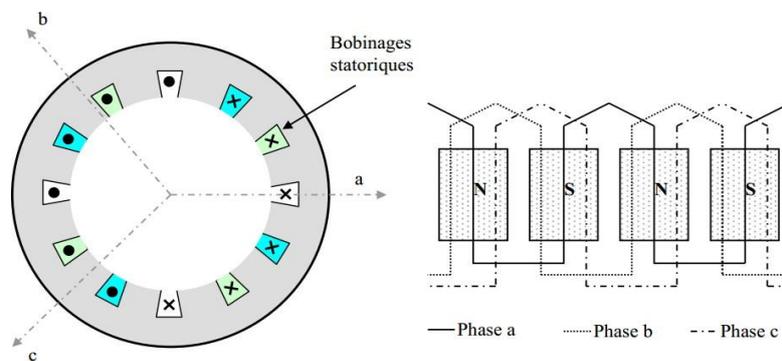


Figure 1.14 Schéma de bobinages statoriques

### I.3.2.2 Structure du rotor

Représente la partie mobile de la MSAP, formée d'un assemblage de tôles et d'aimants créant le flux d'inducteur, il est généralement de deux types :

- rotor possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement, soit perpendiculairement à l'entrefer ou de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- rotor sans pièces polaires donc à entrefer constant, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

### I.3.2.3 Différents types de la machine synchrone à aimants permanents

Il existe plusieurs types de la machine synchrone à aimants permanents qui dépendent du placement des aimants permanents sur le rotor de la machine. En effet, la disposition des aimants a une influence directe sur la saillance de la machine (rapport entre les inductances de l'axe direct  $L_{sdet}$  de l'axe en quadrature  $L_{sq}$ ). Les principales structures des rotors utilisées dans les MSAP sont les suivantes :

#### a-Aimants montés en surface (machine à pôles lisses)

Dans ce type de machine, les aimants sont collés directement à la surface du rotor. La perméabilité des aimants étant proche de celle de l'air, l'entrefer de la machine peut être

considérée comme constante. Ainsi, la machine est à pôles lisses (absence de saillance  $L_{sd} = L_{sq}$ ). Cette structure est souvent utilisée pour sa simplicité de fabrication et de commande mais aussi en raison de son rapport poids-puissance avantageux, ce qui rend cette solution très adaptée aux applications embarquées. Cependant, les aimants placés en surface sont susceptibles de se décoller à haute vitesse car ils sont soumis directement aux forces centrifuges. Une solution pour remédier à ce problème est de consolider le collage des aimants avec un tube de matériau amagnétique Figure (1.15a)

#### **b-Aimants insérés (machine à pôles saillants)**

Cette structure est analogue à celle des aimants montés en surface. Cependant, les ouvertures entre les aimants sont remplies de fer pour créer une saillance ( $L_{sq} >$ ). Cette machine à pôles saillants présente également un bon rapport poids puissance et le collage des aimants ne nécessite plus d'être consolidé Figure (1.15b).

#### **c-Aimants enterrés (machine à pôles saillants)**

Dans ce type de machine, les aimants permanents sont directement enterrés dans le rotor. Cette structure présente un rapport de saillance plus élevée que celle à aimants insérés ( $L_{sq} > L_{sd}$ ). Le risque de décollement des aimants est nul cependant, le rapport poids puissance est réduit. Ainsi, cette topologie est adaptée pour des fonctionnements à haute vitesse où l'encombrement n'est pas une contrainte Figure (1.15c).

#### **d-Aimants à concentration de flux (machine à pôles saillants)**

Cette structure utilise une distribution tangentielle de l'aimantation (au lieu d'une distribution radiale dans les structures précédentes), ce qui implique une forte concentration du flux magnétique dans le rotor. Cela permet d'augmenter sensiblement l'induction dans l'entrefer. Cette topologie utilise principalement des aimants de type « ferrite » pour éviter la saturation magnétique de l'acier et s'applique donc pour des applications où le volume n'est pas une contrainte Figure (1.15d). [11].

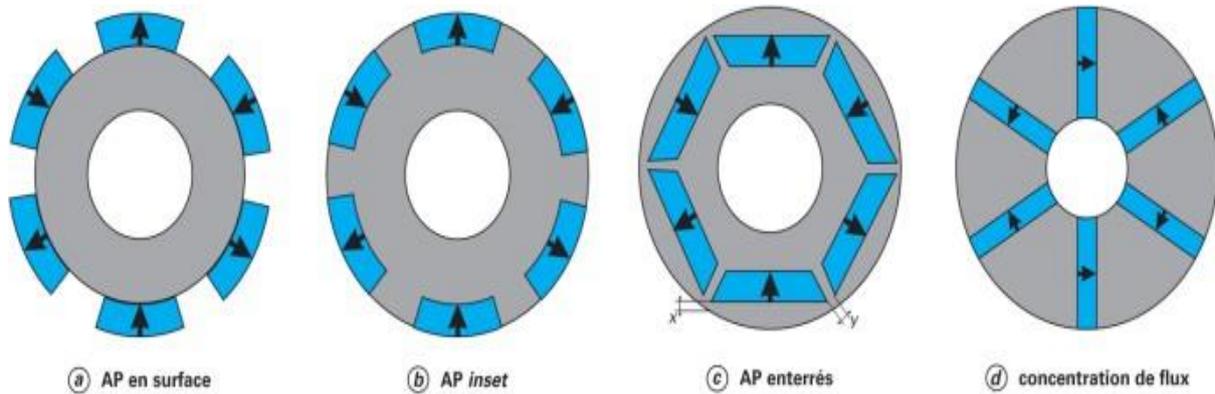


Figure 1.15 Différentes structures rotoriques pour une MSAP

Il existe beaucoup d'autres types de MSAP, notamment des machines à saillance inversée avec  $L_{sd} > L_{sq}$  utilisées pour des applications particulières. Dans la suite de ce mémoire, les machines synchrones à Aimants Permanents utilisées seront toujours des machines à pôle lisses avec des aimants montés en surface car elles présentent les meilleures caractéristiques pour des applications embarquées à faible encombrement [12].

### I.3.3 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse de  $f / p$  tours par secondes avec  $f$  fréquences d'alimentation des bobinages statoriques, et  $p$  le nombre de paires de pôles le rotor composé de  $p$  aimants permanents va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que le champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc :

$$\Omega = \omega / p \text{ [rad/s]} \quad 1.20$$

### I.3.4 Avantages des machines à aimants permanents

Lors de la construction des machines synchrones à aimants permanents (MSAP), la suppression des bobinages d'excitation et leur remplacement par des aimants permanents procurent beaucoup d'avantages:

-Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator d'où le rendement du moteur est amélioré [13].

-Une faible inertie et un couple massique élevé,

-Une meilleure performance dynamique,

-Construction et maintenance plus simple,

-Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contact bague balais dans ces machines.

Le choix des aimants permanents dépend des facteurs suivants:

- Performance du moteur,
- Poids du moteur,
- Dimension du moteur,
- Rendement du moteur,
- Facteur économique.

### **I.3.5 Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents**

-Commutateur mécanique remplacé par un commutateur autre électronique, ce Qui a pour effet de rendre le contrôle du moteur plus complexe et coûteux que celui D'un moteur à courant continu,

-Prix des aimants le rend plus Cher,

-La présence de pulsation de couple.

-Risque de désaimantation, Ce qui limite l'utilisation dans des contraintes physiques comme la température max, courant max....etc.

### **I.3.6 Domaines d'application**

Les MSAP sont utilisées pour les entrainements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants-convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières comme :

- Equipements domestiques (machine à laver le linge).
- Automobiles.
- Equipements d'échantillonnage de l'information (DVD drives).
- Outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.
- Equipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste).
- Servomoteurs.
- Production d'électricité.

- Propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins.
- Machines-outils [14].

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié la structure général d'un moteur roue et leur avantage et l'inconvénient ainsi que Principes de fonctionnement, puis étudié les différents systèmes qui utiliser les moteur –roue qui et déjà intégré dans l'ensemble véhicule électrique.

Ensuite, On a présenté des généralités sur la machine à reluctance variable, on l'a décrit et on a vu son principe de fonctionnement. Nous avons vu le profil de l'inductance et l'expression du couple ainsi que le modèle mathématique de cette machine.

Nous avons aussi présenté des généralités sur la machine synchrone à aimant permanent, les caractéristiques et les différents types des aimants permanents, qui constituent un élément fondamental pour ce type de machine, les différentes structures des aimants sur le rotor, et le principe de fonctionnement, et les avantages et les inconvénients et en fin les domaines d'applications de la MSAP.

# CHAPITRE II

## INTRODUCTION

Il apparaît désormais que la motorisation électrique des véhicules est une tendance écrasante dans l'industrie, et de nombreux travaux complets ont été réalisés pour améliorer les systèmes de propulsion des véhicules électriques. Le premier véhicule moteur-roue a été conçu par Porsche en 1900.

Le moteur-roue attire maintenant de plus en plus d'intérêts de recherche en raison de ses mérites inhérents. Par exemple, innovation d'emballage de véhicule, économies de poids, haute puissance de sortie, contrôle indépendant rapide et précis de la vitesse.

Pour maximiser ces avantages et performances du moteur-roue, des recherches ont été menées. Par exemple, la méthode de contrôle direct, le moment de lacet ou la distribution de la force motrice ainsi que le contrôle différentiel électrique du moteur-roue pour les véhicules électriques. Et en raison de la masse différente (augmentation de la masse non suspendue) et mécanisme d'excitation (couple moteur et force vibratoire directement appliqués sur les roues), de nouvelles méthodes d'estimation de l'état du véhicule ont également été proposées.

D'autre part, de nombreux types de moteurs sont prêts pour les applications aux véhicules électriques (VE), par exemple : Moteur asynchrone, moteur synchrone à aimants permanents, moteur à courant continu ainsi que le moteur à réluctance variable (MRV). Parmi ces choix, la MRV est spécialement conçue pour les applications VE avec excellents avantages : structure simple et haute fiabilité, bonne caractéristiques couple-vitesse, densité de couple élevée et efficacité de fonctionnement avec un faible courant de démarrage. Cependant, ces avantages sont éclipsés par son ondulation de couple élevée, problèmes de vibrations et de bruit, qui ont sérieusement entravé les applications du MRV pour les moteurs-roues dans les VE.

Des méthodes d'optimisation ou de contrôle ont été utilisées pour améliorer les caractéristiques des MRV, ces tentatives visent à améliorer les performances de conduite du MRV en réduisant les ondulations qui sont dues à la structure à double saillance du stator et du rotor.

Ces réalisations ci-dessus améliorent la stabilité, les performances dynamiques et la sécurité du moteur-roue dans le véhicule électrique. Cependant, comme nous le savons, la dynamique du véhicule se compose de dynamiques longitudinale, latérale et verticale, qui

correspondent généralement à la qualité dynamique, la stabilité et le confort. Avec une distribution de masse différente ainsi que le mécanisme d'excitation, les effets négatifs verticaux du moteur-roue émerge. Ces effets induisent moins de confort et de tenue de route. Ce chapitre a comme objectif la modélisation électromagnétique-mécanique de l'ensemble moteur roue-VE afin d'étudier l'influence de déséquilibre de la force radiale (unbalanced radial force, UMP) sur la dynamique verticale du véhicule.

## II.1 Modélisation de machine à reluctance variable

### II.1.1 Présentation la structure d'une MRV

La figure ci-dessous montre la structure d'une MRV à rotor externe avec 4 phases. C'est le type de moteur-roue utilisés dans les VE. Ce moteur est installé au centre de la roue pour réaliser la conduite directe. Plusieurs méthodes peuvent être appliquées pour la caractérisation de cette machine. [16]

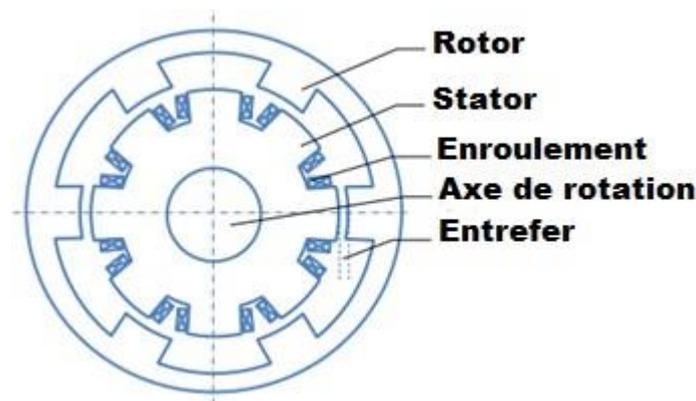


Figure 2.1. Structure d'une MRV

### II.1.2 Equations électromécaniques

La C<sub>o</sub>-énergie est l'intégrale du flux, en respectant le courant  $i$  et les positions du rotor  $\Theta$

$$m_m = \int_0^i (\theta, i) di \quad 2.1$$

Selon le principe des travaux virtuels, La force d'attraction par phase est donnée par :

$$F_k = \left. \frac{dW_m}{dx} \right|_{i = \text{const}} = \int_0^i \frac{d(\theta, i)}{dx} di \quad 2.2$$

Donc la force totale produite à la sortie

$$F = \sum_{k=1}^4 F_k \quad 2.3$$

Où : k=1, 2,3 et 4 représente la phase.

Les équations (2.1) et (2.3) sont les équations fondamentales qui décrivent le fonctionnement de la MRV. Le couple de propulsion et la force radiale ont une grande influence sur la dynamique du véhicule :

$$T_e = \frac{6W_m}{6\theta} | i = \text{const} = \int_0^i \frac{6(\theta,i)}{6\theta} di \quad 2.4$$

$$F_r = \frac{6W_m}{6l_g} | i = \text{const} = \int_0^i \frac{6(\theta,i)}{6l_g} di \quad 2.5$$

Pour calculer le couple et la force, On doit trouver les caractéristiques du flux de la MRV. Ce dernier est déterminé à l'aide de l'inductance et le courant, Donc on à besoin des équations électromagnétiques et les équations du circuit.

### II.1.3 Equations électromagnétiques

Pour un moteur à réluctance variable, le système dynamique se réfère à un enroulement de phase qui peut être représenté par une inductance en série avec une résistance, comme le montre la figure (3.2).

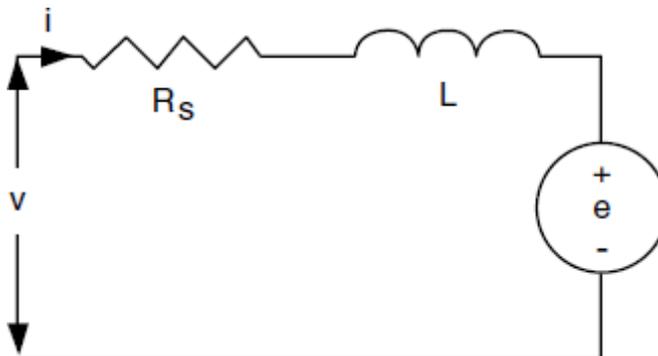


Figure 2.2 circuit équivalent d'une phase de MRV

Étant donné que l'inductance de phase change périodiquement avec la position du rotor  $\theta$ , elle peut être exprimée en série de Fourier par rapport à  $\theta$ : Pour simplifier l'expression de l'inductance, on sélectionne l'origine de la position du rotor  $\theta$  en position alignée, comme il est indiqué dans Figure (2.2). Dans cette définition, l'inductance de phase L atteint sa valeur

maximale  $L_a$  à  $\theta = \pi / N_r$  (position de conjonction) et sa valeur minimale  $L_u$  à  $(\theta = 0)$  (position d'opposition). Ainsi, l'inductance de phase peut s'exprimer comme :

$$L_j(\theta, i_j) = \sum_{n=0}^{\infty} L_n(i_j) \cos(nN_r\theta + \varphi_n) \quad 2.6$$

Où,  $\varphi_n = n\pi$

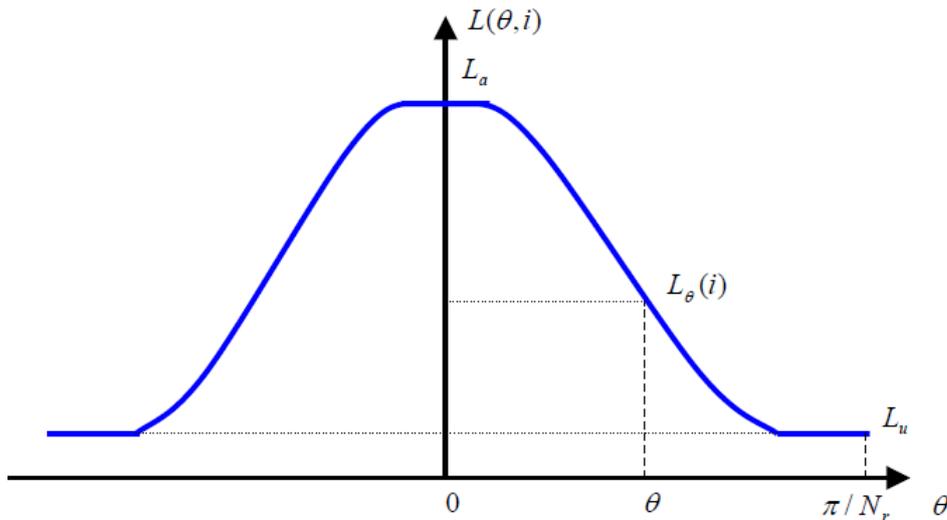


Figure 2.2 *profile de l'inductance en fonction de la position*

Les coefficients dans la décomposition en séries de Fourier  $L_n$  et qui dépendent du courant peuvent être déterminés à partir des valeurs des inductances dans les positions, de conjonction, la position médiane et la position d'opposition. [16, 17]

En négligeant les harmoniques d'ordre supérieures et on considère qu'une approximation jusqu'à l'harmonique d'ordre 3 est suffisante.

$$L_0(i) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} (L_a + L_u) + L_m \right] \quad 2.7$$

$$L_1(i) = \frac{1}{2} (L_a - L_u) \quad 2.8$$

$$L_2(i) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} (L_a + L_u) - L_m \right] \quad 2.9$$

Où l'inductance dans la position d'opposition est considérée constante.

Les inductances dans les positions de conjonction et médiane sont approximés par une fonction polynomiale du courant. On utilise le polynôme de Lagrange, on trouve :

$$L_a(i) = \sum_{n=0}^N a_n i^n \quad 2.10$$

$$L_m(i) = \sum_{n=0}^N b_n i^n \quad 2.11$$

Les inductances dans ces positions (conjonction et médiane) et pour différents valeurs du courant sont calculées numériquement par la méthode des éléments finis (MEF). Nous avons utilisés pour cette raison le logiciel FEMM.

L'interpolation sera faite ensuite à partir des valeurs issues du calcul par MEF. Cela permet d'un coté de trouver les coefficients d'interpolation  $a_n$  et  $b_n$  et de déterminer d'un autre coté une expression précise de l'inductance qui sera utilisée par la suite dans le modèle dynamique de la MRV.

Les figures (2.3 (a) et (b)) montrent les lignes de flux magnétique à l'intérieur de la machine déterminées par la MEF.

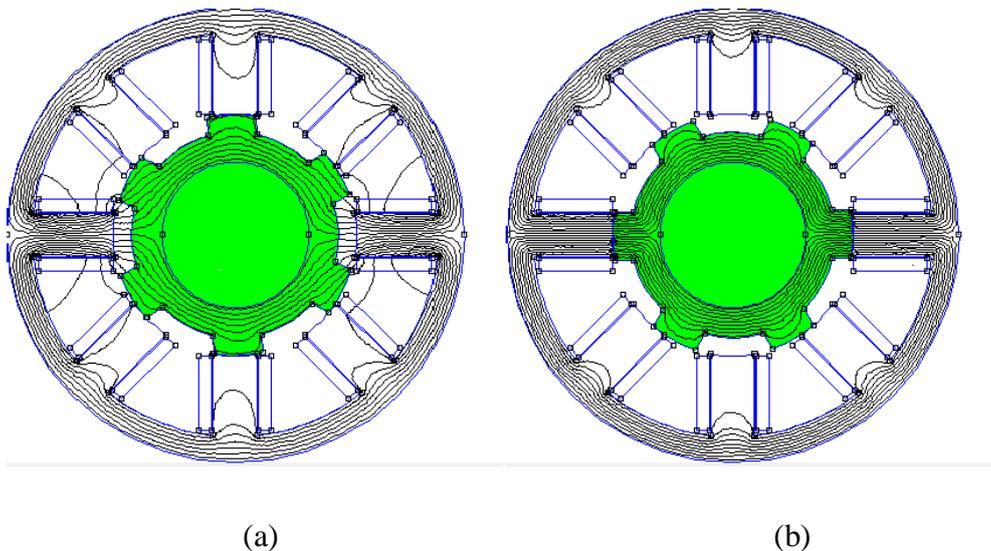


Figure 2.3 Lignes de flux magnétique, (a) : position d'opposition (b) : position de conjonction

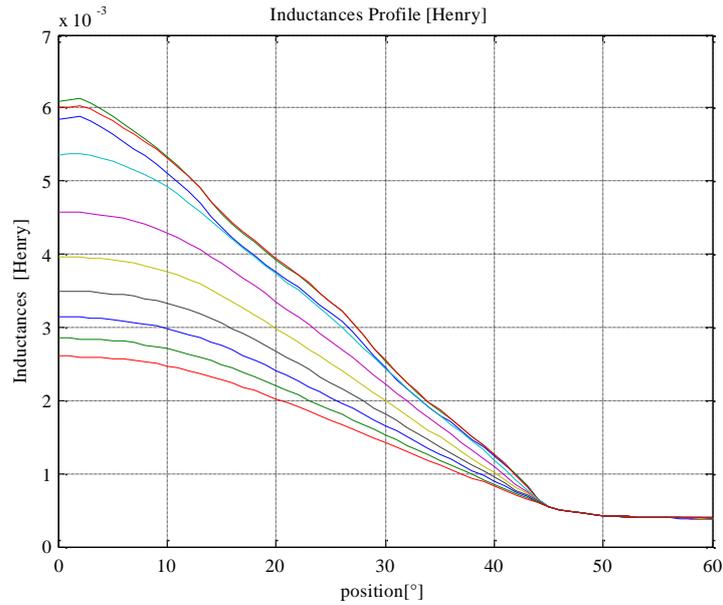


Figure 2.4 Profile de l'inductance obtenue par la méthode des éléments finis

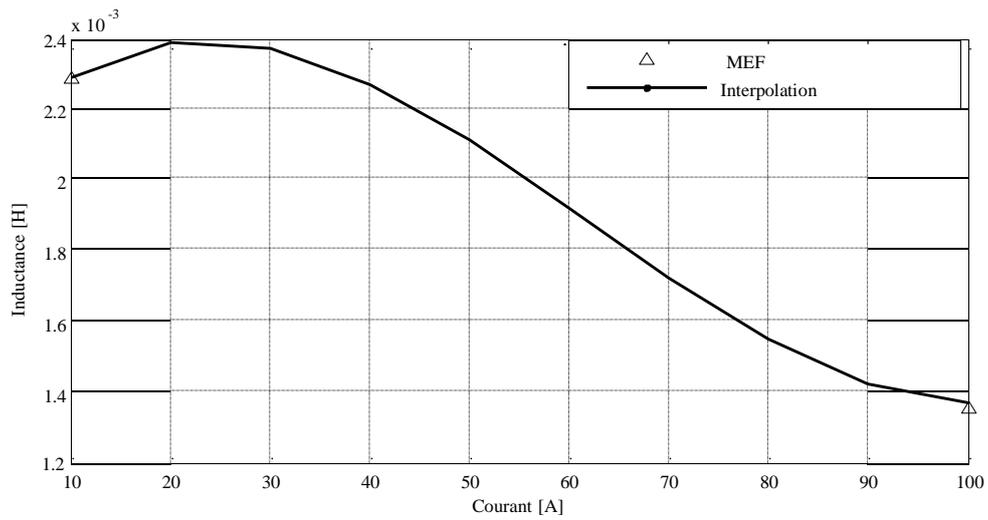


Figure 2.5 Inductance à la position médiane( 30°) en fonction du courant donner par un calcul EF et par interpolation

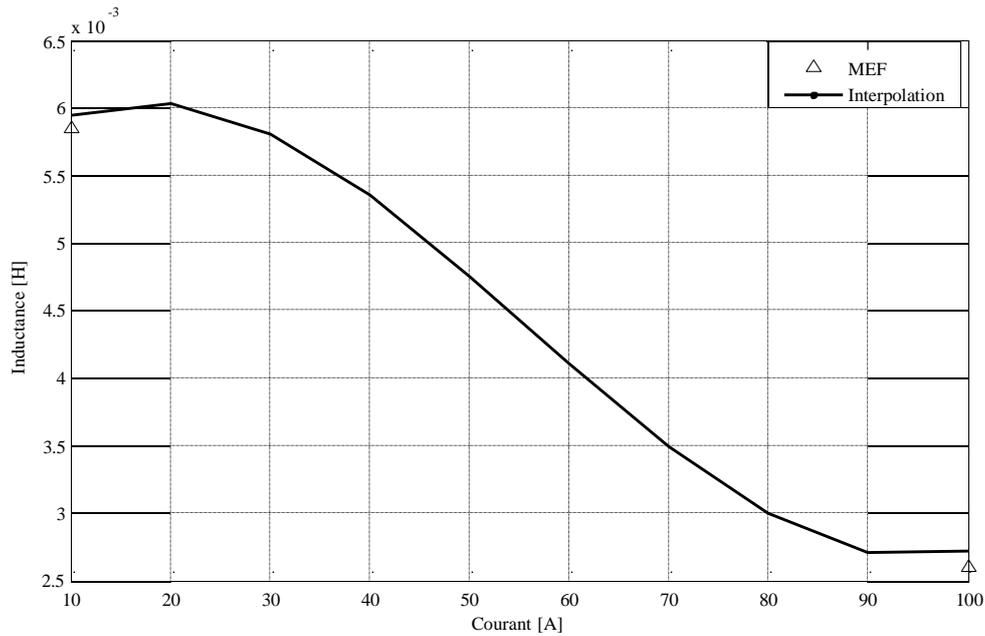


Figure 2.6 Inductance à la position de conjonction( 60°) en fonction du courant donner par un calcul EF et par interpolation

Les valeurs  $a_n$  et  $b_n$  obtenues par interpolation sont dans les deux tableaux suivants :

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
5.46e-003	7.18e-005	-2.44e-006	1.45e-008

Tableau 2.1 Valeurs des coefficients  $a_n$

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
2.057e-003	3.12e-005	-8.21e-007	4.42e-009

Tableau 2.2 Valeurs des coefficients  $b_n$

Le flux par phase est donné par l'intégrale suivante :

$$\begin{aligned}
 (\theta, i_k) = \int_0^{i_k} L_k(\theta, i_k) di_k = \frac{1}{2} [\cos^2(N_r\theta) - \cos(N_r\theta)] \sum_{n=0}^N c_n i^n + \\
 \sin^2(N_r\theta) \sum_{n=0}^N d_n i^n + \frac{1}{2} L_u i_k [\cos^2(N_r\theta) + \cos(N_r\theta)]
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Où

$C_n = a_n - 1/n$  et  $d_n = b_n - 1/n$  sont les coefficients intégraux de  $a_n$  et  $b_n$ . Grâce à la continuité on obtient  $c_0 = d_0 = 0$ .

$$L(\theta, i) = L_0(i) + L_{1(i)} \cos(N_r \theta + \varphi_1) + \sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} L_n(i) \cos(nN_r \theta + \varphi_n) = \sum_{n=0}^{\infty} L_n(i) \cos(nN_r \theta + \varphi_n) \quad 2.13$$

Où  $\varphi_n = n\pi$ .

### II.1.4 Equations mécaniques

D'après l'équation (2.13) on a :

$$\frac{6\varphi}{6\theta} = \sin(N_r \theta) \sum_{n=0}^N e_n i^n + \sin(2N_r \theta) \sum_{n=0}^N f_n i^n \quad 2.14$$

Le couple de phase est

$$T_k = \int_0^{i_k} \frac{6(\theta, i_k)}{6\theta} di_k = \sin(N_r \theta) \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} e_{n-1} i^n + \sin(2N_r \theta) \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} f_{n-1} i^n \quad 2.15$$

Et le couple total de la machine est :

$$T_e = \sum_{k=1}^4 T_k \quad 2.16$$

Le contrôle de la MRV consiste à optimiser l'état de conduction de la phase MRV, rendre le courant sous la forme d'onde appropriée de sorte que la MRV peut produire un couple souhaité, continu et régulier avec un minimum de vibrations. [18]

De même, la force d'attraction électromagnétique radiale entre les pôles du rotor et du stator pourrait être obtenue. Puisque l'entrefer  $l_g$  est relativement invariable lorsque les pôles du rotor et du stator se déplacent vers l'intérieur ou vers l'extérieur, en négligeant le flux de fuite et l'inductance mutuelle, la force radiale de la phase  $k$  peut être simplifiée comme

$$F_{rk} = - \frac{1}{2} i_k^2 \frac{L_k(\theta, i_k)}{l_g} \quad 2.17$$

Avec  $l_g$  : épaisseur de l'entrefer

$L_k$  : inductance de la phase

$I_k$  : courant de la phase  $k$

Où le signe négatif signifie que le rotor se rapproche du stator.

La MRV est un type de moteur à réluctance conforme au principe de réluctance minimale : Le rotor préfère venir à la position où la réluctance est minimale au moment de l'excitation.

La force radiale est une source dominante pour la MRV transmettant des vibrations et du bruit. Théoriquement, ces forces radiales sont d'égale grandeur et dans des directions opposées, ils s'équilibrent en raison de la symétrie géométrique et seul la vibration modale du corps du moteur et le bruit sont transmis. Cependant, en raison de défauts de montage mécanique et charge, les entrefers du moteur sont généralement asymétriques.

En conséquence, différentes forces de traction magnétique se trouvent entre les pôles opposés et la force radiale nette réelle n'est pas nulle.

Parce que l'entrefer est petit, une petite excentricité se traduira par une grande force radiale résiduelle déséquilibrée (unbalanced radial force). Pour les applications moteur-roue dans le véhicule électrique, la force radiale résiduelle déséquilibrée provoquera des vibrations transmises aux roues et à la carrosserie du véhicule, affectant les performances de confort du véhicule.

On définit l'excentricité relative comme :  $\varepsilon = \frac{h_e}{I_g}$  2.18

Où

$I_g$  : est l'épaisseur de l'entrefer en cas d'absence d'excentricité .

$h_e$  : est l'excentricité absolue dans la direction radiale. [19, 20]

Dans la situation réelle, l'excentricité relative maximale peut varier entre 30% et 60 %

Alors la force d'attraction radiale entre le rotor et le pôle statorique m est

$$F_{rm} = -\frac{1}{2} i^2 \frac{L_k(\theta, i_k)}{l_g(m)} \quad 2.19$$

Et la force radiale résiduelle déséquilibrée de la phase k est

$$F_{rk} = F_{rm} - F_{rn} = \frac{1}{2} i^2 \frac{L_k(\theta, i_k)}{l_g(n)} - \frac{1}{2} i^2 \frac{L_k(\theta + i_k)}{l_g(m)} \quad 2.20$$

Où m, n le nombre de pôle statorique dans la direction opposée.

Pour l'ensemble véhicule- moteur roue, la composante de la force radiale est la plus concernée, et la force de vibration d'une seule phase est :

$$F_{rk-z} = F_{rk} \cos\theta \quad 2.21$$

Alors la force résiduelle déséquilibrée totale pour un moteur à quatre phases est :

$$F_{r-z} = \sum_{k=1}^4 F_{rk-z} \quad 2.22$$

### II.1.5 Effet moteur-roue MRV sur la dynamique du véhicule

Pour analyser l'impact de MRV dans le moteur-roue sur la dynamique du véhicule, un quart du modèle de véhicule qui met l'accent sur la conduite et la vibration verticale est adoptée. Pour simplifier, l'excentricité n'existe qu'à une seule phase du MRV. En conséquence, une force supplémentaire exercée sur la roue verticalement et impulsivement. Comme le montre la figure (2.7). [21]

## II.2 Influence du moteur roue sur le comportement dynamique du véhicule

### II.2.1 Equation du mouvement

$$\frac{I_t \dot{w}}{i_g} = \eta i_g T_e - F_{tx} R_e - M_t \quad 2.23$$

Avec

$i_g$  : est le rapport de transmission

$I_t$  : est l'inertie de rotation de la roue

$w$  : est la vitesse angulaire de la roue

$\eta$  : est le rendement de transmission

$M_t$  : est le moment de résistance au roulement

$F_{tx}$  : La force de réaction

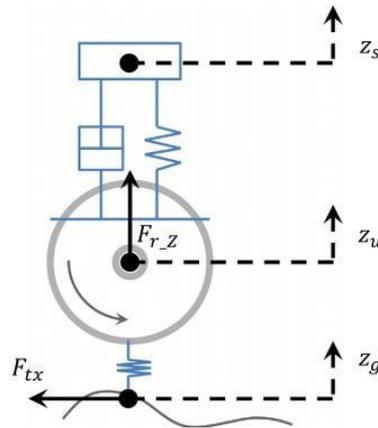


Figure 2.7 Modèle d'un quart du véhicule

On trouve les équations de vibration suivantes :

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= k_s(z_u - z_s) + c_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) \\ m_u \ddot{z}_u &= k_t(z_g - z_u) - k_s(z_u - z_s) + c_t(\dot{z}_g - \dot{z}_u) - c_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + F_{r,z} \end{aligned} \quad 2.24$$

Où :  $I_t$  est l'inertie de rotation de la roue,  $\dot{w}$  est la vitesse angulaire de la roue,  $\eta$  est le rendement de transmission,  $i_g$  est le rapport de transmission, et  $M_t$  est le moment de résistance au roulement.

La force de réaction  $F_{tx}$  du sol au pneu peut être acquise grâce à une formule magique.

## II.2.2 Analyse de l'effet de la MRV moteur-roue sur le véhicule

Les modes de vibration, les caractéristiques de transfert et les distributions d'énergie de vibration peuvent être obtenus via la forme d'espace d'état de l'équation (2.23). On peut voir que l'effet de la force d'excitation du moteur sur le véhicule est similaire à celui d'excitation de la route ou inertie de rotation déséquilibrée de la roue. Deux modes vibratoires majeurs pourraient s'exercer autour des fréquences de résonance des masses suspendues et non suspendues. Cependant, certaines diversités peuvent également être observées. L'excitation de la route est liée aux caractéristiques du véhicule en termes de rigidité et d'amortissement des pneus, contrairement à la force de vibration résiduelle du moteur.

La force résiduelle du moteur est directement liée à l'excentricité et au courant. Si l'excentricité est fixe, plus la force d'entraînement est élevée comme le véhicule requis, plus le courant du moteur est important et plus la force de vibration sera transmise du moteur au véhicule.

## CONCLUSION

Dans cette deuxième partie, on s'est intéressé à la modélisation de l'ensemble moteur roue-VE. Le moteur roue considéré est de type reluctance variable à rotor externe. Cette configuration est adaptée pour la propulsion automobile.

Les différentes équations électromagnétiques et mécaniques ont été expliquées en détails. La force radiale déséquilibrée qui est due à l'excentricité du rotor est calculée à l'issue du modèle électromagnétique de la MRV. L'effet de cette force sur le comportement dynamique du VE a été mis en évidence. L'effet des irrégularités de la route est considéré aussi dans le modèle. Le chapitre prochain sera consacré à la mise en œuvre de modèle décrit dans le présent chapitre.

# CHAPITRE III

## INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre du modèle électromagnétique-mécanique de l'ensemble moteur roue-VE. Le moteur est de type reluctance variable. Le modèle complet est implémenté dans Matlab-Simulink. Le modèle électromagnétique fait appel à calcul éléments finis pour approximer l'inductance des phases du stator. Ce modèle permet d'évaluer la force radiale déséquilibrée (unbalanced radial force) qui est due à l'excentricité du rotor. Le modèle mécanique résout l'équation dynamique de la structure.

### III.1.1 Description du modèle

Le modèle le plus simple est le modèle dit quart de véhicule. Qui ne prend en compte que le mouvement vertical de la caisse. Lorsqu'on s'intéresse au confort, on peut ne prendre en compte que le déplacement vertical de la caisse et pas celui de la roue. Ce modèle, appelle modèle quart de véhicule à un degré de liberté (1ddl), est présenté par Hrovat (1997) comme modèle de référence du comportement désiré pour le châssis du véhicule. Si de plus, la tenue de roue est étudiée, il convient de tenir compte aussi du mouvement vertical la roue. Ce modèle appelé modèle quart de véhicule à (2-ddl), est d'écrit par exemple dans (Thompson \_ Chaplin, 1996).

### III.1.2 Description de l'ensemble moteur roue-VE

Les paramètres physiques et géométriques de l'ensemble moteur roue –VE sont présentés dans les deux tableaux ci-dessous.

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Puissance</i>	<i>20 Kw</i>
<i>Tension DC</i>	<i>250 V</i>
<i>Nombre de pole statorique</i>	<i>8</i>
<i>Nombre de pole rotorique</i>	<i>6</i>
<i>Résistance statorique par phase</i>	<i>1.5 <math>\Omega</math></i>
<i>Moment d'inertie</i>	<i>0.04 Kg<math>m^2</math></i>

Tableau 3.1 Paramètres de la machine

<i>Paramètre</i>	<i>Unite</i>	<i>valeur</i>
<i>Masse du châssis</i>	<i>Kg</i>	<i>M2 = 60</i>
<i>Masse de roues</i>	<i>Kg</i>	<i>M1=40</i>
<i>Raideurs radiale des pneus</i>	<i>N/m</i>	<i>K=18760</i>
<i>Raideurs radiale de suspension</i>	<i>N/m</i>	<i>Kt=100000</i>
<i>L'amortissement radial de l suspension</i>	<i>N.m/m</i>	<i>C2=900</i>

Tableau 3.2. Paramètre du system de quart de véhicule

### III.2.1 Modèle électromagnétique de la MRV

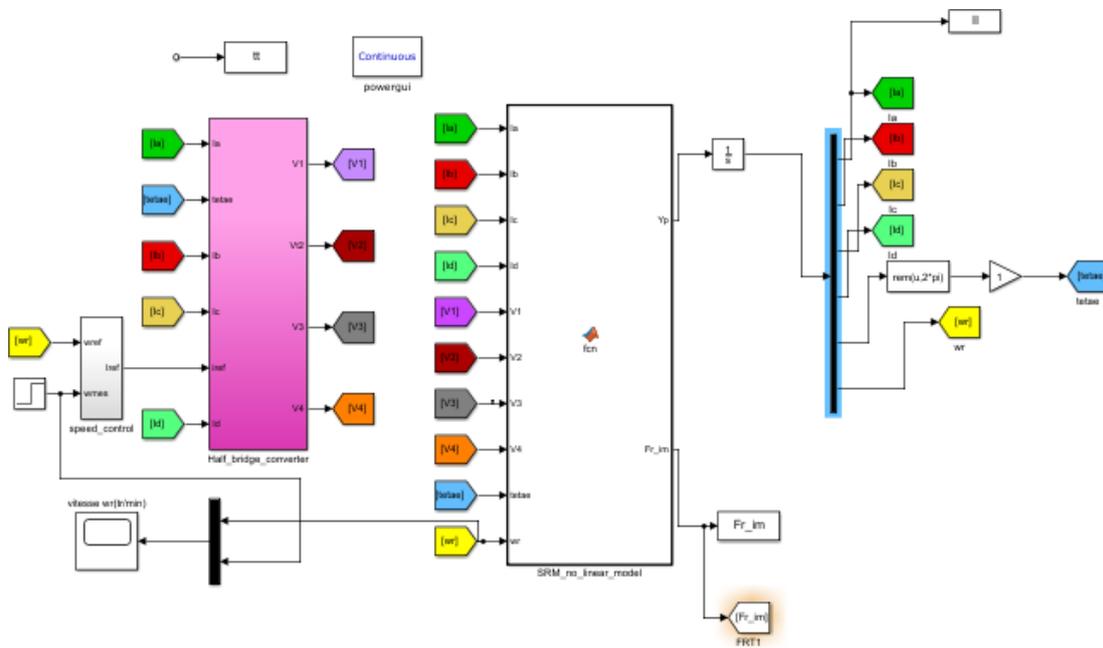


Figure 3.1 Modèle dynamique de la MRV

Ce modèle dynamique est composé de plusieurs parties. Les différentes parties du modèle sont présentés sur la figure (3.1).

A- contrôleur de vitesse.

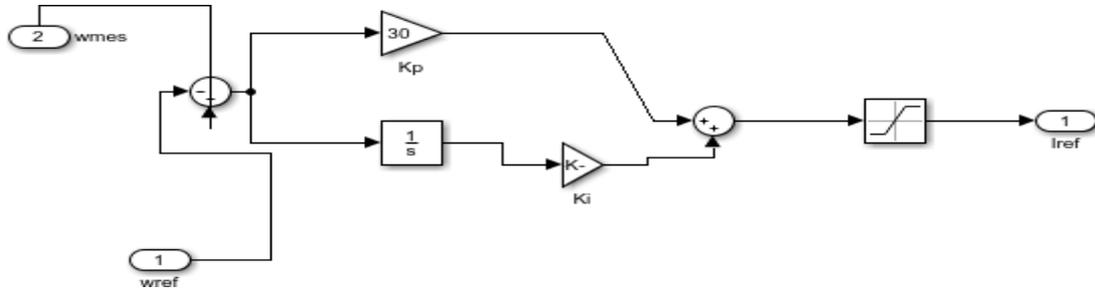


Figure 3.2 contrôleur de vitesse.

B- convertisseur

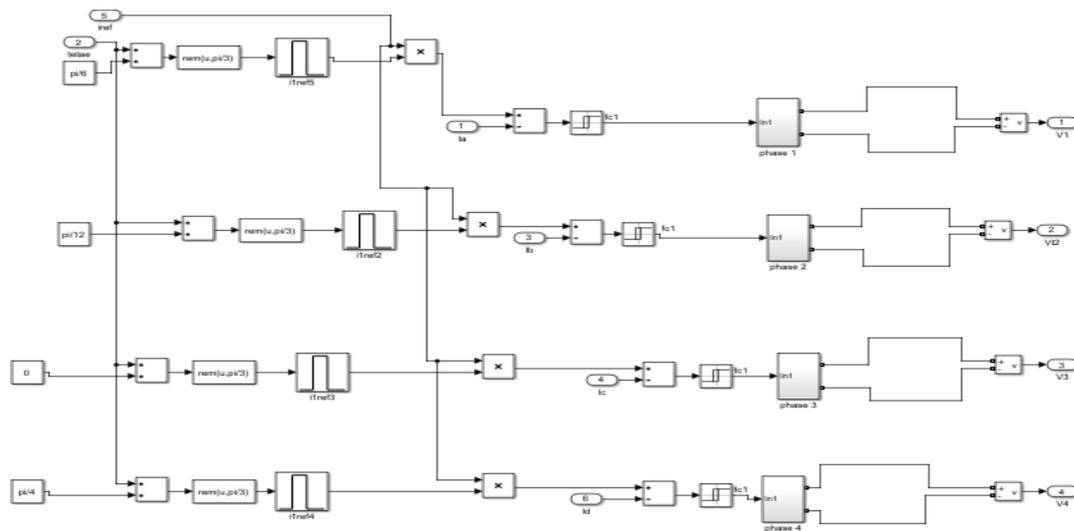


Figure 3.3 convertisseur

C- Modèle de la MRV

C'est une fonction dans matlab- Simulink qui et regroupé tous les paramètres de la MRV

Le modèle permet la prise en compte de l'effet de l'excentricité. La présence de cette dernière provoque des forces radiales déséquilibrées qui agissent sur la structure mécanique du stator et par conséquent le corps du véhicule.

Les figures (3.4) (3.5) présentent quelques résultats de simulation du modèle de la MRV.

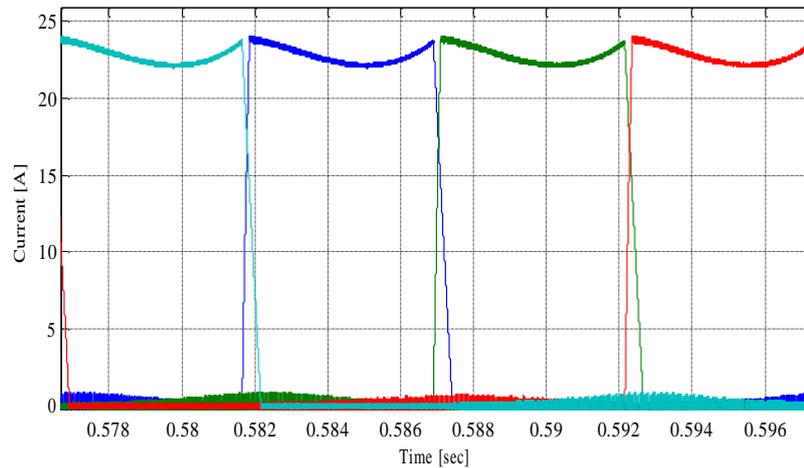


Figure 3.4 L'influence de la variation de la valeur de  $dg$  sur le courant

Cette figure nous montre les allures du courant en fonction du temps en changeant à chaque fois la valeur qui varie de (0.05, 0.07, 1). On observe qu'il n'existe pas une différence entre les trois allures donc le changement de la valeur de  $dg$  n'influe pas sur le courant.

### III.2.2 Modèle mécanique de l'ensemble moteur roue – VE

La force radiale déséquilibrée calculée dans le modèle électromagnétique pour différentes valeurs de l'excentricité du rotor est utilisée comme excitation pour le modèle mécanique de l'ensemble moteur-VE.

L'équation (2.23, voir chapitre II) est résolue dans MATLAB.

Les résultats de simulation sont montrés sur les figures suivantes :

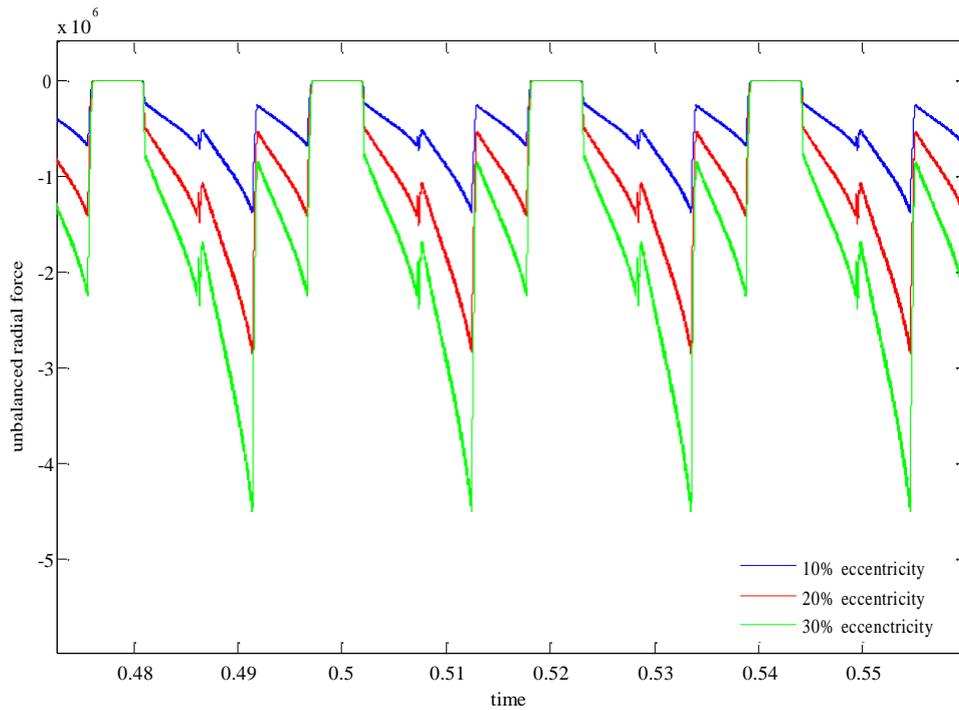


Figure 3.5 Force radiale déséquilibrée pour différents degrés d'excentricité.

Il est évident que l'amplitude de la force radiale augmente avec l'augmentation du degré d'excentricité.

Les figures (3.6), (3.7) et (3.8) montrent les vibrations des différentes parties de l'ensemble moteur-Véhicule électrique.

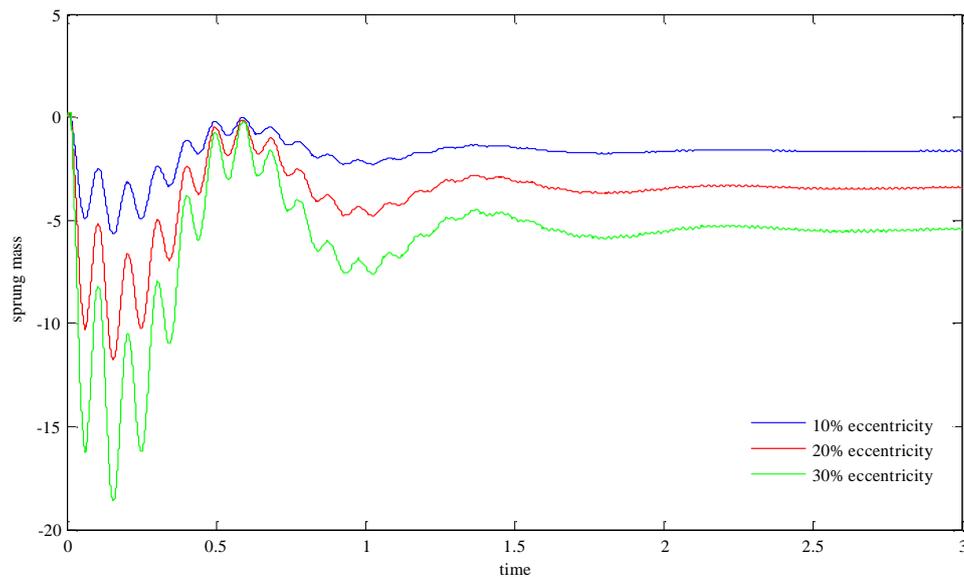


Figure 3.6 vibrations du corps du véhicule pour différents degrés d'excentricité

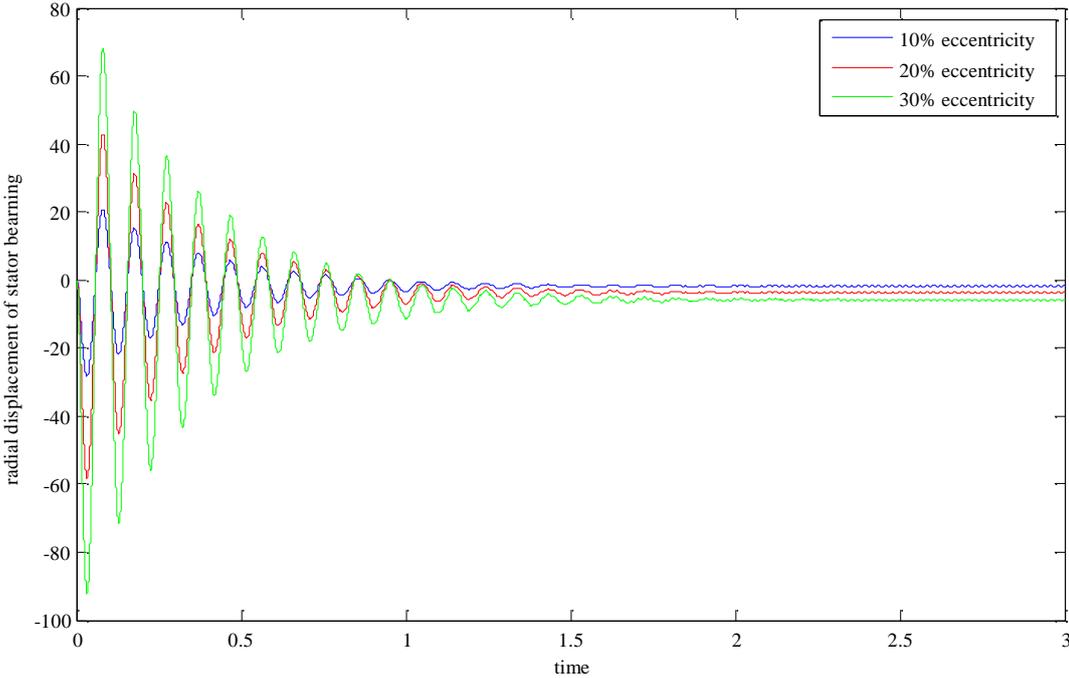


Figure 3.7 vibrations du stator du moteur pour différentes degrés d'excentricité

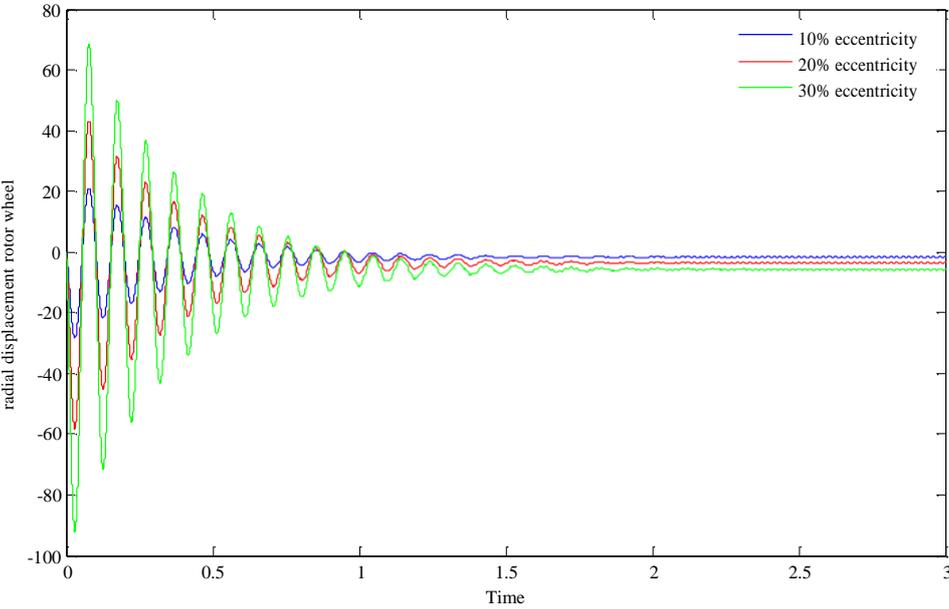


Figure 3.8 vibrations de la roue du véhicule pour différentes degrés d'excentricité

A partir de ces figures, on peut faire les remarques suivantes :

- L'amplitude des vibrations augmente avec l'augmentation de degré d'excentricité.
- En partant du moteur vers le corps du véhicule, l'amplitude des vibrations diminue. Cela est justifié par l'effet des amortisseurs.

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de l'implémentation du modèle électromagnétique-mécanique de l'ensemble moteur roue- VE. Une modélisation dynamique du moteur roue a été effectuée dans Matlab-Simulink. L'effet de l'excentricité du rotor du moteur à reluctance variable est montré. Cette excentricité contribue à la création des efforts radiaux déséquilibrés. Ces derniers influent sur la dynamique du véhicule dans le sens radiale et par conséquent sur le confort au bord du VE. La résolution de l'équation du mouvement de l'ensemble moteur-VE permet de constater que l'excentricité du moteur augment les vibrations du véhicule et réduit le confort.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Pour réduire l'émission de monoxyde de Carbon par les véhicules classiques (VE), les gouvernements dans le monde ont investies dans l'exploitation des véhicules électriques.

Dans un VE, la propulsion est effectuée par un moteur électrique. Les moteurs les plus utilisés sont les moteurs à aimants permanents et les moteurs à reluctance variable.

Dans une partie de ce travail, nous avons décrit la composition et le principe de fonctionnement de chacun de ces moteurs.

Un moteur à reluctance variable (MRV) est modélisé en utilisant une approximation par séries de Fourier de l'inductance. Cette approximation est basée sur un calcul éléments finis des valeurs de l'inductance effectué par le logiciel FEMM.

Ce moteur est installé dans la roue d'un véhicule électrique et utilisé pour la propulsion automobile. Les caractéristiques du couple de sortie et de la force radiale résiduelle déséquilibrée liés à la position angulaire du rotor et le courant d'enroulement sont analysées. Cette force existe à cause de l'excentricité.

La force radiale déséquilibrée est incorporée dans le modèle mécanique d'un quart du véhicule électrique (quarter vehicle model).

La commande de la MRV est également implémentée via des équations de couplage électromécanique.

L'effet négatif du moteur roue sur la dynamique du véhicule est abordé. Pour répondre aux problèmes de vibration et d'exigence de conduite.

Nous avons étudié l'effet de l'excentricité sur les vibrations au bord du véhicule.

Nous avons constaté que l'augmentation de niveau d'excentricité du rotor du moteur roue augmente les vibrations des différentes parties du véhicule. Nous avons aussi confirmé l'effet de la suspension mécanique.

En perspectives, le modèle développé peut être amélioré comme suit

- Introduisant les irrégularités dans l'équation mécanique
- Considéré les vibrations dans la direction axiale
- Introduire des techniques de commande pour la réduction des vibrations au bord du véhicule.

# **Bibliographique**

- [1] S.Murata, Innovation by in-wheel-motor drive unit, *Vehicle System Dynamics* 50 (2012)807–830, <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2012.666354>.
- [2] R.N.Tuncay,O.Ustun,M.Yilmaz,C.Gokce,U.Karakaya,Design and implementation of an electric drive system for in-wheel motor electric vehicle applications, *Proceedings of the 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE, 2011, pp.1–6.*  
<http://dx.doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043070>.
- [3] Y.Chen,J.K.Hedrick,K.Guo,Anovel direct yaw moment controller for in-wheel motor electric vehicles, *Vehicle System Dynamics* 51(2013)925–942,  
<http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2013.773453>.
- [4] J. Liu and H. Peng, “Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle”, *IEEE*, vol. 16, no. 6, pp.1242-1251, Nov.2008.
- [5] Cours sur les machines à réluctance variable. master II machines électriques. université de Jijel .Prof A.R
- [6] Luc Moreau « Modélisation, conception et commande de génératrice à reluctance variable basse vitesse » Thèse de Doctorat, Université de Nantes 2005
- [7] S. Hamache, Dj.Ghemeri «Modélisation par éléments finis d’une machine synchrone à Aimant permanent » mémoire d’ingénieur à l’Université de Bejaia.
- [8] F. Leprince-Ringuet, « Aimant permanent/ matériaux et application », Mémoire d’ingénieur de l’école nationale supérieure de chimie de Paris-technique.
- [9] L. EricRadaozandry, « Conception et optimisation des machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique», mémoire pour obtention du grade de maîtrise en sciences, université de Laval 2007.
- [10] J. Saint-Michel, ‘Bobinage des machines tournantes à courant alternatif’, *Techniques de l’ingénieur*, D3 420, 2001.
- [11] D. Fodorean, A. Miraoui, "Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP)", D3554 *Techniques de l’ingénieur*, Novembre 2009.

- [12] L. Chédot, Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents internes à large espace de fonctionnement. Application à l'alternateur-démarrateur, thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2004.
- [13] Bouchereb, C. "Contrôle direct du couple des machines synchrones". Mémoire de magistère en électrotechnique, université de Batna, 2005.
- [14] M. BardaBendaha , «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel », Mémoire de Magistère en Electronique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 04/02/2015.
- [15] X.D. Xue, K.W.E. Cheng, T.W. Ng, N.C. Cheung, Multi-objective optimization design of In-Wheel Switched Reluctance Motors in electric vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics 57 (2010) 2980–2987, <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2051390>.
- [16] B. Fahimi, G. Suresh, J. Mahdavi, M. Ehsami, A new approach to model switched reluctance motor drive application to dynamic performance prediction, control and design, Proceedings of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 98 Record(Cat.No.98CH36196),IEEE,1998,pp.2097–2102.  
<http://dx.doi.org/10.1109/PESC.1998.703469>.
- [17] I. Husain, M. Ehsani, Torque ripple minimization in switched reluctance motor drives by PWM current control, IEEE Transactions on Power Electronics. 11 (1996) 83–88, <http://dx.doi.org/10.1109/63.484420>.
- [18] Feng-Chieh Lin, S.-M. Yang, Analysis and modeling of the radial force in a switched reluctance motor with sinusoidal excitations, Proceedings of the Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003, IEEE, 2003, pp. 938–943. <http://dx.doi.org/10.1109/PEDS.2003.1283094>.
- [19] S. Ayari, M. Besbes, M. Lecrivain, M. Gabsi, Effects of the airgap eccentricity on the SRM vibrations, Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No.99EX272), IEEE, 1999, pp. 138–140. <http://dx.doi.org/10.1109/IEMDC.1999.769052>.

- [20] N.R. Garrigan, W.L. Soong, C.M. Stephens, A. Storace, T.A. Lipo, Radial force characteristics of a switched reluctance machine, Proceedings of the Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370), IEEE, 1999, pp. 2250–2258. <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.1999.799158>.
- [21] Vibration effect and control of In-Wheel Switched Reluctance Motor for electric vehicle (Journal of Sound and Vibration).

## الملخص:

تهتم هذه الدراسة بالدرجة الأولى بإيجاد حل لمشكلة الإهتزاز في السيارات ذات المحركات الكهربائية, و هذا يتم عبر انجاز نموذج يمثل كل العناصر التي تشارك في حركة السيارة الكهربائية مع الأخذ بعين الاعتبار بنوعية المحرك المستعمل و كذلك حالة الطريق و كل ما يساهم في زيادة الإهتزاز. لقد ذكرنا نوعين من المحركات الأكثر إستعمالا في هذا المجال لكننا أجرينا التطبيق على نوع واحد نظرا للمميزات التي يقدمها ,بالإضافة إلى كتابة معظم العلاقات و المعادلات الرياضية و المغناطيسية و الكهربائية التي نحتاجها لإتمام الدراسة. في الأخير تم إنجاز النموذج مع تطبيق التعديلات المطلوبة و ملاحظة النتائج و إقتراح الحلول التي من خلالها نتمكن من إنقاص أكبر قدر من الإهتزاز في السيارات الكهربائية.

## Résumé :

Cette étude s'intéresse principalement à la réduction de vibration dans un véhicule électrique. Elle basée sur le développement d'un modèle qui présente toutes les paramètres influant sur le mouvement du véhicule en tenant compte le type du moteur utilisé et la route.

Nous avons mentionné deux types des moteurs utilisés dans ce domaine, mais on a choisi le moteur qui nous donne plus d'avantages, Nous avons écrit presque toutes les équations qui nous aident à compléter cette étude.

Enfinement nous avons réussi à élaborer le programme et obtenir les résultats, nous avons proposé les solutions dans lesquelles la vibration est réduit au minimum dans les systèmes des véhicules électrique.

## Abstract:

This study is mainly interested in the reduction of vibration in an electrical vehicle. It is based on making a model which present all the parameters influencing the car movement by keeping an eye on the motor's type and the road.

We have mentioned two types of motor which are the most used in this domain, we have written all the equations we need. Finally, we have successfully made the model and we have obtained the results and suggested solutions which will reduce the amount of vibration as possible as it could be.