

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Département Électrotechnique

Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Électrotechnique

OPTION : MACHINES ELECTRIQUES

Thème :

*Commande Optimale Pour la  
Réduction des Vibrations Et Bruit  
Dans les Machines à Réductance  
Variable Utilisées dans les  
Véhicules Electriques*

*Réalisé par :*

*M<sup>elle</sup>. BOULEBTINA AZIZA  
M<sup>elle</sup>. MEGHAICHI LEILA*

*Encadré par :*

*Pr. REZIG Ali*

Promotion : novembre 2020





## Remerciements

*Nous rendons grâce à dieu qui nous a donné la volonté, l'aide, la patience et le courage pour accomplir ce modeste travail. Ce dernier n'aurait pas vu le jour sans la contribution de plusieurs personnes, tant avec leurs conseils qu'avec leurs critiques*

*Nous remercions très vivement Mr REZIG Ali , notre promoteur de nous avoir encadrer, orienter, conseiller et corriger tout le long de notre travail.*

*Nous remercions également, les membres de jury qui ont accepté d'examiner et de juger notre travail.*

.

*Enfin, Nous remercions également tous les enseignants du département électrotechnique, qui ont assuré notre formation durant notre cycle Universitaire.*

# Sommaire

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : véhicules électriques, propulsion et stockage</b>	
Introduction .....	4
1- Voiture électrique, aperçu historique .....	4
2-Types des véhicules électriques .....	5
2-1 Véhicule purement électrique.....	5
2-2Véhiculeshybrides.....	6
3-Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique.....	7
4- Batteries.....	8
4-1 Types de batteries .....	9
4-2 Caractérisation des accumulateurs électriques.....	10
4-3 Impact de ses batteries sur les performances des VE.....	10
4-4 avantage et inconvénient des véhicules électriques .....	10
5-Moteurs électriques .....	11
5-1 Moteurs à courant alternatif.....	12
5-1 Moteurs asynchrones .....	12
5-2 Moteurs synchrones .....	15
5-3 Moteur à réluctance variable.....	17
5-5 Moteur à courant continu (MCC).....	18
Conclusion.....	20
<b>Chapitre 2 : MRV dans les véhicules électriques</b>	
Introduction .....	22
1- Composition de la machine à reluctance variable.....	22
2- Principe de fonctionnement des MRV .....	23
3- Différentes topologies des MRV .....	25
3-1MRV Pures .....	25
3-2 MRV Hybrides .....	26
4- Profile de l'inductance et expression du couple .....	27
5- Alimentation et commande.....	29

5-1 Circuit de puissance .....	30
5-2 Convertisseur en demi-pont .....	30
5-3 Commande en vitesse .....	32
6- Modèle mathématique de la MRV et calcul de la force radiale .....	33
7- Avantages et inconvénients des MRV.....	34
8 -Génération de vibrations et de bruit dans le MRV intégré dans VE .....	35
Conclusion .....	37

### **Chapitre 3 : Réduction des vibrations et du bruit dans les MRV utilisant la méthode de roue libre étendue**

Introduction .....	39
1-Prédiction des vibrations et du bruit dans les moteurs électriques.....	39
1-1 Prédiction de vibrations.....	39
1-2 Prédiction du bruit.....	42
2- Techniques de réduction de vibration et bruit.....	42
2-1 Méthode de commutation en deux étapes.....	43
2-2 Méthode de lissage de tension.....	43
2-3 Méthode de commutation en trois étapes.....	44
2-4 Méthode de roue libre étendue.....	45
3- Simulation du fonctionnement de la MRV pour la réduction des vibrations et bruit.....	46
4- Résultats de simulation.....	47
4-1 Résultat de simulation sans méthodes de réduction .....	47
4-2 Résultats de simulation avec la méthode réduction.....	50
Conclusion .....	54
Conclusion Générale .....	56
Annexe	
Références bibliographie	

***INTRODUCTION  
GENERALE***

## **INTRODUCTION GENERALE**

La diminution de l'émission de monoxyde de carbone est devenue une préoccupation majeure des gouvernements dans le monde. Plusieurs chercheurs ont focalisé leurs efforts pour cet objectif [1-3]. Dans les cités populaires, l'utilisation des véhicules électriques (VE) est devenue une nécessité pour réduire au maximum l'émission de CO<sub>2</sub>. Le développement des VE en termes de performance, cout, disponibilité mais aussi en confort est alors obligatoire. Pour la motorisation des VE, l'utilisation des moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) donne beaucoup de satisfactions particulièrement lorsqu'ils sont fabriqués à base de matériaux de terre rare [4-5]. En effet ces moteurs ont un rapport couple/volume important et présente une grande résistance à désaimantation. Malheureusement, le prix de revient des aimants permanents de type terre-rare ne cesse pas d'augmenter dans les dernières années. La machine synchrone à reluctance variable (MRV) se présente comme une alternative aux MSAP. Les MRV délivrent un couple important, leur commande en vitesse est simple et son cout de fabrication est relativement faible. Donc beaucoup de chercheurs envisagent l'utilisation des MRV dans les systèmes de propulsion des VE. Malheureusement et vue la structure mécanique de la MRV caractérisée par une double denture au stator et au rotor ce qui favorise les phénomènes de vibrations et de bruit à cause de la discontinuité de la reluctance de l'entrefer. Beaucoup de travaux ont été réalisés ces dernières années sur la réduction du comportement vibroacoustique des MRV. Les méthodes de réduction sont devisées en deux catégories. La première catégorie est basée sur l'optimisation de la géométrie de la machine. La deuxième est basée sur la modification des techniques de commande afin de réduire l'émission de vibrations et bruit.

Ce modeste travail s'inscrit dans le cadre de la recherche concernant la réduction des vibrations et bruit dans les MRV. L'objectif est comprendre le mécanisme de génération de ces phénomènes. Une méthode de réduction de vibrations et bruit dans les MRV sera testée. Cette méthode intervient dans partie commande du convertisseur en demi-pont qui alimente la machine.

Ce mémoire est composé de trois chapitres

Le premier chapitre est consacré aux véhicules électriques, on abordera la structure, le principe de fonctionnement, le système de stockage et particulièrement les moteurs électriques qui peuvent être utilisés.

Le deuxième chapitre est réservé intégralement à description de la machine synchrone à reluctance variable. Dans ce chapitre l'accent est mis particulièrement sur le mécanisme de génération de vibrations et bruit dans les MRV. Les approches utilisées pour la prédiction des vibrations seront présentées.

La mise en œuvre dans Matlab-Simulink du modèle dynamique de la MRV est présentée dans le dernier chapitre. Cette modélisation permet de calculer la force radiale qui s'exerce sur la structure du stator et par la suite la prédiction des vibrations émises de la structure. Dans cette partie la méthode de réduction des vibrations basées sur une période de roue libre étendue est implémentée.

Ce mémoire terminera par une conclusion générale et des perspectives.

# *Chapitre 1*

*Véhicules électriques,  
Propulsion et stockage*

---

## INTRODUCTION

Le moteur électrique est le cœur des véhicules électriques. Ce chapitre après une description des véhicules électriques sera consacré à la présentation de deux composants indispensables dans le fonctionnement d'un véhicule électrique : les batteries et les moteurs de traction. L'accent est mis particulièrement sur les moteurs électriques, ses avantages, ses inconvénients et son adéquation quand à une utilisation pour l'attraction dans les VE.

### 1- Voiture électrique, aperçu historique

La voiture électrique est apparue vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Elle est écologique, performantes e silencieuses. Au début du 20<sup>ème</sup> siècle que la voiture à essence connaît un succès plus important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer un couple suffisant. Pendant cette période, l'évolution de la voiture électrique a été très lente. Les années qui arrivent après ont apporté de véritable progrès. Les travaux de recherche dans cette période ont été focalisés principalement sur le stockage de l'énergie, avec l'apparition des premières batteries au Lithium-Ion. Comme il est montré sur la figure ci-dessous, la constitution d'une voiture électrique moderne est simple par rapport à une voiture à essence. La transmission et le moteur sont nettement plus petits et les batteries peuvent être placées de façon à obtenir une répartition idéale des masses. Elles peuvent même être intégrées au châssis, abaissant ainsi le centre de gravité du véhicule et améliorant sa tenue de route. La taille réduite et la simplicité des composants permettent d'imaginer des véhicules extrêmement petits et légers, ce qui est un avantage non négligeable lorsque l'on souhaite économiser de l'énergie. De plus, les moteurs électriques délivrent une grande puissance à basse vitesse de rotation. Cette caractéristique permettre d'accélérer le véhicule rapidement. [1]

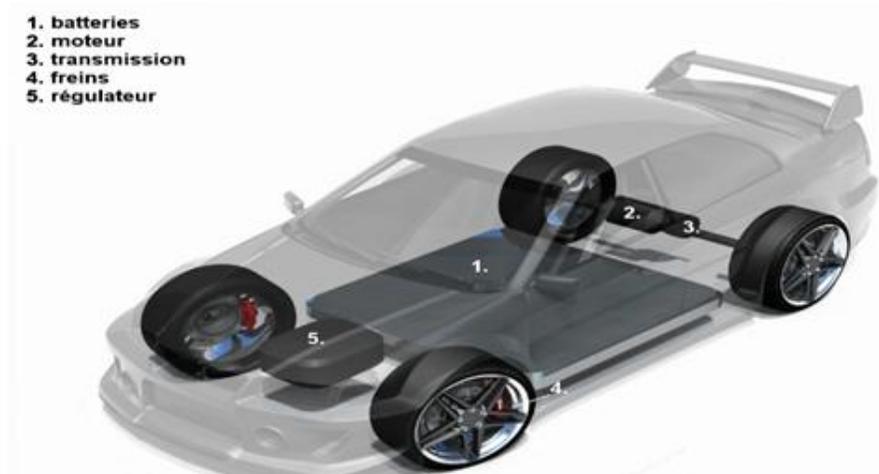


Figure (1-1) Véhicule électrique et ses composants

## 2- Types des véhicules électriques

### 2-1 Véhicule purement électrique

Un Véhicule purement électrique est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Il est composé de plusieurs parties, les plus importantes sont : le moteur électrique, les batteries, l'unité de contrôle...etc.

La force motrice générée par le moteur est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue (voir figure (1-2) ) [3]

Les moteurs peuvent être aussi placés dans les roues (In-Wheel Motors), figure (1-3)



Figure (1-2) Moteur dans un véhicule électrique avec système de transmission

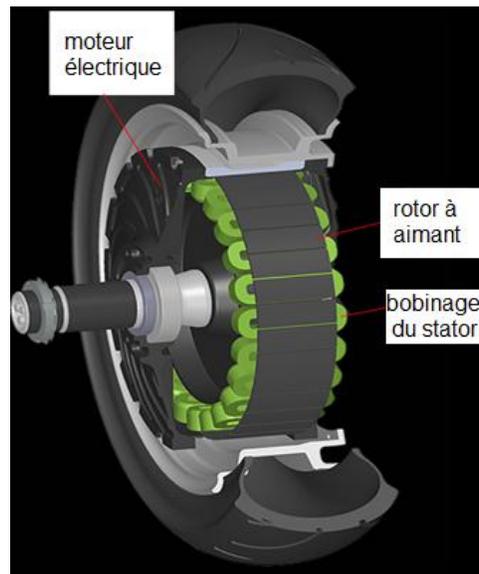


Figure (1-3) Moteur électrique dans la roue du véhicule

## 2-2 Véhicules hybrides

Le véhicule hybride peut se définir comme un moyen de transport faisant appel à deux sources d'énergie embarquées distinctes. Un schéma d'un VE hybride est montré sur la figure (1.4). On peut le caractériser par ses types de stockages d'énergie (chimique, thermique, cinétique, électrostatique, etc.) et par son architecture qui est définie comme l'agencement des sous-systèmes qui transfère l'énergie aux roues. On pourra donc parler des véhicules hybrides **pile à combustible/batteries** par exemple, pour qualifier un véhicule doté d'un réservoir d'hydrogène lié à une pile à combustible et d'une batterie. Le plus souvent, un véhicule hybride est doté d'un moteur thermique (essence ou diesel), d'un ou de plusieurs systèmes de stockage électrique et d'un ou de plusieurs moteurs électriques. [3]

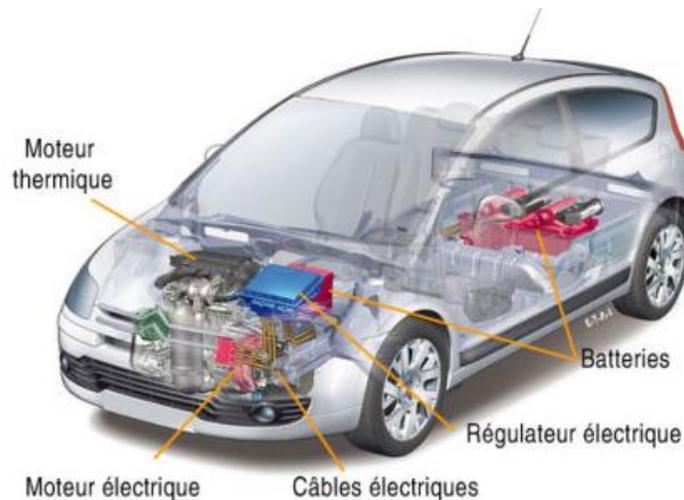


Figure (1-4) véhicule électrique hybride

### 3-Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique

Le véhicule électrique, comporte une batterie pour stocker l'énergie, un moteur électrique avec un système de contrôle et un chargeur de batteries (voir schéma ci-dessous). Ainsi, le ou les moteurs électriques de traction sont reliés aux roues motrices. L'ordinateur contrôle, gère et régule la puissance. Une fiche de raccordement au réseau électrique permet le chargement des batteries via une prise traditionnelle. Il existe aussi des véhicules "hybrides" qu'utilise un moteur électrique pour améliorer le rendement de la partie thermique et augmenter l'autonomie

Les véhicules électriques sont dotés d'une batterie qui stocke l'énergie et se recharge grâce à l'électricité du réseau, d'un ou plusieurs moteurs électriques avec un système de contrôle et d'un chargeur de batterie. La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur (voir figure (1-5)). Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur (cas d'un moteur AC). Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un

véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique [4]

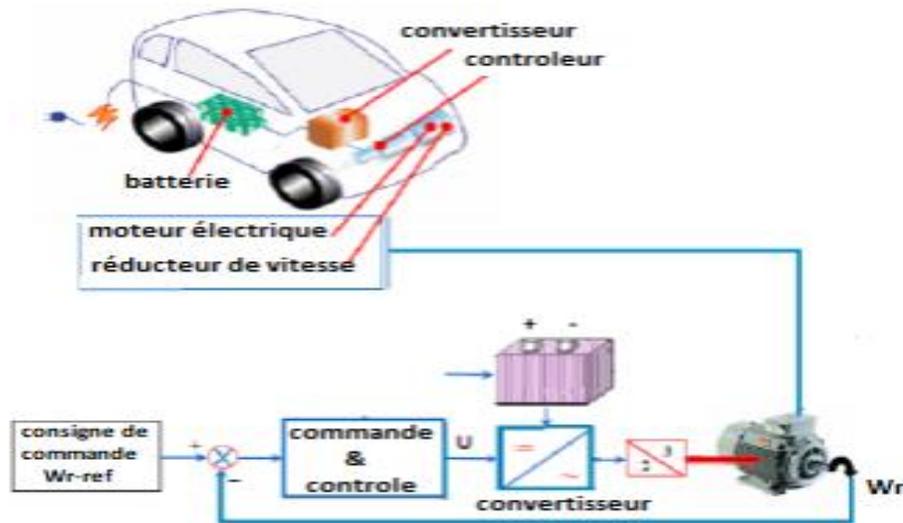


Figure (1-5) Eléments qui intervient dans le fonctionnement d'un VE

#### 4- Batteries

La batterie est le Cœur du véhicule. Elle influe sur les performances et surtout l'autonomie du VE. Les batteries lithium permettent d'améliorer considérablement les caractéristiques techniques des véhicules électriques et rendent leur utilisation possible

Le lithium permet en effet de stocker énormément de charges électriques sous forme d'ions sur les électrodes et de manière très compacte.

Les chercheurs dans le domaine de l'électrochimie travaillent pour améliorer les performances des batteries notamment la capacité de stockage. Cela permet de réaliser des VE qui répondent parfaitement aux exigences du marché [3].

## 4-1 Types de batteries

### 4-1-1 Batteries Nickel-hydrure(NiMH)

La charge d'un accumulateur au Nickel se fait à  $I = C/14h$ . Les accumulateurs NiMH ne supportent pas d'être surchargés (sauf par un courant d'entretien très faible  $< C/20h$ ). Ils sont peu sensibles à l'effet de mémoire.

### 4-1-2 Batteries lithium-ion

Densité d'énergie élevée et absence d'effet mémoire. Autodécharge relativement faible. Le coût reste important. Elles ne nécessitent pas de maintenance. L'utilisation d'un électrolyte liquide présente des dangers si une fuite survient.

### 4-1-3 Batteries lithium métal polymère(LMP)

Elles utilisent un polymère gélifié comme électrolyte. Elles peuvent prendre des formes fines et variées. D'un faible poids. Plus sûre que les Li-ion (plus résistante à la surcharge et aux fuites d'électrolytes). Plus de cycles de vie.

à la caractérisation de la source secondaire d'énergie dans un véhicule électrique hybride. Sa caractéristique principale est qu'elle doit être réversible en puissance : elle peut être rechargée par récupération de l'énergie cinétique ou par le SPAC. Dans un véhicule à pile à combustible hybride, deux technologies d'accumulateurs électriques sont généralement retenues pour constituer la source secondaire d'énergie : les batteries et les super-condensateurs

Les batteries lithium-ion ont une densité énergétique de 150 Wh/kg à 200 Wh/kg, soit quatre fois plus que la technologie nickel-cadmium et six fois plus que le plomb. Cela reste 50 fois moins que les carburants liquides

Capables de stocker plus d'ions, comme l'oxyde de manganèse ( $LiMnO_2$ ) ou l'oxyde de nickel ( $LiNiO_2$ ).[3]

## 4-2 Caractérisation des accumulateurs électriques

Un accumulateur électrique est un dispositif destiné à stocker l'énergie électrique afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement. Nous citons ci-dessous ses grandeurs caractéristiques :

La tension aux bornes est la tension fournie au cours de la décharge. Elle dépend de l'enthalpie libre de la réaction totale, de la cinétique des réactions à chaque électrode et de la résistance de l'électrolyte. La capacité de charge électrique, souvent appelée capacité de l'accumulateur est la charge électrique que peut fournir l'accumulateur complètement chargé pendant un cycle complet de décharge. L'énergie stockée dans la batterie est égale à sa charge électrique multipliée par la tension moyenne sous laquelle cette charge est délivrée.

La densité d'énergie, exprimé en Wh/kg, est une des caractéristiques importantes d'un accumulateur, elle correspond à la quantité d'énergie qu'il peut restituer par rapport à sa masse. La densité de puissance est la puissance que fournit la pile par unité de masse. La puissance fournie dépend du régime de décharge.

## 4-3 Impact des batteries sur les performances des VE

La batterie influe de manière considérable sur les performances des VE. On cite les points suivants :

- La recharge reste une contrainte.
- Le temps de recharge et la disponibilité des bornes

## 4-4 Avantages et Inconvénients du véhicule électrique

### Avantages

- Peu de pollution
- Emission de monoxyde de carbone presque nulle.
- Possibilité de recycler à 100 % les composants des batteries.
- Aucune consommation pendant les phases de ralenti. On peut pendant cette période générer de l'énergie (par le générateur) et la stocker dans les batteries.

- démarrage et très simple.
- Le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage), accélérations progressives.
- Le moteur est parfaitement silencieux.

**Inconvénients**

- Poids des batteries
- Encombrements des batteries
- cycle de charges limitées
- Coûts de production des véhicules élevés.
- In station de recharge

**5- Moteurs électriques**

En plus des batteries le moteur électrique est un élément très essentiel dans le fonctionnement des VE. C'est l'élément qui assure la propulsion et la traction.

La machine électrique est un dispositif électromagnétique destiné à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique ou, inversement, à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique. Elle comprend principalement deux parties : l'inducteur qui crée un champ magnétique et l'induit dans lequel ce champ induit crée une force électromotrice ; ces deux parties sont séparées par un entrefer.

Les moteurs électriques peuvent être décomposés en deux catégories selon la nature de l'excitation (continue ou alternative).

Une classification de ces moteurs est montrée sur l'organigramme ci-dessous.

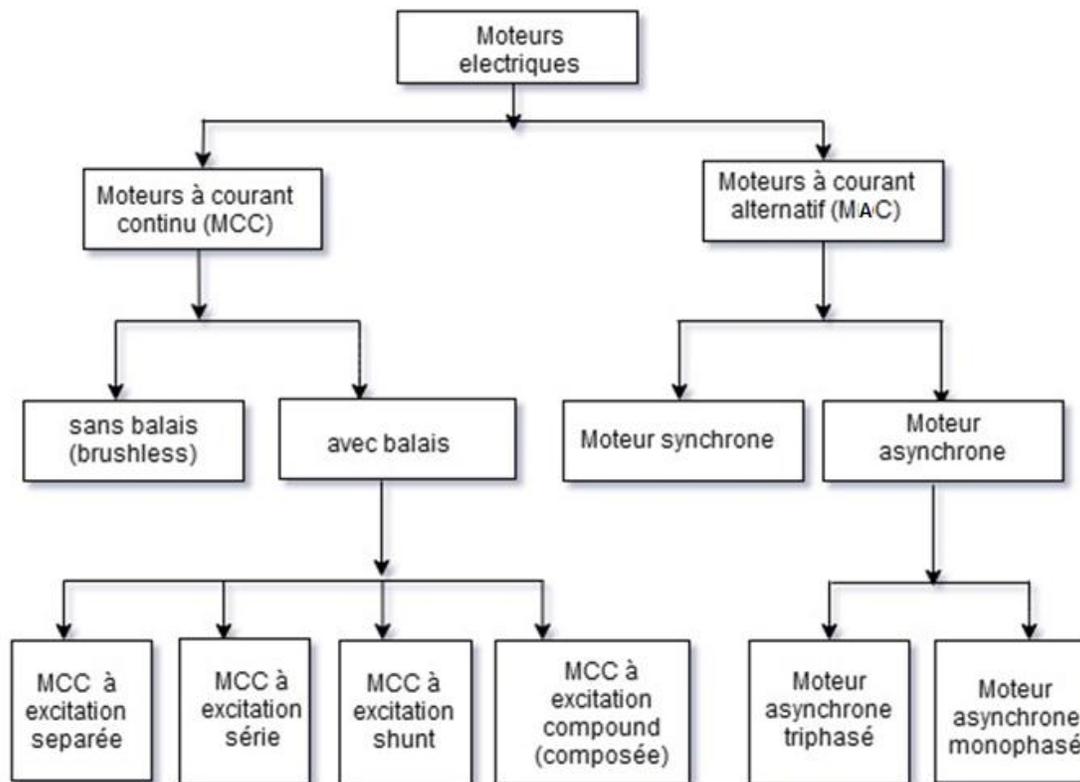


Figure (1-6) Classification des moteurs

## 5- 1 Moteurs à courant alternatif

### 5-1 Moteurs asynchrones

Deux types de machine asynchrone peuvent être distingués : la machine asynchrone à rotor à bagues et la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette dernière est la plus répandue. Son niveau de robustesse et de fiabilité allié à un faible coût en a fait une machine de référence.

Moteur asynchrone est l'un des plus utilisés dans l'industrie lourde (palans, ascenseurs...), mais il a aussi été utilisé dans l'automobile

Ce moteur asynchrone se compose d'un stator et d'un rotor. Le premier est un cylindre ferromagnétique dont les encoches accueillent des bobinages. Quant au second, il est constitué de deux anneaux (appelés cages d'écureuil) attachés par des conducteurs. Il peut aussi être bobiné (présence de trois bobines reliées à une bague).

### 5-1-1-a Constitution d'un moteur asynchrone

#### Inducteur (stator) :

Le stator montré sur la figure (1-7) joue le rôle de l'inducteur, puisque c'est lui qui génère le champ magnétique lors du passage du courant électrique. Quant au rotor, positionné au centre des bobines, il subit le champ magnétique du stator. Il est l'induit. Le courant triphasé qui passe dans les bobines génère un champ magnétique tournant dont la vitesse de rotation est appelée vitesse de synchronisme (exprimée en tours/seconde). La vitesse de synchronisme est obtenue en divisant la fréquence (50 Hz en Europe) par le nombre de paires de pôles



*Figure (1-7) Stator d'une machine asynchrone*

#### Induit (rotor)

Le rotor peut être bobiné mais très souvent il s'agit d'un rotor à cage d'écureuil.

### 5-1-1-b Moteur asynchrone à rotor à cage

Il est constitué de barres conductrices (souvent en aluminium) reliées entre elles par deux anneaux conducteurs de manière à former une cage d'écureuil. Cette cage d'écureuil est remplie par un empilement de tôles (voir figure (1-8)).

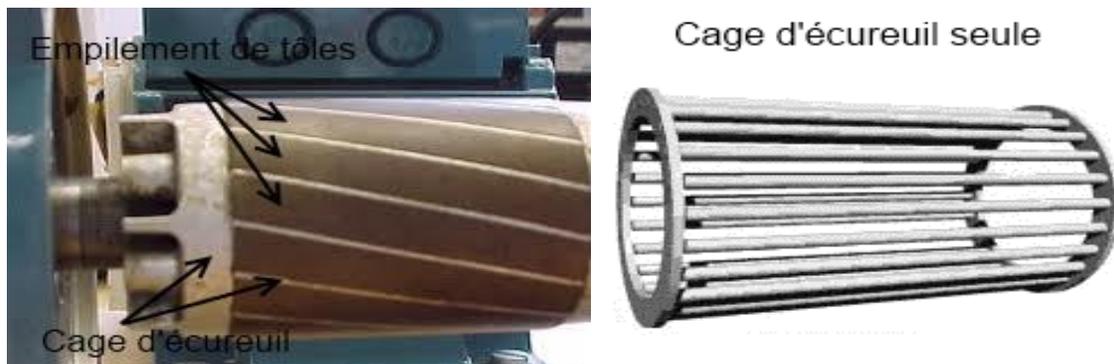


Figure (1-8) Rotor d'une machine asynchrone à cage

### 5-1-1-c Moteur asynchrone à rotor bobiné (rotor à bague)

Le moteur à rotor bobiné possède un bobinage triphasé relié en étoile et branché à trois résistances externes à l'aide des bagues collectrices. La figure (1-9), montre un rotor bobiné. Ce type de moteur s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil. Cependant, il présente les avantages suivants :

- Le couple de démarrage est plus élevé,
- Il est possible de régler la vitesse du moteur à l'aide de résistances extérieures (rhéostats),
- Le courant de démarrage est plus faible lorsqu'on ajoute un rhéostat.

### 5-1-2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

#### Avantages

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Coût réduit.

#### Inconvénients

- Non linéarités, utilisation d'un moteur asynchrone à rotor bobiné (alimentation sur cout)[6].

- intensité de démarrage supérieur à l'intensité nominale, chute de tension au démarrage
- alternateur. Ce moteur ne peut pas démarrer seul.
- le rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ magnétique provoque ce qu'on appelle des glissements.

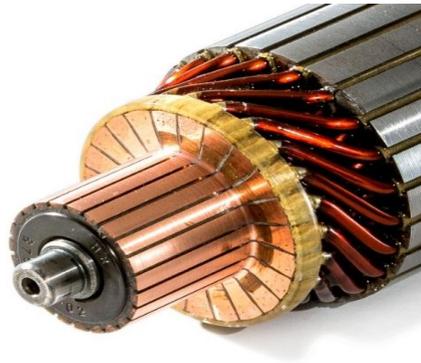


Figure (1-9) d'un rotor bobiné

## 5-2 Moteurs synchrones

Le moteur synchrone est composé d'un stator qui porte un bobinage triphasé similaire à celui d'un moteur asynchrone. Le rotor porte des pôles bobinés et alimenté par une source DC.

Les pôles du rotor peuvent être remplacés par des aimants permanents comme il est montré sur la figure (1-10). Dans ce cas la machine est appelée : machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

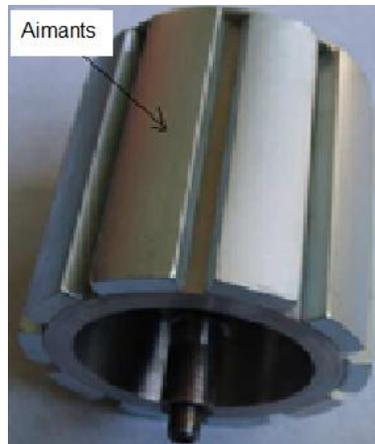


Figure (1-10) rotor d'une machine synchrone à aimants permanents

Selon la disposition des aimants dans le rotor on peut distinguer au moins trois types des moteurs synchrones à aimants permanents (voir figure (1-11))

- Moteur à aimants en surface (surface mounted permanent magnet)
- Moteur à aimants insérés (Inset permanent magnet)
- Moteur à aimants enterrés (burried permanent magnet)
- 

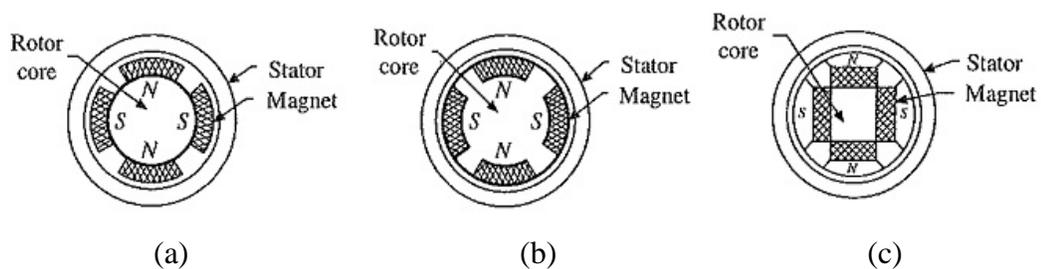


Figure (1-11) Rotors des MSAP a- aimants en surface, b- aimants insérés c- aimants enterrés

L'accrochage entre les pôles du champ tournant et les pôles du rotor permet au moteur de tourner avec la vitesse synchrone.

#### - Avantages et inconvénients des moteurs synchrones à aimants permanents [4]

##### Avantages

- Puissances massiques élevées ce qui rend leurs utilisations convenables aux systèmes embarqués.

- Absence de contacts glissants
- Un bon rendement (peu de pertes aux aimants).

### **Inconvénients**

- Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- Ondulations de couple
- risque de désaimantation

### **5-3 Moteur à réluctance variable**

La machine synchrone à aimants permanents présente plusieurs avantages quant à leur utilisation dans les véhicules électriques par rapport aux autres machines. Cependant le coût de revient des aimants permanents reste l'inconvénient major des MSAP.

La machine synchrone à réluctance variable (MRV) se présente comme une alternative aux MSAP. Leur avantage major est le coût de fabrication relativement faible. Ce qui permet d'envisager leur utilisation comme des moteurs de traction dans les véhicules électriques.

Cette machine comporte bien évidemment un stator et un rotor. Comme il est montré sur la figure (1-12), le rotor est fabriqué en acier doux. Il n'est pas lisse et possède plusieurs dents. Le rotor se positionnant dans la position de la plus faible réluctance. La réluctance est le quotient de la force magnétomotrice d'un circuit magnétique par le flux d'induction qui le traverse [7].



Figure (1-12) Moteur à reluctance variable

Le problème des MRV et l'émission de vibrations et bruit.

Ce problème influe sur leurs utilisations dans des applications de véhicules électriques où le confort acoustique est exigé.

Le prochain chapitre sera consacré à l'étude de cette machine qui fera l'objet de ce mémoire.

### 5-5 Moteur à courant continu (MCC)

Ce moteur est composé d'un enroulement monté sur le rotor (armature) et d'enroulements fixes au stator (pôles de champ).[8]

Toutefois l'enroulement du rotor peut être remplacé par des aimants permanents.

Selon l'excitation les MCC peuvent être classés en trois catégories :

- MCC à excitation séparées : le rotor et le stator sont alimentés par des sources séparées (figure (1-13))

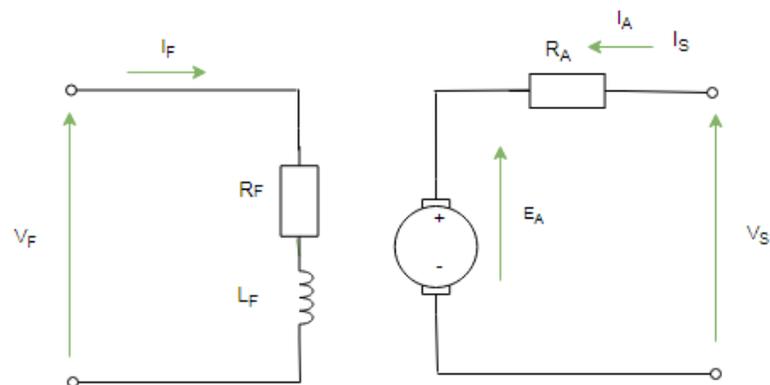


Figure (1-13) MCC à excitation séparée

- MCC à excitation série : le stator et le rotor sont alimentés en série (figure (1-14)).

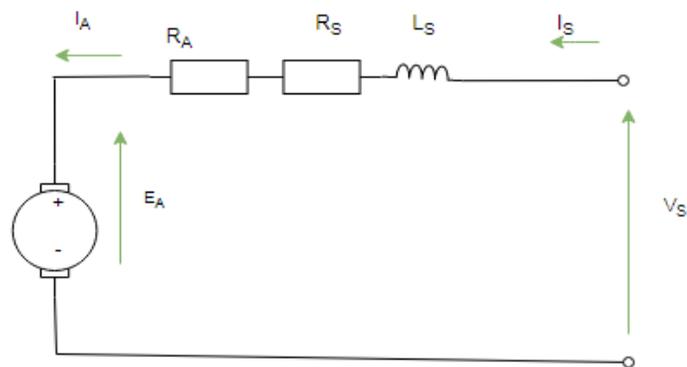


Figure (1-14) MCC à excitation série

- MCC à excitation shunt : le stator et le rotor sont alimentés en parallèle (figure (1-15)).

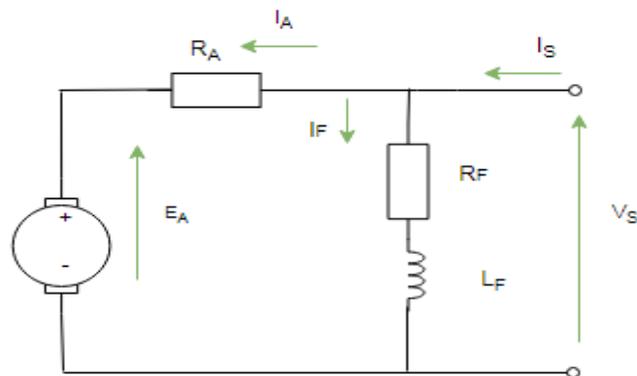


Figure (1-15) MCC à excitation shunt

### - Avantages

L'avantage des moteurs à courant continu est la simplicité de l'entraînement à vitesse variable. La commande de vitesse est simple à implémenter en agissant sur la tension.

Pour effectuer cette variation de vitesse, un convertisseur DC/DC commandable peut être utilisé.

### - Inconvénients

- Rapport couple/volume faible (problème d'espace dans le véhicule électrique)
- Les panne au niveau des balais.

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons abordé l'utilisation des moteurs électriques dans les véhicules électriques. Au début nous avons étudié le principe de fonctionnement d'un véhicule électrique. Ensuite nous avons mis l'accent sur les éléments principaux dans un VE : les batteries et le moteur. Parmi les moteurs qui donnent beaucoup de satisfactions on trouve les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) et les moteurs à reluctance variable (MRV). Ces derniers présentent l'avantage de faible coût de fabrication par rapport aux MSAP. Le prochain chapitre sera consacré à la présentation détaillée des MRV utilisés dans les VE.

# *Chapitre 2*

*MRV*

*Dans les Véhicules électriques*

## INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la présentation de la machine à reluctance variable utilisée dans la motorisation d'un véhicule électrique. Nous présentons la constitution de la machine, son principe de fonctionnement ainsi que son alimentation. Cette machine est caractérisée par son comportement vibratoire et acoustique gênant particulièrement dans certaines applications. Une partie de ce chapitre est réservée à éclaircir l'origine de ces phénomènes.

### 1- Composition de la machine à reluctance variable

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 (voir figure (2.1)).

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 positive [13].

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  $N_r$



Figure (2-1) Stator et e 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 immobilisé avec un couple de démarrage nul, lorsque les pôles rotoriques se trouvent coincés avec ceux du stator.

## 2- Principe de fonctionnement des MRV

Le principe de fonctionnement de la MRV peut être expliqué en se basant sur la figure (2-3). Quel que soit le type de 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 [14]. Il peut être décrit à partir de l'étude d'une structure monophasée élémentaire identique à celle présentée ci-dessous

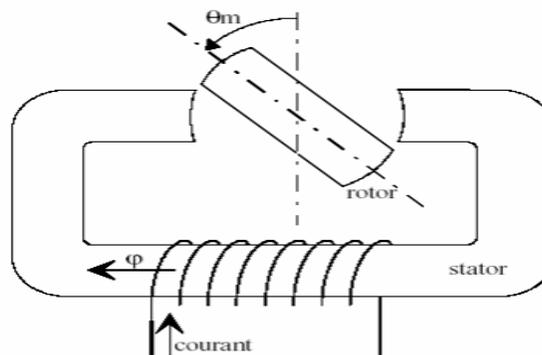


Figure (2-2) Machine à réluctance variable : structure élémentaire

Considérons le circuit magnétique de la figure (2-2), 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 [10]. 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 (2-3-a) [14].

Une position illustrée par la figure (2-3-b) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale appelée position de conjonction

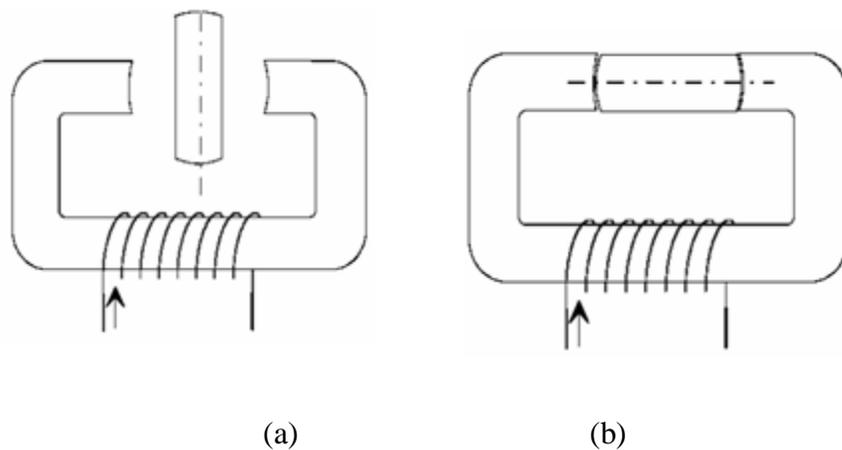


Figure (2.3) Position d'opposition (a) et position de conjonction (b)

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 [14].

En générale

$$\theta_e = 2\theta_m \quad (2.1)$$

$$\theta_e = Nr\theta_m \quad (2.2)$$

Le moteur à reluctance 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.

### 3- Différentes topologies des MRV

#### 3-1 MRV Pures

La MRV dite "pure" a une structure saillante au rotor et au stator avec un stator "actif" où sont situés les bobinages et un rotor "passif" (sans bobinage ni aimants) qui la distingue des machines synchrones et asynchrones. Une autre particularité est qu'elle n'est pas à champ tournant mais à champ « pulsé » [15].

On peut citer divers types de structures à réluctance pure

- Structures à double denture « simple » (« grosses dents ») et à 2 dents par phase.
- Structures à double denture « simple » (« grosses dents ») et à plus de 2 dents par phase.
- Structures à pôles statoriques dentés (« petites dents ») où un bobinage excite plusieurs dents à la fois : on parle de « bobinage global ».

Les différentes structures des MRV sont liées à leur utilisation dans des applications pas à pas. La différence entre les structures permet d'avoir des solutions au niveau de la résolution en position et le nombre de pas.



Figure (2-4) MRV pure à grosses dents

### 3-2 MRV Hybrides

Par rapport aux précédentes structures, la particularité des MRV hybrides réside dans l'intégration d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances. La figure (2-5) présente une MRV hybride. La présence d'aimants permanents permet d'augmenter le couple et réduire les ondulations du couple [15].

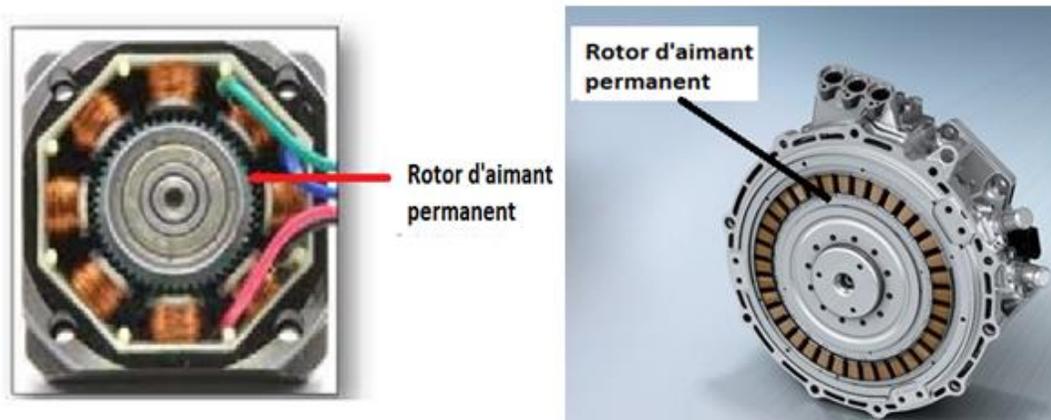


Figure (2-5) MRV hybride.

#### 4- 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 (2-6).

L'énergie électrique fournie au système est donné par :

$$w_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN\Phi}{dt} = \int N i d\Phi = \int FMM d\Phi \quad (2.3)$$

Où :

$e$  est 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.

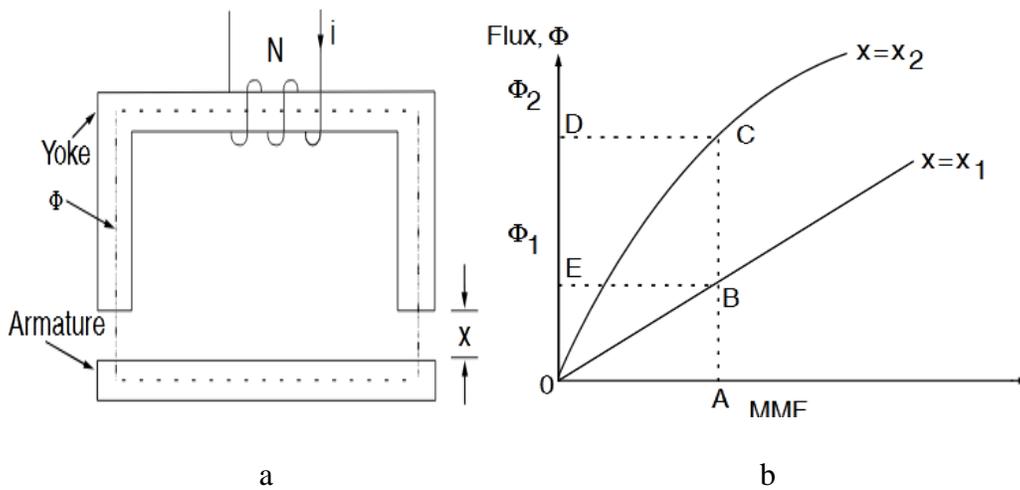


Figure (2-6) solénoïde (a), caractéristique flux-courant (b)

$$w_e = w_f + w_m \quad (2.4)$$

Si la partie mobile est fixe, l'énergie électrique égale dans ce cas l'énergie magnétique.

L'énergie magnétique est représentée par la surface OBEA (voir figure (2-6)).

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 :

$$\delta w_e = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} F_1 d\Phi = F_1(\Phi_2 - \Phi_1) = \text{surface (BCDEB)} \quad (2.5)$$

$$\delta w_f = \delta w_f|_{x=x_2} - \delta w_f|_{x=x_1} = \text{surface(OCDO)} - \text{surface(OBEO)} \quad (2.6)$$

Utilisant (2.2) à (2.4), l'incrément de l'énergie mécanique est donnée par :

$$\delta w_m = \delta w_e - \delta w_f = \text{surface (OBCO)} \quad (2.7)$$

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 :

$$\delta w_m = T_e \delta \theta \quad (2.8)$$

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

$$T_e = \frac{\delta w_m}{\delta \theta} \quad (2.9)$$

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

$$\delta w_m = \delta w'_f \quad (2.10)$$

Avec

$$w'_f = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int (N \Phi) di = \int \lambda(\theta, i) di \quad (2.11)$$

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 :

$$T_e = \frac{\delta w_m}{\delta \theta} = \frac{\delta w'_f}{\delta \theta} = \frac{\delta w'_f}{\delta \theta} \Big|_{i_{\text{constant}}} \quad (2.12)$$

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

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{i^2}{2} \quad (2.13)$$

Où

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \Big|_{i_{\text{constant}}} \quad (2.14)$$

A partir de l'expression du couple, on peut tirer les conclusions suivantes [16]. :

- 1- Le couple dépend du carré du courant, donc le signe de ce dernier n'a pas d'importance. L'alimentation par un courant unidirectionnel est possible.
- 2- 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.
- 3- Le changement de sens de rotation est possible en inversant les séquences des phases du stator.
- 4- L'inductance mutuelle entre phase est faible et par conséquent elle est généralement négligée.

### 5- Alimentation et commande [17].

La commande, l'alimentation et la machine étant considérées comme trois blocs distincts en cascade. Le convertisseur statique permet d'imposer à la machine des tensions à amplitude et fréquence variable. Il existe essentiellement deux sortes (types) de convertisseur statique permettant d'imposer des tensions ou des Courants variable en amplitude et en phase : Cyclo-convertisseur et les Onduleurs.

### 5-1 Circuit de puissance

Le moteur à réluctance variable se contente d'une alimentation unidirectionnelle pour chaque phase puisque le sens du courant n'a aucune importance pour les phénomènes de réluctance variable[17]. Ce courant, en forme de créneau, doit s'établir rapidement, être maintenu à peu près constant, puis décroître rapidement. Plusieurs solutions existent pour réaliser le circuit de puissance de l'alimentation du moteur. La complexité du convertisseur dépend bien sûr de nombre de phases de la machine, mais aussi des exigences sur les performances et la souplesse d'emploi du montage [17].

Plusieurs solutions existent pour réaliser le circuit de puissance. La plus importante et le convertisseur en demi-pont (Half Bridge Converter).

### 5-2 Convertisseur en demi-pont (Half Bridge Converter) [17].

Le montage en demi- pont et le plus utiliser pour la commande d'une MRV. Ce montage nécessite deux interrupteurs de puissance (transistor, IGPT) et deux diodes par phase. Ce montage pour une phase est montré sur la figure (2-7).

Pour faire croître le courant dans la phase A, il faut fermer l'interrupteur S1 et S2 dans ce cas les diodes D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> sont restées bloquer. Si le courant dépasse la valeur de commande (courant de référence), les deux interrupteurs S1 et S2 s'ouvrent et les diodes D<sub>1</sub> et D<sub>2</sub> deviennent passantes. Le courant de référence I<sub>p</sub> est imposé pendant la pente positive de l'inductance. Pour imposer ce courant on le compare avec le courant de phase puis l'erreur est fournie à un contrôleur à hystérésis avec fenêtre  $\Delta i$ .

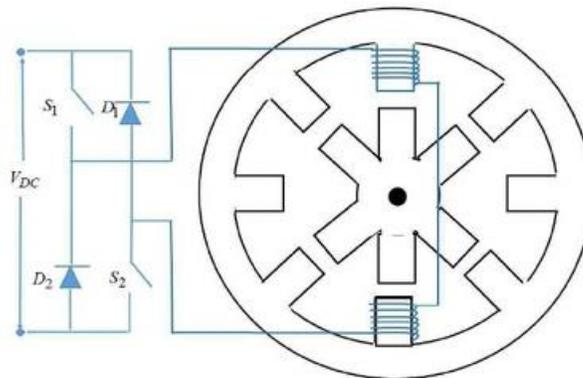


Figure (2-7) convertisseur demi -pont pour une phase de la MRV

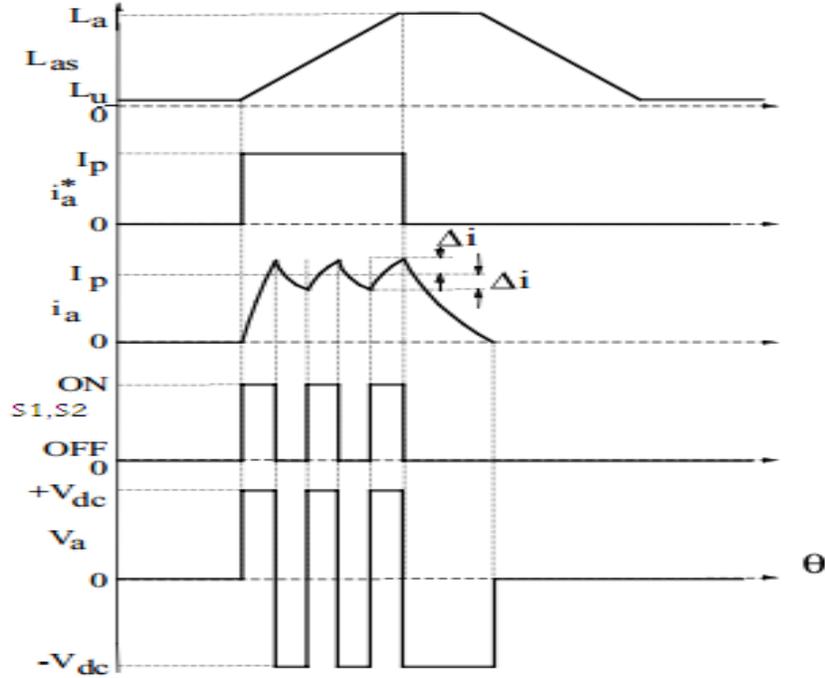


Figure (2-8) Inductance de phase, tension et courant pour un fonctionnement à faible vitesse avec contrôleur à hystérésis

Lorsque l’erreur de contrôleur est supérieure à  $\Delta i$  on ouvre les interrupteurs S1 et S2. Lorsque l’erreur de contrôleur est inférieure à  $\Delta i$  , on ferme les interrupteurs. Voir figure (2-8) [17].

La tension appliquée aux bornes d’une phase change en fonction de l’état des interrupteurs (figure (2-9))

$$S_1 \text{ et } S_2 \text{ ON } \quad D_1 \text{ et } D_2 \text{ OFF} \quad V_{dc} = Ri + \frac{d\lambda(\theta,i)}{dt} \quad (2.15)$$

$$S_1 \text{ et } S_2 \text{ OFF} \quad D_1 \text{ et } D_2 \text{ ON} \quad -V_{dc} = Ri + \frac{d\lambda(\theta,i)}{dt} \quad (2.16)$$

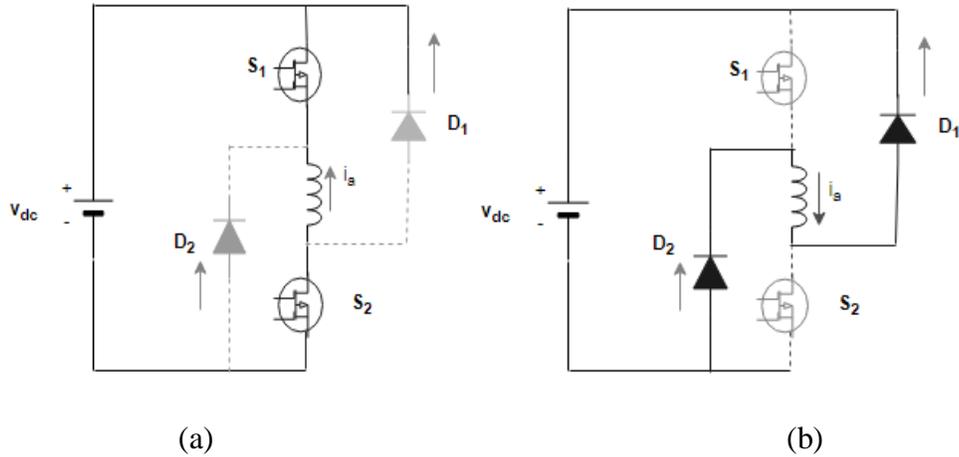


Figure (2-9) Etats des interrupteurs (a) (S1,S2) ON (D1, D2) OFF (b) (S1,S2) OFF (D1,D2) ON

### 5-3 Commande en vitesse

L'utilisation de la MRV dans des véhicules électriques nécessite une souplesse dans la variation de vitesse. Car les VE sont toujours soumis à des variations de vitesse [17].

L'avantage principal de la MRV réside dans sa commande qui relativement simple par rapport à une machine synchrone à aimants permanents.

Le schéma d'une commande en vitesse d'une MRV est montré sur la figure (2-10)

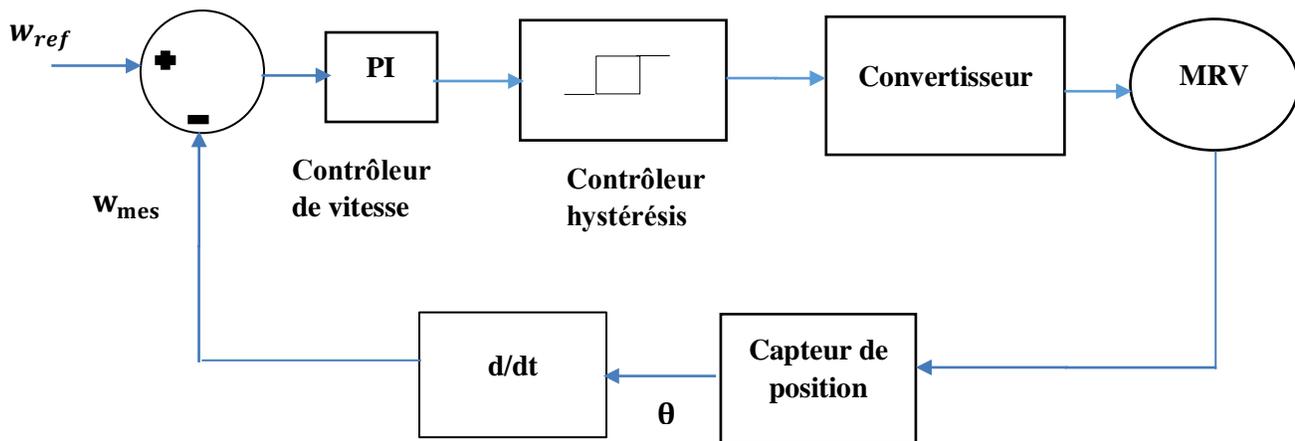


Figure (2-10) Schéma de commande de la vitesse variable d'une MRV

Le contrôleur de vitesse permet de minimiser l'erreur entre la vitesse de référence (la vitesse désirée) et la vitesse mesurée. Cela donne la valeur du courant de référence donnée par l'expression (2-17). Cette valeur de courant est imposée à l'aide d'un contrôleur à hystérésis.

$$i_{ref} = \kappa_p (w_{ref} - w_{mes}) + \kappa_i \int (w_{ref} - w_{mes}) dt \quad (2.17)$$

## 6- Modèle mathématique de la MRV et calcul de la force radiale

Le circuit équivalent de la MRV est composé d'une résistance et une inductance en série, voir figure (2.11). Les effets de saturation magnétique, flux de fuite et couplage entre phases ne sont pas considérée [11].

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

$$u = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.18)$$

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i) i \quad (2.19)$$

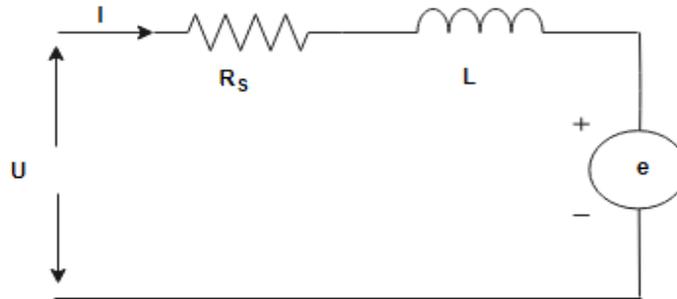


Figure (2-11) Circuit équivalent d'une phase de la MRV

$$u = R_s i + L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot w_r \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.20)$$

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

$w_r$  : La 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 en position  $L(\Theta)$ .

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{L_k(\theta,i)} \left[ V_{dc} - R_s i_k - i_k w_r \frac{dL_k(\theta,i)}{d\theta} \right] \quad k=1,2,\dots,m \quad (2.21)$$

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

$$\frac{dw_r}{d\theta} = \frac{1}{J} \left[ \sum_{k=1}^m \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k(\theta,i)}{d\theta} - \beta w_r - T_{charge} \right] \quad (2.23)$$

Où :

J : l'inertie de machine

$\beta$  : le coefficient de frottement

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

La force radiale qui s'exerce sur la dent de la phase « a » est donnée par cette équation.

$$F_{ra} = \frac{1}{2} I_a^2 \frac{dL_a(\theta,I_a)}{L_g} \quad (2.24)$$

Où

$L_a$  : l'inductance de la phase a

$L_g$  : épaisseur de l'entrefer.

La force totale qui s'exerce sur la structure du stator est donnée par l'équation

$$F_{rt} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} I_i^2 \frac{dL_i(\theta,I_i)}{L_g} \quad (2.25)$$

## 7- Avantages et inconvénients des MRV

### Avantages

- Structure électromagnétique simple
- Robustesse
- Bonne tenue mécanique ce qui permet à la machine de tourner à des vitesses élevées.
- Possibilité de fonctionner dans des environnements sévères

- Tolérance aux défauts
- Pas de bobinage ni aimant sur le rotor, donc faible coût de fabrication [18].

### Inconvénients

- Ondulations de couple importantes à haute vitesse
- Vibrations du circuit magnétique et bruit acoustique [18].

Le problème de vibration et bruit dans les MRV influe sur leur utilisation dans des applications où le confort acoustique est exigé. C'est le cas pour les véhicules électriques. Donc dans le reste de ce mémoire est consacré à l'étude de ce phénomène.

### 8- Génération de vibrations et de bruit dans le MRV intégré dans VE

Les véhicules électriques (VE) se sont développés très rapidement ces dernières années en raison de la nécessité de réduire la consommation d'énergie et les émissions polluantes des véhicules conventionnels. Des efforts considérables ont été faits dans la recherche et le développement de batteries, de moteurs électriques et d'électronique de puissance. La MRV avec ses avantages est l'un des moteurs qui donne beaucoup de satisfactions lorsqu'il est utilisé dans la propulsion des VE. Le problème de vibrations et bruit dans ces moteurs reste un inconvénient major. L'objectif de cette partie est de comprendre l'origine de ces phénomènes [19].

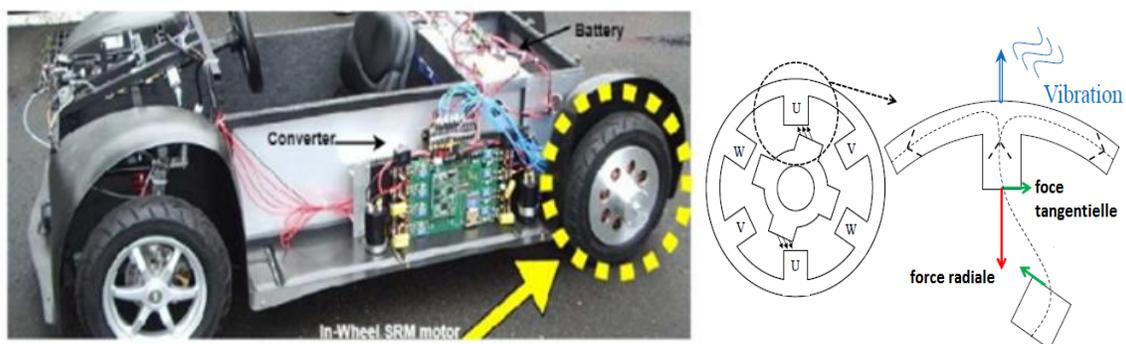


Figure (2-12) MRV, forces et vibrations

Une fois la phase est alimentée (interrupteurs ouverts, figure (2-9)), un flux magnétique circule dans le circuit magnétique. Ce flux donne naissance à une force d'attraction entre les dents du stator et du rotor. Cette force est décomposée en deux

composantes : une composante tangentielle qui crée le couple, l'autre est une composante radiale, inutile et de plus elle est considérée comme la principale source de vibrations et de bruit dans le MRV (voir Figure (2.12)). Cette force est généralement dix fois supérieure à la force tangentielle. Cette force provoque des déplacements de la structure dans le sens radial. Ce phénomène peut être aggravé si une ou plusieurs fréquences de cette force coïncident avec une fréquence propre de la structure [19].

L'expérience réalisée par Lin [3] montre clairement que des vibrations significatives peuvent être générées si une impulsion de la tension est appliquée lorsque le pôle du rotor chevauche avec celui du stator. Cela peut être expliqué en partant de la loi de tension de Kirchhoff appliquée au circuit équivalent MRV de montré sur la figure (2-11).

$$u = R_S i + e = R_S i + \frac{d\lambda}{dt} = R_S i + L \frac{dy}{dx} \left( \frac{di}{dt} \right) + i \left( \frac{dx}{dt} \right) \quad (2.26)$$

Au moment de la commutation entre deux phases consécutives, une variation soudaine de tension à partir de la valeur positive (+v) à une valeur négative (-v) est produite, conduisant à des vibrations considérables (voir figure (2-14)). Analytiquement, cela peut être illustré en dérivant l'équation (2-26). Le terme d'accélération est apparu.

$$\frac{du}{dt} = R_S \left( \frac{di}{dt} \right) + 2 \left( \frac{dL}{dx} \right) \frac{dx}{dt} + L \left( \frac{d^2t}{dt^2} \right) i \left( \frac{dL}{dx} \right) \left( \frac{d^2x}{dt^2} \right) \quad (2.27)$$

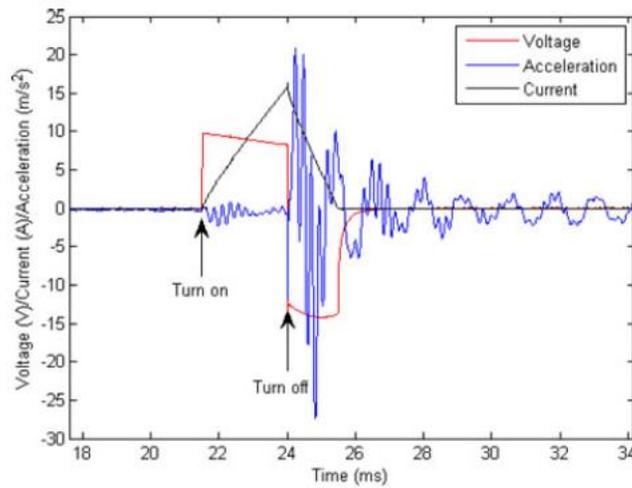


Figure (2-13) Courant et accélération lors d'une variation brutale de tension

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons abordé l'utilisation des moteurs à reluctance variable dans les véhicules électriques. Au début nous avons étudié la composition d'un MRV, son principe de fonctionnement ainsi que son alimentation et commande. La deuxième partie du chapitre est consacré à l'analyse des phénomènes de vibrations et bruit dans les MRV. Nous avons démontré que le phénomène vibroacoustique est dû à la variation brusque de la tension d'alimentation au moment de la commutation d'une valeur positive à une valeur négative.

# *Chapitre 3*

*Réduction des vibrations dans les MRV par la technique de roue libre étendue*

## INTRODUCTION

Les MRV sont devenus des moteurs très compétitifs dans le domaine de l'attraction des véhicules électriques. Cependant les vibrations et le bruit qu'elles émettent présente un inconvénient major. Ces vibrations sont dues à la force radiale qui excite la structure de stator. La variation de cette force lors d'une commutation entre phases provoque des vibrations importantes. Après présentation des formulations de calcul des vibrations et bruit, la deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la description des méthodes de réduction de vibration et bruit dans les MRV. La dernière partie est réservée à la mise en œuvre de deux méthodes de réduction. Cette mise en œuvre nécessite une implémentation dans MATLAB-SIMULINK du modèle dynamique de la machine.

### 1- Prédiction des vibrations et du bruit dans les moteurs électriques

#### 1-1 Prédiction de vibrations

L'amplitude du bruit acoustique quelles que soient les conditions de fonctionnement dépend du déplacement circonférentiel dû à la force radiale (N / m). La force radiale est exprimée par unité de surface. Cette force qui a été calculée dans le chapitre 2 (équation (2-24)) est décomposée en séries de Fourier. Chaque composante de force peut être mise sous la forme ci-dessous [19].

$$F_r(\theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} F_n \cos(n\theta - 2\pi f_{exc} t - \varphi_r) \quad (3-1)$$

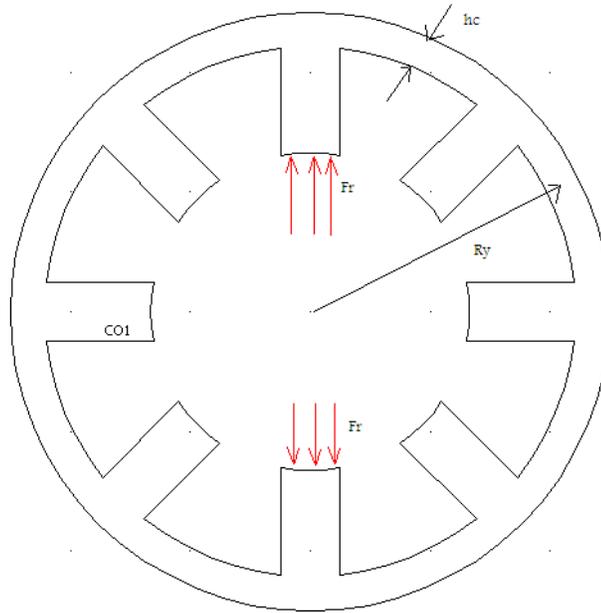
Où :

$F_n$  : Amplitude de la force

$n$  : Numéro du mode de vibration

$f_{exc}$  : Fréquence du mode vibration

Lorsque la culasse du stator est modélisée sous forme d'un cylindre mince (voir figure (3-1)), l'expression analytique du déplacement pour le mode  $n$  avec  $n > 2$  est donnée comme suit :



Figure(3-1) Modélisation de la machine par un cylindre mince pour le calcul des vibrations

$$D_{circum}(f_{exc}) = \frac{\frac{12F_n(f_{exc})(R_{y(av)})}{m^4 E} \left(\frac{R_{y(av)}}{h_c}\right)^3}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f_{exc}}{f_m}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)(f_{exc}/f_m)^2}} \quad (3-2)$$

$D_{circum}$ : Amplitude du déplacement dynamique,

$F_n$ : amplitude de la force radiale,

$f_m$ : fréquence propre du mode m,

$h_c$ : épaisseur de la culasse,

$\delta$ : L'amortissement mécanique

$R_{y(av)}$ : Rayon moyen de l'entrefer.

La détermination des fréquences propres (m) de la structure du stator est donc nécessaire. Pour cette raison, la MRV est modélisée dans notre travail par le logiciel éléments finis COMSOL. Donc les fréquences propres sont calculées numériquement. Les résultats de cette simulation sont montrés sur la figure (3-2) où la déformation due

aux modes 2 et 3 ainsi que les valeurs des fréquences propres sont présentés. Les modes les plus importants de point de vue vibrations et bruit sont les modes faibles[19].

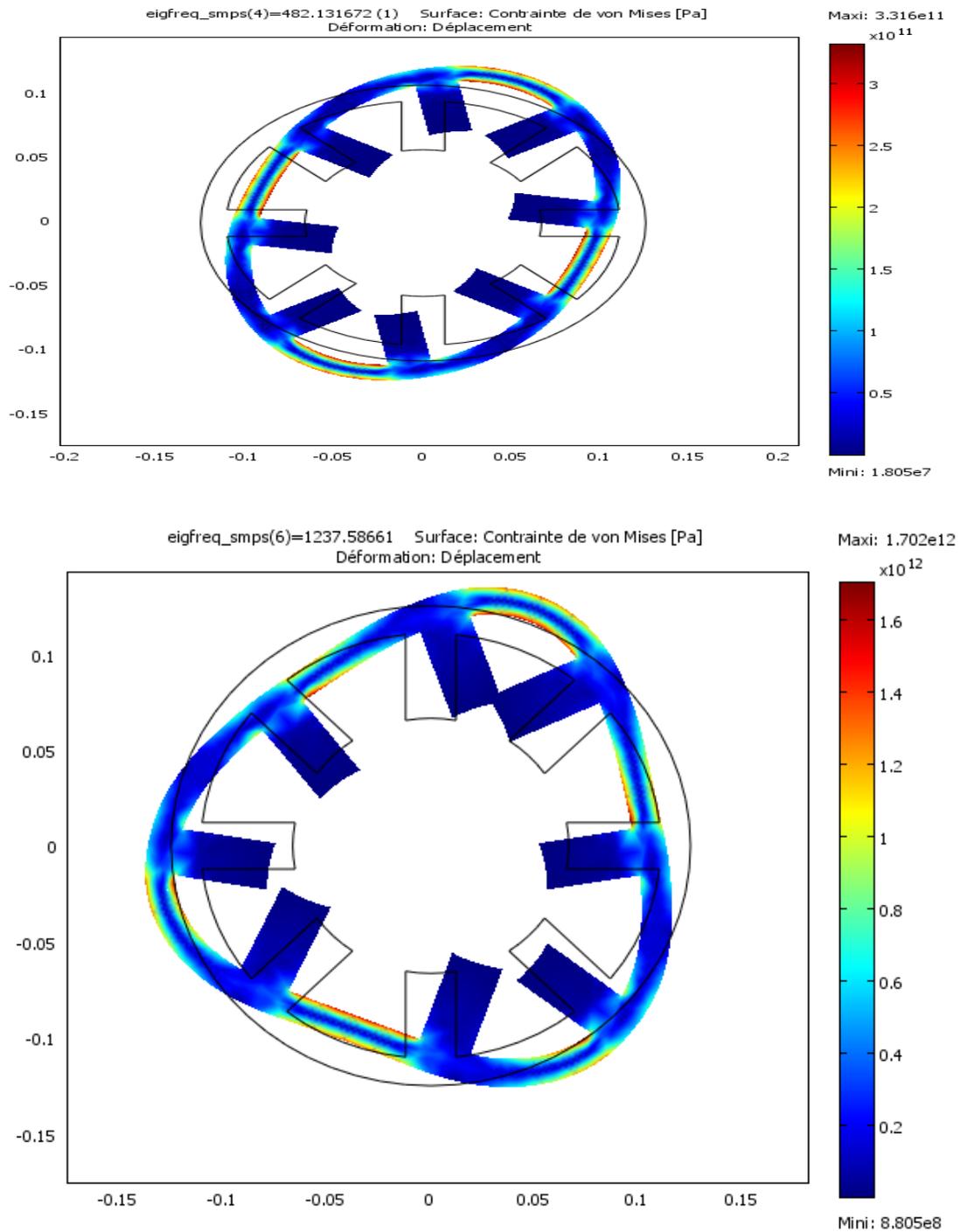


Figure (3-2) Déformation de la structure du rotor selon le mode 2 et 3

Dans la MRV, l'alimentation des phases est complémentaire, c'est-à-dire qu'à chaque instant seulement une phase est alimentée. Donc de point de vue vibration, c'est uniquement le mode 2 qui excite la structure [19].

## 1-2 Prédiction du bruit

La puissance acoustique rayonnée autour de la machine est calculée à partir des expressions de la pression acoustique et de la vitesse de vibration de la surface externe de la machine. La puissance acoustique peut s'écrire comme suit :

$$\mathcal{W} = \int_{s_a} \frac{1}{2} \text{Re}\{v *_{n} P_n\} ad\phi dz \quad (3-3)$$

(13) où  $p$  est la pression acoustique,  $v$  est la vitesse de la surface du stator et  $s$  toute surface entourant la machine. Cette puissance peut être simplifiée comme suit :

$$\mathcal{W} = 8p\pi^3 f_{exc}^2 abD^2_{circum} \sigma_r \quad (3-4)$$

Où  $a$  est le rayon du stator,  $b$  la longueur axiale du stator,  $e$  l'intensité de la puissance acoustique,  $c$  la vitesse du son et  $o$ , est l'efficacité de la puissance acoustique donné par  $J_1$  et  $Y_2$ , sont respectivement les fonctions de Bessel des premier et second types Cette intégrale est calculée numériquement, ce qui permet de mettre en évidence l'effet de la forme du mode et des dimensions géométriques sur leur rayonnement acoustique [19].

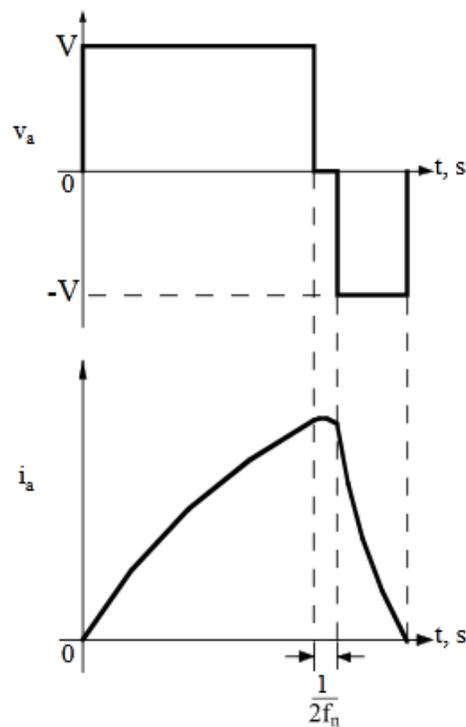
$$\sigma_r = \left(\frac{4kab}{\pi}\right) \int_0^k \left\{ \frac{1}{\left(\frac{(ka)^2 \{1 - (x/k)^2\}}{\left(J_1^2\left[(ka)\sqrt{1 - \left(\frac{x}{k}\right)^2}\right]}\right)}\right)} + Y_2^2 \left[ (ka)\sqrt{1 - \left(\frac{x}{k}\right)^2} \right] \right\} \left(\sin\left(\frac{bx^2}{bx}\right)\right) dx \quad (3-5)$$

### 1-2-a Techniques de réduction de vibration et bruit

La relation entre le bruit acoustique dû aux vibrations du stator et la commutation d'une tension positive à une négative a été démontrée. Une variation brusque du courant est produite à cause de l'inversion de polarité de tension à travers l'enroulement de la machine. Ceci induit une vibration de grande amplitude à la première fréquence de mode de la MRV. La partie suivante présente quelques techniques de commutation pour réduire les vibrations et le bruit résultant [16].

### 1-2-b Méthode de commutation en deux étapes

Dans cette méthode, au moment de la commutation la tension DC passe de sa valeur positive à zéro et reste ainsi pour une période qui correspond à la moitié de cycle de résonance ( $1/2f_m$ ), avec  $f_m$  la fréquence naturelle du mode dominant (voir figure (3-3)). Après cette phase de roue libre la tension est passée à sa valeur négative. La tension reste négative jusqu'à ce que le courant devient nul [13]. Cette dernière étape produit une vibration déphasée de  $180^\circ$  par rapport à celle due à la première étape et l'annule ainsi. Pour appliquer cette méthode, le convertisseur relié à la MRV doit être capable d'appliquer des tensions positives, nulle et négative aux phases de la machine. Notez que les topologies de convertisseur asymétrique et de commutateur ( $q + 1$ ) pourraient répondre à cette exigence.



Figure(3-3) Principe de la méthode de commutation en deux étapes

### 1-2-c Méthode de lissage de tension

Dans cette méthode, la tension appliquée est progressivement réduite en diminuant le rapport cyclique avant d'appliquer constamment la tension continue négative

à travers la phase de la machine enroulement. Le temps nécessaire pour changer le rapport cyclique de 1 à 0 peut être l'origine de nombreux cycles de fréquence de résonance. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle peut prendre un temps considérable et peut influencer sur la production d'un couple maximal ainsi que sur la commande. La méthode est illustrée sur la figure (3-4). Cette méthode nécessite des convertisseurs avec des capacités d'appliquer des tensions positives et négatives telles que C-dump... etc.

Notez que le taux de variation du courant au début de la commutation est très faible en raison de la réduction du cycle puis devient plus grand lorsquela tension appliquée est négative. Cette méthode permet de réduire le bruit acoustique mais pas en même quantité que la méthode de commutation en deux étapes [16].

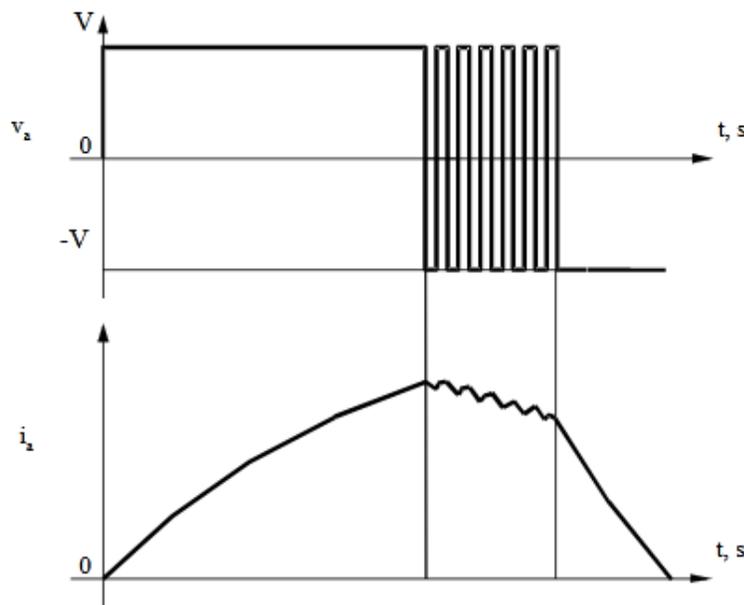


Figure (3-4) Principe de la méthode de lissage de tension

#### 1-2-d Méthode de commutation en trois étapes

Cette méthode comporte trois étapes. Dans la première étape, au début de la commutation, une tension négative est appliquée pour produire une première vibration avec une accélération négative. Après un certain temps, la tension appliquée à la phase de

la machine devient positive ce qui produit une vibration en opposition à la première. Après un certain temps, la tension est à nouveau inversée à une valeur négative et maintenue jusqu'à ce que le courant devienne zéro (voir figure 3-5). Cette méthode aussi nécessite des convertisseurs pouvant appliquer des tensions positives et négatives. Cette méthode est meilleure que la méthode de lissage de tension. Le temps requis pour l'étape 1 et 2 est par essai et erreur [16].

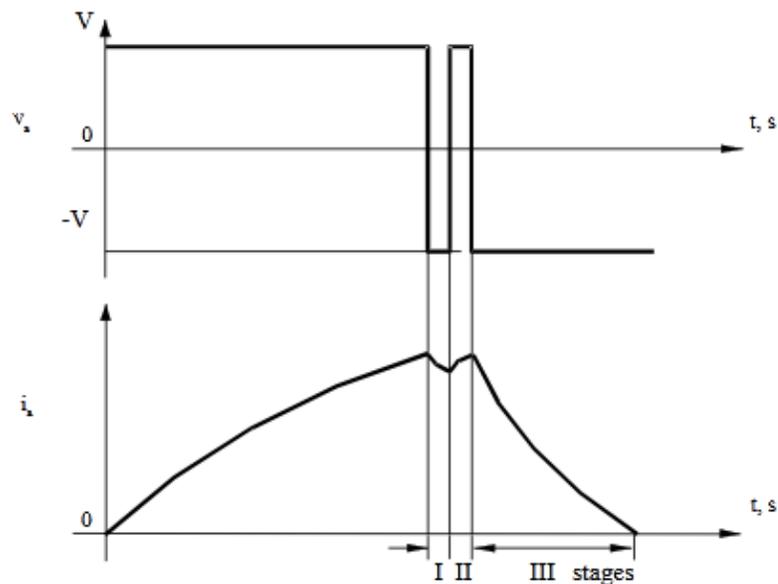


Figure (3-5) Principe de la méthode de commutation en trois étapes

### 1-2-e Méthode de roue libre étendue

Cette méthode est similaire à celle de commutation en deux étapes. La différence est dans la durée de la période de roue libre. Cette durée égale à la moitié du cycle de résonance pour la méthode de commutation en deux étapes. Cela nécessite un calcul mécanique supplémentaire pour la connaissance des fréquences propres de la structure. Ce calcul est généralement effectué à l'aide des logiciels éléments finis [16]. Pour éviter ce calcul, Cette période de roue libre est autorisée pendant une période de temps prolongée.

Après un temps considérable ou un fonctionnement à tension nulle, une tension négative est appliquée à la phase de la machine pour jusqu'à ce que le courant devienne nul. Cette méthode contribue à la réduction des vibrations mais pas autant que la méthode de commutation en deux étapes. Le principe de cette méthode est illustré sur la figure (3-6).

Notez que la mise en œuvre de cette algorithmme nécessite un convertisseur avec capacité d'appliquer une tension positive, nulle et négative.

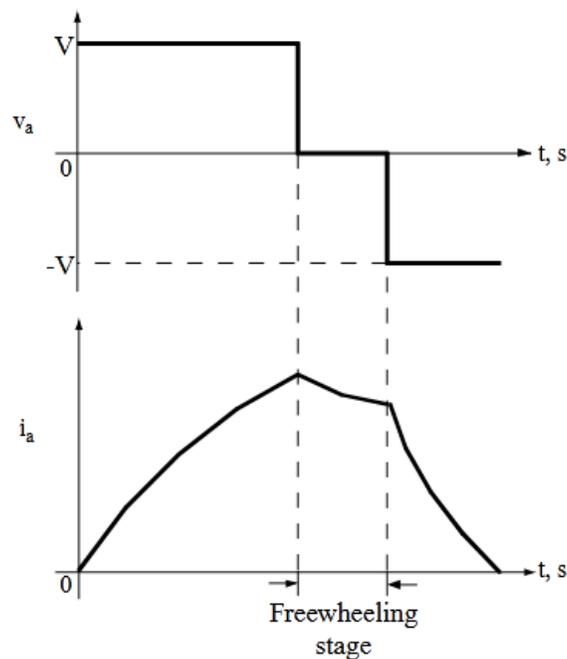


Figure (3-6) Principe de la méthode de roue libre étendue

### 3- Simulation du fonctionnement de la MRV pour la réduction des vibrations et bruit

L'objectif de cette partie est la mise œuvre informatique du modèle dynamique de la MRV afin de tester l'efficacité des méthodes de réduction des vibrations et bruit.

Le modèle développé est décomposé en deux parties. La première permet le calcul de la force radiale qui agit sur une dent statorique. La deuxième partie calcule les vibrations qui sont dues à cette force.

Le modèle dynamique développé dans Matlab-Simulink est montré sur la figure (3-7)

Le modèle permet le calcul de la force radiale qui s'exerce sur chaque dent du stator. Cette force est décomposée en série de Fourier pour permettre ensuite le calcul des vibrations de la structure du stator.

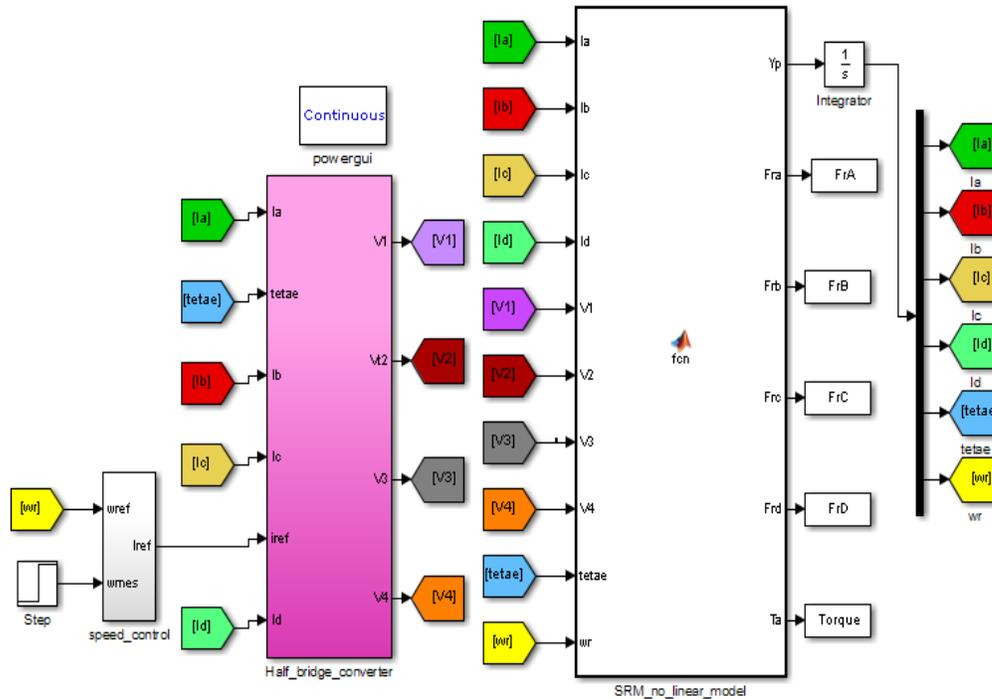


Figure (3-7) Modèle dynamique de la MRV développé dans Matlab-Simulink

#### 4- Résultats de simulation

Le modèle dynamique est appliquée à une MRV 8/6 associée à un convertisseur en demi-pont. Les caractéristiques physiques et géométriques de la machine sont présentées dans l'annexe 1.

##### 4-1 Résultat de simulation sans méthodes de réduction

Les résultats de simulation sans intervention des techniques de réduction sont montrés sur les figures suivantes :

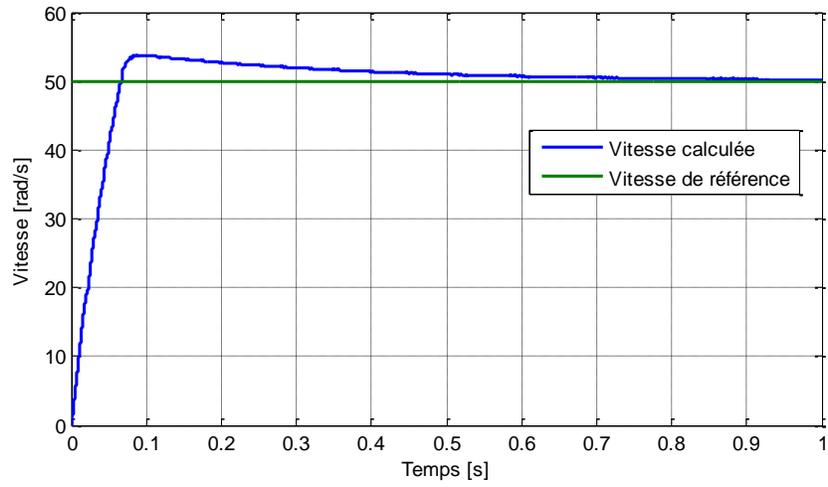


Figure (3-8) Vitesse de rotation du moteur

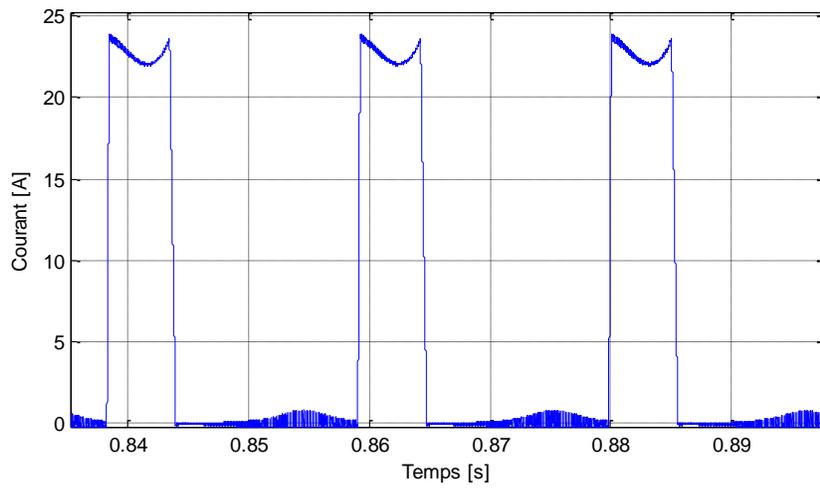


Figure (3-9) Courant de phase sans méthode de réduction

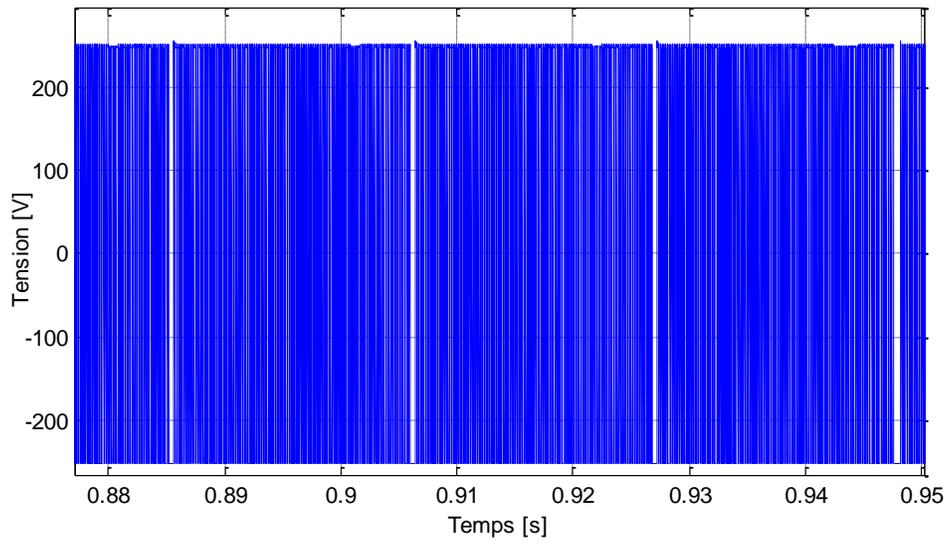


Figure (3-10) Tension de phase sans méthode de réduction

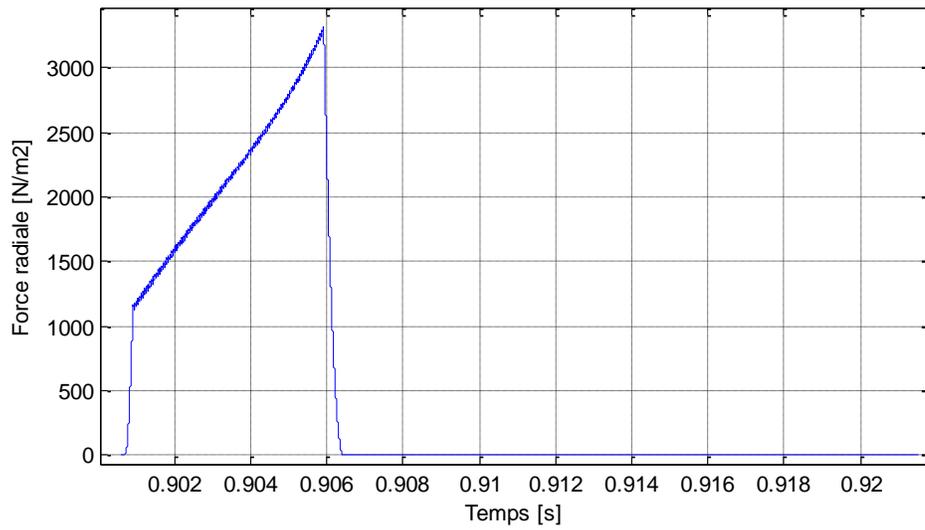


Figure (3-11) Force radiale qui agissent sur une dent sans méthode de réduction

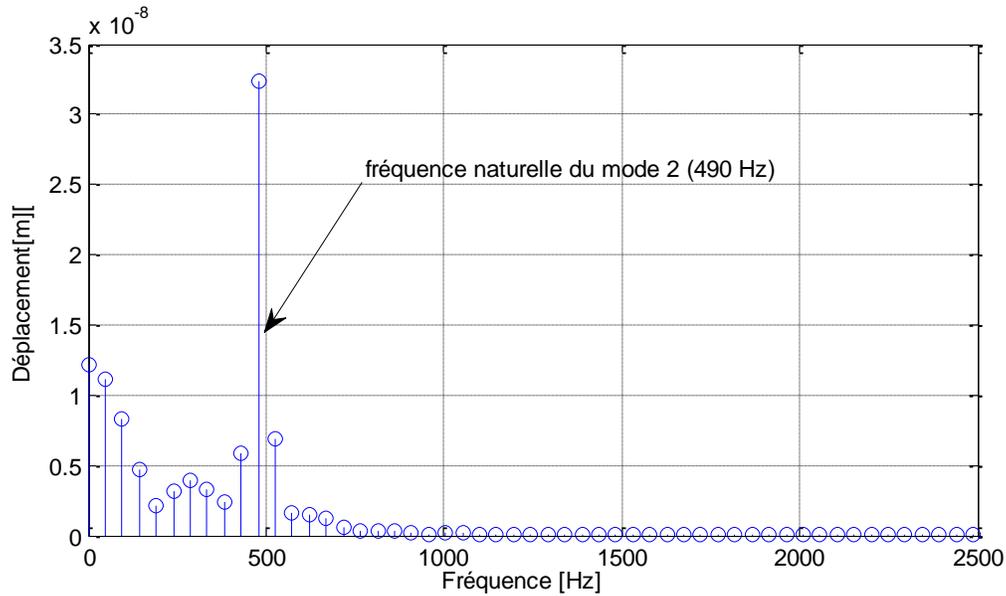


Figure (3-12) Spectre vibratoire de la carcasse rotorique sans méthode de réduction

A partir de ces figures, on peut conclure :

- Le moteur suit correctement la vitesse de consigne ce qui prouve l'efficacité du contrôleur de vitesse.
- La variation brusque de la tension de phase d'une valeur positive à une valeur négative au moment de la commutation entre phase provoque un phénomène de résonance au niveau spectre vibratoire.
- La cause de résonance est la composante de force située à 480 Hz qui est très proche de la fréquence propre du mode naturel 2 située à 490 Hz.

#### 4-2 Résultats de simulation avec la méthode réduction

Pour la réduction des vibrations nous avons appliqué deux méthodes de réduction. L'objectif est la comparaison des deux méthodes concernant la capacité de réduction et la facilité de l'implémentation. Les deux méthodes concernées sont :

- La méthode de commutation en deux étapes
- La méthode de roue libre étendue

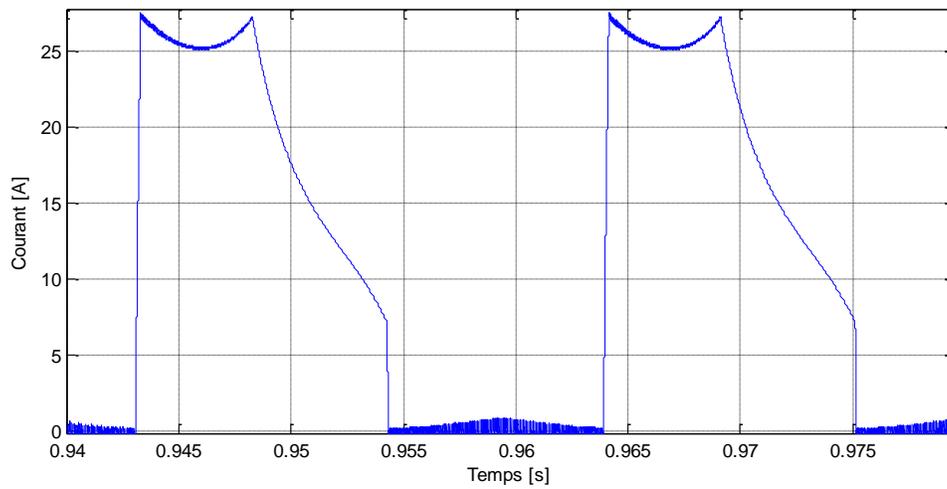


Figure (3-13) Courant de phase pour la méthode de roue libre étendue

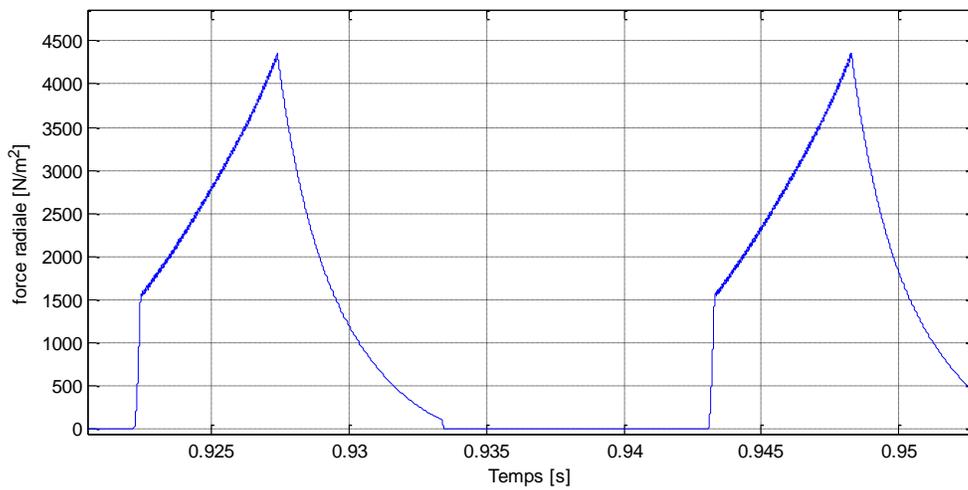


Figure (3-14) Force radiale sur une dent du stator pour la méthode de roue libre étendue

Densité de force [N/m<sup>2</sup>]

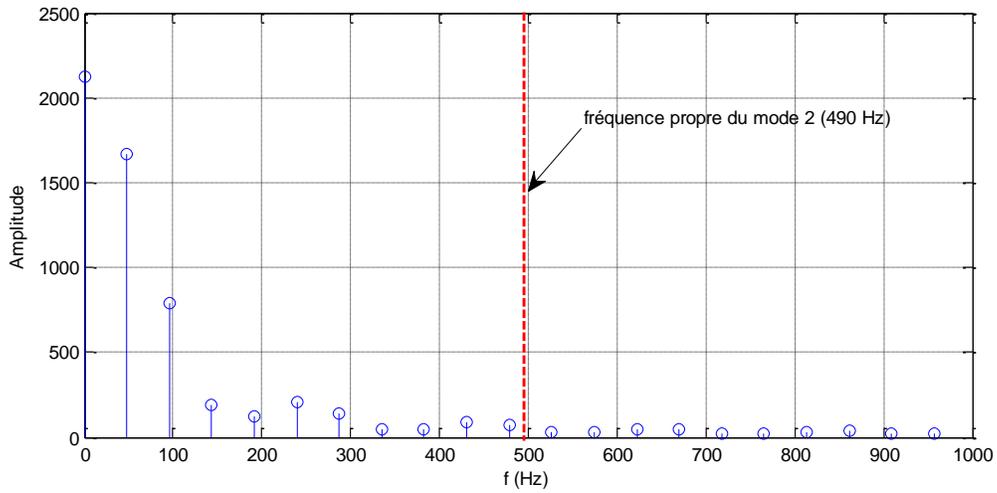


Figure (3-15) FFT de la force radiale

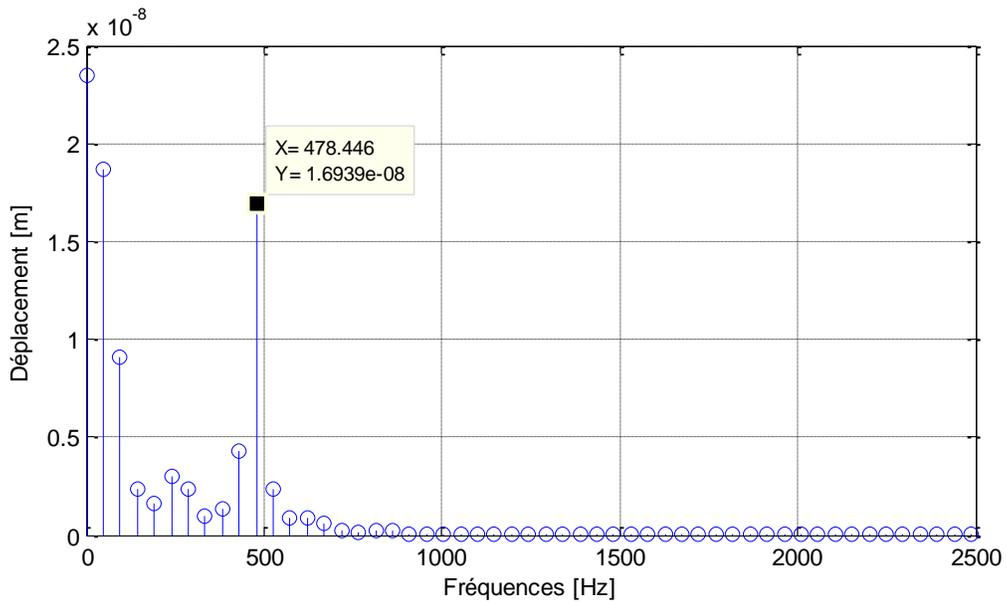


Figure (3-16) spectre vibratoire en utilisant la méthode de roue libre étendue

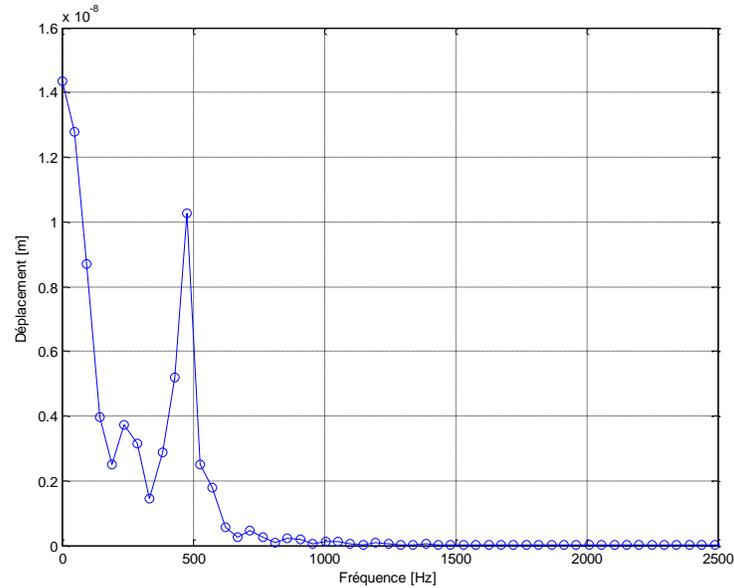


Figure (3-17) spectre vibratoire en utilisant la méthode de commutation en deux étapes

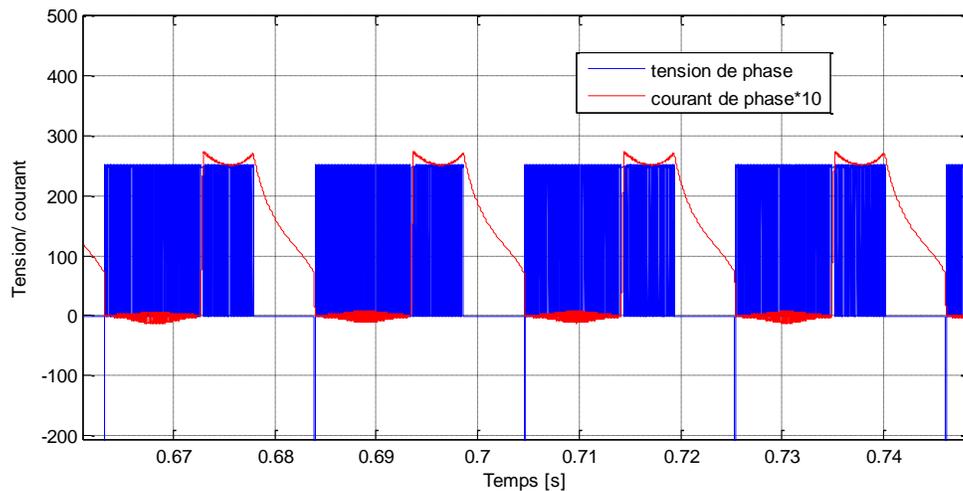


Figure (3-18) Courant et tension de phase pour la méthode de roue libre étendue

A partir de ces résultats, on peut conclure :

- La méthode de roue libre étendue (freewheeling method) permet de réduire considérablement le niveau vibratoire de la machine.
- Cette réduction est due à la diminution de taux de variation de la tension et du courant au moment de la commutation en passant par une période de roue libre étendue (tension nulle).

- La méthode de commutation en deux étapes donne des résultats meilleurs par rapport à la méthode de commutation en deux étapes particulièrement lorsque la période de roue libre est égale à la moitié de la fréquence de résonnance.
- La méthode de commutation en deux étapes nécessite la connaissance des fréquences propres de la structure ce qui conduit à une modélisation mécanique de structure.
- Le calcul exact des fréquences propres nécessite une modélisation éléments finis par des logiciels performants.
- L'avantage de la méthode de roue libre étendue c'est qu'elle ne nécessite pas la connaissance des fréquences propres de la structure.

### CONCLUSION

Ce chapitre est consacré aux phénomènes de vibrations et bruit dans les machines synchrones à reluctance variable. Nous avons présenté le calcul des vibrations et bruit par une approche analytique.

Ensuite nous abordé les différentes techniques utilisés pour la réduction des vibrations et bruit dans les MRV.

Le modèle dynamique de la MRV est implémenté dans Matlab-Simulink ce qui permet de déterminer la variation temporelle de la force qui s'exerce sur chaque dent du stator. Cela permet d'accéder au calcul des vibrations.

Les résultats de simulation montrent l'avantage de la méthode de réduction basée sur une période de roue libre étendue.

***CONCLUSION***  
***GENERALE***

## CONCLUSION GENERALE

Les MRV sont utilisés dans le système de propulsion des véhicules électriques. La tendance actuelle vers l'utilisation des VE est justifiée par la nécessité de réduire l'émission de CO<sub>2</sub> par les véhicules conventionnels.

Ce travail est une contribution dans l'étude et l'analyse des phénomènes vibratoires et acoustiques dans les machines synchrones à reluctance variable (MRV). L'objectif est la réduction de ses phénomènes gênantes afin d'améliorer le confort au bord des VE.

Après une présentation de la structure d'un VE ainsi que ses composants, nous avons focalisé sur l'importance du moteur électrique.

Ensuite une partie est réservée à la description des MRV ainsi que le mécanisme de génération de vibrations et bruit dans ces machines.

Nous avons montré que les vibrations et par conséquent le bruit sont dues à variation brusque de la tension au moment de la commutation d'une valeur positive à une valeur négative.

Pour la réduction de vibration et bruit dans les MRV, nous avons implémenté la technique basée sur une période de roue libre étendue. Cette méthode consiste à créer une période de roue libre étendue (tension nulle). Cela permet une variation assez lente de la tension, le courant et la force au moment de la commutation.

L'implémentation du modèle dynamique de la MRV ainsi que le modèle mécanique pour le calcul de vibrations montre l'efficacité de la méthode de réduction proposée.

L'avantage de la méthode de roue libre étendue est qu'elle ne nécessite pas une connaissance des fréquences propres de la structure contrairement à la méthode de commutation en deux étapes. Cela permet d'éviter un calcul lourd par des logiciels pour la détermination des fréquences propres.

En perspective, nous espérons au futur tester d'autres méthodes de réduction des vibrations et bruit et aussi la modélisation de l'ensemble moteur électrique-VE.

***REFERENCES***  
***Bibliographiques***

## **Bibliographie**

- [1] M.N. Anwar, I. Husain, Radial force calculation and acoustic noise prediction in switched reluctance machine, IEEE. Trans. Ind. Appl.36 (2000) 1589–1597.
- [2] V.J. Azevedo, S. Sartori, M.S. Campos, Co2 emissions: A quantitative analysis among the BRICS nations, Renew. Sustain. EnergyRev. 18 (2018) 107–115.
- [3] J. Bayless, N. Korihara, H. Sogimoto, Acoustic noise reduction of switched reluctance motor with reduced RMS current efficiency,IEEE. Trans. Energy Convers. 33 (2016) 627–636
- [4] BOUCHA ABDELLAH , commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué , mémoire de magister , Université d'Oran Mohamed Boudiaf, www.aveq.ca
- [5] Mr BOUACIDA Abdelatif , VOITURE ELECTRIQUE, mémoire de MASTER, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2018
- [6] SENHADJI Nawel CHALABI AmmariaSoutenu,commande dumoteur synchrone a aimants permanents par backstepping, mémoire de MASTER , Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen, 2015
- [7] boudjtat walid. Kelaiaia m Shimoura Abedelk ader , Simulation d'une machine Asynchrone Alimente par un onduleur de tension a Commande MLI, mémoire de MASTER université badji Mokhtar Annaba , juin 2017
- [8] Etienne Gaucheron "Cahier technique n°207"" Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger" livre CT 207 édition juin 2004
- [9] Control Actif des Vibrations dans les machines à réluctance variable Banque commune Ecole polytechnique - ENS de Cachan psi session 2010 www.Doc-Solus.fr.
- [10] Article ,Traction Motors and Speed Estimation Techniques for Sensorless Control of Electric Vehicles: A Review,Saqib Rind,Yaxing Ren Department of Electrical & Electronic Engineering University of Liverpool, L69 3BX, England  
Saqib.Rind@liverpool.ac.uk, Y.Ren3@liverpool.ac.uk  
Lin Jiang Department of Electrical & Electronic Engineering University of Liverpool, L69 3BX, England L.Jiang@liverpool.ac.uk978-1-4799-6557-1/14/\$31.00 ©2014 IEEE.
- [11] BOUDENDOUNA wafa ,réduction des vibrations et bruit dans les machines à reluctance variable ,mémoire de MASTER , Université jijel 2017
- [12] Noureddine Assas" MODELISATION ET CONTROLE DU COUPLE D'UNE MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE.",UNIVERSITE DE BATNA13 / 01 /2009

- [13] Savane Kissima M Mohamed Mokhtar Ould Amar, Etude d'une Machine à Réductance variable supraconductrice, université Jilali Bounaama KHEMIS-MILIANA, 2018
- [14] R. Krishnan, Switched reluctance motor drives modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, CRC Press, USA, 2001
- [15] Cours de la matière : machines spéciales 2<sup>em</sup> année Master Electrotechnique, option : Machines Electrique
- [16] Chouaib Labiod, Contribution à la modélisation dynamique à base d'éléments finis, au contrôle et à l'optimisation des machines à réductance variable' mémoire Doctora Université Mohamed Khider – Biskra, 2018
- [17] Ali Rezig Ali Rezig,\*, Wafa Boudendounaa, Abdesslem Djerdarb, Abdoul N'Diaye " Investigation of optimal control for vibration and noise reduction in wheel switched reluctance motor used in electric vehicle " L2EI Laboratory, Jijel University, BP 98, Jijel L2EI Laboratory, Jijel University, BP 98, Jijel, AlgeriabFEMTO-ST Laboratory and FCLAB FR-CNRS 3539, University of Technology Belfort-Montbéliard (UTBM) Belfort, France Received 31 January 2019; received in revised form 10 May 2019; accepted 29 May 2019 Available online 10 June 2019

**Tableau A1 : les paramètres géométriques de la machine [Rafajdos-14]:**

Intitulé	Notation	Dimensions
Rayon extérieur du stator	$R_s$	125 mm
Longueur	L	300 mm
Rayon du rotor	$R_r$	66.25 mm
Entrefer	e	0.2 mm
Arc polaire du stator	$B_s$	21°
Arc polaire du rotor	$B_r$	23°
Largeur de pôle statorique	$b_s$	21.82 mm
Largeur de pôle rotorique	$b_r$	23.08 mm
Hauteur de pôle statorique	$h_s$	44.72 mm
Hauteur de pôle rotorique	$h_r$	10.9 mm
Rayon de l'arbre	$R_a$	40 mm
Nombre de spire par phase	$N_s$	20
Acier	M19	M19