

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



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de la technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention de diplôme

**Master**

En

Génie électrique

Option :

Electrotechnique

*Thème :*

*Étude et dimensionnement d'un moteur synchrone à aimant permanent à rotor intérieur  
pour application : véhicule*

Réalisé par :

Mr. BISKRI Zakaria

Mr. ITATAHINE Abdesslam

Encadré par :

Dr. BENALLAL Mohamed Nadjib

Année Universitaire 2014/2015

## Remerciement

---

*Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes. Nous souhaitons ici les en remercier.*

*Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement monsieur (DR. Ben Allal Mohamed NaDjib) qui nous a permis de bénéficier de son encadrement. Les conseils qu'il nous a prodigués, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.*

*Nos remerciements s'étendent également à tous Nos enseignants durant les années des études.*

*Nous adressons aussi nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

*Merci à tous et à toutes.*

## *Dédicace*

---

### *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à toute ma famille, mon père , ma mère, mes frères et ceul soeurs.*

*Je le dédie particulièrement à ma grand-mère,*

*Je le dédie aussi à tous mes oncles et tantes, cousins et cousines*

*Je ne saurai terminer sans citer mes amis*

*Enfin je le dédie à tous mes amis que je n'ai pas cités et à tous ceux qui me connaissent, Qu'ils trouvent à travers ce travail ma sincère reconnaissance.*

**BISKRI ZAKARIA**

## Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à celle qui m'a donné le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère ...*

*A mon père (RAHIMAHO ELLAH), école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.*

*Que dieu les garde et les protège.*

*A mes adorables sœurs et à mes chers frères*

*A mes ami(e)s : islam, belkacem, abderahman, mohammed, kheira, basma, chouaib, billal, daya, wissem ...ect*

*A mon binôme biskri zakaria*

*A toute ma famille et surtout ma cousine*

*A tous ceux qui me sont chères.*

*Je dédie ce travail.*

**ITATAHINE ABDESSLAM**

## ***Résumé***

Dans ce projet on a étudié la conception d'un moteur synchrone à aimant permanent à rotor intérieur, application véhicule. Dans le premier chapitre nous avons parlé sur les moteurs véhicule et sa motorisation .Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les éléments du moteur a aimant permanent. Dans le troisième chapitre on a fait un état de calcul de dimensionnement pour une puissance de 8 kw. Dans le dernier chapitre on a étudié la distribution des performances électromagnétiques.

## **الملخص**

في هذا المشروع قمنا بدراسة تصميم المحرك المتزامن ذات مغناطيس دائم (تطبيق على السيارات) ،في الفصل الأول تحدثنا حول تقنيات محركات السيارات و تطوراتها ،اما في الفصل الثاني قدمنا تقرير حول ما يحتويه هذا المحرك ،في الفصل الثالث تطرقنا إلى حساب أبعاد هذا المحرك ،و في الأخير تحققنا من توزيع أداء الكهرومغناطيسي.

## **Abstract**

In this project we investigated a magnet synchronous motor design permanent internal rotor, application vehicle. In the first chapter we talked about vehicle engines and its motorization. In the second chapter we presented the elements of the motor permanent magnet. In the third chapter was a calculation state of sizing for a power of 8 kw. In the last chapter we investigated the distribution of electromagnetic performance.

# Sommaire

---

<b>Introduction Général</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation</b>	
<b>1.1 Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Historique</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Classification des voitures électriques</b>	<b>5</b>
<b>1.3.a Le véhicule tout électrique</b>	<b>5</b>
<b>1.3.b Le véhicule hybride</b>	<b>6</b>
<b>1.3.b-i Technologie Micro-hybride</b>	<b>8</b>
<b>1.3.b-ii Technologie Mild-hybride</b>	<b>8</b>
<b>1.3.b-iii Technologie Full-hybride</b>	<b>8</b>
<b>1.3.c Classement écologique</b>	<b>9</b>
<b>1.3.d Perspectives</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Motorisation des voitures électriques</b>	<b>11</b>
<b>1.4.a Introduction</b>	<b>11</b>
<b>1.4.b Machine asynchrone MAS</b>	<b>13</b>
<b>1.4.b-i Constitution</b>	<b>14</b>
<b>1.4.b-ii Principe de fonctionnement</b>	<b>14</b>
<b>1.4.b-iii Avantages &amp; Inconvénients</b>	<b>15</b>
<b>1.4.b-iv Perspectives</b>	<b>15</b>
<b>1.4.c Machine synchrone</b>	<b>16</b>
<b>1.4.c-i Machine synchrone à rotor bobiné MSRB</b>	<b>17</b>
<b>1.4.c-ii Machine synchrone à aimant permanent MSAP</b>	<b>19</b>
<b>1.4.c-iii Machine synchrone à double excitation MSDE</b>	<b>19</b>
<b>1.4.c-iv Conclusion</b>	<b>21</b>
<b>1.5 Conclusion</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre 2 : Moteur synchrone a aiment permanent</b>	
<b>2.1. Introduction.</b>	<b>25</b>
<b>2.2. Les aimants permanents .</b>	<b>25</b>
<b>2.2.1. Caractéristiques générales des aimants permanents</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2. Les différents types d'aimants permanents.</b>	<b>27</b>
<b>2.3. Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents.</b>	<b>28</b>
<b>2.3.1. Structures à flux radial (RFPM).</b>	<b>29</b>
<b>2.3.1.1. Structures à aimants déposés en surface.</b>	<b>29</b>

# Sommaire

---

2.3.1.2. Structures à aimant encastrés	30
2.3.1.3. Structures à aimants enterrés	31
2.3.2. Structures à flux axial (AFPM)	32
2.4. Applications des machines synchrones à aimants permanents	33
2.5. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents.	35
2.6. Modélisation de la MSAP	36
2.6.1 Equations de tensions et flux	37
2.6.2. Transformation de Park	38
2.6.3. Expression de la puissance et du couple électromagnétique	40
2.7. Schéma fonctionnelle de la MSAP	42
2.8. Mise sous forme d'équation d'état	42
2.9. Modélisation de l'association MSAP-Onduleur de tension .	44
2.9.1. Définition de l'onduleur	44
2.9.2. Modélisation de l'onduleur de tension	45
2.10. Conclusion	48
 <b>Chapitre 3 : Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur</b>	
3.1 Introduction	49
3.2 Dimensionnement de la machine synchrone à aimants permanents	49
3.2.1 Configuration de la machine	49
3.2.2 Définition des paramètres	50
3.2.3 Démarche de dimensionnement	50
3.2.4 Hypothèses de dimensionnement	50
3.2.5 Les formules du dimensionnement de la machine	51
3.2.6 L'épaisseur de la culasse	53
3.2.7 L'épaisseur de l'aimant	53
3.2.8 Ouverture de l'aimant	53
3.2.10 Rayon extérieur	54
3.2.11 Géomètre de l'encoche	56
3.3 Dimensionnement de l'enroulement statorique	56
3.3.1. Introduction	56
3.3.3. Nombre d'encoches statorique	57

# Sommaire

---

3.3.4. Nombre d'encoches par pôle et par phase	57
3.3.5 Adaptation du bobinage à la tension d'alimentation	57
3.3.6. Courant nominal au stator	58
3.3.7 Nombre de spires d'une seule phase statorique	58
3.3.8. Nombre de conducteurs effectifs	58
3.3.9. Diamètre du fil utilisé	59
3.4. Modélisation du moteur en régime permanent	59
3.4.1 Chute magnétique dans l'entrefer	60
3.4.2 Chute magnétique dans la culasse du rotor	60
3.4.3 Réactance synchrone d'une phase	62
3.4.5 Résistance d'une phase	62
3.4.6. Tableaux de dimensionnement final	63
<b>Chapitre 4 : Distribution des Performances Electromagnétiques</b>	
4.1 INTRODUCTION	65
4.2. Présentation de l'outil de calcul logiciel FEMM	66
4.3. Modélisation par élément finis	67
4.3.1. Paramètre de la machine Dimensions géométriques du MSAP	67
4.3.2. LA MACHINE MODELISEE PAR LE FEMM	68
4.3.2.1. Présentation de la structure de machine étudiée	68
4.3.2.2. Le maillage	69
4.4. EXPLOITATION DES RESULTATS	70
4.4.1. Les lignes iso-potentiels vecteurs	70
4.4.2. La densité du flux magnétique	71
4.5. Distribution du bobinage	72
4.6. Conclusion	73
Conclusion général	74
Références	75
Annexe	79



# Sommaire

---

# Conclusion Général

---

## Introduction Général

Dans ce contexte, la recherche de nouvelle technologie pour remplacer la voiture à essence constitue un véritable enjeu industriel. Les véhicules électriques sont une alternative prometteuse aux véhicules conventionnels propulsés par des moteurs à combustion interne, offrant la possibilité de réduire le CO<sub>2</sub>, les émissions polluantes et sonores. Toutefois, la capacité limitée des batteries constitue un problème majeur devant le développement des véhicules électriques. En alliant les avantages des véhicules thermiques et des véhicules électriques, Le véhicule hybride semble être une très bonne solution, au moins de manière palliative. Il constitue un enjeu de tout premier ordre.

La définition des règles de dimensionnement d'un moteur synchrone à aimant permanent constant.

Cette définition fait apparaître plusieurs paramètres : géométriques, magnétiques et électriques. A partir du cahier des charges, certains sont déterminés empiriquement d'après des considérations établies à partir des machines existantes.

Calculs préliminaires des dimensions principales du stator (diamètre d'alésage, Diamètre extérieur, Induction dans l'entrefer..... etc.).

Dimensionnement de l'enroulement statorique (calcul nombre d'encoches statorique, nombre d'encoches par pôle et par phase, nombre de conducteurs effectifs, Coefficient de distribution).

Le choix préliminaire de la géométrie de L'encoche (hauteur de l'encoche, section de l'encoche pour l'emplacement des conducteurs.....etc.)

Dimensionnement du rotor (calcul Entrefer, l'épaisseur de l'aimant, diamètre intérieur et extérieur du rotor, La largeur de paquet fer du rotor.....).

# Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

---

## I.1 Introduction

A la fin du XIXe siècle, lorsque l'automobile en était à ses débuts, trois modes de propulsion coexistaient : le moteur à explosion, le moteur à vapeur et le moteur électrique.

Et comme on le sait, l'automobile à essence prit le dessus. La voiture électrique traversa ensuite différentes phases avant d'être oubliée dans les années 30, puis fut l'objet de quelques recherches à partir des années 60 et connaîtra un regain d'intérêt dans les années 90 avec des véhicules commercialisés sans grand succès. L'évolution technique de ces dernières années lui offre maintenant la possibilité de prendre une revanche, plus de 100 ans après ses débuts. De la première voiture électrique (aux alentours de 1830), en passant par la domination totale des véhicules thermiques durant le XXème siècle, aujourd'hui les grandes acteurs du secteur automobile investissent dans les voitures hybrides et électriques. Ce paragraphe a pour but de revenir rapidement sur l'évolution qu'a connue ce domaine depuis deux siècles.

## I.2 Historique

Le premier véhicule électrique fit son apparition dans les années 1830 (1832-1839). La première personne à avoir inventé une voiture électrique fut Robert Anderson, un homme d'affaire écossais. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique.

Vers 1838 l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h. Ces deux inventeurs n'utilisaient pas de batterie rechargeable. En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881.

En 1884, on voit sur la photo de la figure I.1 Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui pourrait être la première au monde.[1]



Figure I.1 – Une des premières voitures électriques (Thomas Parker 1884)

En 1897, on peut apercevoir les premiers taxis électriques dans les rues de New York.

En 1899 en Belgique, une société construit "La Jamais Contente" la première auto électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h). L'auto était pilotée par le belge Camille Jenatzy, et munie de pneus Michelin [5]. Elle était en forme de torpille (figure I.2).

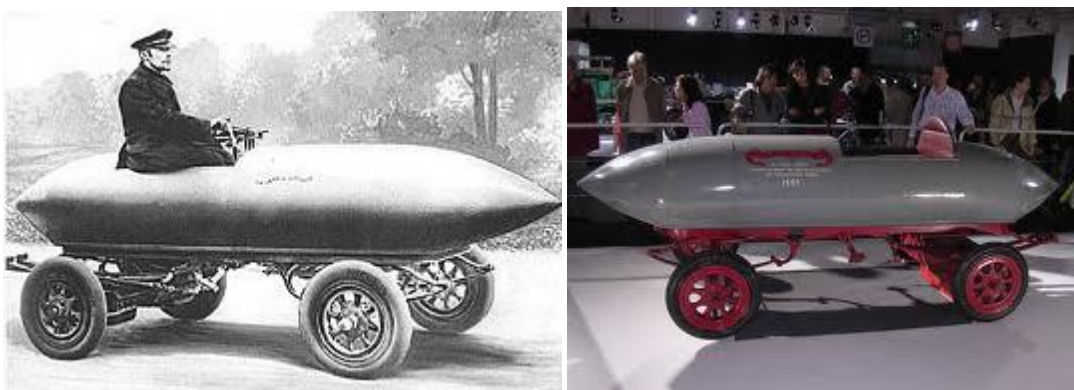


Figure I.2 – La Jamais Contente (1899)

Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des autos à essence et à vapeur [2].

## Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

---

Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence [3] [4].

En 1972, Victor Wouk, le parain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (General Motors).

Dès 1988, le président de GM Roger Smith lance un fond de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra la EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998 (figure I.3)



Figure I.3 – La voiture électrique EV1 ( GM 1996)

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride, la Prius (figure I.4)

De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10



Figure I.4 – La Prius ( Toyota 1997)

EV et le Toyota RAV4 EV.

En 2003 en France, Renault fait une tentative avec la sortie de sa voiture hybride Kangoo Elect'road mais abandonne la production après environ 500 véhicules. Aujourd'hui, la voiture

# Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

tout électrique commence à percer, moyennant une autonomie en évolution permanente. De nombreux modèles sont proposés à la vente. L'implication des villes dans la protection de l'environnement joue également un rôle : les villes développent les réseaux de bus électriques et récemment de voitures électriques en location (Autolib/Paris fin 2011) qui donnent ainsi une bonne visibilité à l'électrique.

## I.3 Classification des voitures électriques

### I.3.a Le véhicule tout électrique

Le véhicule tout électrique utilise la seule énergie fournie par les batteries. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteur(s) électrique(s). La solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore. Sur la figure I.5, on présente la composition de base d'une voiture électrique. La constitution de cette voiture est nettement plus simple que celle d'une voiture à essence. Les composants sont plus petits. La taille réduite et la simplicité des composants permettent de mettre au point des véhicules petits et légers. .[4]

1. Batteries
2. Moteur
3. Transmission
4. Freins
5. Régulateur

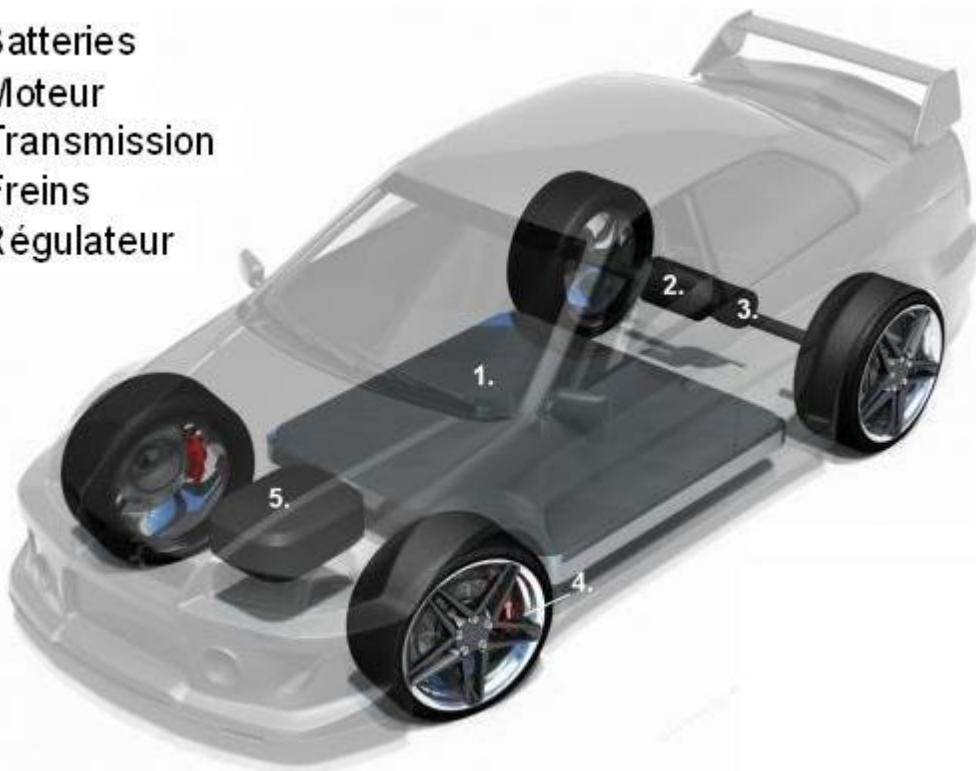


Figure I.5 – Composition de base d'un véhicule électrique

# Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

---

- Fonctionnement

La batterie est le point de stockage de l'électricité. Elle 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. La batterie est chargée, à partir d'une source extérieure (EDF par exemple) pendant les périodes de repos.

Lors de la circulation, en phase d'accélération ou de marche à vitesse constante, l'électronique puise l'énergie dans la batterie et fait tourner le ou les moteurs électriques. En phase de décélération, l'électronique fait fonctionner la ou les machine(s) électrique(s) en générateur(s), l'énergie délivrée par ces générateurs est utilisée pour recharger la batterie. Ainsi la consommation d'énergie est réduite.

- Avantages

- Propreté : Aucune émission d'hydrocarbures, de fumées ou de particules.
- Economie : Aucune consommation pendant les phases de ralenti, les batteries se rechargent pendant les phases de décélération.
- Fiabilité : Possibilité de parcourir jusqu'à 1 million de kilomètres, les dépenses d'entretien sont réduites de 30 à 40 % et les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- L'agrément de conduite : Le démarrage se fait toujours au quart de tour, même en hiver, le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage) et il est parfaitement silencieux.

- Inconvénients

- La durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio), la décharge des batteries est accélérée.
- La durée de vie de la batterie n'est pas encore très importante.
- La puissance du moteur électrique n'est pas encore très importante.[1]

## **I.3.b Le véhicule hybride**

La voiture hybride est composée de deux systèmes de traction : les modèles actuels associent un moteur thermique classique (essence ou diesel) avec un moteur électrique muni d'une batterie. Cette même technologie se développe inversement où le moteur thermique permet de recharger les batteries du moteur électrique :  
on parlera d'hybride rechargeable (plug in hybrid).

# Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

- Fonctionnement

La méthode générale de fonctionnement consiste à faire fonctionner soit le moteur électrique, soit le moteur thermique, soit les deux en même temps selon les modèles. Lorsque le véhicule est immobile, les deux moteurs sont à l'arrêt. Au démarrage, c'est le moteur électrique qui assure la mise en mouvement de la voiture, jusqu'à des vitesses plus élevées (entre 25 et 50 km/h aujourd'hui). Lorsque plus de sollicitation et/ou de puissance sont demandées par le conducteur, le moteur thermique prend le relais.

En cas de forte accélération, la mise en marche des deux moteurs permet d'avoir plus de couple, et une montée en régime moteur équivalente à un moteur de même puissance, voire supérieure. En phase de décélération et de freinage, l'énergie cinétique est récupérée pour recharger les batteries.

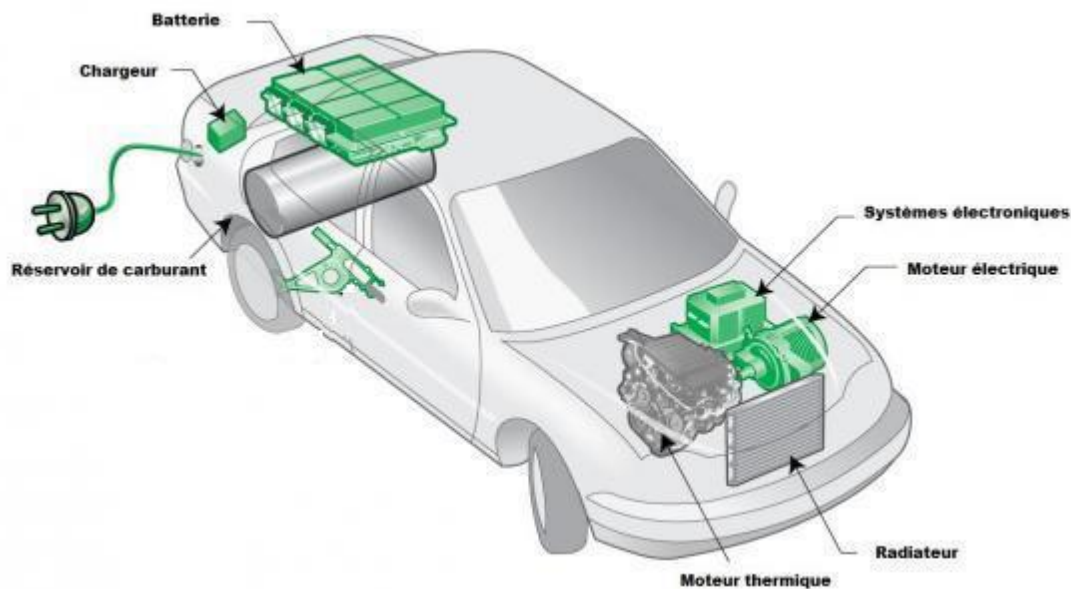


Figure I.6 – Composition de base d'un véhicule électrique

- Avantages

- Les consommations obtenues sont intéressantes, en raison de la récupération d'énergie au freinage, et du fait que le moteur thermique tourne généralement dans les conditions de régime et de charge les plus favorables.
- En ville, les véhicules hybrides fonctionnent en mode électrique. De ce fait, ils n'engendrent presque pas de pollution urbaine.
- Les performances des véhicules sont tout à fait comparables à celles des automobiles "normales" à essence, tant sur le plan de l'accélération que du confort de conduite.
- Réduction de 90 % des émissions polluantes. .[5]



- Inconvénients

- Prix plus élevé que celui des voitures de taille moyenne offrant des prestations et un équipement comparables.
- La nécessité croissante de réduire les émissions des gaz à effet de serre nécessite le développement de nouveaux types de motorisation.
- Coûts de production élevés à l'heure actuelle.

Aujourd'hui, trois technologies de voitures hybrides se distinguent selon le degré de présence de la motorisation électrique, on parle de technologies micro-hybride, mild-hybride et full-hybride.

### **I.3.b-i Technologie Micro-hybride**

Un seul moteur électrique vient remplacer le démarreur et l'alternateur des voitures conventionnelles, c'est l'alternateur-démarreur. Il est capable de remplir leur fonctions, mais aussi d'assurer une nouvelle fonction appelée "Stop & start" qui permet la mise en veille du moteur lorsque le véhicule est à l'arrêt, entraîne une diminution significative de la consommation de carburant et donc des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le "Stop& Start" (développé par Valeo) équipe déjà de nombreuses voitures. La Citroën C3 a été le premier modèle de la marque à être équipé de cette technologie.

### **I.3.b-ii Technologie Mild-hybride**

Pour le "Mild-hybride", en plus des fonctions assurées par l'alternateur-démarreur du "Micro-hybrid", le moteur électrique est capable d'assister le moteur thermique dans la traction. Avec un moteur plus puissant et une batterie de plus grande taille, la technologie "Mild-hybrid" permet un gain de consommation considérable par rapport à une voiture classique.

L'objectif du projet "MHYGALE" (Mild HYbrid GénérALisable) dont s'inscrivent les travaux de cette thèse, est de développer une solution capable d'assurer les fonctions :

- Stop & Start
- Récupération de l'énergie au freinage
- Assistance électrique du moteur thermique à bas régime

### **I.3.b-iii Technologie Full-hybride**

C'est l'association de deux moteurs thermique et électrique de puissances relativement équivalentes, ainsi par rapport à la technologie "mild", le moteur électrique augmente en importance et le moteur thermique diminue de taille ("downsizing").[6]

Le tableau I.7 montre une étude comparative entre les trois technologies du véhicule hybride.

## Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

	Stop & start	Mild hybrid	Full hybrid
Arrêt du moteur au ralenti	✓	✓	✓
Freinage récupératif	-	✓	✓
Downsizing du moteur thermique et assistance à l'accélération	-	✓	✓
Mode électrique	-	-	✓
Puissance électrique	2 kW	10 kW	30 kW
Electronique de haute puissance	< 60V	> 60V	500 V
Gain carburant (estimations sur cycle mixte)	5 %	15 %	25 %
Surcoût de fabrication	~ 200€	~ 2000 €	~ 5000 €
Exemples d'applications	Citroën C3, Volkswagen Lupo	Chevrolet Tahoe GMC Yukon	Toyota Prius, Ford Escape Honda Civic, Nissan Altima

Figure I.7 – Tableau comparatif des trois technologies de voiture hybride ; source : Centre d'analyse stratégique [3]

### I.3.c Classement écologique

Jusqu'au siècle dernier, la consommation des voitures intéressait peu le législateur.

C'était plutôt une affaire à régler entre le vendeur et l'acheteur. Ce dernier y prêtait plus ou moins attention en fonction du prix affiché à la pompe. Ce qui explique en partie que l'on ne conduise pas les mêmes voitures en Europe, où le carburant est fortement taxé, et aux États-Unis, où il l'est peu. Mais l'engagement des pays développés, pris dans le cadre du protocole de Kyoto, de réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub>, a changé la donne. La consommation des voitures est soumise à des limitations sévères qui obligent les constructeurs à faire les choix techniques appropriés. En Europe, un règlement impose de ramener les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> provenant des véhicules neufs à 130 g/km (soit 5,3 l/100 km en essence, réalisation échelonnée entre 2012 et 2015). L'objectif visé pour 2020 est de 95 g/km (4 l/100 km), alors que la moyenne tourne aujourd'hui autour de 160 g/km (6,5 l/100 km) [2].

La voiture électrique semble l'une des meilleures solutions pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde, néanmoins, elle nécessite plus d'émissions de CO<sub>2</sub> pour sa production :

8,8 tonnes de CO<sub>2</sub>, contre 6,5 pour une voiture hybride et 5,6 pour un véhicule essence [7].

Une organisation scientifique anglaise (Low Carbon Vehicle Partnership) [1] a réalisé une étude sur la pollution des voitures électriques et thermiques sur la totalité du cycle de vie des véhicules (figure I.8). Cette étude démontre que si les voitures électriques et hybrides sont

## Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

plus polluantes lors de leur production, elles restent plus écologiques que les véhicules thermiques durant leur cycle de vie.

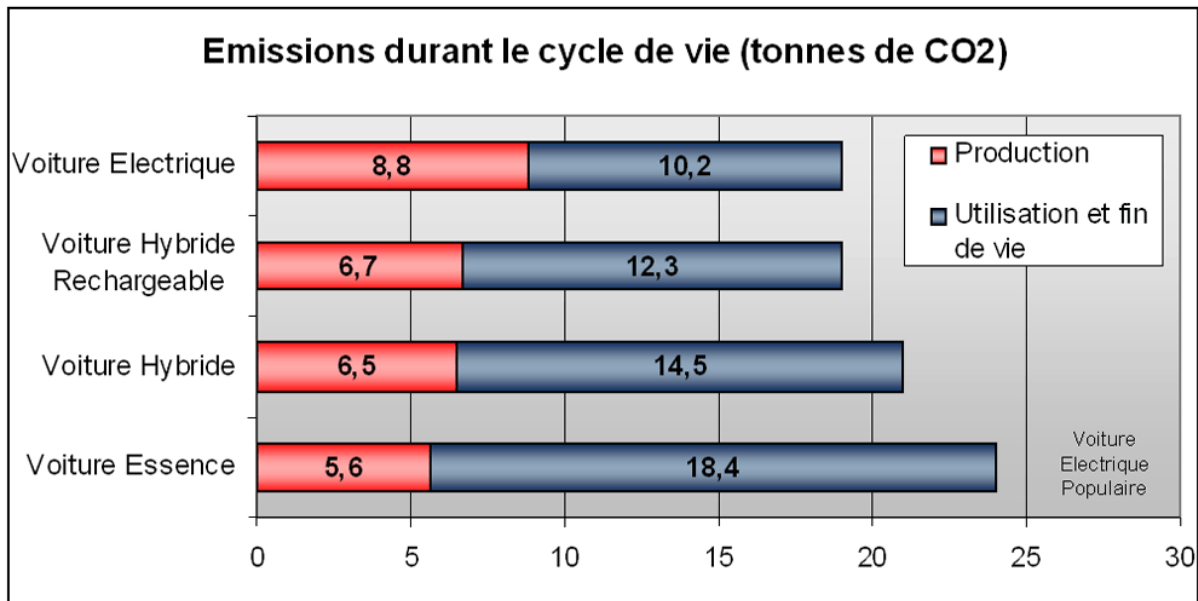


Figure I.8 – Pollution des différentes voitures ; Source : Low Carbon Vehicle Partnership [1]

### I.3.d Perspectives

Confrontés à des normes de plus en plus sévères et à des clients de plus en plus demandeurs de modèles économes en carburant, les constructeurs se lancent désormais massivement dans l'électrification de leurs véhicules. Véhicules hybrides, rechargeables ou non, et véhicules électriques sont les nouvelles vedettes des salons automobiles.

Selon le Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA) [4], le marché mondial des véhicules hybrides a dépassé 740 000 unités en 2009. En France, ces ventes ont représenté 9 399 unités, soit une augmentation très modeste de 2,9 % par rapport à 2008 mais surtout une part de marché en baisse. Au Japon, les ventes de véhicules hybrides ont plus que doublé en 2009 et aux États-Unis, 290 000 unités ont été vendues en 2010. En Inde, Chine et Corée du Sud, les marchés encore restreints devraient croître rapidement et portent de belles promesses pour les constructeurs.

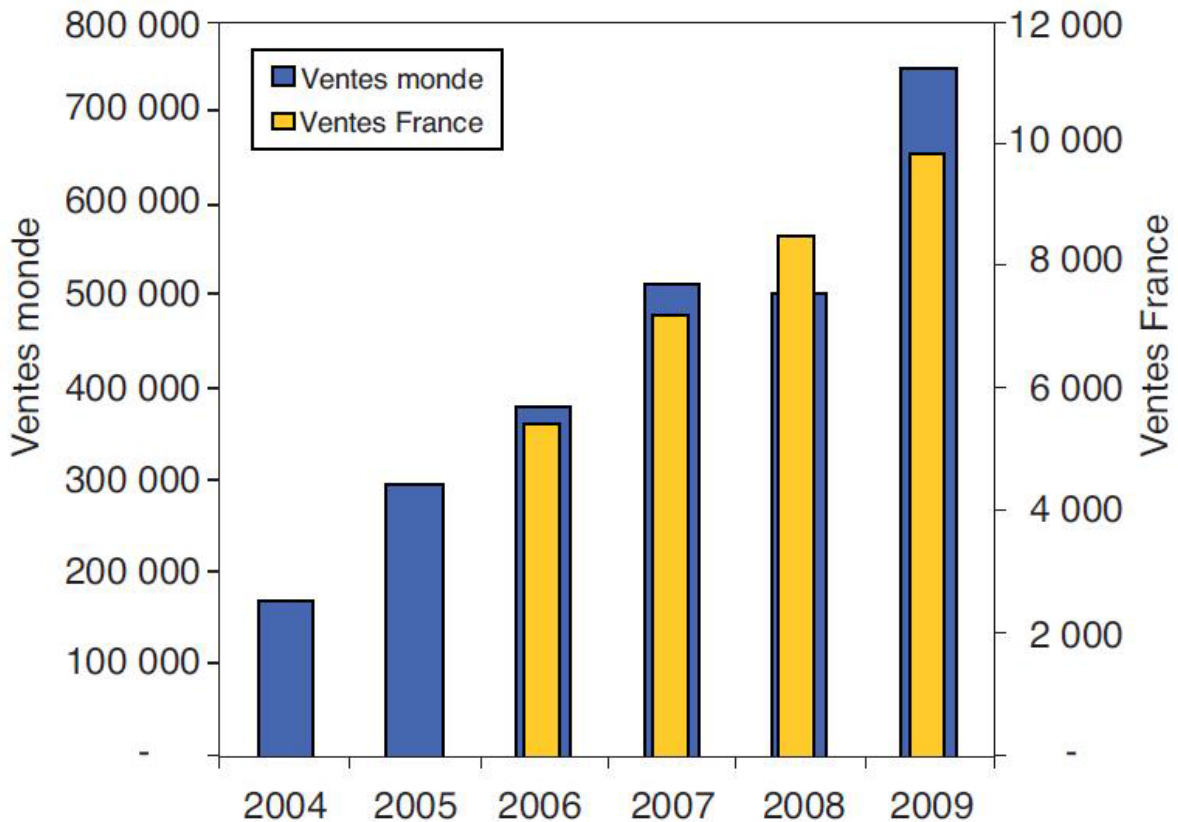


Figure I.9 – Les chiffres de ventes de véhicules hybrides dans le monde (2004-2009) ; Source : CCFA, Automotive Innovation Platform [4]

Les véhicules électriques et hybrides font beaucoup parler d'eux et les constructeurs investissent énormément, mais leur part de marché est encore très faible. En 2011, au niveau mondial, les véhicules hybrides n'ont représenté que 1,7 % de la production, soit 1,25 million d'unités. Pour les véhicules électriques, en Europe, on parle de quelques milliers de véhicules immatriculés. En 2011, au niveau mondial, la production de ces véhicules représente 0,2 % du parc des véhicules légers, selon les données du centre d'analyse stratégique [3].

Après un ralentissement en 2012, les véhicules hybrides devraient représenter 4 % du marché en 2018. Les hybrides, notamment les full hybrides (hybridation totale avec des motorisations utilisant des énergies différentes), qui représentent 86% du marché des véhicules propres, sont sans doute les modèles qui vont se développer le plus rapidement. Et le plug-in hybride ou rechargeable, compromis entre l'hybride et l'électrique, devrait par ailleurs conquérir dans les six prochaines années 30% du marché des véhicules verts.

## I.4 Motorisation des voitures électriques

### I.4.a Introduction

Les premiers moteurs électriques à être utilisés sur les véhicules électriques furent les moteurs à courant continu. Ce choix était logique il y a 30 ans, car c'était le moteur le plus facile à piloter en vitesse. La seconde génération de motorisation des automobiles électriques utilisa des moteurs à induction ou asynchrones. Actuellement les machines performantes sont les moteurs synchrones, et le marché des véhicules électriques et hybride se partage entre ces deux technologies :

- Moteur synchrone à aimant permanent (Peugeot, Toyota)
- Moteur synchrone à rotor bobiné (Renault, Nissan)

La machine électrique est l'élément essentiel de la voiture électrique, les cahiers des charges la concernant deviennent de plus en plus exigeants sur plusieurs aspects (compacité, rendement, commande, coût, robustesse, etc). Elle doit donc répondre aux cahiers des charges qui, en plus d'être exigeants, sont toujours en évolution.

On peut résumer l'ensemble des performances requises comme suit :

- Une enveloppe couple/vitesse contraignante (figure I.10) avec un couple de démarrage important
- Une grande compacité
- Une facilité de contrôle (bon rapport de défluxage)
- Un rendement élevé (90% dans les zones les plus sollicitées du cahier des charges, figure I.11)

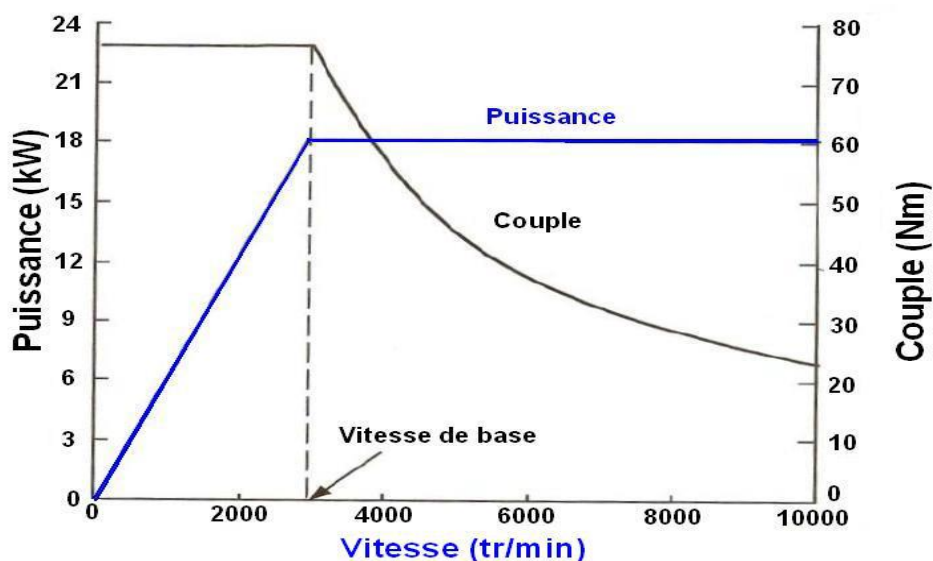


Figure I.10 – Enveloppe couple/vitesse pour un véhicule hybride

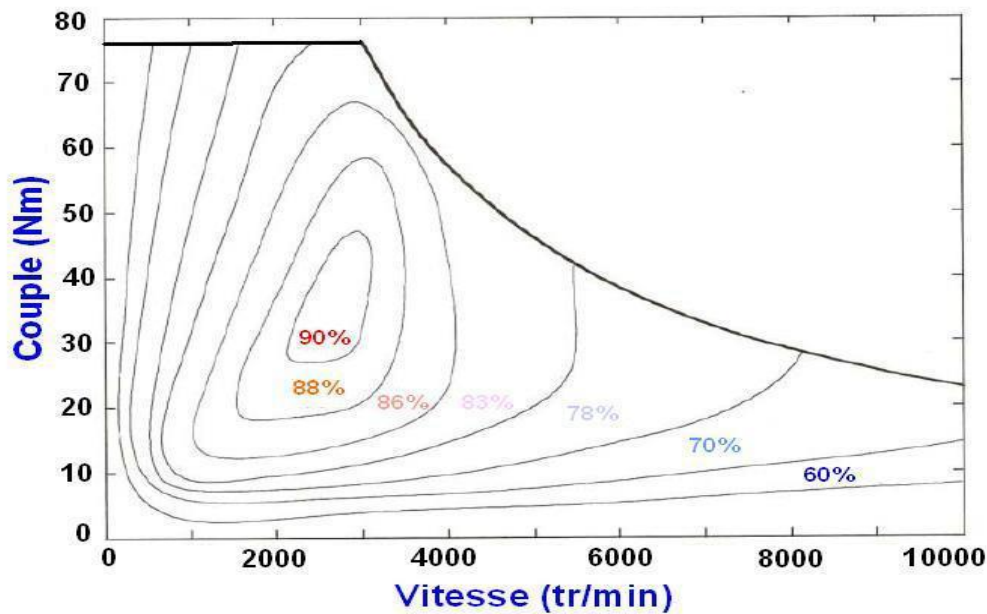


Figure I.11 – Rendement d'un moteur pour véhicule hybride

Plusieurs solutions ont été traitées pour répondre aux cahiers des charges des constructeurs automobiliste, ces solutions se distinguent aussi bien par le principe de fonctionnement (synchrone, asynchrone, à réluctance variable ... ), le mode d'excitation que par la topologie (axiale ou radiale). Parmi les structures étudiées on trouve des machines griffes [14] [15], des machines synchrones à aimants permanents [16] [17] [18] , à rotor bobiné [19], et à double excitation [20] [21] [22], des machines asynchrones [23] et des machines à commutation de flux [24] [25].

Dans ce qui suit, on fera le tour des différentes machines candidates pour la motorisation des véhicules électriques et hybrides, on montrera les avantages et les inconvénients de chacune de ces technologies et on s'intéressera particulièrement aux machines synchrones à double excitation et à rotor bobiné, machines sur lesquelles les travaux de la présente thèse ont porté.

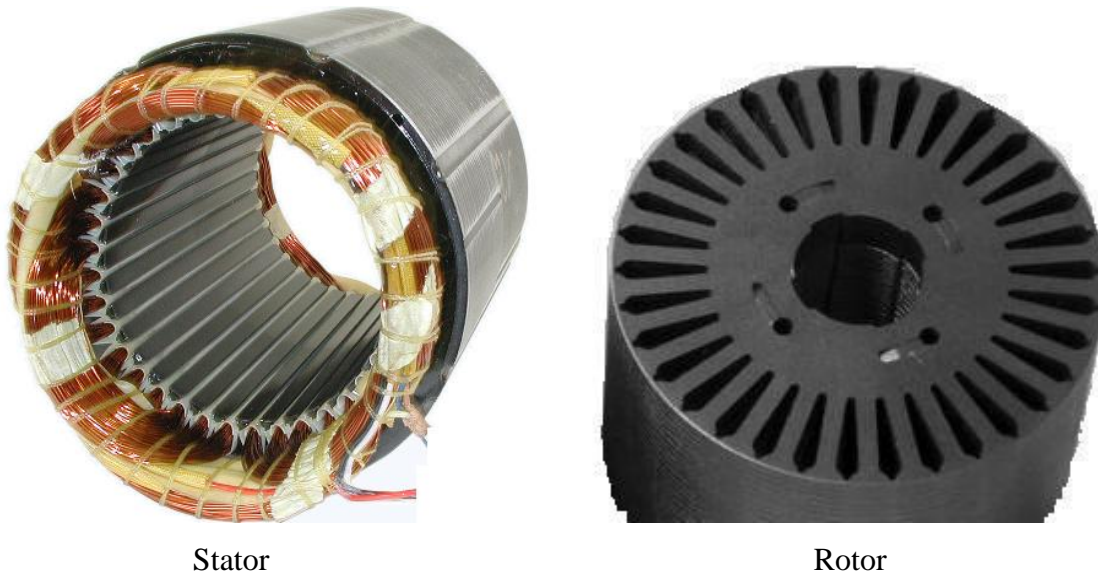
### I.4.b Machine asynchrone MAS

La machine asynchrone, de part sa simplicité de fabrication et d'entretien est actuellement la machine la plus répandue dans le secteur industriel et présente de bien meilleures performances que les autres types de machines. Par ailleurs, ces machines possèdent un couple massique, un rendement et un facteur de puissance plus faible que les machines à aimants.

Actuellement, les moteurs à aimants permanents sont très populaires dans le secteur automobile. Mais les constructeurs automobiles considèrent le moteur asynchrone comme une

alternative potentielle aux moteurs synchrones : d'une part sa fabrication s'accommode aisément d'une production automatisée, et il possède de très bonnes propriétés mécaniques ; il est robuste, fiable et peu coûteux. D'autre part, les possibilités actuelles de commande permettent de lui conférer toutes les caractéristiques électromécaniques requises, et ce aussi bien en moteur qu'en générateur [19].

### I.4.b-i Constitution



Stator

Rotor

Figure I.12 – Structure d'une machine asynchrone

Le moteur asynchrone est formé d'un :

- Stator : la partie fixe du moteur. Il comporte trois bobinages (ou enroulements) qui peuvent être couplés en étoile Y ou en triangle \_ selon le réseau d'alimentation.
- Rotor : la partie tournante du moteur. Cylindrique, il porte soit un bobinage (d'ordinaire triphasé comme le stator) accessible par trois bagues et trois balais, soit une cage d'écureuil non accessible, à base de barres conductrices en aluminium. Dans les deux cas, le circuit rotorique est mis en court-circuit (par des anneaux ou un rhéostat)

### I.4.b-ii Principe de fonctionnement

Les bobinages statoriques, alimentés par des courants triphasés de pulsation  $\omega$ , créent un champ magnétique B tournant à la vitesse  $s = \omega/p$  où p est le nombre de paires de pôles au stator.

Ce champ tournant balaie le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices (f.e.m) d'après la loi de Lenz. Le bobinage rotorique étant en court-circuit, ces f.e.m y produisent des courants induits. C'est l'action du champ tournant B sur les courants induits qui crée le couple moteur. Ce dernier tend à réduire la cause qui a donné naissance aux courants, c'est-à-dire la

rotation relative du champ tournant par rapport au rotor. Le rotor va donc avoir tendance à suivre ce champ. Le rotor tourne forcément à une vitesse  $r < s$  (d'où le terme asynchrone).

### I.4.b-iii Avantages & Inconvénients

Cette machine est très attractive pour le mode démarreur. Cependant, ses caractéristiques se dégradent en fonctionnement génératrice [19]. En effet, à tension d'alimentation constante, le couple varie proportionnellement à l'inverse du carré de la fréquence ( $\Gamma \approx [V/f]^2$  ;  $\Omega \sim f$ ), la puissance électrique débitée ( $P \approx [\Gamma \cdot \Omega]$ ) décroît donc à partir d'une certaine vitesse de rotation. Ceci pose un problème de surdimensionnement de l'onduleur de tension MLI (tension d'alimentation élevée) et de coût [19].

Par principe, le moteur asynchrone induit par définition un glissement magnétique (friction) pour qu'il y ait création de couple. Ce glissement implique des pertes obligatoires au niveau du rotor. La cartographie de rendement (figure 1.13) montre un rendement qui plafonne à 82%, et qui chute rapidement à 75% sur une plage de fonctionnement plus étendue.

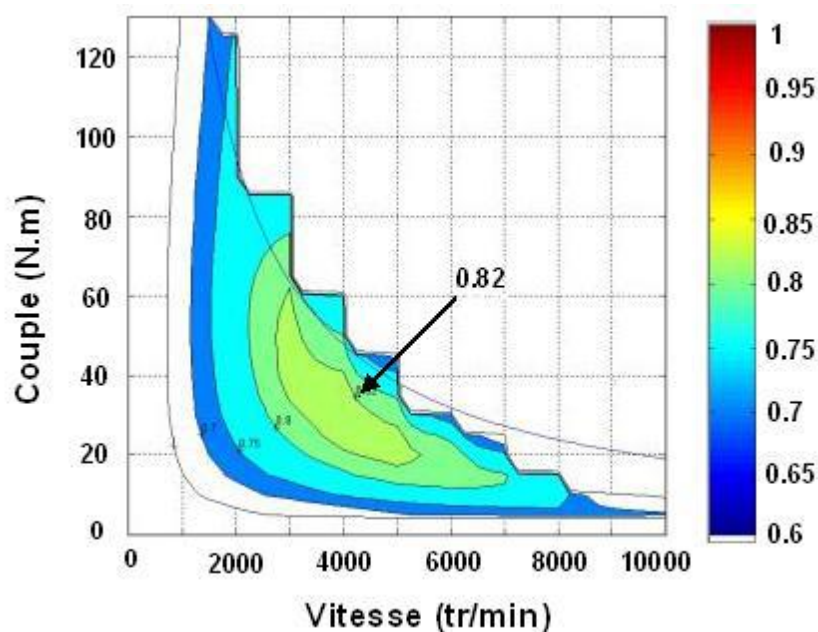


Figure I.13 – Cartographie de rendement d'un moteur asynchrone

### I.4.b-iv Perspectives

A ce jour, toutes les voitures commercialisées utilisent des moteurs synchrones (à aimants permanents ou à rotor bobiné), sauf la Tesla Roadster qui utilise un moteur asynchrone [9], tout comme l'EV1 [10]. Or ce sont elles qui proposent les meilleures performances (autonomie et vitesse de pointe). La question devient de plus en plus insistante : Est-ce que les constructeurs se trompent de technologie de motorisation électrique ? Il est vrai que chaque



## Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

---

type de moteur électrique présente des performances différentes, des qualités et des inconvénients spécifiques. Le moteur synchrone à aimants permanents est plus coûteux mais donne une bonne autonomie, le moteur synchrone à rotor bobiné présente un très bon rapport puissance/prix, et l'asynchrone est simple et donne un excellent rapport puissance/prix de fabrication.

Depuis le début de l'année 2011, un autre facteur est entré en jeu, il s'agit de la hausse continue des prix des terres rares. Le prix de la matière première néodyme, qui constitue en termes de coûts la partie décisive d'un aimant néodyme-fer-bore, a été multiplié à peu près par 5 entre janvier 2011 et juin 2011 [11], ceci a posé de vrais problèmes aux constructeurs développant uniquement des solutions à base de ces matériaux. Les constructeurs renforcent leurs recherches pour trouver d'autres alternatives aux machines à aimants.

Remy International, une division de GM (General motors), a annoncé qu'elle a développé une solution efficace à ce problème. Il s'agit justement d'une machine asynchrone améliorée avec une nouvelle technologie de bobinage. Avec cette conception brevetée, Remy estime que les machines asynchrones peuvent offrir des performances comparables à des machines à aimants permanents [12].

L'année passée, une hausse de 50% a été enregistrée dans l'intégration de moteurs asynchrones dans les véhicules électriques (Audi R8 e-Tron, Citroën Berlingo, Tazzari zero, etc.) [13]

Les recherches se poursuivent donc pour améliorer les performances de la machine asynchrone et la rendre compétitive par rapport aux machines à aimants.

### **I.4.c Machine synchrone**

Bien que plus délicats à piloter, plus coûteux et potentiellement moins robuste, le choix du moteur synchrone s'est imposé dans les véhicules électriques et hybrides.

La machine synchrone offre le meilleur rendement en mode générateur et moteur. Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer.

La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor. La figure (figure I.14) montre une machine synchrone à pôles saillants constitués d'électro-aimants alimentés en courant continu.

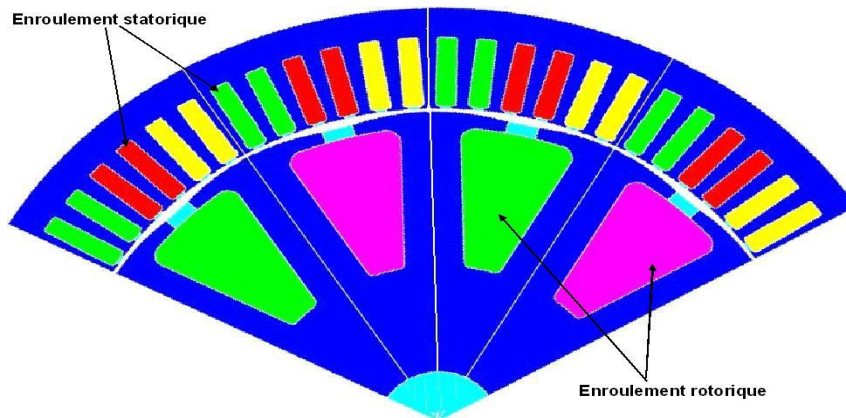


Figure I.14 – Structure d'une MSR

Trois familles de machines synchrones sont en compétition :

- Machine synchrone à rotor bobiné MSR : Elles utilisent des bobinages pour créer le champ rotorique, ce dernier peut être modulé électroniquement, ce qui permet un pilotage facile à haute vitesse (en défluxage). Les MSR nécessitent un contact électrique avec le rotor (système balais-collecteur).
- Machine synchrone à aimants permanents MSAP : Aucune alimentation électrique n'est nécessaire pour le rotor. Il y a donc gain de maintenance, compensé par un risque potentiel de désaimantation en phase de défluxage. Par ailleurs, ces moteurs utilisent en général des aimants terres rares, une matière première dont le prix ne cesse d'augmenter.
- Machine synchrone à double excitation MSDE : Tentent d'allier les avantages des MSAP (très bon rendement énergétique) à ceux des MSR (facilité de fonctionnement à vitesse variable), le flux d'excitation dans ces machines est la somme d'un flux créé par des aimants permanents et d'un flux d'excitation créé par des bobines.

Les machines synchrones à aimants, à double excitation ou encore à rotor bobiné,. Dans ce qui suit, on se propose de faire une description de chacune de ces machines.

## I.4.c-i Machine synchrone à rotor bobiné MSR

Constitution : La machine à rotor bobiné est constituée de :

- Rotor : Formé de masses polaires autour desquelles sont entourées des bobines d'excitation. Ces masses polaires peuvent être réalisées en acier massif ou par un empilage de tôles afin de réduire les pertes fer, le flux rotorique est obtenu, donc, grâce aux ampères-tours injectés dans les bobines d'excitation.

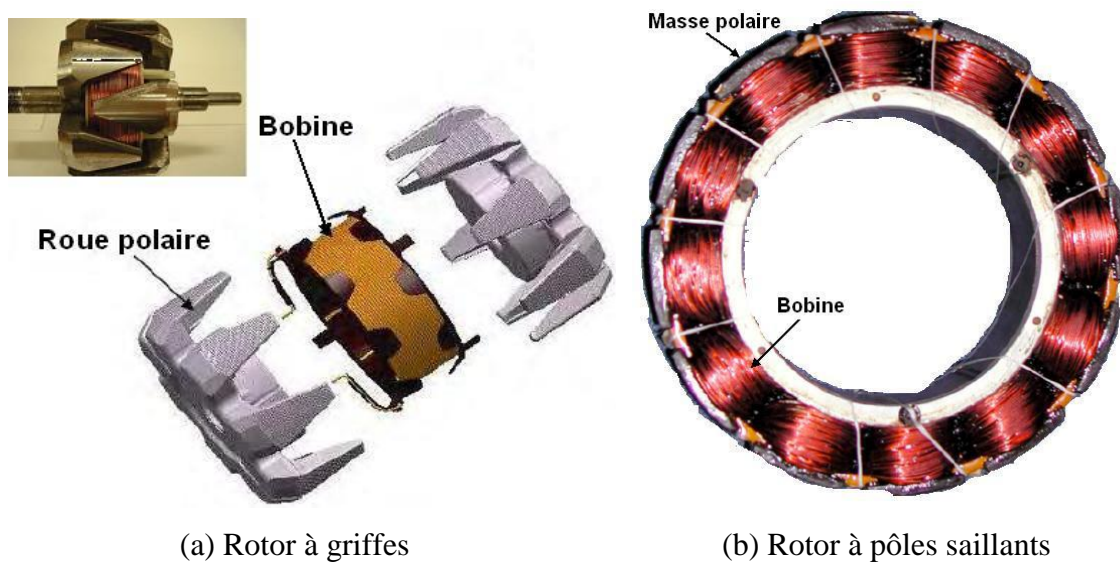


Figure I.15 – Structures du rotor d'une MSRB

La machine à rotor bobiné à griffes (figure I.15a) est la machine utilisée en majorité pour les alternateurs automobiles, plusieurs travaux de thèse ont porté sur ce type de machine [14][15][20][26][27]. En revanche, les MSRB à pôles saillants (figure I.15b) sont moins répandues dans le secteur automobile, on les rencontre généralement dans des applications alternateurs [28].

– Stator : de même structure qu'un stator MAS, il est principalement constitué du paquet de fer et du bobinage. Le paquet est constitué de tôles feuilletées afin de minimiser les pertes par courants de Foucault. Des encoches sont réalisées dans le paquet ce qui permet d'y insérer les conducteurs du bobinage.



Figure I.16 – Stator d'une MSRB [26]

### **I.4.c-ii Machine synchrone à aimant permanent MSAP.**(voir chapitre 2).

Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, le moteur synchrone à aimant permanent semble promis à un bel avenir. Grâce aux aimants permanents qui produisent une densité magnétique élevée, on peut construire des moteurs synchrones plus compacts et plus légers que des moteurs asynchrones de même puissance [29], présentant des couples et des puissances massiques avec des rendements élevés. Ils ont pu trouver leur essor en traction électrique par le développement des aimants en terres rares frittées consolidées par des fibres.

Leur prix de revient est cependant plus élevé que celui des moteurs asynchrones.

### **I.4.c-iii Machine synchrone à double excitation MSDE**

L'utilisation

des aimants permanents dans les machines électriques permet d'augmenter significativement leur rendement et surtout de réduire leur encombrement. Ce type de machine possède donc un couple massique considérable. Grâce à ses caractéristiques électromagnétiques imbattables et sa grande compacité, la MSAP s'est retrouvée pendant longtemps la machine la plus utilisée dans les véhicules électriques et hybrides [30][17][18]. La machine à rotor bobiné, quant à elle, présente de nombreux avantages, notamment le fonctionnement sur une large plage de vitesse (rapport de défluxage important grâce au bobinage rotorique).

L'intérêt recherché par les machines à double excitation est d'augmenter la capacité de défluxage des structures à aimants permanents (fonctionnement sur une large plage de vitesses) sans dégrader sa puissance massique et son rendement. La double excitation permet ainsi de conjuguer les avantages des MSAP et des MSRB.

Les rotors des machines à double excitation possèdent deux sources électromagnétiques :

Les aimants permanents qui, en général, créent le flux principal d'excitation, et le bobinage qui permet de contrôler le flux généré par les aimants : Le renforcer au démarrage et l'affaiblir à grande vitesse (défluxage).

Réalisation : On aborde ici quelques structures à double excitation qui ont été conçues et réalisées pour des applications automobiles, on se limite à trois exemples : la machine à griffes à aimants interpolaires, La machine NES (new electrical structure) et la MSDE de Li [20].

– Machine à griffes à aimants interpolaires :

## Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

Afin d'augmenter la puissance massique des machines à griffes à rotor bobiné. Des travaux de recherches à Valeo ont permis de réduire les flux de fuites entre deux pôles consécutifs du rotor, en insérant des aimants dans les espaces interpolaire (figure I.17). La polarisation des aimants est naturellement opposée au sens des fuites intergriffes. Cette structure a permis un gain considérable par rapport à la structure classique [26] [20]

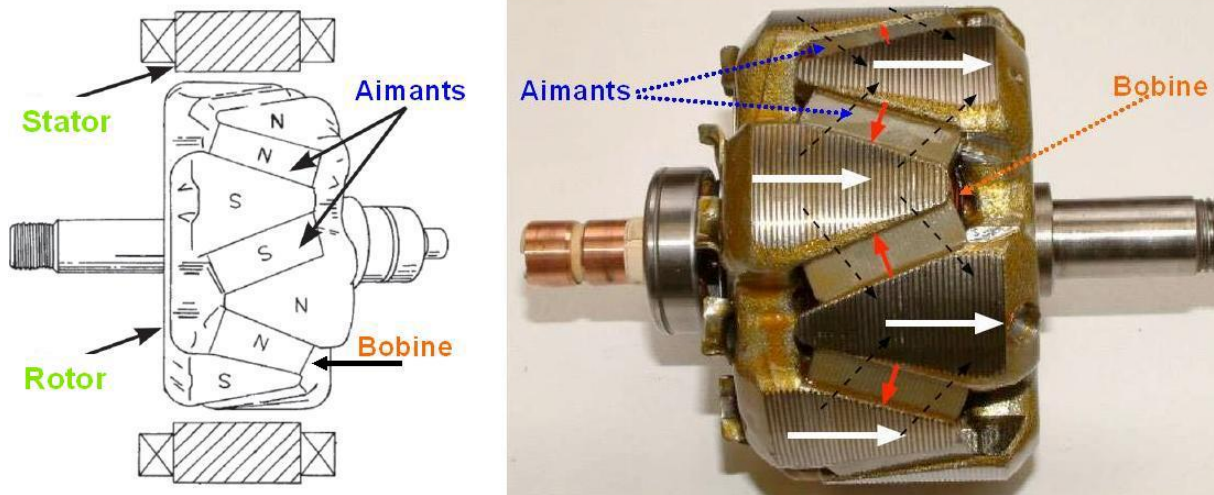


Figure I.17 – Rotor d'une machine à griffes à aimants interpolaire avec dessin des flèches : blanches pour le flux principal, noires pointillées pour le flux de fuite, et rouges pour le champ des aimants. [26]

– Machine NES (new electrical structure) :

Il s'agit d'une machine synchrone à double excitation à pôles saillants (figure I.18). Cette nouvelle structure a été développée en 1999 [28]. Le but de cette nouvelle structure était d'augmenter de la puissance massique des machines existantes (Machines à griffes) et de surmonter quelques problèmes que ces dernières ont rencontrés (difficulté de déclinaison, vitesse maximale limitée pour des machines allongées [26] ).

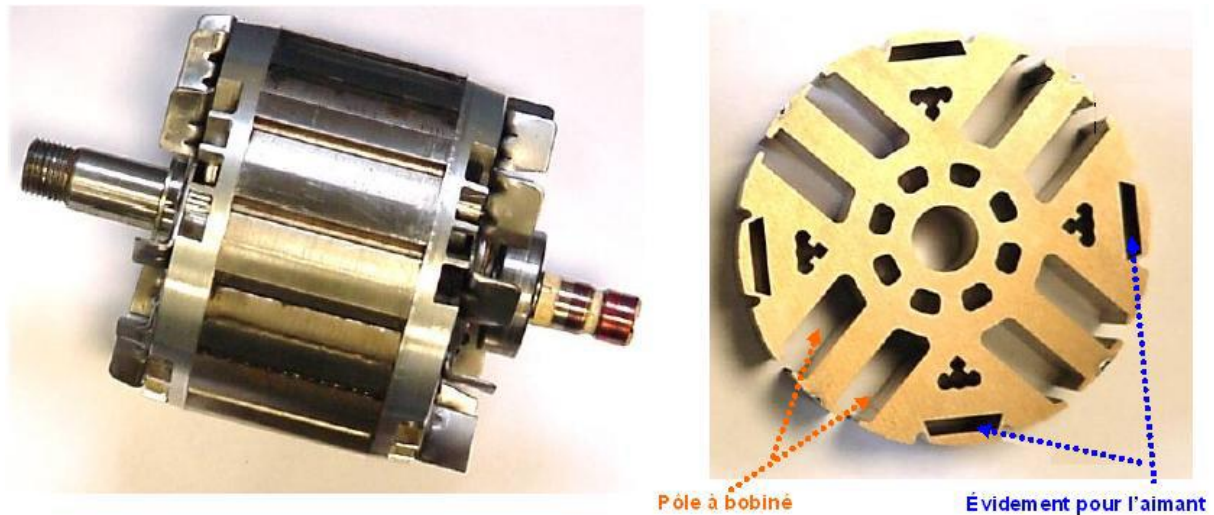


Figure I.18 – Structure NES (New electrical structure)

– Structure à double excitation de Li :

La nouvelle machine a été présentée dans la thèse de Li LI [20]. La structure de cette machine est illustrée à la figure 1.22. Les aimants permanents dans la région interpolaire sont orientés ortho-radialement. Les bobines d'excitation sont alimentées de façon à ce que le flux qu'elles produisent s'oppose au flux produit par les aimants dans le noyau des pôles respectifs. Selon la valeur et le sens du courant d'excitation, la machine peut fournir une puissance de base, fournie par les aimants seul (courant d'excitation nul), une puissance maximale, générée par les aimants et les bobines ou une puissance nulle en inversant le courant d'excitation (défluxage total). Les prototypes dimensionnés pour un cahier des charges automobile présentent un rendement supérieur à 90% dans une large plage comprenant la zone la plus sollicitée de la machine[20].

### I.4.c-iv Conclusion

Les différents types de machines proposées dans les paragraphes précédents ne sont pas exhaustifs. Nous avons choisi de se limiter aux machines synchrones à aimants permanents MSAP, à rotor bobiné MSRB et à double excitation MSDE, car ce sont les machines les plus répandues actuellement dans le secteur automobile.

Nous avons introduit également les machines asynchrones, qui, de part leur simplicité de fabrication et leur robustesse, semblent être une meilleure option pour concurrencer les machines synchrones pour les applications de véhicules électriques et hybrides.

Dans le tableau I.2, on dresse les principales caractéristiques des différentes machines présentées dans ce chapitre. La figure I.19 établit également une comparaison sommaire entre ces technologies en terme de coût, rendement, puissance massique et facilité de commande.

## Chapitre 1 : La Voiture Electrique et sa Motorisation

Table I.2 – Tableau comparatif des différentes machines présentées[26]

Type de machine	Avantages	Inconvénients
Machine asynchrone MAS	Fabrication maîtrisée, puissance massique élevée, moteur robuste, montée en survitesse aisée, longue durée de vie.	Rendement faible, Pertes Joule rotor, faible couple de démarrage, électronique coûteuse, Commande complexe
Machine synchrone à rotor bobiné MSRB	Flux variable : facilité de contrôle, absence d'aimants, large plage de vitesse	Plus volumineux et plus lourd que les MSAP, Nécessite de l'électronique supplémentaire (hacheur), fragilité des systèmes bagues balais
Machine synchrone à aimant permanent MSAP	Technologie devenue courante, puissance massique élevée, pas d'échauffement au rotor, très bon rendement, refroidissement aisé	Ondulations de couple, coût des aimants, technologie coûteuse, survitesse pénalisante, difficulté de défluxage
Machine synchrone à double excitation MSDE	Bon rendement, puissance massique relativement élevée, large plage de vitesse (défluxage facile)	Fragilité des bagues balais, nécessite de l'électronique supplémentaire (hacheur)

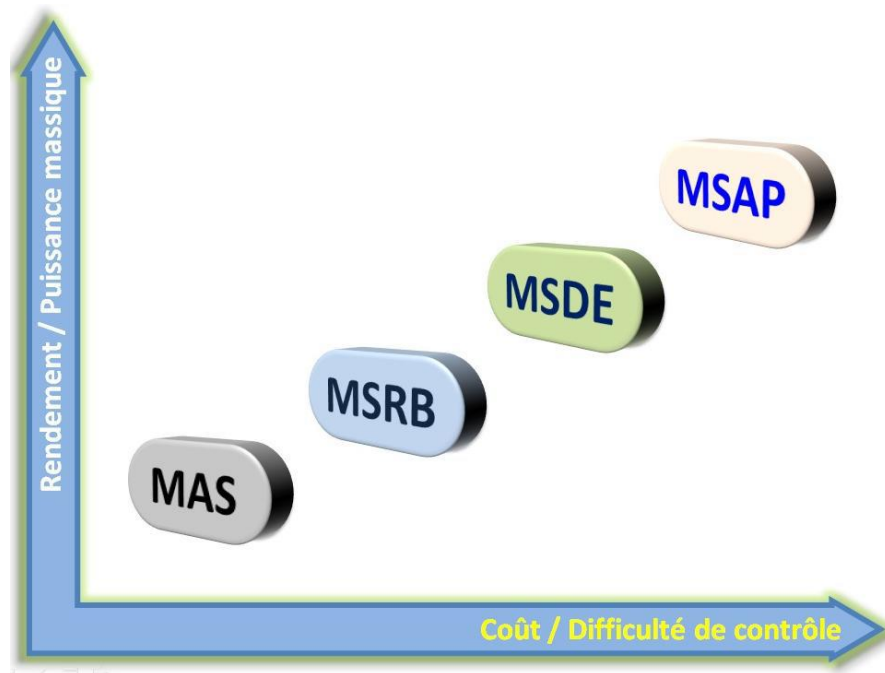


Figure I.19 – Classification des machines en termes de rendement, puissance massique, coût et commande.

Les essais qui ont été effectués sur la structure à double excitation [20] ont montré qu'elle possède de bonnes caractéristiques électromagnétiques. Par la suite, nous nous intéresserons particulièrement à cette machine dans le but de la modéliser et de mettre en place une nouvelle méthodologie de dimensionnement et d'optimisation de cette structure pour un cahier des charges donné.

Pour tout problème de dimensionnement-optimisation d'une machine électrique, nous avons besoin d'un modèle conjuguant fiabilité et rapidité qui permettra de lier les différents paramètres géométriques et physiques de la machine à ses performances électromagnétiques. Dans la section suivante nous présenterons les différentes méthodes de modélisation des machines électriques rencontrées dans la littérature.



## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre introductif, nous avons établi un historique des différentes technologies de voitures électriques et hybrides. Ces voitures qui sont actuellement en plein développement semblent être les voitures dominantes du marché de demain malgré les nombreuses difficultés qu'elles rencontrent (Coût, autonomie, motorisation, etc.).

Les constructeurs automobiles, confrontés à des normes écologiques et des exigences économiques de plus en plus sévères, relèvent le défi et se lancent massivement dans l'électrification de leurs voitures.

Nous avons présenté les différentes technologies des voitures électriques et hybrides et nous avons établis une étude comparative de ces technologies de point de vue performances, coût et écologie.

### 2.1. Introduction

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile et nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés [31,35].

Historiquement, le moteur à courant continu (M.C.C) a constitué la seule source électromagnétique de vitesse variable en raison de son facilité de commande. Cependant, la fragilité du système balai collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif afin d'écarter cet inconvénient [31,35].

Parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements à vitesse variable, le moteur synchrone à aimant permanent reste un bon candidat. Son choix devient attractif et concurrent de celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents qu'ils soient à base d'alliage ou à terre rare. Cela leur a permis d'être utilisés comme inducteur dans les moteurs synchrones offrant ainsi, non seulement d'augmenter la densité d'énergie de ces machines, mais aussi de réduire leurs dimensions et leurs pertes par rapport aux autres type de moteur, alors beaucoup davantage, entre autres, une faible inertie et un couple massique élevé aussi [31, 35, 33].

Dans ce chapitre nous présenterons les différents types d'aimant ainsi que les principales structures des machines synchrones à aimant permanent et leur domaine d'application.

La modélisation de la MSAP par la transformation de Park, puis nous traiterons l'association convertisseur machine. Une démonstration des résultats de simulation indiquant la validation du modèle utilisé sera aussi présentée.

### 2.2. Les aimants permanents

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (figure 2.1) et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants

## Chapitre 2: moteur synchrone a aiment permanent

permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur [32,44] La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe.

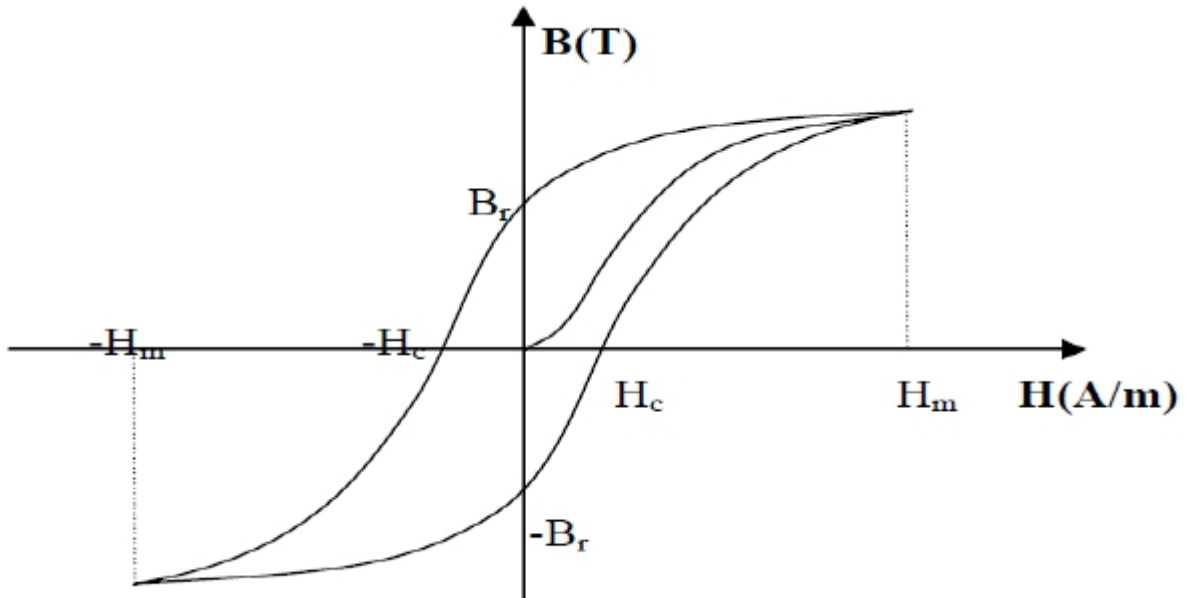


Figure 2.1.cycle d'hystérésis

### 2.2.1. Caractéristiques générales des aimants permanents

L'état de fonctionnement d'un aimant se situe dans le deuxième quadrant de son cycle d'hystérésis (voir figure 2.2).

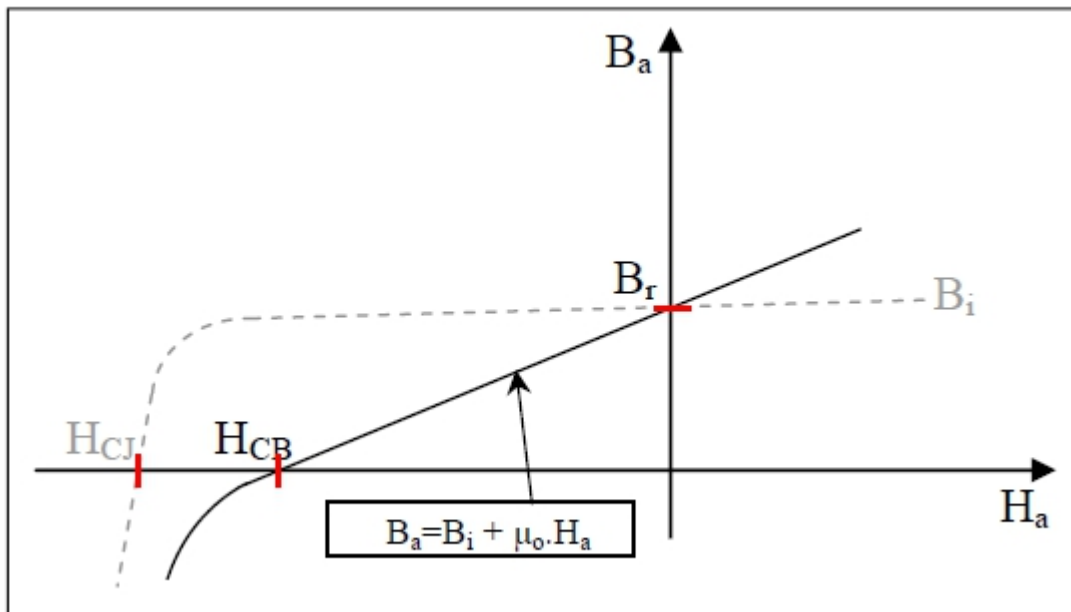


Figure 2.2 : courbe de désaimantation

Les aimants permanents sont caractérisés par plusieurs paramètres qui sont déterminants

## Chapitre 2: moteur synchrone a aiment permanent

---

pour les applications industrielles. Ces paramètres sont:

- L'induction résiduelle (ou rémanente),  $B_r$ , qui indique la puissance potentielle de l'aimant et détermine la section normale nécessaire au passage de flux utile pour le maintien du flux d'entrefer.
- le champ coercitif,  $H_{CB}$ , représentant le champ magnétisant capable d'annuler l'induction résiduelle et, dont la valeur est d'autant plus élevée que l'aimant est plus stable.
- le champ coercitif de polarisation,  $H_{CI}$ , qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau, la démagnétisation est totale et irréversible
- le produit d'énergie  $(B \cdot H)_{MAX}$ : valeur énergétique de l'aimant par unité de volume. En plus des propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître les propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix ainsi que le point de Curie (température au-delà de laquelle l'aimant perd ses propriétés magnétiques).

### 2.2.2. Les différents types d'aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types [32,44]:

- **Les Alnico:** aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel-Cobalt. Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de part leur composition métallique ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.
- **Les Ferrites:** aimants permanents, formés de matériaux de la famille des céramiques et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques. Ils sont caractérisés par une faible induction rémanente mais ont un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie – prix.
- **Les alliages métaux – terres rares:** ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium–cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de

## Chapitre 2: moteur synchrone a aimant permanent

façon considérable le volume du rotor, ce qui permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé.

Le choix de l'aimant est effectué en fonction de caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le tableau 2.1 ci-dessous.

cType D'aimants	Densité d'énergie (BH) <sub>max</sub> (kJ/ m <sup>3</sup> )	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif -H <sub>c</sub> (kA/m)	Température T <sub>max</sub> (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co <sub>5</sub>	140-200	1	2000	280	220
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites strontium	27-35	0.3-04	250	250	6
Ferrites baryum	8-30	0.2-04	170	100-240	4.5

Tableau2.1 : Exemples de propriétés magnétiques des aimants [32,42]

### 2.3. Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents

Les structures des machines synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). Celles-ci peuvent être alimentées, soit par des courants sinusoïdaux dans le cas des PMSM ou par des courants en créneaux dans le cas des BDCM. Une vue schématique des deux types de machines à aimants, à flux radial et à flux axial, est donnée par la figure 2.3.

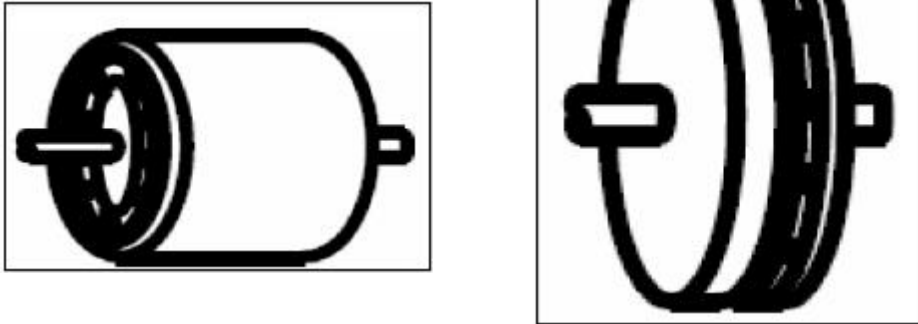


Figure 2.3 : Vue schématique des machines : (a) à flux radial, (b) à flux axial

### 2.3.1. Structures à flux radial (RFPM)

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimant la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure 2.4). Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit encastrés ou enterrés.

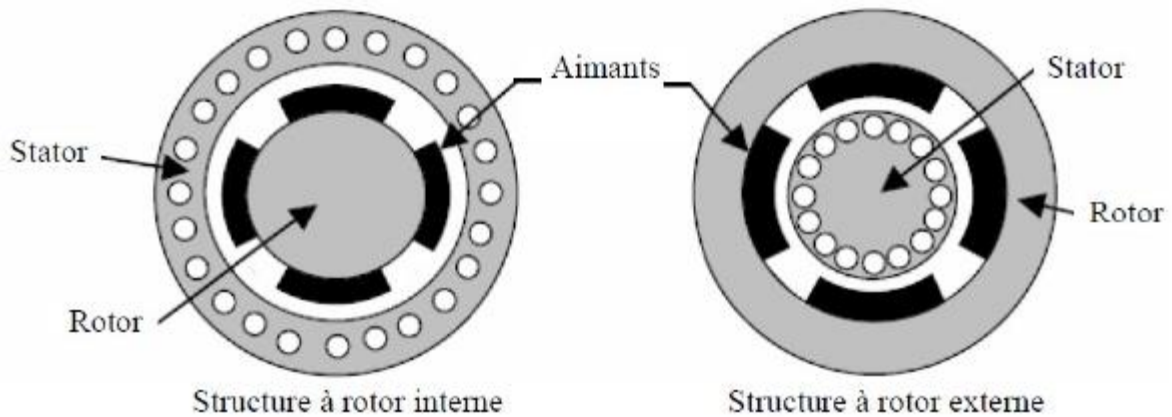


Figure 2.4 : Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe.

#### 2.3.1.1. Structures à aimants déposés en surface

Elles sont appelées machines à inducteur lisse en raison de leurs aimants disposés au niveau de l'entrefer sur un noyau ferromagnétique lisse (Figure 2.5). L'induction  $B_e$  dans l'entrefer est celle des aimants  $B_a$ . Leur aimantation peut être radiale, tangentielle ou combinée. La topologie à rotor interne est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et son faible coût de réalisation. Cependant elle présente quelques inconvénients. En effet, les aimants

## Chapitre 2: moteur synchrone a aimant permanent

permanents sont exposés aux champs de démagnétisation et sont sujets à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor [32 ,36].

La topologie à rotor externe est moins utilisée car plus difficile à réaliser et nécessite plus de volume d'aimant, présente les avantages suivants :

- Un diamètre du rotor, plus grand que pour les machines conventionnelles à flux radial, permettant d'avoir un nombre plus élevé de pôles et un couple plus grand.
- Une meilleure qualité de collage des aimants sur le rotor grâce à la force centrifuge qui pousse les aimants vers l'extérieur, rendant leur détachement presque impossible.

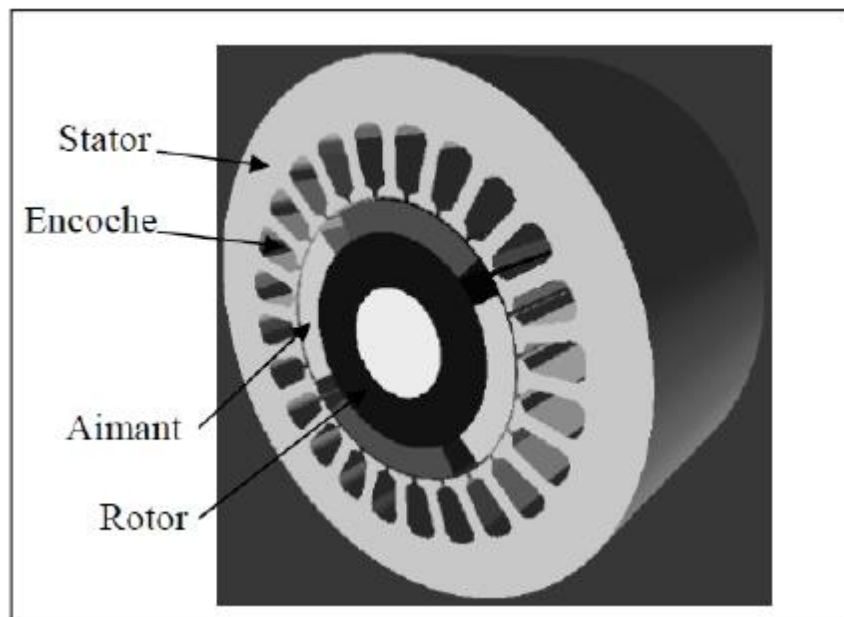


Figure 2.5 : Structure à aimants déposés en surface (rotor interne)

### 2.3.1.2. Structures à aimant encastrés

Des aimants de forme simple sont insérés à la surface du rotor, ce qui leur permet d'avoir une bonne tenue mécanique (figure 2.6). L'espace entre les aimants est couvert par des dents rotoriques créant une saillance inversée ( $X_d < X_q$ ). Cette saillance produit un couple de réluctance aussi important que le couple d'interaction dû aux aimants permanents [32, 36, 41].

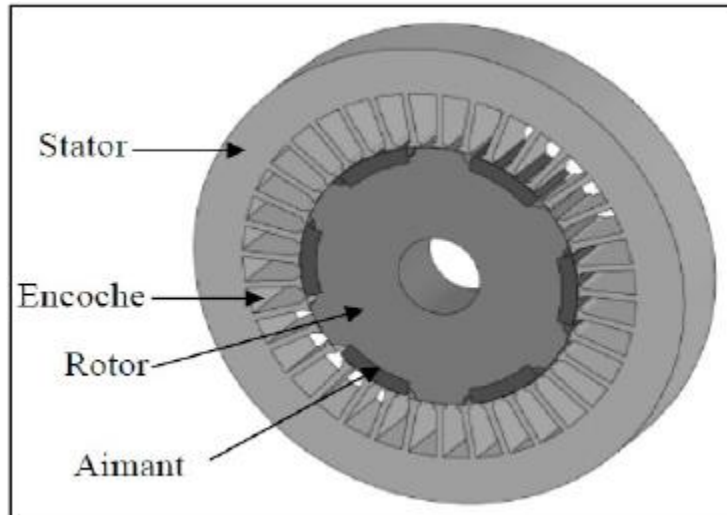


Figure 2.6 : Structure à aimants encastrés

### 2.3.1.3. Structures à aimants enterrés

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor. La robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes. Deux configurations du rotor peuvent être distinguées (voir Figure 2.7), l'une est à concentration de flux et l'autre à structure classique.

L'avantage de ces deux configurations réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants, permettant ainsi d'assurer des niveaux d'inductions élevées dans l'entrefer [32,36]. De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la démagnétisation.

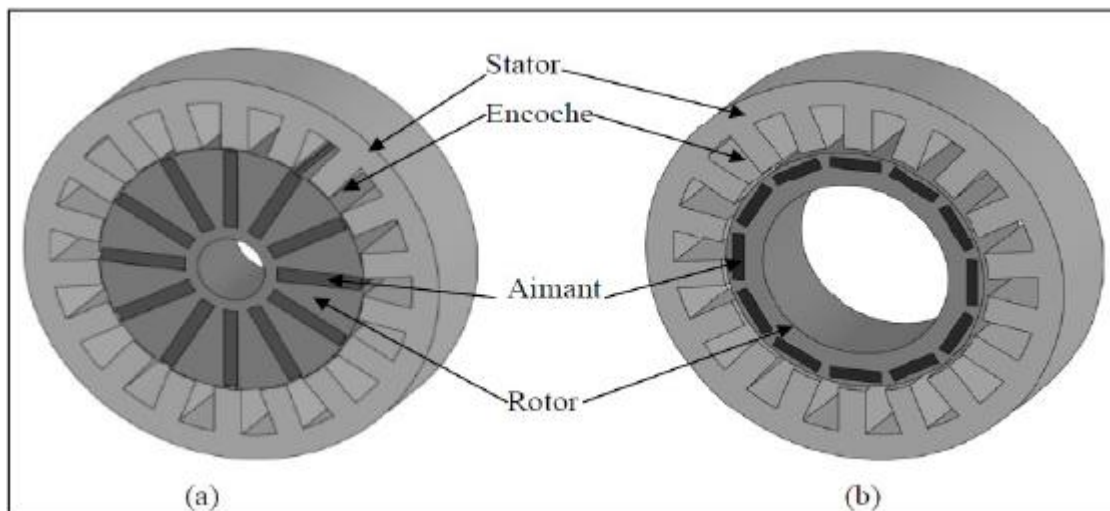


Figure 2.7 : Structure à aimants enterrés : (a) avec concentration de flux, (b) structure classique



### 2.3.2. Structures à flux axial (AFPM)

Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales [32, 36, 40]. Comparées à la structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale. Différentes configurations à flux axial existent: celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (Figure 2.8) et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors (Figure 2.9) ou un seul rotor inséré entre deux stators (Figure 2.10). L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [32,41].

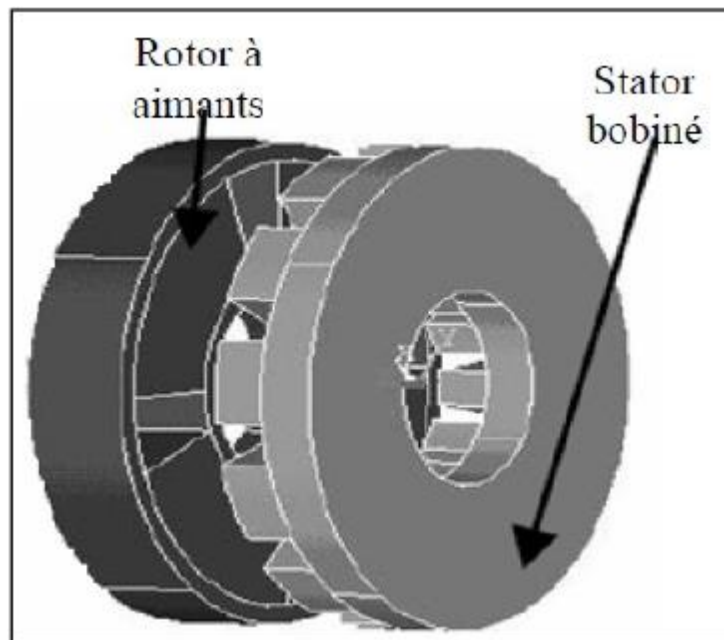


Figure 2.8 : Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator.

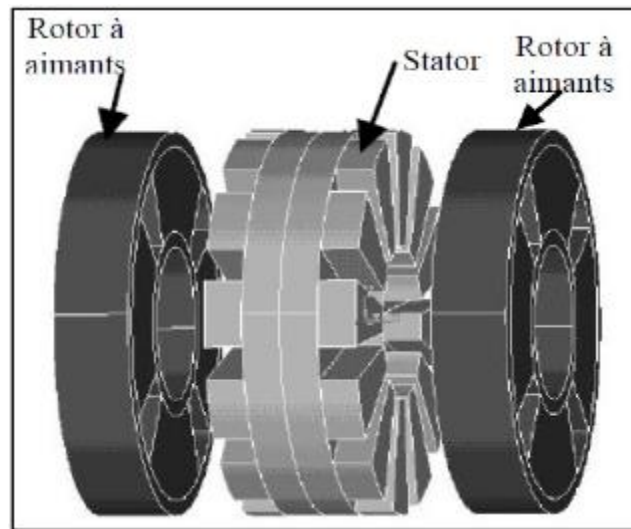


Figure 2.9 : Structure à flux axial avec double rotor et un stator.

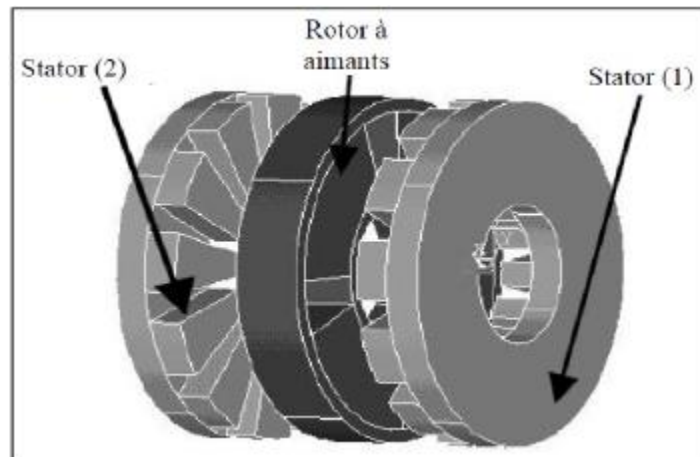


Figure 2.10 : Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor.

### 2.4. Applications des machines synchrones à aimants permanents

Ces machines ont trouvé un vaste champ d'applications dans plusieurs domaines (équipement domestique, lecteurs CD/DVD et disques durs d'ordinateur, voiture et vélo électriques, transport, aérospatial, machines outils, servomoteurs, équipement médical et propulsion des navires). Celles-ci sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts. La figure I.11 illustre quelques applications de ces machines. Il est utilisé pour les entraînements 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

## Chapitre 2: moteur synchrone a aiment permanent

l'espace et dans d'autres applications plus particulières (domestique,...).



Figure 2.11 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents

### 2.5. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie 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 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.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- les machines synchrone à rotor bobiné
- les machines synchrone à réluctance
- les machines synchrone à aimants permanents.

Nous intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé).

La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport a la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.



Figure 2.12 : Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques

## Chapitre 2: moteur synchrone a aimant permanent

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $120^\circ$ .

Le rotor de la MSAP 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, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

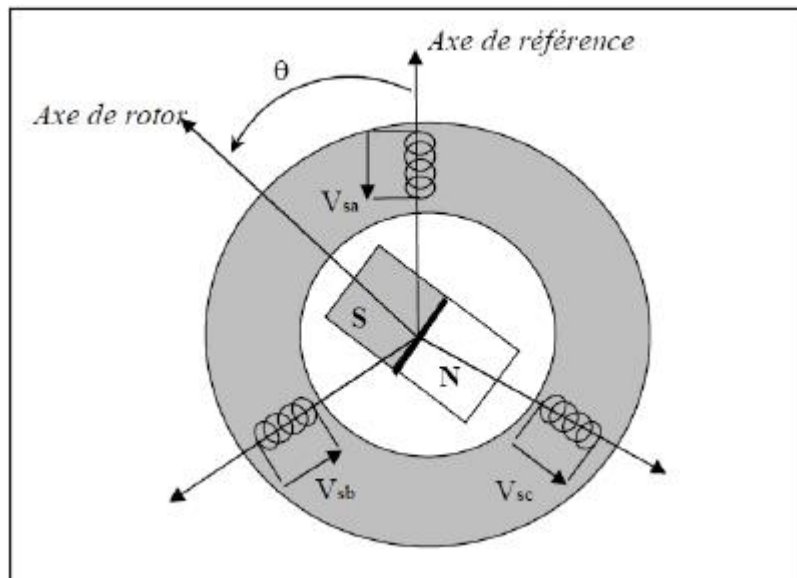


Figure 2.13 : Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent [31,37]

### 2 .6. Modélisation de la MSAP

Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses à savoir que :

- Le moteur possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelle sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- La distribution des forces électromotrice, le long de l'entrefer, est supposée sinusoïdale.
- Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés.
- La perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air.

## Chapitre 2: moteur synchrone a aimant permanent

L'excitation étant faite par un aimant permanent, telle que le flux d'excitation est considéré comme constant, par ailleurs, l'aimant est considéré comme un enroulement sans résistance ni inductance propre et mutuelle, mais comme source de flux [31,43].

### 2.6.1 Equations de tensions et flux

Les tensions, flux et courants statoriques triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes  $[V_s]$ ,  $[\Phi_s]$  et  $[I_s]$  respectivement.

L'équation tension dans le référentiel du stator s'écrit [31, 37, 38]:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad \boxed{2.1}$$

Avec :

$$[V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T, [I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T, [\Phi_s] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T \quad \boxed{2.2}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

**$R_s$**  Résistance des enroulements statoriques.

Les flux statoriques et rotoriques ont pour expression :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [\Phi_f]$$

Et

$$[\Phi_f] = \Phi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Ou :

$\Phi_{sf}$ : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements Statoriques

$\theta$ : Position absolue du rotor en degré électrique

## Chapitre 2: moteur synchrone a aiment permanent

[L<sub>SS</sub>] Étant la matrice des inductances statoriques.

Dans la machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statoriques [L<sub>SS</sub>] est fonction de la position. Elle contient deux termes : [L<sub>s0</sub>] qui est constant, et [L<sub>s2</sub>(θ)] qui est en fonction de l'angle θ = P θ<sub>m</sub> étant l'angle électrique et θ<sub>m</sub> est la position mécanique du rotor par rapport au stator.

2.3

$$[L_{SS}] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)]$$

Le terme [L<sub>s0</sub>] à pour expression :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix}$$

2.4

Le terme [L<sub>s2</sub>(θ)] s'écrit, dans le cadre de la théorie du premier harmonique :

$$[L_{s2}(\theta)] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos 2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

2.5

Les inductances propres et mutuelle L<sub>s0</sub>, M<sub>s0</sub> et L<sub>s2</sub> sont des constantes.

En introduisant (2.2) dans (2.1) on aura :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{SS}][I_s] + [\Phi_f])$$

2.6

On remarque que l'équation (2.6) est non linéaire et couplée pour supprimer ce problème on adopte des changements de variable et des transformations qui réduisent la complexité du système. Dans ce cas nous procédons à la Transformation de Park, qui consiste à transformer les enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (d, q) tourne avec le rotor.

### 2.6.2. Transformation de Park

A l'aide de la transformation de Park, on passe des grandeurs statoriques réelles (tension, flux courant) à leurs composantes fictives appelés les composantes d-q.

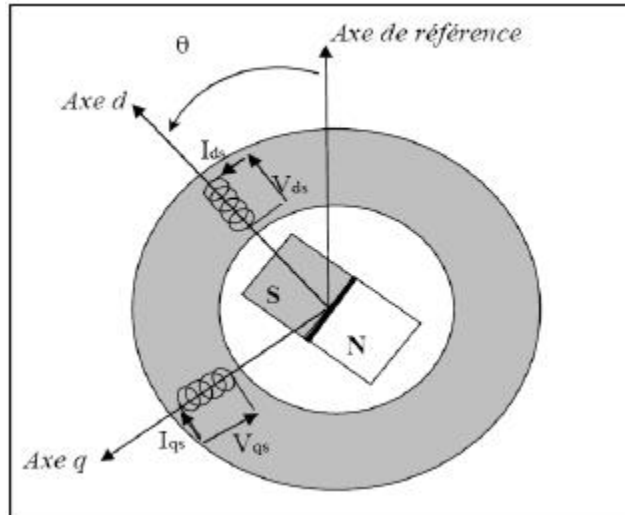


Figure 2.14 : Machine équivalente au sens de Park [31,37]

Dans le système d'équations (2.6) effectuons le changement de la variable suivant [31,37]:

$$\begin{cases} [P(\theta)][V_{dqhs}] = [V_s] \\ [P(\theta)][I_{dqhs}] = [I_s] \end{cases} \quad \boxed{2.7}$$

Avec :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \boxed{2.8}$$

$[P(\theta)]$  étant la matrice de la transformation de Park qui permet le passage des grandeurs statorique  $[I_s]$ ,  $[V_s]$  et  $[\Phi_s]$  à leurs composants relatives  $I_{dqhs}$  et  $V_{dqhs}$ .

L'application de la transformation de Park à l'équation (I.8) donne :

$$[P(\theta)][V_{dqhs}] = [R_s][P(\theta)][I_{dqhs}] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][P(\theta)][I_{dqhs}]) + \frac{d[\Phi_f]}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad \boxed{2.9}$$



## Chapitre 2: moteur synchrone a aiment permanent

Avec :

$$\frac{d}{dt} = s$$

Si on prémultiplie tous ces termes par  $[P(\theta)]^{-1}$  et en sachant que :

$$[R_s] = [R_s] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On peut :

Écrire les équations simplifiées des tensions :

$$[V_{dqhs}] = [R_s][I_{dqhs}] + [P(\theta)]^{-1} \left\{ \frac{d}{dt} ([L_{ss}][P(\theta)][I_{dqhs}]) + \frac{d[\Phi_f]}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \right\} \quad 2.10$$

Avec :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad 2.11$$

Les équations électriques dans le repère de Park :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \omega \Phi_{ds} \end{cases} \quad 2.12$$

Les flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_d I_d + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_q I_q \end{cases} \quad 2.13$$

En introduisant (2.13) dans (2.12) on aura Le modèle électrique du MSAP sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_{ds} \frac{d}{dt} I_{ds} - \omega L_{qs} I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_{qs} \frac{d}{dt} I_{qs} + \omega L_{ds} I_{ds} + \omega \Phi_{ds} \end{cases} \quad 2.14$$

### 2.6.3. Expression de la puissance et du couple électromagnétique

## Chapitre 2: moteur synchrone a aiment permanent

Selon Park, l'expression de la puissance s'écrit comme suit :

$$p(t) = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}$$

2.15

En remplaçant  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  par leur expressions il vient :

$$p(t) = \frac{2}{3} \left[ R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) - \left( I_{ds} \frac{d}{dt} \Phi_{ds} + I_{qs} \frac{d}{dt} \Phi_{qs} \right) + \frac{d}{dt} (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \right]$$

2.16

D'où :

Le 1<sup>er</sup> terme représente la chute de tension Ohmiques (pertes par effet joule).

Le 2<sup>ème</sup> terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée.

Le 3<sup>ème</sup> terme représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

Sachant que :

$$P_e = C_e \cdot \Omega$$

2.17

D ou :

$$C_e = \frac{3}{2} p [\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}]$$

2.18

En remplaçant  $\Phi_{ds}$  et  $\Phi_{qs}$  par leur expressions il vient :

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) I_{ds} I_{qs} + \Phi_f I_{qs}]$$

2.19

Avec

$p$  : nombre de paire de pôles.

L'équation de mouvement de la machine est :

$$C_e - C_r - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt}$$

2.20

Avec

- ✓  $J$ : Le couple d'inertie des masses tournantes ;
- ✓  $C_r$ : Couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique ;
- ✓  $C_e$ : Couple électromagnétique ;
- ✓  $\Omega$ : vitesse mécanique de rotation ;
- ✓  $f$ : Coefficients des frottements visqueux.
- ✓  $\Phi_f$ : Flux des aimants permanents.

### 2.7. Schéma fonctionnelle de la MSAP :

D'après les équations (2.14), (2.19) et (2.20), on obtient le système d'équations suivant

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_{ds} = \frac{1}{L_{ds}} (V_{ds} - R_s I_{ds} + \omega L_{qs} I_{qs}) \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = \frac{1}{L_{qs}} (V_{qs} - R_s I_{qs} + L_{ds} \omega I_{ds} - \omega \Phi_f) \\ C_e = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) I_{ds} I_{qs} + \Phi_f I_{qs}] \\ C_e - C_r - f \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \end{array} \right. \quad 2.21$$

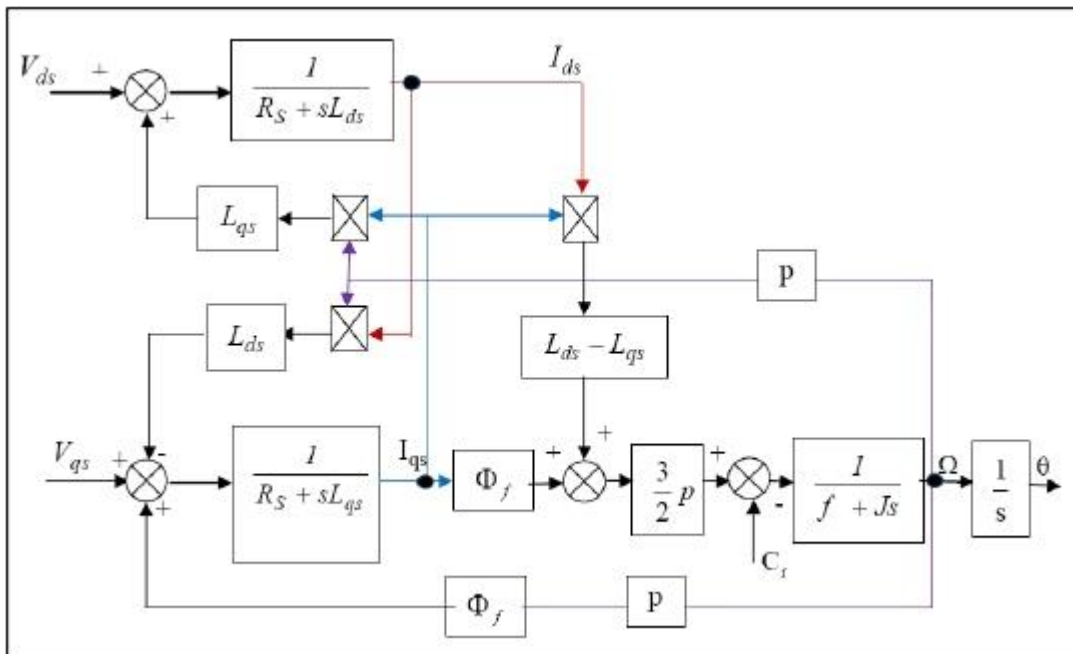


Figure 2.15 : Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension

### 2.8. Mise sous forme d'équation d'état

Considérons les tensions ( $V_{ds}, V_{qs}$ ) et le flux d'excitation  $\Phi_f$  comme grandeurs de commande, les courants statoriques ( $I_{ds}, I_{qs}$ ) comme variable d'état et le couple résistant comme perturbation. A partir des équations (2.14) on peut écrire le système d'équation suivant :

## Chapitre 2: moteur synchrone a aiment permanent

$$\begin{cases} [\dot{X}] = [A][X] + [B][V] \\ [Y] = [C][X] + [D][V] \end{cases}$$

2.22

- ✓ [A] : Matrice fondamentale qui caractérise le système
- ✓ [B] Matrice d'entrée
- ✓ [V] : Vecteur de commande
- ✓ [X] : Vecteur d'état (posons  $[X] = [I_{ds} \ I_{qs}]^T$ )
- ✓ [C] : Matrice de sortie
- ✓ [D] : Matrice de transfert direct

Sous forme matricielle on peut écrire le système d'équation (2.17) comme suit :

$$\frac{d}{dt}[X] = [A][X] + [B][V]$$

2.23

Avec :

$$[X] = [I_{ds} \ I_{qs}]^T$$

2.24

$$[V] = [V_{ds} \ V_{qs} \ \Phi_f]^T$$

2.25

Et :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & -\omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ \Phi_f \end{bmatrix}$$

2.26

Et on pose :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & -\omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix}$$

On peut écrire la matrice  $[A]$  comme suit :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \omega \quad \boxed{2.27}$$

Et :

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \omega \quad \boxed{2.28}$$

### 2.9. Modélisation de l'association MSAP-Onduleur de tension

Les onduleurs de tension, associés aux machines à courant alternatif, sont de nos jours très largement utilisés dans les systèmes d'entraînement industriels. En premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation de convertisseurs statiques de plus en plus performants. En second lieu, l'évolution des techniques numériques, notamment l'utilisation sans cesse grandissante des processeurs de signaux (DSP "Digital Signal Processing") [32,38], permet désormais d'exécuter en temps réel des algorithmes complexes de contrôle des convertisseurs.

#### 2.9.1. Définition de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Si on dispose à l'entrée d'une tension continue, grâce à des semi-conducteurs, on relie chacune des bornes du récepteur une tension tantôt positive, tantôt négative [31, 39, 34].

Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du l'onduleur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation, en anglo-saxon) [31,39].

On distingue plusieurs types d'onduleurs :

Selon la source :

- onduleurs de tension.
- onduleurs de courant.

Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc.), Selon le nombre de niveaux (2,3, etc.).

### I.9.2. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la figure, où  $T_i$  et  $T'_i$  ( $i=a, b, c$ ) sont des transistors MOSFET,  $S_i$  et  $S'_i$  sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que :

- si  $S_i = 1$ , l'interrupteur  $T_i$  est passant et  $T'_i$  est ouvert,
- et si  $S'_i = 0$ , l'interrupteur  $T_i$  est ouvert et  $T'_i$  est passant.

Le convertisseur coté réseau est constituée d'un redresseur triphasé à diodes et d'un filtre, et le convertisseur coté machine, et un onduleur de tension triphasé.

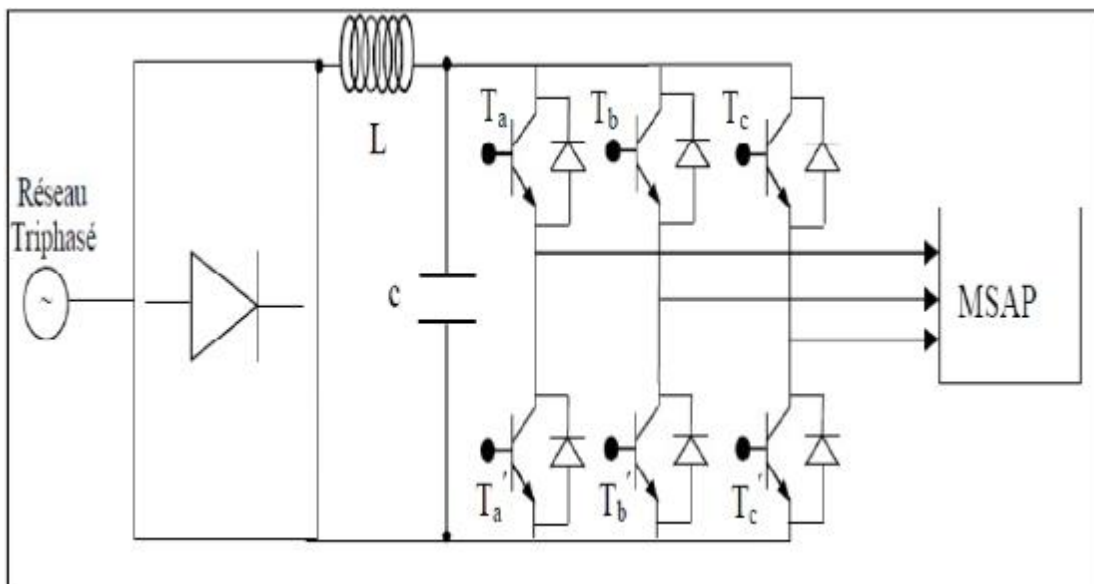


Figure 2.16 : Schéma de l'association machine synchrone-onduleur de tension

On considère l'alimentation de l'onduleur est comme une source parfaite, supposée être constituée par deux générateurs de f.é.m égale à  $E$  connectés entre eux par un point noté  $O$ .

L'onduleur est constitué de trois bras, chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Les transistors sont shuntés par des diodes de récupération, Chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure (2.18). La machine synchrone est connectée en étoile, est la tension continue alimentant l'onduleur de tension.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

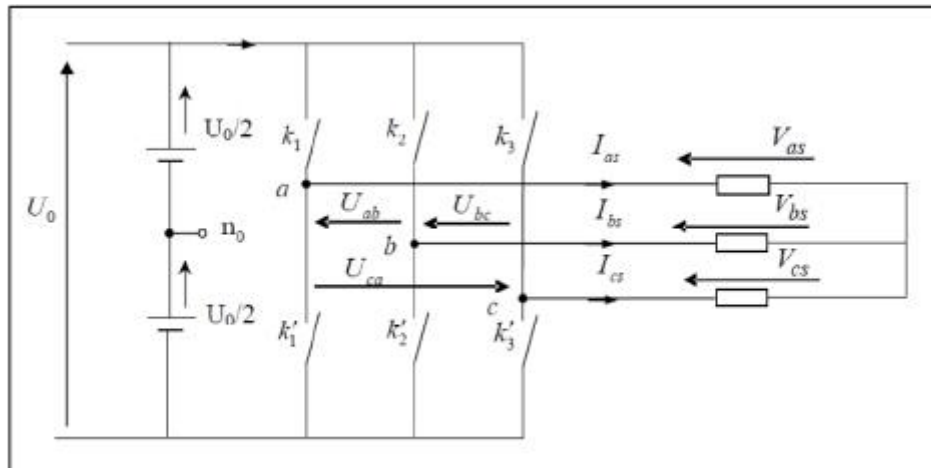


Figure 2.17: Schéma équivalent de l'onduleur

$$U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = U_0(S_a - S_b)$$

2.29

$$U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = U_0(S_b - S_c)$$

2.30

$$U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = U_0(S_c - S_a)$$

2.31

Les tensions  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$  et  $V_{cs}$  forment un système de tension triphasées équilibrées alors :

De (2.29) et (2.31) en trouve :

$$V_{as} = \frac{U_0}{3}(2S_a - S_b - S_c)$$

2.32

De (1.29) et (1.30) en trouve :

$$V_{bs} = \frac{U_0}{3}(2S_b - S_a - S_c)$$

2.33

De (3.30) et (3.31) en trouve :

## Chapitre 2: moteur synchrone a aiment permanent

$$V_{cs} = \frac{U_0}{3}(2S_c - S_a - S_b)$$

2.34

Donc

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

2.35

Dans notre travail, l'onduleur est commandé par la technique de Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI). Elle consiste à imposer aux bornes de la machine des tensions, hachées à fréquence fixe, évoluant en fonction des références de tension obtenues à partir des régulateurs des courants. A l'aide d'un signal triangulaire appelé porteuse, ces tensions sont modulées en largeur d'impulsion afin de déterminer les instants de commutation et la durée de conduction de chaque interrupteur de l'onduleur. A chaque instant, l'un des deux interrupteurs de chaque bras est en conduction et l'autre est bloqué.

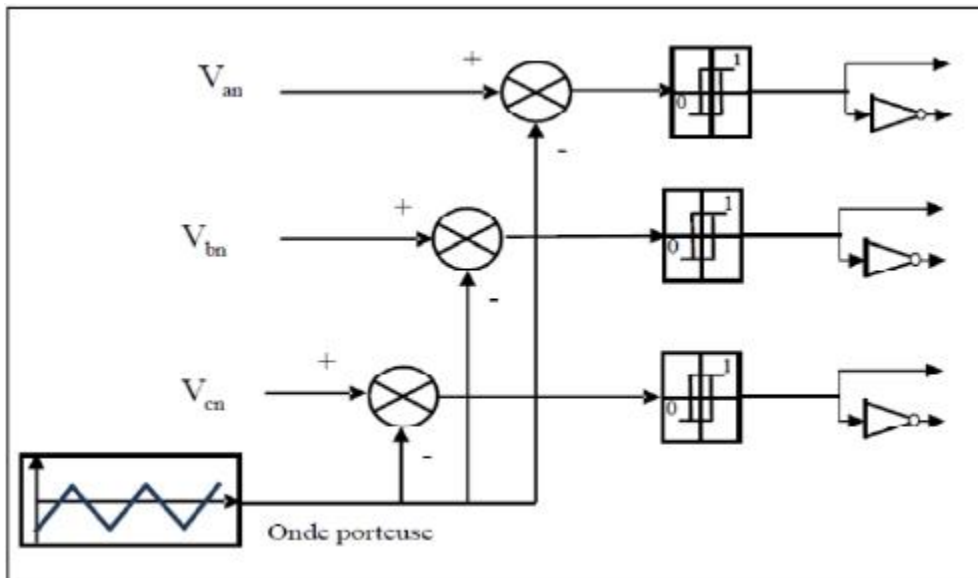


Figure 2.18: Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale



### 2.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, le modèle de la machine synchrone à aimant permanent dans un système triphasée et de sa transformation dans un système biphasé .En choisissant la transformation de Park. Il est important de noter que le choix du référentiel et les transformations triphasé biphasé permettent d'obtenir une première de l'écriture des équations d'états.

# Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente un modèle de calcul des paramètres des machines synchrones à aimants permanents. Ce modèle basé sur les fonctions analytiques se prêtant bien à ce genre de traitement, nous avons donc naturellement recherché au départ à développer un modèle basé sur leur utilisation. Un modèle analytique a été proposé afin de prédéterminer les caractéristiques géométriques et électriques de la génératrice synchrone à aimants permanents.

## 3.2 Dimensionnement de la machine synchrone à aimants permanents

### 3.2.1 Configuration de la machine

Soit une machine synchrone à aimants permanents, constituée de trois phases au stator et des aimants permanents au rotor de type (NdFeB) avec  $p$  pairs de pôles. La configuration de la machine ainsi que les paramètres géométriques de la machine utilisée lors de la modélisation sont représentés sur la figure (3.1).

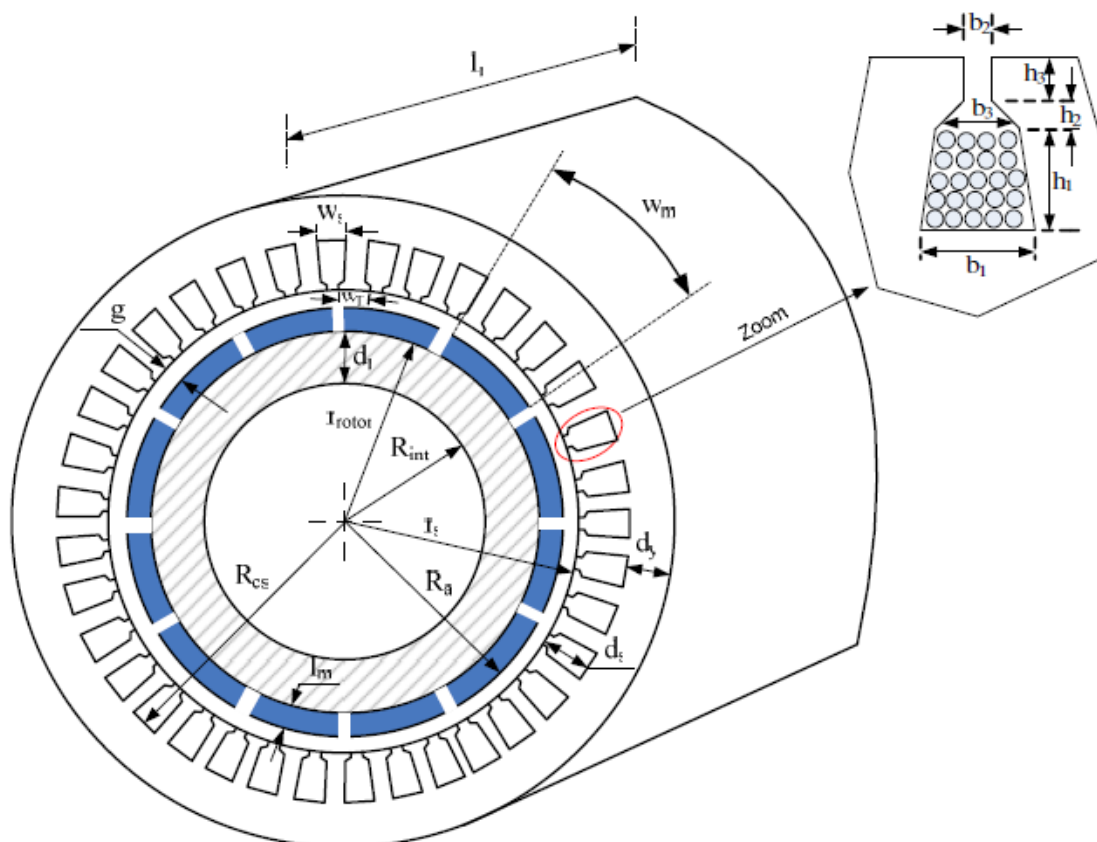


Figure (3.1) : Paramètres géométrique de la machine[43]

# Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

---

## 2.2.2 Définition des paramètres

Nous allons ici définir les paramètres géométriques de la machine que nous utiliserons lors de la modélisation.

$l_m$  : Epaisseur radiale de l'aimant au rotor.

$g$  : Epaisseur d'entrefer.

$w_m$  : Largeur d'aimant pour un pôle.

$w_s$  : Largeur d'une encoche statorique.

$w_T$  : Largeur d'une dent statorique.

$d_s$  : Profondeur d'encoche.

$d_y$  : Profondeur de la culasse de la machine.

$l_r$  : Longueur active de la machine.

$r_s$  : Rayon d'alésage de la machine.

## 3.2.3 Démarche de dimensionnement

Le principe du dimensionnement repose donc sur le choix de plusieurs paramètres d'entrée que l'utilisateur modifie à son gré. Nous allons montrer qu'à partir d'un choix judicieux des paramètres d'entrée, les relations analytiques permettent de déterminer toutes les dimensions définissant la machine [45].

## 3.2.4 Hypothèses de dimensionnement

Ayant effectué les choix initiaux issus de l'analyse du cahier des charges et à partir des propriétés générales des différentes solutions, un module de dimensionnement basé sur un modèle analytique et des équations algébriques a été développé. A partir de l'expression du couple électromagnétique développé par l'interaction du flux des aimants et des courants et en considérant la loi de conservation du flux, il est possible de mettre en relation les grandeurs magnétiques et géométriques de la machine.

Un choix judicieux du vecteur d'entrée permet alors de déterminer toutes les dimensions définissant la machine [46]:

- Nous fixons le facteur de remplissage à  $K_p = 0.833$  ; cette valeur correspond à  $\alpha_{aimant} = 45^\circ$ .

## Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

---

- La largeur angulaire des aimants est choisie afin de minimiser certains harmoniques de la fem et d'assurer un bon rapport entre le volume d'aimant et la valeur efficace de l'induction dans l'entrefer.

- Nous imposons également la valeur du rapport profondeur d'encoche / rayon d'alésage de sorte que  $R_{dr} = 0.25$ .

Le coefficient de remplissage d'encoche ( $K_r = 0.5$ ) représente le pourcentage de la surface d'encoche occupée par les conducteurs.

- L'aimantation rémanente et la perméabilité relative des aimants dépendent des caractéristiques et de la température des aimants. Dans notre application, nous avons choisi des aimants de type Néodyme Fer Bore ( $B_R = 1.1 T$ ,  $\mu_r = 1.05$ ).

Le rapport rayon d'alésage / longueur active de la machine.

Le rapport profondeur d'encoche / rayon d'alésage  $R_{dsre} = 0.25$ .

Ainsi, le rayon d'alésage est connu et toutes les dimensions de la machine synchrone peuvent être déterminées à l'aide des relations suivantes :

- La longueur active de la machine  $l$  vaut:

$$R_{lre} = \frac{r_e}{l} = 0.8 \Rightarrow l = R_{lre} \times r_e = 78.75mm \quad (3.1)$$

- Le profondeur des encoches  $d_s$  vaut :

$$d_s = r_e \times R_{dsre} = 63 \times 0.35 = 15.75mm \quad (3.2)$$

- La valeur de l'entrefer est calculée par la relation empirique suivante:

$$g = 0.02 + 0.003\sqrt{r_e l} = 0.5mm \quad (3.3)$$

-Le nombre d'encoches au stator  $N_{enc}$  se déduit du nombre d'encoches par pôle et par phase :

$$N_{enc} = 6p \quad N_{ep} = 24 \quad . \quad \text{Avec } N_{ep} = 2$$

# Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

## 3.2.5 Les formules du dimensionnement de la machine

Quelques formules analytiques simples permettent d'obtenir un premier dimensionnement de la machine ; ce dernier est certes approximatif mais cependant fiable. Il constitue ainsi le dimensionnement de base de la machine.

Le couple électromagnétique a pour expression :

$$T = 2\pi \cdot r^2 \cdot l \cdot B_{1g} \cdot k_s \cdot k_{B1} \tag{3.4}$$

Avec :  $B_{1g}$  (T) la densité de flux dans l'entrefer,  $K_s$  (A/m) la valeur efficace de la charge linéique de courant,  $K_{B1}$  le coefficient de bobinage.

Avec  $B_g$  valeur entre [0.85-0.95] (T)

$$B_g = B_r \frac{\frac{lm}{\mu r}}{k_c g + \frac{lm}{\mu r}} = 0.9 T \tag{3.5}$$

Avec :  $K_c$  g l'entrefer corrigé par le coefficient de Carter  $K_c$  . Ce dernier prend en compte de manière moyenne les effets des encoches sur la valeur de l'entrefer.

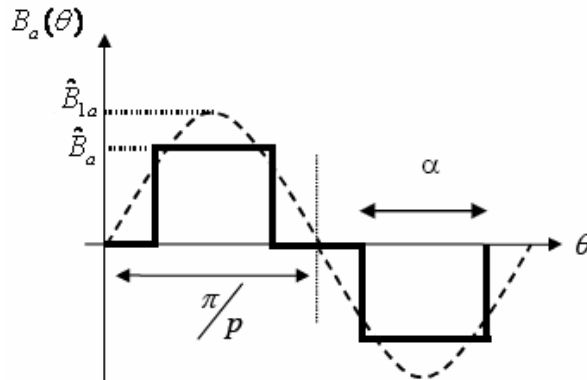


Figure (2.2) : Induction créée par l'aimant dans l'entrefer

Nous pouvons, en première approximation pour les calculs, poser  $K_c = 1.05$  .

La valeur crête du fondamental de l'induction créée par l'aimant dans l'entrefer est définie par la relation :

$$B_{1g} = \frac{4}{\pi} B_g \sin \alpha \text{ aimant} = 0.57 T \tag{3.6}$$

La charge linéique  $k_s$  duite avec la formule suivent :

## Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

$$k_s = \frac{T}{B_1 g \cdot 2\pi \cdot r \cdot e^2 \cdot l \cdot k_B} = 29.792 \text{ kA/m} \quad (3.7)$$

-avec  $k_B=0.9$

Elle caractérise le courant réparti le long de l'entrefer par unité de longueur. Il s'agit d'une donnée essentielle pour le dimensionnement car elle influe directement sur l'échauffement [47]. Cette grandeur varie généralement de 10000 à 50000 A/m.

### 3.2.6 L'épaisseur de la culasse :

Nous pouvons alors exprimer l'épaisseur de la culasse par la relation :

$$d_y = \frac{w_m \times B_g}{B_y} = \frac{2re \times \alpha \times B_g}{2P \times B_y} = 27.31 \text{ mm} \quad (3.8)$$

### 3.2.7 L'épaisseur de l'aimant :

L'épaisseur de l'aimant est donnée par:

$$l_m = \frac{\mu_r \cdot k_c}{\frac{B_r}{B_g} - 1} = 4.725 \text{ mm} \quad (3.9)$$

### 3.2.8 Ouverture de l'aimant :

$$\alpha = \frac{w_{pm}}{\tau_p} = 0.5 \quad (3.10)$$

L'équation veut dire que le pôle fait la moitié du pas polaire.

Remarque : Dans l'industrie, il est plus difficile de meuler des blocs de pièces d'aimants arqués pour les collés sur le dos des MSAPs, c'est pourquoi, des pièces de forme parallélépipède sont construites et juxtaposées pour former le pôle voulu, comme le montre la figure 3.2.

## Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

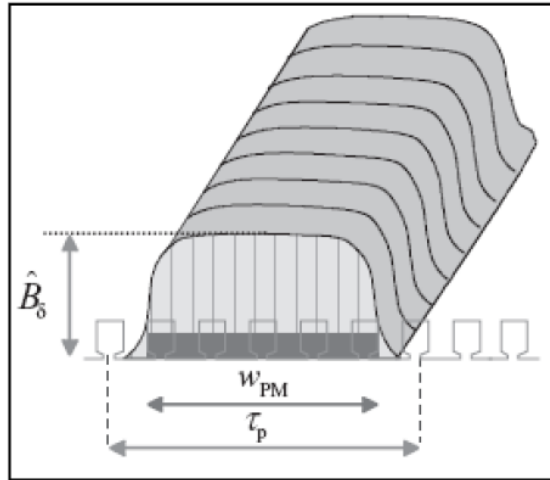


Figure 3.2 : Flux d'induction créé dans l'entrefer du moteur sectoriel D'un moteur synchrone aplati (à aimant surfacique), remarquer la largeur des aimants est plus petite que le pas polaire [2].

### Le pas polaire :

C'est la distance entre deux pôles voisins différents, il est donné par la relation suivante :

$$\tau_p = \frac{2\pi \cdot r_e}{p} = 98.96 \text{ mm} \quad (3.11)$$

### 3.2.10 Rayon extérieur :

En peut déduire le rayon extérieur avec les résultats précédents

$$r_{ex} = r_e + dy + de = 107 \text{ mm} \quad (3.12)$$

# Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

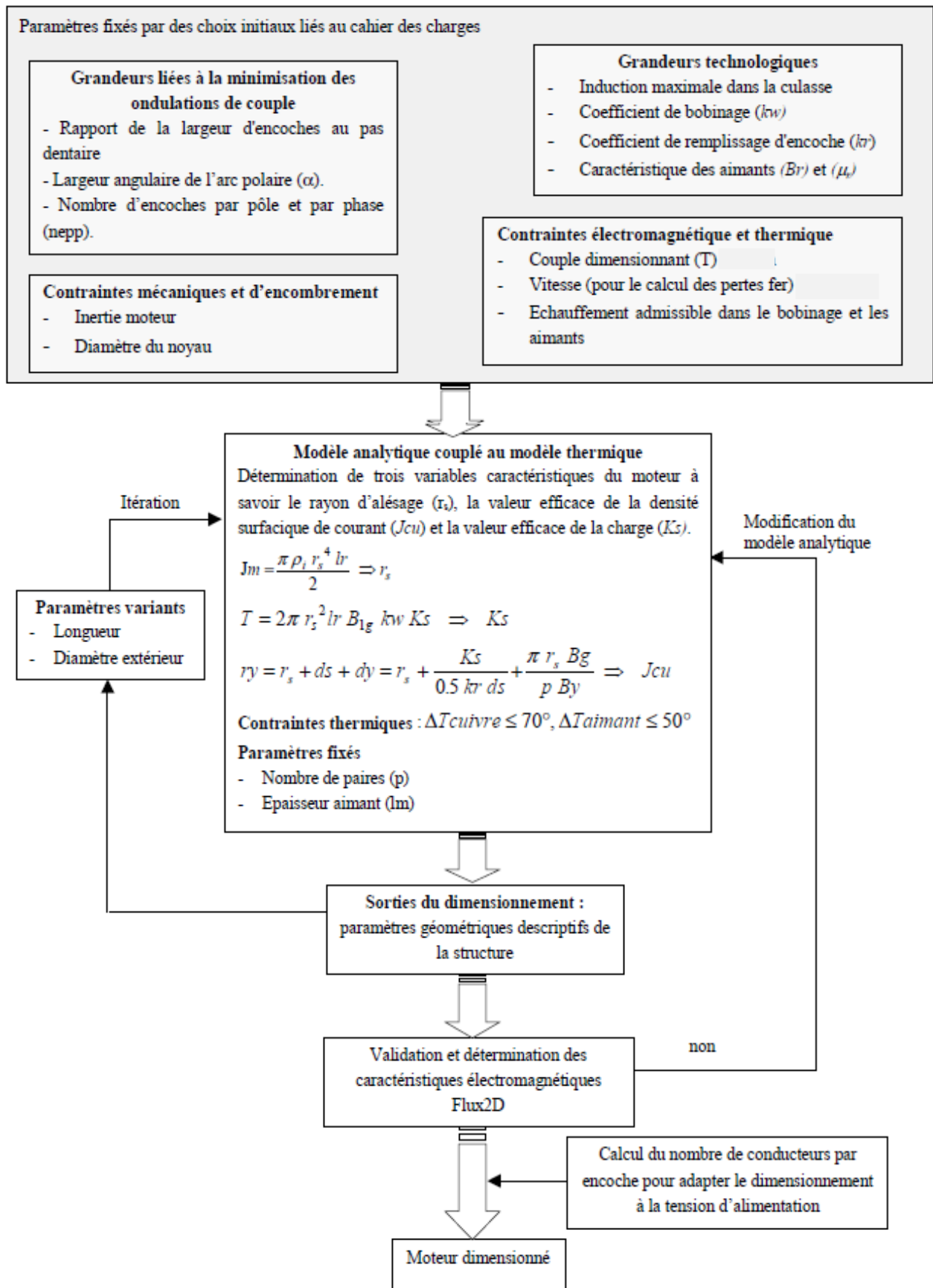


Figure 3-3: Démarche de dimensionnement du moteur [45]



# Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

L'ensemble de ces contraintes permet de ramener le dimensionnement en un système d'équations. Cette spécificité du cahier des charges nous dispense de l'emploi d'algorithme d'optimisation car dans notre cas, beaucoup de paramètres initialement considérés comme des entrées du dimensionnement sont fixés par le cahier des charges.

## 3.2.11 Géométre de l encoche :

Supposons qu'une encoche est définie selon les paramètres de la figure *Fig.3. 1* . Nous imposons :

$$ws = wt = \frac{4\pi re}{3Nenc} = 11 \text{ mm} \quad (3.13)$$

On

$$\begin{aligned} b1 &= ws & b3 &= 3ws/4 = 8.25 \\ b2 &= \frac{ws}{2} = 5.5 \text{ mm} & h2 &= ws/8 = 1.37 \text{ mm} \\ h3 &= 0.02re = 1.26 \text{ mm} & h1 &= ds - h2 - h3 = 13.15 \text{ mm} \end{aligned}$$

## 3.3 Dimensionnement de l'enroulement statorique

### 3.3.1. Introduction

Le circuit magnétique statorique est constitué d'un empilement de tôles fines d'acier découpées faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0,35mm et 0,50 mm pour minimiser les pertes magnétiques. Afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de verni ou de silicate de soude. Le bobinage statorique est constitué de deux parties (Fig. I. 3) : les conducteurs dans les encoches et ceux des têtes de bobines. Les conducteurs dans les encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant a elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation. L'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices à répartition sinusoïdale (autant que possible) dans l'entrefer pour limiter les oscillations du couple électromagnétique.

## Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchron à Aimants Permanents à Rotor intérieur

---

Le calcul de l'enroulement statorique commence par le choix du type d'enroulement à utiliser. Les enroulements sont caractérisés par le nombre d'encoches par pôle et par phase qu'occupent les conducteurs appartenant à la même phase et se trouvant au même instant sous le même pôle.

### 3.3.3. Nombre d'encoches statorique $N_s$

Dans le processus de calcul est utile d'examiner la possibilité de valeurs minimales et maximales de la plage recommandée de pas dentaire  $w_t$ . Puis le nombre possible de fentes de stator, correspondant aux valeurs choisies

### 3.3.4. Nombre d'encoches par pôle et par phase $q_l$

La partie de la machine qui fournit le courant magnétisant est pourvue d'un nombre entier d'encoches par pôle et par phase car avec un nombre fractionnaire, le fonctionnement de la machine peut devenir irrégulier.

Le nombre d'encoches par pôles et par phase du stator doit être, dans tous les cas, supérieur à 2 afin que la dispersion provenant des champs harmoniques supérieurs demeure faible.

### 3.3.5 Adaptation du bobinage à la tension d'alimentation

Le dimensionnement, basé sur le couple dimensionnant, détermine le courant total d'encoche. Il doit être complété en calculant le nombre de conducteurs par encoche pour permettre une adaptation en termes de tension et de vitesse. L'alimentation est constituée d'un onduleur de tension contrôlé en courant délivrant une tension maximale de valeur efficace :

$$V_{eff} = \frac{E}{2\sqrt{2}} \quad \text{pour une MLI régulière}$$

$$V_{eff} = \frac{E}{\sqrt{6}} = \frac{54}{\sqrt{6}} = 22.045 \text{ V} \quad \text{pour une MLI triphasée}$$

Avec : E (V) la tension du bus continu.

## Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

### 3.3.6. Courant nominal au stator

$$I_s = \frac{Pu}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot 3 \cdot U_n} = 150A$$

$U_n$  : La tension nominal

$\eta=0.92$  Et  $\cos \varphi=0.9$  sont choisis au début du calcul

### 3.3.7 Nombre de spires d'une seule phase statorique $W_1$

$$w_1 = \frac{U_n \cdot N_s}{2 \cdot a \cdot m} = 44 \text{ spire}$$

La valeur résultante  $U_n$  arrondi à l'entier le plus proche. Le nombre final de spires dans les enroulements de phase.

### 3.3.8. Nombre de conducteurs effectifs

Il est exprimé par :

$$N_{eff} = \frac{w_1 \cdot a}{p \cdot q} = 22 \text{ conducteur} \quad (3.14)$$

Avec

$$N_{eff} = N'_{ef} \cdot a$$

$N'_{ef}$  : Représente le nombre de conducteurs effectifs préliminaire

$a=2$  : Représente le nombre de voies d'enroulements qui dépend du courant nominal.

Il est préférable, techniquement, d'avoir un nombre minimum.(  $a = (1 \div 2P)$  Pour un enroulement à 2 couches.)

Le nombre de conducteurs effectifs doit être un nombre paire ensuite on recalcule  $W_1$  puis, avec cette nouvelle valeur de  $W_1$ , on doit recalculer la valeur de  $B_g$ , et on vérifie si elle est admissible.

# Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

## 3.3.9.Diamètre du fil utilisé

4 à 11 ampères par millimètre carré, c'est la plage de variation permise pour la densité de courant  $J$  dans le cas des MSAPs. Pour éviter tout échauffement excessif à l'intérieur du bobinage, on a ajusté la densité de courant à une valeur de  $9 \text{ A/mm}^2$ .

Élucidons maintenant comment calculer le diamètre du fil : calculons la section du conducteur qui occasionne qu'une valeur de  $9 \text{ A/mm}^2$  par l'équation  $s=I/J$ , et comme le type de câble utilisé dans ces gammes de puissances de machines est un conducteur rond de section  $\pi d^2/4$ , par une simple substitution de la deuxième équation dans la première et après réarrangement de cette dernière, on arrive au diamètre calculé par l'équation suivante

$$d = \sqrt{\frac{4I}{J\pi}} = 3.25 \text{ mm} \quad (3.15)$$

$$s = \frac{I}{J} = 8.3 \text{ mm}^2 \quad (3.16)$$

## 3.4.Modélisation du moteur en régime permanent

un moteur synchrone à aimant peut être étudié par un simple circuit électrique série, ce circuit qui figure ci-dessous peut nous servir avec une exactitude plausible pour traiter le moteur et deviner son comportement quand il opère à vide ou en charge

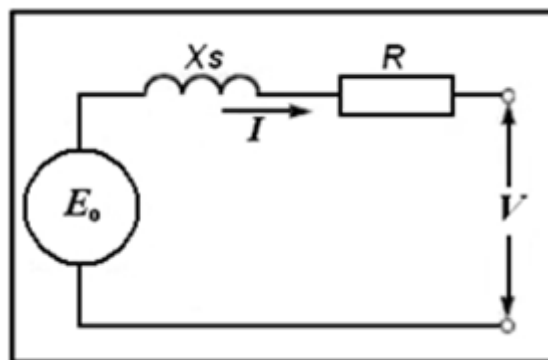


Figure 4.1 : Circuit équivalent du moteur synchrone à aimants permanents.

# Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

---

## 3.4.1 Chute magnétique dans l'entrefer

comme cette région d'entrefer ne renferme aucun matériau, le champ est déduit de la fameuse relation  $B_g = \mu_0 \cdot H_g$  où  $\mu_0$  est la perméabilité du vide, sa valeur célèbre est  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  henry par mètre. Pour l'induction  $B_g$ , elle est égale à 0.9T

$$U_g = \frac{B_g \cdot g}{\mu_0} = 358 \text{ A}$$

## 3.4.2 Chute magnétique dans la culasse du rotor

Pour la culasse rotorique, la densité de flux  $B_y$  conseillée est de l'ordre de 1.5 T [5], comme toujours, cette valeur d'induction est exploitée pour trouver la valeur du champ  $H_{cr}$  qui lui correspond, dans ce cas, on 327.24 A/m.

$$U_{cr} = H_{cr} \cdot \tau_{yr} = 10 \text{ A}$$

Avec 
$$\tau_{yr} = \frac{\mu \cdot (D_e + d_s)}{2P} = 0.12355 \text{ m}$$

## 3.4.3 Chute magnétique dans la dent

Lors de coupure et du poinçonnage des tôles de fer, ces derniers subissent des contraintes de cisaillement, ce qui occasionne une destruction au niveau microscopique des structures cristallines du fer, cela a pour effet de diminuer la perméabilité du fer au niveau des bordures de la dent. Pour modéliser ce phénomène, 0.1 millimètre doit être soustraie de la largeur de la dent lors du calcul de la densité de flux dans celui-ci [46]. On suppose a partir des études précédent que  $\mu_r = 2000$  A/m

$$U_d = H_d \cdot h_d = 31.5 \text{ A/m}$$

## Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

### 3.4.3 Réactance synchrone d'une phase

Lorsqu'un circuit électrique linéaire est excité par un courant alternatif, il devient le siège d'une F.É.M. induite d'auto induction, qui est différente de la F.É.M. induite dans un circuit secondaire (ouvert). La différence entre ces deux F.É.M. constitue la F.É.M. de dispersion. Celle-ci est due au flux magnétique dispersé, qui agit sur le circuit primaire, mais demeure sans effet sur le secondaire ; pour les enroulements, les conditions ne sont plus aussi simple [46], c'est pourquoi on va dévoiler l'équation qui va nous aboutir à nos besoins avec autant d'exactitude

$$X_s = \frac{4\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot N_s^2 (p_{dent} + p_{encoche} + p_{front} + p_{diff})}{pq} \quad (3.17)$$

### 3.4.4 Résistance d'une phase

Pour calculer les pertes Joules, un facteur nous manque : la résistance, ce nombre qui reflète le degré d'opposition aux électrons parcourant l'enroulement, n'est pas fonction seulement de la résistivité mais aussi bien la géométrie transversale et longitudinale du fil de cuivre utilisé. Examinons d'abord la question de la géométrie du conducteur, en reportant à plus tard le sujet de la résistivité.

Comme nous avons signalé à plusieurs reprises, le fil adopté pour la conception du moteur est de section transversale arrondie, il n'a pas donc de directions particulières de pliage. Par conséquent, la boucle requise dans le cas des bobines préformées n'est pas nécessaire ici. On a ainsi des têtes de bobines, souvent appelées chignons, qui prennent une allure plutôt arrondie. Cette partie courbe peut, avec une approximation en général tout à fait satisfaisante, être remplacée par une droite à 45° de longueur [46], en effet l'équation ci dessous donne avec une exactitude plausible la longueur totale du conducteur déboursé pour former un enroulement d'une phase.

$$l_{cuivre} = 2 \cdot N_s \left( l + 0.02 + \frac{\pi}{p} (2re + ds) \cdot \cos 45^\circ \right) = 11m \quad (3.18)$$

## Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchron à Aimants Permanents à Rotor intérieur

---

Puisque la section du fil adopté est déjà calculée, le programme de conception n'a qu'à exploiter cette valeur de section pour l'exploiter selon le besoin.

Par définition, la résistivité  $\rho$  : est précisément ce qui caractérise l'opposition plus ou moins grande qu'offre un conducteur au passage du courant. Elle varie suivant la nature de la substance dont est constitué le conducteur. Elle varie aussi avec la température. Tout comme la masse volumique, la résistivité est une propriété caractéristique d'une substance. Pour le cuivre, ce facteur chiffrant à  $15.9 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$  à  $0^\circ\text{C}$  [46].

Lorsque la température d'un conducteur augmente, l'agitation de ses atomes s'accroît. L'opposition au déplacement des électrons augmente car les collisions entre les électrons et les atomes se multiplient. C'est ce qui explique l'augmentation de la résistivité des métaux conducteurs avec la température [1], par exemple, le cas des machines électriques, cette résistivité grimpe en raison de l'échauffement irradié des différentes pièces emmitouflant l'enroulement, peut atteindre les  $75^\circ\text{C}$ , c'est pourquoi on doit rapporter la valeur de la résistivité à  $75^\circ\text{C}$ , cette variation obéit à la formule suivante

$$\rho_{75^\circ} = \rho_{0^\circ}(1 + \alpha \cdot 75^\circ) = 21 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$$

Pour le cuivre,  $\alpha = 0,00427$

La formule qui donne la résistance d'une phase à chaud est la suivante :

$$R_{ph75^\circ} = \rho_{75^\circ} \frac{l_{\text{cuivre}}}{S_{\text{cuivre}}} = 0.028 \Omega$$

(3.19)

## Chapitre3: Conception d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents à Rotor intérieur

### 3.4.5. Tableaux de dimensionnement final

Paramètres	Notation	Dimensions
Aimantation résiduelle (NdFeB)	$B_r$	1.1 T
Perméabilité relative des aimants	$\mu_r$	1.05
Nombre de conducteurs par encoche	$N_c$	22
Intensité du courant de phase	$I$	150 A
Nombre d'encoches statorique	$N_s$	24
Ouverture de l'encoche	$b_0$	7.2°
Nombre de paires de pôles	$P$	2
Epaisseur radiale de l'aimant au rotor	$l_m$	4.725 mm
Epaisseur d'entrefer	$g$	0.5 mm
Rayon d'alésage	$r_e$	63 mm
Profondeur d'encoche	$d_s$	15.75 mm
Rayon interne des aimants	$R_{int\ aim}$	27.8 mm
Profondeur de la culasse de la machine	$d_y$	26.8 mm
Rayon extérieur	$r_{ext}$	107 mm
Ouverture de l'aimant	$\alpha$	45°
Longueur active de la machine	$L$	78.75 mm
Fréquence	$f_r$	85 Hz
Rapport ouverture des aimants sur le pas polaire	$\beta$	0.5
Largeur d'une encoche statorique.	$w_s$	8.52 mm
Largeur d'une dent statorique.	$w_T$	7.7 mm
la densité de flux dans l'entrefer	$B_g$	0.9 T
la densité de flux dans la culasse statorique	$B_y$	1.5 T
Résistance de schéma équivalent	$R_s$	0.028 $\Omega$
La tension nominale DC	$E$	54 V
La tension efficace AC	$v_{eff}$	22.045 V
Rendement	$\eta$	0.92
Puissance nominal	$P$	8kw
Couple nominal	$T$	30N.m



## Chapitre 4: Distribution des Performances Electromagnétiques

---

### INTRODUCTION :

L'étude d'un dispositif électromagnétique nécessite la connaissance des champs électromagnétiques dans ce dispositif et donc les valeurs du flux, les forces magnétiques, etc.

Le calcul du champ magnétique nécessite une résolution des équations de Maxwell. Les forces magnétiques jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout système électromécanique en termes de déplacement ou de déformation. Pour cela, il existe plusieurs méthodes pour le calcul des forces, ces méthodes sont fondées sur les méthodes des travaux virtuels, sources équivalentes et tenseur de Maxwell, Ces dernières sont parfaitement compatibles avec la méthode des éléments finis (MEF), et les résultats globaux donnés sont identiques.

La machine synchrone à aimants permanents étudiée est à stator magnétique lisse et bobinage triphasé situé dans l'entrefer. Selon le type d'aimants utilisés et leur direction de magnétisation, le rotor peut être magnétique ou non magnétique. En effet, la structure avec des aimants permanents (NdFeBr) radiaux présente un rotor magnétique. L'alimentation de ces machines synchrones étudiées est assurée par un onduleur de courant triphasé qui délivre soit un courant rectangulaire de type  $120^\circ$  ou un courant sinusoïdal. Le dimensionnement du moteur comporte généralement deux étapes principales:

➤ La première étape du dimensionnement consiste en un pré-dimensionnement sur la base d'un modèle analytique. Il s'agit des solutions symboliques exactes des équations physiques du moteur, en faisant au préalable des hypothèses simplificatrices sur la structure et les propriétés physiques de celui-ci.

Les modèles analytiques présentent les avantages suivants :

- Rapides et permettent d'explorer au maximum l'espace des solutions dans un temps donné réduit.
- Favorisent une grande variation de tous les paramètres du modèle dans les limites de validité des équations, ce qui permet par exemple de dimensionner des moteurs de puissances très différentes dont tous les paramètres varient dans de grandes proportions.
- Les équations symboliques contiennent un lien explicite entre tous les paramètres et les phénomènes physiques. Ils sont adaptés aux calculs des performances moyennes, mais peu aux calculs de phénomènes locaux.

## Chapitre 4: Distribution des Performances Electromagnétiques

---

➤ La deuxième étape du dimensionnement fait appel aux modèles numériques. Les équations physiques de base du moteur sont résolues avec un faible niveau d'hypothèses en utilisant des algorithmes numériques lourds. La méthode des éléments finis et la méthode des différences finies sont des exemples de méthodes numériques très utilisées, permettant la prise en compte des phénomènes électriques, magnétiques, mécaniques ou thermiques. Ces méthodes reposent en général sur la décomposition de la structure en petites régions sur lesquelles on suppose une évolution donnée du champ. En regroupant les équations de toutes les régions et en utilisant les conditions aux limites du problème, on peut trouver une valeur approchée du champ dans tous les nœuds et par suite dans toutes les mailles de la structure.

### 4.2. Présentation de l'outil de calcul logiciel FEMM :

Les calculs dans ce mémoire, sont effectués à l'aide d'un logiciel 2D basé sur la méthode des éléments finis désigné par FEMM (Finite Element Method Magnetics)

Comme tous les logiciels employés pour des problèmes d'éléments finis en deux dimensions sont articulés en trois axes appelés "pré-processeur", "processeur" et "postprocesseur".

Dans le but de pouvoir modifier à notre guise les paramètres de la machine pour voir leur influence. FEMM, ne nous donne pas cette opportunité, par contre, il nous donne la possibilité de le commander par des programmes extérieurs. Nous définirons alors le post et le pré processeur à l'aide du langage LUA, qui est dérivé du langage C. Le script LUA est une partie de programme directement interprétée par FEMM, contenant des fonctions propres au logiciel FEMM. Avec ce script nous pouvons aisément de configurer et de piloter FEMM.

#### **Pré-processeur :**

Cet élément permet de définir la machine d'études à savoir :

- dessiner la géométrie de la machine avec des arcs ou des segments de droite
- définition du problème à savoir la nature du problème à résoudre (la fréquence, l'unité des grandeurs géométriques, la précision de calcul). Nous pouvons également définir la finesse du maillage.
- introduction des caractéristiques des différentes régions géométriques de la structure (propriétés magnétiques des matériaux)
- définitions des circuits de la structure. Cette partie nous donne aussi la possibilité d'introduire le nombre de spires dans les bobinages ainsi que la valeur des courants
- introduction des conditions aux limites
- introductions des courbes de saturations dans le cas où elle est prise en compte.

## Chapitre 4: Distribution des Performances Electromagnétiques

### Le processeur :

Cet élément effectue la résolution du problème défini sur chaque élément de maillage en effectuant des itérations jusqu'à atteindre la précision imposée au pré-processeur. En chaque élément, le potentiel vecteur est connu et à partir de là, les autres grandeurs sont déduites.

### Le post-processeur :

Une fois les résultats sont déterminés par le processeur, le post-processeur nous permet de les visualiser et récupérer les valeurs des grandeurs désirées (les flux d'encoches, les valeurs de l'énergie, couples...) sous forme de fichiers numériques [49].

### 4.3. Modélisation par élément finis :

#### 4.3.1. Paramètre de la machine Dimensions géométriques du MSAP:

Nous avons choisi d'étudier une machine synchrone à aimant permanent triphasé de 4 pôles Configuration, les principaux paramètres géométriques sont donnés par le tableau 4.1 suivant :

<b>Intensité du courant de phase</b>	$I$	150 A
<b>Nombre d'encoches statorique</b>	$N_s$	24
<b>Ouverture de l'encoche</b>	$b_0$	7.2°
<b>Nombre de paires de pôles</b>	$P$	2
<b>Epaisseur radiale de l'aimant au rotor</b>	$l_m$	4.725 mm
<b>Epaisseur d'entrefer</b>	$g$	0.5 mm
<b>Rayon d'alésage</b>	$r_e$	63 mm
<b>Profondeur d'encoche</b>	$d_s$	15.75 mm
<b>Rayon interne des aimants</b>	$R_{int\ aim}$	27.8 mm
<b>Profondeur de la culasse de la machine</b>	$d_y$	26.8 mm
<b>Rayon extérieur</b>	$r_{ext}$	107 mm
<b>Ouverture de l'aimant</b>	$\alpha$	45°
<b>Longueur active de la machine</b>	$L$	78.75 mm
<b>Fréquence</b>	$f_r$	85 Hz
<b>Rapport ouverture des aimants sur le pas polaire</b>	$\beta$	0.5
<b>Largeur d'une encoche statorique.</b>	$w_s$	8.52 mm
<b>Largeur d'une dent statorique.</b>	$w_T$	7.7 mm

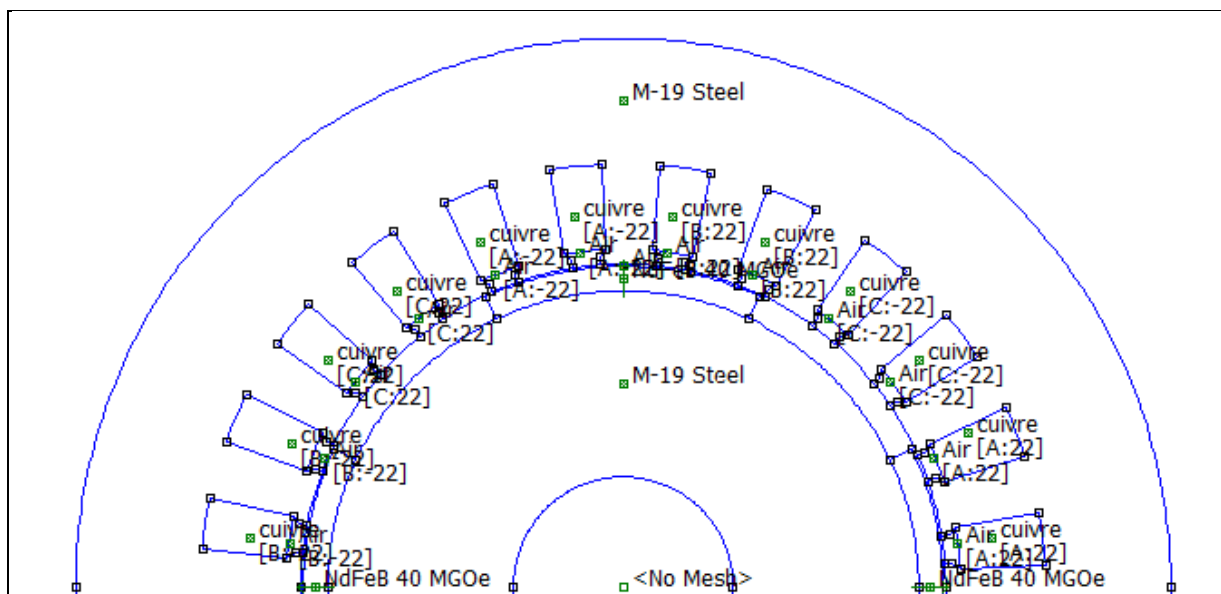
TABLEAU 4.1 : paramètres de base de la machine expérimentale étudiée

### 4.3.2. LA MACHINE MODELISEE PAR FEMM :

#### 4.3.2.1. Présentation de la structure de machine étudiée

La machine étudiée est une machine synchrone à aimants permanents triphasée, à aimantation radial, à rotor interne et à aimants déposés en surface. Ses grandeurs nominales et ses dimensions géométriques sont données en tableau 1. Son diamètre extérieur est de 107mm et sa longueur utile est de 78.75mm. Elle possède trois paires de pôles. La coupe transversale de la Figure III.1 montre les différentes parties de la machine. Celle-ci est constituée de:

- Un stator cylindrique en tôles magnétiques à 24 encoches, comportant un enroulement triphasé à une seule couche à bobines concentriques. Chaque phase comporte deux bobines montées en série.[50]
- Un rotor lisse en matériau magnétique sur lequel sont collés quatre aimants, présentant une aimantation radiale. Ces derniers sont conçus en un seul segment en forme de tuile épousant parfaitement la surface du rotor.



**Figure 4.1:** Vue en coupe de la machine d'étude

Le tracé de la géométrie d'étude a été réalisé à l'aide d'un logiciel f.e.m.m (Finité Elément Méthode Magnétiques); ce logiciel est doté d'une interface de dessin conviviale et permet d'effectuer des maillages automatiques et génèrent des fichiers de données des maillages accessibles aux utilisateurs.

### 4.3.2.2. Le maillage:

le tracé de la géométrie d'étude a été réalisé a l'aide d'un logiciel (libre sur le réseau internet) F.E.M.M (Finite Element Method Magnetics) version 4.2 ;ce logiciel est doté d'une interface de dessin conviviale et permet d'effectuer des maillages automatique et génèrent des fichiers de données des maillages accessibles aux utilisateurs

L'utilisation de l'interfaces devient difficile lorsque la structure a tracé est complexe ; cependant ce logiciel offre une solution robuste qui est l'exécution des programmes écrit sous le langage MATLAB. Nous avons exploité cet interfaçage (F.E.M.M - MATLAB) pour programmer la structure à étudier.

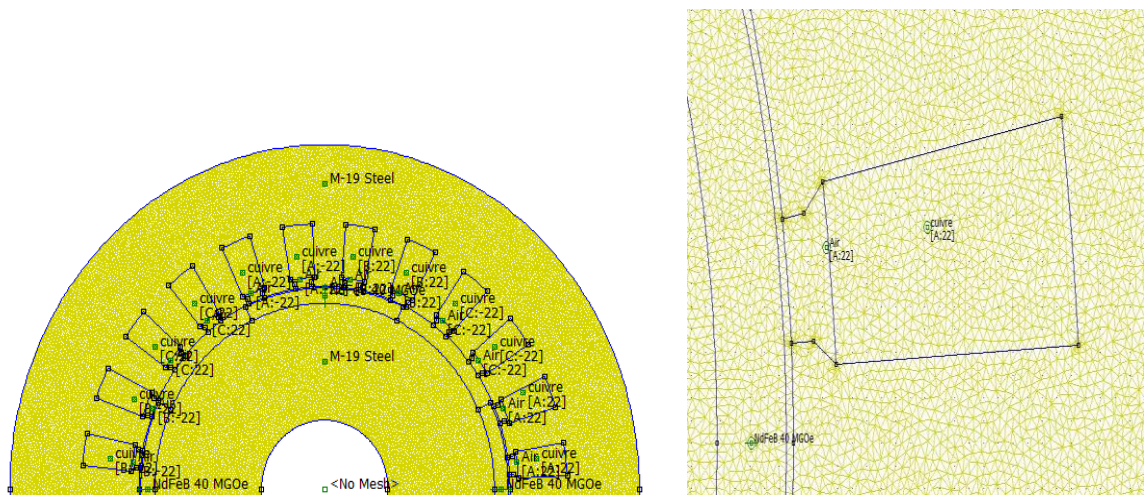


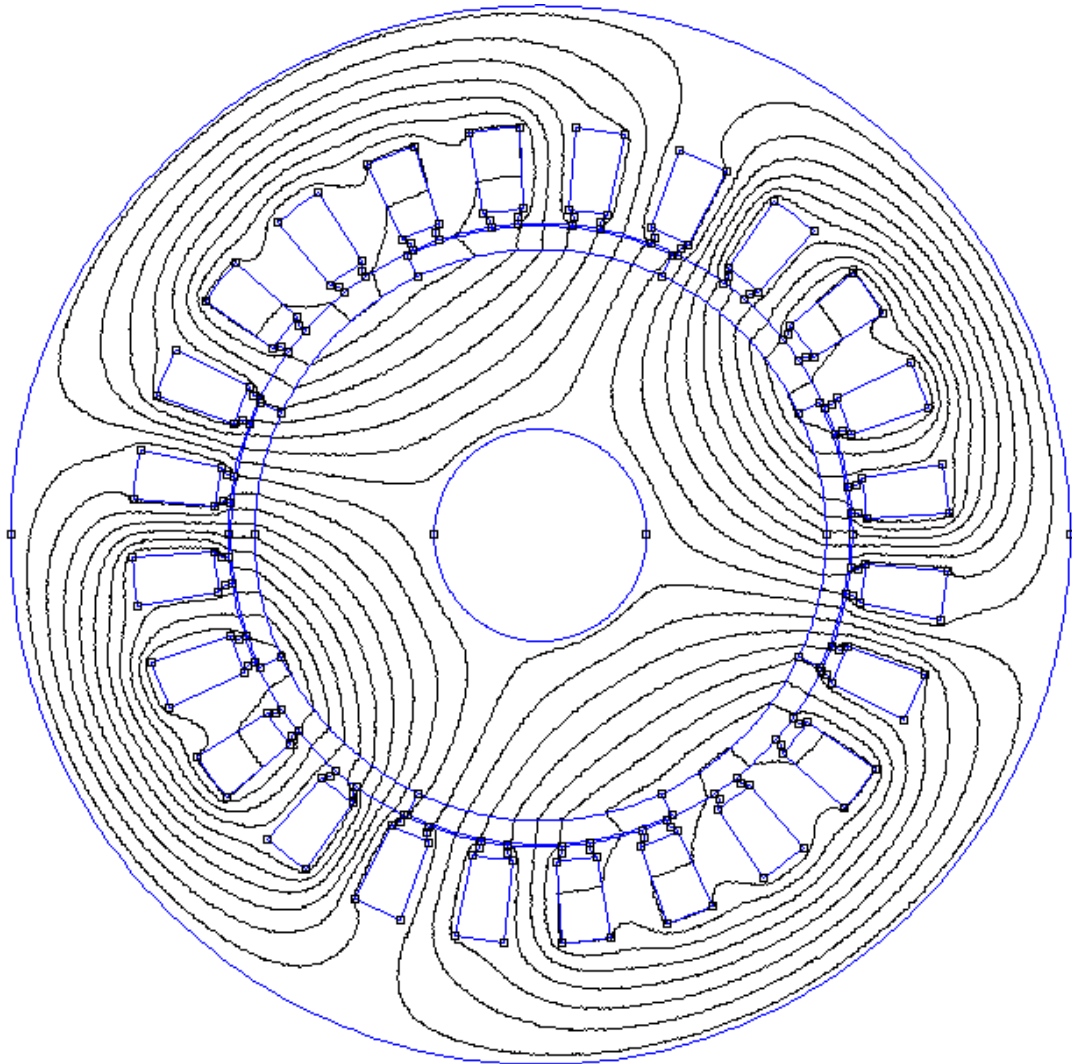
Figure 4.2: Maillage par éléments finis triangulaires

Une fois le système résolu, les potentiels aux nœuds, obtenus, sont utilisés pour calculer les composantes de l'induction. Ceci nous permet de déterminer l'énergie magnétique  $W$  de la structure étudiée, à partir de la somme des énergies élémentaires  $W_e$  dans chaque triangle, ainsi que le couple électromagnétique et la force électromotrice.

Le calcul de ces grandeurs globales est effectué pour chaque position du rotor par rapport au stator qui est fixe. Pour ce faire, la simulation du mouvement est nécessaire on tenir compte du mouvement et des conditions aux limites de type Dirichlet et d'anti-périodicité pour résoudre l'équation de Poisson dans l'entrefer en tenant compte de la saturation et des courants induits. Le maillage complet comporte **143854** nœuds et **285939** éléments avec une précision de  $5.00e-008$ .

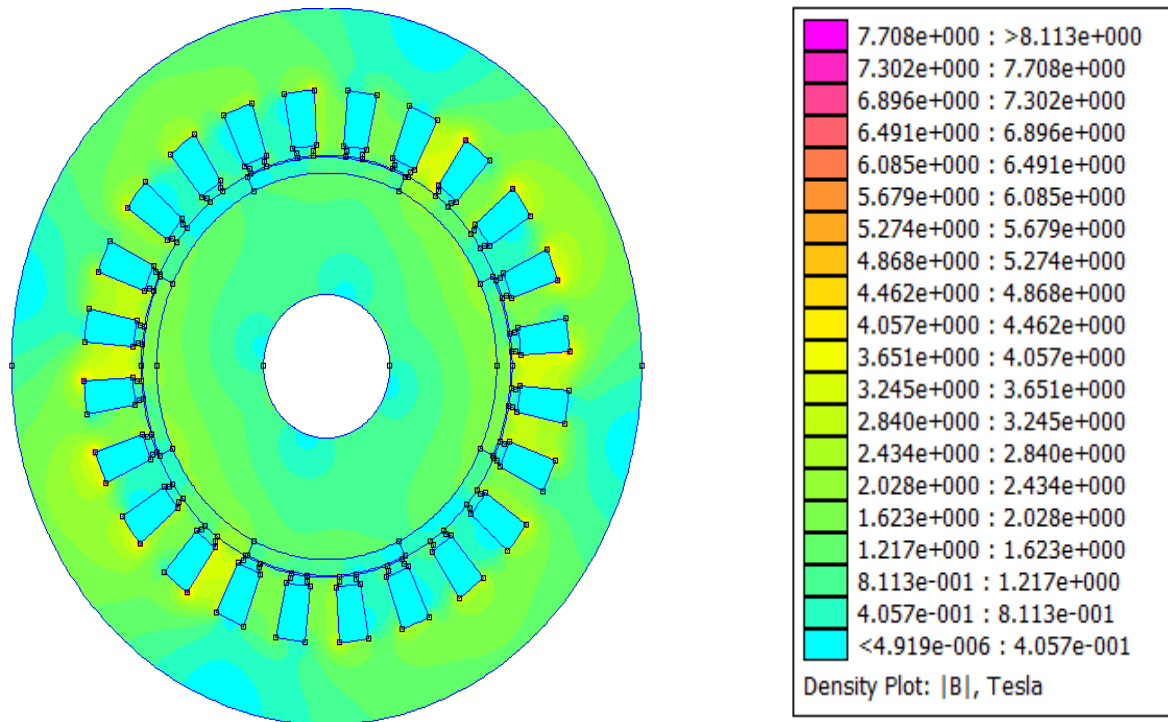
### 4.4. EXPLOITATION DES RESULTATS :

#### 4.4.1. Les lignes iso-potentiels vecteurs :

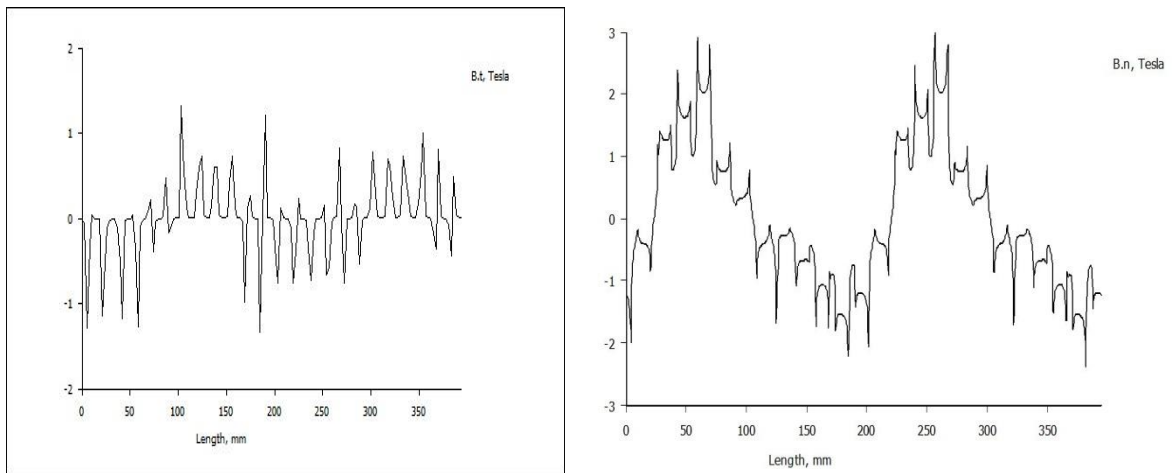


**Figure 4.3:** Les lignes iso-potentiels vecteurs.

#### 4.4.2. La densité du flux magnétique :



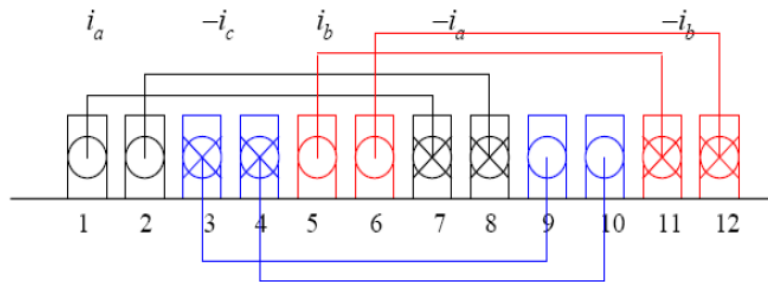
**Figure 4.4:** La densité du flux magnétique.



**Figure4.5.** L induction magnétique dans l entrefer (radial et tangentiel)

### 4.5. Distribution du bobinage

La machine synchrone triphasée à aimants permanents étudiée est alimentée par un onduleur de courant qui délivre des créneaux de courant de type  $120^\circ$ . Avec ce type d'alimentation, deux phases de la machine sont alimentés en tout instant (à  $t=0$ ,  $i_a=I$ ,  $i_b=0$  et  $i_c=-I$ ). L'enroulement de la machine est à pas diamétral en simple couche, le nombre d'encoche par pôle et par phase est de deux ( $q=2$ ) (Figure 4.6).



**Figure 4.6** Distribution du bobinage simple couche sur un pair de pôle



### 4.6. Conclusion

Le dimensionnement final d'une machine électrique en général et une machine synchrone à aimants permanents en particulier est assuré par la méthode des éléments finis. En effet, cette dernière permet de déterminer la distribution spatiale du champ magnétique en tout point de la machine en régime linéaire et en saturé ainsi que les performances électromagnétiques.

Le travail abordé dans ce 4ème chapitre, concernant l'influence de divers paramètres géométriques sur les caractéristiques électromagnétiques d'un prototype de MSAP, a permis d'optimiser la plupart de ces paramètres.

# Conclusion Général

---

## Conclusion Général

La voiture électrique en particulier est un sujet de recherche en plein développement à l'heure actuelle et constitue un rêve pour les politiciens comme aux scientifiques qui bravent toute contribution malgré son infinité, avec l'accumulation des travaux entreposés dans les tiroirs des laboratoires de recherche, peut servir à la rescousse de notre planète du réchauffement climatique qui la menace. Les constructeurs automobiles, confrontés à des normes écologiques et des exigences économiques de plus en plus sévères, relèvent le défi et se lancent massivement dans l'électrification de leurs voitures.

Nous avons présenté les différentes technologies des voitures électriques et hybrides et nous avons établi une étude comparative de ces technologies de point de vue performances, coût et écologie.

Le 2ème chapitre était rédigé dans le but d'examiner le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP). Nous avons divisé le chapitre en deux parties, la première a couvert l'essentiel des aimants permanents : types, stabilité... La deuxième partie du chapitre était destinée à clarifier le fonctionnement du MSAP : l'alimentation, ses avantages et inconvénients, ses applications...etc.

Ensuite, on a abordé dans le 3ème chapitre la phase de la conception du moteur synchrone à aimants permanents à rotor intérieur qui est destiné principalement à être logé à l'intérieur des roues. Dans ce même chapitre, le dimensionnement était fait à travers d'un cahier de charge et basé sur plusieurs documentations de dimensionnement comme référence, les résultats obtenue converti sous un programme MATLAB qui est intégré avec l'interface FEMM , ces résultat a été également présenté dans le chapitre 4.

Le chapitre 4 présente les résultats de simulation, le moteur à base de Nd-Fe-B et suivies par une analyse de structure pour vérifier sa saturation magnétique .Cette résolution était faite par la méthode des éléments finis sous environnement MATLAB en utilisant l'interface FEMM qui a pour but de procurer la cartographie de l'induction magnétique. Elle nous a aussi permis de nous renseigner sur l'état de la saturation des moteurs utilisant le Nd-Fe-B.

## Références

- [1] Low Carbon Vehicle Partnership <http://www.lowcvp.org.uk>
- [2] Magazine Energies N16 Automne 2009 <http://www.Total.com>
- [3] La voiture de demain : carburants et électricité ; Centre d'analyse stratégique juin 2011  
[www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)
- [4] Comité des constructeurs français d'automobiles <http://www.ccfa.fr>
- [5] <http://www.voitureelectrique.net>
- [6] <http://tpe-voitureecolo.e-monsite.com>
- [7] <http://www.voiture-electrique-populaire.fr>
- [8] Le développement des véhicules hybrides et électriques 2011 ; IFP Energies nouvelles ;  
[www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr)
- [9] <http://www.teslamotors.com>
- [10] <http://www.techno-science.net>
- [11] <http://www.supermagnete.de/fre>
- [12] <http://gm-volt.com>
- [13] Peter Harrop, Electric Motors for Electric Vehicles 2012-2022, May 2012
- [14] Laurent albert - Modélisation des alternateurs à griffes : Application au domaine automobile. Thèse de doctorat, INP de Grenoble, juillet 2004
- [15] LILYA BOUARROUDJ -Contribution à l'étude de l'alternateur à griffes Application au domaine automobile.Thèse de doctorat, INP de Grenoble, Novembre 2005
- [16] F. Magnussen, On design and analysis of synchronous permanent magnet machines for fuel-weakening operation in hybrid electric vehicles, Stockholm 2004.
- [17] Jérôme LEGRANGER, Contribution à l'étude des machines brushless à haut rendement dans les applications de moteurs-générateurs embarqués. Thèse de doctorat, l'Université de Technologie de Compiègne, Mai 2009
- [18] Bill SESANGA N'TSHUIKA -Optimisation de Gammes : Application à la Conception des Machines Synchrones à Concentration de Flux, INP de Grenoble, Février 2011
- [19] BIEDINGER (J. M.), FRIEDRICH (G.), VILAIN (J. P.), PLASSE (C.) - Etude de Faisabilité d'un Alternateur Démarreur Intégré : Comparaison des Solutions Asynchrone et Synchrones à Rotor Bobiné. CEMD'99.

- [20] Li Li, Étude et mise au point d'une nouvelle famille d'alternateur- Démarreur pour véhicules hybrides et électriques, Thèse de doctorat, INP de Grenoble, Valeo, 2011.
- [21] Yacine AMARA, Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation Application au véhicule hybride ,Thèse de doctorat,décembre 2001.
- [22] Sami HLIQUI, Etude d'une Machine Synchrone à Double Excitation Contribution à la mise en place d'une plate-forme de logiciels en vue d'un dimensionnement optimal,Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, université de Besançon, Décembre 2008
- [23] Jean-Paul YONNET, ETUDE ET MODELE ELECTROMAGNETIQUE DE MACHINE ASYNCHRONE POUR ALTERNATEUR-DEMARREUR,Thèse de doctorat, INP de Grenoble, Juillet 2002
- [24] BESBES (M.), HOANG (E.), LECRIVAIN (M.), GABSI (M.), AKEMAKOU (A. D.), HUART (D.), PLASSE (C.) -Comparaison des Performances d'une Machine à Commutation de Flux et d'une Machine Synchrone à Aimants Enterrés pour une Application d'Alternateur Démarreur Intégré pour Véhicule Automobile. CEMD'99
- [25] K.N Ochjid, C. Pollack Design/performance of a flux switching generator system for variable speed applications, IAS 2005
- [26] Anthony GIRARDIN, Contribution à l'optimisation des performances des alternateurs automobiles,Thèse de doctorat,INP de Grenoble, Octobre 2008
- [27] Anthony Gimeno, Contribution à l'étude d'alternateurs automobiles : caractérisation des pertes en vue d'un dimensionnement optimal,Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Février 2011
- [28] Azeddine TAKORABET, Dimensionnement d'une machine à double excitation de structure innovante pour une application alternateur automobile. Comparaison à des structures classiques,Thèse de doctorat, ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN, Janvier 2008
- [29] BOUKAIS Boussad, Contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : Application aux machines à aimants permanents (BDCM-PMSM,Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzzou, Algérie, Février 2012
- [30] L. Chédot , Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents internes à large espace de fonctionnement. Application à l'alternateur-démarreur,Thèse de doctorat,Université de Technologie de Compiègne, novembre 2004

- [31] Benbrahim Amel, «Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse de Magistère à université de Batna, juin 2009.
- [32] BOUKAIS Boussad, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012
- [33] W. Leonhard, "Control of AC Drives", spring, Verlag, Berlin, 1984
- [34] F. Labrique et G. Séguier, "La conversion Continu-Alternatif", Technique et Documentation, Paris, 1995.
- [35] A. KADDOURI " Étude d'une Commande Non Linéaire Adaptative d'une machine Synchrone à Aimants Permanents ", Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 2000.
- [36] R.Saou, "Modélisation et optimisation de machines lentes à aimants permanents : Machines à double saillance et à inversion de flux", Thèse de doctorat d'état, ENP d'Alger, 2008
- [37] F. Khatounian " Contribution a la Modélisation, L'Identification et à la Commande d'une Interface Haptique à un Degré de Liberté Entraînée par une Machine Synchrone à Aimants Permanents " Thèse de Doctorat, De L'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2006.
- [38] Y. Amara "contribution à la Conception et à la Commande des Machine Synchrone à Double Excitation Appliquée au Véhicule Hybride", Thèse de Doctorat, Université Paris , France, Décembre 2001.
- [39] G. Séguier et R. Bausière, "les convertisseurs de l'électronique de puissance", la conversion continu-alternatif Tome 4, deuxième édition, Lavoisier TEC II DOC.
- [40] A.Parviainen., "Design of axial flux permanent magnet low speed machines and performance comparison between radial flux and axial flux machines," thèse de Doctorat, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2005.
- [41] B. Singh B.P. Singh, S. Dwivedi, "A State of Art on Different Configurations of Permanent Magnet Brushless Machines" IE(I) Journal-EL, pp. 63-73, vol87, June 2006.
- [42] Bernard MULTON, "Application des aimants aux machines électriques ", notes de cours version 2009. Ecole normale supérieure de Cachan.
- [43] J.Lesenne, F.Notelet, G.Segulier, " Introduction à l'électrotechnique approfondie " ,Technique et Documentation, Paris XI, 1981.
- [44] G.Lacroux, " Les aimants permanents ", Edition technique et documentation, 1989.
- [45] Soltane BELAKEHAL « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » UNIVERSITE DE CONSTANTINE**2010**

- [46] CHIBANI AZIZ Université de Constantine « Étude pour la Conception d'une Machine Synchrones à Rotor Externe » 2011
- [47] DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale »2010
- [48] Serhoud Hicham, « *Contribution à l'étude de la machine synchrone à réluctance variable* », Thèse de magister, Université de Batna, 2009.
- [50] Kamel BOUGHRARA, « *Modélisation Analytique et Numérique des Performances Electromagnétiques des Moteurs Synchrones à Aimants Permanents* », Thèse de Doctorat d'Etat, L'Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

## Annexes

### Annexe A

**Diamètre de l'isolation en fonction de la section de l'encoche et diamètre de fil**

$D_{nu}$ [mm]	$D_{iso}$ [mm]	$S_{eff}$ [mm <sup>2</sup> ]
0.75	0.815	0.442
0.80	0.865	0.503
0.85	0.915	0.567
0.9	0.965	0.636
0.95	1.015	0.709
1.00	1.080	0.785
1.06	1.140	0.883
1.12	1.200	0.985
1.18	1.260	1.094
1.25	1.330	1.227
1.32	1.405	1.368
1.40	1.485	1.539
1.50	1.585	1.767
1.60	1.685	2.011
1.70	1.785	2.270
1.80	1.885	2.540
1.90	1.995	2.830

**Tableau 1** : Tableau des sections normalisées

## Annexe B

### (Matlab /FEMM)

#### Introduction

OctaveFEMM est une boîte à outils de Matlab qui permet l'exploitation de la ElementMethodMagnetics finite (FEMM) via un ensemble de fonctions Matlab. La boîte à outils travaille avec Octave, un clone de Matlab. OctaveFEMM au démarrage un processus FEMM, l'interface utilisateur FEMM à l'adresse habituelle s'affiche et est pleinement fonctionnel. L'utilisateur a ensuite la possibilité d'accomplir des tâches d'analyse et de modélisation soit exclusivement par le biais de fonctions mises en œuvre par la boîte à outils, ou par une combinaison des opérations manuelles et programmatiques – selon ce qui est plus facile pour la tâche à accomplir. La syntaxe de la OctaveFEMMtoolbox reflète étroitement celle d'existant Lua scripting language interface de FEMM associée à FEMM v4.2. Cependant, il existe certaines différences entre les fonctions Lua et les implémentations de Octave/Matlab analogues: • toutes les chaînes sont entourés de guillemets simples, plutôt que des guillemets comme dans Lua. • Les fonctions Lua qui n'ont aucuns arguments requièrent un jeu de parenthèses vides après le nom de fonction (p. ex. mi\_analyze()). En Octave ou Matlab.

#### Magnetics Preprocessor Command Set

Il existe un certain nombre de différentes commandes dans le préprocesseur.

##### 4.1 Object Add/Remove Commands

- `mi_addnode(x, y)` Ajouter un nouveau nœud à x,y
- `mi_addsegment(x1, y1, x2, y2)` Ajouter un nouveau segment de la ligne du nœud le plus proche de (x1,y1) au nœud le plus proche de (x2,y2)
- `mi_addblocklabel(x, y)` Ajouter un nouveau label de bloc à (x,y)
- `mi_addarc(x1, y1, x2, y2, angle, maxseg)` Ajouter un nouveau segment d'arc à partir du nœud le plus proche (x1, y1) vers le nœud le plus proche à (x2, y2) avec angle « angle » divisée en segments de « maxseg ».



- `mi drawline (x1, y1, x2, y2)` Ajoute les nœuds à  $(x_1, y_1)$  et  $(x_2, y_2)$  et une ligne entre les nœuds.
- `mi drawpolyline ([x1, y1; x2, y2' . . . ])` Ajoute les nœuds à chacun des points spécifiés et les relie à segments.
- `mi drawpolygon ([x1, y1; x2, y2' . . . ])` Ajoute les nœuds à chacun des points spécifiés et les relie à segments pour former un contour fermé.
- `mi drawarc (x1, y1, x2, y2, angle, maxseg)` Ajoute les nœuds à  $(x_1, y_1)$  et  $(x_2, y_2)$  et ajoute un arc de l'angle spécifié et la discrétisation reliant les nœuds .
- `mi drawrectangle (x1, y1, x2, y2)` Ajoute des nœuds dans les coins d'un rectangle défini par les points  $(x_1, y_1)$  et  $(x_2, y_2)$ , puis ajoute des segments reliant les angles du rectangle.
- `mi deleteselected` Supprimer tous les objets sélectionnés.
- `mi deleteselectednodes` Supprimer objet sélectionné.
- `mi deleteselectedlabels` Supprimer des étiquettes de bloc sélectionné.
- `mi deleteselectedsegments` Delete selected segments.
- `mi deleteselectedarcsegments` Delete selects arcs.

### 4.2 Geometry Selection Commands

- `mi clearselected` Désactivez tous les nœuds sélectionnés, les blocs, les segments et les segments d'arc.
- `mi selectsegment (x, y)` Sélectionnez le segment de ligne le plus proche de  $(x, y)$
- `mi selectnode (x, y)` Sélectionnez le nœud le plus proche de  $(x, y)$ . Renvoie les coordonnées du nœud sélectionné.
- `mi selectlabel (x, y)` Sélectionnez le placard de l'étiquette à  $(x, y)$ . Renvoie les coordonnées de l'étiquette sélectionnée.
- `mi selectarcsegment (x, y)` Sélectionnez le segment d'arc plus proche de  $(x, y)$
- `mi selectgroup (n)` Sélectionnez l'énème groupe de nœuds, les segments, les segments d'arc et les blocklabels. Cette fonction efface tous les éléments précédemment sélectionnés et laisser l'editmode dans 4 (groupe)
- `mi selectcircle (x, y, R, editmode)` sélectionne les objets au sein d'un cercle de rayon  $R$  centré à  $(x, y)$ . Si seulement  $x, y$  et reçoivent des paramètres  $R$ , le mode édition actuel est utilisé. Si le paramètre `editmode` est utilisé, 0 désigne les nœuds, 2 indique bloc étiquettes, 2 désigne les segments, 3 désigne les arcs, et 4 spécifie que tous les types d'entité sont sélectionnables.
- `mi selectrectangle (x1, y1, x2, y2, editmode)` sélectionne des objets dans un rectangle défini par les points  $(x_1, y_1)$  et  $(x_2, y_2)$ . Si aucun paramètre `editmode` est fourni, le mode édition actuel est utilisé. Si le paramètre `editmode` est utilisé, 0 désigne les nœuds, 2 indique bloc étiquettes, 2 désigne les segments, 3 désigne les arcs, et 4 spécifie que tous les types d'entité doivent être `selected.selects` des objets dans un rectangle défini par les points  $(x_1, y_1)$  et  $(x_2, y_2)$ . Si aucun paramètre `editmode` est fourni, le mode édition actuel est utilisé.

## Annexes

Si le paramètre editmode est utilisé, 0 désigne les nœuds, 2 indique bloc étiquettes, 2 désigne les segments, 3 désigne les arcs, et 4 spécifie que tous les types d'entité sont sélectionnables.

### Annexes 3

#### L indice de protection

Protection contre les solides		Protection contre les liquides		Protection mécanique	
IP	Définition	IP	Définition	IP	Définition
0	Pas de protection	0	Pas de protection	0	Pas de protection
1	Protégée contre les corps solides supérieure à 50 cm	1	Protégée contre les chutes verticales des gouttes d'eau (condensation)	1	Energie de choc 0.255 J
2	Protégée contre les corps solides supérieure à 12 cm	2	Protégée contre les chutes des gouttes d'eau jusqu'à 15° de la verticale	2	Energie de choc 0.375 J
3	Protégée contre les corps solides supérieure à 2.5 cm	3	Protégée contre les chutes des gouttes d'eau jusqu'à 60° de la verticale	3	Energie de choc 0.5 J
4	Protégée contre les corps solides supérieure à 1 mm	4	Protégée contre les projections d'eau de toutes les directions	4	Energie de choc 2 J
5	Protégée contre les poussières (pas de dépôt nuisible)	5	Protégée contre les jets d'eau des toutes les directions à la lance	5	Energie de choc 0.6 J
6	Totalement protégée contre les poussières (ne concerne pas les tournantes)	6	Protégée contre les projections d'eau assimilée au paquet de mer	6	Energie de choc 20 J
7	-	7	Protégée contre les effets de l'immersion entre 0.1 et 1 m	7	-
8	-	8	Protégée contre les effets prolongés de l'immersion sous pression	8	-

#### Différent type de protection

L'**indice de protection (IP)** est un standard international de la Commission électrotechnique internationale relatif à l'étanchéité. Cet indice classe le niveau de protection qu'offre un matériel aux intrusions de corps solides et liquides. Le format de l'indice, donné par la norme CEI 60529, est IP 69 où les lettres 69 sont deux chiffres et/ou une lettre. Les chiffres indiquent

## Annexes

la conformité avec les conditions résumées dans les tableaux ci-dessous. Lorsqu'aucun critère n'est rencontré, le chiffre peut être remplacé par la lettre X.

Indice	1 <sup>er</sup> chiffre (dizaine) = Protection contre la poussière	2 <sup>nd</sup> chiffre (unité) = Protection contre l'eau
0	Aucune protection.	Aucune protection.
1	Protégé contre les corps solides supérieurs à 50 mm.	Protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau.
2	Protégé contre les corps solides supérieurs à 12,5 mm.	Protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 15° de la verticale.
3	Protégé contre les corps solides supérieurs à 2,5 mm.	Protégé contre l'eau en pluie jusqu'à 60° de la verticale.
4	Protégé contre les corps solides supérieurs à 1 mm.	Protégé contre les projections d'eau de toutes directions.
5	Protégé contre les poussières.	Protégé contre les jets d'eau de toutes directions à la lance (buse de 6,3 mm, distance 2,5 m à 3 m, débit 12,5 l/min ±5%).
6	Totalement protégé contre les poussières.	Protégé contre les forts jets d'eau de toutes directions à la lance (buse de 12,5 mm, distance 2,5 m à 3 m, débit 100 l/min ±5%).
7	-	Protégé contre les effets de l' <a href="#">immersion</a> (jusqu'à 1 m).  La pénétration d'eau en quantité nuisible ne sera pas possible lorsque l'équipement est immergé dans l'eau dans des conditions définies de pression et de temps (jusqu'à 1 m de submersion).
8	-	Matériel <a href="#">submersible</a> dans des conditions spécifiées (immersion prolongée) au delà de 1 m et pendant 30 minutes.  Normalement, cela signifie que l'équipement est hermétiquement fermé. Cependant, avec certains types de matériel, cela peut signifier que l'eau peut pénétrer, mais seulement à condition qu'elle ne produise pas d'effets nuisibles. Protection contre la submersion.
9	-	Matériel <a href="#">submersible</a> dans des conditions spécifiées (immersion prolongée) au delà de 1 m et Protection contre le nettoyage à

## Annexes

		haute pression.  Normalement, cela signifie que l'équipement est hermétiquement fermé et qu'il peut résister à une haute pression d'eau.
9K	-	Matériel <a href="#">submersible</a> dans des conditions spécifiées (immersion prolongée) au delà de 1 m et Protection contre le nettoyage à haute pression.  Normalement, cela signifie que l'équipement est hermétiquement fermé et qu'il peut résister à une haute pression d'eau. Norme pour Alimentation/Cuisines/etc...

Par exemple la notation IP 67 d'un produit signifie que le produit est totalement étanche à la poussière et protégé contre les effets de l'immersion jusqu'à 1 mètre de profondeur. Ce coefficient est défini dans les normes DIN40050, CEI 60529, BS 5490.