

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**ÉTUDE COMPARATIVE DE LA CHAÎNE DE PUISSANCE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA**

**MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE**

**PAR  
AMOS NGON**

**SEPTEMBRE 2020**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

## MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

### **Direction de recherche :**

Prof. Adam W. Skorek directeur de recherche

## Jury d'évaluation

Prof. Adam W. Skorek directeur de recherche

Prof. Alben Cardenas Gonzalez évaluateur

Dr Mauricio Higuita Cano évaluateur externe

Université du Québec à Trois-Rivières  
Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## Résumé

Les moteurs électriques occupent une place importante dans le monde industriel de nos jours et en particulier dans l'industrie automobile, par leurs rendements, leurs efficacités, leurs moindres coûts de maintenances et surtout pour le fait qu'ils émettent zéro pourcent de gaz à effet de serre, cela étant un facteur très avantageux pour la protection de l'environnement. Cette étude se focalise essentiellement sur l'utilisation d'une catégorie précise de moteurs électriques dans les applications automobiles à savoir : moteurs asynchrones à cage d'écureuil et le moteur synchrone à aimant permanent pour la raison suivante: Ces deux types de moteurs sont effectivement ceux qui reviennent le plus souvent lorsque nous réalisons une revue de la littérature sur les tractions électriques et les propulsions électriques. En plus de cela, les plus grands constructeurs d'automobiles utilisent ces deux types de moteurs. Nous avons parlé de leurs caractéristiques, de leurs impacts sur l'environnement, qui est un impact positif, car ils ne sont pas polluants, nous les avons comparés. Nous avons choisi de réaliser la modélisation et la commande vectorielle par orientation du flux rotorique du moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) pour le fait que son modèle soit fortement non-linéaire et par conséquent difficile à simuler. La commande a été élaborée et testée de manière synthétique avec des régulateurs PI, qui nous a servi à maintenir la tension à la valeur demandée. Le dispositif de commande a fait l'objet d'une analyse et d'une comparaison basée sur les performances et la robustesse vis-à-vis des variations de paramètres du moteur.

## **Remerciements**

Je remercie premièrement pour chaque soutien obtenu durant mes études et pour mon séjour au Canada.

Je remercie sincèrement au professeur Adam Skorek qui a accepté de m'encadrer pour ce travail de mémoire, pour son assistance et ses encouragements, qui ont été d'un apport très important pour ce mémoire.

Mes chaleureux remerciements vont également au professeur Mamadou Lamine Doumbia, qui m'a soutenu quand j'étais encore en Allemagne, en m'aidant pour la procédure de demande d'admission et pour surmonter les difficultés rencontrées dans le cadre de mes cours.

Je suis sincèrement reconnaissant envers tous ceux qui m'ont soutenu durant ce programme de maîtrise, en particulier mes amis de UQTR et à tous ceux qui liront ce mémoire, je dis également merci.

Sans toutefois oublier les membres de ma famille pour leur soutien et encouragements, je leur suis très reconnaissant et je leur dis grandement merci pour tout.

## Table des matières

Résumé.....	IV
Remerciements.....	V
Liste des tableaux.....	IX
Liste des figures .....	X
Liste des symboles .....	XIII
1. Introduction générale .....	1
1.1 Problématique.....	5
1.2 Objectif.....	5
1.3 Méthodologie .....	6
2. Types de moteurs utilisés dans le VE .....	7
2.1 Moteur Asynchrone .....	9
2.1.1 Introduction.....	9
2.1.2 Moteur asynchrone monophasé .....	10
2.1.3 Moteur à induction triphasé .....	11
2.1.4 Construction de base et principe de fonctionnement .....	13
2.1.5 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé.....	14
2.1.6 Constitution d'un moteur asynchrone triphasé .....	16
2.1.7 Rotor .....	16
2.1.8 Type du rotor d'un moteur asynchrone.....	16
2.1.9 Stator.....	19
2.1.10 Les paliers .....	20
2.1.11 Couple du MAS à cage en fonction de la vitesse.....	20
2.1.12 Avantages et inconvénients des MAS.....	22
2.1.13 Classification des rotors de à cage d'écureuil.....	22
2.1.14 Domaines d'applications.....	22
2.2. Modélisation triphasée du moteur asynchrone à cage .....	23

2.2.1 Introduction.....	23
2.2.2 Représentation schématique du moteur asynchrone .....	23
2.2.3 Hypothèses simplificatrices .....	24
2.2.4 Modèle dynamique dans le repère triphasé.....	25
2.2.5 Équations électriques .....	25
2.2.6 Équations magnétiques .....	25
2.2.7 Équation mécanique.....	26
2.2.8 Transformation de Park.....	27
2.2.9 Application de la transformée de Park au modèle triphasé.....	27
2.2.10 Conclusion .....	28
2.3. Présentation du moteur synchrone à aimant permanent PMSM(MSAP) .....	29
2.3.1 Principe de fonctionnement du moteur synchrone à aimant permanent.....	29
2.3.2 Différentes structures des moteurs synchrones à aimant permanent .....	29
Type du rotor Moteur PMSM .....	29
Les aimants permanents.....	30
2.3.3. Couple du PMSM/MSAP .....	35
2.3.4 Avantages.....	36
2.3.5 Inconvénients .....	36
2.3.6 Domaines d'applications.....	36
2.4 Modélisation de l'ensemble MSAP et onduleur autonome .....	36
2.4.1 Introduction.....	36
2.4.2 Onduleurs.....	37
2.4.3 Modélisation d'un onduleur de tension.....	37
2.4.4 Stratégie de commande de l'onduleur.....	38
2.4.5 Hypothèses simplificatrices .....	38
2.4.6 Mise en équation du MSAP dans le repère triphasé .....	38
2.4.7 Équation électrique .....	39
2.4.8 Équation mécanique.....	40
2.4.9 Équation magnétique .....	40
2.4.10 Transformation de Park.....	40
2.5 Conclusion .....	41

3 Étude comparative .....	42
3.1 Introduction.....	42
3.2 Moteur Synchrone à amant permanent MSAP(PMSM) .....	42
3.3 Moteur asynchrone à cage (MAS) .....	43
3.4 Constitution du MAS et du MSAP .....	43
3.5 Analyse des paramètres.....	43
3.6 Evaluation d'efficacité .....	50
3.7 Conclusion de la comparaison .....	51
4. Commande vectorielle du MSAP .....	52
4.1 Introduction.....	52
4.2 Principe de la commande vectorielle .....	52
4.3 Commande vectorielle du MSAP alimenté en Tension .....	54
4.4 Découplage .....	55
4.5 Découplage par compensation .....	55
4.6 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle .....	57
4.6.1 Avantages de la commande vectorielle.....	57
4.6.2 Inconvénients de la commande vectorielle .....	57
4.7 Choix des régulateurs.....	57
4.7.1 Concevoir un régulateur.....	58
4.7.2 Calcul des r/gulateurs.....	60
4.8 Simulation de la commande vectorielle du MSAP piloté par onduleur de tension .....	58
4.9 Interprétation des résultats de la simulation.....	81
4.10 Conclusion .....	81
5 Conclusion générale .....	82
Références .....	84
Annexe .....	91

## Liste des tableaux

Tableau 2-1	Liste des véhicules hybrides commercialisés .....	6
Tableau 2-2	Principales caractéristiques magnétiques des différents aimants.....	28
Tableau 3-1	Moteurs utilisés dans différentes applications .....	38
Tableau 3-2	Comparaisons de caractéristiques du MAS et du PMSM .....	39
Tableau 3-3	Comparaison des performances.....	40
Tableau 3-4	Évaluation des caractéristiques des moteurs .....	43
Tableau 4-1	Éléments du navigateur de la bibliothèque.....	48

# Liste des figures

Transformation de l'énergie de l'entrée vers la sortie

Figure 1-1	Types de véhicules électriques hybrides .....	2
Figure 1-2	Voiture à pile à combustible.....	3
Figure 2-1	Liste des moteurs électriques existants .....	8
Figure 2-2	Transformation de l'énergie de l'entrée vers sortie .....	9
Figure 2-3	Moteur asynchrone triphasé .....	11
Figure 2-4	Moteur asynchrone et ses parties .....	11
Figure 2-5	Représentation spatial des enroulements dans le stator.....	12
Figure 2-6	Bobine parcourue par un courant alternatif.....	13
Figure 2-7	Deux bobines parcourues par deux courants alternatifs.....	13
Figure 2-8	Enroulements triphasés parcourus par trois courants alternatifs.....	14
Figure 2-9	Rotor à cage du moteur asynchrone .....	15
Figure 2-10	Le stator d'un moteur asynchrone triphasé .....	15
Figure 2-11	Couple du moteur asynchrone à cage .....	17
Figure 2-12	Moteur synchrone à aimant permanent .....	19
Figure 2-13	Différents rotors du moteur synchrone.....	20
Figure 2-14	Couple du MAS à cage.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 20
Figure 2-15	Modèle schématique trphasé du MAS .....	24
Figure 2-16	Repérage angulaires des systèmes axes des différents repères .....	28
Figure 2-17	Moteur synchrone à aimant permanent .....	29
Figure 2-18	Différents rotors du MSAP .....	30
Figure 2-19	Courbe de désaimantation .....	31

Figure 2-20	Courbe de B(H) des différents aimants .....	32
Figure 2-21	Aimant permanent terre rare .....	34
Figure 2-22	Aimant permanent en ferrite .....	34
Figure 2-23	Aimant permanent en AlNiCo .....	35
Figure 2-24	Schéma de l'association MSAP-Onduleur .....	37
Figure 2-25	Schéma de l'onduleur triphasé .....	38
Figure 2-26	Le MSAP dans le repère triphasé .....	39
Figure 2-27	Transformation de Park .....	41
Figure 3-1	Rendement du MAS à cage et du MSAP pour la compression.....	47
Figure 3-2	Rendements du MAS à cage et du MSAP dans le cas de petit moteurs .....	48
Figure 3-3	Rendement du MAS à cage à gauche et MSAP à droite .....	49
Figure 4-1	Phase du MSAP dans le repère (d, q) liée au champ tournant.....	46
Figure 4-2	Commande par orientation de flux rotorique du MSAP.....	48
Figure 4-3	Couplage entre les axes d et q.....	49
Figure 4-4	Couplage par compensation du MSAP.....	50
Figure 4-5	Découplage de la commande du MSAP.....	50
Figure 4-6	Commande par régulateur.....	51
Figure 4-7	Boucle de régulation $I_d$ .....	52
Figure 4-8	Boucle de régulation $I_q$ .....	53
Figure 4-9	Boucle de régulation $\Omega$ .....	53
Figure 4-10	Boucle de réglage de vitesse avec limitation de courant.....	55
Figure 4-11	Régulateur PI avec la mesure Anti-Winup.....	55
Figure 4-12	Environnement de Matlab.....	56
Figure 4-13	La Librairie de Simulink.....	56
Figure 4-14	Vitesse du MSAP en fonction du temps.....	59

Figure 4-15	Couple électromagnétique en fonction du temps.....	60
Figure 4-16	Flux en fonction du temps.....	60
Figure 4-17	Courant Statorique sur l'axe d en fonction du temps.....	61
Figure 4-18	Courant Statorique sur l'axe q en fonction du temps.....	61
Figure 4-19	Courant Statorique en fonction du temps.....	62
Figure 4-20	Vitesse du MSAP avec inversion en fonction du temps.....	62
Figure 4-21	Couple électromagnétique en fonction du temps .....	63
Figure 4-22	Flux en fonction du temps .....	63
Figure 4-23	Courant statorique sur l'axe d en fonction du temps .....	64
Figure 4-24	Courant Statorique sur l'axe q en fonction du temps .....	64
Figure 4-25	Courant Statorique en fonction du temps .....	65
Figure 4-26	Vitesse du MSAP sous forme de trapèze en fonction du temps.....	65
Figure 4-27	Couple électromagnétique en fonction du temps.....	66
Figure 4-28	Flux en fonction du temps.....	66
Figure 4-29	Courant Statorique en fonction du temps.....	67
Figure 4-30	Courant Statorique sur l'axe q en fonction du temps.....	67
Figure 4-31	Courant Statorique en fonction du temps.....	68
Figure 4-32	Vitesse du MSAP en charge en fonction du temps.....	68
Figure 4-33	Couple électromagnétique en fonction du temps.....	69
Figure 4-34	Flux en fonction du temps.....	69
Figure 4-35	Courant statorique sur l'axe d en fonction du temps.....	69
Figure 4-36	Courant Statorique sur l'axe q en fonction du temps .....	70
Figure 4-37	Courant Statorique en fonction du temps.....	70
Figure 4-38	Vitesse du MSAP avec variation de Rs en fonction du temps.....	71
Figure 4-39	Courant statorique en fonction du temps.....	71

Figure 4-40	Vitesse de MSAP en charge en fonction du temps.....	72
Figure 4-41	Couple électromagnétique et Couple de charge en fonction du temps.....	72
Figure 4-42	Flux du MSAP en fonction du temps.....	72
Figure 4-43	Courant statorique sur l'axe d en fonction du temps.....	73
Figure 4-44	Courant Statorique sur l'axe q en fonction du temps.....	73
Figure 4-45	Courant statorique en fonction du temps.....	74
Figure 4-46	Vitesse du MSAP en fonction du temps.....	74
Figure 4-47	Couple électromagnétique en fonction du temps.....	75
Figure 4-48	Flux du MSAP en fonction du temps.....	75
Figure 4-49	Courant Statorique sur l'axe d en fonction du temps.....	76
Figure 4-50	Courant Statorique sur l'axe q en fonction du temps.....	76
Figure 4-51	Courant statorique en fonction du temps.....	77

## Liste des symboles

Symbol	Sgnification	Unité
<b>MSAP</b>	Moteur synchrone à aimant permanent	
<b>ASM</b>	Asynchronous Motor	
<b>PMSM</b>	Permanent Magnet synchronous motor	
<b>MAS</b>	Moteur asynchrone	
<b>MRC</b>	Moteur à Réductance Commutée	
<b>SRM</b>	Switched Reluctance Motor	
<b>IPM</b>	Interior Permanent Magnet (Motor)	
<b>d,q</b>	Composantes de Park liées au rotor directe et quadrature	
<b>a,b</b>	Référentiel fixe lié au stator	
<b>f.m.m</b>	Force magnétomotrice	
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'impulsion	
<b>t</b>	Temps	s
<b>P</b>	Opérateur de la Place(d/dt)	
<b>MCC</b>	Moteur à courant continu	

<b>CC</b>	Courant continu	
<b>MLIST</b>	Modulation par largeur d'impulsion sinus-triangulaire	
<b>STPWM</b>	Sinus Triangular Pulse Width modulation	
<b>PI</b>	Correcteur proportionnel intégrale	
<b>P.I.D</b>	Action proportionnelle intégrale dérivée	
<b>CMG</b>	Commande par mode glissant	
<b>VSS</b>	Variable structur System	
<b>CSV</b>	Commande à structure variable	
<b>MC</b>	Mode de commande	
<b>MG</b>	Mode de glissement	
<b>MRP</b>	Mode de régime permanent	
<b>f.e.m</b>	Force électromotrice	
<b>FTBO</b>	Fonction de transfert en boucle ouverte	
<b>FTBF</b>	Fonction de transfert en boucle fermée	
<b>[ Vs ]</b>	Tension continue appliquée à l'onduleur	V
<b>I</b>	Courant statorique de ligne	A
<b>ϕ</b>	Flux magnétique	Wb
<b>P(θ)</b>	Matrice de passage direct de Park	
<b>P(θ)<sup>-1</sup></b>	Matrice de passage inverse de Park	
<b>[ R ]</b>	Matrice de passage ( $\alpha, \beta$ ) au (d,q)	
<b>[ C ]</b>	Matrice de passage (a,b,c) au ( $\alpha, \beta$ )	
<b>[ C ]<sup>-1</sup></b>	Matrice de passage ( $\alpha, \beta$ ) au (a,b,c)	
<b>X<sub>abc</sub></b>	Vecteur de variable X dans le repère triphasé	
<b>X<sub>αβο</sub></b>	Vecteur diphasé qui correspond au vecteur <b>X<sub>abc</sub></b>	
<b>X<sub>dqo</sub></b>	Vecteur de variable X dans le repère de Park	
<b>L<sub>d</sub>, L<sub>q</sub></b>	Inductances des axes d, q	H
<b>I<sub>d</sub>, I<sub>q</sub></b>	Courants des axes d et q	A
<b>V<sub>d</sub>, V<sub>q</sub></b>	Tensions des axes d et q	V
<b>φ<sub>d,φq</sub></b>	Flux de axes d et q	Wb
<b>X<sub>o</sub></b>	Homopolaire	
<b>T<sub>i</sub></b>	Interrupteurs de l'onduleur	
<b>S<sub>i</sub></b>	Commande logique des interrupteurs	
<b>f<sub>p</sub></b>	Fréquence de la porteuse	Hz
<b>f<sub>r</sub></b>	Fréquence de la référence	Hz
<b>V<sub>p</sub></b>	Tension de la porteuse	V
<b>V<sub>r</sub></b>	Tension de la référence	V
<b>k<sub>p</sub></b>	Gain proportionnel du régulateur PI	
<b>k<sub>i</sub></b>	Gain intégral du régulateur PI	
<b>T<sub>i</sub></b>	Constante de temps intégrale	
<b>s</b>	Opérateur de Laplacien	
<b>S(x)</b>	Surface de glissement de la variable x	
<b>e(x)</b>	Ecart de la variable à régler	
<b>λ(x)</b>	Constante positive qui intègre la bande passante du contrôle désiré	

$\mathbf{V(x)}$	Fonction de Lyapunov	
$V_{dref}, I_{dref}$	Tension et courant de référence	
$\mathbf{u}$	Grandeur de la commande	
$\mathbf{U}_{eq}$	Commande équivalente	
$r$	Degré relatif	
$K$	Gain positif	
$[i_s]$	Vecteur courant statorique	A
$[R_s]$	Matrice résistance stator	Ohms
$R_s$	Résistance de l'enroulement du stator	Ohms
$[L_{ss}]$	Matrice inductance stator	H
$L_{ss}$	Inductance cyclique statorique par phase	H
$[\varphi_{sf}]$	Vecteur flux engendré par l'aimant	Wb
$[\varphi_s]$	Vecteur flux statorique	Wb
$w$	Pulsation électrique	rad/s
$w_r$	Vitesse de rotation de la machine	rad/s
$C_{em}$	Couple électromagnétique délivré par le moteur	N.m
$C_r$	Couple résistant	N.m
$P$	Puissance	Watts
$p$	Nombre de paires de pôles	
$J$	Moment inertie des parties tournantes ramenées à l'arbre moteur	$kg \cdot m^2$
$\theta$	Angle entre l'axe d et l'angle de référence dans le système triphasé	
$f$	Coefficient de frottement visqueux	N.m.s/rad

# 1. Introduction générale

Les Moteurs électriques consomment une grande partie d'énergie électrique dans le monde, il a été estimé que les moteurs électriques représentent environ 44 à 46% de la consommation mondiale en électricité [1] Durant les années antérieures, la prise de conscience mondiale des problèmes environnementaux a augmenté et cela étant, les nouvelles réglementations sur l'efficacité des moteurs électriques ont été introduites à travers le monde. La réduction de la consommation en énergie des moteurs électriques peut être réalisée en utilisant les moteurs électriques plus efficaces et en appliquant les convertisseurs de fréquence pour alimenter les moteurs en fonction de la charge demandée. La réglementation sur l'efficacité des moteurs repose sur la classification d'efficacité. La Commission d'Électrotechnique Internationale (CEI) spécifie quatre normes internationales d'efficacités (IE). Classes pour moteurs à vitesse monophasé, moteur asynchrone triphasé à cage :

IE1- Rendement standard

IE2- Haut rendement

IE3- Rendement premium

IE4- Rendement super premium

Les moteurs électriques font partie intégrante de la chaîne de puissance des voitures et en particulier des véhicules électriques, dont nous évoquerons dans le cadre de ce travail [2 3].

## Historique du Véhicule électrique :

La Voiture électrique est l'un des sujets les plus importants de ce XXIème siècle, malgré le fait que celle-ci date du XIXème siècle, car les premiers prototypes de voiture électrique ont été inventée entre 1834 et 1881, elle connaît naturellement un succès durant ce temps grâce au perfectionnement des Batteries par Gaston planté en 1865 et par Camille Faure et 1881 [4].

Les efforts de recherches actuel dans le domaine des véhicules électriques, concentrés sur certaines difficultés telles que l'accumulation de l'Electricité dans le véhicule, la faible autonomie, le manque de station de recharge rapide, n'ont pas encore aboutie à des résultats satisfaisants. De ce fait, l'utilisation de ce type de véhicule est limitée aux transports urbains. Initialement considéré comme une transition entre les véhicules classiques et les véhicules électriques, les véhicules hybrides restent une alternative qui gagne du terrain, car ils combinent les avantages des deux types de véhicules qui sont : les véhicules classiques et les véhicules électriques. Il existe trois types de véhicules hybrides à savoir : Véhicules Hybride série (VHS), Véhicules Hybride Parallèle (VHP) et Véhicules Hybride Mixte [5].

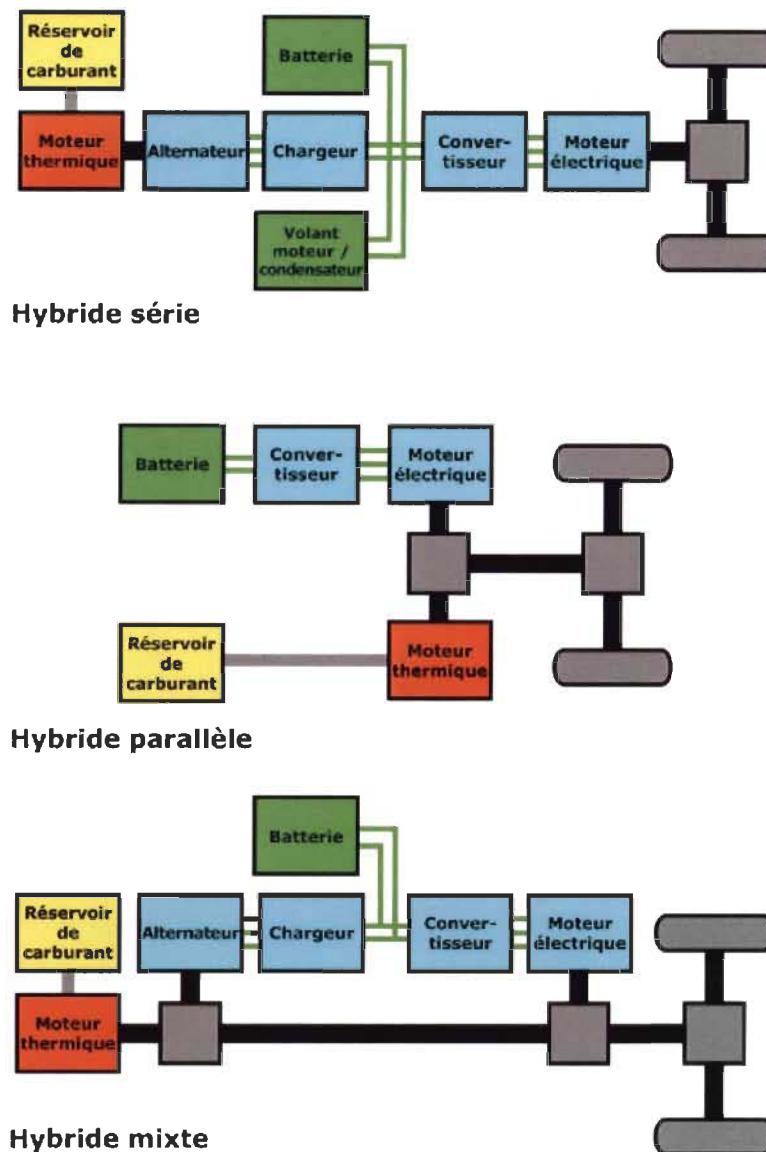


Figure 1-1 : Types de Véhicules électriques Hybrides [107]

La variation des prix du carburant et le réchauffement climatique sont les principaux motifs de l'abandon par les populations de l'utilisation des véhicules classiques, qui dépendent entièrement du carburant. La quête des hydrocarbures alternatifs a augmenté ces dernières années [6] et de nombreux véhicules avancés tels que les véhicules à pile à combustible (VPC), les véhicules électriques hybrides, font l'objet d'intenses Travaux de recherches. Les systèmes véhicules électriques hybrides incorporent le stockage de l'énergie dans leur groupe motopropulseur pour améliorer leur efficacité. Les véhicules à pile à combustible utilisent l'hydrogène comme carburant pour produire de l'électricité afin de pouvoir propulser le véhicule [7].

Exemple de véhicule à pile à combustible du Constructeur Toyota, la marque est MIRAI à voir dans la figure 1-2 suivante.

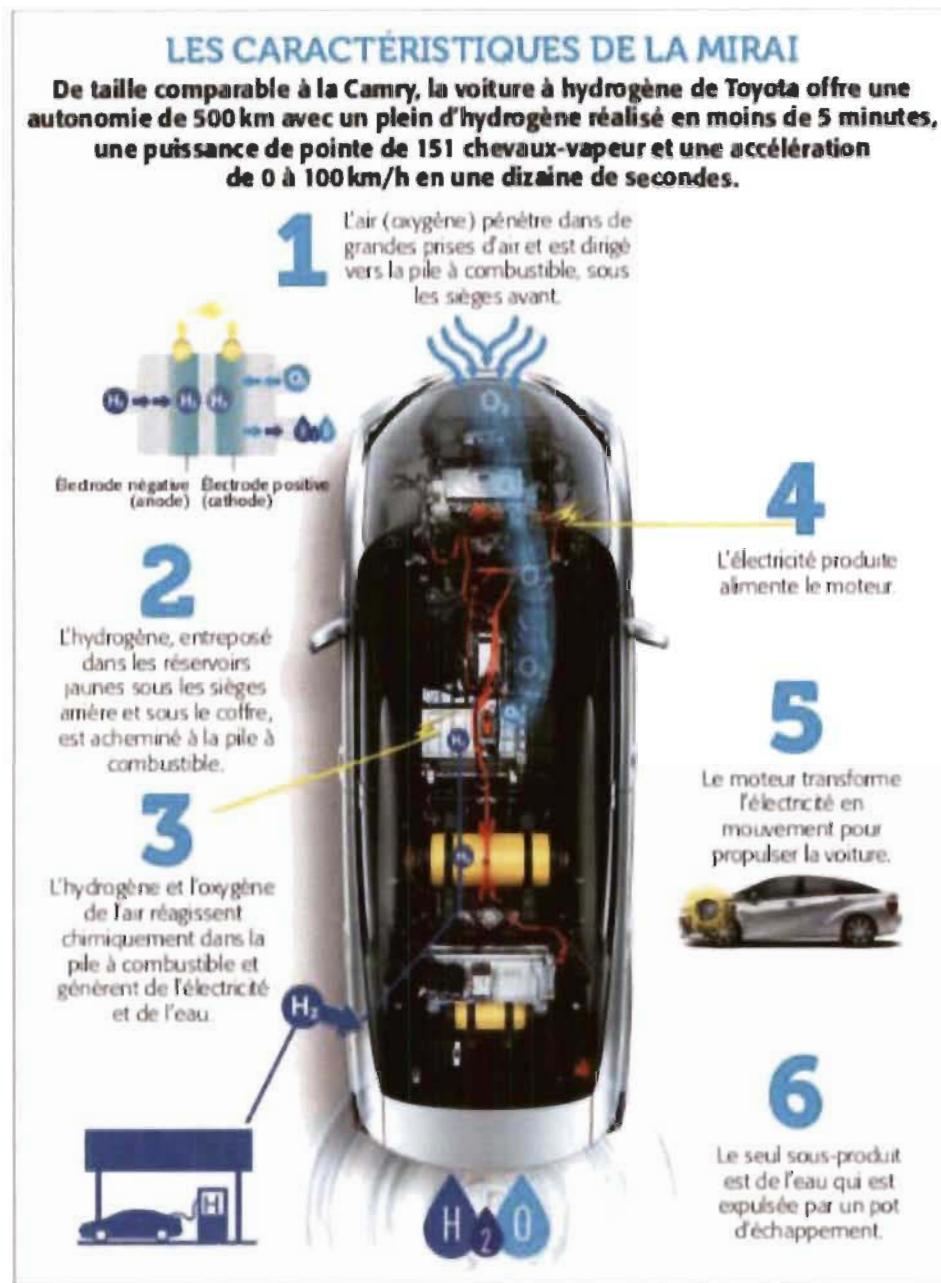


Figure 1- 2 : Voiture à pile à combustible [104][8]

Puisque l'électricité est générée par une réaction chimique impliquant de l'hydrogène, les VPC ne produisent pas de polluants et sont donc considérés comme sans émission. Même si les VPC ont un fonctionnement plus silencieux et produisent moins d'émissions de gaz à effet de serre, elles nécessitent de nouvelles infrastructures pour leur fabrication et leur maintenance ainsi que la production et la distribution d'hydrogène, ce qui les rend coûteux et difficile de faire leur entré

dans le marché mondial d'automobile. Les véhicules électriques hybrides (HEV) consomment peu de carburant grâce à la récupération de l'énergie cinétique lors du freinage par récupération et également en raison de la présence de source d'énergie électrique réduisant la dépendance au carburant [9] Les VHE utilisent un système de moteur à combustion interne (MCI) pour convertir l'énergie chimique stockée dans l'essence en énergie mécanique et enfin électrique utilisée pour entraîner le moteur électrique de traction.

Le choix de la traction électrique la mieux adaptée pour ces applications fait encore l'objet de beaucoup de débats. Les moteurs électriques que l'on retrouve le plus dans ces applications, sont les moteurs asynchrones et les moteurs synchrones à aimant permanent, comme nous pouvons le remarquer dans le Tableau 2-1 ci-dessous [10]

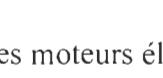
Véhicule	Type du Véhicule	Photo	Type du Moteur	Puissance	Batterie	Tension Autonomie
Smart Fortwo Electric	2 places		BLDC	55 kW	Li-ion 17.6 kWh	339 V 110 km
Fiat 500e (2014)	Mini-Compact		MSAP	82 kW	Li-ion 24 kWh	399 V 140 km
Toyota Scion iQ	Mini-Compact		MS	47 kW	Li-ion 16.6 kWh	270 V 85 km
Chevrolet Spark EV (2014)	Compact		MAS	104 kW	Li-ion	370 V 130 km
Ford Focus Electric	Compact		MSAP	107 kW	Li-ion 20 kWh	350 V 120 km
Mitsubishi i-MiEV	Compact		BLDC	49 kW	Li-ion 14.5 kWh	330 V 122 km
Nissan Leaf	Moyenne		MSAP	80 kW	Li-ion 24 kWh	360 V 195 km
Tesla model S (2013)	Grande		MAS	238 kW à 401 kW	Li-ion 40 kWh- 85 kWh	400 V 220 km - 420 km
Honda Fit EV	Wagon		BLDC	92 kW	Li-ion 20 kWh	330 V 130 km
Toyota RAV 4 (2014)	SUV		MAS	115 kW	Li-ion 41.8 kWh	396 V 160 km

Tableau 1-1 : Types de Véhicules et les moteurs électriques utilisés

C'est en cherchant une réponse à la question suivante : Pourquoi retrouve t'on le plus souvent ces deux types de moteurs électriques dans les applications de véhicules électriques, qu'il m'est venu à l'esprit de faire de cette question un thème de mémoire, qui fera l'objet de mes recherches. Les travaux de ce mémoire qui entrent dans le cadre du programme de la maîtrise en génie électrique avec mémoire de l'UQTR sont présentés de la manière suivante : Le second chapitre a fait l'objet d'une étude du moteur asynchrone à cage dans son ensemble, partant de sa structure jusqu'à sa modélisation en passant par sa représentation dans le repère de Park et dans la même lancé, la même étude a aussi été faite pour le moteur synchrone à aimant permanent.

Dans le troisième chapitre, nous avons effectué une étude comparative proprement dite qui a été basée sur les aspects et paramètres suivants :

✓ **Du point de vue de la Construction (Caractéristiques des deux Moteurs)**

Nous avons étudié la constitution du MAS et celle du MSAP, avons fait une comparaison des deux constitutions.

✓ **Analyse des Paramètres**

Une Analyse et une Comparaison des paramètres ont été faite.

✓ **Évaluation d'efficacité**

Après la comparaison, nous avons réalisé la commande vectorielle du moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) par orientation de flux rotorique sous le logiciel Matlab/Simulink, les résultats ont été naturellement présentés et interprétés. Le modèle adopté s'est basé sur la transformation de Park et l'utilisation de deux régulateurs de notre choix. Cela a constitué le quatrième chapitre de notre travail.

Et le cinquième chapitre a fait l'objet d'une conclusion générale de tout le travail effectué et d'une proposition des travaux futures.

### 1.1 Problématique

Le choix d'un entraînement électrique pour une application quelconque, implique de trouver un compromis entre performance, robustesse, rendement, fiabilité et le coût suivant l'utilisation de cette application, le besoin étant ainsi justifié, nous avons trouvé bon de faire une étude analytique et théorique, qui pourra nous permettre de comparer les deux types de moteurs électriques les plus répandues sur le marché mondial des véhicules électriques à l'heure actuelle, à noter : moteur asynchrone à cage et moteur synchrone à aimant permanent.

### 1.2 Objectif

Ce Projet avait pour but d'étudier premièrement le moteur asynchrone à cage y compris ses avantages et inconvénients pour les applications de véhicules électriques, en suite une étude identique a également été faite pour le moteur synchrone à aimant permanent, et une comparaison aussi sur la base des critères suivants :

- ✓ Caractéristiques(constitution)
- ✓ Analyse des paramètres
- ✓ Evaluation de l'efficacité

Finalement, nous avons réalisé une modélisation et la commande vectorielle du moteur synchrone à aimant permanent sous un environnement du logiciel Matlab/Simulink/SimPowerSystems.

La modélisation nous permet par la suite de faire une simulation du modèle obtenu, le MSAP a un modèle dynamique fortement non linéaire, ce qui rend sa simulation très complexe. Une présentation et une interprétation des résultats de la simulation ont été faite.

### **1.3 Méthodologie**

Nous allons dans le cadre de ce Travail faire une Recherche Bibliographique, une étude théorique du Moteur asynchrone à cage et du Moteur synchrone à aimant permanent. La modélisation et la commande vectorielle du moteur synchrone à aimant permanent sera faite en utilisant le logiciel Matlab/Simulink/SimPowerSystems / et les résultats de simulation de la commande sont présentés et interprétés. Nous n'avons pas à faire la modélisation et la commande vectorielle du moteur asynchrone à cage, pour la simple raison que cela soit faisable de manière similaire à celle du moteur synchrone à aimant permanent.

## **2. Types de moteurs utilisés dans le VE**

Les moteurs électriques sont à présent, hormis des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires. Leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, leur donne une importance économique toute particulière qui fait qu'aucun concepteur d'installation ou de machine, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer [11]

### **Généralités sur les moteurs électriques :**

Les moteurs électriques sont des convertisseurs statiques, qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils ne polluent pas l'environnement, parce qu'ils émettent 0% de gaz à effet de serre. Grâce au progrès dans le domaine de l'électronique de puissance, nous pouvons varier leurs vitesses, ce qui nous donne de pouvoir les utiliser dans une variété d'applications qui nécessitent une variation de vitesse ou alors les applications de diverses puissances, car la puissance des moteurs varie selon leur utilisation dans les applications. Les moteurs de faibles puissances ( $P < 600W$ ) par exemple sont utilisés pour les applications comme le micro-ventilateurs, les disques dures [11][75] Les moteurs électriques peuvent être regrouper en trois grandes catégories qui sont :

- **Moteurs Universels (MU)**
- **Moteurs à Courant continu (MCC)**
- **Moteurs à Courant Alternatif (MCA)**

Les moteurs universels ont un principe de fonctionnement identique à celui d'une machine à courant continu à excitation série (la MCC est un convertisseur électromécanique bidirectionnel, qui converti l'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique) , ils peuvent être utilisés comme moteur à courant continu lorsqu'ils sont alimentés par une source de tension continue, ou alors être utilisé comme moteur à courant alternatif, lorsqu'ils sont alimentés en courant alternatif. À cause de leurs mauvais rendements de l'ordre d'environ 60% en comparaison avec ceux des technologies de Brushless qui sont supérieur à 85%, et de l'usure du collecteur et balais qui nécessitent une maintenance, nous n'allons pas considérer ce moteur comme faisant parti de l'objet de notre étude et travail. La figure 2-1 ci-dessous nous donne les deux catégories restantes [12][105]

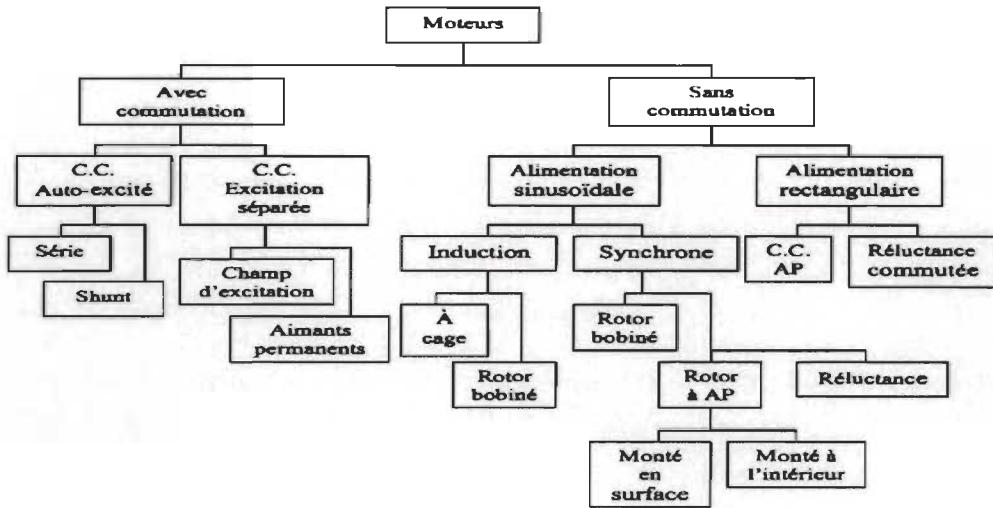


Figure 2- 1:Classification des Moteurs électriques existant [13]

En nous référant du Tableau ci-dessous de véhicules électriques hybrides ci-dessous, en rapport avec la Figure 2-1, nous pouvons constater que le moteur asynchrone (moteur à induction/induction motor) figure quatre fois, suivi du moteur synchrone à aimant permanent (synchronous permanent magnet motor).

Véhicule	Type du Véhicule	Photo	Type du Moteur	Puissance	Batterie	Tension / Autonomie
Smart Fortwo Electric	2 places		BLDC	55 kW	Li-ion 17.6 kWh	339 V 110 km
Fiat 500e (2014)	Mini-Compact		MSAP	82 kW	Li-ion 24 kWh	399 V 140 km
Toyota Scion IQ	Mini-Compact		MS	47 kW	Li-ion 16.6 kWh	270 V 85 km
Chevrolet Spark EV (2014)	Compact		MAS	104 kW	Li-ion	370 V 130 km
Ford Focus Electric	Compact		MSAP	107 kW	Li-ion 20 kWh	350 V 120 km
Mitsubishi i-MiEV	Compact		BLDC	49 kW	Li-ion 14.5 kWh	330 V 122 km
Nissan Leaf	Moyenne		MSAP	80 kW	Li-ion 24 kWh	360 V 195 km
Tesla model S (2013)	Grenade		MAS	238 kW à 401 kW	Li-ion 40kWh-85 kWh	400 V 220 km - 420 km
Honda Fit EV	Wagon		BLDC	92 kW	Li-ion 20 kWh	330 V 130 km
Toyota RAV 4 (2014)	SUV		MAS	115 kW	Li-ion 41.8 kWh	386 V 160 km

Tableau 2- 1 : Liste des véhicules électriques commercialisés [14]

## 2.1 Moteur Asynchrone

### 2.1.1 Introduction

Les moteurs à induction à courant alternatif (AC) sont les moteurs les plus couramment utilisés dans les systèmes de commande de mouvement industriels, ainsi que dans les Appareils ménagers principaux alimentés en courant alternatif. Simple et robuste conception, faible coût, faible maintenance et connexion directe à une source d'alimentation en courant alternatif sont les principaux avantages de moteurs à induction AC.

Différents types de moteurs à induction alternatifs sont disponibles dans le marché. Différents moteurs sont adaptés pour différentes applications. Bien que les moteurs à induction soient plus faciles à concevoir que les moteurs à courant continu, le contrôle de la vitesse et du couple de divers types de moteurs à induction nécessite une plus grande compréhension de la conception et de la caractéristique de ces moteurs. Cette note d'application traite des bases d'un moteur à induction; les différents types, leurs caractéristiques, les critères de sélection des différentes applications et techniques de contrôle de base.[52]

Le moteur à induction (IM) est un type de moteur à courant alternatif asynchrone où le dispositif en rotation est alimenté par induction électromagnétique. Le moteur à induction a été inventé par Nikola Tesla en 1882 en France, mais le brevet a été délivré en 1888 après que Nikola tesla ait transférer son cierge aux États-Unis. Tesla a mis les bases de la compréhension du fonctionnement du moteur. En 1889 l'électricien Allemand d'origine russe Mikhail Dolivo-Dobrosvolski inventa le moteur asynchrone triphasé à rotor à cage. Les moteurs asynchrones sont couramment utilisés dans les applications de véhicules électriques en raison de la simplicité de leur structure, de leur fiabilité, leur efficacité, aux moindres coûts de maintenance, leur habileté à fonctionner dans un environnement hostile. La figure ci-dessous nous montre le principe de transformation de l'énergie électrique à l'entrée vers une énergie mécanique à la sortie [15][16]

Les moteurs asynchrones se regroupent en deux catégories qui sont :

- Moteur asynchrone monophasé
- Moteur asynchrone triphasé

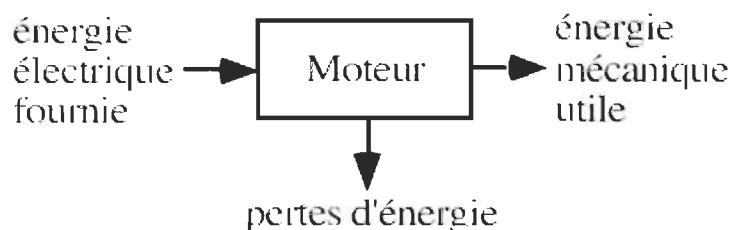


Figure 2- 2 : Transformation de l'énergie de l'entrée vers la sortie [16]

### **2.1.2 Moteur asynchrone monophasé**

Il y a probablement plus de moteurs à induction monophasés utilisés aujourd'hui que le total de tous les autres types mis ensemble. Il est logique que le moteur le moins coûteux et qui nécessite le moins d'entretien soit utilisé le plus souvent. Le moteur à induction monophasé convient le mieux à cette description.

Le moteur asynchrone monophasé se constitue essentiellement d'un rotor à cage identique à celui des moteurs triphasés, et d'un stator. Le stator porte un enroulement principal bobiné de façon à former des pôles dont le nombre détermine la vitesse du moteur. Il porte aussi un enroulement auxiliaire qui fonctionne seulement durant la brève période de démarrage. L'enroulement auxiliaire a le même nombre de pôles que l'enroulement principal et est disposé à 90° de ce dernier. L'enroulement principal produit un flux  $\phi_s$  et l'enroulement auxiliaire, un flux  $\phi_a$ . Si ces deux flux sont déphasés l'un par rapport à l'autre, il en résulte un champ tournant. On obtient un champ tournant parfait quand  $\phi_s$  et  $\phi_a$  sont égaux et déphasés de 90°. Dans ces conditions, le couple de démarrage atteint sa valeur maximale et le moteur fonctionne en moteur diphasé. Cependant, comme on le verra plus loin, le déphasage est généralement inférieur à la valeur idéale de 90°. Différentes techniques existent pour déphaser les flux, la plus utilisée aujourd'hui consiste en la mise en série d'un condensateur avec l'enroulement auxiliaire. Le moteur agit comme un véritable moteur diphasé seulement lorsqu'il fonctionne à pleine charge. Dans ces circonstances, les courants  $I_a$  et  $I_s$  créés par les deux enroulements sont égaux et déphasés de 90°. Par conséquent, pour ce type de moteur, la vibration qui caractérise les moteurs monophasés est éliminée lorsqu'il fonctionne à pleine charge. Cependant, la vibration réapparaît aux faibles charges. Notons aussi que la vitesse synchrone d'un moteur monophasé obéit à la même loi qu'un moteur triphasé.

Le moteur à induction monophasé ne démarre pas automatiquement. Lorsque le moteur est connecté à une alimentation monophasée, le bobinage principal est alimenté en courant alternatif.

En fonction des différentes techniques de démarrage, les moteurs à induction monophasés sont en outre classés comme décrit dans les sections suivantes :

- **(A) Moteur asynchrone monophasé à démarrage par phase auxiliaire**
- **(B) Moteur asynchrone monophasé à lancement manuel**

#### **A) Moteur asynchrone monophasé à démarrage par phase auxiliaire**

Dans ce type de moteur, le couple de démarrage est créé par un enroulement auxiliaire. Le flux magnétique créé par cet enroulement doit être déphasé par rapport au flux principal. Le stator de ce moteur comporte donc au minimum deux enroulements décalés géométriquement de 90°. On place un condensateur en série avec l'enroulement auxiliaire de manière à créer un déphasage. Le champ tournant résultant est alors suffisant pour provoquer le démarrage du moteur. Le procédé le plus utilisé pour créer le déphasage est le condensateur, mais on peut aussi utiliser une inductance (ou self), ou encore des résistances. Le circuit auxiliaire peut, ou non, rester en service après le démarrage du moteur (permanent ou temporaire). L'élimination du circuit auxiliaire peut se faire par coupleur centrifuge, par coupleur magnétique ou par relais d'intensité.

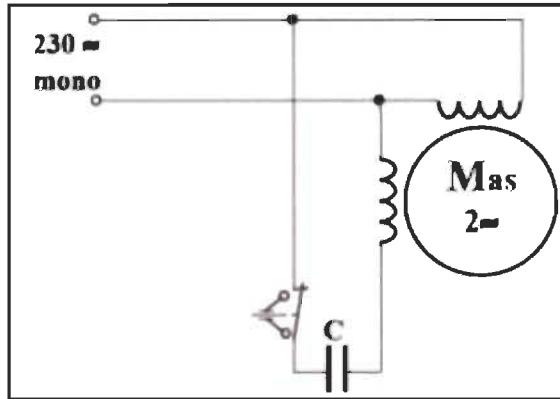


Figure 2- 3 : moteur asynchrone monophasé à démarrage par phase auxiliaire [52]

### B) Moteur asynchrone monophasé à lancement manuel

Il se compose de deux bobines principales et peut être mono ou bitension. Il n'est plus utilisé de nos jours. Puissance maximale est 1 cheval vapeur.

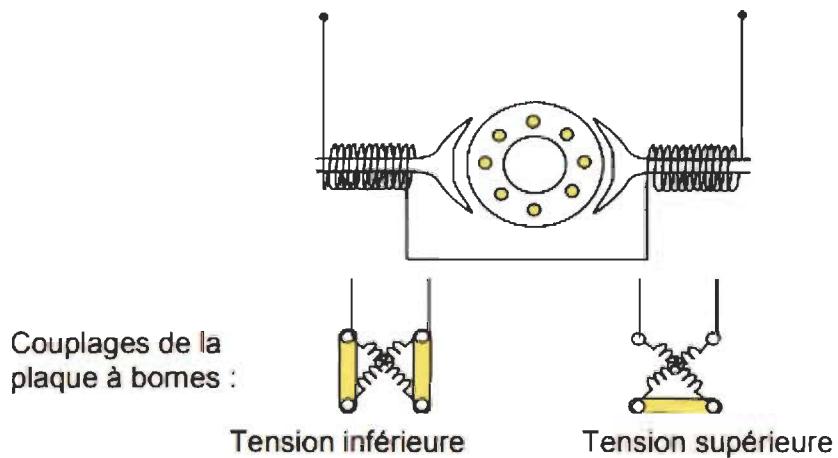


Figure 2- 4 : moteur asynchrone monophasé à démarrage manuel [52]

#### 2.1.3 Moteur à induction triphasé

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus utilisé (environ 85% des entraînements industriels). Son avantage le plus important est l'élimination de tous les contacts coulissants. Cela le rend extrêmement robuste, presque sans entretien et fiable. Les moteurs asynchrones sont conçus pour des puissances de quelques watts à plus de 10 MW. Afin de réduire les courants de Foucault et les pertes de courants de Foucault dues au champ magnétique rotatif, les deux parties principales, le stator et le rotor sont laminées. Le stator et le rotor sont séparés par un petit entrefer. Les enroulements du stator et du rotor sont logés dans des fentes réparties uniformément sur la circonférence.

L'enroulement du stator est généralement conçu comme un enroulement triphasé symétrique. Il se compose de trois brins d'enroulement individuels, décalés de  $120^\circ$  dans un moteur à une paire de pôles ( $p = 1$ ). Pour les moteurs avec  $p$  paires de pôles, le décalage est de  $120^\circ / p$ . La figure 2 montre la distribution spatiale des trois phases d'enroulement pour  $p = 1$ . Les trois chaînes sont connectées en étoile ou en triangle au réseau triphasé ou à un convertisseur de fréquence. Les trois brins sont désignés par les lettres a, b, c ou u, v, w. Les applications populaires comprennent les meuleuses, les tours, les perceuses à colonne, les pompes, compresseurs, convoyeurs, le matériel d'impression, les équipements de la ferme, le refroidissement électronique et autres applications de services mécaniques [52][106]

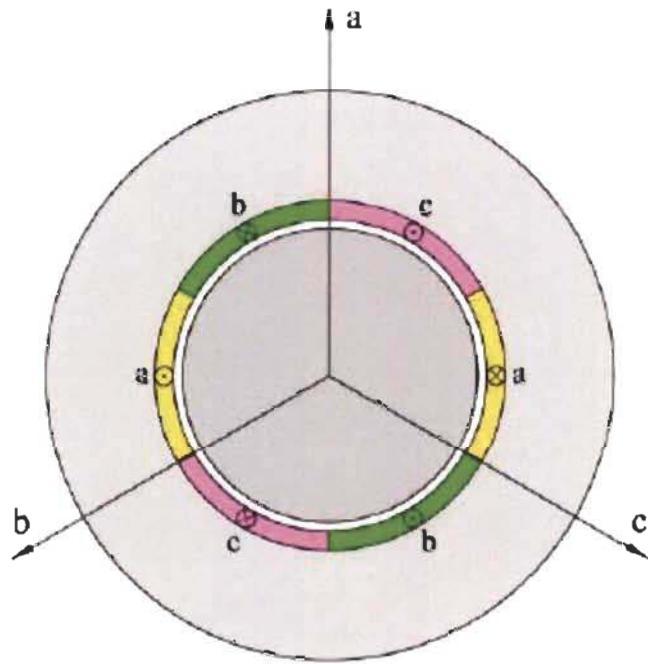


Figure 2- 5 : Représentation spatial des enroulements dans le stator

La figure suivante est celle d'un moteur asynchrone triphasé qui se compose de stator, rotor, les roulements, d'un ventilateur, du bâti, des fils de raccordement, de la boîte de raccordement et l'arbre.

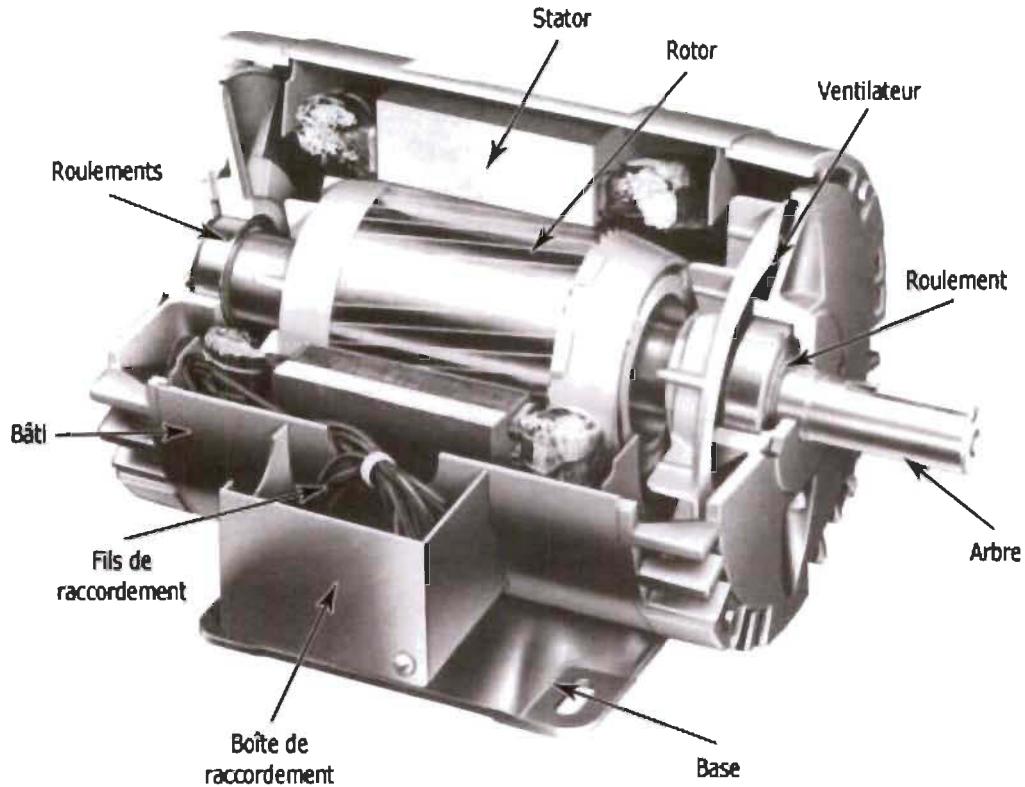


Figure 2- 6 : Moteur asynchrone triphasé.[18]

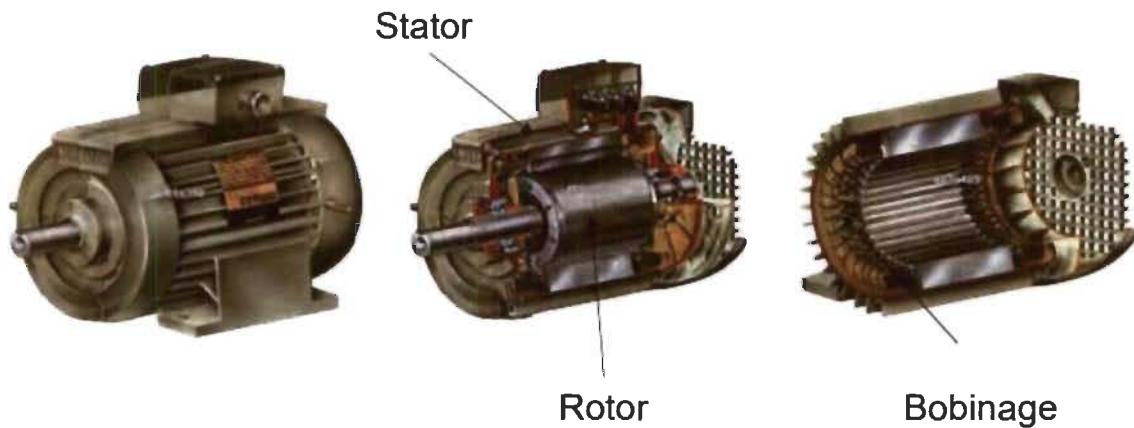


Figure 2- 7 : Moteur asynchrone et ses parties [19]

#### 2.1.4 Construction de base et principe de fonctionnement

Comme la plupart des moteurs, un moteur à induction à courant alternatif a une partie extérieure fixe, appelée stator, et un rotor qui tourne à l'intérieur avec un intervalle d'air soigneusement conçu entre les deux.

Pratiquement tous les moteurs électriques utilisent la rotation de champ magnétique pour faire tourner leurs rotors. Un moteur à induction triphasé est le seul type où le champ magnétique tournant est créé naturellement dans le stator en raison de la nature de la provision. Les moteurs à courant continu dépendent de la mécanique ou commutation électronique pour créer une rotation magnétique des champs. Un moteur à induction alternatif monophasé dépend de composants électriques supplémentaires pour produire cette rotation du champ magnétique.

La conception va des petits moteurs à vitesse largement constante aux gros moteurs asynchrones de plusieurs mégawatts de puissance. Indépendamment de ces différences, un moteur asynchrone est toujours construit de la même manière: les principaux composants de la machine asynchrone sont le stator, et un rotor interne ou un rotor séparé du stator par un entrefer. Le stator de la machine asynchrone porte un enroulement triphasé normal, chacun décalé de 120 °. Le rotor est généralement un rotor dit à cage d'écureuil avec un enroulement de rotor court-circuité, qui est donc souvent appelé rotor de court-circuit.[52]

### 2.1.5 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé

Le principe de fonctionnement des moteurs asynchrones est basé sur l'emploi d'un champ tournant créé par des tensions alternatives. Ce principe est présenté dans les figures suivantes.

- Cas d'une bobine traversée par un courant alternatif (Figure 2-8)
- Cas de deux bobines parcourue par deux courants alternatif (Figure 2-9)
- Cas d'enroulements triphasés parcourus par trois courants alternatifs (Figure 2-10)

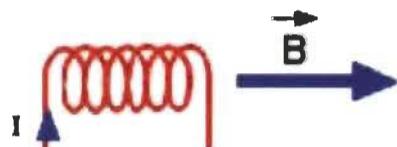


Figure 2- 8 : Bobine parcourue par un courant alternatif [20]

La circulation d'un courant alternatif dans une bobine crée un champ magnétique  $B$  alternatif (même sens et fréquence que le courant) dans l'axe de la bobine (grandeur vectorielle), comme présenté dans la figure 2-8.

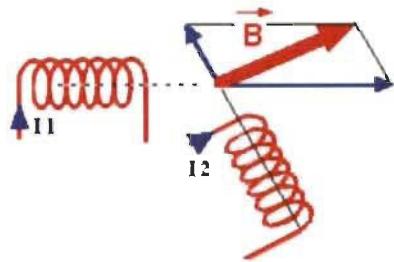


Figure 2- 9 : Deux bobines parcourues par deux courants alternatifs [20]

Comme nous pouvons le voir dans la Figure 2-9, si plusieurs bobines sont placées à proximité les unes des autres, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle (dans le cas des 3 bobines, elles sont disposées dans le Stator à  $120^0$  les unes des autres).

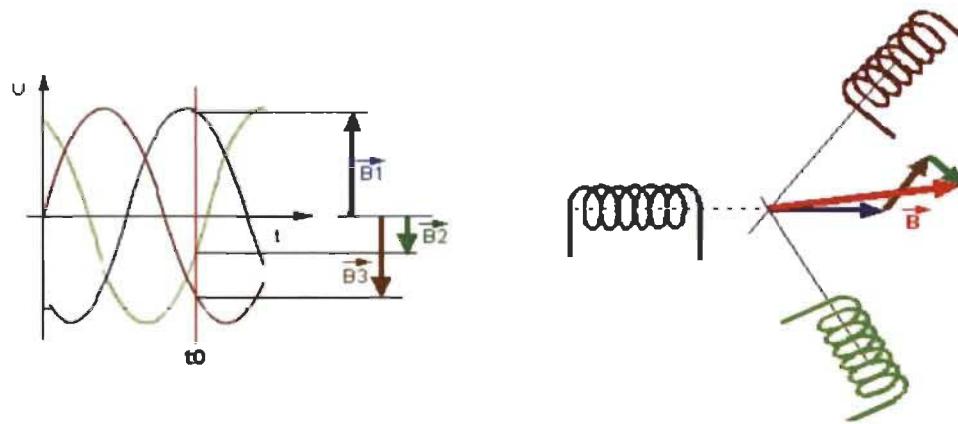


Figure 2- 10 : Enroulements triphasés parcourus par trois courants alternatifs [20]

Les enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, elle va tourner à cette vitesse de synchronisme.

### **2.1.6 Constitution d'un moteur asynchrone triphasé**

Dans cette partie, nous vous proposerons les éléments qui constituent le moteur asynchrone. Cette description nous donnera d'appréhender la façon avec laquelle ce dispositif a été physiquement réaliser.

Le Moteur asynchrone triphasé est composé mécaniquement parlant de trois parties qui sont :

- La partie fix nommée **stator** qui détient trois bobines identiques, qui ont un couple de pôles aux axes décalés les uns des autres de 120 degrés, et qui sont placées sur sa face interne.
- La partie tournante autour d'un axe symétrique au moteur, nommée **rotor**. Elle permet d'entraîner une charge mécanique.
- Les **piliers**, partie mécanique provoquant la rotation de l'arbre du moteur

### **2.1.7 Rotor**

Le rotor se compose de tôles empilées de façon à former un cylindre qui comporte des encoches dans lesquelles sont logés des conducteurs en aluminium coulé ou en cuivre dont les extrémités sont court-circuitées par des couronnes de même nature formant ainsi une "cage d'écuréuil" comme le montre la figure 2-12.

Le rotor peut recevoir également trois bobines identiques constituées de conducteurs en cuivre reliés à des bagues servant à les court-circuiter. Il s'agit dans ce cas d'un rotor "bobiné".

Ainsi, le rotor peut être de type cage d'écuréuil ou bobiné. C'est d'ailleurs à cette caractéristique que l'on distingue les deux types de moteurs asynchrones triphasés ; il y a donc des moteurs à cage et des moteurs à bagues.

Les moteurs à cage sont de loin les plus utilisés : ils représentent de 80 à 85 % des applications en milieu industriel.[106]

### **2.1.8 Type du rotor d'un moteur asynchrone**

Le rotor se compose de tôles empilées de façon à former un cylindre qui comporte des encoches dans lesquelles sont logés des conducteurs en aluminium coulé ou en cuivre dont les extrémités sont court-circuitées par des couronnes de même nature formant ainsi une "cage d'écuréuil". Lorsqu'il reçoit trois enroulements identiques constitués de conducteurs en cuivre reliés à des bagues qui servent à les court-circuiter, on parle dans ce cas de rotor bobiné.[21]

#### **1-Rotor bobiné ou à bagues**

Le moteur à bague collectrice ou moteur à rotor bobiné est une variante du moteur à induction à cage d'écuréuil. Alors que le stator est le même que celui du moteur de cage d'écuréuil, il a un ensemble des enroulements sur le rotor qui ne sont pas court-circuités, mais se terminent par un ensemble de bagues collectrices.

Ceux-ci sont utile pour l'ajout de résistances externes et de contacteurs. Le moteur à rotor bobiné possède un bobinage triphasé relié en étoile et branché à trois résistances externes à l'aide de bagues collectrices. Ce type de moteur s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil. Cependant, il présente les avantages suivants :

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

Avec l'apparition de contrôleurs électroniques de plus en plus performants, l'utilisation des moteurs à rotor bobiné tend toutefois à diminuer dans les applications à vitesse variable au profit de moteurs à cage d'écureuil associés à des variateurs de vitesse à contrôle vectoriel de flux permettant des variations de 0 à 2 fois la vitesse de rotation nominale du moteur [21].

Le rotor bobiné typique des moteurs asynchrones se présente de manière suivante :

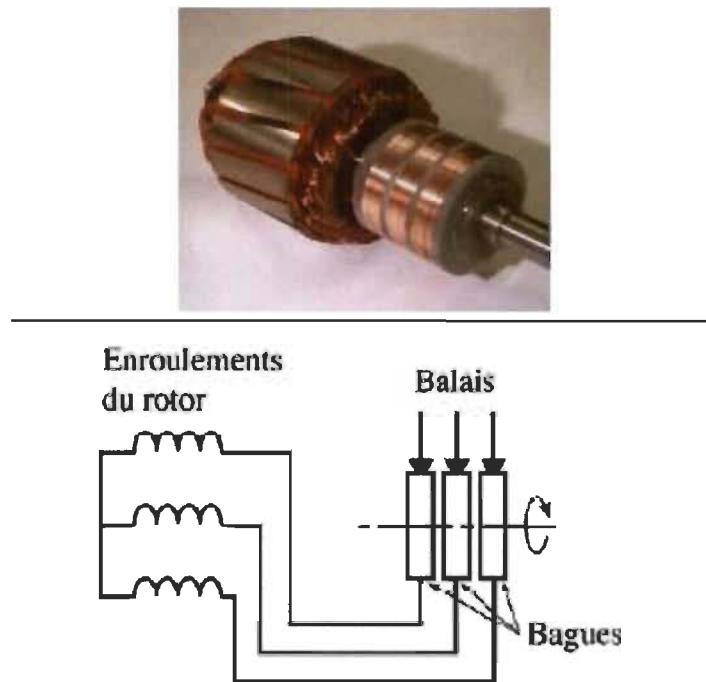


Figure 2- 11 : Rotor bobiné typique [107]

L'inconvénient du moteur à bagues collectrices est que les bagues collectrices et les assemblages de brosses nécessitent un entretien régulier, un coût non applicable au moteur à cage standard. Si les enroulements du rotor sont en court-circuit et un démarrage est tenté (c'est-à-dire le moteur est converti en moteur à induction standard), il présentera un courant de rotor bloqué extrêmement élevé -typiquement jusqu'à 1400% et un très bas couple rotorique bloqué, peut-être aussi bas que 60%, dans la plupart des applications, Ceci n'étant pas une option.

La modification de la courbe de couple-vitesse en variant les résistances du rotor, vitesse à laquelle le moteur entraînera une charge particulière peut être modifiée. À pleine charge, vous pouvez réduire efficacement à environ 50% vitesse synchrone du moteur, surtout en conduite variable de charges de couple / vitesse variable, telles que les presses à imprimer ou des compresseurs. Réduire la vitesse en dessous de 50% résulte en une très faible efficacité due à une puissance plus élevée dissipation dans les résistances du rotor. Ce type de moteur est utilisé dans les applications pour la commande de couple variable / charges à vitesse variable, comme dans une presse à imprimer

## **2-Rotor à cage d'écureuil**

Près de 90% des moteurs triphasés à induction sont du type à rotor à cage d'écureuil et cela fonctionne comme expliqué précédemment. Les puissances nominales vont du tiers à plusieurs centaines de chevaux dans les moteurs triphasés. Les Moteurs de ce type, évalués à une puissance égale ou supérieure, coûtent moins cher et peuvent démarrer avec des charges plus lourdes que leurs homologues monophasés.

Dans le cas du rotor à cage d'écureuil, les encoches renferment des barres en cuivre ou en aluminium réunies entre elles de part d'autre du rotor par des anneaux. Les moteurs de faible et moyenne puissance ont en général des cages en aluminium coulé sous pression. Le couplage permet d'obtenir en une opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les ailettes servent à la ventilation [21]

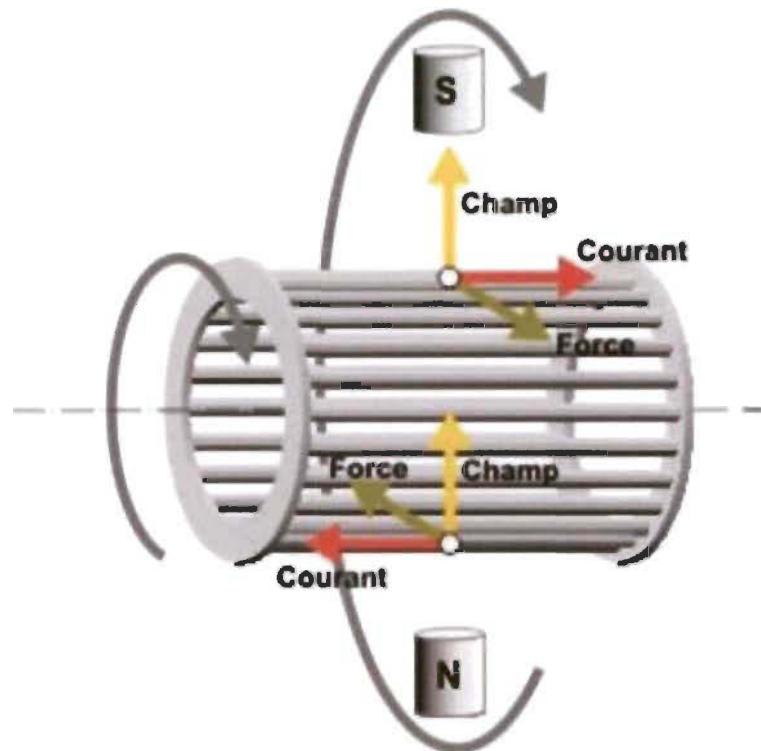


Figure 2- 12 : Rotor à cage du moteur asynchrone [22]

### 2.1.9 Stator

Le stator du moteur asynchrone est composé de tôles d'acier, à l'intérieur desquelles se trouvent les enroulements du stator. Selon la puissance des moteurs, on retrouve deux formes de tôles différentes.

- pour les moteurs de faibles puissances, les tôles sont faites en une seule pièce
- pour les moteurs de fortes puissances, elles sont faites sous forme de sections

Pour limiter les pertes par courants de Foucault, on met une couche de vermis sur les tôles et on les assemble les unes des autres en utilisant les écrous ou par la soudure afin de d'obtenir le circuit magnétique du stator. Les bobines statoriques peuvent être insérées dans les encoches de trois manières suivantes : imbriqué, ondulé ou concentrique [51].

Pour les moteurs, dont les enroulements sont faits mécaniquement, on insère généralement de manière concentrique le bobinage statorique.

Pour les grandes machines les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique.[51]

Le stator consiste en un empilage de tôles d'acier. Il a la forme d'un cylindre vide. Les tôles comportent à leur périphérie intérieure des encoches dans lesquelles sont placés, à  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre les enroulements d'un bobinage triphasé. Ces enroulements peuvent se raccorder soit en étoile soit en triangle [22]

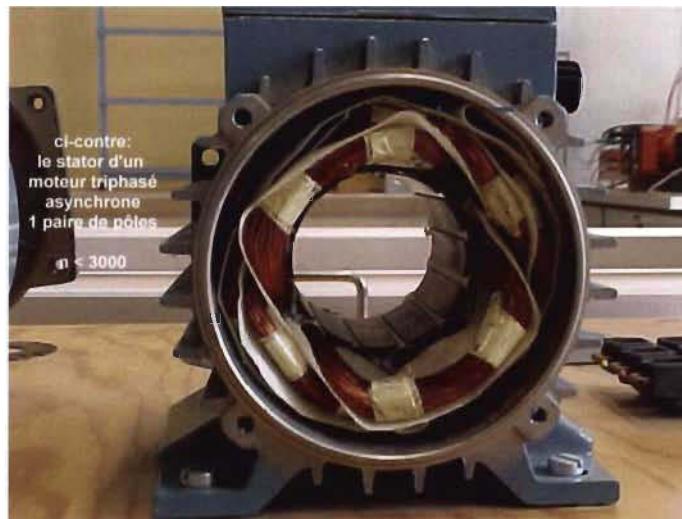


Figure 2- 13 : Le Stator d'un moteur asynchrone triphasé [23]

#### 2.1.10 Les paliers

Les paliers maintiennent et actionnent la rotation de l'arbre du rotor. Ils se composent de flasques et de roulements à billes introduits lorsqu'ils chauffent encore sur l'arbre rotorique. Les flasques sous formes moulés en fonte, sont montés sur le carter du stator à l'aide des boulons ou tiges, permettant de serrer l'ensemble du système [51].

#### 2.1.11 Couple du MAS à cage en fonction de la vitesse

Si nous prenons un moteur asynchrone à cage, qui reçoit une tension triphasée fixe et dont la fréquence est également fixe. Lorsque nous augmentons la charge mécanique du moteur, sa vitesse baisse aussi de manière progressive. Le moteur s'arrêtera lorsque le couple atteindra sa valeur critique (valeur de décrochage) et sa vitesse va aussi tout d'un coup diminuer. Ceci nous montre que le couple du moteur est lié à sa vitesse [24].

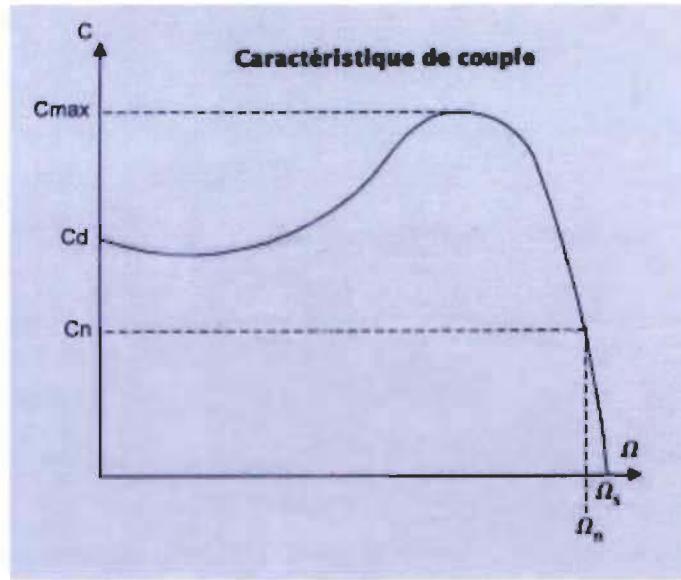


Figure 2- 14 : Couple du moteur asynchrone à cage [25]

$C_d$  : couple de démarrage

$C_n$  et  $\Omega_n$  : couple nominal et vitesse nominale

$C_{max}$  : couple maximum

$\Omega_s$  : vitesse de synchronisme

#### Conditions de fonctionnement :

Dans le domaine industriel, les moteurs doivent fonctionner dans des conditions très variées. C'est pourquoi leur construction diffère selon l'environnement auquel ils seront soumis. On distingue donc des moteurs :

- abrités
- à l'épreuve des éclaboussures
- blindés avec ventilateur extérieur
- à l'épreuve des explosions.

Les constructeurs donnent habituellement les valeurs de rapports de couple de démarrage ( $C_d$ ) et le couple maximum ( $C_m$ ) suivants :

$$0,6 \leq C_d \leq 1,5$$

$$2 \leq C_m \leq 3[25]$$

### **2.1.12 Avantages et Inconvénients des MAS**

Comme avantage du MAS, nous pouvons citer les points suivants :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est la vitesse de rotation du champ statorique dans le MAS,  $n_s = \frac{f}{p}$  ; f - fréquence du réseau et p le nombre de paire de pôles
- Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse [26]

Comme Inconvénients nous pouvons citer :

- Le couple de démarrage très élevé que le couple nominal.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (il est nécessaire d'avoir un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage.[27]

### **2.1.13 Classification des rotors de à cage d'écureuil**

La Canadian Electrical Manufacturers Association (CEMA) classifie les asynchrones à cage à l'aide de la valeur et l'allure de la courbe du couple en fonction la vitesse du moteur. Cette courbe est liée à la forme d'encoches découpées dans les laminations qu'on utilise pour la fabrication du rotor. Les classes sont les suivantes :

**Classe A:** Couple normal et courant de démarrage normal.

**Classe B:** Couple normal et faible courant de démarrage.

**Classe C:** Couple élevé et faible courant de démarrage.

**Classe D:** Couple élevé et glissement élevé [27][28]

### **2.1.14 Domaines d'applications**

Selon les études rapportées dans les références [29][30][31] Les domaines dans lesquels on retrouve les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont les suivants :

- traction électrique (Eurostar, TGV POS, TGV DUPLEX DASYE)
- propulsion des navires
- propulsion électrique automobile
- machines-outils
- treuils
- ascenseurs
- pompes

- électroménager
- chariots éléveurs
- convoyeurs
- palans

## 2.2. Modélisation triphasée du moteur asynchrone à cage

### 2.2.1 Introduction

On entend par modélisation triphasée d'un moteur asynchrone la réalisation à l'aide des équations mathématiques d'un modèle du dit moteur.

Nous procéderons de manière analytique et en utilisant les équations différentielles, basées sur le modèle qui considère les aspects suivants

- mécanique
- dynamique
- électromagnétiques

### 2.2.2 Représentation schématique du moteur asynchrone

Pour rendre la tâche moins complexe, considérons un moteur qui a deux pôles, le stator étant constitué de trois enroulements pareils, qui ont des axes respectifs  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  dans le Référentiel (abc), ayant chacun par rapport à l'autre un décalage de  $120^\circ C$ , ces enroulements /tant fermés sur eux-mêmes. La figure ci-dessous nous illustre le modèle.[32][33][36]

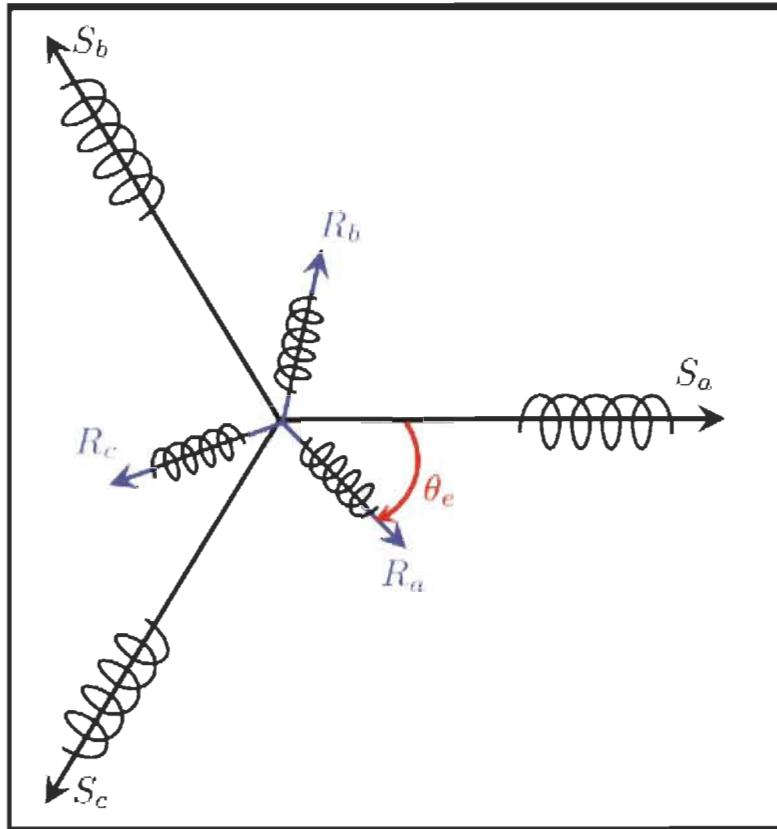


Figure 2- 15 : Modèle schématique triphasé du moteur asynchrone.[34][35][37]

### 2.2.3 Hypothèses simplificatrices

Avant d'établir le modèle mathématique du Moteur asynchrone, nous sommes dans l'obligation d'établir et prendre en considération les hypothèses suivantes, qui nous faciliterons la tâche en ce qui concerne l'écriture des différentes équations du MAS.

- Pas de saturation dans le circuit magnétique, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, afin de négliger les courants de Foucault.
- Les pertes par hystérésis et effet de peau sont négligées.
- L'épaisseur de l'entrefer est considérée constante sur toute la périphérie de la machine, en négligeant l'effet des encoches.
- La force magnéto motrice créée par chacune des phases est à répartition sinusoïdale, ce qui revient à ne considérer que la fondamentale. Ce qui signifie que le flux d'enroulement à travers chaque phase et l'inductance mutuelle entre un enroulement rotorique et statorique suivent une loi sinusoïdale en fonction de l'angle rotorique.
- De même, le moteur asynchrone est considéré comme symétrique et équilibré [38]

Les hypothèses citées impliquent les conséquences, dont les plus importantes sont cités ci-dessous :

Ce qui signifie que le flux d'enroulement à travers chaque phase et l'inductance mutuelle entre un enroulement rotorique et statorique suivent une loi sinusoïdale en fonction de l'angle rotorique [38]

#### 2.2.4 Modèle dynamique dans le repère triphasé

Nous fournirons au moteur asynchrone une Tension alternative triphasée. Il sera donc question des tensions comme éléments vectoriels de commande pour l'écriture de l'équation d'état du moteur asynchrone. Les tensions statoriques auront la même amplitude et la pulsation  $\omega_s$ . Pour la réalisation du modèle du moteur asynchrone, nous aurons besoin des équations suivantes :

- ✓ équations électriques
- ✓ équations magnétiques
- ✓ équations mécaniques

#### 2.2.5 Équations électriques

En nous référant à la loi d'Ohm, nous obtenons les équations de tensions statoriques et rotoriques, s et r sont les indices du stator et du rotor.

$$\text{Stator : } \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\text{Avec } [V_{sabc}] = [R_s] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\emptyset_{sabc}]$$

$$\text{Rotor : } \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rs} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\text{Avec } [V_{rabc}] = [R_r] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\emptyset_{rabc}] \quad [53]$$

#### 2.2.6 Équations magnétiques

Nous allons dans cette partie écrire les équations matricielles des flux magnétiques en fonction des inductances et des courants, grâce à l'aide des hypothèses simplificatrices mentionnées un peu plus en haut. Les expressions des équations magnétiques sont les suivantes :

$$\text{Stator : } \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_0] \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

où  $[\emptyset_{sabc}] = [\mathbf{L}_{ss}] [\mathbf{i}_{sabc}] + \mathbf{M}_{sr} [\mathbf{i}_{rabc}] \quad (2.5)$

avec  $[\mathbf{L}_{ss}] = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \\ \mathbf{M}_s & \mathbf{L}_s & \mathbf{M}_s \\ \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s & \mathbf{L}_s \end{bmatrix} \quad (2.6)$

Rotor :  $\begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_r & \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{M}_r & \mathbf{I}_r & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_r & \mathbf{I}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ra} \\ \mathbf{i}_{rb} \\ \mathbf{i}_{rc} \end{bmatrix} + [\mathbf{M}_{sr}] \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sa} \\ \mathbf{i}_{sb} \\ \mathbf{i}_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$

où  $[\emptyset_{rabc}] = [\mathbf{L}_{rr}] [\mathbf{i}_{rabc}] + \mathbf{M}_{rs} [\mathbf{i}_{sabc}] \quad (2.8)$

avec  $[\mathbf{L}_{rr}] = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_r & \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{M}_r & \mathbf{L}_r & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_r & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \quad (2.9)$

$[\mathbf{M}_0]$  : Valeur Maximale de l'inductances mutuelles du Stator et du Rotor

$[\mathbf{L}_{ss}]$  : Représentation matricielle de l'inductance statorique

$[\mathbf{L}_{rr}]$  : Représentation matricielle de l'inductance rotorique

$[\mathbf{M}_{sr}]$  : Représentation matricielle des inductances mutuelles stator-rotor

Nous pouvons obtenir la réciprocité mutuelle par l'expression suivante :[54][55][56]

$$[\mathbf{M}_{rs}] = [\mathbf{M}_{sr}]^T$$

## 2.2.7 Équation mécanique

$$\mathbf{J} \frac{d\Omega}{dt} = \mathbf{C}_e - \mathbf{C}_r - \mathbf{f}_r \Omega \quad (2.10)$$

$f_r$  : coefficient de frottement

$\Omega$  : pulsation mécanique du moteur

$C_r$  : couple résistant du moteur

$C_e$  : couple électromagnétique du moteur

### 2.2.8 Transformation de Park

La transformation de Park est une méthode mathématique qui nous permet de partir d'un système triphasé (a, b, c) vers un système biphasé (d, q) à l'aide de transformations mathématiques. Autrement dit nous transformons les trois enroulements fixes du stator ayant les uns des autres un déphasage de  $\frac{2\pi}{3}$  en deux enroulements imaginaires équivalents déphasés de  $\frac{\pi}{2}$

Comme nous pouvons le voir dans l'équation suivante :

$$[\mathbf{X}_{dq0}] = [\mathbf{P}][\mathbf{X}_{abc}] \text{ Et l'inverse étant : } [\mathbf{X}_{dq0}] = [\mathbf{P}]^{-1}[\mathbf{X}_{abc}] \quad (2.11)$$

Avec :

$[\mathbf{X}]$  : Peut-être la tension, le courant ou alors le flux

$[\mathbf{P}]$  : est la matrice de transformation direct de Park

$[\mathbf{P}]^{-1}$  : est la matrice inverse de la transformation directe de Park

La matrice de transformation s'écrit :

$$[\mathbf{P}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \psi & \cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi + \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \psi & -\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$\psi$  : la Position du référentiel choisi pour la transformation [57][58]

L'inverse de transformation direct de Park s'écrit :

$$[\mathbf{P}]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi + \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

### 2.2.9 Application de la transformée de Park au modèle triphasé

Pour passer du modèle triphasé du MAS au modèle diphasé de Park, il faut utiliser les grandeurs du Stator et les grandeurs du Rotor, et les appliquer au modèle de Park comme suit :

$$[\mathbf{P}(\theta_s)]$$

$[P(\theta_r)]$

avec :

$\theta_s$  : angle électrique situé entre l'axe direct d et l'axe de la phase a du stator

$\theta_r$  : angle électrique situé entre l'axe direct d et l'axe de la phase a du rotor

$\alpha$  : écart angulaire entre l'axe de la phase a du Stator avec celui de la phase a du rotor [39]

La relation d'autopilotage s'écrit :

$$\theta_s = \theta_r + \alpha \quad (2.14)$$

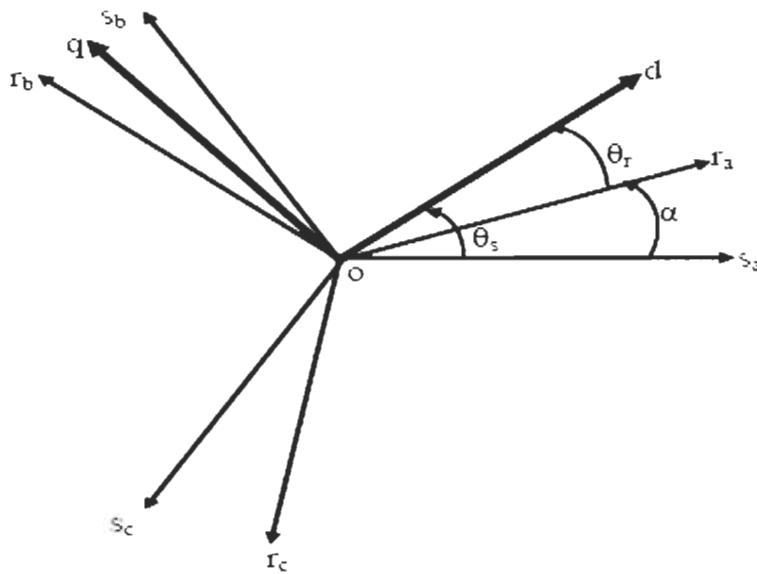


Figure 2- 16 : Repérage angulaire des systèmes axes des différents repères [40][41]

### 2.2.10 Conclusion

Nous avons vu tout au long de ce sous-chapitre 2, le moteur asynchrone, son principe de fonctionnement, sa constitution, les avantages et inconvénients, la classification des rotors à cage, les applications dans lesquelles sont utilisés les moteurs asynchrones, sa modélisation, la Transformation de Park et l'application de la transformation de Park au modèle triphasé. Tout ceci nous permet de comprendre le pourquoi es ce que ce moteur est d'autant plus sollicité, cela justifie une fois de plus le choix de notre thème de recherche. Nous pouvons aussi dire que les facteurs comme par exemple le couple de démarrage qui est très élevé et la nécessité de se procurer un variateur pour faire varier la vitesse ne sont pas négligeables et doivent être pris en considération lors du choix d'un moteur de traction.

### 2.3. Présentation du moteur synchrone à aimant permanent PMSM( MSAP)

Le moteur Synchrone fût autrefois utilisé comme alternateur, mais aujourd’hui, grâce aux progrès scientifiques, aux avancées technologiques réalisées dans le domaine de l’électronique de puissance et la généralisation des aimants permanents utilisés comme inducteurs, nous pouvons exploiter les machines synchrones en tant que moteur dans une large gamme de puissances. Comme tous les moteurs électriques, le moteur synchrone à aimant permanent est un convertisseur statique, qui transforme l’énergie électrique reçue en énergie mécanique. Il est constitué d’une partie fixe appelée **stator** et d’une partie mobile appelée **rotor** [30][60][61]

Le moteur synchrone est généralement utilisé en triphasé, il est réversible, c'est-à-dire qu'il peut fonctionner soit comme génératrice, soit comme moteur.

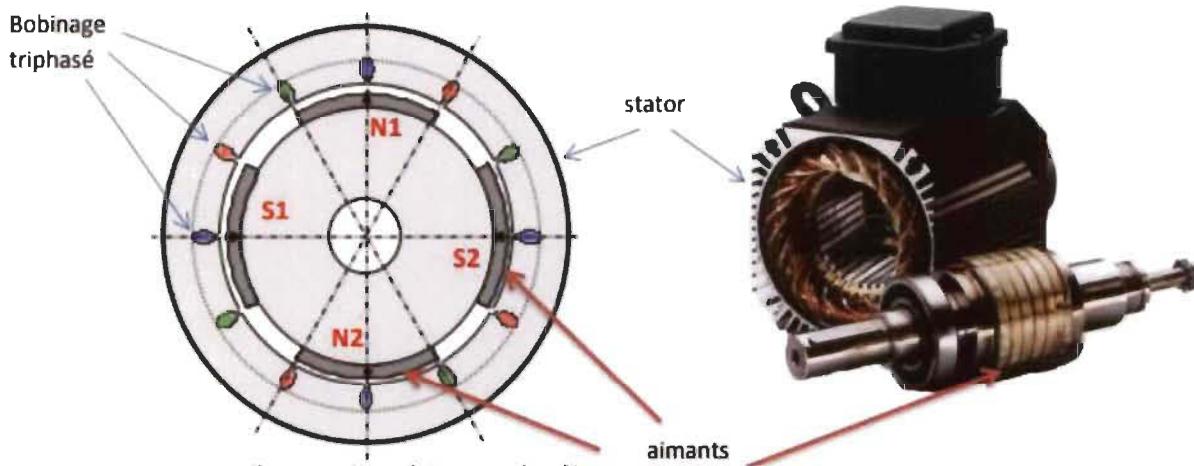


Figure 2-17 : Moteur synchrone à amant permanent [31]

#### 2.3.1 Principe de fonctionnement du moteur synchrone à aimant permanent

Les moteurs synchrones à amant permanent ont généralement le même fonctionnement et les mêmes caractéristiques de performances que les moteurs synchrones conventionnels. Lorsque le stator est alimenté par une source de tension triphasé, il y a création d'un champ tournant dans l'entrefer, le champ magnétique crée tourne à une vitesse constante de  $f/p$  tours par secondes. F étant la fréquence de la source d'alimentation stator et p le nombre de paires de pôles [32]

#### 2.3.2 Différentes structures des moteurs synchrones à aimant permanent

##### Type du rotor Moteur PMSM

Il existe trois grandes classes de moteurs synchrones à aimant permanent, qui se distingue par l'emplacement des aimants permanents dans le rotor, ils se placent de la manière suivante :

- Les moteurs synchrones à aimant permanent monter à l'intérieur (IPMSM)
- Les moteurs synchrones à aimant permanent monter en surface (SPMSM)
- Les moteurs synchrones à aimants permanent à concentration de Flux (SynRM) [33]

Nous pouvons observer sur la figure ci-dessous, les différents rotors du MSAP

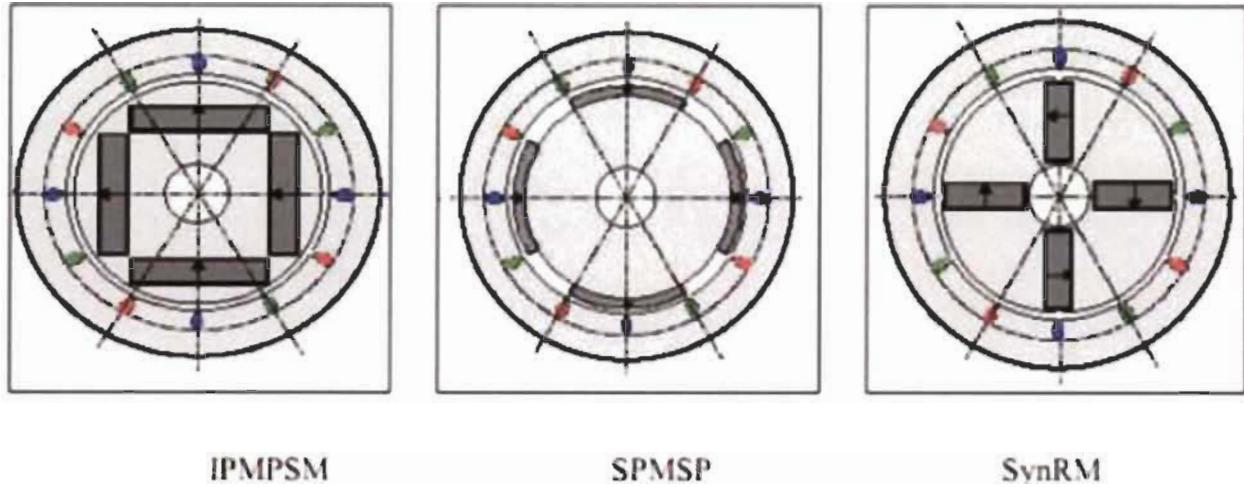


Figure 2-18 : Différents rotors du moteur synchrone à aimant permanent.[34]

#### **Les aimants permanents**

Comme nous pouvons le voir dans la figure 2-19 ci-dessous, nous pouvons classer les matériaux employés pour la propriété magnétique des MSAP dépendamment de leur cycle d'hystéresis. Ils constituent deux grandes classes à savoir :

La classe des matériaux magnétiques dures appelés aimant permanent. On parle d'aimant permanent à cause du fait que leur aimantation est invariable lorsqu'on la soumet à un champ magnétique extérieur [62][63][64].

La classe des matériaux magnétiques, dont une excitation externe provoquerait les caractéristiques magnétiques. On parle aussi de matériaux magnétiques doux [65][66].

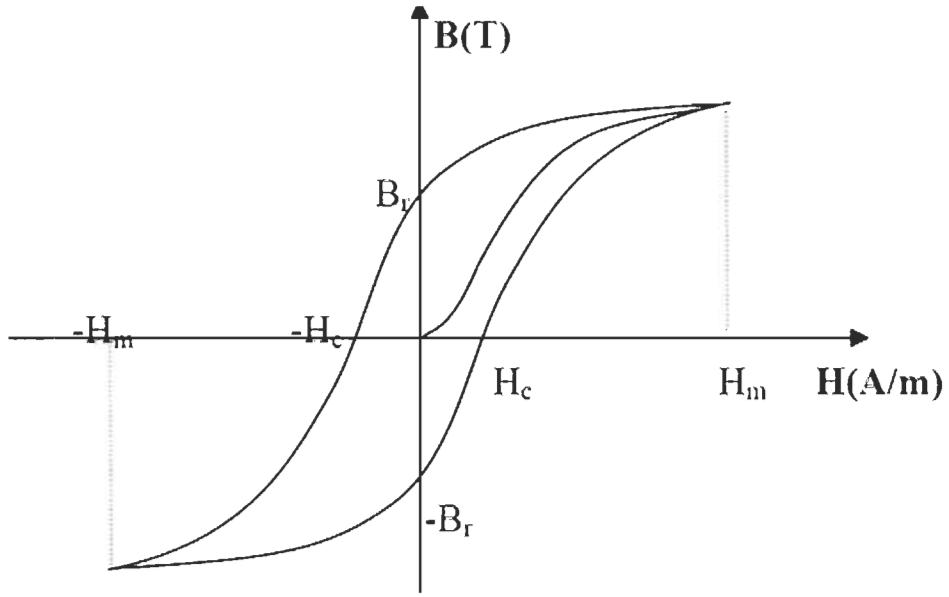


Figure 2- 19 : Courbe BH [67]

Nous décrivons de manière macroscopique l'état magnétique d'un aimant permanent par les vecteurs suivants :

- ❖ l'induction magnétique  $B$
- ❖ le champ magnétique  $H$
- ❖ la polarisation rémanente de l'aimant  $J_p$

L'aimant permanent est un matériau dur, qui se caractérise par la polarisation rémanente  $J_p = B_r$ , qui a un champ coercitif d'aimantation  $H_c$  et une énergie spécifique  $(BH)_{max}$ .

L'association d'une aimantation introduite par un champ externe  $J_{ext}$  et l'aimantation rémanente  $J_p$  nous donne comme résultat l'aimantation de l'aimant permanent. Nous pouvons écrire :

$$J_{ext} = \mu_0 X_m(H) H$$

Avec  $X_m$  qui est la susceptibilité magnétique du matériau

$$B = \mu_0 \left[ H + \frac{J_p}{\mu_0} + X_m(H) H \right] = \mu_0 [1 + X_m(H)] H + J_p \quad (2.4)$$

Si nous considérons l'expression  $\mu_r = 1 + X_m(H)$  de la perméabilité relative, nous aurons finalement :

$$B = \mu_0 \mu_r(H) H + J_p \quad (2.5)[68]$$

Nous allons par la suite représenter la courbe de la caractéristique  $B(H)$  de l'aimant. Nous considérerons uniquement le segment de la courbe dans lequel  $H < 0$  et  $B > 0$ . On dit qu'un champ d'aimantation se démagnétise, lorsqu'un champ externe est utilisé en opposition à l'alimentation résiduelle de l'aimant [69][70][71]

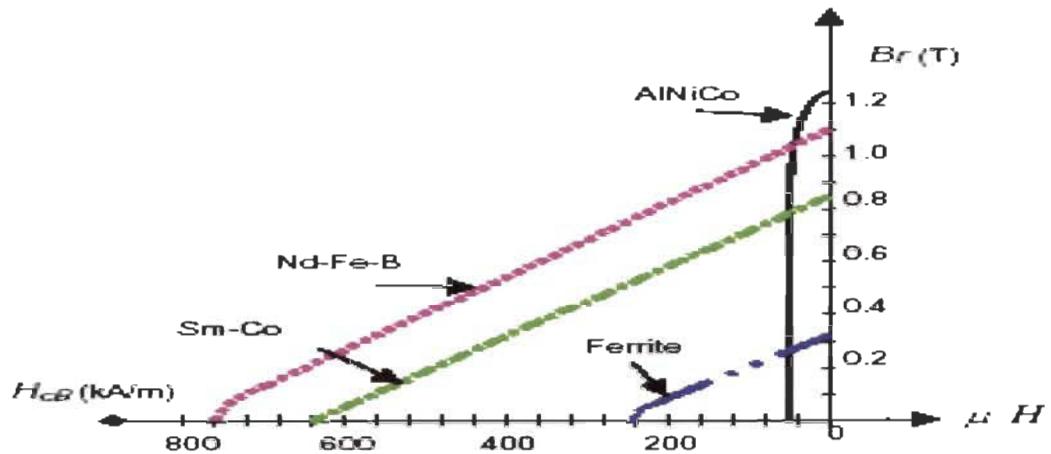


Figure 2- 20 : Courbe BH des différents aimants [72]

Les trois types d'aimants permanents que nous retrouvons le plus souvent dans les moteurs synchrones à aimant permanent sont :

- ✓ les ferrites
- ✓ les ALNiCo
- ✓ les terres rares (Samrium-Cobalt et Neodyme Fer-Bore).

Le tableau 2-3 nous donne les caractéristiques et les propriétés des différents types d'aimants permanents [72][73][74].

Propriétés	Unités	AlNiCo	Ferrite	Sm-Co	Nd-Fe-B
Champ rémanent $B_r$	T	0,6 à 1,35	0,35 à 0,43	0,7 à 1,05	1,0 à 1,3
Champ coercitif intrinsèque $H_c$	KA/m	40 à 130	180 à 400	800 à 1500	800 à 1900
(BH) max	KJ/m³	20 à 100	24 à 36	140 à 220	180 à 320
Coefficient de température $B_r$	%/°C	-0,01 à -0,02	-0,2	-0,045 à -0,05	-0,08 à -0,15
Coefficient de température $H_c$	%/°C	-0,02	0,2 à 0,4	0,2 à 0,25	-0,5 à -0,9
Température maximum de fonctionnement	°C	500 à 550	250	250 à 350	80 à 200

Tableau 2-3 : Principales caractéristiques magnétiques des différents aimants [72]

En considérant le Tableau 2-3, nous pouvons donner un point de vue sur les avantages et les inconvénients des types d'aimants permanents cités précédemment, nous choisissons à cet effet uniquement deux types à savoir :

**AlNiCo** ; Avantage : Très grand champ rémanent. Inconvénients : Très faible champ coercitif, gros problème de désaimantation.

**Ferrite** : Les Aimants en ferrites sont composés d'oxyde de fer, de Barym et de Strontium, et s'obtiennent par frittage. Ils sont peu coûteux et plus robustes. Les aimants en ferrites sont utilisés pour fabriquer les moteurs de faibles puissances, dont on retrouve dans les applications de véhicules électriques ou encore dans l'industrie automobile. C'est le composant le plus ancien et le moins cher. Ses performances modestes le cantonnent cependant dans les machines de faible puissance massique. C'est un matériau très cassant mais résistant à la corrosion. Par ailleurs, ce sont des aimants fortement sensibles à la démagnétisation à basse température et possèdent une polarisation rémanente relativement faible qui ne les prédisposent pas aux contraintes aéronautiques [72].

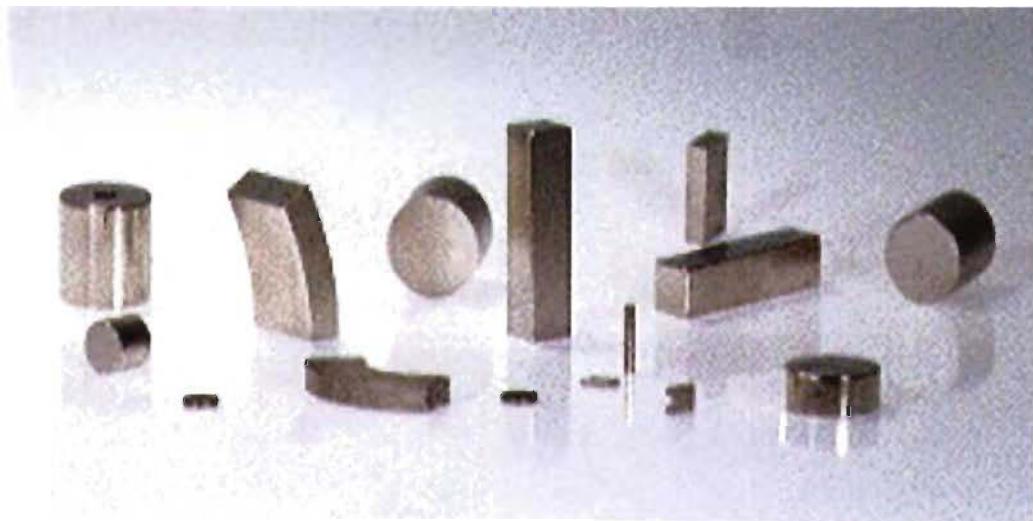


Figure 2- 21 Aimant permanent en terre rare [72]

Exemple les samarium cobalts, ils permettent une température de fonctionnement plus élevée ( $300^{\circ}\text{C}$ ) et sont aussi plus performants. La présence du cobalt dans leur composition les rend très coûteux. On les retrouve dans les domaines d'applications particuliers (télécommunications, aéronautique) ayant les propriétés de hautes températures et de résistance à l'oxydation supérieures [72].



Figure 2-22 Aimant permanent en ferrite [72]

Les aimants permanents en ferrite sont constitués d'oxyde de fer, de Barym et de Strontium. Ils s'obtiennent par frittage [72].

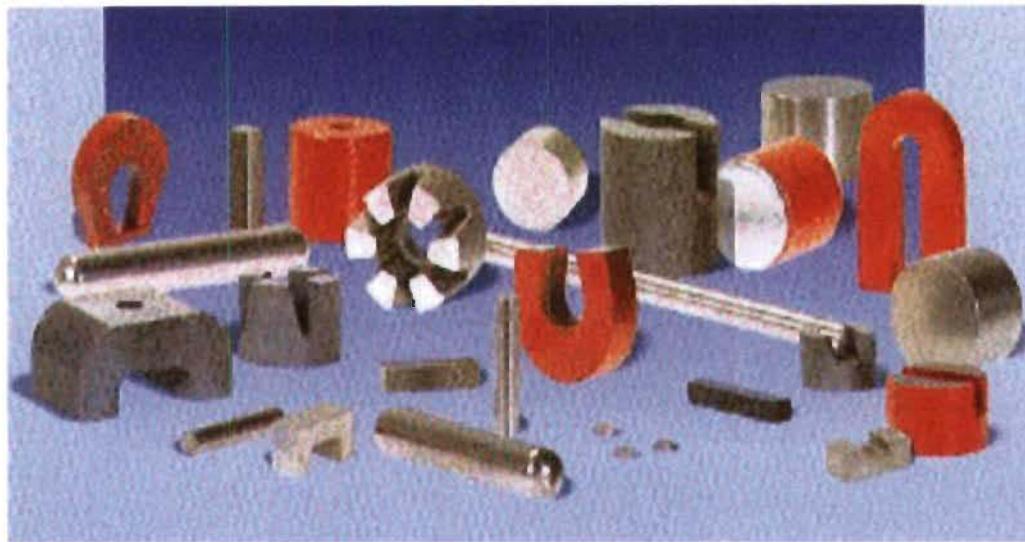


Figure 2- 23 : Aimant permanent ALNiCo [72]

Les AlNiCo sont des alliages qui sont fait à base d'aluminium et de nickel, avec des additions de cobalt, du cuivre ou du titane. Ils ont un champ rémanent très élevé, contrairement à leur champ coercitif qui est très faible, ce qui implique de gros problèmes de désaimantations. Leur domaine d'application sont les appareils de mesure ou encore comme capteurs [72].

### 2.3.3. Couple du PMSM/MSAP

En parcourant la littérature, on constate qu'il existe trois types de couples en ce qui concerne le moteur synchrone, qui sont :

#### Le couple mutuel :

Il est la résultante de l'interaction entre les champs statoriques et rotoriques

#### Couple de détente :

Quand les aimants tournent avec le rotor et passent devant les dents du stator, ils rencontrent une réductance variable qui entraîne un couple de valeur moyenne nulle que l'on appelle couple de détente ; pour tenter de l'annuler, les encoches peuvent être inclinées d'un pas d'encoche, mais cela rend plus difficile l'opération de bobinage, il est préférable d'incliner les aimants plutôt que les encoches [21]

#### Le couple de saillance ou encoure couple de réductance :

Il est dû aux variations des inductances des enroulements statorique en fonction de la position du rotor. Il faut noter que dans le cas des aimants montés en surface, le flux d'induit rencontre la même réductance quelle que soit la position du rotor, il n'y a pas donc pour ces moteurs de couple de réductance à prendre en compte [21]

### **2.3.4 Avantages**

Comme avantages des moteurs synchrones à aimant permanent, on peut citer :

- les pertes cuivre sont moindres
- il détient un couple massique élevé et une inertie médiocre
- ses Performances dynamiques sont excellentes
- il est simple à construire et a un entretien plus simple
- le manque de contact entre les bobinages et les balais permet d'augmenter la fiabilité et la constante thermique
- très bon rendement
- moindres usures [35].

### **2.3.5 Inconvénients**

Les Inconvénients du MSAP nous pouvons noter :

- la présence d'un commutateur électronique le rend complexe
- les aimants permanents sont en terres rares, ce qui rend le moteur coûteux
- il peut se désaimanter, s'il se trouve dans un environnement hostile.
- il a une pulsation de couple
- la présence des pertes par courant de Foucault
- les aimants permanents tiennent jusqu'à 250°C pour le Samarium-cobalt
- le flux ne se régule pas, ce qui empêche le contrôle de la vitesse sur une large plage
- Nécessité d'un capteur de position [35].

### **2.3.6 Domaines d'applications**

- il est utilisé comme Compresseur
- comme moteur des pompes
- comme traction électrique dans les voitures électriques
- robotique
- instrumentation [35].

## **2.4 Modélisation de l'ensemble MSAP et onduleur autonome**

### **2.4.1 Introduction**

Nous vous présenterons premièrement le modèle du moteur synchrone à aimant permanent, et par la suite l'association MSAP et convertisseurs. Comme vous pouvez le voir dans la figure ci-dessous, nous avons à l'entrée du schéma une source de tension triphasée et un redressement triphasé avec filtre, et juste avec le MSAP, nous avons un onduleur de tension.

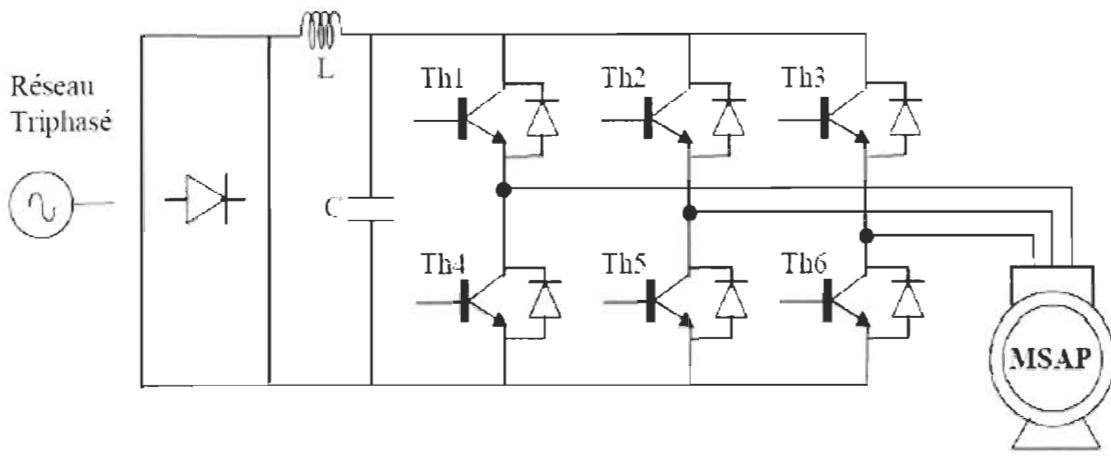


Figure 2-24: Schéma de l'association onduleur-MSAP [72][75]

#### 2.4.2 Onduleurs

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques qui permettent la conversion soit du courant ou de la tension continu/continu en courant ou tension alternatif/alternative. Il existe deux types d'onduleurs selon le nombre de phases (monophasé, triphasé) et selon le nombre de niveaux (2, 3...) qui sont :

- onduleurs de courant
- onduleurs de tension

#### Onduleurs de tension

Les onduleurs de tension permettent d'obtenir aux bornes d'un moteur électrique une tension, qui grâce à la commande, peut avoir une amplitude et une fréquence variable [71][72].

#### 2.4.3 Modélisation d'un onduleur de tension

Nous allons modéliser un onduleur de tension triphasée. Les interrupteurs de bras d'un bras pourront être commander de manière complémentaire. Cela implique que nous aurons deux états indépendants. La figure ci-dessous nous présente un onduleur de tension triphasé [73].

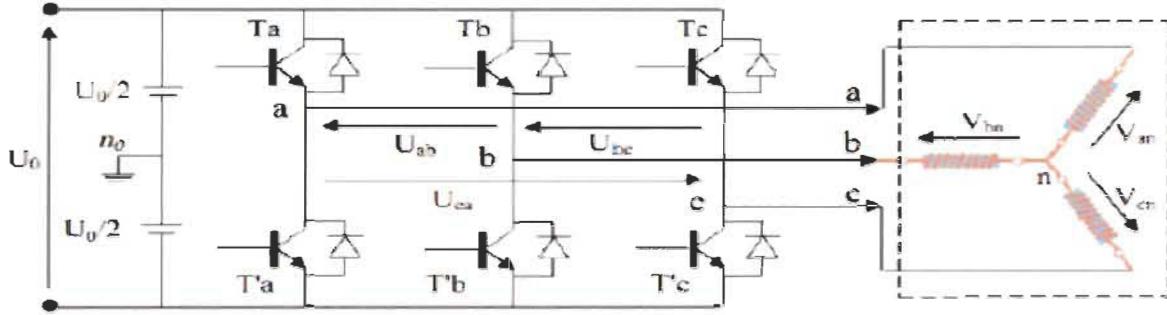


Figure 2- 25 : Schéma de l'onduleur triphasé [73]

#### 2.4.4 Stratégie de commande de l'onduleur

Le découpage de la tension aux bornes de l'entrée de l'onduleur, se fait par la commande des interrupteurs qui compose la commande du dît onduleur. Les types de commandes existantes sont :

- la commande avec onde rectangulaire
- la commande de créneaux à largeur variable
- la commande à paliers
- la commande à modulation de largeur d'impulsions (MLI)

#### 2.4.5 Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices nous facilitent la réalisation du modèle mathématique du moteur synchrone à aimant permanent. Elles sont les suivantes :

- ✓ la force électromagnétique induit est sinusoïdal
- ✓ l'effet de peau et de la température doit être négliger.
- ✓ les courants de Foucault et les pertes par hystérésis sont négligeables
- ✓ la saturation de circuit magnétique est négligeable
- ✓ les bobines du stator sont généralement connectées en étoile à neutre isolé [74][76][77]

#### 2.4.6 Mise en équation du MSAP dans le repère triphasé

Les paramètres suivants du MSAP sont représentés sous forme matricielle  $[V_s]$ ,  $[\varphi_s]$ ,  $[i_s]$ . Nous vous présenterons dans la figure suivante les bobines du MSAP triphasé.

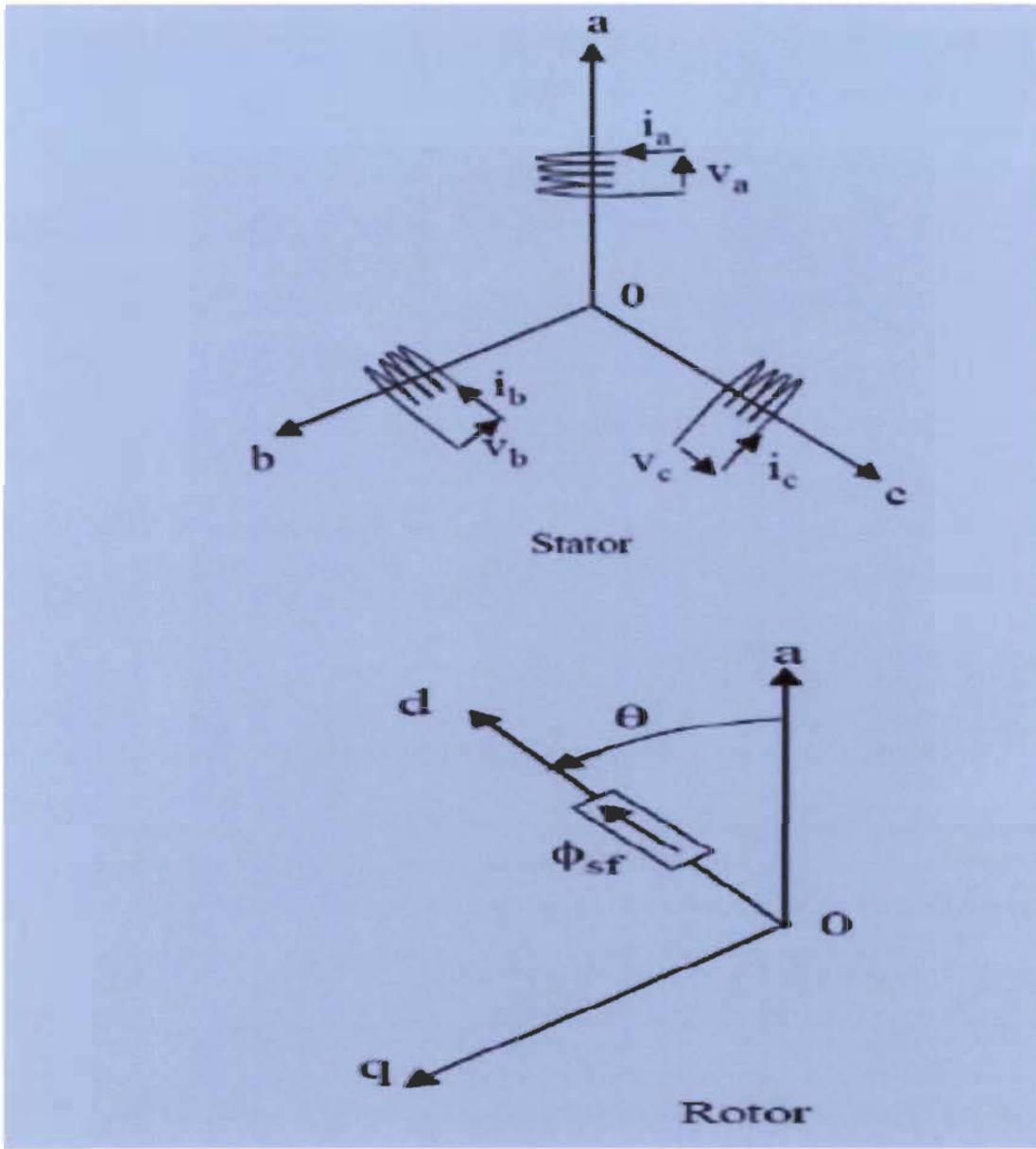


Figure 2- 26 : Le MSAP dans le repère triphasé.[78]

#### 2.4.7 Équation électrique

Nous pouvons écrire l'équation électrique d'un moteur synchrone à aimants permanents avec un nombre P de paires de pôles comme suite :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w L_q i_d \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + w L_d i_d + w \varphi_f \end{cases} \quad (2.1)$$

$V_d$  : tension du stator axe d

$V_q$ : tension du stator axe q

$i_d$ : courant du stator axe d

$i_q$ : courant du stator axe q

$L_d$ : inductance du stator axe d

$L_q$ : inductance du stator axe q [80]

#### 2.4.8 Équation mécanique

Les études faites dans les références [79][80][81], nous permet d'écrire l'équation mécanique de la manière :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (\mathbf{C}_{em} - \mathbf{C}_r - f\Omega_r) \quad (2.2)$$

#### 2.4.9 Équation magnétique

Il nous est nécessaire de connaître et de comprendre les équations du MSAP et particulièrement l'équation magnétique, car elle nous aide à étudier le MSAP et à réaliser par la suite sa commande vectorielle. L'équation magnétique s'écrit de manière suivante :

$$\mathbf{C}_{em} = [\mathbf{i}_s]^T \left[ \frac{1}{2} \frac{d[L_{ss}]}{d\theta} [\mathbf{i}_s] + \frac{1}{2} \frac{d[\varphi_{sf}]}{d\theta} \right] \quad (2.3)$$

En observant l'équation ci-dessus, on constate qu'elle détient un nombre important de coefficients variables. Afin de quitter d'état de coefficient variable à coefficients constants, il est nécessaire de faire usage de la transformation dite de Park [91]

#### 2.4.10 Transformation de Park

L'application de la transformation de Park a été présentée au Chapitre 2.2.8, y compris les équations nécessaires, cela étant, nous vous présenterons ici uniquement cette transformation de Park du MSAP dans le repère (d, q) [82][83]

La figure ci-dessous nous donne la transformation de Park du MSAP, avec l'axe (OA) fixe et le repère (d, q) tournant autour de lui avec une vitesse wr.

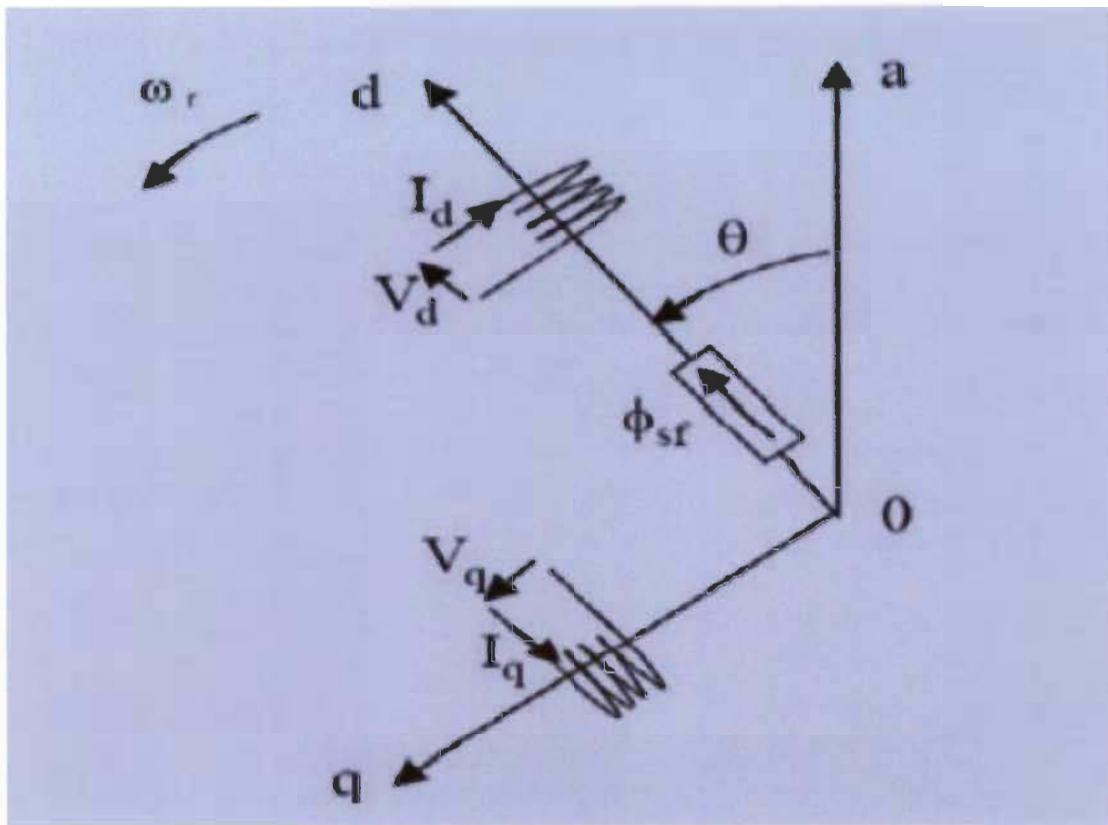


Figure 2- 27 : Transformation de Park [82]

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les différents types de moteurs électriques existants, et en particulier ceux qui sont utilisés dans les applications de VE, leurs constitutions, principe de fonctionnement, les avantages et inconvénients, les types de rotors, les domaines d'applications, les hypothèses simplificatrices nous permettant de réaliser la modélisation, les différents types d'aimants permanents, et la transformation de Park. Dans le prochain chapitre, nous allons réaliser une étude comparative du moteur asynchrone à cage et du moteur synchrone à aimant permanent, du point de vue forme, la constitution, l'efficacité et l'analyse des paramètres.

### 3 Étude comparative

#### 3.1 Introduction

Les systèmes de commande électrique modernes consistent en une électronique de puissance transformateurs, contrôleurs analogiques / numériques et capteurs ou observateurs. Les moteurs à courant continu (MCC), asynchrones et synchrones sont des types de moteurs fréquemment utilisés avec ces systèmes de pilotage. De nouveaux types de moteurs sont développés, tels que les moteurs linéaires, les moteurs pas à pas, les moteurs à réluctance à commutation et les moteurs synchrones à aimants permanents.

Les moteurs synchrones à aimants permanents sont utilisés là où les exigences en matière de stabilité de la vitesse et de fonctionnement synchrone d'un ou de plusieurs moteurs interconnectés sont nécessaires. Du fait que le Rotor du MSAP soit synchronisé avec la fréquence du courant d'alimentation et que sa vitesse reste constante sous différentes charges variables, il est donc idéal pour le matériel de pilotage à vitesse constante. La plupart des applications de moteurs industriels utilisent des MAS.

Les raisons en sont notamment la robustesse, la fiabilité, les prix bas et le rendement élevé. Les industries ont de nombreuses applications, où une vitesse de fonctionnement variable est une exigence primordiale. Dans de nombreuses applications, le fait d'utiliser l'installation à une vitesse réduite lorsque le plein rendement n'est pas nécessaire présente un autre avantage important: économies d'énergie et réduction des coûts. L'usure des installations et, par conséquent, les exigences de maintenance, sont également minimisées par un fonctionnement à vitesse réduite.

Les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) sont largement utilisés dans les applications à faible et moyenne puissance telles que les périphériques équipements, robotique, l'instrumentation, les machines et contrôle de processus, des variateurs de vitesse et véhicules électriques. La croissance sur le marché des entraînements électriques dans lesquels le MSAP est utilisé, a fait naître le besoin d'un outil de simulation nous permettant de réaliser de ces systèmes dynamiques complexes à MSAP. Les outils de simulation nous donnent la capacité de réaliser des simulations dynamiques d'entraînements par moteur dans un environnement visuel de manière à faciliter le développement de nouveaux systèmes. Dans ce travail, la simulation d'un contrôle de couple direct de MSAP est développée à l'aide de Simulink. Le contrôle de couple direct est l'une des plus performantes stratégies de contrôle pour la machine à courant alternatif.

La comparaison se portera uniquement sur l'analyse des paramètres et sur l'évaluation de l'efficacité. Ces moteurs étant de loin les plus utilisé, nous ferons leur analyse et leur évaluation en nous référant aux expérimentations réalisées sur ces types de moteurs [83][84][85].

#### 3.2 Moteur Synchrone à amant permanent MSAP(PMSM)

Comme nouvelle définition, le Moteur Synchrone à aimant permanent (MSAP) présente de nombreux avantages par rapport aux autres machines classiquement utilisées servomoteurs.

Le courant de stator du moteur à induction (IM) contient des composants magnétisants et générateurs de couple. L'utilisation de l'aimant permanent dans le rotor du MSAP rend inutile la fourniture d'un courant magnétisant à travers le stator pour un flux d'entrefer constant; le courant du stator n'a besoin que de produire un couple. Ainsi, pour une même sortie, le MSAP fonctionnera à un facteur de puissance plus élevé (en raison de l'absence de magnétisation du courant) et sera plus efficace que le moteur à induction. Le développement du MSAP permet de corriger les inconvénients précédents du moteur synchrone en remplaçant sa bobine d'excitation, alimentation en courant continu et bagues collectrices avec un aimant permanent [86]

### **3.3 Moteur asynchrone à cage (MAS)**

Le moteur asynchrone à cage est un moteur électrique qui est principalement utilisé dans les domaines d'applications industriels. Ils ont comme avantages principaux les qualités suivantes : Simple construction, moins coûteux, leur fonctionnement est sûr, ils sont robustes, ont un simple coût de maintenance. Partant des considérations que nous venons d'énumérer, ils sont fréquemment utilisés pour les commandes performantes, en remplacement des moteurs à courant continu (MCC). Le défaut que les MAS à cage ont, est l'absence de découplage entre le couple électromagnétique et le flux, ce qui rend leur commande très difficile à réaliser. Mais grâce aux progrès de l'électronique de puissance, nous pouvons appliquer aux MAS à cage la commande vectorielle pour orientation de flux rotorique [107]

### **3.4 Constitution du MAS et du MSAP**

Le MSAP se compose comme le MAS, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La différence réside sur le fait que le flux dans l'entrefer n'est pas dû à une composante du courant Statorique : Il est créé par les aimants permanents ou par le courant inducteur fourni par une source à courant continu extérieure qui alimente un enroulement placé dans le rotor.

Le stator comprend une carcasse et un circuit magnétique généralement constitués de tôles d'acier au silicium et d'un bobinage triphasé analogue à celui d'un moteur asynchrone alimenté en courant alternatif triphasé pour produire un champ tournant. Le rotor porte des aimants permanents parcourus par un courant continu qui créent des pôles Nord et Sud intercalés. Le rotor, à la différence des moteurs asynchrones tourne sans glissement à la vitesse du champ tournant.

### **3.5 Analyse des paramètres**

Il existe plusieurs types de moteurs qui sont utilisés pour diverses applications telles que l'éolienne, aérospatiale, robotique, outil domestique. Dans une étude réalisée en 2013, les types de moteurs utilisés pour ces différentes applications ont été listé dans le tableau suivant, nous nous intéresserons unique aux deux moteurs à comparer [45].

## Utilisation dans différentes applications

Domaines d'applications	MAS	MSAP	MRC
Véhicule électrique	2	1	5
Turbine éolienne	5	4	3
Aéronautique	2	4	3
Robotique	1	5	2
Application domestique	1	4	2
Autres	3	4	3
Total	14	22	18

Tableau 3- 1 : Moteurs utilisés dans différentes applications [46]

Comme nous pouvons le voir dans le Tableau 3-1, lorsque nous additionnons les valeurs qu'ont les différents moteurs dans chaque domaine d'application, nous constatons que le moteur synchrone à aimant permanent détient un total de vingt-et-deux, cependant le moteur asynchrone a juste un total de 14, ce qui donne un nette avantage au PMSM par rapport à IM. Le Moteur à Réductance commuté se positionne juste après le MSAP, avec 18, ce qui le rend plus convoiter que le MAS.

## Comparaison au niveau des caractéristiques

Les Tableaux ci-dessous, Tableau 3-2, Tableau 3-3, nous donne un aperçu concret sur les paramètres des deux.

Type Characteristics	Permanent magnet	Induction
Rated voltage	150V	150 V
Current	9.2 A	8 A
Maximum linear force produced by linear armature (rotary armature is disconnected)	600 N	540 N
Maximum torque produced by rotary armature (linear armature is disconnected)	18 N.m	14 N.m
Maximum electromagnetic torque at linear speed of:		
0 m/s	15 N.m	11 N.m
3 m/s	10 N.m	10 N.m
6 m/s	6.5 N.m	8 N.m
Maximum efficiency at linear speed of:		
0 m/s	95 %	60 %
3 m/s	85 %	50 %
6 m/s	70 %	40 %
Maximum power at linear speed of:		
0 m/s	970 W	650 W
3 m/s	900 W	560 W
6 m/s	860 W	450 W
Volume	0.006 cubic meter	0.007 cubic meter
Weight	49 kg	42 kg

Tableau 3- 2 : Comparaison des Caractéristiques du MSAP et du MAS [47]

Nous pouvons déduire du Tableau 3-2 ci-dessus que le MSAP est plus performant que le MAS pour une comparaison basée sur les mêmes paramètres.

### Performances à 1500 et à 6000tr/min à la puissance maximale

La figure ci-dessous nous donne en quelque sortes les performances du moteur à Induction et du moteur à aimant permanent pour des vitesses de 1500tr/min et 6000tr/min. Une étude sur les moteurs électriques utilisés dans les VEs a été faite en 2010, la comparaison entre un MSAP et un MAS pour les moteurs de grandeurs de 1500tr/min et 6000tr/min pour une puissance maximale, les résultats de l'étude ont été placé dans le Tableau ci-dessous. La comparaison concernait les pertes fer, les pertes cuivre, le couple, la densité et l'efficacité des moteurs [46].

Vitesse = 1500 tr/min						
Variable	Couple (N.m)	Courant (Arms ou Apk-SRM)	Perte fer (W)	Perte cuivre(W)	Efficacité (%)	Densité du courant RMS(A/mm <sup>2</sup> )
MSAP	303	141.1	198	4328	91.3	15.7
MAS	297	164.8	148	8591	83.1	15.8/12.1
MRC	294	300	404	7653	85.2	20.1

Vitesse = 6000 tr/min						
Variable	Couple (N.m)	Courant (Arms ou Apk-SRM)	Perte fer (W)	Perte cuivre(W)	Efficacité (%)	Densité du courant RMS(A/mm <sup>2</sup> )
MSAP	45.6	31.8	953	219	96.1	3.75
MAS	50.8	47.1	439	730	730	4.51/3.72
MRC	52.1	60	4074	306	306	4.02

Tableau 3- 3 : Comparaison des performances des MAS, MSAP et MRC

Comme nous pouvons le voir dans le Tableau 3-3, pour une vitesse de 1500tr/min, le couple du moteur synchrone à aimant permanent est plus élevé, en comparaison à celui du moteur asynchrone. Lorsque nous examinons aussi l'efficacité, nous remarquons que le MSAP est plus efficace que IM(MAS) et aussi concernant les pertes cuivre, le MAS a les pertes cuivre les plus élevées. Une étude comparative a été réalisée par la société Bauer Gear Motor GmbH en avril 2017 entre le MAS/ASM et MSAP/PMSM pour une Application de presse de boue (Compresseur de Boue) [47]

Le MAS avait les caractéristiques suivantes :

Classe IE2, puissance P= 2.2kW. Et le MSAP avec les caractéristiques suivantes :

Classe IE3, puissance P2.2kW. Le convertisseur de fréquence Danfoss a été utilisé comme mémoire afin de collecter entièrement les informations sur la vitesse, la charge et le rendement. Les résultats sont présentés dans les figures suivantes :

## Rendement à 15 Hz et 10 Nm (compression)

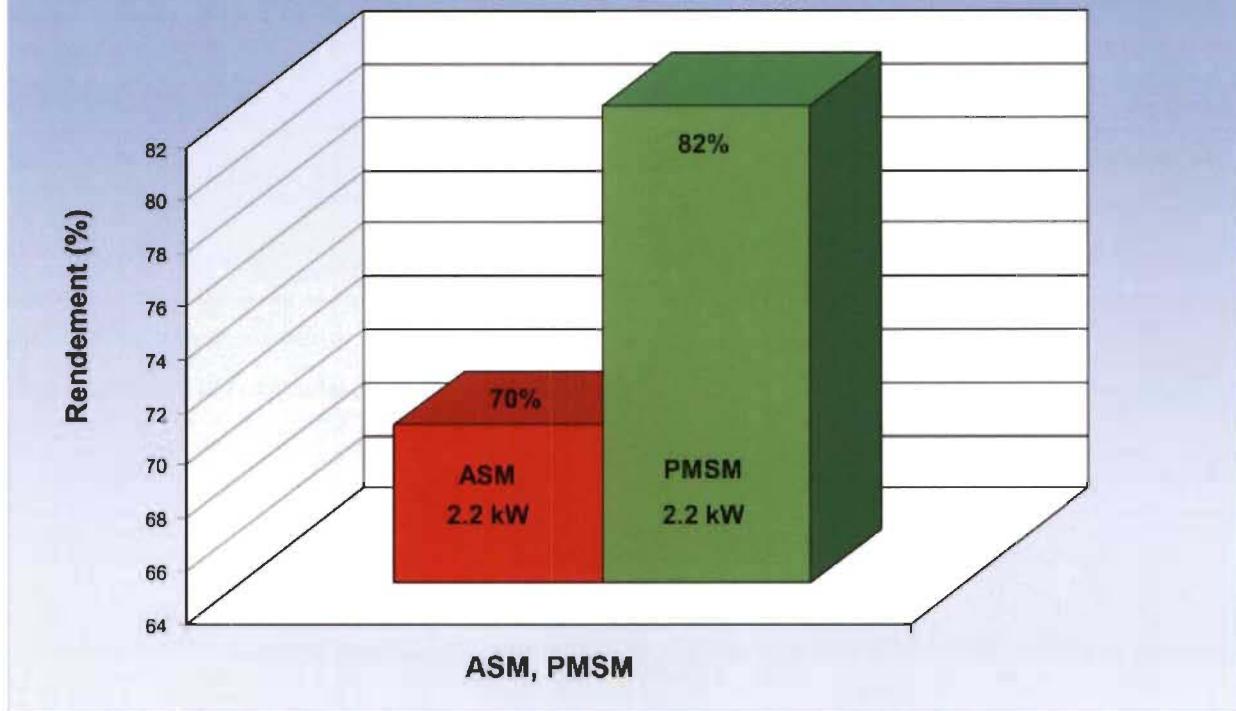


Figure 3- 1 : Rendement du MAS et MSAP utilisé comme Moteur à compression [48]

La charge de chacun des moteurs a été revue à la hausse, cependant leur vitesse a diminuée. La Figure 3-1 nous permet de voir la supériorité du moteur synchrone à aimant permanent, qui a un rendement meilleur, Malgré l'existence d'une charge partielle. Comme nous pouvons le remarquer dans la figure 3-2 qui suit.

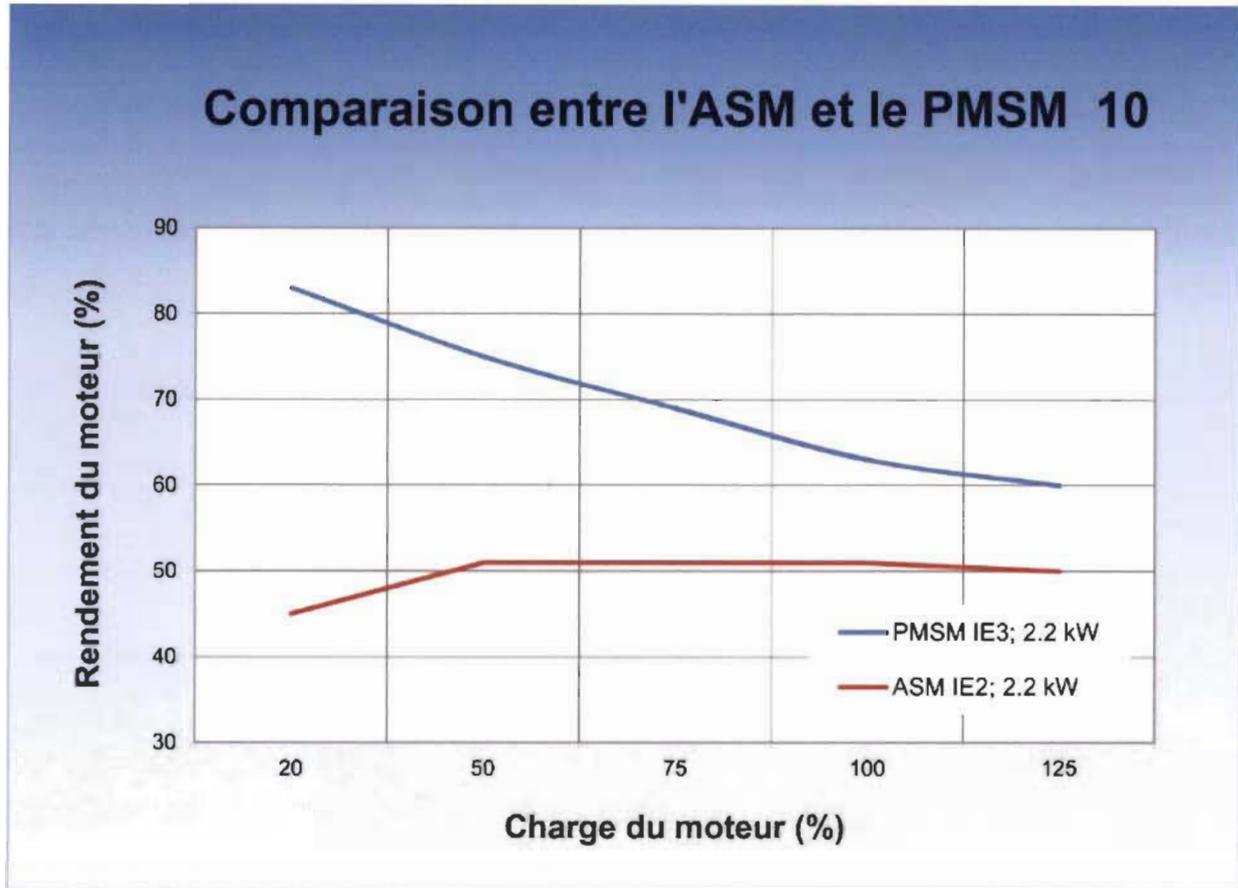


Figure 3- 2 : les Rendements et Charges du MAS et MSAP [48]

La charge du moteur et le rendement sont tous deux exprimés en pourcentage. De la figure 3-2, il est à constater que le MAS, utilisé comme moteur de traction pour l'intervalle de charge allant de 0 à 20 %, a un mauvais rendement (de l'ordre de 45%) comparativement à celui du MSAP. Pour mieux illustrer cela, regardons le graphique tridimensionnel du rendement des deux moteurs, tracer en fonction de la charge et de la vitesse, comme dans la figure 3-3 ci-dessous [48].

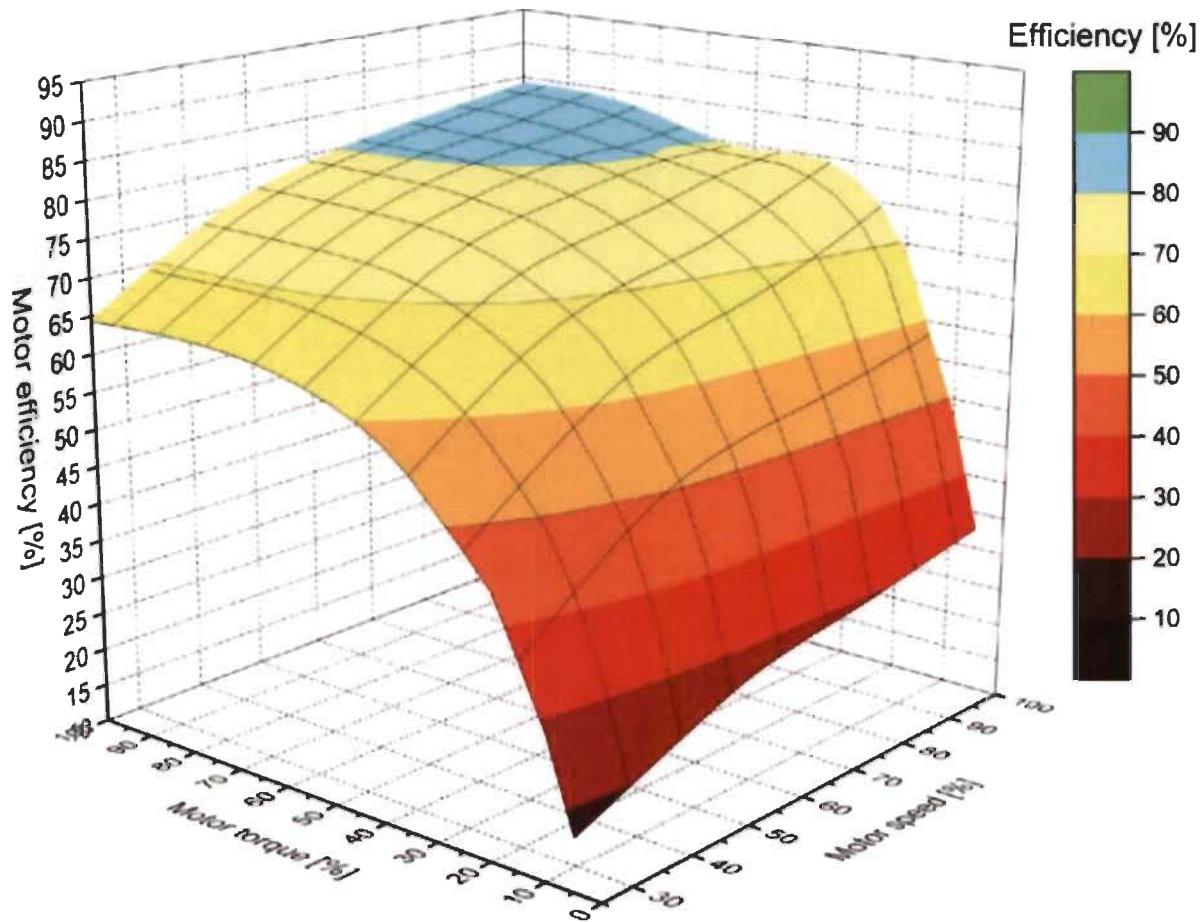


Figure 3- 1 a) Représentation tridimensionnelle du couple et de la vitesse du MAS

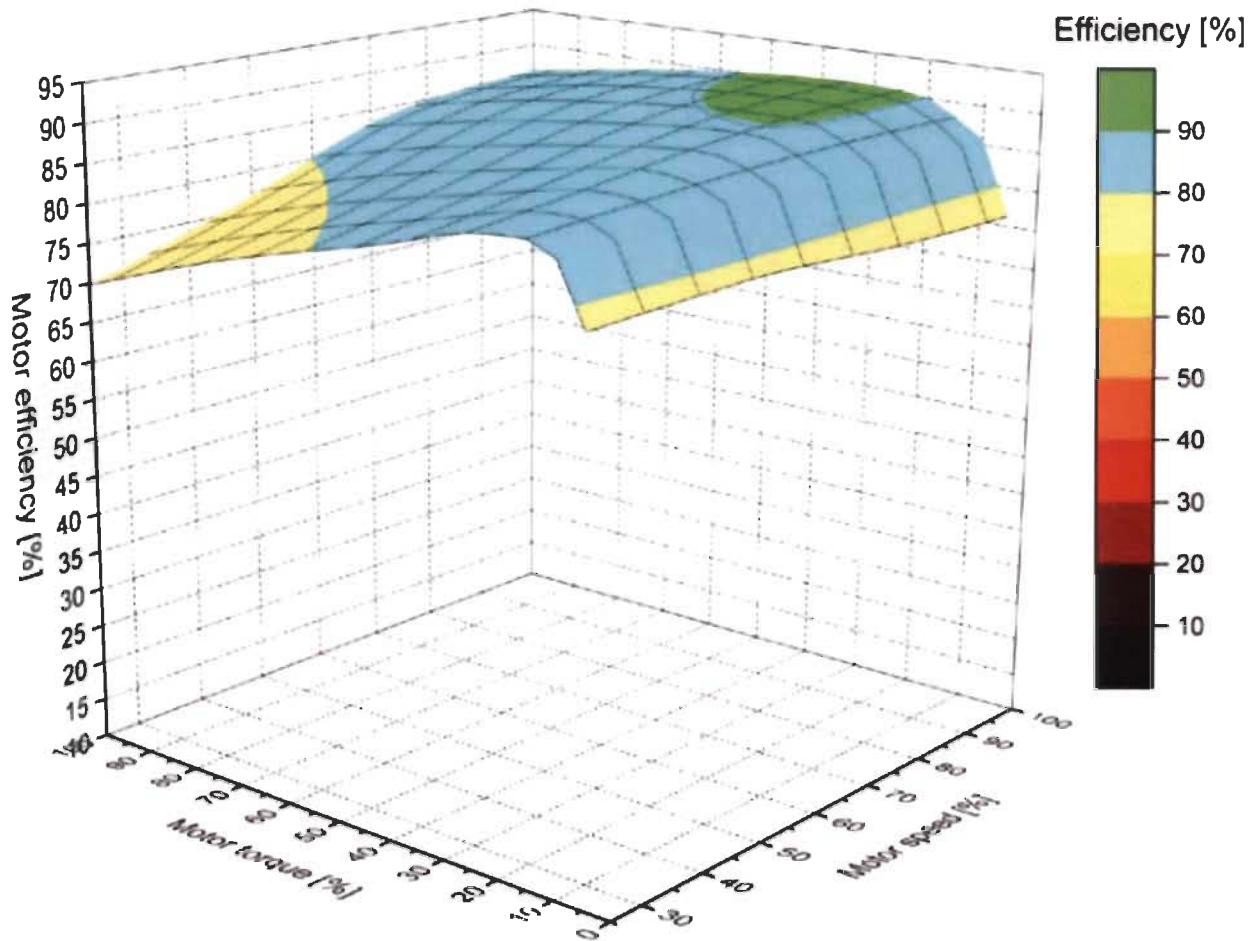


Figure 3- 3 b) Représentation tridimensionnelle du couple et de la vitesse du MSAP

### 3.6 Evaluation d'efficacité

Le Tableau ci-dessous nous donne de comparer les deux moteurs par l'évaluation de leurs caractéristiques (efficacité, la densité de puissance, le poids, la contrôlabilité, la fiabilité, la maturité de la technologie, le coût)

Systèmes de Propulsion	MCC	MAS	MS	MRC
Caractéristiques				
Densité de puissance	2,5	3,5	5	3,5
Efficacité	2,5	3,5	5	3,5
Contrôlabilité	5	5	4	3
Fiabilité	3	5	4	5

<b>Maturité de la Technologie</b>	3	5	4	4
<b>Coût</b>	3	5	3	4
<b>Total</b>	22	27	25	23

Tableau 3- 4 : Evaluation des caractéristiques des moteurs.

En nous référant au Tableau 3-4, addition des valeurs des caractéristiques du MAS, et partant de sa densité jusqu'à son coût, cela nous donne un total de 27 points et un total 25 points pour le moteur synchrone à aimant permanent. Pour ce qui est de l'efficacité et de la densité de puissance, il en résulte que le moteur synchrone à aimant permanent est de loin supérieur au moteur au MAS. technologie et fiabilité sont aussi pris en compte, ceci propulse le moteur asynchrone à la première place devant le moteur synchrone à aimant permanent dans l'industrie actuelle [48]

### 3.7 Conclusion de la comparaison

Dans ce chapitre, nous avons fait la comparaison du moteur synchrone à aimant permanent et du moteur asynchrone à cage, sur la base d'une analyse des paramètres et d'une évaluation de l'efficacité. Il en résulte de ces deux points que le MSAP est le meilleur en termes de performance et d'efficacité, sans toutefois omettre de préciser que le MAS détient une Technologie plus mature que celle du MSAP.

## 4. Commande vectorielle du MSAP

### 4.1 Introduction

La commande vectorielle du moteur synchrone à aimant permanent triphasé est difficile en raison de son modèle mathématique dans le repère de Park qui est non linéaire et qui est fortement couplé du fait de l'existence d'un couplage complexe entre les deux armatures rotorique et statorique [86]. Le découplage des armatures statorique et rotorique du MSAP est réalisé en lui appliquant la commande directe par orientation de flux rotorique, notée FOC (Field Oriented Control). Cette méthode a été proposée en 1971 par Blaschke. Son principe est de séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe direct du repère choisi. Nous avons ici deux choix à faire, le premier étant celui des variables d'état, le second celui du repère. Cela nous donne d'avoir une structure de commande découpée [87] La commande vectorielle basée sur une régulation classique Proportionnel-Intégral (PI), associe dans sa structure des termes de compensation qui permettent de découpler l'axe d (qui sera utilisé pour le réglage du flux), de l'axe q (qui sera utilisé pour le réglage du couple). Cette configuration permet de réaliser des systèmes d'actionnement électriques ayant les performances exigées par les domaines d'application [88]. Cette commande a été rendue possible grâce au développement des technologies de semiconducteurs dans les convertisseurs statiques (diminution des temps de commutation) et dans les unités de calcul (DSP) [89]. Ce chapitre présente la commande vectorielle appliquée à la MSAP. La boucle de courant et la boucle de vitesse sont régulées à l'aide de correcteurs PI. Des résultats de simulation sont présentés pour montrer les performances de la régulation proposée [56][90][91]

Par rapport aux autres formes de moteur, Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) a une meilleure performance dynamique, avec une taille plus petite et une plus haute Efficacité. Ces dernières années, avec le développement rapide de l'électronique de puissance, la découverte des terres rares, des matériaux magnétiques permanents et de plus en plus de recherche sophistiquée dans domaine du moteur à aimant permanent. MSAP est largement utilisé dans la défense nationale, l'agriculture et la vie quotidienne [92][93]

### 4.2 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle du MSAP est basée sur le même principe que celui d'un moteur à courant continu (MCC) à excitation séparée. Il est question dans ce cas de régler le flux et le couple par les composantes respectives du courant. Il est impératif de nous placer dans un repère (d, q) dans lequel nous pourrons écrire l'expression du couple en fonction des composantes du courant dans le repère (d, q). Le courant de l'axe d ( $I_d$ ) étant le courant de l'excitation et permettant le réglage du flux dans le moteur et le courant ( $I_q$ ) permet de contrôler le flux[57][94][95].

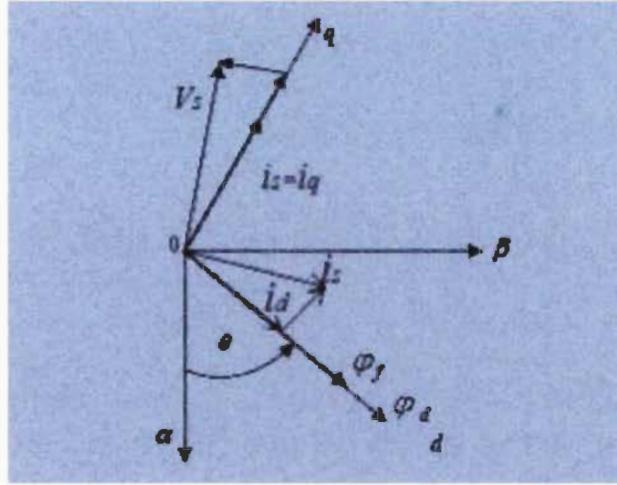


Figure 4-1 : Phase du MSAP dans le repère (d, q) lié au Champ tournant [57]

En considérant la figure ci-dessus, on constate que la position instantanée du rotor, autrement dit le flux rotorique se situe à une distance d'angle  $\theta$  par rapport à l'axe  $\alpha$  du référentiel ( $\alpha, \beta$ ) lié au stator. La mise en évidence de la commande vectorielle implique que l'axe du courant rotorique  $I_q$  soit en avance par rapport au flux rotorique et ainsi le courant statorique  $I_d$  soit colinéaire aux flux rotoriques. Si nous sommes dans un système à couple constant,  $I_d = 0$ , ce qui entraîne que :

$$I_d = 0 \Rightarrow I_q = I_s \quad (4.1)$$

Donc :

$$\varphi_d = \varphi_f \quad (4.2)$$

L'expression du couple électromagnétique est la suivante :

$$C_e = \frac{3}{2} P \varphi_f I_q \quad (4.3)$$

Le flux étant de valeur constante, cela implique la proportionnalité du couple électromagnétique au courant  $I_q$ .

$$C_e = k_t I_q \quad (4.4)$$

$$k_t = \frac{3}{2} P \varphi_f \quad (4.5)$$

Si nous faisons fonctionner le MSAP en excès de vitesse, cela entraînera l'application d'un défluxage, cela étant le courant  $I_d$  sera différent de zéro et le couple sera limité afin que l'expression mathématique suivante soit vraie :

$$\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq I_{max} \quad (4.6)$$

Le modèle du MSAP dans le repère de Park

$$\begin{cases} V_d = -W_r L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{d I_q}{dt} + W_r \varphi_f \end{cases} \quad (4.7)$$

### 4.3 Commande vectorielle du MSAP alimenté en Tension

La commande vectorielle est également appelée découplage ou commande par orientation de flux rotorique. La commande vectorielle sépare trois courant de phase du stator en deux courant de phases d-q, en un flux produit et un autre couple produit. Ce qui permet un contrôle direct du flux et du couple. Donc en utilisant la commande vectorielle, le MSAP est équivalent à une machine à courant continu excitée séparée. Le modèle de MSAP est non linéaire. Donc, en utilisant la commande vectorielle, le modèle de MSAP devient linéaire. Le schéma de la commande vectorielle est basé sur transformation de coordonnées et équation du couple moteur en contrôlant le courant du stator pour améliorer les performances du moteur. Sous le contrôle d'un Système MSAP triphasé, le courant modulé est fourni aux enroulements de stator A-B-C pour construire un magnétique champ tournant et faire tourner le rotor. La stratégie de la commande vectorielle est formulée dans un référentiel synchronisé rotationnel. Au niveau de transformation de Clarke ou de Park et la transformation inverse, les relations équivalentes de courants sont construites entre coordonnées a, b, c du stator, coordonnées stationnaires des axes:  $\alpha$ ,  $\beta$  et coordonnées rotatives des axes d, q [58][96][97].

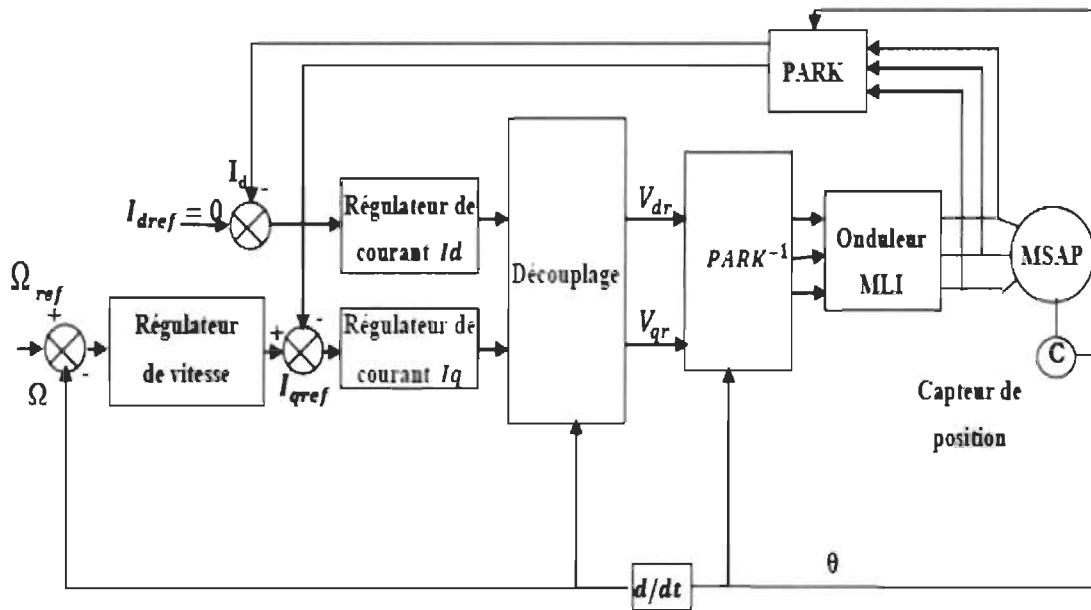


Figure 4- 2 : Commande par orientation de flux rotorique du MSAP [58][98]

Les éléments importants de la commande vectorielle sont : La régulation de la vitesse, La régulation du courant Id et la Régulation du courant Iq.

#### 4.4 Découplage

Le modèle du MSAP dans le repère de Park nous donne un Système d'équations différentielles, dans lesquelles toutes les composantes contenues dans ces expressions dépendent les uns des autres [58]

$$\begin{cases} V_d = (L_d \frac{dI_d}{dt} + R_s I_d) - W_r L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + W_r (L_d I_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (4.8)$$

Nous vous présenterons dans la suite un schéma de couplage des axes d et q.

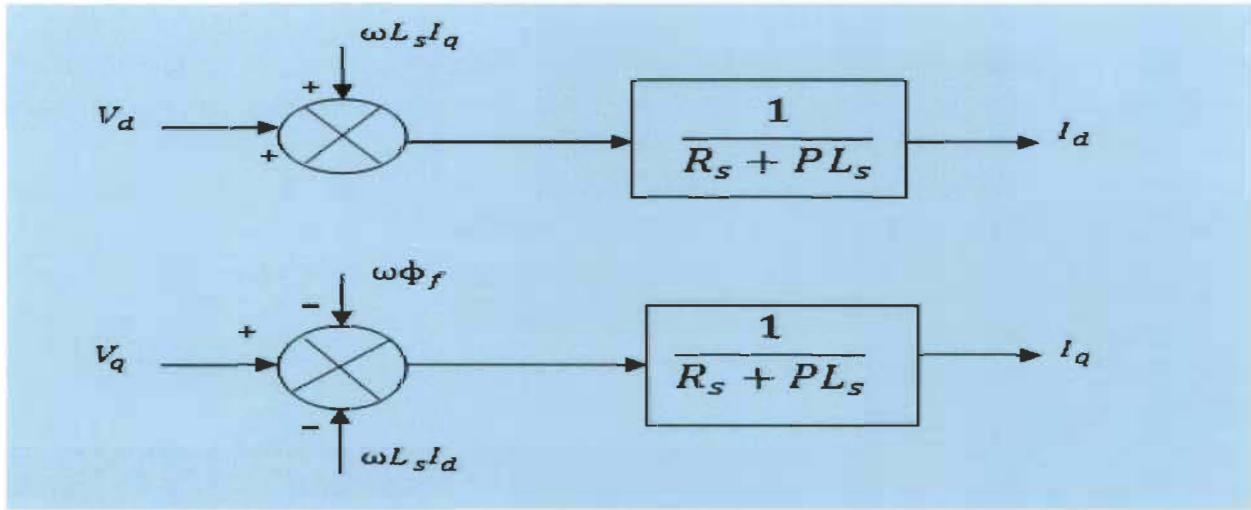


Figure 4- 3 : Couplage entre les axes d et q

#### 4.5 Découplage par compensation

Pour écrire les équations du MSAP dans le repère (d, q) et déterminer les coefficients des régulateurs, nous devons utiliser le découplage par compensation, car les équations du MSAP dans (d, q) sont fortement non linéaires. Le découplage consiste à utiliser le changement de variable, en définissant de nouvelles variables de commande  $F_{emd}$  et  $F_{emq}$  et en faisant la substitution de ces variables. [100] L'équation aura donc la forme suivante :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - F_{emd} \\ V_q = V_{q1} + F_{emq} \end{cases} \quad (4.9)$$

Où

$$\begin{cases} V_{d1} = L_d \frac{dI_d}{dt} + R_s I_d \\ V_{q1} = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{emd} = W_r L_q I_q \\ F_{emq} = W_r (L_d I_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (6.10)$$

Nous aurons alors :

$$\begin{cases} \frac{I_d}{V_{d1}} = \frac{1}{R_s + sL_d} \\ \frac{I_q}{V_{q1}} = \frac{1}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (4.11)$$

Nous pouvons observer le circuit équivalent du découplage par compensation dans la figure suivante :

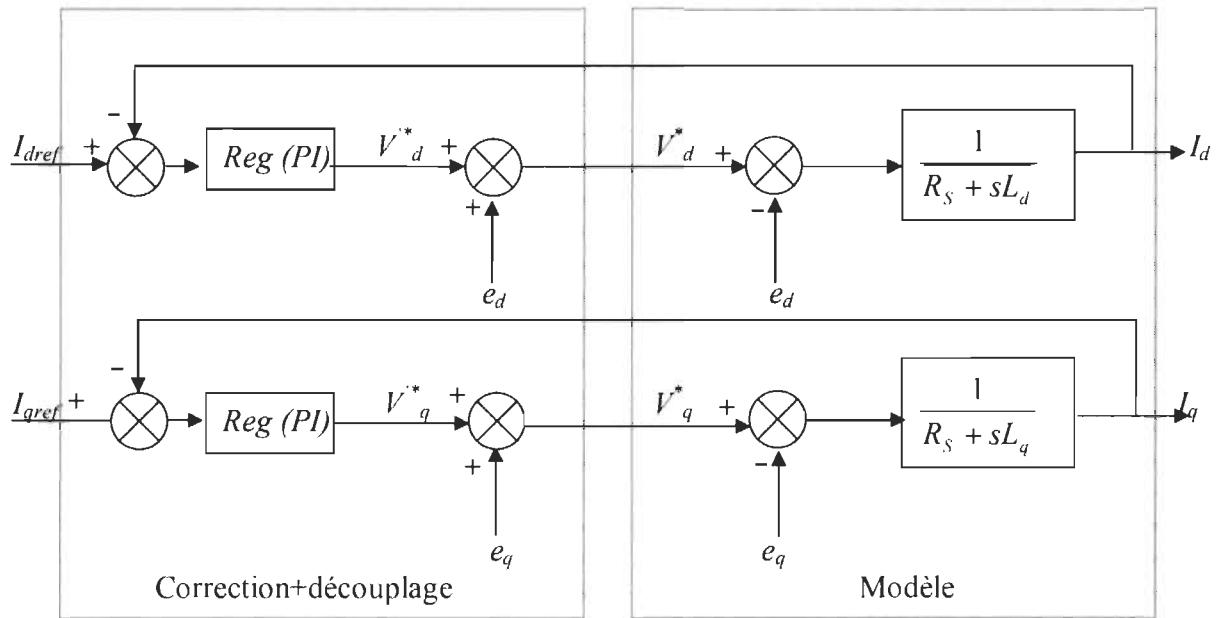


Figure 4- 4 : Découplage par compensation du MSAP.

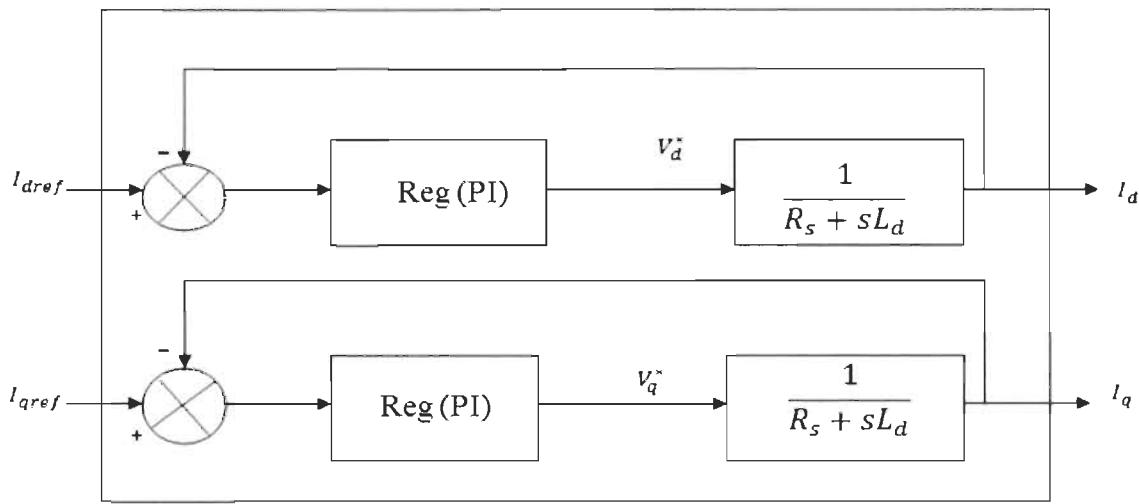


Figure 4- 5 : Découplage de la commande du MSAP

## 4.6 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

### 4.6.1 Avantages de la commande vectorielle

Parmi les avantages de la commande vectorielle, nous pouvons les suivants :

- ✓ la commande vectorielle est basée sur le régime transitoire
- ✓ nous pouvons contrôler le couple à l'arrêt
- ✓ elle est rapide et précise
- ✓ nous pouvons contrôler les grandeurs par leurs Amplitudes et leurs Phases [101]

### 4.6.2 Inconvénients de la commande vectorielle

La commande vectorielle directe à flux orienté est une très bonne méthode, mais qui vient aussi avec ses inconvénients, que nous présentons ci-dessous :

- ✓ la vitesse de rotation intervient uniquement dans l'expression de l'algorithme de commande. Si nous ne mesurons pas la vitesse par l'utilisation d'un variateur sans capteur de vitesse, les erreurs d'estimation de vitesse pourront diminuer les performances du variateur.
- ✓ pour transformer les coordonnées, nous avons besoin d'un angle estimé  $\theta_s$
- ✓ à cause de l'encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, la commande vectorielle directe revient très coûteuse.
- ✓ elle n'est pas robuste aux variations de la constante de temps du rotor et aux variations paramétriques [80]

## 4.7 Choix des régulateurs

Les régulateurs ont pour objectif de stabiliser le circuit de réglage, d'assurer la meilleure précision et un meilleur temps de réponse. On retrouve généralement dans le domaine industriel les régulateurs standards suivant: PI et PID.

#### 4.7.1 Concevoir un régulateur

Soit  $Y^*(t)$  la consigne,  $Y(t)$  le signal de sorti du système à régler.

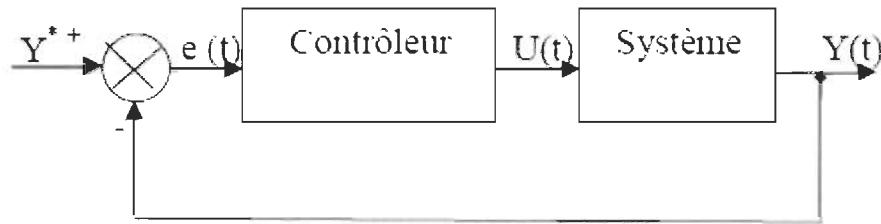


Figure 4- 6 : Commande par régulateur PI [61]

$$\text{avec } U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (4.12) | 102 |$$

##### Action proportionnelle ( $K_p$ )

Lorsque  $K_p$  est de valeur élevée, la correction se fera de manière rapide. Il se pourrait que nous ayons un dépassement et le signal de sortie aura une oscillation élevée.

Lorsque  $K_p$  est de faible valeur, nous aurons une correction qui se fera lentement et le signal de sorti ne pourra peut-être pas osciller.

##### Action Intégrale $K_i$

La réponse de l'action intégrale à la variation de l'erreur se fait lentement. L'action intégrale s'assure à ce que la consigne soit rattrapée.

Aussi longtemps que nous aurons une valeur positive ou négative de l'erreur, la valeur de l'action  $U(t)$  pourra éventuellement soit augmenter soit diminuer jusqu'au point où l'erreur s'annulera complètement [61]

#### 4.7.2 Calcul des régulateurs

##### Régulateur de courant $I_d$

Nous allons choisir les paramètres du régulateur du courant  $I_d$  de manière que le zéro introduit soit compensé par la dynamique du courant. La figure ci-dessous nous donne la boucle du courant ( $I_d = \frac{V_{d1}}{R_s + S L_d}$ )

$$(4.13)$$

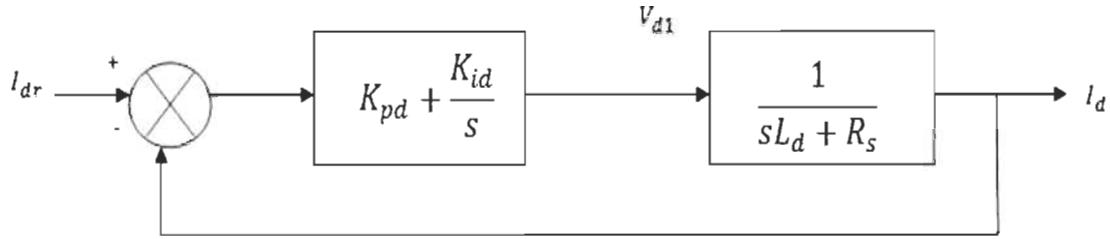


Figure 4- 7 : Boucle de régulation  $I_d$ [61]

Nous obtenons la Fonction de transfert à boucle ouverte (FTBO) par l'expression suivante :

$$F_{dod}(s) = \left( \frac{K_{id}}{s} + K_{pd} \right) \left( \frac{1}{sL_d + R_s} \right) = \frac{K_{id}}{s} \left( 1 + \frac{K_{pd}s}{K_{id}} \right) \left( \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \left( \frac{L_d}{R_s} \right)s} \right) \quad (4.14)$$

$$F_{dod}(s) = \frac{K_{id}}{s} \left( 1 + \frac{K_{pd}s}{K_{id}} \right) \left( \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_d s} \right) \text{ Avec } T_d = \frac{L_d}{R_s} \quad (4.15)$$

La Fonction de transfert en boucle fermée (FTBF)

$$F_{dod}(s) = \frac{F_{bod}(s)}{F_{bod}(s) + 1} \quad (4.16)$$

Nous allons calculer les paramètres du régulateur PI

En partant de l'expression de la Fonction de transfert à boucle ouverte (6.14), et admettant que  $\frac{K_{pd}}{K_{id}} = \frac{L_d}{R_s}$ , nous aurons les nouvelles expressions des fonctions de transfert ouverte et fermée

$$\begin{cases} F_{bod} = \frac{K_{id}}{sR_s} \\ F_{bfd} = \frac{1}{\frac{R_s}{K_{id}}s + 1} \end{cases} \quad (4.17)$$

avec  $\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}}$  la constante de temps et on admet que  $t_r$  la réponse sera

$$t_r = 3\tau_d \quad [102]$$

Pour déterminer les gains de PI, en un temps t quelconque, on utilise l'expression suivante :

$$\begin{cases} t_r = 3 \frac{R_s}{K_{id}} \Rightarrow K_{id} = \frac{3 R_s}{t_r} \\ \frac{K_{pd}}{K_{id}} = \frac{L_d}{R_s} \Rightarrow K_{pd} = \frac{3 L_d}{t_r} \end{cases} \quad (4.18)$$

### Régulateur de courant $I_q$

Le régulateur de courant  $I_q$  se détermine identiquement au régulateur du courant  $I_d$

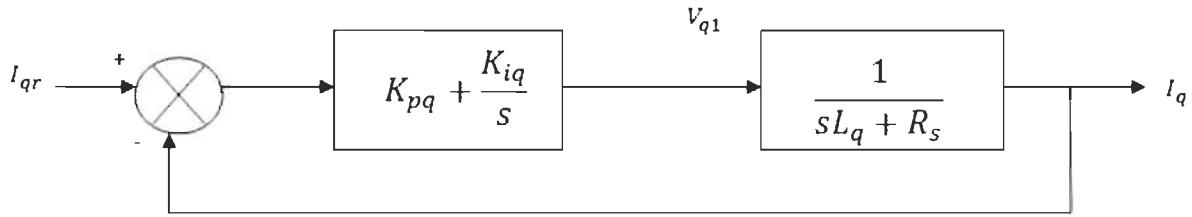


Figure 4- 8 : Boucle du régulateur de  $I_q$  [102]

$$\begin{cases} t_r = 3 \frac{R_s}{K_{iq}} \Rightarrow K_{iq} = \frac{3 R_s}{t_r} \\ \frac{K_{pq}}{K_{iq}} = \frac{L_q}{R_s} \Rightarrow K_{pq} = \frac{3 L_q}{t_r} \end{cases} \quad (4.19) [102]$$

### Régulateur de vitesse

La boucle de la régulation de vitesse est présentée dans la Figure ci-dessous

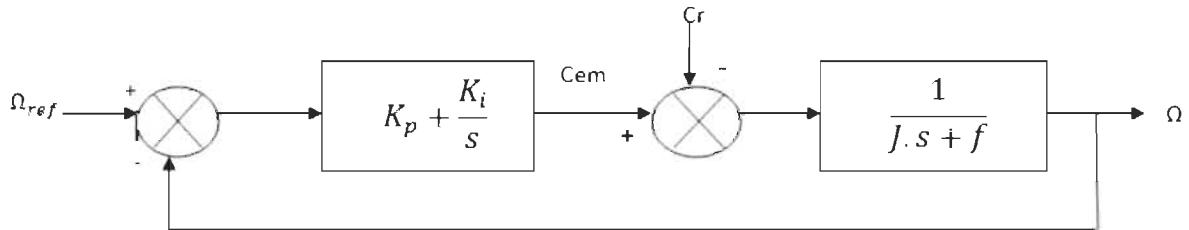


Figure 4- 9 : Boucle du régulateur de vitesse  $\Omega$  [59]

La FTBO est la suivante :

$$F_{bo\Omega}(s) = \left( \frac{K_i}{s} + K_{p\Omega} \right) \left( \frac{1}{J_s + f} \right) = \frac{K_i}{s} \left( 1 + \frac{K_{p\Omega} s}{K_{i\Omega}} \right) \left( \frac{\frac{1}{f}}{1 + \left( \frac{f}{J} \right) s} \right) \quad (4.20)$$

$$F_{bo\Omega}(s) = \frac{K_{i\Omega}}{s} \left( 1 + \frac{K_{p\Omega} s}{K_{i\Omega}} \right) \left( \frac{\frac{1}{f}}{1 + T_d s} \right) \text{ Avec } T_d = \frac{j}{f} \quad (4.21)$$

Nous pouvons ainsi avoir la fonction de transfert boucle fermée par la formule :

$$F_{df\Omega}(s) = \frac{F_{bo\Omega}(s)}{F_{bo\Omega}(s)+1} \quad (4.22)$$

En admettant que «  $\frac{K_{p\Omega}}{K_{i\Omega}} = \frac{j}{f}$  », la FTBO et la FTBF pourront s'écrire de manière suivante :

$$\begin{cases} F_{bo\Omega} = \frac{K_{i\Omega}}{fs} \\ F_{bf\Omega} = \frac{1}{\frac{f}{K_{i\Omega}}s+1} \end{cases} \quad (4.23)$$

avec  $\tau_\Omega = \frac{f}{K_{i\Omega}}$  la constante de temps et on admet que  $t_r$  la réponse sera

$$t_r = 3\tau_\Omega \quad [104]$$

Pour déterminer les gains de PI, en un temps t quelconque, on utilise l'expression suivante :

$$\begin{cases} t_r = 3\frac{f}{K_{i\Omega}} \Rightarrow K_{i\Omega} = \frac{3f}{t_r} \\ \frac{K_{p\Omega}}{K_{i\Omega}} = \frac{j}{f} \Rightarrow K_{p\Omega} = \frac{3j}{t_r} \end{cases} \quad (4.24)$$

### **La limitation du courant :**

Les limitations en courant dans un circuit de commande vectorielle peuvent provoquer les anomalies durant les phénomènes transitoires ayant la forme d'un dépassement énorme de la valeur à contrôler, cela peut aussi provoquer un fonctionnement instable du circuit de réglage. Nous ne pouvons plus utiliser la caractéristique non linéaire de la limitation, car elle ne favorise plus l'emploi de la méthode linéaire à des fins d'analyse précise du comportement dynamique du circuit au moment où le Signal de sorti du régulateur est saturé. Le fonctionnement des régulateurs dépend de leur sortie, si la sortie est saturée, cela pourra perturber leur fonctionnement, si ces régulateurs ont une partie intégrale. Ceci est dû au fait que l'action intégrale du régulateur croît sans cesse, alors que sa sortie est limitée.

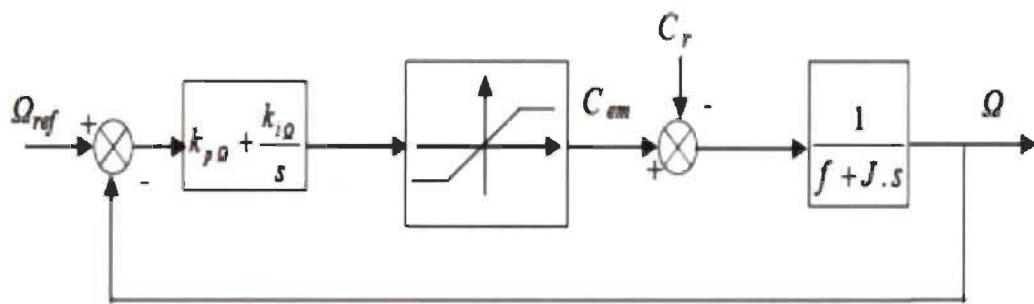


Figure 4-10 : Boucle de réglage de vitesse avec limitation du courant [62]

Pour remédier au problème évoqué précédemment, nous devons utiliser la méthode dite anti-windup (anti-remise d'emballement). Voir la figure ci-dessous.

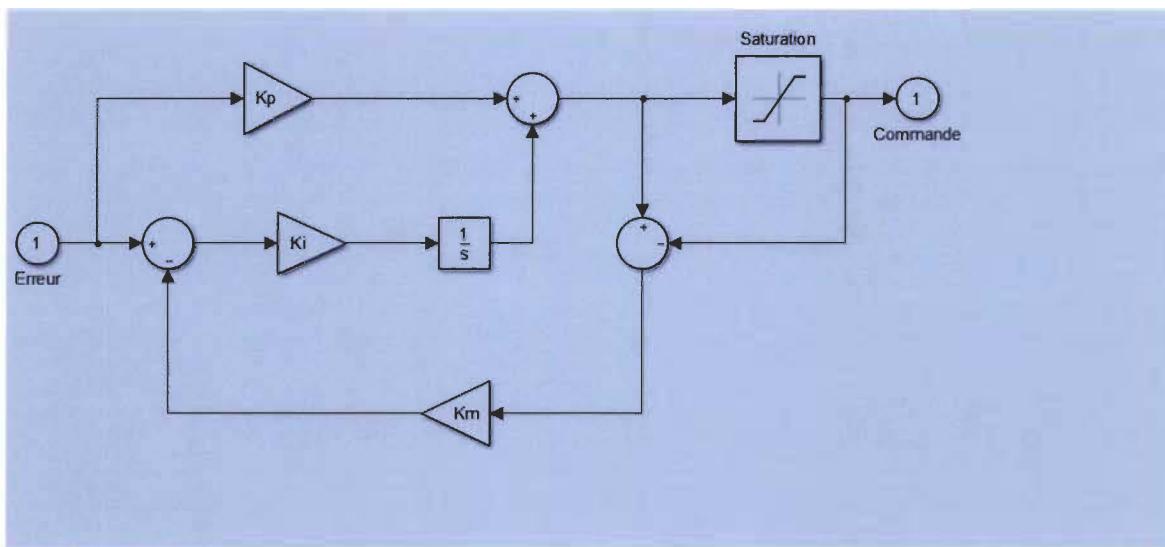


Figure 4-11 Régulateur PI avec la mesure anti-windup [62]

#### 4.8 Simulation de la commande vectorielle du MSAP piloté par onduleur de tension à deux niveaux

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons utiliser le logiciel Matlab/Simulink pour vérifier la validité de nos systèmes dynamiques par la simulation.

Le déroulement de la simulation se fera avec un MSAP tournant à vide c'est-à-dire sans un couple résistant.  $C_r = 0$ ,  $w = 70\text{rad/sec}$ . Nous réaliserons les trois tests suivants :

- **test de poursuite de la consigne**
- **test de la régulation**
- **test de la robustesse**

Les caractéristiques du MSAP dont nous utiliser pour effectuer les simulations et les tests sont dans le tableau ci-dessous [106][107]

Puissance nominale ( $P_n$ )	1.1 kW
Couple nominal	...
Vitesse nominale ( $\omega_r$ )	750 tr/min
Tension nominale ( $V_n$ )	220 V
Résistance statorique direct ( $R_s$ )	4 Ohms
Nombre de paires de pôles (P)	4 pôles
Flux des aimants ( $\varphi_{sf}$ )	0.053 Wb
Fréquence nominale (F)	50 Hz
Facteur de puissance	0.83
Inertie du moteur (J)	$0.09 \cdot 10^{-5} N.m.s^2/rad$
Inductance statorique direct ( $L_d$ )	2.5 mH
Inductance statorique quadratique ( $L_q$ )	2.5 mH
Coefficient de frottement (f)	0

Tableau 4- 1 Caractéristiques du MSAP utilisé pour la simulation [89]

#### ➤ Test de poursuite

On observera si les régulateurs suivront la consigne.

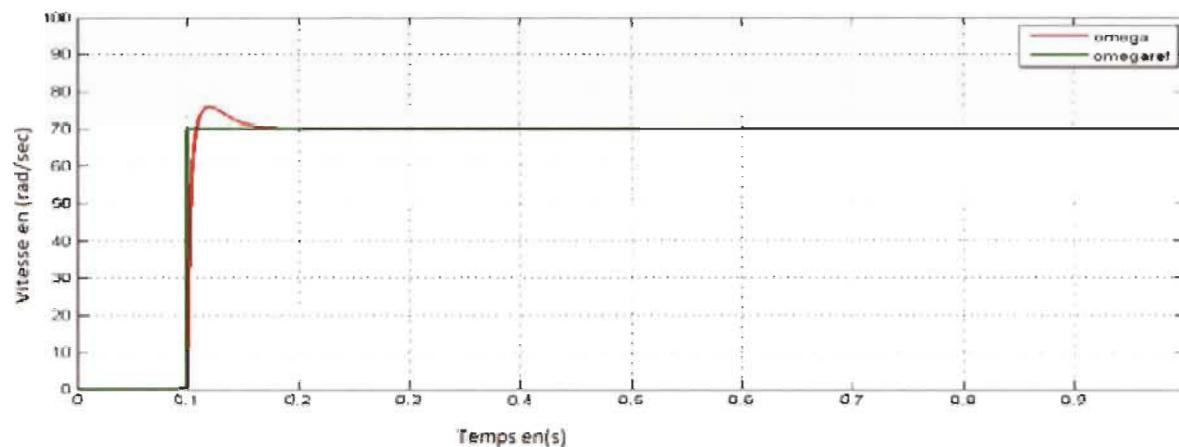


Figure 4- 14 : Vitesse du MSAP en fonction du temps

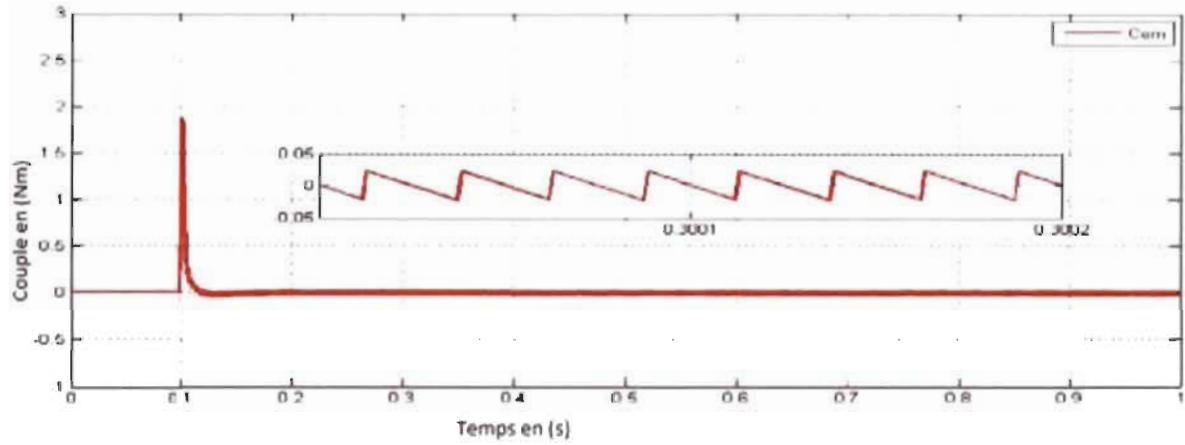


Figure 4- 15 : Couple électromagnétique en fonction du temps

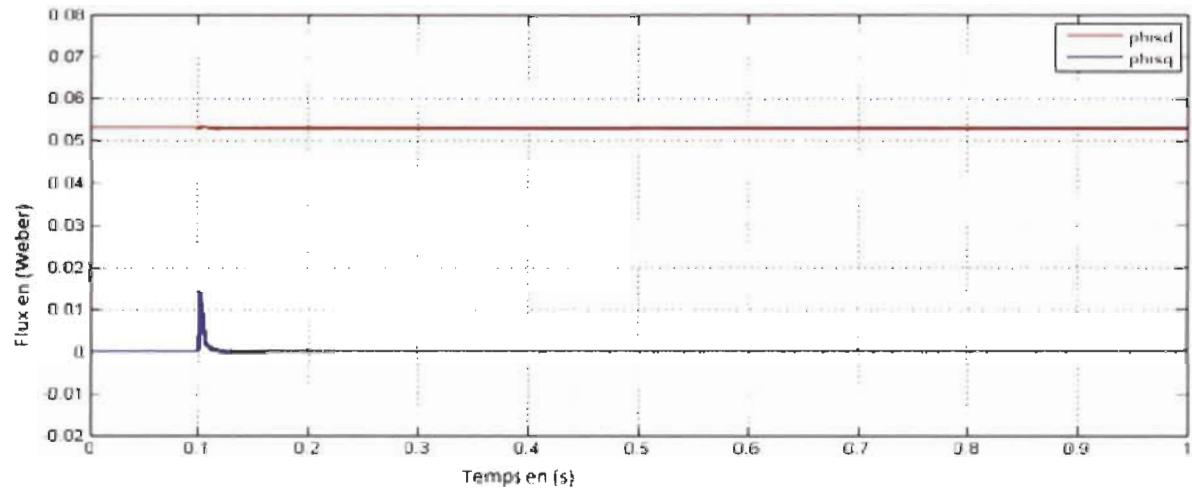


Figure 4-16 : Flux en fonction du temps

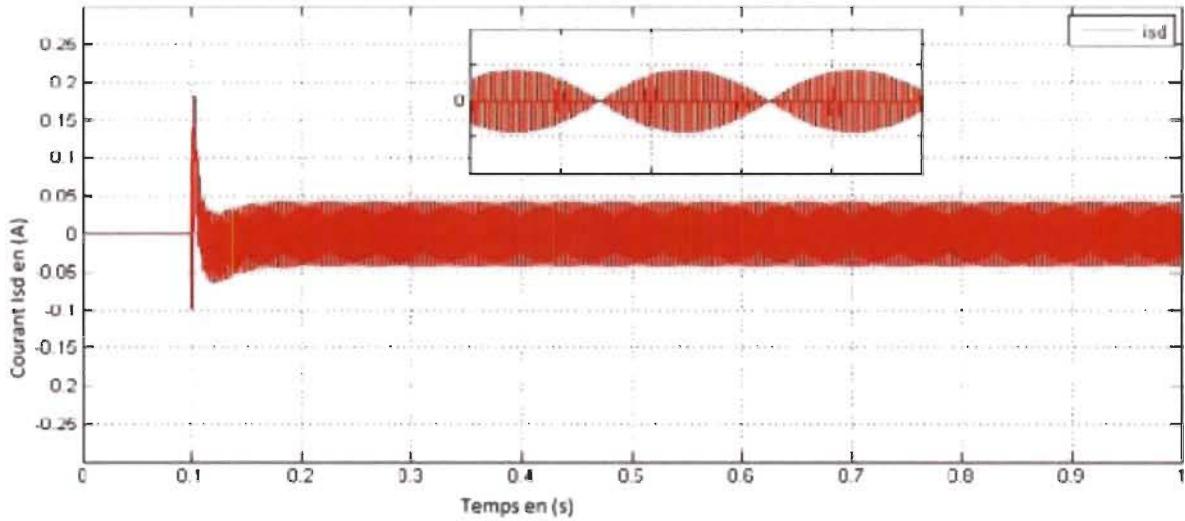


Figure 4-17 : Courant statorique sur l'axe d en fonction du temps

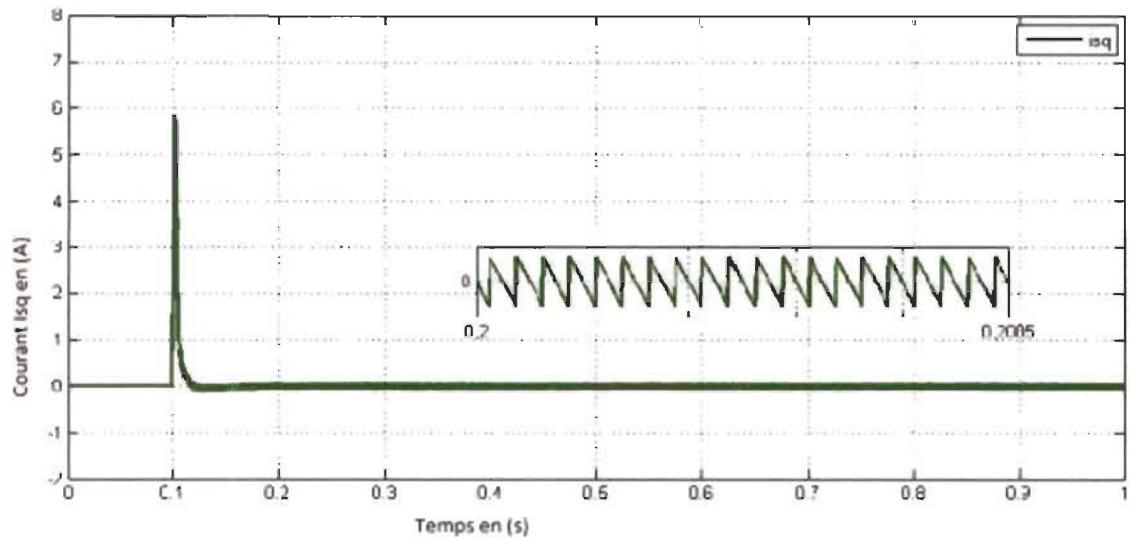


Figure 4-18 Courant statorique sur l'axe q en fonction du temps

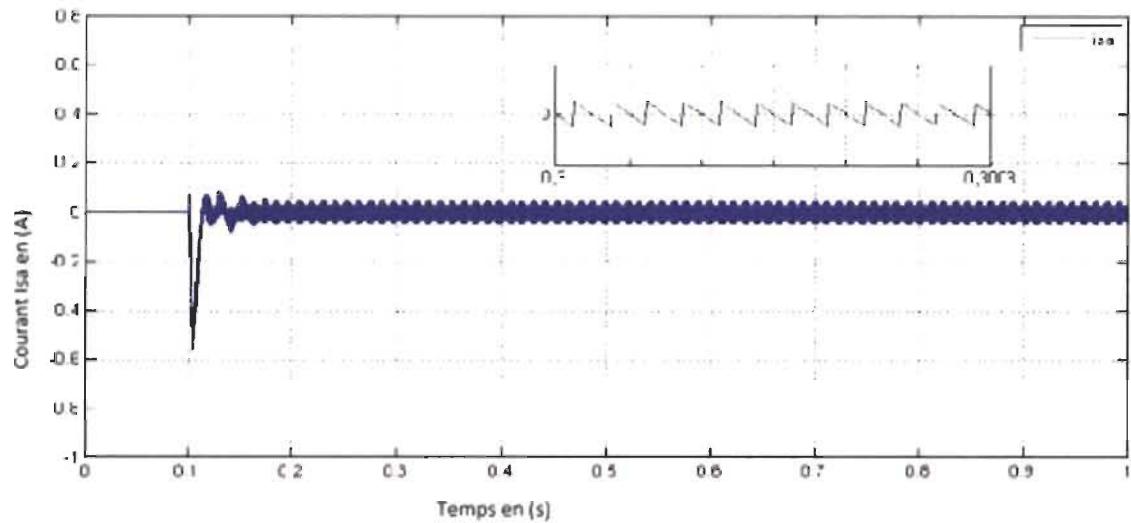


Figure 4-19: Courant statorique en fonction du temps

Nous allons par la suite observer la vitesse avec inversion à un temps quelconque  $t = 0.4\text{s}$ .

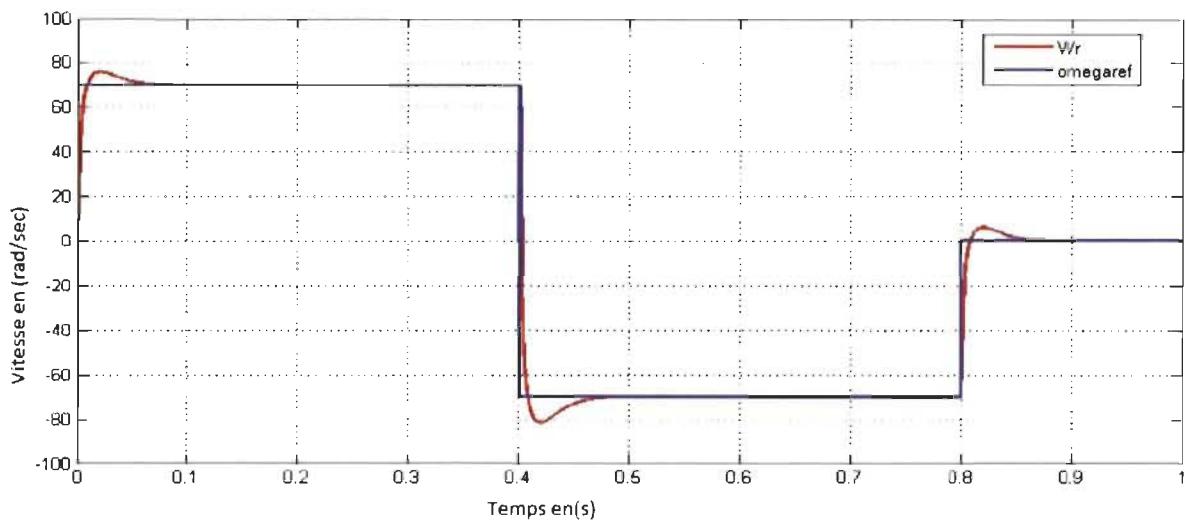


Figure 4-20: Vitesse du MSAP avec inversion en fonction du temps

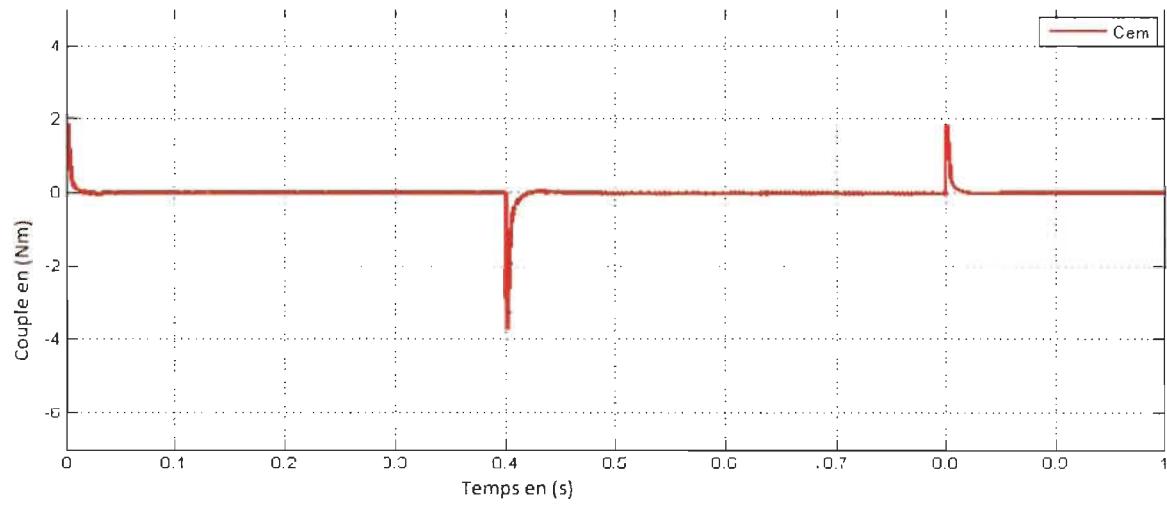


Figure 4-21 : Couple électromagnétique en fonction du temps

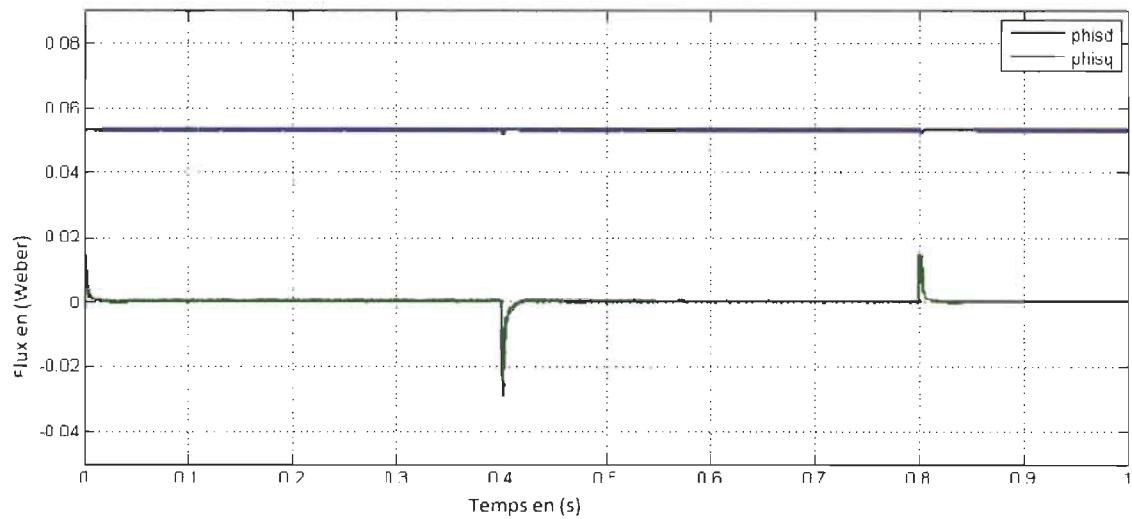


Figure 4-22: Flux en fonction du temps

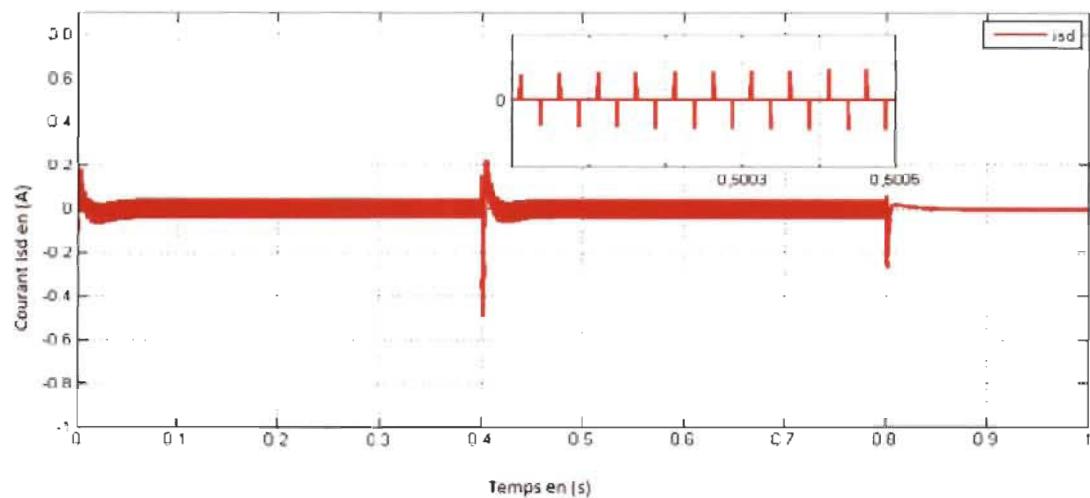


Figure 4-23: Courant Statorique sur l'axe d en fonction du temps

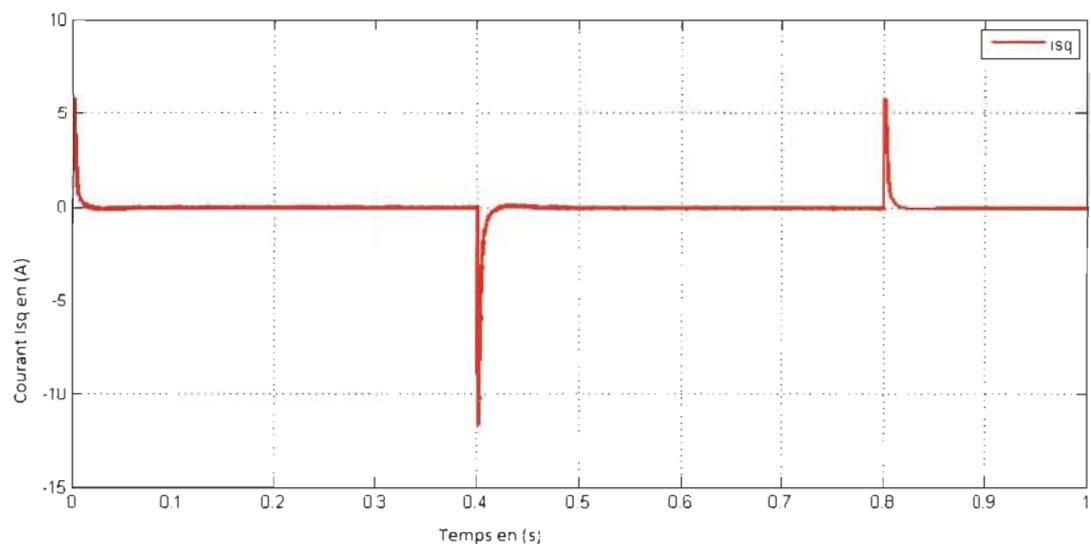


Figure 4-24: Courant statorique sur l'axe q en fonction du temps

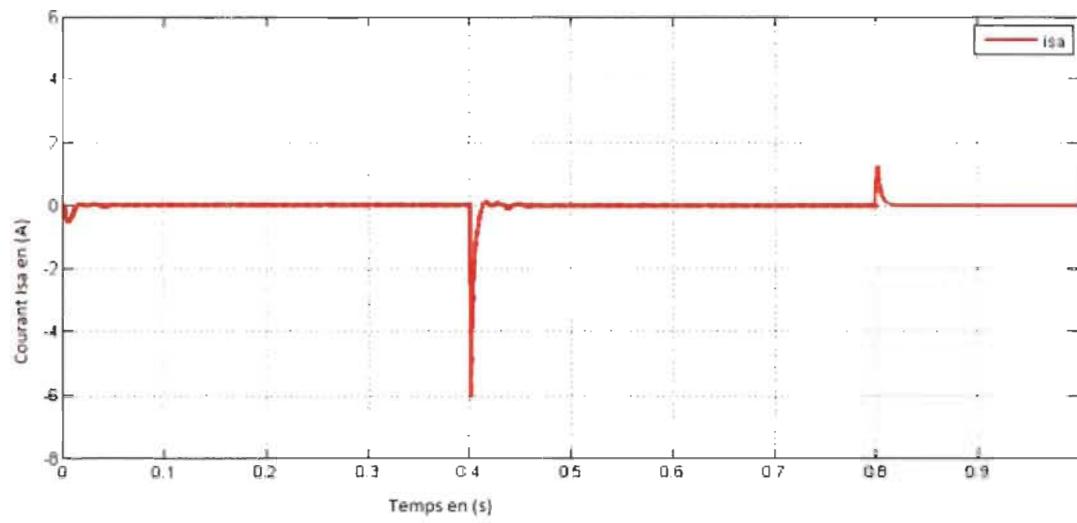


Figure 4-25: Courant statorique en fonction du temps

Allure de la courbe en forme de trapèze de l'inversion de la vitesse.

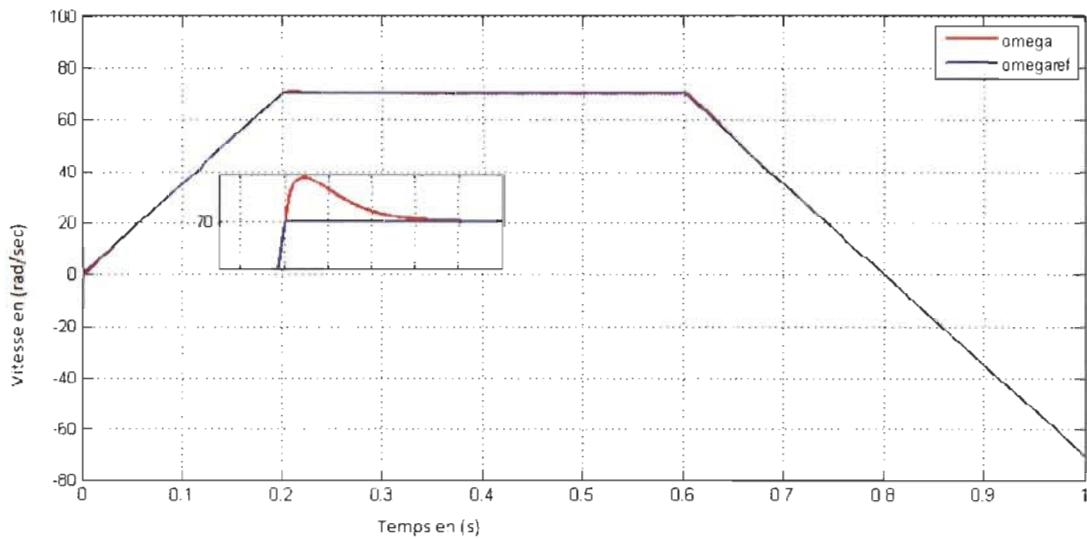


Figure 4-26: Vitesse du MSAP sous forme de trapèze en fonction du temps

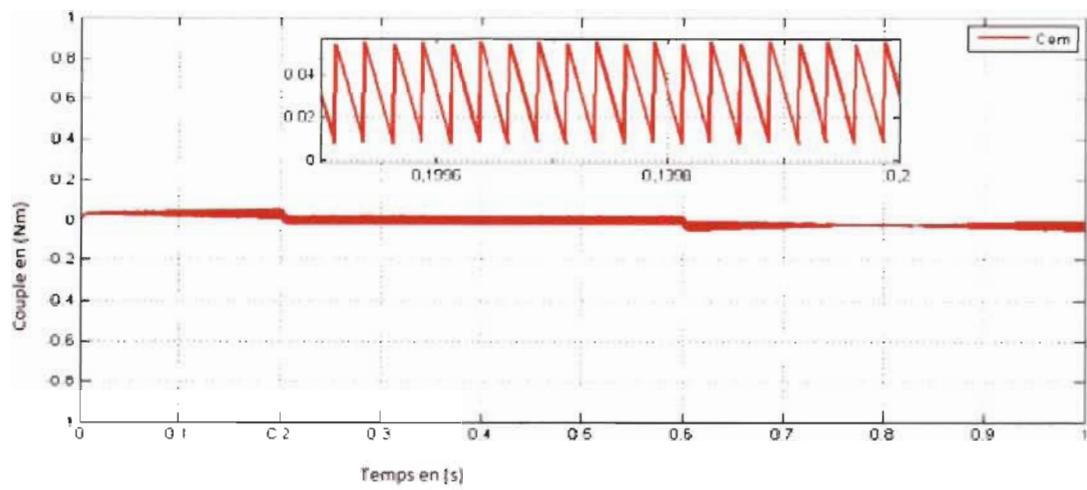


Figure 4-27: Couple électromagnétique en fonction du temps

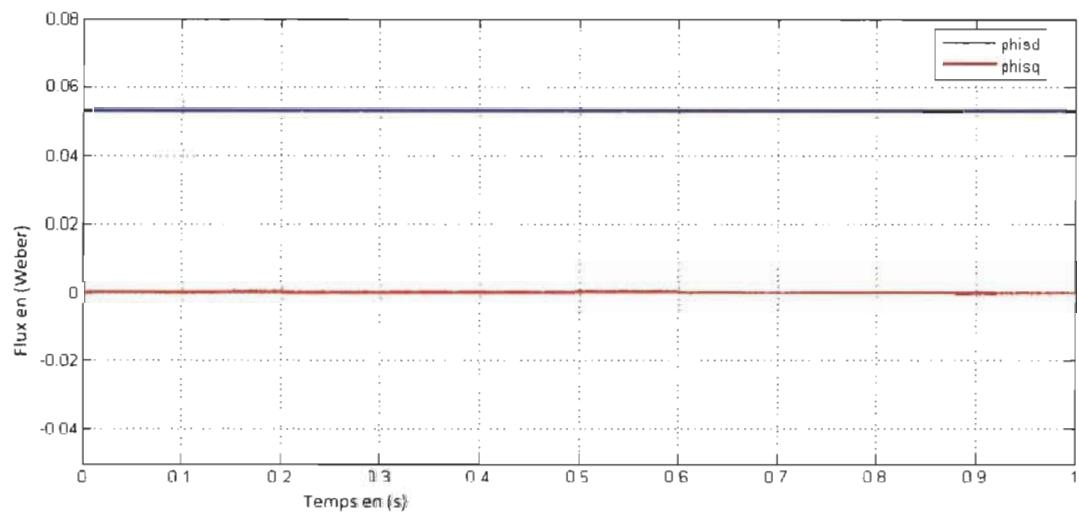


Figure 4-28: Flux en fonction du temps

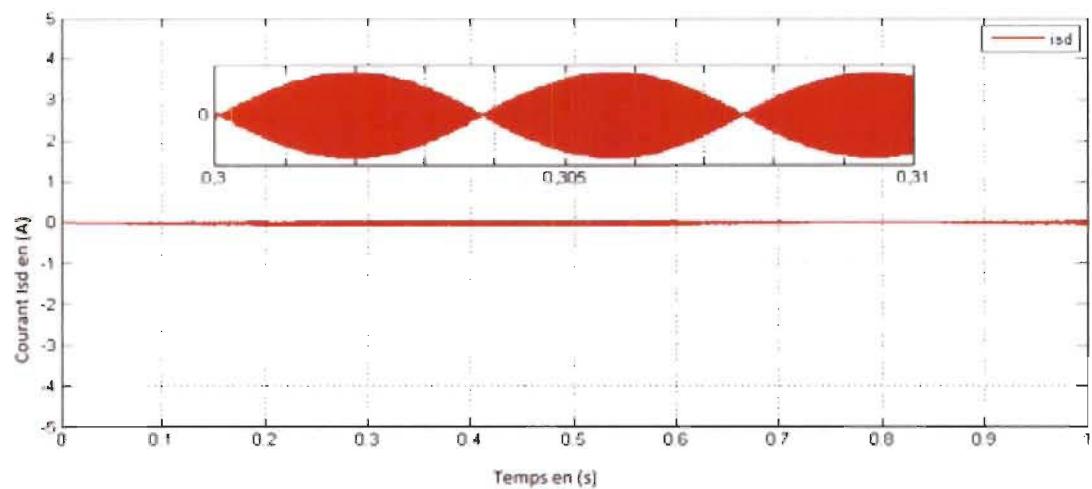


Figure 4-29: Courant statorique sur l'axe d en fonction du temps

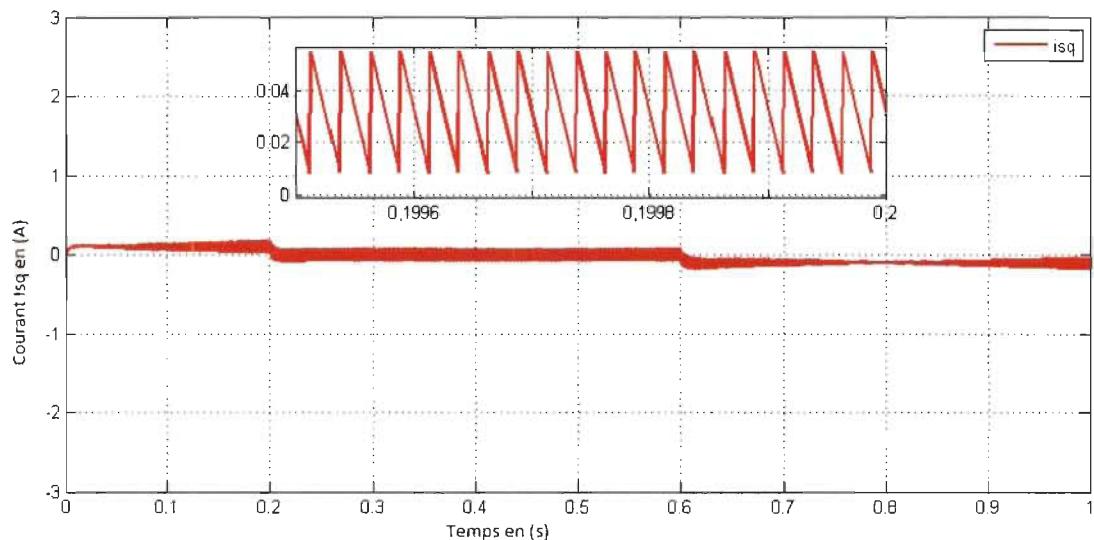


Figure 4-30: Courant statorique sur l'axe q en fonction du temps

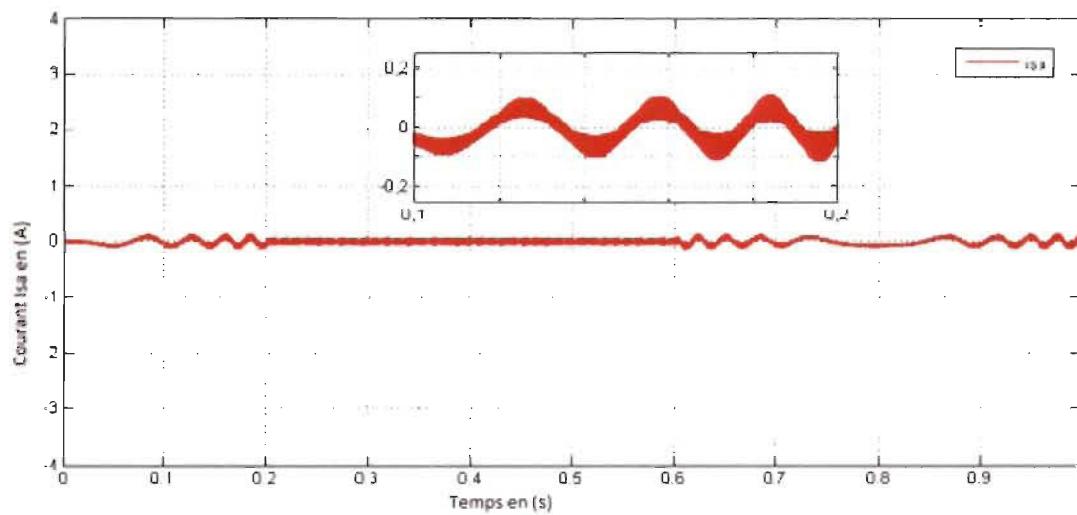


Figure 4-31: Courant Statorique en fonction du temps

#### ➤ Test de la régulation

Nous allons procéder à un test de vitesse  $w = 70 \text{ rad/sec}$  ayant une inversion à un temps  $t = 0.4\text{s}$ . Le MSAP aura un couple résistant de  $C_r = 0.2\text{Nm}$ .

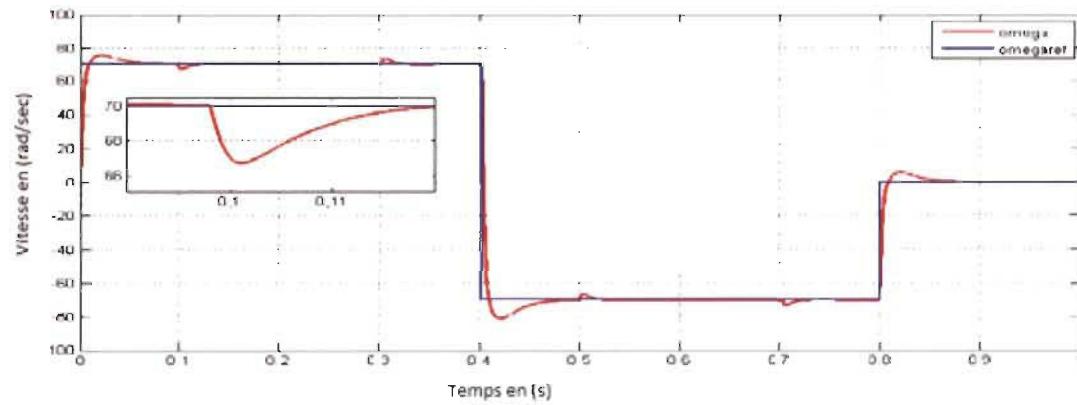


Figure 4-32 Vitesse du MSAP avec charge en fonction du temps

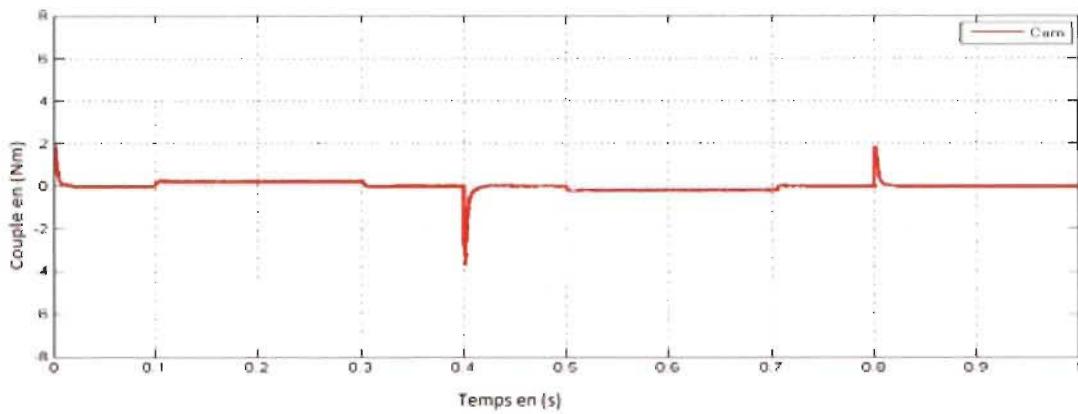


Figure 4-33: Couple électromagnétique en fonction du temps

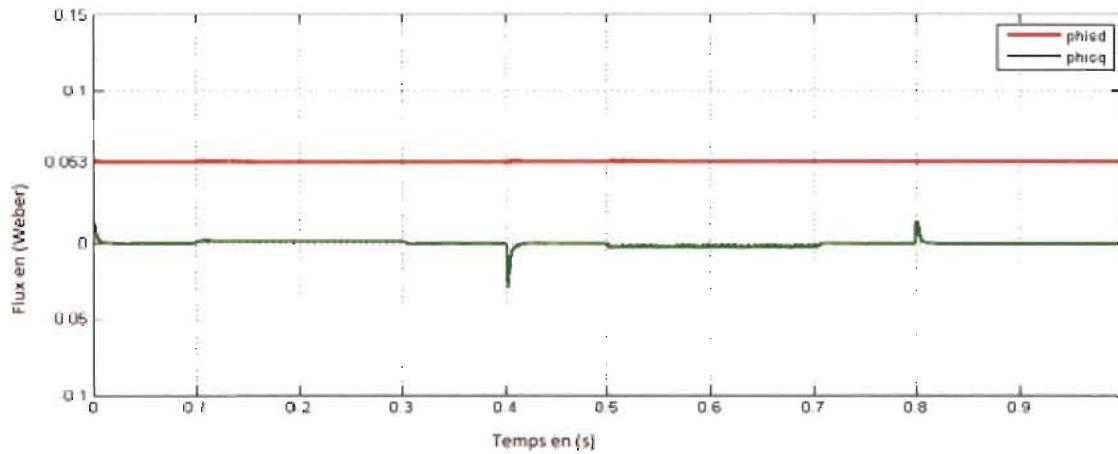


Figure 4-14: Le flux en fonction du temps

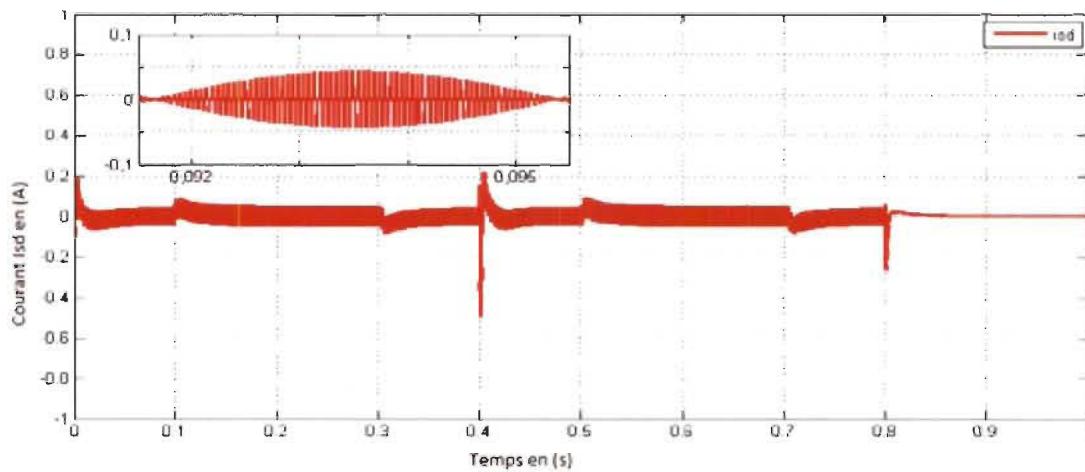


Figure 4-35: Courant statorique sur l'axe d en fonction du temps

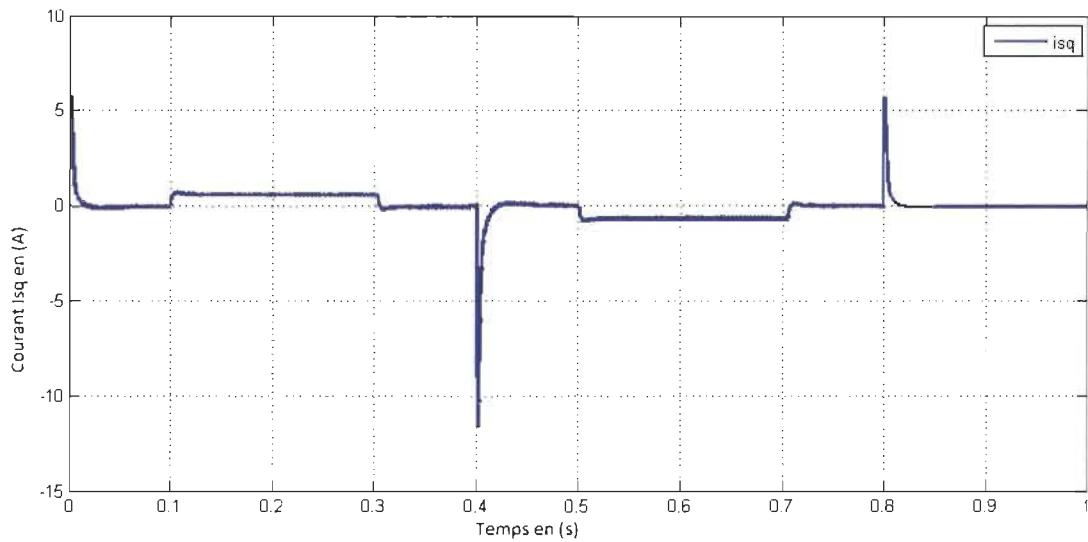


Figure 4-36: Courant statorique sur l'axe q en fonction du temps

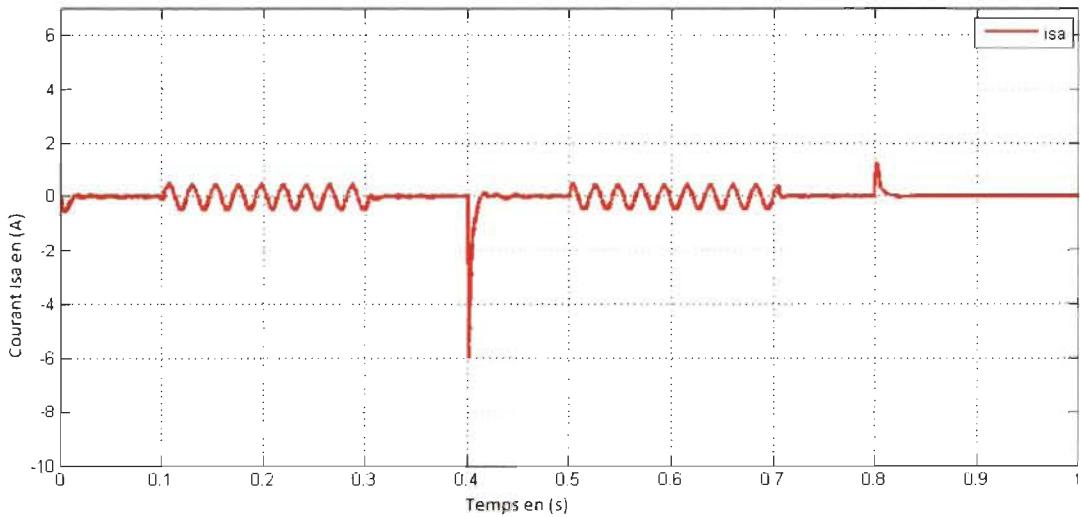


Figure 4-37: Courant statorique en fonction du temps

#### ➤ Test de la robustesse

Nous allons tester la robustesse du MSAP avec les paramètres suivants :  $\omega = 70 \text{ rad/s}$ , inversion à  $t = 0.4\text{s}$ , charge appliquée de  $C_r = 0.2\text{Nm}$  à l'instant  $t = 0.4\text{s}$ , nous varierons la résistance du stator de  $R_s$  [103]

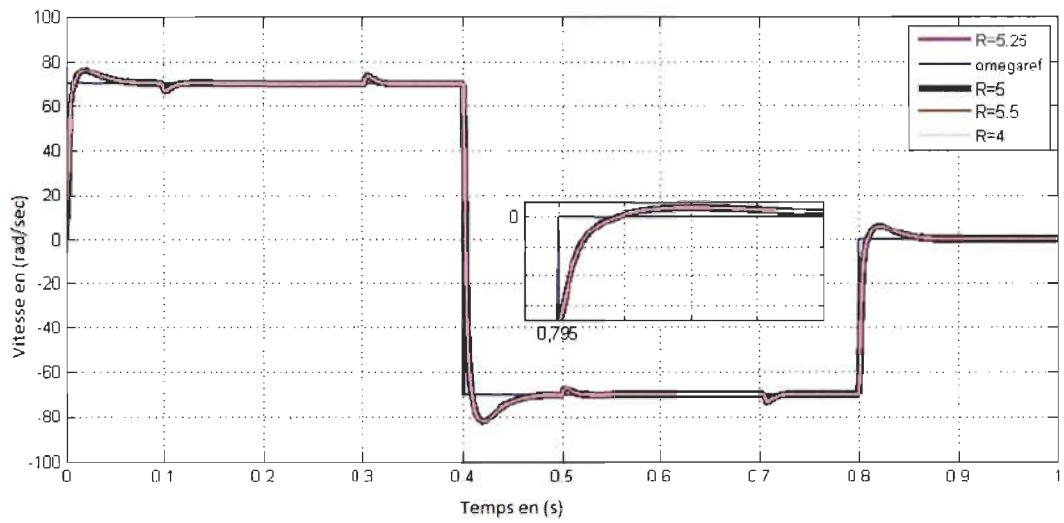


Figure 4-38: Vitesse du MSAP avec variation de  $R_s$  en fonction du temps

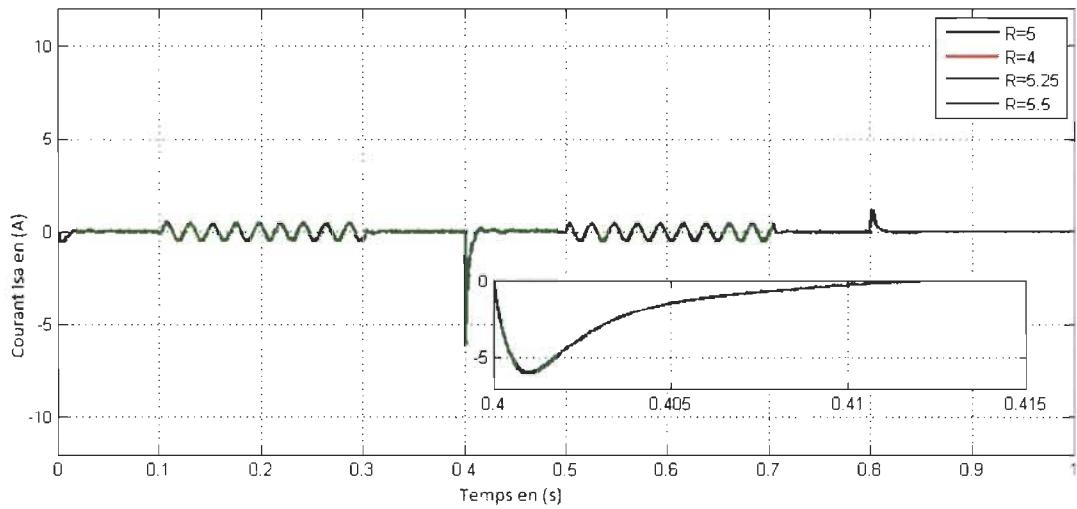


Figure 4-39: Courant statorique en fonction du temps

### Simulation du MSAP en charge

Nous allons réaliser la simulation avec les valeurs suivantes :  $C_r = 0.2 \text{ N.m}$ ,  $t = 0.5 \text{ s}$ .

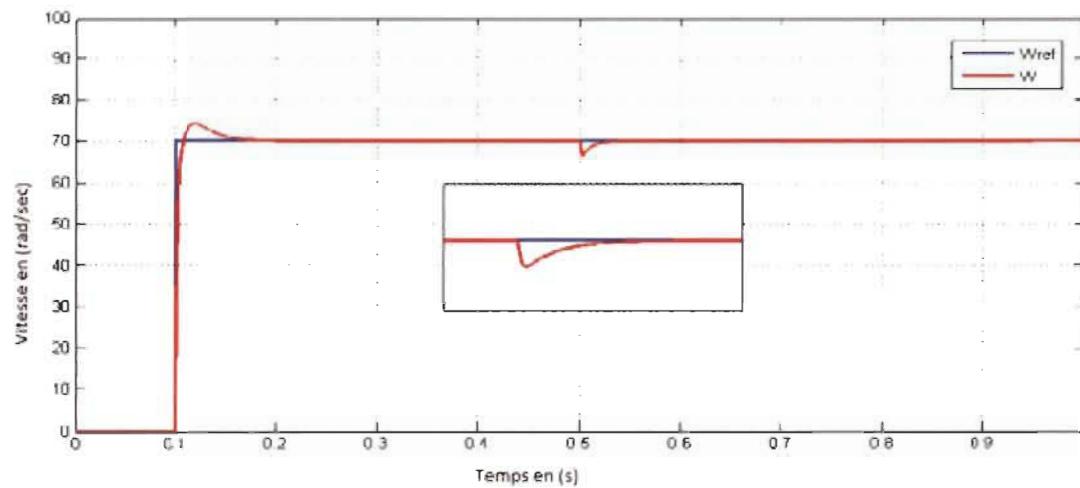


Figure 4-40: Vitesse du MSAP en charge en fonction du temps

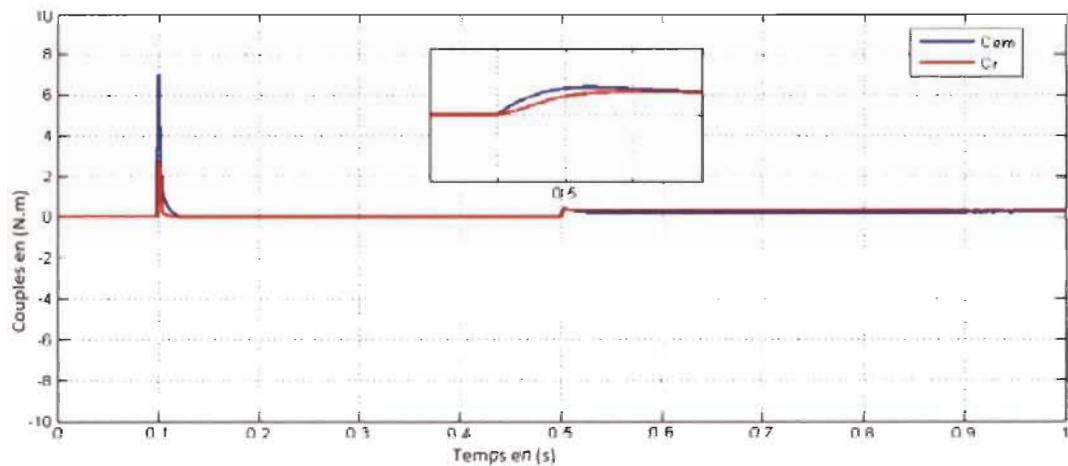


Figure 4-41: Couple électromagnétique et couple de charge en fonction du temps

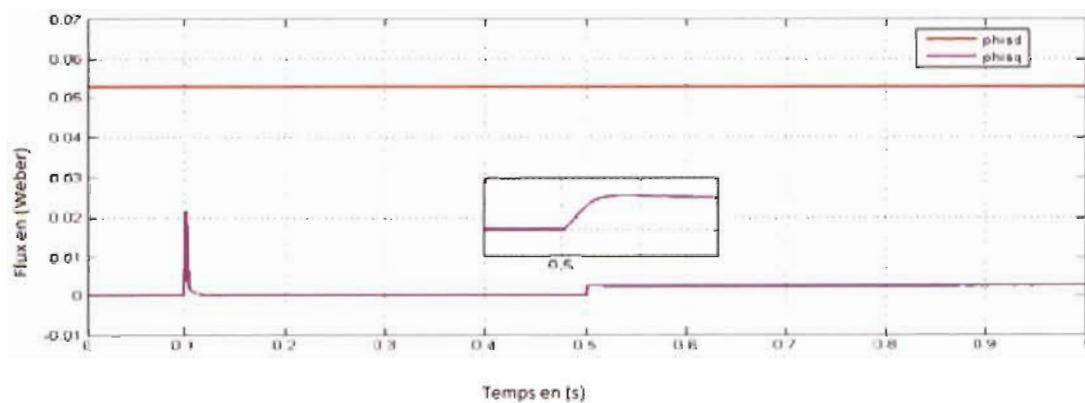


Figure 4-42: Flux du MSAP en fonction du temps

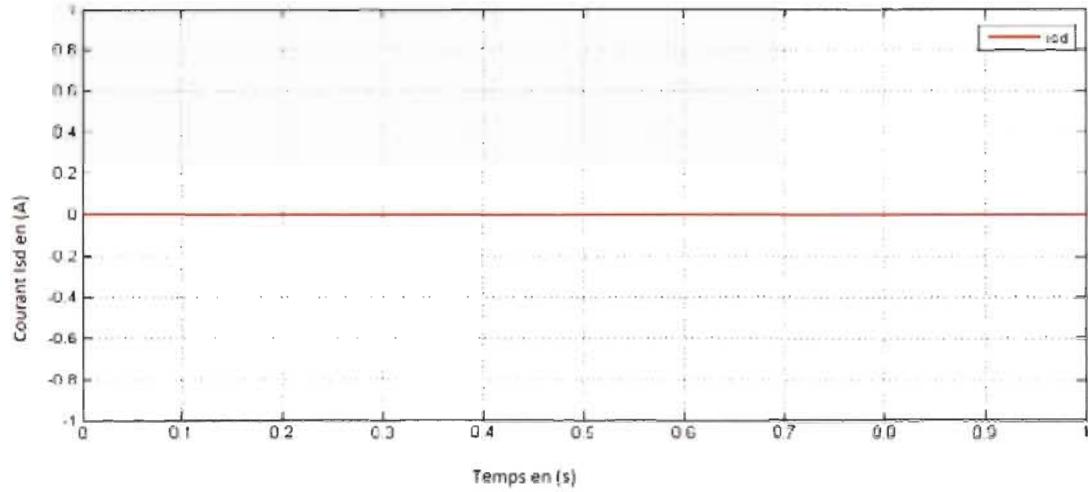


Figure 4-43: Courant du stator sur l'axe d en fonction du temps

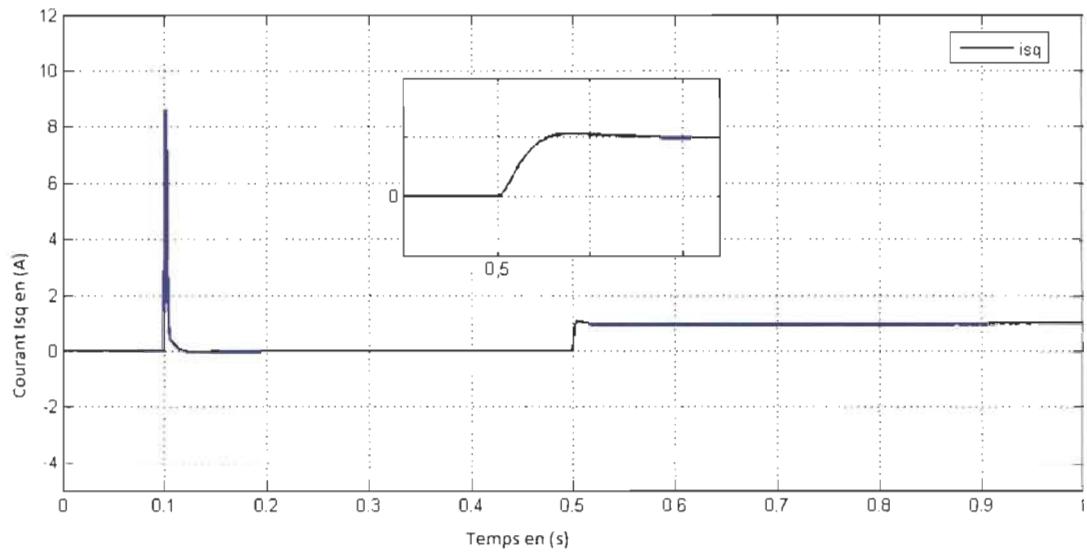


Figure 4-44: Courant du stator sur l'axe q en fonction du temps

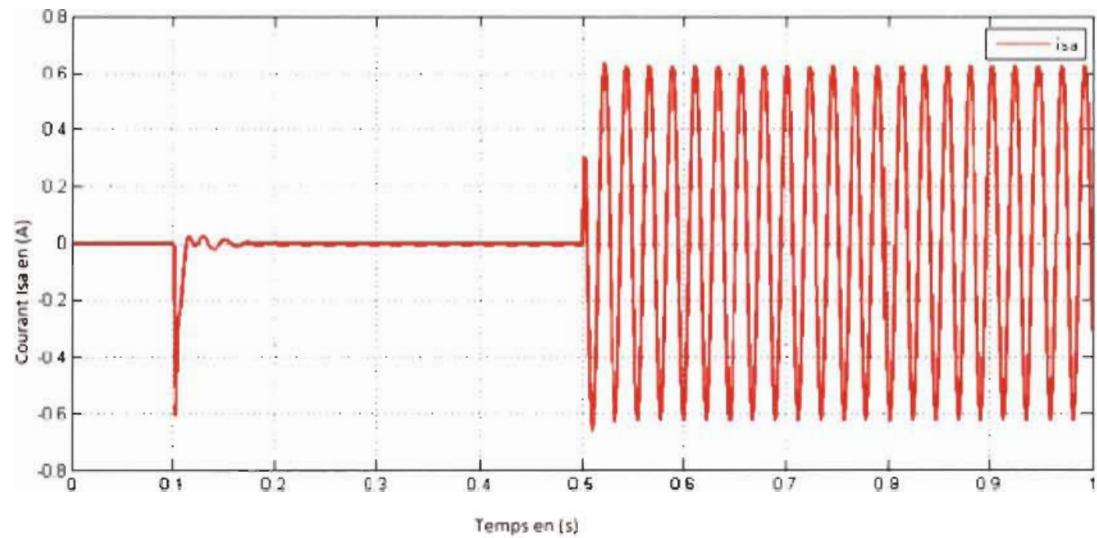


Figure 4-45: Courant statorique en fonction du temps

Réalisation de la simulation avec onduleur de tension.

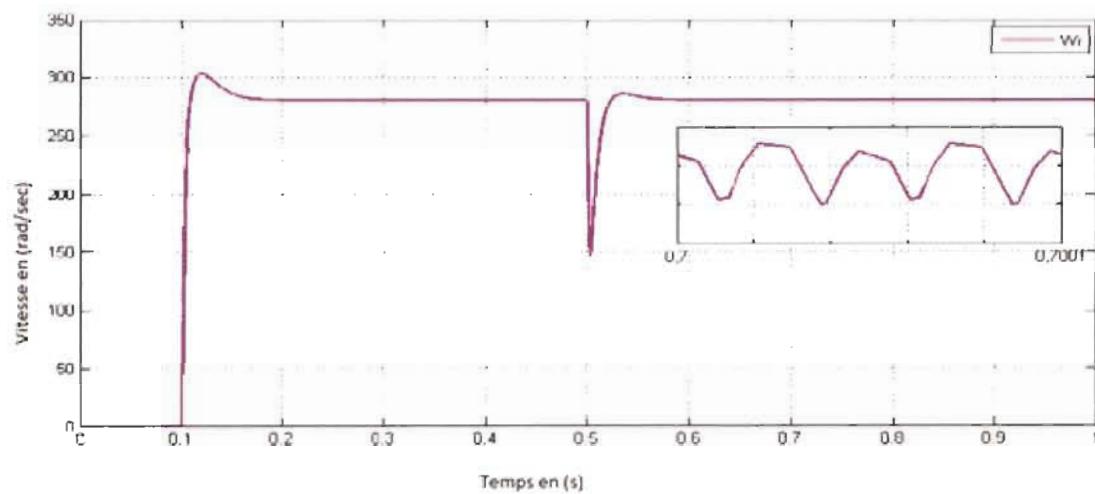


Figure 4-46: Vitesse du MSAP en fonction du temps

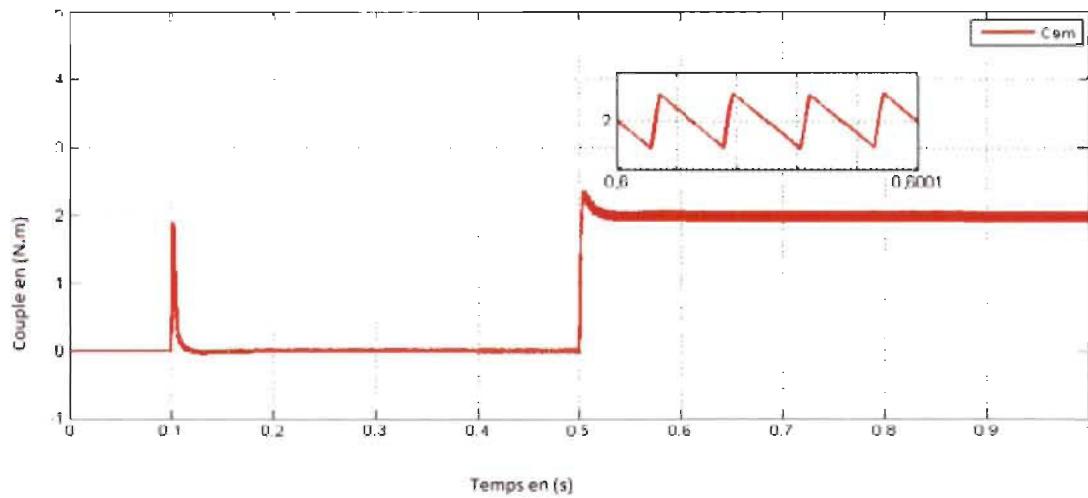


Figure 4-47: Couple électromagnétique en fonction du temps

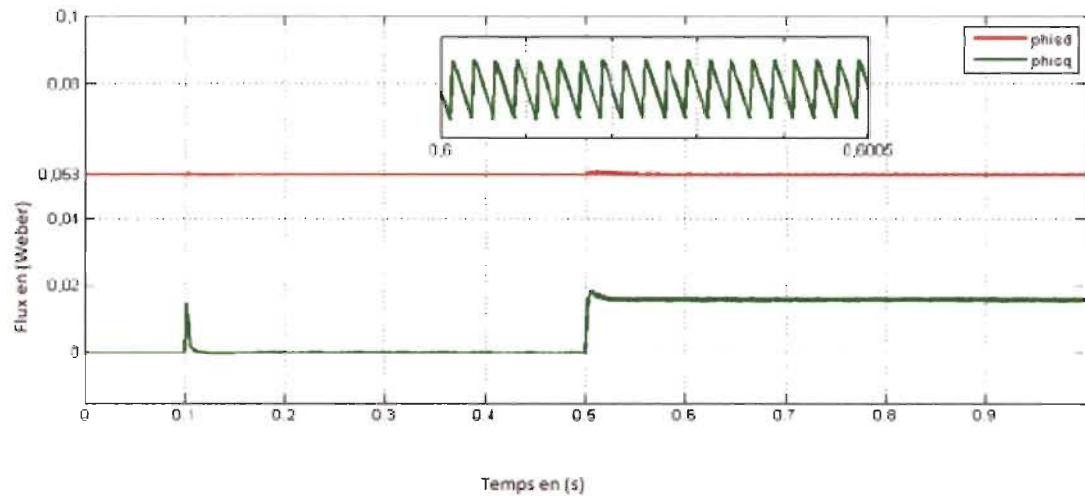


Figure 4-48: Flux du MSAP en fonction du temps

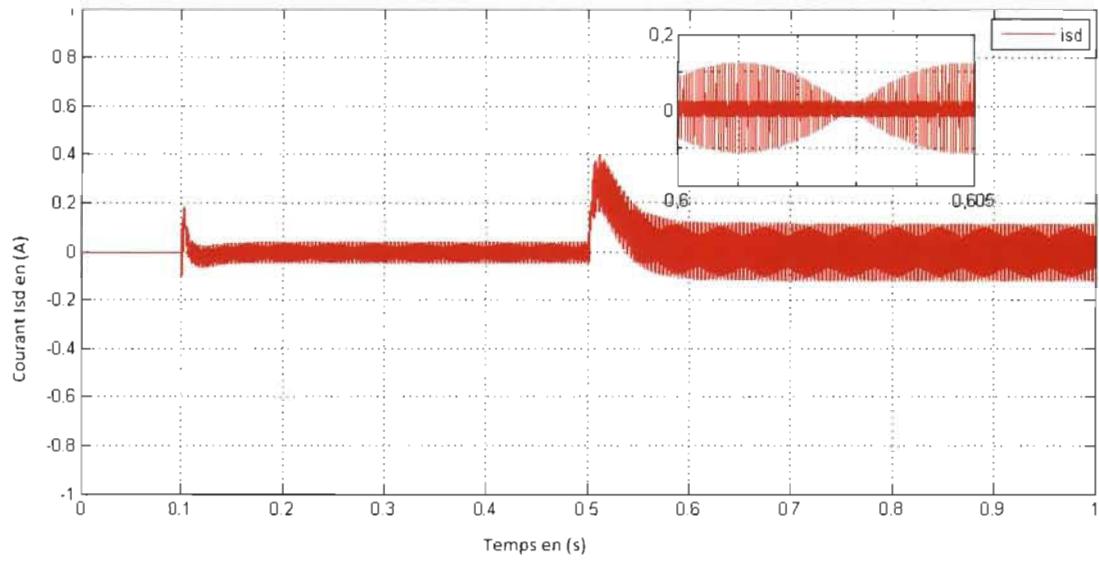


Figure 4-49: Courant statorique sur l'axe d en fonction du temps

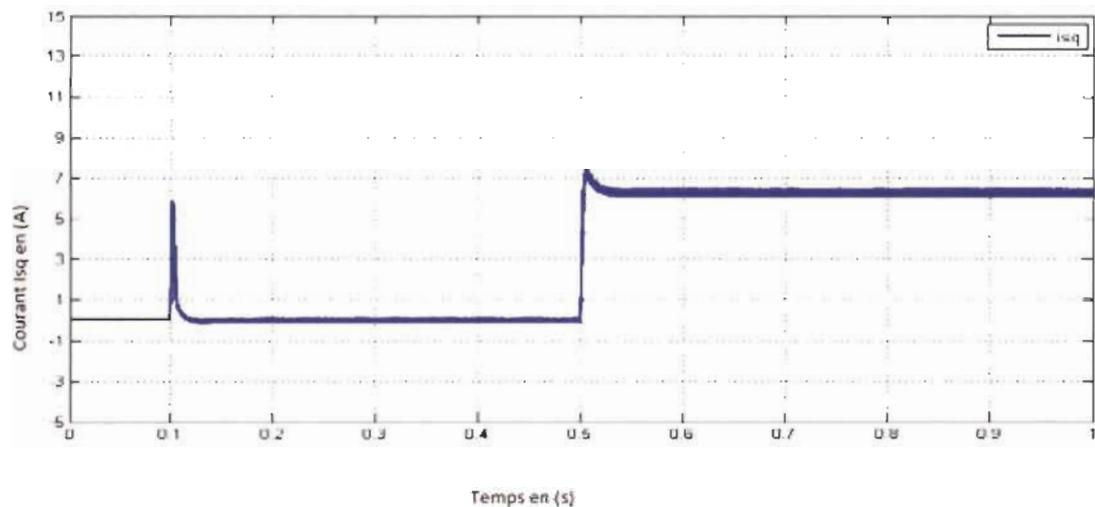


Figure 4-50: Courant du stator sur l'axe q en fonction du temps

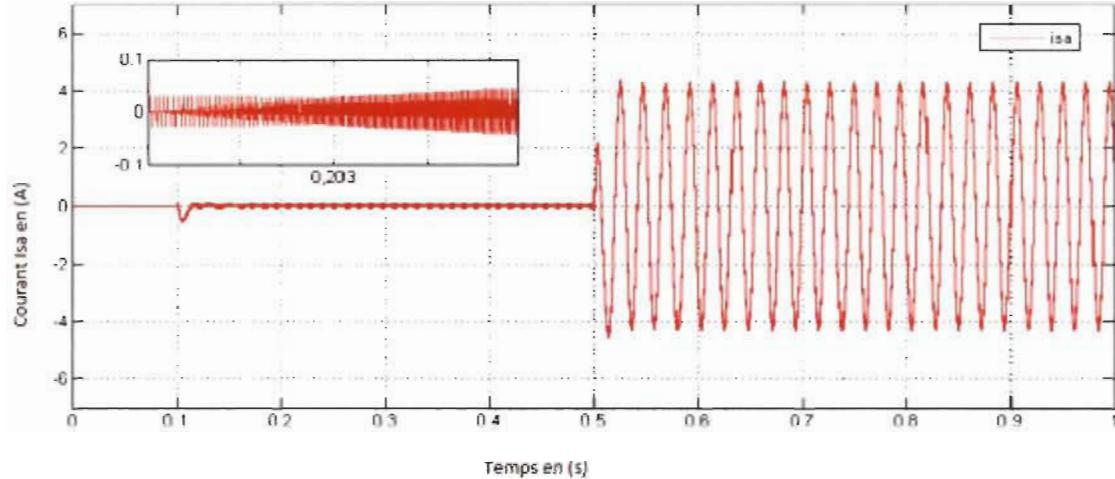


Figure 4- 51 : Courant statorique en fonction du temps

#### 4.9 Interprétation des résultats de la simulation

Nous avons effectué les tests et les simulations du MSAP commandé directement par orientation de flux rotorique. Les résultats permettent de dire que, peu importe la variation de la charge ou de la référence dans le régime permanent, le découplage s'effectue dans les bonnes conditions et est maintenu. Tous les paramètres ont subi une influence correcte de la part de l'onduleur de tension à deux niveaux utilisés dans cette simulation. La vitesse varie rapidement et réalise un léger dépassement et l'erreur statique est de valeur zéro, les perturbations sont rejetées rapidement et le temps de réponse très court.

#### 4.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la méthode de commande vectorielle d'un moteur synchrone à aimant permanent triphasé avec l'orientation de flux rotorique, cette méthode consiste à réaliser un modèle dynamique précis du MSAP et à l'aide de la transformation de Park, et l'utilisation de deux régulateurs PI pour le réglage en vitesse et en flux, choisir un référentiel adéquat et enfin faire les analyses et le pilotage du moteur synchrone à aimant permanent triphasé d'une manière identique à celle d'un moteur à courant continu, ce qui implique un découplage du flux rotorique et du couple électromagnétique. Les résultats de la simulation démontrent que la qualité et les performances en régime statique ou dynamique ont été atteintes et sont satisfaisantes.

## 5 Conclusion générale

Ce mémoire visant l'étude comparative de la chaîne de puissance des véhicules électriques à moteur asynchrone à cage et synchrone à aimant permanent a exposé les caractéristiques, l'efficacité et les performances de ces deux types de moteurs, ainsi que les stratégies de modélisations et de commande directe par orientation de flux rotorique.

Le Chapitre 1 a détaillé le plan de travail, qui débutait par une introduction générale, une problématique, les objectifs et la méthodologie de travail. Nous avons également abordé de manière brève l'histoire des véhicules électriques, les différents types de véhicules existants, les problèmes liés au stockage de l'énergie électrique dans la voiture électrique.

Le Chapitre 2 parlait en général des types de moteurs électriques existants, et en particulier du MAS et MSAP, de leurs principes de fonctionnement, constitution, du type de leurs rotors. La caractéristique couple vitesse a été aussi mentionnée. Les domaines d'applications, les avantages et inconvénients sont aussi les points qui ont fait l'objet d'une énumération. Les différentes classes du moteur asynchrone à cage ont aussi été évoquée, la modélisation du moteur asynchrone à cage et du moteur synchrone à aimant permanent, la représentation du modèle dynamique MAS dans un repère triphasé en suite dans un repère diphasé, et sa transformation de Park aussi. Nous avons également réalisé la transformation de Park du MSAP, et sa représentation dans le repère triphasé et diphasé par la suite.

Le Chapitre 3 a fait l'objet d'une comparaison proprement dite, nous avons comparé les deux types de moteurs de la manière suivante : premièrement, nous avons tout d'abord fait une analyse paramétrique dans laquelle, les caractéristiques du MAS à cage et du MSAP ont été listées et comparer. En suite les domaines dans lesquels on retrouve ces types de moteurs, en dehors du domaine de l'automobile. Nous les avons comparés aussi sur la base des résultats des expériences menées sur ces moteurs, comme dans le cas d'un compresseur, ils ont été utilisés dans cet exemple comme un moteur compresseur. Deuxièmement nous avons procédé à une évaluation d'efficacité qui nous a permis d'apprécier l'efficacité et les performances des moteurs concernés et d'en tirer les conclusions du point de vue scientifique et économique.

Le Chapitre 4 nous a permis de modéliser le moteur synchrone à aimant permanent, notre choix s'est porté sur ce moteur en raison du fait que son modèle est fortement non linéaire et cela rend la tâche plus compliquée à résoudre. La méthode de commande par orientation de flux rotorique a été réalisée dans un environnement de Matlab/Simulink, après que nous ayons déjà modéliser le moteur synchrone à aimant permanent en appliquant la transformation de Park. Les résultats de la simulation ont été interprétés et discuter selon une approche scientifique, la notion de couplage et de découplage de flux a également été mentionné. Nous avons pu voir que cette méthode est très efficace et permet de modéliser les systèmes, qui sont extrêmement non linéaire. Nous avons pu analyser et observer les performances du moteur synchrone à aimant permanent.

## Perspectives

D'après notre conclusion sur cette étude comparative, présentant le moteur synchrone à aimant permanent comme vainqueur de ce duel, il en résulte qu'il détienne des inconvénients tels que le problème de terre rare, d'où il est vraiment impératif de nous tourner vers le moteur synchrone à aimant permanent mais à concentration de flux (SynRM), afin de pouvoir remédier à ce problème de terre rare. Ce type de moteur présente les qualités meilleures que celles des autres moteurs qui ont été étudier dans le cadre de ce travail.

## RÉFÉRENCES

- [1] Hannu Kärkkäinen; Lassi Aamiovuori; Markku Niemela; Juha Pyrhönen; Jere Kolehmainen, IECON 2017 43<sup>rd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, date of Conference 29 Oct – 01Nov 2017, INSPEC Accession Number 17431946, Conference Location Beijing China.
- [2] Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code), Ed. 1, IEC 60034-30-1, March 2014.
- [3] Commission Regulation (EC) No 640/2009 of 22 July 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to eco-design requirements for electric motor). Off. Jour. of the EU, L 191, pp. 26–34, 23 July 2009.
- [4] AVERA France, Histoire du véhicule électrique:  
[http://www.averre-france.org/Site/Article/?article\\_id=5871&from\\_espace\\_adherent=0](http://www.averre-france.org/Site/Article/?article_id=5871&from_espace_adherent=0)
- [5] Florin Nicolae Jurca ; Mircea Ruba ; Claudia Martis , 2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), 2015, pages 172-176, IEEE Conference
- [6] Nicolas Denis, Thèse de Doctorat en génie électrique de l'Université de Sherbrooke, Mai 2014, Thème : Système de gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride rechargeable.
- [7] Clément Dépature, Thèse de Doctorat en génie électrique de l'Université du Québec à Trois-Rivières et l'Université de Lille 1, Thème : Commandes par inversion d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs, Avril 2017.
- [8] Auteur: Johnson Matthey, site : <https://www.technology.matthey.com/article/54/1/44-50/>
- [9] M. Zeraouila, M.E.H. Benbouzid, and D. Diallo. "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study"Vehicle Power and Propulsion. 200S IEEE Conference. Volume. Issue.7-9 Sept. 200S. pp. 8 -1 S.
- [10] O. Dobzhanskyi, E. Amiri, and Rupert Gouws. " Comparison Analysis of Electric Motors with Two Degrees of Mechanical Freedom: PM Synchronous Motor vs Induction Motor 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF) Year: 2016 pp. 14-17.
- [11] Center Blog, document disponible sur: <http://voiture-electrique.centerblog.net>
- [12] Normand Lebreux, UQTR, Mémoire de Maîtrise en génie électrique, Thème: Système de propulsion pour les véhicules de proximité utilisant un moteur à induction, décembre 2002.
- [13] <http://lapileacombustible.e-monsite.com/pages/les-limites.html>
- [14] Nasser Hashemnia ; Behzad Asaei "Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles 2008 18th International Conference on Electrical Machines Year: 2008 Page s: 1 – 5.

- [15] Khaled Itani, Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, préparée à l'école normal supérieure de Cachan, Génie électrique, Thème : Récupération d'énergie pour système intégré moteur roue, application au véhicule électrique, 10 Juillet 2017.
- [16] <http://lapileacombustible.e-monsite.com/pages/les-limites.html>
- [17] J. J. Lopez Cascales, M. C. Juan-Segovia, J. Ibanez Molina, J. Sanchez Vera, and P. M. Vivo Vivo, "Environmental impact associated with the substitution of internal combustion vehicles by fuel cell vehicles refueled by hydrogen generated by electrolysis using the power grid. An estimation focused on the Autonomous Region of Murcia (Spain)", *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 79-85, May. 2015.
- [18] Khaled Itani, Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, préparée à l'École normale supérieure de Cachan, Génie électrique, Thème : Récupération d'énergie pour système intégré moteur roue, application au véhicule électrique, 10 Juillet 2017.
- [19] <http://www.romanschmitz.com/VE.pdf>
- [20] <http://news.hybridlife.org/renault-commercialisera-sa-premiere-voiture-hybride-diesel-debut-2017-toujours-low-cost>
- [21] Boudjema Abde Raouf, Université Mohamed Khider Biskra, Mémoire de Maîtrise en génie électrique, Thème : Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP, Année 2013/2014.
- [22] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/automobilc-sont-defauts-voiture-electrique-1039/>
- [23] M. L. Doumbia, Outil d'aide à la conception des systèmes d'entraînement de machines électriques : Exemple d'application", International Symposium on Industrial Electronics, Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2000
- [24] <http://news.hybridlife.org/renault-commercialisera-sa-premiere-voiture-hybride-diesel-debut-2017-toujours-low-cost>
- [25] C. C. Chan, and K. T. Chau, " An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles," IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 44, No.1, pp.3-13, février 1997.
- [26] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/automobile-sont-defauts-voiture-electrique-1039/>
- [27] Circuits et machines électriques, réalisé par Paul Bouchard et Guy Olivier, Éditions de l'École polytechnique de Montréal. ISBN 2-553-00428-1
- [28] Electrotechnique Quatrième Édition, réalisé par Théodore Wildi et Gilbert Sybille, ISBN : 2-76378185-3.
- [29] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/automobile-sont-defauts-voiture-electrique-1039/>
- [30] Normand Lebreux, UQTR, Mémoire de Maîtrise en génie électrique, Thème: Système de propulsion pour les véhicules de proximité utilisant un moteur à induction, décembre 2002.
- [31] Normand Lebreux, UQTR, Mémoire de Maîtrise en génie électrique, Thème: Système de propulsion pour les véhicules de proximité utilisant un moteur à induction, décembre 2002.

- [32] Mr. Khaled Itani, Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, préparée à l'école normal supérieure de Cachan, Génie Électrique, Thème : Récupération d'énergie pour système intégré moteur roue, application au véhicule électrique, 10 Juillet 2017.
- [33] <http://lapileacombustible.e-monsite.com/pages/les-limites.html>
- [34] J. J. Lopez Cascales, M. C. Juan-Segovia, J. Ibanez Molina, J. Sanchez Vera, and P. M. Vivo Vivo, "Environmental impact associated with the substitution of internal combustion vehicles by fuel cell vehicles refueled by hydrogen generated by electrolysis using the power grid. An estimation focused on the Autonomous Region of Murcia (Spain)", *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 79-85, May, 2015.
- [35] Mr. Khaled Itani, Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, préparée à l'école normal supérieure de Cachan, Génie Électrique, Thème : Récupération d'énergie pour système intégré moteur roue, application au véhicule électrique, 10 Juillet 2017.
- [36] <http://www.romanschmitz.com/VE.pdf>
- [37] Zaiem Mohamed Elbekir et Naami Hibât Alrahmen, Mémoire de Master en Génie électrique de l'Université de Kasdi Merbah Ouargla, Thème : Commande vectorielle par orientation de flux rotorique et commande directe par couple classique de la MAS. Année 2015/2016
- [38] Tarek Hallah, Mohamed Faouzi Mimouni, Faouzi Msahli, "Commande vectorielle d'un moteur asynchrone par orientation de flux rotorique," *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, Vol. 44, No.1, pp.3-13, Fevrier 1997.
- [39] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/automobile-sont-defauts-voiture-electrique-1039/>
- [40] Normand Lebreux, UQTR, Mémoire de Maîtrise en génie électrique, Thème: Système de propulsion pour les véhicules de proximité utilisant un moteur à induction, décembre 2002.
- [41] <http://news.hybridlife.org/renault-commercialisera-sa-premiere-voiture-hybride-diesel-debut-2017-toujours-low-cost>
- [42] A. Khedher, M. F. Mimouni, N. Derbel, A. Masmoudi, « Analyse des effets de la constante rotorique sur le comportement d'un moteur à induction sous contrôle vectoriel », 21ème JTEA, Sousse Tunisie 2002.
- [43] B. de Fornel, « Alimentations des machines asynchrones », Techniques de l'ingénieur D3620, D3621-Juin 1990.
- [44] A. Khedher, M. F. Mimouni, N. Derbel, A. Masmoudi, « Analyse des effets de la constante rotorique sur le comportement d'un moteur à induction sous contrôle vectoriel », 21ème JTEA, Sousse Tunisie 2002.
- [45] C. C. Chan, and K. T. Chau, " An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles," *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, Vol. 44, No.1, pp.3-13, February 1997.
- [46] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/automobile-sont-defauts-voiture-electrique-1039/>

- [47] Normand Lebreux, UQTR, Mémoire de Maîtrise en génie électrique, Thème: Système de propulsion pour le véhicule de proximité utilisant un moteur à induction, décembre 2002.
- [48] Normand Lebreux, UQTR, Mémoire de Maîtrise en génie électrique, Thème: Système de propulsion pour le véhicule de proximité utilisant un moteur à induction, décembre 2002.
- [50] Mamadou Lamine Doumbia, Abdoulaye Traoré, MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE À CAGE À L'AIDE DU LOGICIEL MATLAB/SIMULINK.
- [52] <http://www.microchip.com/downloads/en/appnotes/00887a.pdf>
- [53] H.Aid, W.Aina. Synthèse De Lois de Commande Non-Linéaires Pour Un Entrainement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents, Mémoire de Master, Université abou bekra belkaid, Tlemcen, 2013.
- [54] E.M.Amara, T.Guttioun. Commande en Vitesse de la (MSAP) Alimentée en Tension, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [55] Caron J. P. et Hautier J. P., "Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone," Collection Méthodes et Pratiques de l'Ingénieur, Paris, France, 1995.
- [56] K.Kendouci. Contribution A La Commande Sans Capteur Mécanique D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents, Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran, 2012.
- [57] M.I.Hemmami. Commande Sans Capteur De Vitesse D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents (MSAP) Par L'utilisation De La Commande Directe Du Couple Et D'un Observateur De vitesse A mode Glissant, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [58] N.CHOUG. Etude de la Robustesse Des Contrôleurs Flous d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents avec Pilotage Vectoriel, Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar- Batna, 2011.
- [59] SENHADJI Nawel et CHALABI Ammaria, Commande du Moteur synchrone à aimant permanent par Backstepping, Université Abou Bekr Belkaid Themcen, Année 2014/2015.
- [60] ZAIEM Mohamed Elbekir et NAAMI Hibât Alrahmen, Mémoire de Master en génie électrique de l'Université de KASDI MERBAH OUARGLA, Thème : Commande vectorielle par orientation de flux rotorique et commande directe par couple classique de la MAS. Année 2015/2016.
- [61] RACHID ABDESSAMED, " Modélisation et simulation des machines électrique", livre en électrotechnique, Ellipses Edition Marketing S, A, Paris 2011.
- [62] H.Aid, W.Aina. Synthèse De Lois de Commande Non-Linéaires Pour Un Entrainement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents, Mémoire de Master, Université abou bekra belkaid, Tlemcen, 2013.
- [63] M.Behloul.Commande Directe du Couple par Mode Glissants(DTC-SMC) d'un Actionneur Asynchrone Destiné pour un Bras de Robot, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2009.

- [64] M.D. Bidart. Commande Coopérative Des Systèmes Monoconvertisseurs Multimachines Syncrhones, Thèse de Doctorat, L’Institut national polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2011.
- [65] B. BOUKAIS. Contribution à la Modélisation ses Systèmes Couplés Machines Convertisseurs : Application aux Machines à Aimants Permanents (BDCM-PMSM), Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [66] S. Song, J. Gong, W. Lin, and G. Wang, “Modeling and simulation of space vector control system for pure electric vehicle driven by permanent magnet synchronous motor”, Journal of Wuhan University of Technology, vol. 34, no.4, pp. 118-122, 2012.
- [67] B. Wang, Y. Wang, and Z. Wang, “Direct torque control of permanent magnet synchronous motordrives using space vector modulation», Electric Machines and Control, vol. 14, no. 6, pp. 45-50, 2010.
- [68] G. Wang, J. Ma, P. Yang, and M. Yan, “Dynamic modeling and simulation of starting and acceleration for electric vehicle”, Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), vol. 29, no. 6, pp. 98-102, 2009.
- [69] Y. Amara, J. Lucidarme, M. Gabsi, M. Lécrivain, A.H. Ben Ahmed & A.D. Akémakou. A new topology of hybrid synchronous machine. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 5, pages 1273\_1281, Sep./Oct. 2001.
- [70] S. M. Lukic et al., “Effects of drivetrain hybridization on fuel economy and dynamic performance of parallel hybrid electric vehicles,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 53, no. 2, pp. 385–389, Mar. 2004.
- [71] L. Eudy et al., “Overview of advanced technology transportation, 2004 Update,” Natl. Renewable Energy Lab., Golden, CO, DOE/GO- 102004-1849, Aug. 2004.
- [72] A. G. Jack et al., “A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault tolerant applications,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 4, pp. 889–895, Jul./Aug. 1996.
- [73] PMSM based on MATLAB/Simulink”, Journal of Soochow University (Engineering Science Edition), vol. 31, no. 3, pp. 63-67, 2011.A. Li, H. Deng, and L. Xu, “Fuzzy-PID-based vector control simulation”, Chinese Journal of Construction Machinery.
- [74] C. Wang, Y. Ji, H. Luan, and Z. Zhang, “Simulation of PMSM sensorless vector control system based on Matlab/Simulink”, Journal of Jilin University (Information Science Edition), vol. 27, no. 1, pp. 17-22, 2009.
- [75] SENHADJI Nawel, CHALABI Ammaria, Université Abou Bekr Belkaide Tlemcen, Mémoire de Maîtrise en génie électrique, Thème : Commande du moteur synchrone à aimants permanents par Backstepping, Année 2014/2015.
- [76] D. Yadav, S. Bansal, and M. Kumar, " Design, Development & Simulation of Fuzzy Logic Controller to Control the Speed of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System," International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), Vol.1, Issue 5, PP.101-106, Aug. 2012.

- [77] R. Pandey and S. P. Dubey, "Multilevel Inverter Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Constant Torque Angle Control," Advance in Electronic and Electric Engineering, Research India Publications, ISSN 2231-1297, Vol.3, No.5, 2013, PP. 521-530.
- [78] AID Houssem, AINA Wafaa, Université Abou Bekr belkaide Tlemcen, Mémoire de Master en génie électrique, Thème : Synthèse de la loi de commande non-linéaire pour un entraînement variable basé sur un MSAP, Année 2012/2013.
- [79] M.A. Arjona Lopez & D.C. Macdonald. A new lumped steady-state synchronous machine model derived from finite element analysis. IEEE Trans. Energy Conv., vol. 14, no. 1, pages 1-7, Mar. 1999.
- [80] A.K. Adnanes & T.M. Undeland. Optimum torque performance in PMSP drives above rated speed. In Annual meeting IEEE Ind. Appl. Soc., pages 169-175, Oct. 1991.
- [81] Y. Amara. Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation. Application au véhicule hybride. PhD thesis, Université Paris XI, l'École Normale Supérieure de Cachan – Laboratoire Electricité Signaux et Robotique, 2001.
- [82] AID Houssem, AINA Wafaa, Université Abou Bekr belkaide Tlemcen, Mémoire de Master en génie électrique, Thème : Synthèse de la loi de commande non-linéaire pour un entraînement variable basé sur un MSAP, Année 2012/2013.
- [83] Z. Rahman et al., “An investigation of electric motor drive characteristics for EV and HEV propulsion systems,” presented at the SAE Technical Paper Series, Paper # 2000-01-3062.
- [84] M.Aloui "Commande et observateur par modes glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur", Thèse de doctorat, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, 2002.
- [85] A.Ameur "Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants", Mémoire de magister, Batna, 2005.
- [86] N.M.Babak "Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, convergence, robustesse, identification "en ligne" des paramètres", Thèse de doctorat, 2001.
- [87] R.Benayache "Contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires incertains application à un système hydraulique", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, France, 2007.
- [88] L. Eudy et al., “Overview of advanced technology transportation, 2004 Update,” Natl. Renewable Energy Lab., Golden, CO, DOE/GO-102004-1849, Aug. 2004.
- [89] AID Houssem, AINA Wafaa, Université Abou Bekr Belkaide Tlemcen, Mémoire de Master en génie électrique, Thème : Synthèse de la loi de commande non-linéaire pour un entraînement variable basé sur un MSAP, Année 2012/2013.

- [90] ROBAI Toufik BANSALA Ahmed Rafiq, Université Mohamed Boudiaf M SILA, Mémoire de Master, Thème: Contribution à l'étude d'un MSAP monté sur la surface rotorique, Année 2016/2017.
- [91] Z. G. Wang, J. X. Jin « SVPWM Techniques and applications in PMSM machine control» journal of electronic science and technology of china, vol.6, pp.191-192 ,N°2, June 2008.
- [92] K. Boughrara, B. Ladghem Chikouche, R. Ibtiouen, D. Zarko, O. Touhami, «Analytical investigation of slotted air-gap surface mounted PMSM with magnet bars magnetized in shifting direction», International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 3, N. 4 July-August 2008, pp. 738-748.
- [93] MOUSSAOUI Lotfi, « Contribution A La Commande Des Machines Synchrones A Aimants Permanants, Utilisation Des Réseaux De Neurones Et De La Logique Floue», Mémoire de magister Université BADJI MOKHTAR ANNABA, Année 2007.
- [94] A. Achour- A. Zizi « Synthèse de la commande équivalente par mode glissant avec orientation du champ application pour une machine synchrone à aimants permanents » PFE –Université Farhet Abbes, Sétif 1995.
- [95] Z. G. Wang, J. X. Jin « SVPWM Techniques and applications in PMSM machine control» journal of electronic science and technology of china, vol.6, pp.191-192, N°2, June 2008.
- [96] Annane Adel « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable » Mémoire de magister –Université Badji MOKHTAR ANNABA,2009/2010.
- [97] M.S.Mahgoun. *Application De La Commande Aux Systèmes Linéaires Perturbés*, Mémoire de Magister, Université ferhat abbas-Setif (UFAS), 2012.
- [98] F.Benchabane "Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering",Mémoire de magister, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2005.
- [99] Kaushik Jash et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications [www.ijera.com](http://www.ijera.com) ISSN : 2248-9622, Vol. 3, Issue 5, Sep-Oct 2013, pp.913-917.
- [100] Zhonghui Zhang and Jiao Shu, Matlab based Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control Simulation, IEEE, 978-1-4244-5540-9/10.
- [101] M. Pradeep Kumar, S. Sirisha and M. Chandramouly, Design of Pmsm Base on DTC method with Mras, International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 1, issue 3, Sep-Oct 2013, pp. 646-653.
- [102] K K Pratap Singh, K V Bhargav and Ch. Rambabu, Sensorless Speed Control of Surface PMSM using DTC Control Based on Extended Kalman Filter, International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 3, issue 1, January-February 2013, pp. 1792-1796.
- [103] AID Houssem, AINA Wafaa, Université Abou Bekr belkaide Tlemcen, Mémoire de Master en génie électrique, Thème : Synthèse de la loi de commande non-linéaire pour un entraînement variable basé sur un MSAP, Année 2012/2013.
- [104] Auteur : JOEL Le BLANC, Vendredi le 12.06.2020 à 11h :36min, heure d'Europe. Site : <https://www.quebecscience.qc.ca/technologie/rouler-a-l-hydrogène/>

- [105] Auteur: Guillaume Dupas, le 13.12.2016 et mis à jour par l'Auteur le 01.07.2018 le Site <https://www.tecnipass.com/cours-materiels-machines-mcc.c.continu?page=3>,  
Le 17.06.2020, 22h :41min.
- [106] <http://electromecanique-faculte-tunisie.blogspot.com/2014/08/partie-2-technologie-et-fonctionnement.html>  
Le 26.06.2020, 19 :35min
- [107] <http://dbtechnology.be/terme/types-de-vehicules-hybrides/>, 12.07.2020, 19h:40min

## ANNEXE

Matlab est un Environnement de programmation graphique nous permettant de réaliser les trois fonctions principales suivantes :

- ✓ **Modéliser**
- ✓ **Simuler**
- ✓ **Analyser**

Les Systèmes dynamiques multi domaines. Son Interface principale est un outil graphique de création de block-diagrammes et un ensemble personnalisable de bibliothèque blocs.[40]

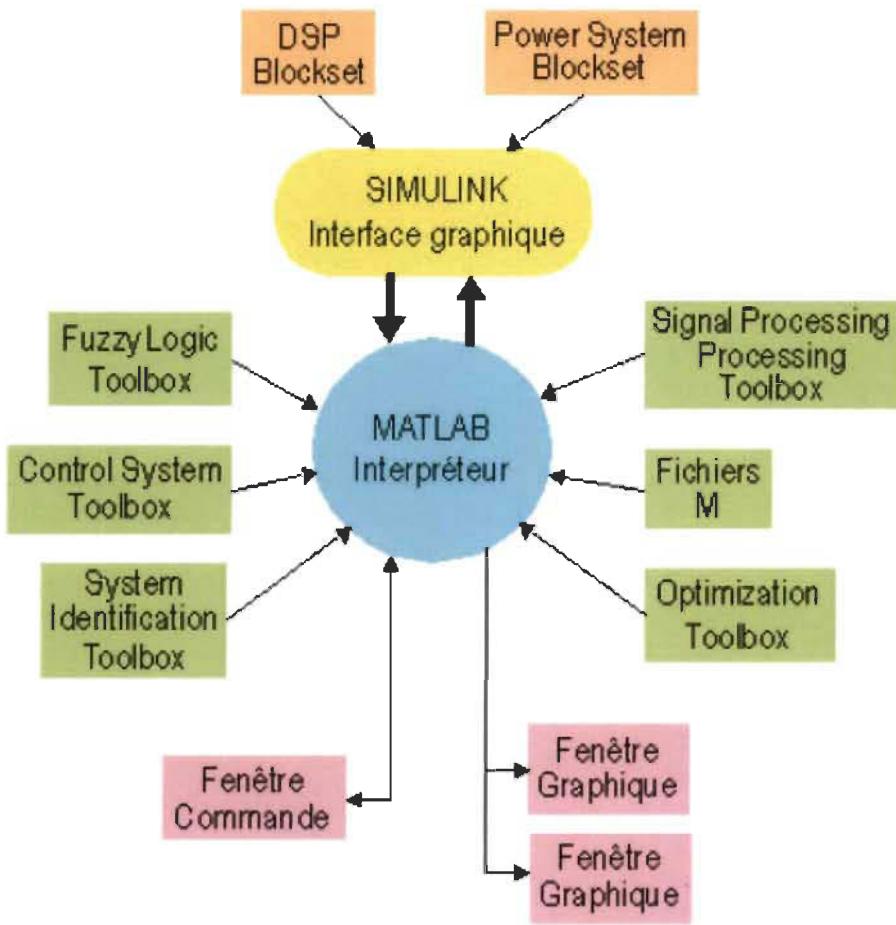


Figure 4- 22 : Environnement Matlab [41]

L'extension graphique qui nous donne la possibilité de faire les représentations des systèmes dynamiques et des fonctions mathématiques par des schéma-blocs.

Librairie	Contenu
Sources	Différents types de signaux d'entrée
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete	Blocs représentant les systèmes discrets
Math operations	Opérations mathématiques
Lookup Tables	Tables de Recherches
Discontinuities	Systèmes et opérateurs discontinus
Model-Wide Utilities	Utilitaire de l'échelle du modèle
Model verification	Vérification de modèle
Ports & Subsystems	Ports et sous-systèmes
Signal Routing	Routage du Signale

Signal Attributes	Attributs du Signale
User-Defined Functions	Fonctions définies par l'utilisateur
Logic and Bit operations	Opérations logiques et binaires
Additional Math & Discrete	Systèmes discrets additionnels en mathématique
Commonly Used Blocks	Blocs couramment utilisés

Tableau 4 - 2 : Tableau des éléments du navigateur de la Bibliothèque

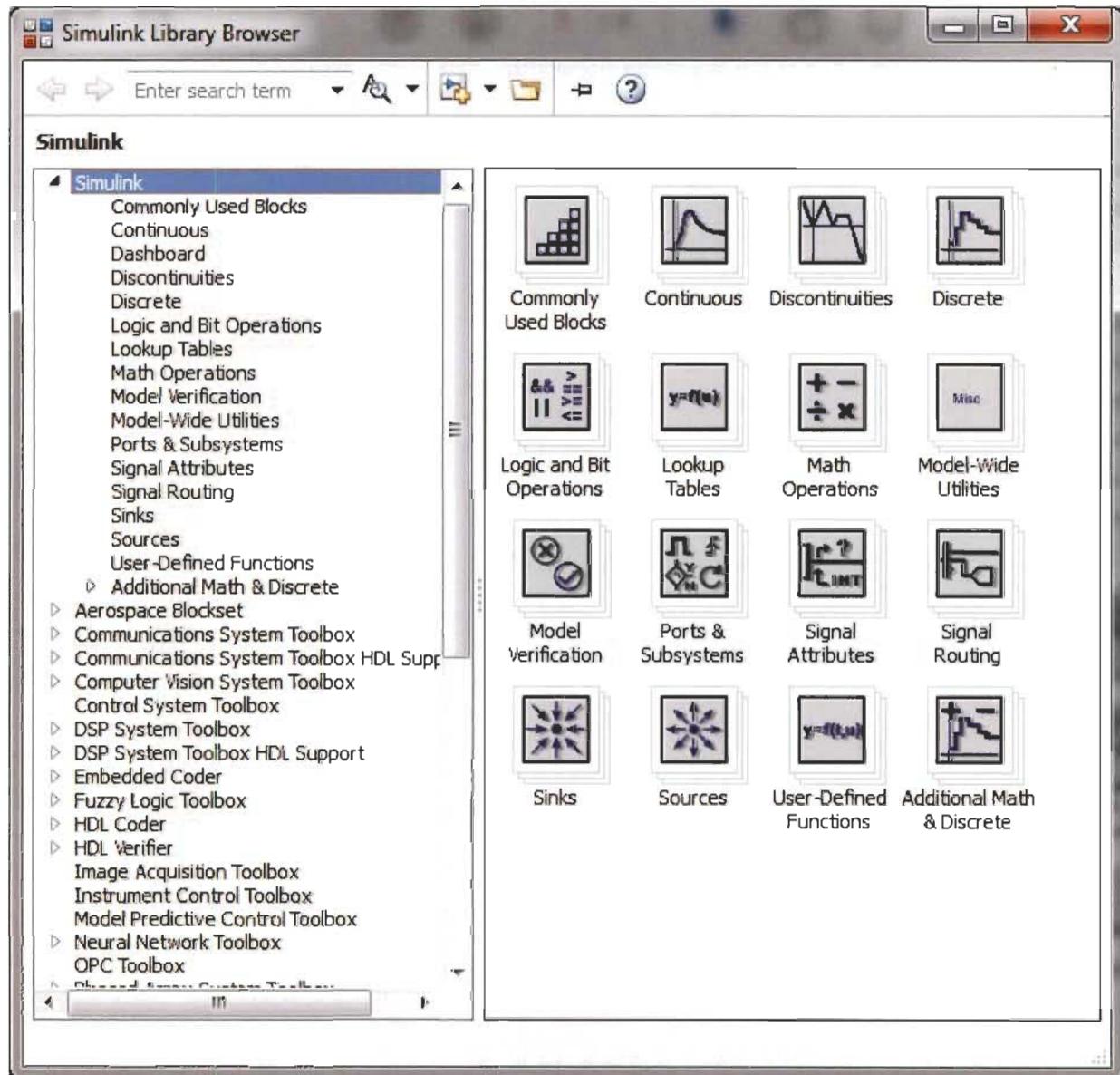


Figure 4- 13 : La Librairie de Simulink