

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

*Université A.MIRA-BEJAIA*



*Faculté de Technologie*



*Département de Génie Électrique*

## **Mémoire de fin d'étude**

*En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en Énergies Renouvelables*

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

*Thème*

**Contrôle sans capteur mécanique d'une  
génératrice asynchrone autonome dédié à la  
production d'énergie éolienne**

*Réalisé par :*

- ❖ OUGUERGOUZ Hanane
- ❖ CHELLI Rabah

*Encadré par :*

- ❖ Mr IDJDARENE Kassa

*Co-Encadré par :*

- ❖ Mr MERNACHE Hamza

*Promotion 2021/2022*

# *Remerciements*

## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.*

*Nous tenant particulièrement à exprimer toute notre gratitude et nos sincères remerciements à **Mr IDJDARENE Kassa** et **Mr MERNACHE Hamza**, pour avoir dirigé ce travail, pour leurs grandes compétences scientifiques ainsi que pour leurs conseils, leurs remarques toujours constructives.*

*Nos remerciements vont également à toute la famille universitaire pour leurs efforts afin d'assurer le bon déroulement des études au cours des dernières années.*

*Nous remercions l'ensemble de nos proches pour le soutien qu'ils nous ont apporté tout au long de nos études.*

# ***Dédicaces***

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail*

*A ceux qui ont donnés un sens à mon existence,*

*A ceux qui m'ont soutenu jour et nuit et durant tout mon parcours ;*

*A vous mes très chers parents Farida et Madjid,*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours*

### ***A mes chères sœurs***

*Anissa et son mari Zinou*

*Meriem et son mari Mostapha*

*Nardjesse et son mari Jugurtha*

*Sarah et son mari Taher*

*Les jumelles Amina et son mari Fahem*

*Et Amira.*

*Ma future femme Syla*

### ***A mes chers frères***

*Nadjim et sa femme Meriem*

*Sofiane*

*A toutes mes neveux*

***Je vous souhaite tout le bonheur du monde***

***Et que dieu vous protège***

*A ma binôme Hanane*

***Mes chères amies***

***Samir, Mounir, Saad, Didine, Ramzy, Hichem, Hanafi, Abdou.***

***Rabah***

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail*

*A ceux qui ont donnés un sens à mon existence,*

*A ceux qui m'ont soutenu jour et nuit et durant tout mon parcours ;*

*A vous mes très chers parents*

*Spécialement à toi ma chère maman qui a toujours cru en moi*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours*

### ***A mes chers frères et sœurs***

*Fahed*

*Souria et son mari Farid*

*Said*

*Samia et son mari Faouzi*

*Idir et Hemza*

*Mes belles*

*Amina, Thilleli, Thiziri, Hina et Meriem*

***Mes chères copines***

*Chahines et Nawal*

*A toi Faride mon cher ami*

***Et mes amis***

*Mounir, Aissa, Saad, Didine,*

***Mon cher binôme RABAH***

*A toute mes collègues*

*A une personne très spéciale qui m'a toujours aidée M*

*Fafa, chaima, ma tante khaira et toute la famille*

*A mes neveux Dadou et Zizou*

***Que dieu vous garde***

**HANANE**

## Symboles

$C_p$	Le coefficient de puissance
$T_r$	Couple résistant imposé à l'arbre de la machine (N.m)
$T_{em}$	Couple électromagnétique (N.m)
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$	Sont des coefficients dépendent de la turbine considérée.
$E$	Tension aux bornes de la batterie (V)
$F$	Coefficient de frottement visqueux (N.m/rad.S <sup>-1</sup> )
$g$	Le glissement
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants statorique (A)
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	Composant direct et quadrature de courant statorique dans le repère ( $\alpha$ et $\beta$ ) (A)
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	Courants rotoriques (A)
$i_{rd}, i_{rq}$	Composant direct et quadrature de courant statorique dans le repère (d et q) (A)
$i_{dc}$	Courant redressé (A)
$i_c$	Courant dans la capacité (A)
$i_R$	Courant dans la charge résistive (A)
$J$	Moment d'inertie des masses tournantes (Kg/m <sup>2</sup> )
$K_i$	Gain intégral
$K_p$	Gain proportionnel
$K_\varphi$	L'amplitude de flux
$L_s$	Inductance cyclique statorique propre (H)
$L_r$	Inductance cyclique rotorique propre (H)
$l_s$	Inductance de fuite statorique (H)
$l_r$	Inductance de fuite rotorique (H)
$M$	Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et celle du rotor (H)
$M_r$	Inductance mutuelle rotorique (H)
$M_{sr}$	Inductances mutuelles entre le stator et le rotor (H)
$M_{rs}$	Inductances mutuelles entre le rotor et le stator (H)
$M_s$	Inductance mutuelle statorique (H)
$P$	Nombre de pair de pole de la force magnétomotrice résultante
$P_t$	La puissance aérodynamique (KW)
$P_{réf}$	La puissance de référence (KW)
$R$	La résistance vue du coté continue ( $\Omega$ )
$R_p$	Rayon de la turbine
$R_s$	Résistance d'une phase statorique ( $\Omega$ )
$R_r$	Résistance d'une phase rotorique ( $\Omega$ )
$r_b$	La résistance interne de la batterie ( $\Omega$ )
$S$	La surface balayée par les pales de l'éolienne (m <sup>2</sup> )
$C$	Capacité (F)
$T_s$	Constante de temps statorique
$T_r$	Constante de temps rotorique
$T_{ech}$	La période d'échantillonnage
$t$	Temps (s)

$U_{s\alpha}$ Et $U_{s\beta}$	Les tension statorique dans le repère $\alpha$ et $\beta$ (V)
$V_v$	La vitesse du vent (Tr/min)
$V_s$	Vecteur de tension (V)
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$	Tension appliquées aux trois phases statorique (V)
$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$	Tensions rotoriques (V)
$V_{dc}$	Tension redressée (V)
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$	Composant direct et quadrature de tension statorique dans le repère ( $\alpha$ et $\beta$ ) (V)
$V_{sd}, V_{sq}$	Composant direct et quadrature de tension statorique dans le repère (d et q) (V)
$\varphi_{sréf}$	La consigne de flux $\varphi_s$ (Wb)
$\varphi_s$	Le flux statorique (Wb)
$\varphi_r$	Le flux rotorique (Wb)
$\varphi_{s\alpha}$ et $\varphi_{s\beta}$	Composant direct et quadrature de flux statorique dans le repère ( $\alpha$ et $\beta$ ) (Wb)
$\varphi_{rd}$ et $\varphi_{rq}$	Composant direct et quadrature de rotorique dans le repère (d et q) (Wb)
$\varphi_{s-nom}$	Le flux statorique de norme (Wb)
$\sigma$	Coefficient de dispersion
$\omega_s$	Pulsation statorique liée a la fréquence du stator
$\Omega$	La vitesse mécanique (rad/s)
$\Omega_s$	La vitesse de synchronisme (Tr/min)
$\Omega_r$	Vitesse rotorique (Tr/min)
$\Omega_n$	Vitesse mécanique de rotation du rotor nominal (rd/s)
$\theta$	Angle électrique entre les axes statorique et les rotorique
$\lambda$	Rapport de vitesse
$\beta$	L'angle de calage des pales ( $^\circ$ )
$\rho$	La masse volumique de l'air ( $Kg/m^3$ )
P	Matrice de Park.
$P^{-1}$	Matrice inverse de Park.



## NOTATIONS

EnR :	Energie renouvelable
VAWT :	Vertical axis Wind turbine
IGBT :	Insulated Gate Bipolar Transistore
AC :	Alternative Current
DC :	Direct Current
MLI :	Modulation par largeur d'impulsion
MAS:	Machine asynchrone
MPPT:	Maximum Power Point Tracking
PI :	Proportionnel- Intégrale
MCC :	Machine à Courant Continu
FOC :	Field Oriented Contrôle (Command à flux orienté)
DFOC :	Direct Field Oriented Contrôle (Command indirect à flux orienté)
IFOC :	Indirect Field Oriented Contrôle (Command indirect à flux orienté)
MRAS :	Modèle de référence adaptatif
MADA :	Machine asynchrone à double alimentation
MSAP :	Machine synchrone à aimants permanents

## LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Aéromoteur construis par Charle F. Brush.....	4
Figure I-2 Fonctionnement de l'éolienne SAVONIUS .....	5
Figure I-3 Les modèle Darrieus [18] .....	6
Figure I-4 Eolienne horizontale .....	6
Figure I-5 Les 3 types des éoliens. ....	7
Figure I-6 Turbine éolienne en amont et en aval [19] .....	8
Figure I-7 Turbine éolienne en amont et en aval .....	9
Figure I-8 Géométrie de profile aérodynamique [8] .....	11
Figure I-9 L'écoulement d'air dans la pale éolienne [8] .....	11
Figure I-10 Eolienne à vitesse fixe à base d'une machine asynchrone .....	12
Figure I-11 Eolienne à vitesse variable à base de MADA.....	13
Figure I-12 Eolienne à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentation. .....	16
Figure I-13 Classification électrique des machines à double alimentation [22] .....	16
Figure II-1 Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique .....	23
Figure II-2 Transformation triphasée – biphasée .....	26
Figure II-3 Schéma bloc de simulation.....	31
Figure II-4 Allure de la vitesse.....	32
Figure II-5 Couple électromagnétique.....	32
Figure II-6 Allure de courant isabc .....	33
Figure III-1 Equivalence entre commande d'une MCC et la commande vectorielle à flux orienté d'une MAS. ....	35
Figure III-2 Diagramme espace-temps avec alignement de l'axe d sur le flux rotorique. ....	36
Figure III-3 Régulateur PI et IP respectivement. ....	40
Figure III-4 Schéma de l'algorithme de commande.....	40
Figure III-5 Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté.....	41
Figure III-6 Schéma principal du MRAS. ....	43
Figure III-7 Schéma globale de la vectorielle avec le MRAS. ....	44
Figure III-8 Allure de vitesse .....	45
Figure III-9 La tension redressée .....	45
Figure III-10 Le flux rotorique.....	46
Figure III-11 Les courants <b>isdetisq</b> .....	46
Figure III-12 Le couple électromagnétique .....	47
Figure III-13 Les courants statoriques $i_{sabc}$ .....	47
Figure III-14 Les courants statoriques $i_{sabc}$ (zoomer au point 3s) .....	48
Figure III-15 Les courants statoriques $i_{sabc}$ (zoomer au point 6s).....	48
Figure III-16 Allure de vitesse .....	49
Figure III-17 Allure de la tension redressée Vdc .....	49
Figure III-18 Allure du flux rotorique .....	50

Figure III-19 Allure du couple électromagnétique.....	50
Figure III-20 Allure des courants statoriques isabc.....	51
Figure III-21 Allure des courants statoriques isabc (zoom t=3s).....	51
Figure III-22 Allure des courants statoriques (zoom t=6s).....	52
Figure III-23 Allure des courants isd et isq .....	52

***Tableau***

Tableau I:1 Catégorie des éoliennes.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
--	-------------------------------------

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I.....Etat de l'art de la conversion des énergies éoliennes	
I. Introduction .....	3
I.1 Généralité sur les énergies renouvelables.....	3
I.2 Généralité sur la conversion éolienne.....	3
I.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	4
I.3.1 Différent type de système éolien.....	5
I.4 Système aérodynamique dans une éolienne.....	10
I.5 Les modes de fonctionnement des éoliennes .....	12
I.5.1 Fonctionnement à vitesse fixe.....	12
I.5.2 Fonctionnement à vitesse variable .....	12
I.6 Machines électriques et système de conversion éolienne.....	13
I.6.1 Machine asynchrone.....	13
I.6.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	14
I.6.3 Machine asynchrone à double alimentation .....	15
I.6.4 Machine synchrone .....	17
I.7 Système éolien connecté au réseau et le fonctionnement autonome et isolé.....	17
I.7.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone auto-excité .....	18
I.7.1.2 Capacité de compensation en série .....	19
I.8 Généralité sur le capteur de vitesse dans la machine asynchrone.....	19
I.9 Conclusion .....	20
CHAPITRE II.....Etude des différentes parties de système étudié	
II. Introduction .....	21
II.1 Modélisation du vent et la turbine d'une éolienne .....	21
II.1.1 Limite de BETZ .....	21
II.1.2 Modélisation de l'arbre mécanique .....	22
II.2 Hypothèses simplificatrices .....	22
II.3 Modélisation de la machine asynchrone.....	23
II.3.1 Les équations électriques.....	23
II.3.2 Les équations magnétiques .....	24
II.3.3 Equation mécanique .....	25

II.3.4	Transformation de Park .....	25
II.3.5	Référentiel ( $\alpha - \beta$ ).....	28
II.3.6	Modélisation du convertisseur statique : .....	29
II.4	La simulation de la machine asynchrone en fonctionnement moteur .....	31
II.5	Conclusion .....	33
CHAPITRE III	.....Etude de la commande de la machine asynchrone	
III.	Introduction .....	34
III.1	Commande vectorielle à flux orienté d'une MAS .....	34
III.2	Principe de la commande vectorielle à flux orienté d'une MAS.....	34
III.3	Modèle du la MAS avec orientation du flux rotorique .....	36
III.4	Estimation de flux rotorique et de pulsation statotique .....	37
III.4.1	Estimation de pulsation statorique $\omega_s$ .....	37
III.4.2	Estimation du flux rotorique $\phi_r$ .....	38
III.5	Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté.....	38
III.6	Définition de l'algorithme de commande (Régulation ( <b>Vdc</b> )).....	39
III.7	Commande vectorielle sans capteur basée sur la méthode MRAS.....	42
III.7.1	La méthode MRAS.....	42
III.8	Résultats et interprétations .....	44
III.9	Conclusion.....	53
Conclusion Générale	.....	54

## INTRODUCTION GENERALE

La production de l'énergie électrique, l'un des grands problèmes qui préoccupe le monde ces dernières années. Les diverses pollutions affectées par les centrales thermiques (pétrole, gaz, charbon) et leurs limitations dans la nature, en outre, les déchets radioactifs aussi les risques des centrales nucléaires ont fait sonner l'alarme pour faire des recherches et trouver de nouvelles stratégies et méthodes durables et qui ne nuit pas l'environnement.

Aujourd'hui, le monde penche vers les énergies renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse,...) pour produire de l'énergie électrique. Ces énergies renouvelables représentent une solution idéale du fait qu'elles sont écologiques et inépuisables.

Parmi ces énergies, l'énergie éolienne qui connaît un lancement exceptionnel dans le domaine de la production de l'énergie électrique, grâce au développement de la technologie du côté aérodynamique, aussi, du côté de la commande des machines électriques à courant alternatif.

A savoir, l'aspect le plus visible de cette évolution, celui de l'utilisation des grandes centrales de production de masse, reliées au réseau. Un autre aspect, c'est le moins visible et ces celui qu'on va concentrer sur lui dans notre travail, les petites unités de production en fonctionnement autonome, utilisons les génératrices asynchrones à cage d'écureuil. Ces derniers, sont connus par leur simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible coût d'achat de fabrication.

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de recherche sont orientés vers l'utilisation de la technologie de commande moderne. Avec le développement des calculateurs numériques et l'électronique de puissance, ces technologies ont connu une grande évolution. Parmi ces technologies de commande, on trouve la commande vectorielle, la commande directe de couple,....

La commande vectorielle est connue parmi les simples à mettre en œuvre, elle est commandée par l'électronique et les estimateurs de vitesse, mais l'électronique et les composants reliés à la mesure de la vitesse sont très coûteux. Cette vitesse est obtenue par un capteur mécanique. Ce capteur a des inconvénients, son coût de l'installation élevé (câblage, supplémentaire, maintenance), le degré de redondance des pannes et sa fragilité, par conséquent, sa suppression et le remplacer par des estimateurs de vitesse peut améliorer la robustesse du système et fait diminuer son coût. Les chercheurs essayent de se débarrasser de ce capteur mécanique de vitesse ou de position qui fait un encombrement et sa difficulté d'adaptation et montage sur tous les types d'entraînement. On trouve actuellement dans la littérature de nombreuses méthodes de commande sans capteurs mécaniques, et nous intéressons dans ce qui suit sur la technique MRAS.

Le travail présenté dans ce mémoire et le contrôle sans capteur mécanique d'une génératrice asynchrone autonome dédié à la production d'énergie éolienne. Pour cela, on a réparti le mémoire en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, un état de l'art sera présenté, commençons par un historique sur les éoliennes après le principe de leur fonctionnement avec une présentation des types et la constitution de ces éoliennes ainsi les différents types des machines électriques et les systèmes de conversion éoliens, enfin on a parlé sur les systèmes autonomes et isolés puisque notre thème est basé sur le fonctionnement autonome.

Le second chapitre, est consacré à la modélisation des différentes parties du système étudié, au premier temps on va faire une modélisation des différentes structures de l'éolienne (vent, turbine, multiplicateur de vitesses, arbre mécanique), en outre, une modélisation de la machine asynchrone, au début, nous développons un modèle triphasé de la MAS, après le modèle biphasé basé sur la transformation de PARK. Ensuite, la modélisation des convertisseurs statiques. A la fin, on va valider le modèle en fonctionnement moteur à vide autonome avec MATLAB/SIMULINK.

Le troisième chapitre est dédié pour la commande vectorielle à flux rotorique orienté avec la méthode MRAS. On commence par un état de l'art d'une commande vectorielle classique et on présente le modèle la commande vectorielle du flux rotorique orienté, à la fin nous ajoutons la commande MRAS. En finissons par une simulation et on présente des résultats et des commentaires.

La conclusion générale est dédiée à une synthèse du travail présenté et aux perspectives envisagées.

# **CHAPITRE**

**I**



## I. Introduction

L'énergie éolienne a fait un saut en avant dans le domaine de la production de l'énergie électrique. Cela est dû, aux nouvelles technologies aérodynamiques, en outre, l'évolution des machines alternatives.

L'objectif de ce premier chapitre, est de présenter un état de l'art sur les énergies éoliennes. Ce chapitre est partagé en trois parties, dans la première partie, on va présenter l'état de l'art des énergies éoliennes, un historique sur les éoliennes et le principe de fonctionnement d'une éolienne. La deuxième partie, est consacrée pour les machines électriques et les systèmes de conversion éoliens. Et pour la troisième et dernière partie, on présentera les systèmes autonomes et isolés puisque notre thème est basé sur le fonctionnement autonome.

### I.1 Généralité sur les énergies renouvelables

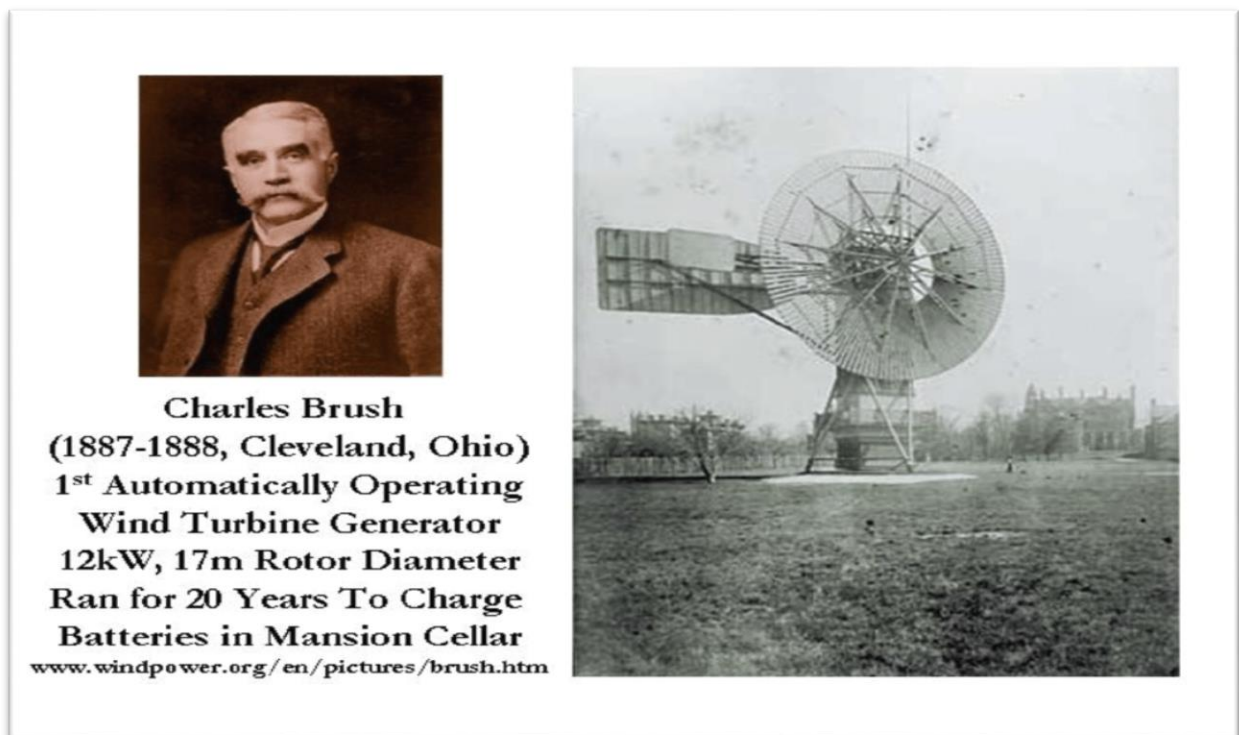
Depuis le 19e siècle le début de la révolution industrielle que l'humanité y épuise ses réserves fossiles environ un million de fois plus vite que cela nature a met pour les construire, les sources d'énergie traditionnelle combustible fossile, gaz naturel, pétrole, charbon et leur extraction génère des impacts environnementaux (réchauffement climatique) important des sérieux problèmes sociaux et économiques, la production et la consommation continue à augmenter, les pays cherchent à réduire la consommation d'énergie primaire en développant d'autres sources inépuisables sur l'échelle des temps humain pour couvrir les besoins énergétiques qui permettent aussi de diminué les émissions de gaz à effet de serre et la lutte contre les changements climatiques ainsi pour préserver la santé humaine, le monde a tourné vert de nouvelle forme d'énergie dite renouvelable ( EnR ) ou énergie verte, le faible impact environnemental de leur exploitation ont fait un élément majeur des stratégies des entreprises en matière de développement durable, l'électricité d'origine renouvelable plus écologique que les énergies non renouvelables elle émet très peu de CO<sub>2</sub>.

Il existe plusieurs types d'énergie renouvelable hydraulique, solaire, éolienne, géothermique et biomasse. Parmi les ressources d'énergie renouvelable en a la conversion de rayonnement solaire qui sert à la conversion de ce dernier en énergie électrique, directement utilisable par le système photovoltaïque ou la concentration des rayonnements pour actionner des turbines et aussi le chauffage. Aussi l'énergie éolienne la plus rentable, c'est une source renouvelable est distribuée d'une manière équitable sur notre planète, il est disponible par tout sur le globe terrestre qui est de mieux en mieux exploité [1].

### I.2 Généralité sur la conversion éolienne

La première utilisation de l'énergie éolienne remonte à 200 ans avant JC, les moulins à vent à axe horizontal, les occupants de la chine actuelle sont les premiers à avoir l'idée d'exploiter le vent comme énergie pour ce déplacé pendant plusieurs milliers d'années, le premier moulin à vent ces apparaitre en 11e siècle en Europe serve à moudre le blé est pompée l'eau ils sont constitués de quatre pales tournant autour d'un axe horizontal, jusqu'aux 19e siècle, des améliorations sont apportées progressivement au moulin à vent européen il se développe dans toute l'Europe et en particulier aux Pays-Bas et de la Méditerranée beaucoup plus tard (1300-1875 après JC, la poursuite de l'évolution et de la perfection de ces systèmes a

eu lieu aux États-Unis au 19ème siècle en 1887, l'Américain Charles Francis Brush surnommé le grand-père des éoliennes et grande adapte du vent a mis en œuvre la première éolienne entièrement automatisée pour alimenter sa maison en électricité en utilisant un système de stockage avec batterie, cette invention était géante avec 144 pâles en cèdre et de 17 mètres de haut alimente une génératrice de 12 kW était installée à Cleveland dans l'Ohio, le développement des technologies de la conversion éolienne a réellement démarré en 1920 le français George Darrieus développe un prototype d'éolienne avec un rotor à axe verticale et l'Allemand Alberte BETZ démontre scientifiquement que la totalité de l'énergie cinétique de vent n'est pas utilisable, aujourd'hui les concept d'éolienne de Darrieus et les limites de BETZ constituent la base de la conception d'éoliennes, en 1990 la première éolienne dite industrielle permettant de générer de l'électricité, dans les années suivantes ils ont mis ou point plusieurs prototypes et recherches qui finissent par constater qu'en réduisant le nombre de pôle, la vitesse de rotation de rotor augmente, permettant aussi de produire d'avantage d'électricité, il met au point les premières éoliennes conçue à partir des principes modernes de l'aérodynamique [1].



**Figure I-1** Aéromoteur construis par Charle F. Brush

### **I.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne**

L'éolienne dite aussi aérogénérateur et un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent qui est capté par les pâles afin de la transformé en énergie mécanique, à l'aide d'une génératrice synchrone ou asynchrone cette énergie ce transforme en énergie électrique injecté au réseau [2].

### I.3.1 Différent type de système éolien

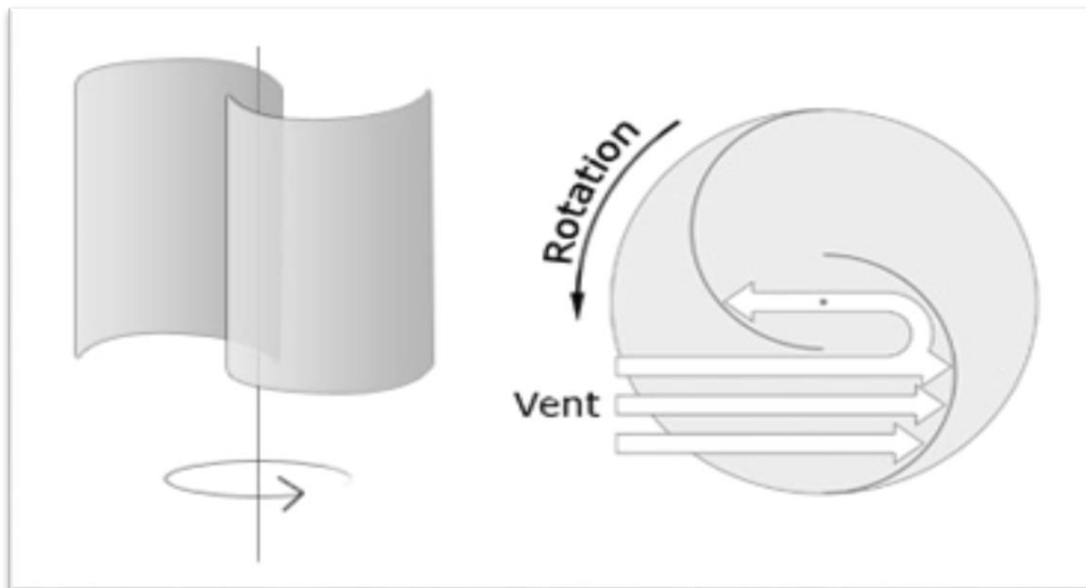
Selon la disposition géométrique et l'orientation de l'axe de rotation, on classe les éoliennes en deux grandes familles : axe vertical ou axe horizontal [3].

#### I.3.1.1 Eolienne Verticale

Contrairement à l'éolienne à axe horizontale (traditionnel moulin à vent) en a l'éolienne à axe verticale aussi nommé VAWT (vertical axis Wind turbine). Elle était la première structure développée pour produire de l'électricité. Ce type d'aérogénérateur tourne autour d'un axe qui est perpendiculaire à la direction du vent, elle utilise des pales courbées montés verticalement. Au niveau du sol en installent la génératrice et la boîte de vitesse donc facilement accessible, la turbine à axe verticale a besoin des câbles de guidage pour maintenir l'arbre du rotor dans une position fixe et pour minimiser les vibrations mécaniques [3, 5].

##### I.3.1.1.1 Savonius

Les éoliennes Savonius sont les plus simples à fabriquer, Son esthétique nous permet de l'installer sur la toiture sans oublier le fait qu'elle peut fonctionner même avec les vents faibles avec n'importe quelle direction l'inconvénient c'est que son rendement est faible, sa vitesse de rotation est lente voisine de 2 à 3 m/s [3].



**Figure I-2** Fonctionnement de l'éolienne SAVONIUS

##### I.3.1.1.2 Darrieus

Son inventeur GEORGES DARRIEUS c'est une éolienne rapide fonctionne sur le principe du l'aile portante (identique aux ailes d'avion) elle produit de l'électricité grâce à un rotor qui tourne sur une tige fixe. Il peut être de type hélicoïdal ou cylindrique.

Il existe quatre types de rotor Darrieus : rotor cylindrique, rotor tronconique, rotor parabolique, rotor à variation cyclique. Elle émet moins de bruit (silencieux). Plus performante dans les vents forts leur rendement avoisine celui des éoliennes à axe horizontale moderne [3, 6].

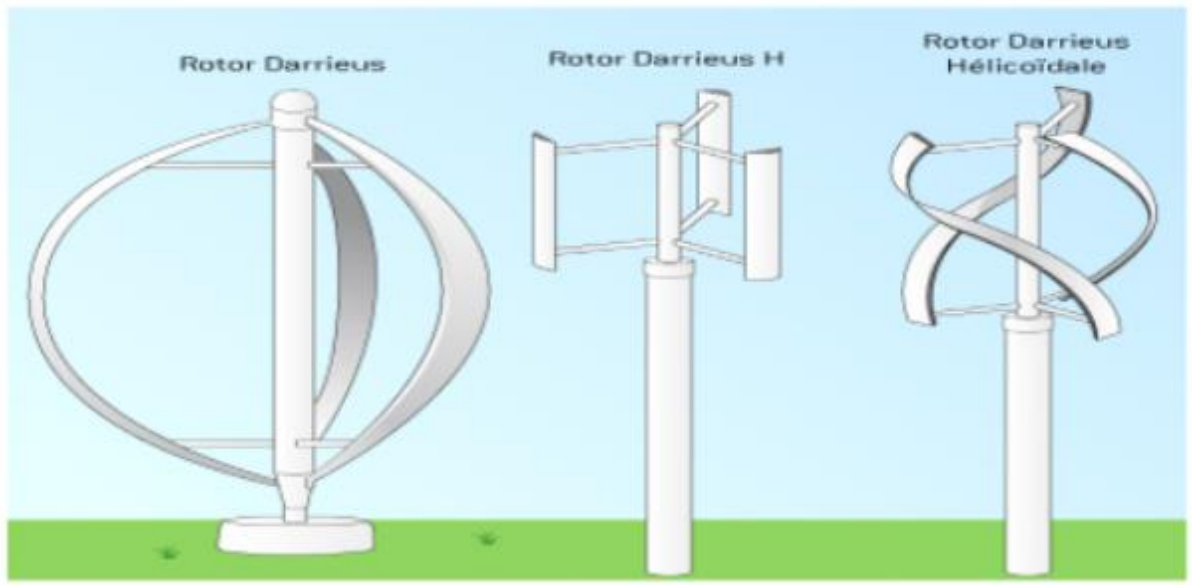


Figure I-3 Les modèle Darrieus [18]

### I.3.1.2 Éolienne Horizontale



Figure I-4 Eolienne horizontale

Les aérogénérateurs à axe horizontal, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, employé plus largement dans les fermes éoliennes à grand puissance, ce type d'éolienne a un rendement aérodynamique plus élevé, ils utilisent la force de portance du vent appliqué aux pales, démarre d'une façon autonome, elle fonction dans les vents forts par rapport aux turbines à axe vertical. Elle demeure face au vent dans l'orientation de l'axe de rotation est

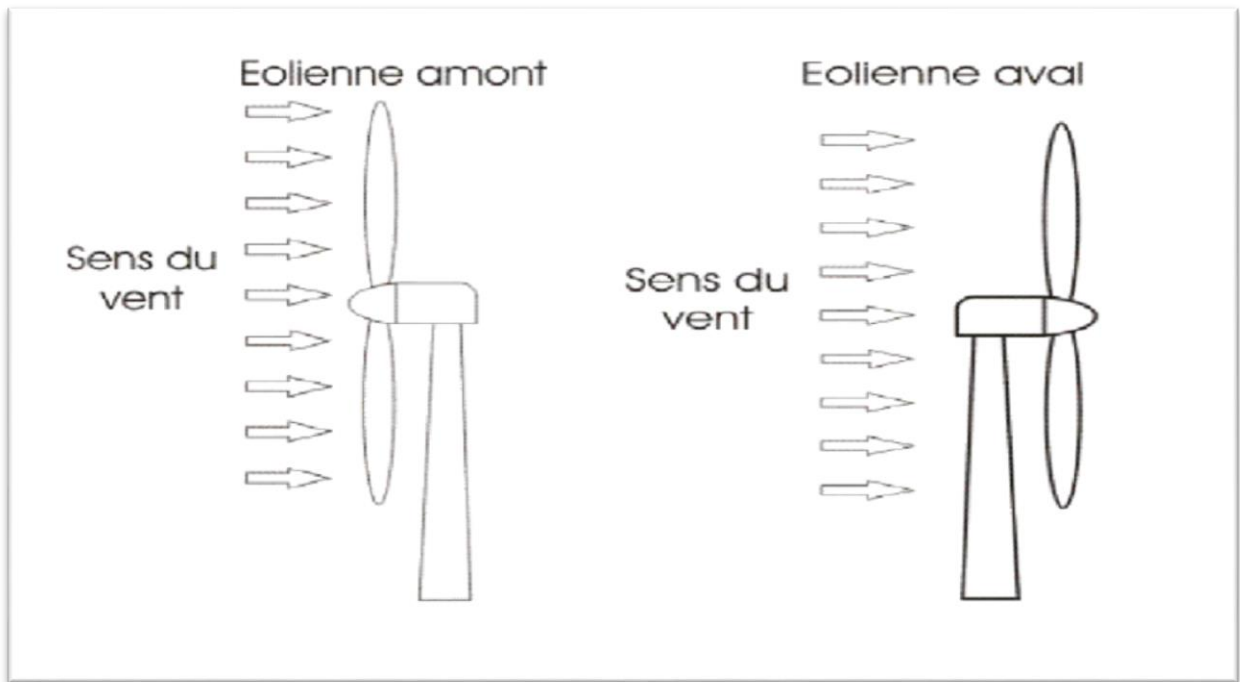
parallèle au sol, ce type d'éolienne basé sur la technique ancestrale des moulins à vent et les hélices des avions [3].

La plupart des éoliennes vendue sur le marché sont des tripales, il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût, la vitesse de rotation de capteur de vitesse, le nombre de pales repose sur le potentiel éolien de site et de fonctionnement de la machine électrique il dépend aussi de profile du vent, une éolienne à deux pales a l'avantage d'économisé le cout d'une pale et de son poids équivalent, il existe aussi les éoliennes mono-pales et multi-pales [3].



**Figure I-5** Les 3 types des éoliens.

Suivant leur orientation en fonction du vent ( orienté selon la direction du vent) les HAWT (horizontale axis wind turbine) sont dites en amont (up-wind) ou en aval (down-wind), les premières ont le rotor face au vent, le flux d'aire atteindre le rotor son obstacle, un mécanisme d'orientation et nécessaire pour maintenir en permanence le rotor en face du vent, les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor et placé dans l'autre côté de la tour ; la disposition de la turbine en amont et la plus utilisée à cause de sa simplicité et donne les meilleures résultats pour les fortes puissances sachant que les efforts de manœuvre sont moins important et donne une meilleure stabilité [3].



**Figure I-6** Turbine éolienne en amont et en aval [19]

-En distingue trois catégories des éoliennes selon leur puissance nominale :

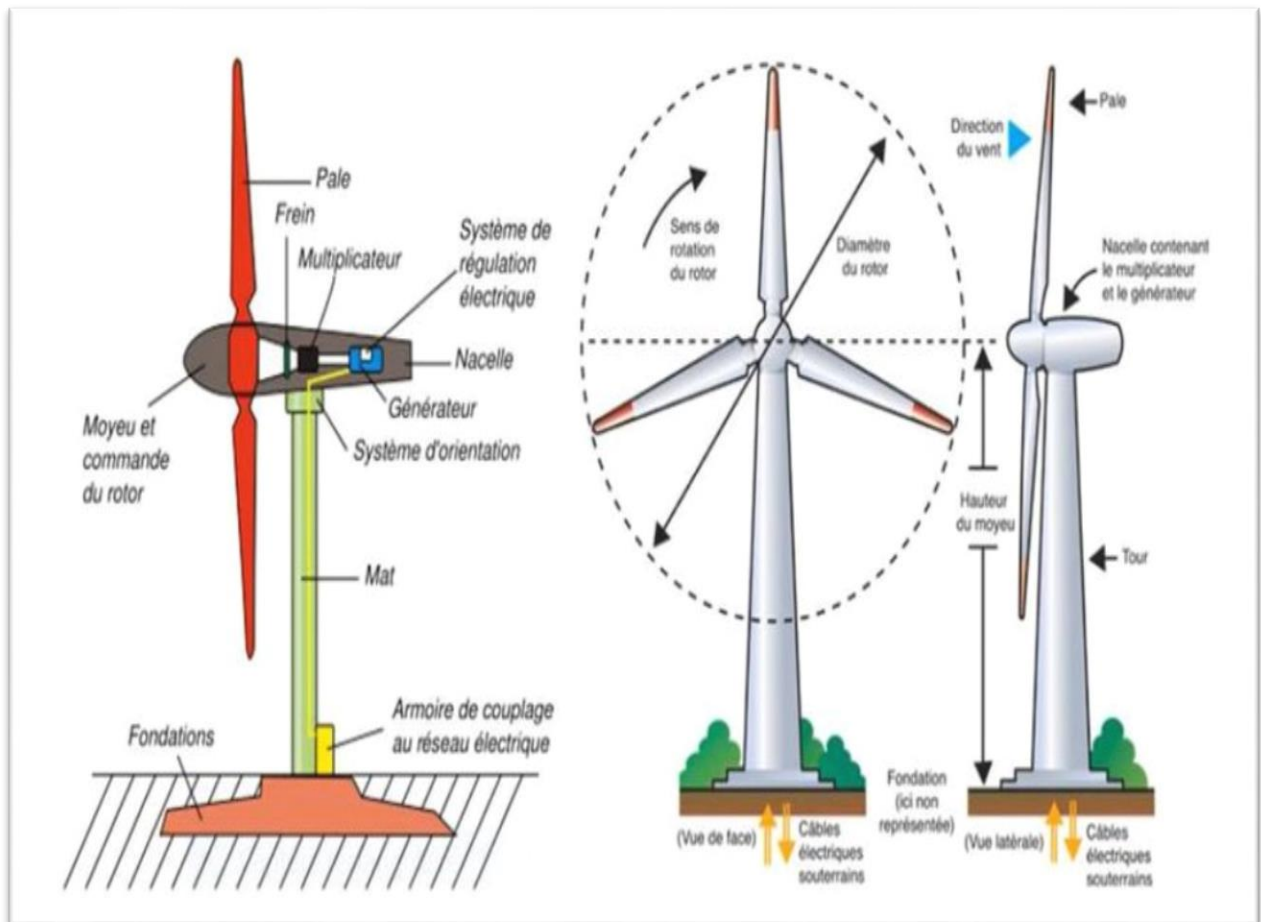
**Table I-1** Catégorie des éoliennes

<b>Echelle</b>	<b>Diamètre de l'hélice</b>	<b>Puissance délivrée</b>
<b>Petite</b>	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
<b>Moyenne</b>	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
<b>Grande</b>	46 m et plus	1 MW et plus

Le Tableau I:1 propose une classification de ses turbines selon la puissance quelle délivre et le diamètre de leur hélice [3, 7].



- **Constitution d'une éolienne a axe Horizontale**



**Figure I-7** Turbine éolienne en amont et en aval

Les principaux composants dans la conversion éolienne [1, 7, 8] :

---

**-La base ou la fondation** : souvent en béton armé elle permet de maintenir la structure globale.

---

**-La tour** : composé de mat qui élève la nacelle pour fournir un espace suffisant pour la rotation des pales afin d'atteindre des meilleures conditions pour capté le vent, de système de commande électrique et de transformateur.

---

**-Le rotor** : permet de transférer une partie de la puissance du vent à l'arbre lent de l'éolienne, constitué de plusieurs pales et un moyeu auquel sont accouplé ses pales, la puissance récupéré dépend de diamètre de rotor.

---

**-le moyeu** : il relie la pale et la machine, c'est une grosse tige métallique qui traverse la nacelle

---

**-La pale** : généralement constituée d'un mélange de fibre de verre et de matériaux composite à la fois légère et assure une rigidité et une bonne résistance. De diamètre de 40m à 120m.

---

---

**-La nacelle** : structure soutenue par le mat support les pales, le moyeu et le rotor, le frein, ainsi que les génératrices synchrones ou asynchrones et le multiplicateur.

---

**-le frein** : permet à l'éolienne de fonctionner en cas de vitesse trop importante, si la vitesse du vent supérieur à 90KM/H qui pourrait l'endommager ou la rendre incontrôlable en réduisant la vitesse de rotation de premier rotor.

---

**-le multiplicateur** : l'une des pièces maitrise, il sert a élevé la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire de la génératrice, pour cela, une boîte de vitesse élévatrice est habituellement nécessaire pour adapter les deux vitesses de rotation.

---

**-Le système d'orientation** : placé en dessous de la nacelle, il utilise un mécanisme qui maintient la turbine orientée contre le vent avec des moteurs électriques démultipliés.

---

**-système de régulation électrique** : il a pour rôle de ralentir le rotor en cas de vent fort.

---

#### I.4 Système aérodynamique dans une éolienne

La lame dispose d'un grand profilé d'aérodynamique formé de plusieurs tailles et forme de la base à la pointe, la technologie simple d'aérodynamique fait tournée la pôle de l'éolienne, cela signifie qu'une forme de poussée est créé.

La rotation de la pale dans une éolienne se base sur des concepts de l'aérodynamique, parmi ses concepts on peut citer la notion de trainée et la force de portance.

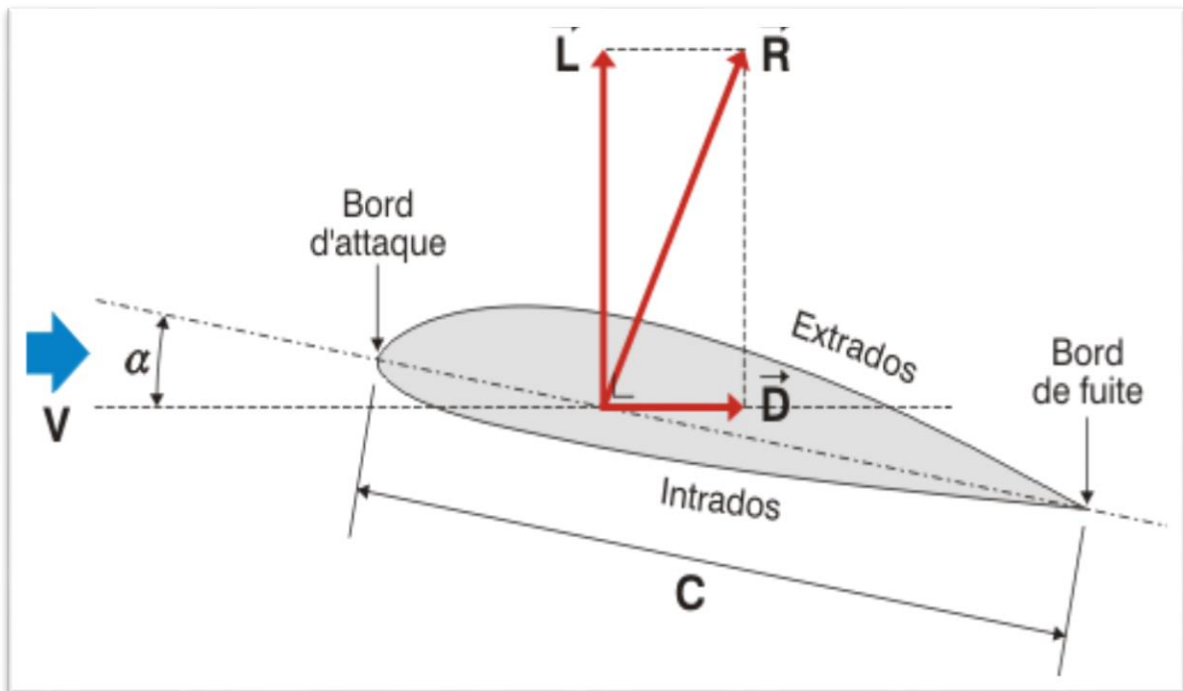
L'aile de l'éolienne a la même structure que l'aile d'un avion.

La figure suivante c'est une représentation de l'aile en trois dimensions, l'axe X : une corde, l'axe Y : une cambrure et l'axe Z : une envergure. Cette illustration est constituée d'un bord d'attaque et d'un bord de fluide les deux extrémités sont relies par une corde.

En amont la vitesse de vent lorsqu'elle frotte l'aile crée un angle avec la corde, qui s'appelle l'angle d'attaque ( $\alpha$ ), celle-ci réorganise localement l'écoulement de l'air.

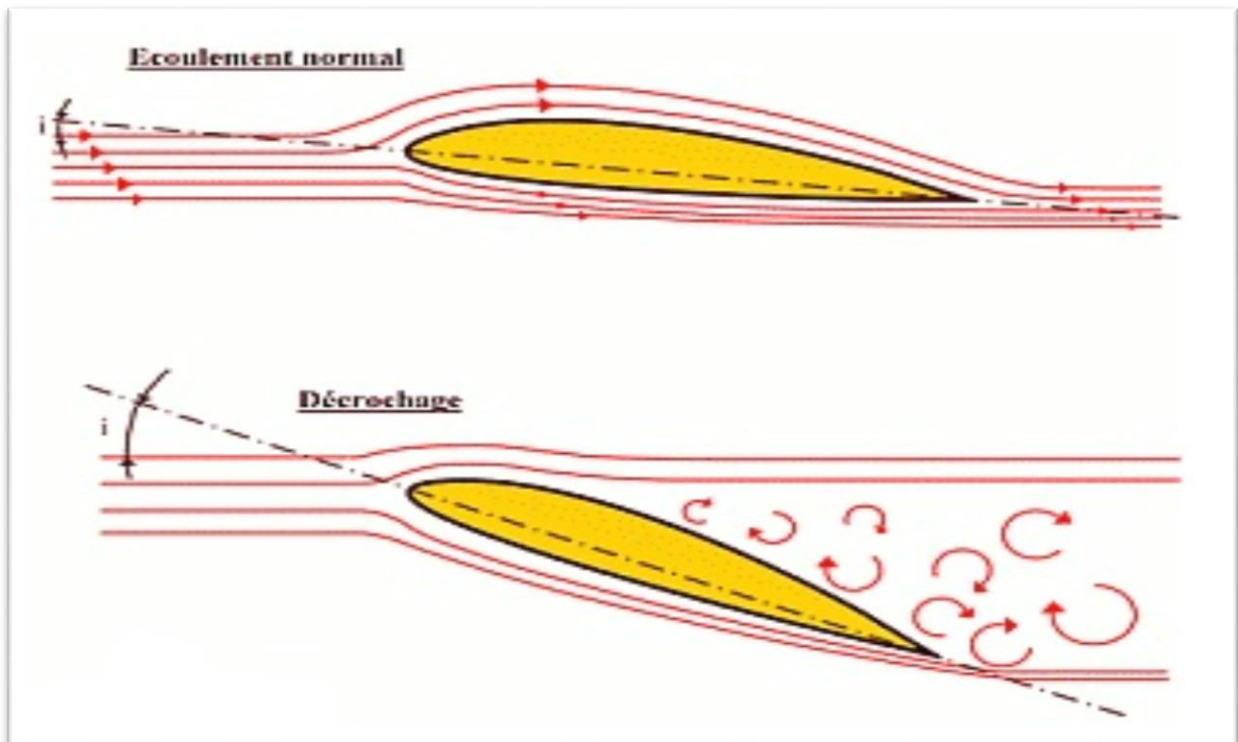
L'extrados fait accéléré l'écoulement et l'intrados ralentie l'écoulement [8].





**Figure I-8** Géométrie de profil aérodynamique [8]

Le vent a une force qui se décompose en plusieurs composantes, considèrent la composante dans la direction de l'écoulement la force de traînée  $D$  (drag), et dans la direction perpendiculaire de l'écoulement la force de portance  $L$  (lift). [8]



**Figure I-9** L'écoulement d'air dans la pale éolienne [8]

## I.5 Les modes de fonctionnement des éoliennes

On distingue deux principaux modes de fonctionnement :

### I.5.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement adapté aux éoliennes dans la vitesse de rotation régulée par orientation des pales (pitch contrôle). Constitué d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Ce mode est généralement lié à la génératrice connecté directement aux réseaux. Ce fonctionnement ne peut pas nous permettre à extraire le maximum de la puissance aérodynamique [11,21].

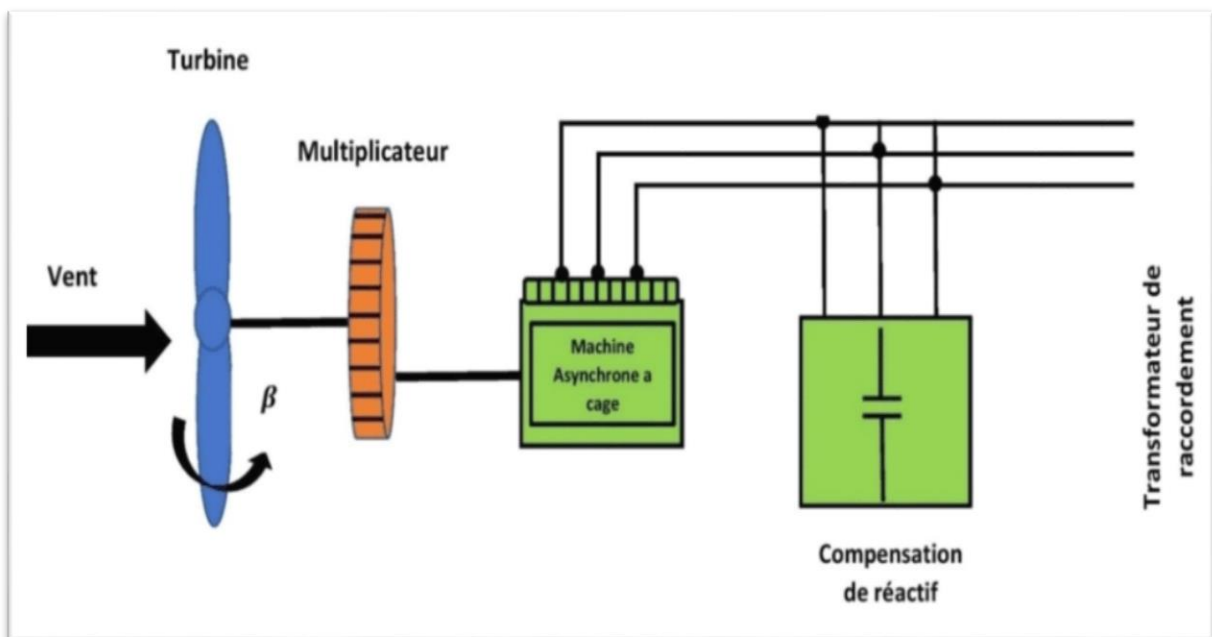
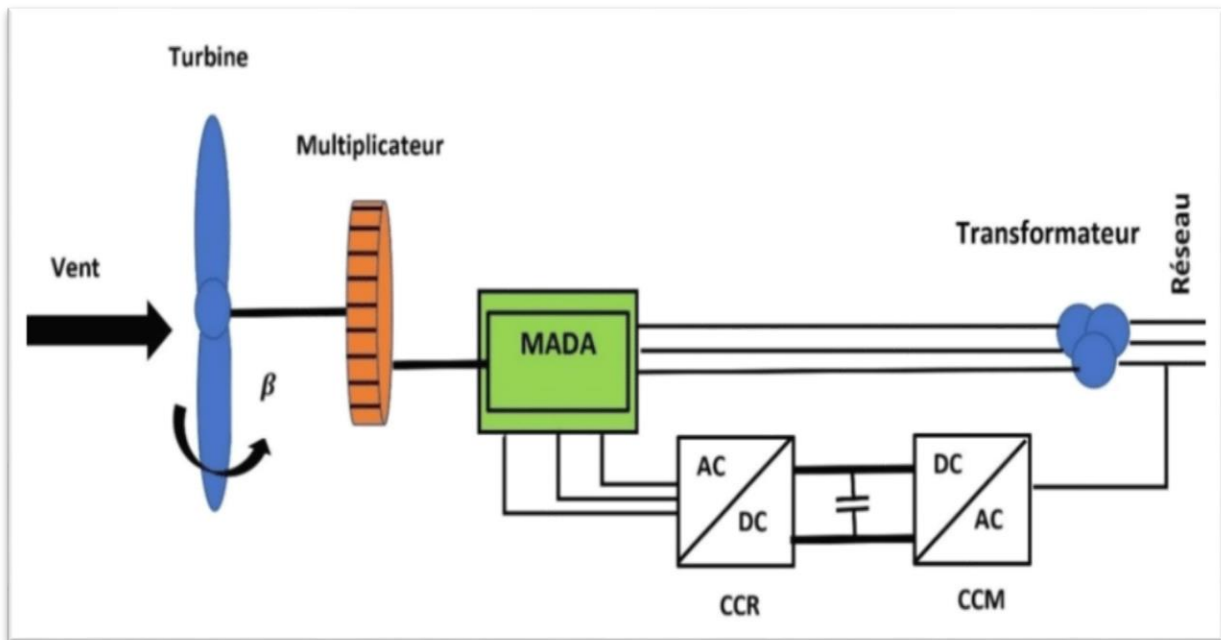


Figure I-10 Eolienne à vitesse fixe à base d'une machine asynchrone

### I.5.2 Fonctionnement à vitesse variable

Constitué d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) à une liaison directe du stator avec le réseau et une liaison avec le rotor réalisé avec l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence ou d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) a une liaison avec le réseau réalisé avec l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence. Ce mode lié à la génératrice connecté au réseau via une interface de connexion [13, 21].



**Figure I-11** Eolienne à vitesse variable à base de MADA

Pour cela on peut définir quatre zones de fonctionnement :

- Zone I : la vitesse du vent inférieure à la vitesse d'enclenchement, elle n'est pas suffisante pour faire fonctionner la turbine, la puissance de rotation est inférieure à la consommation.
- Zone II : la vitesse du vent est supérieure à la vitesse d'enclenchement, c'est la zone exploitable où la puissance fournie par l'arbre dépend de la vitesse de vent, le coefficient de puissance  $C_p = C_{p\max}$ , c'est dans cette zone que l'on parle de stratégie de MPPT (maximum power point tracking).
- Zone III : la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer la génératrice éolienne, les pales de la turbine sont mises en drapeaux.
- Zone IV : la vitesse du vent est supérieure à la vitesse de déclenchement, la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

## I.6 Machines électriques et système de conversion éolienne

### I.6.1 Machine asynchrone

Le générateur à induction est plus souvent utilisé dans la conversion d'énergie éolienne de moyenne et de grande puissance. Des machines tournantes qui ont l'avantage de la robustesse et qui ont un coût réduit de fabrication et une simplicité mécanique elle représente un taux de défaillance très peu élevé, constituée d'une partie mobile, rotor et une partie fixe, stator. Le stator supporte trois enroulements décalés de  $120^\circ$ , alimenté avec une tension alternative triphasée, produit un champ magnétique appelé champ tournant, induit des courants dans le rotor par leur interaction, sa fréquence secondaire à celle de champ tournant. Elles ont

comme inconvénient la consommation de courant réactif de magnétisation au stator. Elle a comme avantage que les puissances extraire sont optimisées avec les vents faibles et moyenne par contre et d'une autre part le dimensionnement de l'électronique de puissance est à 100% de puissance nominale [13, 21].

### **I.6.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil**

Les machines à cage d'écureuil sont les premières machines utilisées dans la conversion éolienne autonome ou isolée de grande puissance, ses génératrices (rotor à cage) couplé directement au réseau électrique qui impose sa fréquence (50 HZ) aux grandeurs statoriques, grâce à ses caractéristiques mécaniques, coût moins élevé et l'absence de ballast-collecteur ainsi que le contact glissant sur des bagues, ça les a rendus les mieux adaptés pour la conversion éolienne. Les éoliennes à vitesse fixe tournent à une vitesse régulé par un système mécanique d'orientation de l'aérogénérateur des pales (pitch control) pour avoir un fonctionnement au voisinage du synchronisme et qu'il ne nécessite pas un dispositif d'électronique de puissance lors de la connexion directe au réseau, l'éolienne à grand puissance à vitesse fixe généralement a trois lames reliés avec une génératrice à induction via un multiplicateur de vitesse pour adapté la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. La machine fonctionne en hyper-synchronisme ce qui fait le glissement  $g < 0$  (négative) pour un fonctionnement en génératrice.

Ce type de convertisseur électromécanique consommateur de l'énergie réactive nécessaire pour la magnétisation du rotor de la machine, La connexion directe au réseau électrique impose l'ajout du banc de condensateur en parallèle pour la compensation de l'énergie réactive qui devienne la seule source de cette énergie dans le cas de fonctionnement autonome.

En cite quelques avantages et inconvénients de l'éolienne à vitesse fixe dans la machine asynchrone à cage d'écureuil [3, 7, 8, 9, 10, 11] :

#### **❖ Avantage :**

- Système électrique simple.
- Coût moins élevé.
- Facilité de maintenance et fiable.
- Pas besoin de dispositif d'électronique de puissance.

#### **❖ Inconvénient :**

- Puissance extraite et faible
- Pas de gestion de puissance réactive.
- Système bruyant à cause des modifications des caractéristiques d'aérogénérateur.

Le fonctionnement à vitesse variable des machines à cage nous donne un meilleur emploi de vaste gamme de la vitesse de vent et d'extraire le maximum de l'énergie cinétique

du vent (production de la puissance), pour réduire les contraintes subites par la structure mécanique aussi le bruit acoustique. La connexion directe aux réseaux n'est plus possible en rend alors la vitesse variable. Quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, elle nous fournit des tensions continues, pour cela en fait appel à des convertisseurs de puissance, un onduleur MLI qui nous permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe adaptée à celle de réseau et un second convertisseur MLI qui fournit la puissance réactive magnétisante (rotor) relié à un bus continu pour contrôler les échanges de puissance active et réactive avec le réseau ce qui représente.

Quelques avantages et inconvénients de l'éolienne à vitesse variable dans les machines asynchrones à cage d'écureuil :

❖ **Avantage :**

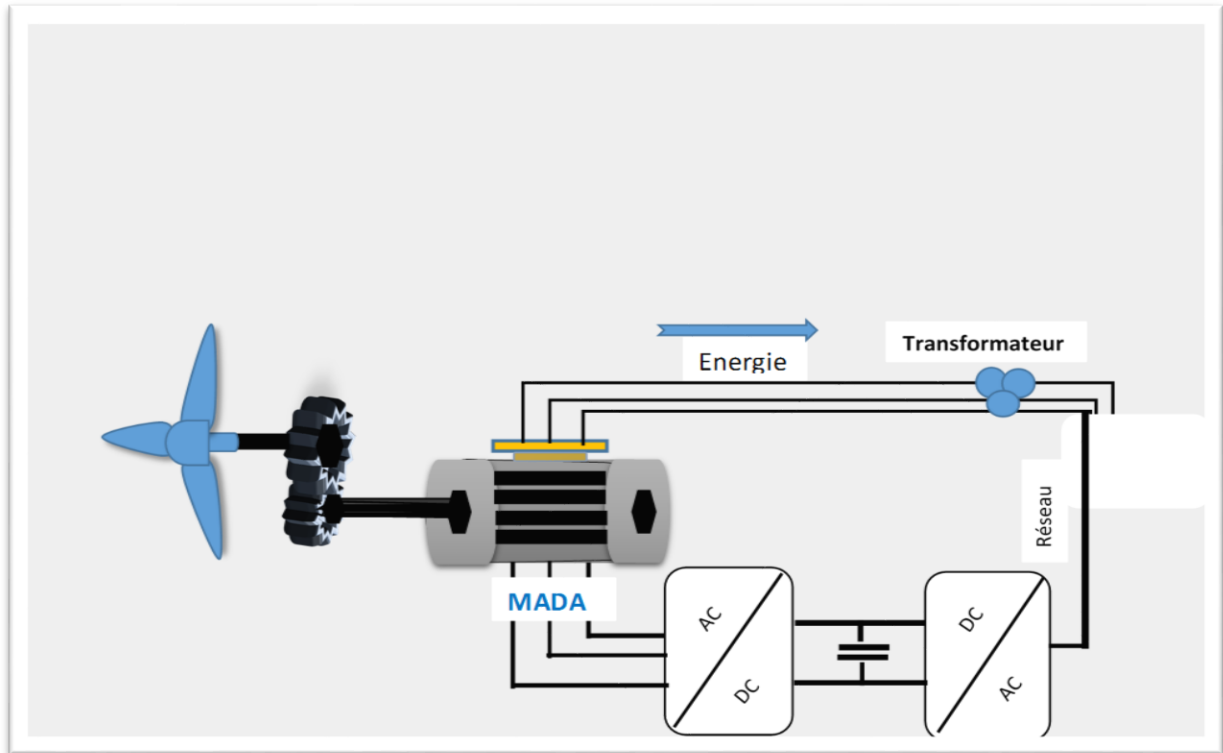
- Compensation de l'énergie réactive
- Bon contrôle de la puissance active et réactive de la machine avec celle du réseau.
- Réduit les bruits acoustiques.

❖ **Inconvénient :**

- Coût de l'installation élevée.
- Pertes importantes.

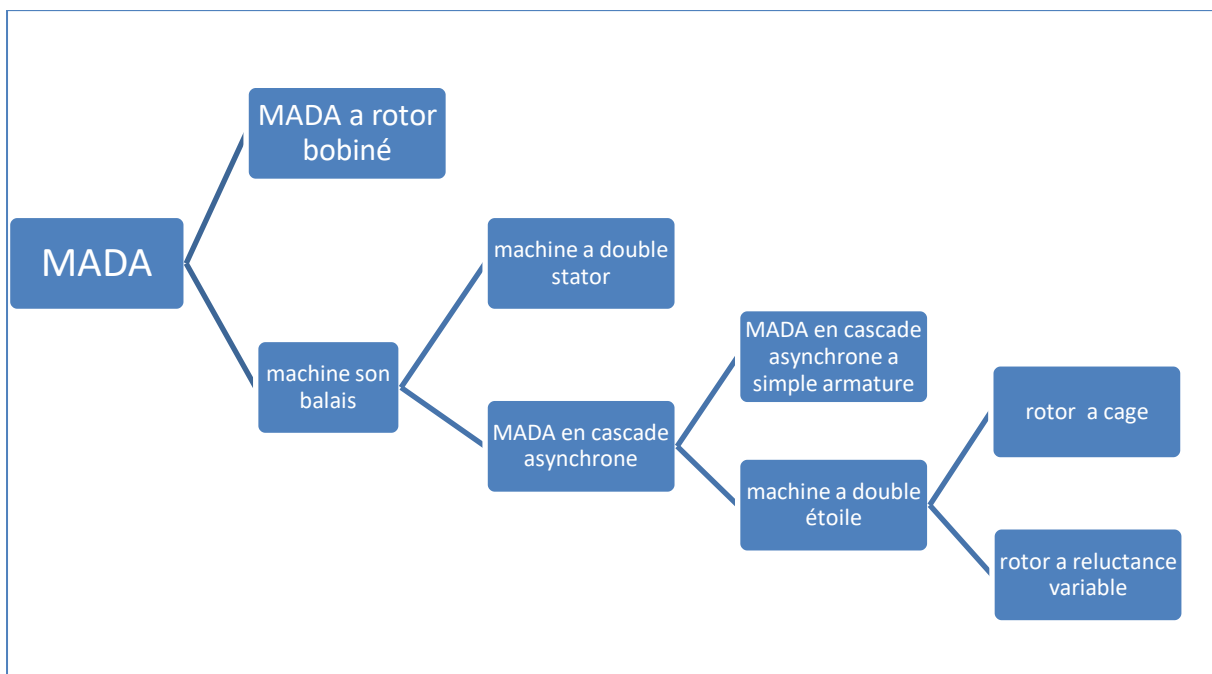
### **I.6.3 Machine asynchrone à double alimentation**

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone et basé sur le rotor qui est couplé au réseau, dans notre machine à courant alternatif au lieu de rotor à cage on a un rotor bobiné, la machine à double alimentation à rotor bobiné est plus complexe comparant avec la machine à cage, son atout repose sur le fonctionnement hypo synchrone. Les deux modèles nécessitent un multiplicateur de vitesse, le stator qui est identique avec celui de la machine asynchrone classique est connecté directement au réseau via un transformateur, le rotor, lui est relié à un convertisseur statique, ce rotor a un bobinage triphasé connecté en étoile, accessible par trois bagues munies d'un contact glissant, le rotor permet à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur la plage de vitesse qui dépend du type de la chaîne rotor. La double alimentation de la machine offre un meilleur emploi de l'éolienne, cette alimentation est réalisée par deux ponts triphasés d'IGBT commandés par la technique MLI, un redresseur et un onduleur de tension, le premier AC/DC : contrôle le flux et la vitesse de rotation, poursuit le point de fonctionnement afin d'extraire le maximum de la puissance de l'énergie cinétique du vent et le limiter en cas du vent fort, il prend en compte le réglage de la puissance active et réactive échangé entre la génératrice et le réseau. Le deuxième DC/AC : sur le bus continu il maintient la tension fixe, il transfère aussi l'énergie active et réactive au réseau. [7, 12, 20]



**Figure I-12** Eolienne à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentation.

- **Différentes variantes de la machine à double alimentation**



**Figure I-13** Classification électrique des machines à double alimentation [22]

### **I.6.4 Machine synchrone**

La machine synchrone classique à la même constitution avec la machine asynchrone, le rotor doit être tournée à la même vitesse que le champ tournant (champ statorique), son avantage est l'absence du courant réactif de magnétisation. Pour ce type de machine on utilise les aimants ou bien un bobinage d'excitation conventionnelle pour obtenir le champ magnétique. Lorsqu'on a un très grand nombre de pôles, elle peut être utilisée en entraînement direct sur les turbines ce qui ne nécessite pas de boîte de vitesse, son adaptation avec les éoliennes à vitesse fixe pratiquement compliquée en raison de maintenir la vitesse de rotation de la turbine strictement fixe aussi pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion, lorsqu'on a un très grand nombre de pôles elle peut être utilisée en entraînement direct sur les turbines ce qui ne nécessite pas de boîte de vitesse, sa fréquence étant incompatible avec celle de réseau, ce qui impose un convertisseur de fréquence, l'interface d'électronique de puissance entre le stator s'impose pour mieux adapté la machine pour le fonctionnement à vitesse variable à connexion indirecte avec les réseaux à travers un convertisseur statique.

La machine synchrone à aimant permanent (MSAP) a pour avantage grâce à son rendement et sa simplicité de la rendre mieux appliqué pour l'éolienne isolée et autonome, elle ne nécessite pas une source pour l'excitation, Plusieurs structures permettant l'alimentation des charges autonomes de la machine à aimant permanent à travers des dispositifs d'électronique de puissance, la méthode la plus intéressante et de coupler le stator à travers deux onduleurs MLI triphasé, le premier en mode redresseur simple puisqu'il n'absorbe pas de puissance réactive, ce redresseur est suivi d'un hacheur élévateur qui permet de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation, l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau, le hacheur nous permet de contrôler indirectement la puissance transitée, aussi le contrôle de fonctionnement de la commande à poursuite de point de puissance maximale (maximum power point tracking MPPT).

Pour la machine à rotor bobiné fait souvent appelle à une excitation au niveau de l'inductance sa demande une alimentation. Ce qui n'est pas pratique pour les sites isolés, sa demande une batterie ou une source de tension importante [4, 7, 11].

## **I.7 Système éolien connecté au réseau et le fonctionnement autonome et isolé**

La production de l'énergie électrique est divisée en deux catégories, la majorité des cas autonome, pour les machines ou les éoliennes petites puissances ou moyennes puissances, pour les grandes éoliennes produites sur le réseau de distribution (raccordement sur un réseau déjà existant) directement à l'aide des machines de centaines KW et même des MW très importante.

Dans le fonctionnement raccordé au réseau la génératrice préférable qu'elle fonctionne à vitesse variable est connectée avec un convertisseur met entre la génératrice et le réseau pour ne pas nuisez le rendement global de l'installation.

Dans notre chapitre en va étudier les machines à cage d'écureuil, la meilleure machine pour le fonctionnement autonome dans les sites isolés, c'est grâce à sa capacité de fonctionner sans l'aide d'une source d'énergie pour sa magnétisation, elle est souvent associée à un

condensateur ou une batterie qui fournit l'énergie réactive nécessaire pour la magnétisation de cette dernière, sa robustesse et son coût.

Les sites autonomes via l'utilisation des énergies renouvelables que sont les rayonnements solaires ou le vent et ou l'eau, aujourd'hui grâce à l'évolution technologique, nombreuse contrainte liée à l'autonomie énergétique.

La philosophie d'un système autonome pour décrire est de satisfaire seulement le besoin de consommateur en électricité, les sites isolés ou autonome et l'appellation d'un site non connecté aux réseaux de distribution électriques comme les installations qui en besoin de puissance élevé.

### **I.7.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone auto-excitée**

La génératrice asynchrone n'engendre pas sa propre énergie d'excitation contrairement à l'alternateur. Pour cette raison il faudra lui apporter cette énergie est stabilisée sa tension de sortie et sa fréquence. La génératrice asynchrone auto-excitée fonctionnant à vitesse fixe et couplée directement au réseau, la vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Entraînée à une vitesse supérieure au synchronisme, cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la vitesse de la génératrice à celle du rotor de l'éolienne.

**Machine asynchrone auto-excitée par condensateur fixe :** L'utilisation de la machine asynchrone à cage connectée à des capacités a l'avantage de la simplicité de mise en œuvre et du faible coût dû à l'absence de convertisseurs statiques. Cependant, cette configuration admet des limites de fonctionnement qu'il faut prendre en compte. Il existe plusieurs configurations dans la littérature pour connecter les capacités aux bornes de la machine

**Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur fixe :** Des travaux ont été effectués dans le cas où la génératrice asynchrone est auto-amorcée par une seule capacité d'excitation. Le bobinage de la machine étant connecté en étoile ou en triangle. Dans le cas où la machine est connectée en étoile, la capacité d'excitation peut être branchée entre une phase et le neutre comme elle peut être branchée entre deux phases.

**Machine asynchrone auto excitée par une batterie de condensateurs fixes :** Dans cette configuration, les bobinages statoriques de la machine asynchrone sont connectés à un banc de capacités en parallèle avec la charge.

#### **I.7.1.1 Machine asynchrone auto excitée par une batterie de condensateurs fixes**

Avec un système de compensation l'utilisation d'un banc de capacités fixe ne permet pas de maîtriser le flux de puissance réactive et par conséquent maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension délivrée constante lors des variations de charge ou de vitesse du vent. Pour surmonter cet inconvénient, tout en gardant un banc de capacités d'auto excitation, plusieurs solutions ont été envisagées.



### **I.7.1.2 Capacité de compensation en série**

La structure la plus couramment utilisée consiste à connecter, en plus des capacités parallèles, d'autres capacités en série avec la charge ou avec le stator de la machine (dénommée en anglais « short-shunt connexion »). Cette approche permet de diminuer la chute de tension en charge mais elle limite les possibilités d'une régulation continue de la tension sur une large gamme de charge et/ou de vitesse.

### **I.7.1.3 Batterie de condensateurs commandés**

Une autre solution, basée sur le concept de contrôle continu de la capacité d'excitation, a été proposée. Il s'agit d'un dispositif constitué de capacités fixes en parallèle avec des interruptions GTO (Gate Thyristor Off) montés en antiparallèle (en tête bêche), la valeur apparente de la capacité peut être alors ajustée périodiquement par le contrôle du temps durant lequel la capacité est connectée au circuit.

### **I.7.1.4 Configuration avec convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte)**

Cette adaptation a pour but de maintenir la tension à une valeur constante aux bornes de la charge et ceci lorsque le système est placé dans un environnement dynamique où la vitesse, la charge et la capacité changent. La régulation de la tension de sortie à la valeur désirée aux bornes de la charge peut se faire en agissant sur le rapport cyclique du signal commandant l'interrupteur du convertisseur DC-DC à la valeur adéquate.

### **I.7.1.5 Configuration avec convertisseurs bidirectionnels (convertisseurs à MLI)**

La génératrice asynchrone connectée à un redresseur et un onduleur de tension à MLI. Sa permet le contrôle, par une commande adaptée, de la magnétisation et de la tension à la sortie de la génératrice asynchrone lorsque la vitesse du rotor et la charge électrique sont variables.

## **I.8 Généralité sur le capteur de vitesse dans la machine asynchrone**

Que ce soit la commande vectorielle, la commande scalaire caractérisée  $V/f$  par de faibles performances surtout à basse vitesse ou la commande directe en couple, pour asservir la vitesse de la charge il faut mesurer celle-ci à l'aide d'un capteur. Le variateur de vitesse pour la machine asynchrone est un équipement électrique souvent mis en place dans un environnement déjà existant. La machine à contrôler n'est pas toujours accessible, ou la distance entre le variateur et la machine peut être grande. Dans ce cas, il semble peu pratique de câbler une ligne de faible ampérage pour le capteur de vitesse dans un environnement d'électronique de puissance. Aussi, le plus souvent il n'y a matériellement pas de place pour ajouter un capteur de vitesse sur l'axe du rotor du moteur déjà installé dans son environnement d'utilisation. De plus, le capteur de vitesse est peu fiable car il est sensible aux perturbations extérieures et aux perturbations électromagnétiques, aux vibrations ou à la température. Sa présence engendre une augmentation du coût de la commande (coût de maintenance en cas de panne du capteur), la complexité de l'installation. Pour des raisons économiques, pour la sûreté de fonctionnement ou pour une solution dégradée mais fonctionnelle aux applications avec capteurs en cas de panne de ceux-ci, la commande sans capteur mécanique requiert l'attention de nombreux industriels. C'est

pourquoi, elle est devenue un centre d'intérêt pour la recherche ces dernières années. Ces capteurs de vitesse réduisent la robustesse et la fiabilité d'entraînement de la machine asynchrone et augmentent son coût ainsi que la complexité des montages, De ce point de vue, l'objectif principal de cette étude consiste à synthétiser des lois de commande non linéaires La commande en question est une commande vectorielle sans capteur mécanique basé sur l'approche du MRAS classique basé sur les flux rotoriques pour la machine asynchrone.

## **I.9 Conclusion**

Ce chapitre présente brièvement l'état de l'art sur les énergies éoliennes, quelques concepts principaux sur la technologie éolienne, la limite de BETZ, les différentes génératrices utilisés dans la conversion de système éolien, aussi les convertisseurs existés dans le domaine d'utilisation leur association et ses avantages et inconvénients.

L'objectif de notre travail se penchera sur l'étude d'une machine asynchrone à cage dans une conversion de l'énergie éolienne en fonctionnement autonome.

# **CHAPITRE**

## **II**

## II. Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape très importante et essentielle dans la compréhension du système éolienne. Avec le modèle appropriée, nous pouvons nous orienter facilement vers la commande étudiée.

Dans ce chapitre, on va prendre en considération la modélisation des différents constituants de la chaîne de conversion éolienne, qu'est composé de deux parties : mécanique (modélisation du vent et la turbine), électrique (modélisation de la machine et de convertisseur).

Le choix porté pour notre système est fixé sur une génératrice asynchrone et les convertisseurs statiques.

### II.1 Modélisation du vent et la turbine d'une éolienne

Le vent est un phénomène naturel qu'en peut contrôler facilement, la variation de sa vitesse et complexe dont en peut donner une description simple, une des premières études a élaboré dans un système éolien et la quantité d'énergie que en disposé, en a un facteur critique qui et le temps pendant le quelle le vent souffle, la vitesse du vent supérieur à la vitesse de déclenchement, la puissance disponible augmente fortement même avec une petite augmentation de la vitesse du vent [22, 23].

La puissance fournie par le vent est donnée par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} * \rho * S * V_v^3 \quad \text{II-1}$$

#### II.1.1 Limite de BETZ

Lorsque la pale de l'éolienne tourne en peut pas dire quelle extraire tout l'énergie cinétique du vent qu'il contient, car si en retrait du vent tout l'énergie qu'il a il cesserait d'exister, pour cela il est impossible de capté toute l'énergie contenu dans le vent, la vitesse du vent diminue lorsque en capte de l'énergie. BETZ a prouvé cette théorie et il a déterminé qu'un système éolien idéal peut seulement capter 59% de la vitesse du vent, le coefficient de la turbine éolienne et sa valeur ne dépasse pas 16/27, cette valeur et appelé limite de BETZ. Selon lui la puissance de la turbine généralement s'exprime en utilisant le coefficient de puissance elle est donnée par [22, 23]:

$$P_t = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho * S * V_v^3 \quad \text{II-2}$$

La puissance mécanique de la turbine et exprimé par suite :

$$P_m = C_p * P_v(\lambda, \beta) \quad \text{II-3}$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  est en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de calage des pales  $\beta$  (°).

$\lambda$  Est le rapport de la vitesse linéaire des extrémités des pales ( $\Omega_t, R$ ) sur la vitesse instantanée du vent.

Et

$$\lambda = \left( \frac{\Omega_t \cdot R}{V_v} \right)$$

L'expression du couple aérodynamique est donnée par :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad \text{II-4}$$

La surface balayée par la turbine éolienne :

$$S = \pi \cdot R^2$$

### II.1.2 Modélisation de l'arbre mécanique

La liaison entre la turbine et la partie électrique de l'éolienne est représenté par une équation du mouvement. Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature.

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turb}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale constitué de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice ( $J_g$ ).

$$J = J_{total} = \frac{J_{turb}}{K^2} + J_g \quad \text{II-5}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total, aussi il prend en compte, le couple électromagnétique produit par la génératrice le couple des frottements visqueux ( $T_{visc}$ ), et le couple issu du multiplicateur  $T_{multi}$

$$T_m = J_t \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = T_{multi} - T_e - T_{visc} \quad \text{II-6}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux  $T_f$

$$T_{visc} = T_f \cdot \Omega_m \quad \text{II-7}$$

## II.2 Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser une machine asynchrone en fonctionnement génératrice on doit d'abord citer certaines hypothèses simplificatrices [14]:

- L'entrefer est constant.
- L'effet de l'encoche est négligeable.
- Les circuits magnétiques sont symétriques.
- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.

- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants.

Ces hypothèses ont des conséquences importantes telles que :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques

### II.3 Modélisation de la machine asynchrone

Le comportement de la MAS est défini par trois types d'équations :

- Les équations électriques.
- Les équations magnétiques.
- Equation mécanique.

#### II.3.1 Les équations électriques

On appliquant la loi d'ohm généralisé à chaque phase de la figure, et on obtient les équations des tensions des trois phases statoriques et rotoriques [7,14]:

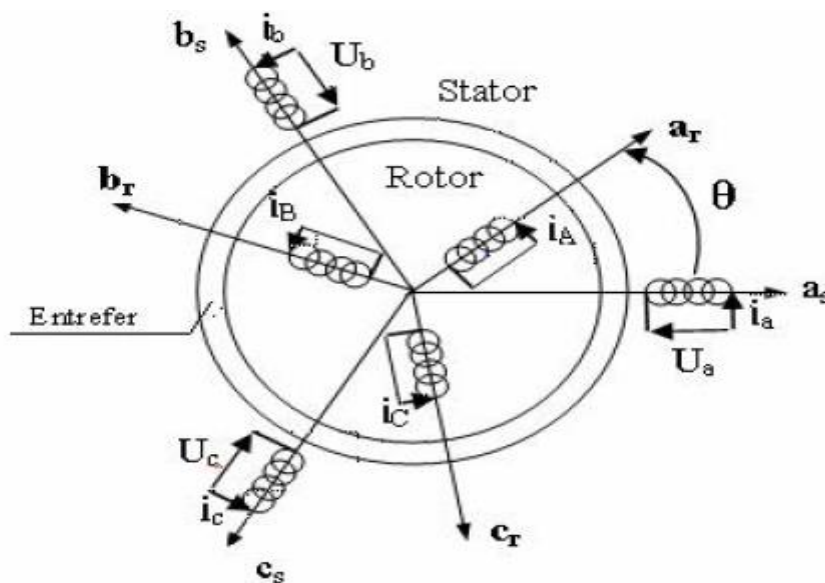


Figure II-1 Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s * i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s * i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s * i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad \text{II-8}$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r * i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r * i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r * i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad \text{II-9}$$

En représente les équations générale de la machine asynchrone sous forme matricielle pour les deux grandeurs statorique et rotorique [14]:

$$[V_{sabc}] = [R_s] * [i_{sabc}] + \frac{d[\phi_{sabc}]}{dt} \quad \text{II-10}$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] * [i_{rabc}] + \frac{d[\phi_{rabc}]}{dt} \quad \text{II-11}$$

Les paramètres  $R_s$  et  $R_r$  représente respectivement les résistances statorique et rotorique.

Les grandeurs tensions et courants sont des vecteurs définis comme suite [7, 14] :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II-12}$$

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II-13}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad \text{II-14}$$

Avec :

$[V_{sabc}], [V_{rabc}]$  : Vecteur tension des phases respectivement statorique, rotorique.

$[i_{sabc}], [i_{rabc}]$ : Vecteur courant des phases respectivement statorique, rotorique.

$[\phi_{sabc}], [\phi_{rabc}]$ : Vecteur flux des phases respectivement statorique, rotorique.

### II.3.2 Les équations magnétiques

Connaissant les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante [7, 14]:

$$[\phi_{sabc}] = [L_s] * [i_{sabc}] + [M_{rs}(\theta)] * [i_{rabc}] \quad \text{II-15}$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_r] * [i_{rabc}] + [M_{sr}(\theta)] * [i_{sabc}] \quad \text{II-16}$$

$\theta$  : étant l'angle mécanique, position de la phase (a) du rotor par rapport à la phase (a) de stator.

Avec :

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II-17}$$

Pour la matrice inductance mutuelle stator – rotor est définie par :

$$[M_{sr}(\theta)] = [M_{rs}(\theta)]^t = M * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{II-18}$$

L'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$[T_{em}] = [i_{sabc}]^t * \left(\frac{d[M_{sr}]}{d\theta}\right) * [i_{sabc}] \quad \text{II-19}$$

### II.3.3 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par [14] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - T_r - f * \Omega \quad \text{II-20}$$

Le modèle de la machine asynchrone est présenté comme suit :

$$[V_{sabc}] = [R_s] * [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} ([L_s] * [i_{sabc}] + [M_{sr}] * [i_{rabc}]) \quad \text{II-21}$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] * [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} ([L_r] * [i_{rabc}] + [M_{rs}] * [i_{sabc}]) \quad \text{II-22}$$

Cette modélisation présente un inconvénient major pour notre application, les matrices  $[M_{rs}]$  et  $[M_{sr}]$  dépendent de l'angle de rotation mécanique ( $\theta$ ), et besoin d'être recalculées à chaque pas d'échantillonnage. Pour corriger ce problème, on effectue des transformations.

### II.3.4 Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée-diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère **abc** vers le repère **d-q**. Les repères de la transformation de Park ont des grandeurs statoriques et rotoriques qui doivent coïncider, en effet si on note par l'angle  $\theta_s$  de la transformation de Park des grandeurs statoriques et  $\theta_r$  des grandeurs rotoriques, ceci se fait en unissant les deux angles par la relation : [7, 14]

$$\theta_s = \theta_r + \theta$$

Une représentation des deux axes de la machine :



$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = P(\theta) * \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

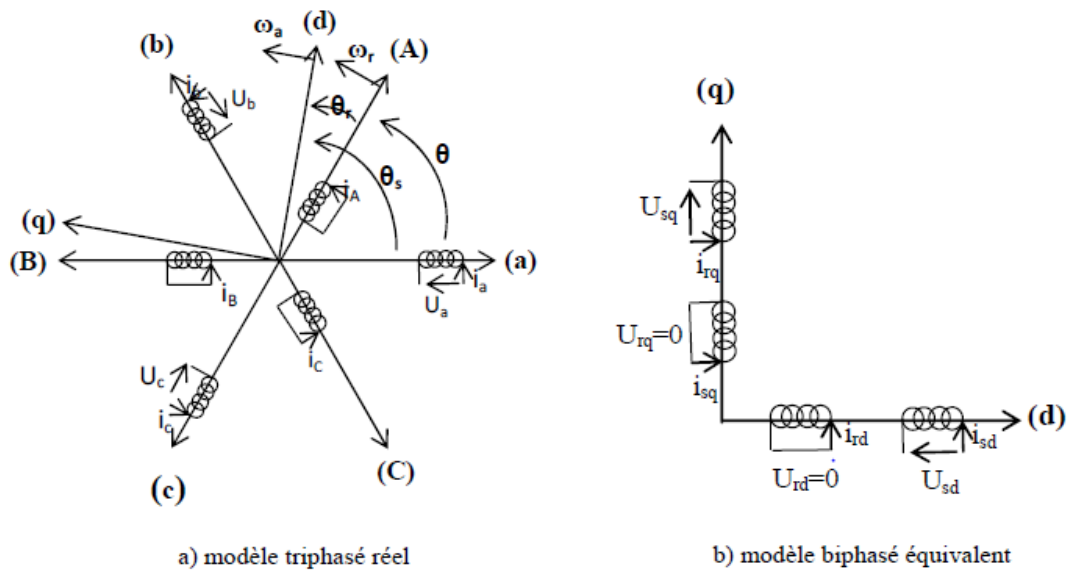


Figure II-2 Transformation triphasée – biphasée

Le passage du système triphasé-biphasé est obtenu en introduisant la matrice Park suivante [7, 14] :

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II-23}$$

Dont la matrice inverse est :

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II-24}$$

L'interprétation de la transformation de PARK est simple. Si, nous laissons de côté la composante homopolaire pour les courants par exemple (charge équilibré), on aura :

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II-25}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) \\ -\sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) \\ -\sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}$$

**II-26**

On va effectuer un changement de variables aux grandeurs statorique et rotorique nous aurons alors :

$$\begin{cases} [\mathbf{V}_s] = [\mathbf{P}(\theta_s)]. [\mathbf{V}_{sp}] \\ [\mathbf{V}_r] = [\mathbf{P}(\theta_r)]. [\mathbf{V}_{rp}] \\ [\mathbf{i}_s] = [\mathbf{P}(\theta_s)]. [\mathbf{i}_{sp}] \\ [\mathbf{i}_r] = [\mathbf{P}(\theta_r)]. [\mathbf{i}_{rp}] \end{cases} \quad \text{II-27}$$

**II.3.4.1 Application de la transformation de Park**

Les expressions de la machine, peuvent s'exprimer d'une autre façon, en utilisant la matrice de passage, avec un système équilibré [7, 14] :

- **Equations électriques**

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s * i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s * \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s * i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s * \phi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = R_r * i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r * \phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r * i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r * \phi_{rd} \end{cases} \quad \text{II-28}$$

Avec :  $\omega_r = \omega_s - \omega$

- **Les équations magnétiques**

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s * i_{sd} + M_{sr} * i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s * i_{sq} + M_{sr} * i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r * i_{rd} + M_{sr} * i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r * i_{rq} + M_{sr} * i_{sq} \end{cases} \quad \text{II-29}$$

Avec :

$$M_{sr} = \frac{3}{2} * M$$

Le modèle global de la machine est :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s * i_{sd} + L_s * \frac{di_{sd}}{dt} + M_{sr} * \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s * (L_s * i_{sd} + M_{sr} * i_{rd}) \\ V_{sq} = R_s * i_{sq} + L_s * \frac{di_{sq}}{dt} + M_{sr} * \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s * (L_s * i_{sq} + M_{sr} * i_{rq}) \\ V_{rd} = 0 = R_r * i_{rd} + L_s * \frac{di_{rd}}{dt} + M_{sr} * \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r * (L_r * i_{rd} + M_{sr} * i_{sd}) \\ V_{rq} = 0 = R_r * i_{rq} + L_s * \frac{di_{rq}}{dt} + M_{sr} * \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r * (L_r * i_{rq} + M_{sr} * i_{sq}) \end{cases}$$

**II-30**

• **Equation mécanique**

L'application de la transformation de Park pour l'équation mécanique donne :

$$T_{em} = p * (\Phi_{rd} * i_{sq} - \Phi_{rq} * i_{sd}) \tag{II-31}$$

L'équation du mouvement de la machine :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - T_r - f * \Omega \tag{II-32}$$

• **Choix du référentiel**

Selon le repère choisi, le positionnement des deux axes (d,q), peut être située selon [14] :

- Référentiel lié au stator d'axe ( $\alpha$  et  $\beta$ ) lorsque ( $\omega_s = 0$ ).
- Référentiel lié au stator d'axe (x,y) lorsque ( $\omega_a = \omega_r$ ).
- Référentiel lié au champ tournant d'axe (d,q) lorsque ( $\omega_a = \omega_s$ ).

**II.3.5 Référentiel ( $\alpha - \beta$ )**

Dans ce référentiel, on prend le système d'axe ( $\alpha - \beta$ ), qui veut dire, le système d'axe biphasé est immobile (stable) par rapport au système d'axe triphasé. La vitesse de rotation des axes ( $\alpha - \beta$ ) est nulle ( $\omega_s=0$ ), ce qui permet de réduire la complexité des équations. Le passage entre les deux systèmes triphasé vers biphasé est assuré par la matrice de Concordia [14].

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{II-33}$$

L'application de la transformation de Concordia aux courants, aux tensions et aux flux de la machine des grandeurs statoriques et rotoriques permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} X_{s\alpha} \\ X_{s\beta} \\ X_{s0} \end{bmatrix} = [T] * \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} X_{r\alpha} \\ X_{r\beta} \\ X_{r0} \end{bmatrix} = [T] * \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \tag{II-34}$$

Equation de la machine dans le repère  $(\alpha - \beta)$

Dans ce repère, les équations magnétiques et électromagnétiques (permet d'obtenir) [14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = R_s * i_{s\alpha} + \frac{d\phi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s * i_{s\beta} + \frac{d\phi_{s\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} = 0 = R_r * i_{r\alpha} + \frac{d\phi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r * \phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = R_r * i_{r\beta} + \frac{d\phi_{r\beta}}{dt} - \omega_r * \phi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad \text{II-35}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{s\alpha} = L_s * i_{s\alpha} + M * i_{r\alpha} \\ \phi_{s\beta} = L_s * i_{s\beta} + M * i_{r\beta} \\ \phi_{r\alpha} = L_r * i_{r\alpha} + M * i_{s\alpha} \\ \phi_{r\beta} = L_r * i_{r\beta} + M * i_{s\beta} \end{array} \right. \quad \text{II-36}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = R_s * i_{s\alpha} + L_s * \frac{di_{s\alpha}}{dt} + M * \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s * i_{s\beta} + L_s * \frac{di_{s\beta}}{dt} + M * \frac{di_{r\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} = 0 = R_r * i_{r\alpha} + L_s * \frac{di_{r\alpha}}{dt} + M * \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \omega_r * (L_r * i_{r\alpha} + M * i_{s\alpha}) \\ V_{r\beta} = 0 = R_r * i_{r\beta} + L_s * \frac{di_{r\beta}}{dt} + M * \frac{di_{s\beta}}{dt} - \omega_r * (L_r * i_{r\beta} + M * i_{s\beta}) \end{array} \right. \quad \text{II-37}$$

**II.3.6 Modélisation du convertisseur statique :**

Les tensions d'entrées redresseur d'une manière générale comme suit [7, 15] :

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{array}{l} U_{Sa} = f_a * V_{dc} \\ U_{Sb} = f_b * V_{dc} \\ U_{Sc} = f_c * V_{dc} \end{array} \quad \text{II-38}$$

Avec :

$$\begin{array}{l} f_a = \frac{2*S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2*S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c = \frac{2*S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{array}$$

Le courant  $i_{dc}$  est exprimé en fonction des états des interrupteurs ( $S_a, S_b, S_c$ ) et les courants  $i_{sabc}$  comme suite :

$$i_{dc} = S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc} \quad \text{II-39}$$

- L'auto amorçage de convertisseur statique :

Le modèle de la machine et celui de redresseur supposé composé d'interrupteurs parfaits, il faut introduire les équations du circuit électrique à la sortie du redresseur. Deux cas de figure sont à considérer :

-la diode est passante :

$$i_{dc} = i_b - i_R - i_C$$

$$\text{Implique : } i_{dc} = \frac{E - V_{dc}}{r_b} - C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R} \quad \text{II-40}$$

$$\text{Donc : } \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \left[ i_{dc} + V_{dc} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{r_b} \right) - \frac{E}{r_b} \right] \quad \text{II-41}$$

Par conséquent, la tension redresseuse  $V_{dc}$  est donnée comme suite :

$$V_{dc} = \int -\frac{1}{C} \left[ i_{dc} + V_{dc} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{r_b} \right) - \frac{E}{r_b} \right] \quad \text{II-42}$$

-la diode est bloquée :

$$i_{dc} = -i_R - i_C$$

$$\text{Implique : } i_{dc} = -C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R} \quad \text{II-43}$$

$$\text{Donc : } \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \left[ i_{dc} + \frac{V_{dc}}{R} \right] \quad \text{II-44}$$

Par conséquent, la tension redresseuse  $V_{dc}$  est donnée comme suite :

$$V_{dc} = \int -\frac{1}{C} \left[ i_{dc} + \frac{V_{dc}}{R} \right] \quad \text{II-45}$$

Lorsque la diode est bloquée  $V_{dc} \geq E$

II.4 La simulation de la machine asynchrone en fonctionnement moteur

Dans cette partie, le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil en mode moteur figure II-18 a été simulé sous MATLAB/SIMULINK, cela permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone. Les résultats de simulation sont représentés dans les figures suivantes :

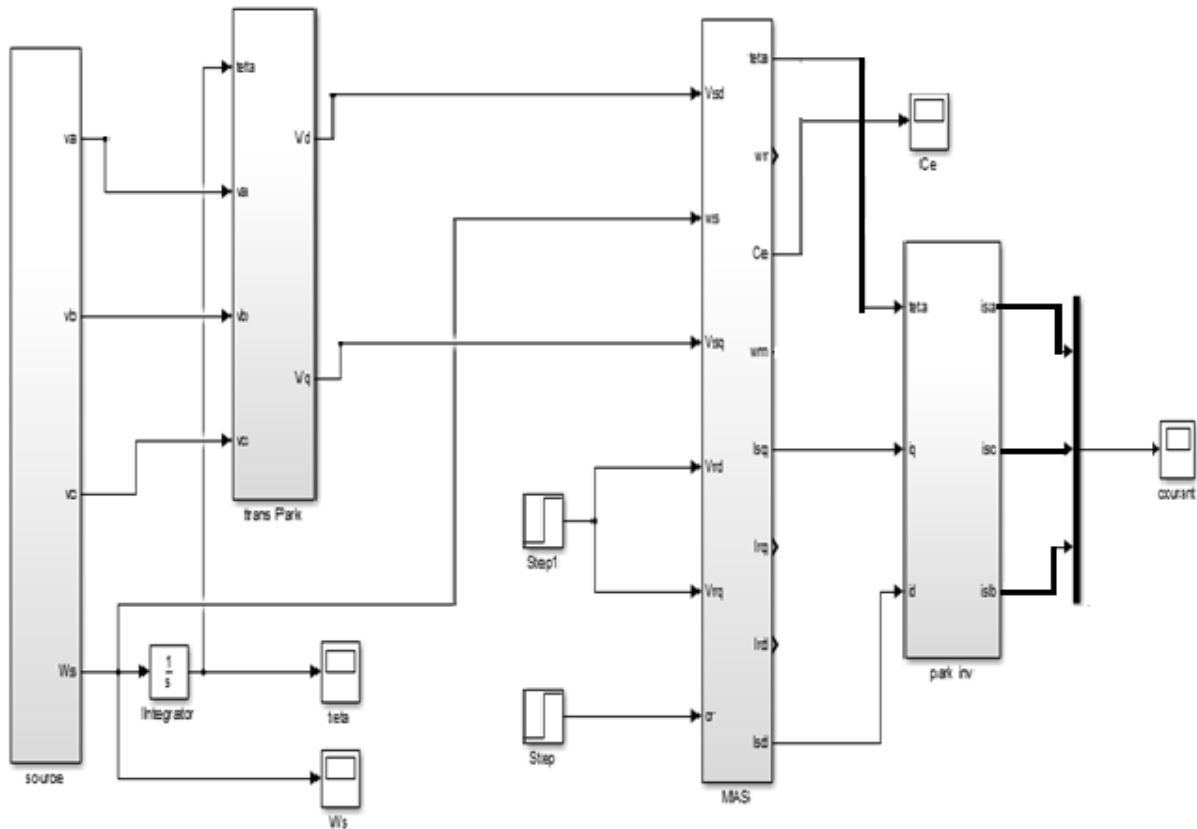
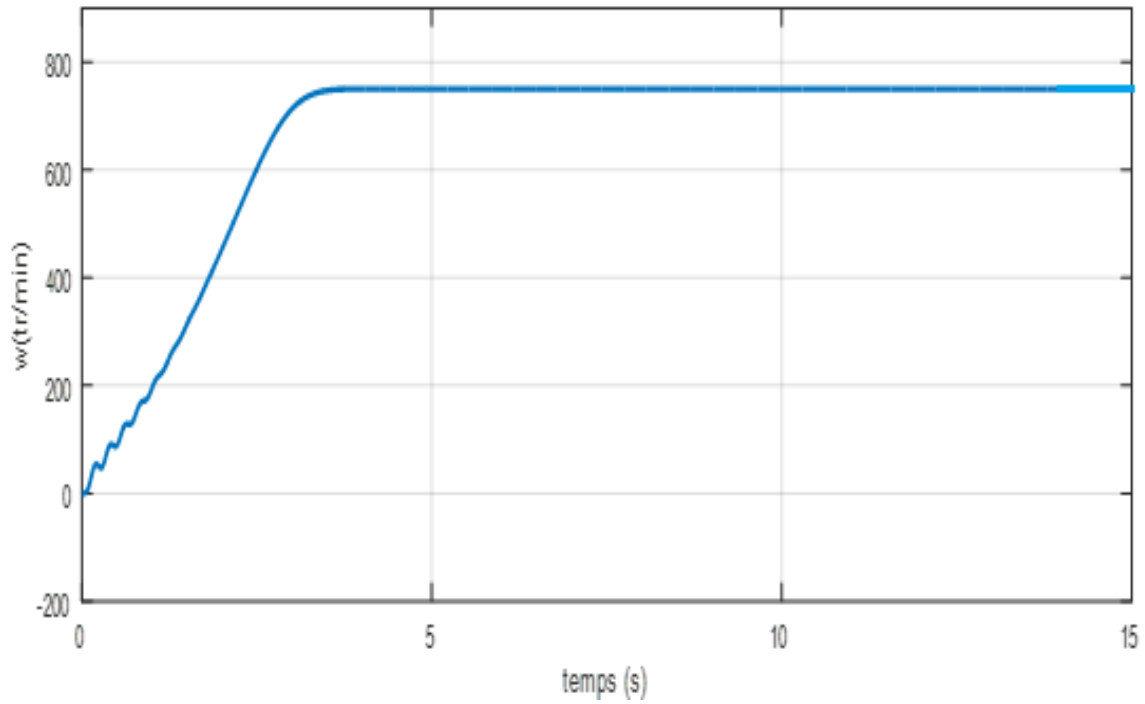


Figure II-3 Schéma bloc de simulation

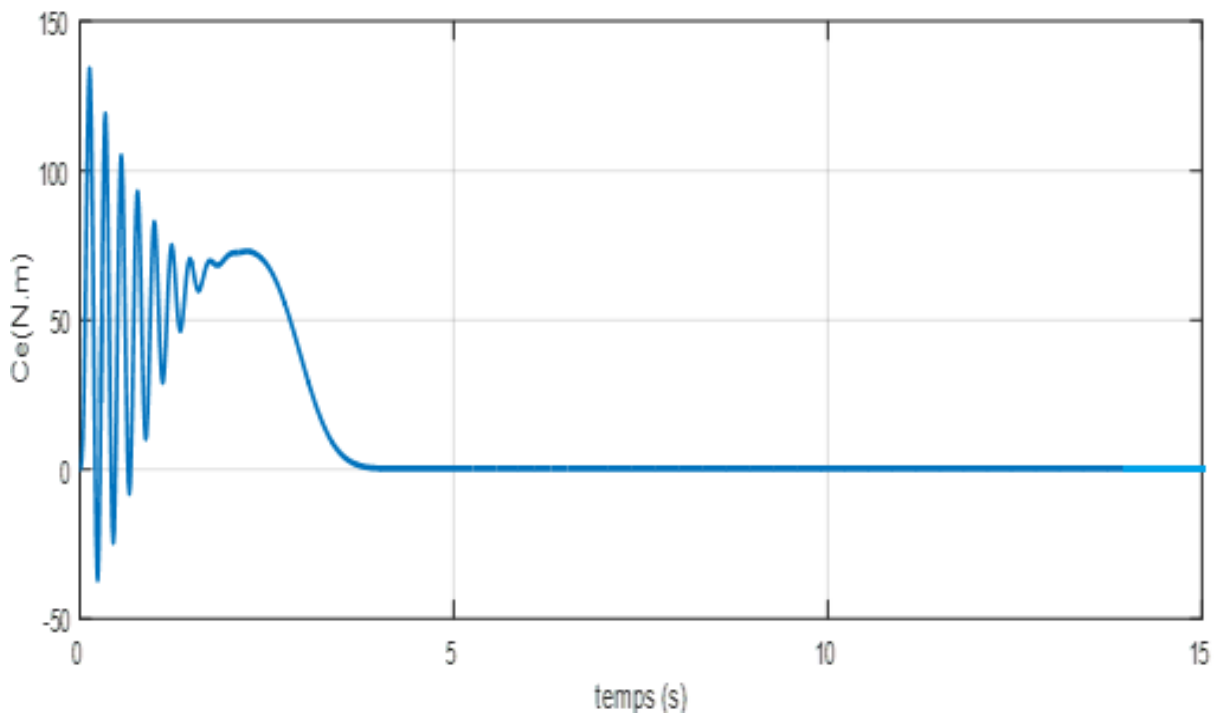
Dans cette partie, le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil a été simulé sous MATLAB/SIMULINK, cela permet de mettre en évidence le comportement de la machine asynchrone en fonctionnement moteur. Les résultats de simulation sont représentés dans les figures ci-après.

La figure II-6 représente l'allure de la vitesse rotation, elle illustre don évolution temporelle, en régime transitoire et en régime permanent. Dans la phase transitoire en constate de légère ondulation celles-ci sont dues aux oscillations du couple, la vitesse se stabilise à 750 tr/mn. On a appliqué un couple de charge nulle.



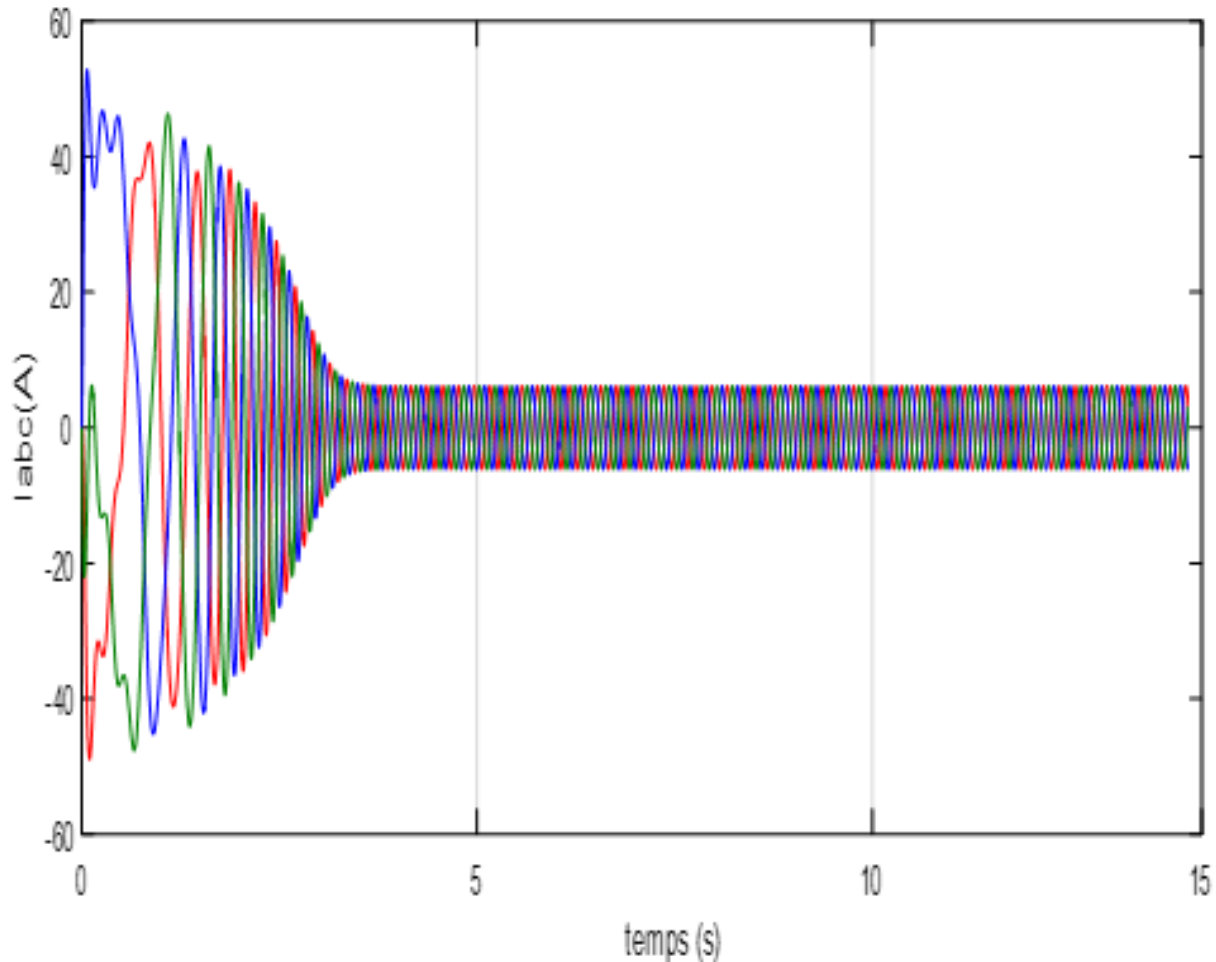
**Figure II-4** Allure de la vitesse

La figure II-5 représente la courbe de couple électromagnétique de la MAS. Nous remarquons des oscillations avant  $t=0.4s$  qui représente le régime transitoire puis se stabilise.



**Figure II-5** Couple électromagnétique

Les figures II-8-9-10 représentent l'allure des courants statoriques de la machine qui prennent la forme en bouteille dans le régime transitoire puis se stabilise à partir de l'instant  $t=0.4s$  ce qui représente le régime permanent.



**Figure II-6** Allure de courant  $i_{abc}$

## II.5 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la présentation et la description de la machine asynchrone à cage d'écurieil ainsi que sa modélisation analytique par présentation de modèle mathématique basé sur le modelé de Park utilisant la transformation de Concordia qui repose sur une série d'hypothèses simplificatrices. Nous avons fait la modélisation des convertisseurs statiques.

Nous avons ensuite présenté la simulation de la machine en mode moteur par MATLAB/SIMULINK et on a discuté ses résultats.



# **CHAPITRE**

## **III**

**III. Introduction**

La difficulté de l'utilisation d'une commande de la machine asynchrone se trouve dans le couplage entre les variables d'entrée, les variables de sortie et les variables internes de la machine comme flux, le couple et la vitesse ou la position, pour cela plusieurs travaux ont été fait pour répondre à deux objectifs principaux : obtenir un contrôle précis et rapide du flux et du couple et réduire la complexité des algorithmes de contrôle.

Avec le développement des technologies, on trouve de nouvelles stratégies de commandes, la plus populaire c'est la commande vectorielle à flux rotorique orienté (Flux Oriented Control), introduite par KOVACS en 1959 et reprise par blaschke en 1972.

Cependant, les inconvénients inhérents à l'utilisation des capteurs de vitesse sont nombreux, en effet, ils sont sensibles aux perturbations électromagnétiques, aux vibrations ou à la température. Ils nécessitent un espace d'installation supplémentaire et donc des précautions particulières et des raccordements soignés. D'autres part, ils réduisent la fiabilité, augmentent les coûts et augmentent la complexité des équipements et de la maintenance, limitant leur mise en œuvre dans nombreuses applications.

La plupart des travaux rapportés dans la littérature traitent respectivement le problème de l'élimination des capteurs de vitesse et du manque de robustesse de la commande vectorielle vis-à-vis des changements de paramètres. De plus, l'objectif de ce travail est de proposer une commande robuste à flux rotorique orienté, équipée d'une commande sans capteur basée sur la méthode MRAS.

Dans ce chapitre, on va présenter la commande vectorielle à flux rotorique orienté, puis nous ajoutons la commande MRAS pour étudier la commande vectorielle sans capteur.

En fin, on va faire une simulation et des commentaires sur les résultats.

**III.1 Commande vectorielle à flux orienté d'une MAS**

La commande vectorielle à flux orienté d'une MAS, a un but d'arriver à commander la machine asynchrone (MAS) comme une machine à courant continu à excitation indépendante (MCC), où il y'a un découplage naturel entre la grandeur principale le flux (courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant induit). Ce découplage permet d'avoir une réponse très rapide du couple [17].

**III.2 Principe de la commande vectorielle à flux orienté d'une MAS**

La commande vectorielle à flux orienté (FOC) introduit a vu le jour en Allemagne par Blaschke et Hasse au début des années 70 c'est l'une des solutions la plus attractive pour les applications à hautes performances (l'entraînement à vitesse variable) [17].

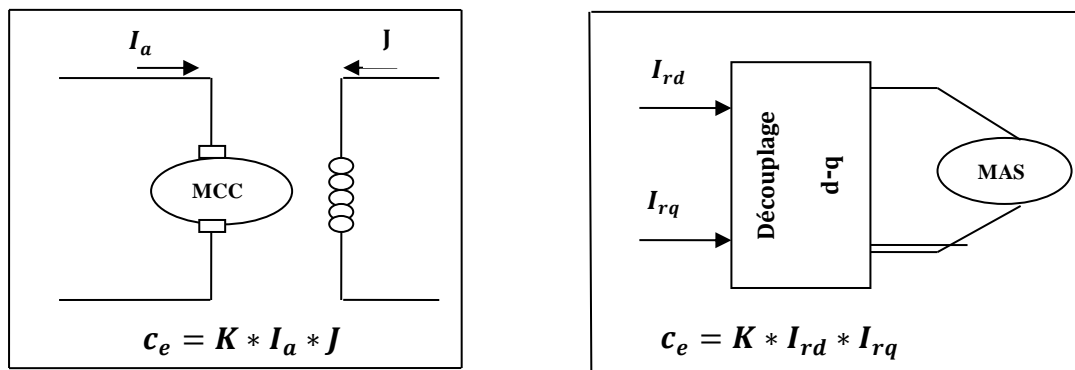
D'une manière générale, on peut présenter la commande vectorielle à flux orienté par deux méthodes, la première est appelée directe (Blaschke), la deuxième est appelée indirecte (Hasse), la méthode indirecte consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux, mais seulement sa position, dans ce cas le flux est contrôlé en boucle ouverte.

Le but de cette commande est d'assimiler le comportement du générateur asynchrone à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée en deux aspects

- Le couple et le flux de la machine sont contrôlés indépendamment l'un de l'autre.
- Les conditions optimales de productions du couple sont assurées en régime permanent et en régime transitoire.

Pour cela il faut choisir un référentiel d'axe, et une loi de commande qui assure ce découplage entre les grandeurs à contrôler et pour séparer le contrôle du flux et le contrôle du courant générant le couple électromagnétique.

. La Figure III- 1 montre le but recherché par cette commande [17] :



**Figure III-1** Equivalence entre commande d'une MCC et la commande vectorielle à flux orienté d'une MAS.

Cette propriété (l'équivalence entre commande MCC et MAS) est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants [17].

Le principe de la commande vectorielle (ou commande par flux orienté) consiste à orienter une des composantes de flux statoriques, rotorique ou de l'entrefer sur un axe du référentiel tournant à la vitesse du synchronisme.

Les classifications des commandes présentées dans la littérature :

- La source d'énergie :
  - Commande en tension.
  - Commande en courant.
- L'orientation du repère d – q :
  - Le flux rotorique.
  - Le flux statorique.
  - Le flux d'entrefer.
- La détermination de position du flux :
  - Directe (mesure ou observation de vecteur flux).
  - Indirecte (contrôle de la fréquence du glissement).

III.3 Modèle du la MAS avec orientation du flux rotorique

En régime permanent sinusoïdal, le couple électromagnétique est donné par un produit vectoriel de deux composantes en quadrature, pour avoir une forme scalaire simple, on garde toujours l'une des composantes nulle. D'après le diagramme vectoriel de la Figure suivante et les équations de la machines munies de la contrainte  $\Phi_{rq} = 0$  donne les propriétés suivantes [17] :

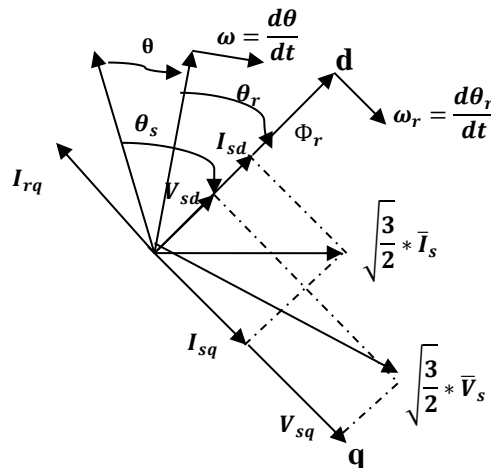


Figure III-2 Diagramme espace-temps avec alignement de l'axe d sur le flux rotorique.

L'axe « d » est aligné systématiquement sur le vecteur flux rotorique tel que ( $\phi_{rd} = \phi_r$ ). Lorsque le champ rotorique est orienté, et avec l'hypothèse de linéarité autour d'un point du fonctionnement, le comportement de la MAS est décrit par les équations suivante [7, 17] :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \tag{III-1}$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sd} \tag{III-2}$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \tag{III-3}$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{rd} \tag{III-4}$$

Les relations entre les différents flux et les courants dans le cas d'une modélisation linéaire de la MAS [7, 17] :

$$\phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \tag{III-5}$$

$$\phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \tag{III-6}$$

$$\phi_{rd} = M \cdot i_{sd} + L_r \cdot i_{rd} \tag{III-7}$$

$$\phi_{rq} = M \cdot i_{sq} + L_r \cdot i_{rq} \tag{III-8}$$

Si  $\phi_{rq} = 0$ , les équations de la machine dans la base de Park en régime non saturé se simplifient de manière suivante [7, 17] :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \quad \text{III-9}$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sd} \quad \text{III-10}$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_r}{dt} \quad \text{III-11}$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_s \cdot \phi_r \quad \text{III-12}$$

Et par l'équation (8), on a le courant  $i_{rq}$  comme suit :

$$i_{rq} = -\frac{M \cdot i_{sq}}{L_r} \quad \text{III-13}$$

On conclure, lorsque le flux  $\phi_r$  est maintenu constant le couple est réglable par action sur  $i_{sq}$ . Alors, imposer la relation  $\phi_r = 0$  fait la transformation des équations de la machine dans le repère Park de telle sorte que le flux rotorique et l'axe « d » seront dans la même orientation, ce qui donne l'appellation (à flux orienté) pour ce type de commande.

Les deux équations du système (11) et (12), correspondent à la loi de la commande représentant le fonctionnement lorsque le flux est orienté sur l'axe « d » [7, 17].

Connaissant le courant ( $i_{rq}$ ) équation (13), l'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$\begin{aligned} T_e &= -p * (\phi_r * i_{rq}) \\ T_e &= p * \frac{M}{L_r} * (\phi_r * i_{sq}) \end{aligned} \quad \text{III-14}$$

### III.4 Estimation de flux rotorique et de pulsation statorique

#### III.4.1 Estimation de pulsation statorique $\omega_s$

Pour que la vitesse  $\omega_s$  du référentiel soit effectivement celle du champ tournant, il convient d'assurer à tout instant la relation angulaire d'autopilotage suivant [7, 17] :

$$\omega_s = p \cdot \Omega + \omega_r \quad \text{III-15}$$

Avec  $\omega_r$  : la vitesse relative du repère d'axes d-q

$$\omega_r = \frac{M}{T_r * \phi_r} * i_{sq} \quad \text{III-16}$$

Donc l'angle de Park  $\theta_s$  :

$$\begin{cases} \theta_s = \int \omega_s \cdot dt = \int (\mathbf{p} \cdot \Omega + \omega_r) \cdot dt \\ \theta_s = \int \omega_s \cdot dt = \int \left( \mathbf{p} \cdot \Omega + \frac{\mathbf{M}}{T_r \cdot \Phi_r} * \mathbf{i}_{sq} \right) \cdot dt \end{cases} \quad \text{III-17}$$

### III.4.2 Estimation du flux rotorique $\Phi_r$

On exprime le flux rotorique en fonction des grandeurs statoriques qui sont accessibles, en fonction des courants statoriques, puisqu'il n'est pas directement accessible, soit [7, 17] :

$$\Phi_r = \Phi_{rd} = \mathbf{M} * \mathbf{i}_{sd} + \mathbf{L}_r * \mathbf{i}_{rd} \quad \text{III-18}$$

Donc à partir de l'équation 15 on tire l'expression  $i_{rd}$

$$\mathbf{i}_{rd} = \frac{\Phi_r - \mathbf{M} \cdot \mathbf{i}_{sd}}{\mathbf{L}_r} \quad \text{III-19}$$

Et on va remplacer l'expression 16 dans l'équation 11

On trouve :

$$\hat{\Phi}_r = \frac{\mathbf{M}}{1 + T_r \cdot \mathbf{P}} * \mathbf{i}_{sd} \quad \text{III-20}$$

Les deux expressions (17) et (20) constituant des simples observateurs du flux rotorique et de la vitesse du référentiel dans le repère rotorique, Leurs précisions peuvent être très essentielles. Il apparaît que toute erreur relative sur la valeur de la constante de temps rotorique ( $T_r$ ), paramètre sensible à la température ( $R_r$ ) et la magnétisation du circuit magnétique ( $\mathbf{M}$ ), peut se retourner directement sur les grandeurs estimées [17].

### III.5 Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté

Suite aux différentes simplifications établies ci-dessus, nous allons exprimer les tensions en fonction des courants statorique et du flux ( $\Phi_r$ ), nous allons effectuer les développements seulement pour ( $V_{sd}$ ) puisque le raisonnement est le même pour ( $V_{sq}$ ).

On prend le dérivé de l'expression (5) par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = \mathbf{L}_s * \frac{di_{sd}}{dt} + \mathbf{M} * \frac{di_{rd}}{dt} \quad \text{III-21}$$

Dans l'équation (1), on remplace  $\Phi_{sq}$  (de l'expression 6) et  $\frac{d\Phi_{sd}}{dt}$  par leurs expressions, on obtient :

$$\mathbf{V}_{sd} = \mathbf{R}_s * \mathbf{i}_{sd} + \mathbf{L}_s * \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s * \mathbf{L}_s * \mathbf{i}_{sq} + \mathbf{M} * \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s * \mathbf{M} * \mathbf{i}_{rq} \quad \text{III-22}$$

En met les relations (13) et (16) à la place des courants rotoriques :

$$\mathbf{V}_{rd} = \mathbf{R}_s * \mathbf{i}_{sd} + \left( \mathbf{L}_s + \frac{\mathbf{M}^2}{\mathbf{L}_r} \right) * \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s * \left( \mathbf{L}_s + \frac{\mathbf{M}^2}{\mathbf{L}_r} \right) * \mathbf{i}_{sq} + \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{L}_r} * \frac{d\Phi_r}{dt} \quad \text{III-23}$$

Le coefficient de dispersion d'écrit :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r * L_s}$$

La relation précédente devient :

$$V_{sd} = R_s * i_{sd} + \sigma * L_s * \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s * \sigma * L_s * i_{sq} + \frac{M}{L_r} * \frac{d\phi_r}{dt} \quad \text{III-24}$$

De manière identique, donc  $V_{sq}$  s'écrit :

$$V_{sq} = R_s * i_{sq} + \sigma * L_s * \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s * \sigma * L_s * i_{sd} + \omega_s * \frac{M}{L_r} * \phi_r \quad \text{III-25}$$

Dans notre cas, on va utiliser des correcteurs de courant par hystérésis, donc il n'y a pas de consignes de tensions à déterminer et donc la connaissance du modèle interne de la génératrice n'est pas nécessaire, et il n'y a pas besoin de prendre en considération les termes de compensation dans notre système de commande.

### III.6 Définition de l'algorithme de commande (Régulation ( $V_{dc}$ ))

On a le flux qu'est contrôlé par ( $i_{sd}$ ). Une fois que celui-ci conservé à sa référence, le couple est directement proportionnel à ( $i_{sq}$ ) [7].

Pour notre travail, c'est la tension  $V_{dc}$  à la sortie de redresseur qui doit être contrôlée et maintenue constante.

D'après la tension à contrôlée  $V_{dc}$  et du courant mesurée  $i_{dc}$  à la sortie de redresseur, on exprime la puissance débitée sur la charge :

$$V_{dc\_ref} * i_{dc} = P_{ref}$$

On peut dire que cette puissance est égale la puissance électromagnétique et sa en négligeant les pertes, avec l'expression

$$P_{ele} = T_{em} \cdot \Omega$$

Donc on peut exprimer le couple électromagnétique comme suit :

$$T_{em} = \frac{P_{ref}}{\Omega}$$

Par conséquent, le contrôle de  $V_{dc}$  peut être réalisé par le contrôle du couple électromagnétique. Il est à noter que les conventions utilisées pour le modèle de la machine étant celles du fonctionnement moteur, la valeur du courant  $i_{dc}$  est donc négative. Ceci implique que la puissance de référence, et par suite le couple de référence, ont également des valeurs négatives.

On utilise un régulateur IP pour imposer la tension du bus continu à sa référence :

$$P_{ref} = (V_{dc\_ref} - V_{dc}) \cdot \left( K_p + \frac{K_i}{S} \right)$$

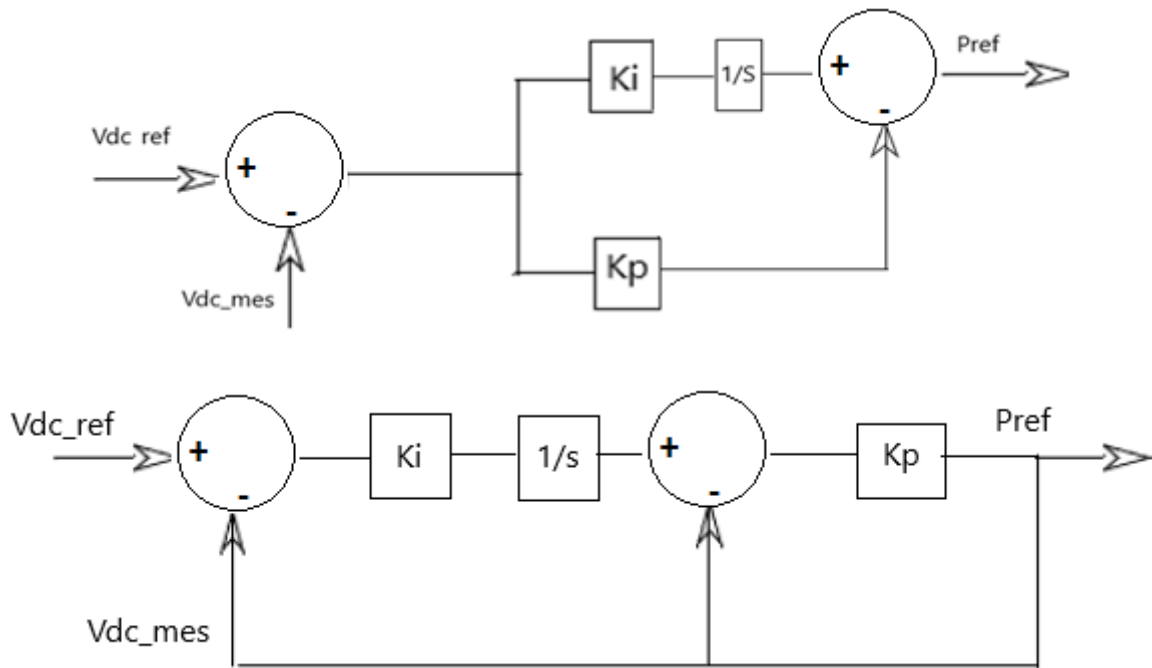


Figure III-3 Régulateur PI et IP respectivement.

Dans le cas de la commande génératrice, la référence du flux rotorique est généralement affectée à une valeur dérivée de la tension nominale à la fréquence nominale.

Dans notre cas, on va utiliser la valeur du flux estimé du bloc d'estimation du flux rotorique [7].

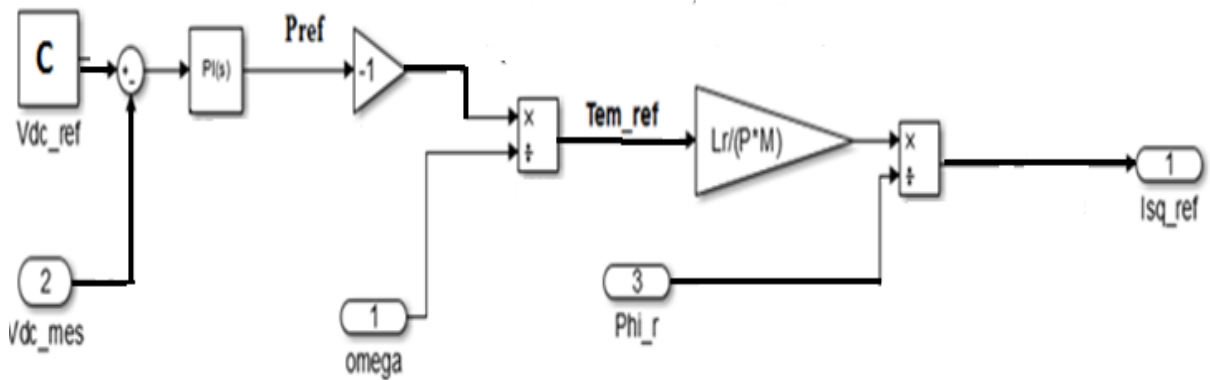
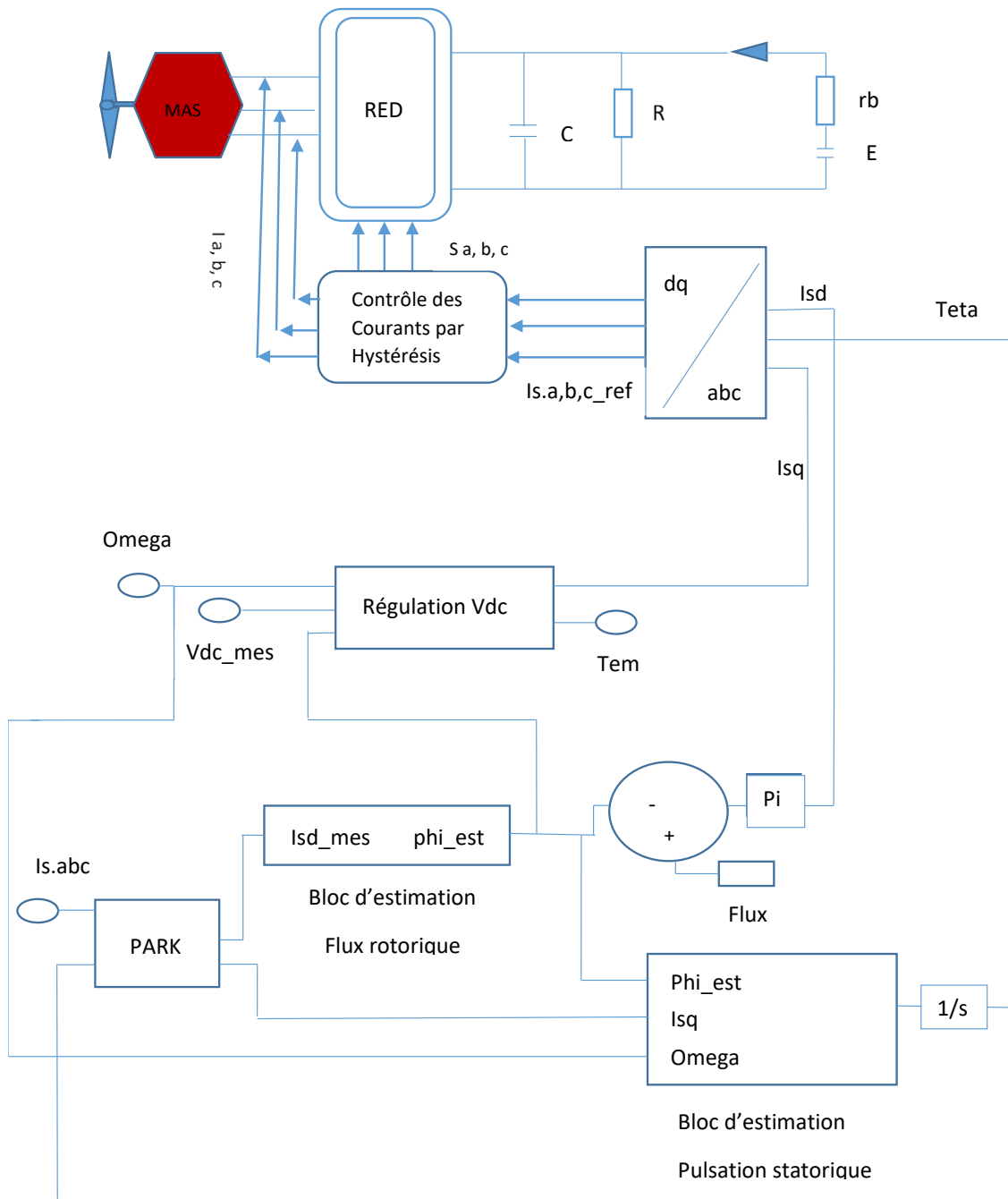


Figure III-4 Schéma de l'algorithme de commande





**Figure III-5** Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté

La figure III-5 représente la structure de la commande en boucle fermée. Les courants ( $i_{sd}$ ) et ( $i_{sq}$ ) sont régulés en valeurs instantanées. La tension  $V_{dc}$  est régulée en valeur moyenne et sa valeur de référence  $V_{dc\_ref} = 465V$ .

L'essai de simulation est réalisé avec une batterie de 12V et de résistance interne ( $r_b = 0.1\Omega$ ). La capacité de filtrage de sortie redresseur est fixée à  $1000\mu F$  [7].

### III.7 Commande vectorielle sans capteur basée sur la méthode MRAS

#### III.7.1 La méthode MRAS

La technique d'estimateur adaptatif, MRAS (Système Adaptatif à Modèle de Référence), qui a été développée par Schauder c'est une des méthodes les plus utilisées mais on peut relever en particulier sa sensibilité à la variation des paramètres de la machine. Cette méthode est étudiée et évaluée en simulation numérique pour analyser les performances et la robustesse de la commande proposée.

Le principe de l'estimateur de vitesse MRAS basé sur le flux rotorique, est de comparer les sorties des deux estimateurs de flux, obtenus par les expressions (26) et (27).

Le premier estimateur est un modèle de tension défini à partir des équations statoriques, il est appelé modèle de référence. Le second est appelé le modèle ajustable ou adaptif, qui lui-même est écrit à partir des équations rotoriques, qui définit un modèle du courant explicitement lié à la vitesse. Pour les deux modèles, l'estimation des composantes du flux du rotor sont basées uniquement sur les mesures de la tension et du courant du stator représentés dans le référentiel  $(\alpha - \beta)$  [16].

- **Modèle de référence** [16]

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_r}{L_m} \left( V_{s\alpha} - R_s * i_{s\alpha} - \sigma * L_s * \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right) \\ \frac{d\phi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_r}{L_m} \left( V_{s\beta} - R_s * i_{s\beta} - \sigma * L_s * \frac{di_{s\beta}}{dt} \right) \end{cases} \quad \text{III-26}$$

- **Modèle ajustable** [16]

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\phi}_{r\alpha}}{dt} = -\frac{1}{T_r} * \hat{\phi}_{r\alpha} - \hat{\omega}_r * \hat{\phi}_{r\beta} + \frac{L_m}{T_r} * i_{s\alpha} \\ \frac{d\hat{\phi}_{r\beta}}{dt} = -\frac{1}{T_r} * \hat{\phi}_{r\beta} - \hat{\omega}_r * \hat{\phi}_{r\alpha} + \frac{L_m}{T_r} * i_{s\beta} \end{cases} \quad \text{III-27}$$

- **Comparateur**

Le mécanisme d'adaptation entre un signal d'erreur significatif de l'écart existant entre les deux estimateurs de flux, ce signal peut être défini par [16] :

$$e_\phi = (\phi_{r\beta} * \hat{\phi}_{r\alpha} - \phi_{r\alpha} * \hat{\phi}_{r\beta})$$

Le but de ce dispositif est de générer une valeur de vitesse estimée qui est réintroduire dans le modèle ajustable pour contrer l'erreur entre les deux modèles d'estimation du flux. Par conséquent, il doit faire converger cette erreur vers zéro pour fournir une réponse rapide et garantir la stabilité du système. Pour l'étude de la stabilité de cet algorithme, C. Schauder a appliqué le critère dit hyper stabilité. La vitesse estimée peut être exprimée par une loi de type proportionnelle et intégrale donnée par la relation suivante [16] :

$$\hat{\omega}_r = K_p * e_{\phi r} + K_i * \int e_{\phi r} * dt$$

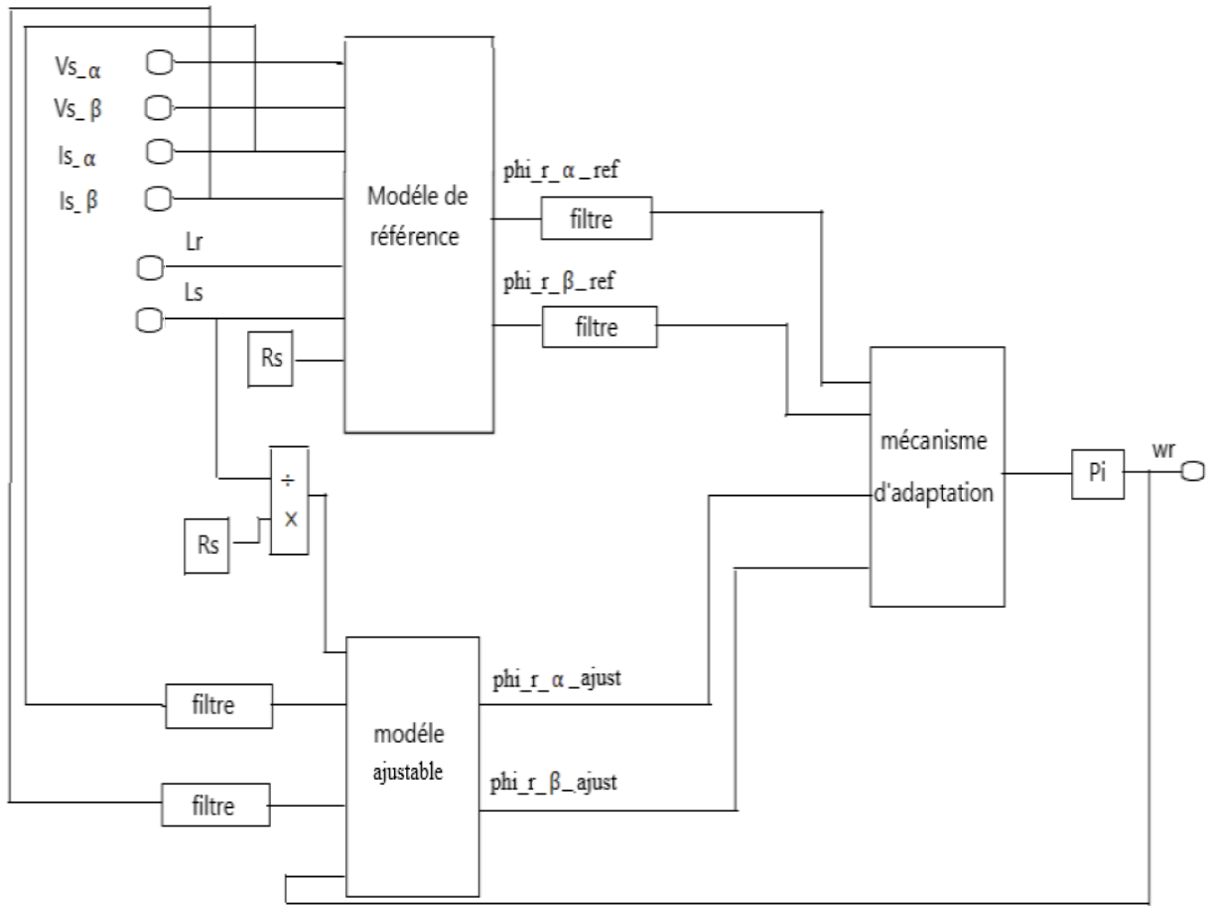


Figure III-6 Schéma principal du MRAS.

Avec :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}$$

$$\sigma = 1 - \left( \frac{L_m^2}{L_s * L_r} \right)$$

Dans le travail expérimental, les chercheurs ont trouvé une difficulté dans la mise en œuvre de l'estimateur MRAS en raison de la nécessité de différencier les courants du stator. Pour réduire l'effet des termes dérivés, des blocs de filtre passe-bas du premier ordre ont été insérés respectivement dans la sortie et l'entrée du modèle de référence et du modèle ajustable pour éliminer le problème d'intégration

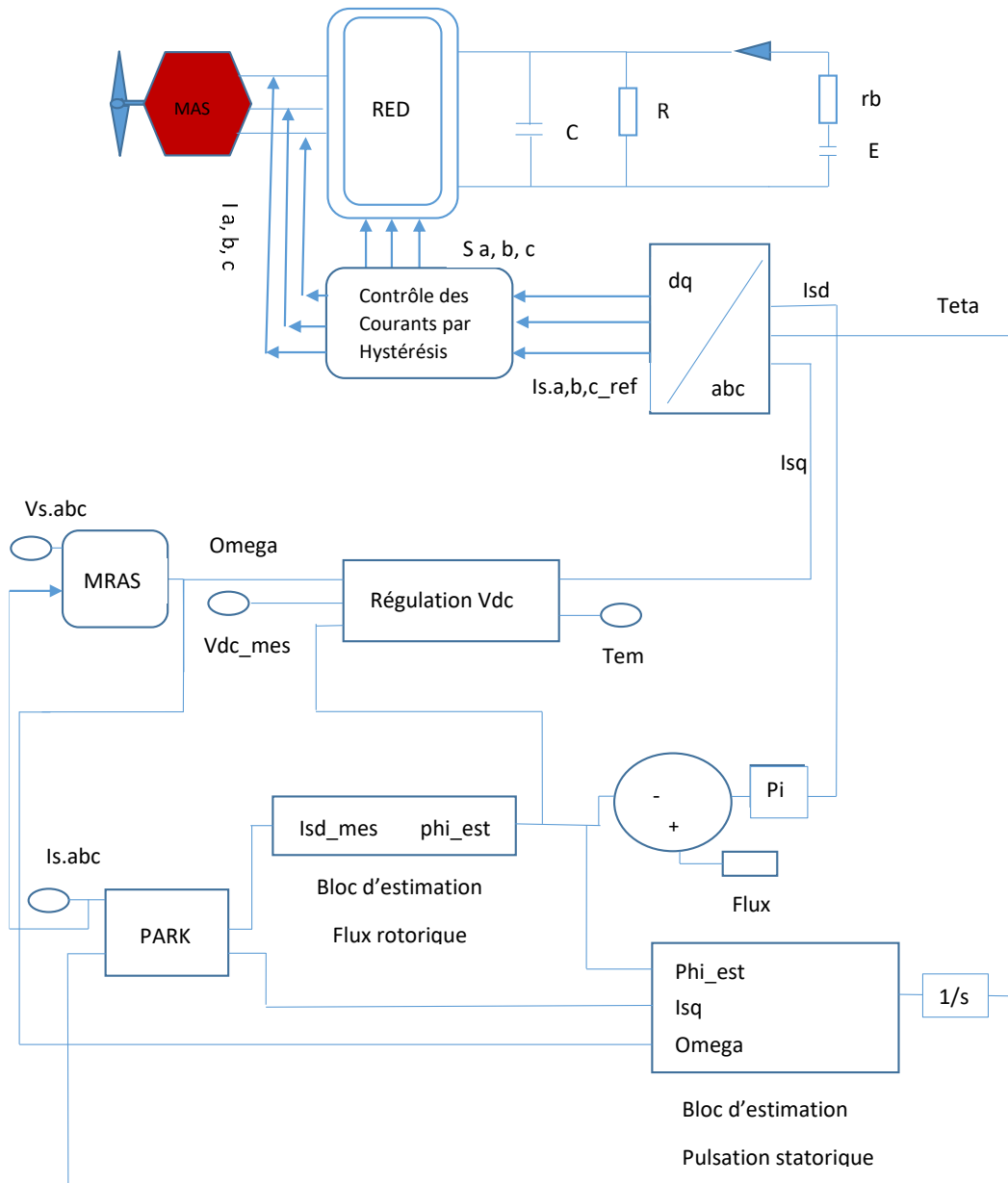


Figure III-7 Schéma globale de la vectorielle avec le MRAS.

### III.8 Résultats et interprétations

Dans cette section, des résultats de simulation sont présentés, les simulations sont réalisées sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Pour évaluer les performances de la stratégie de commande étudiée, nous avons introduit des variations de vitesse. Initialement, la génératrice est entraînée à la vitesse 354.16 tr/min. A l'instant  $t=3s$ , la vitesse est diminuée de 10%. Puis, à l'instant  $t=6s$ , elle est augmentée de 10% par rapport à cette dernière. A savoir, la tension de référence est ( $V_{dc\_ref} = 465V$ ), le flux rotorique de référence est fixé à la valeur nominale ( $\phi_r = 0.7 Wb$ ).

Les résultats de la commande vectorielle obtenus sont donnés ci-dessus :

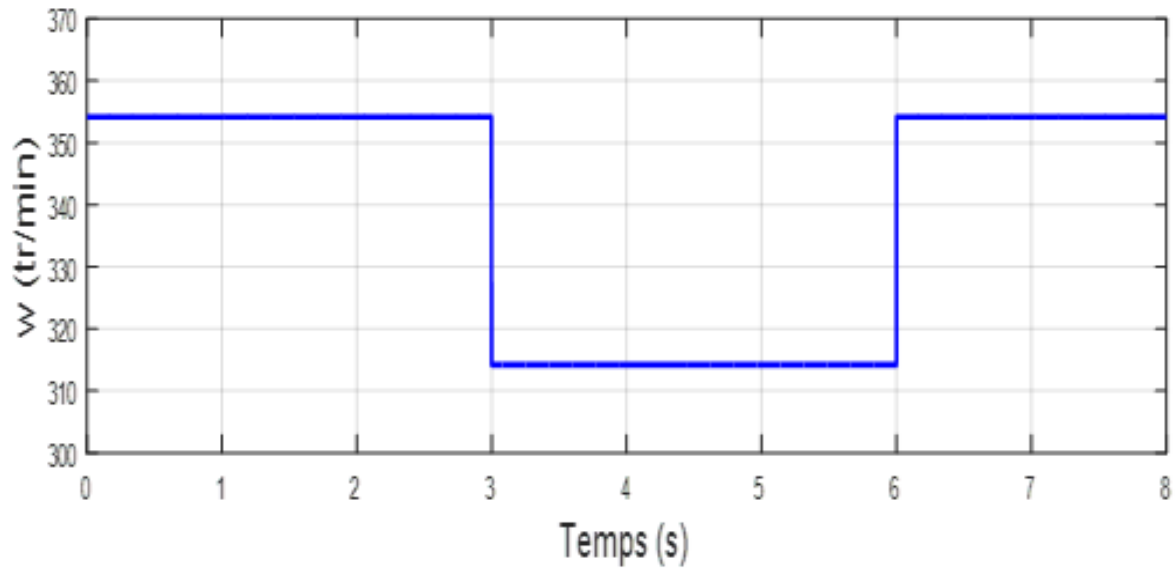


Figure III-8 Allure de vitesse

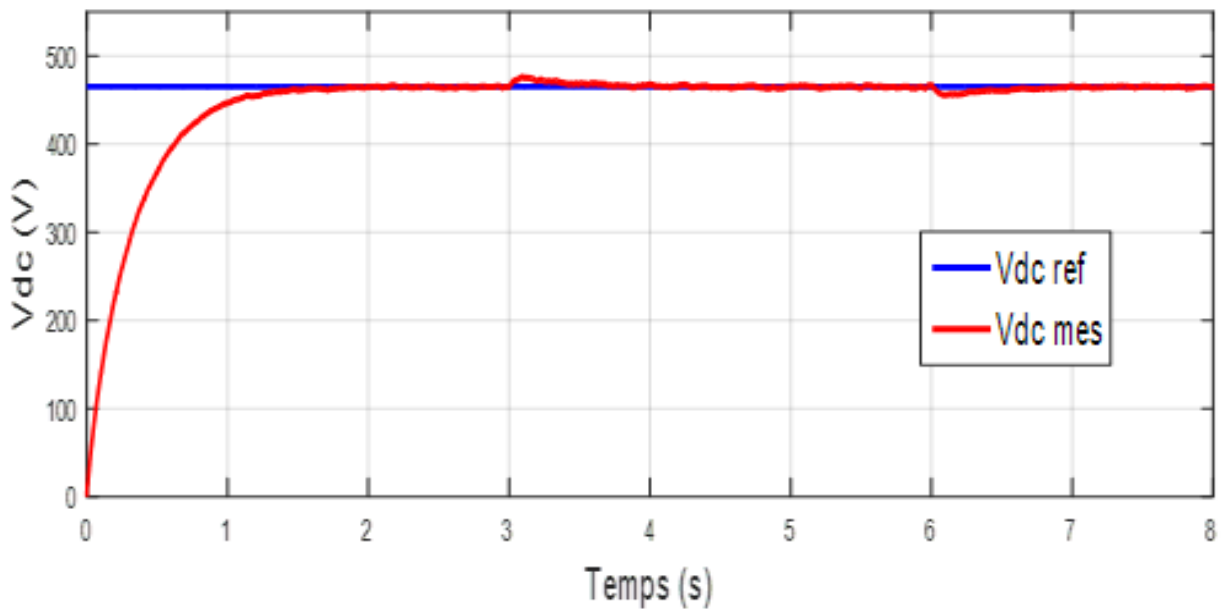


Figure III-9 La tension redressée

La figure III-9, on observe que la tension redressée augmente respectivement de 0 jusqu'à la tension du synchronisme et reste en moyenne égale à 465V. Lorsque la vitesse du vent varie, la commande répond et rejette instantanément la perturbation.

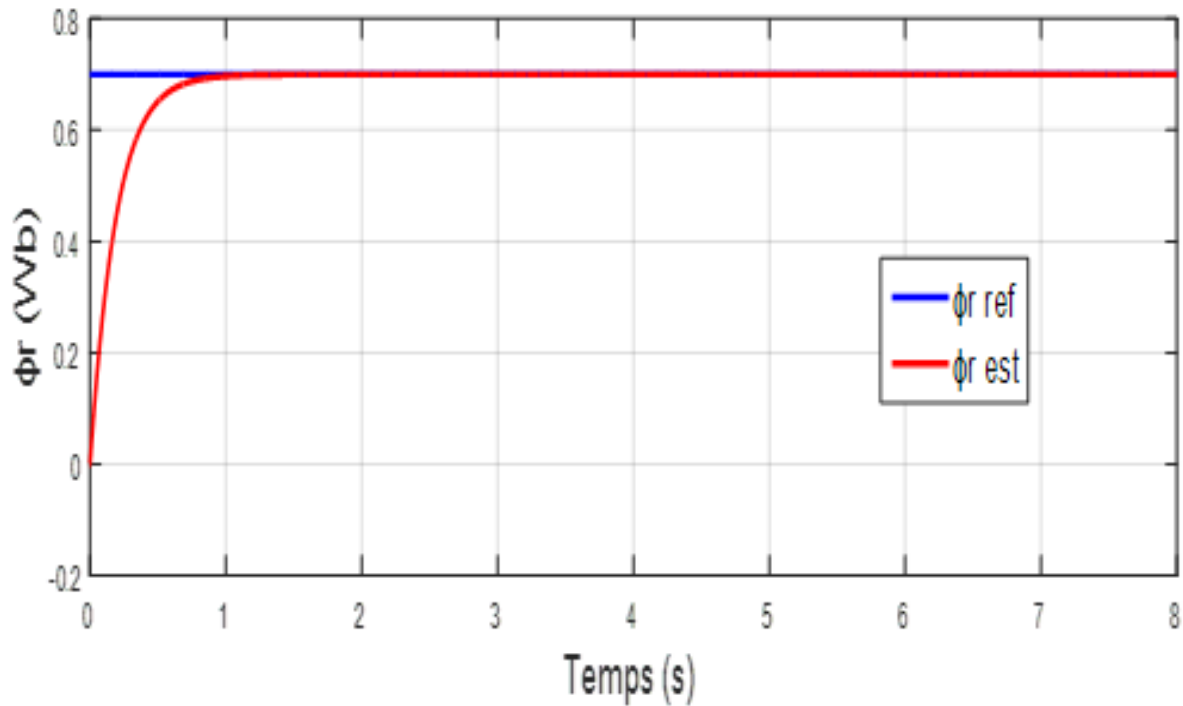


Figure III-10 Le flux rotorique

La figure III-10 représente l’allure du flux rotorique avec la commande vectorielle, on remarque que le flux suit bien sa référence avec une réponse rapide ( $t=0.8$ s) et il est insensible aux variations de vitesse.

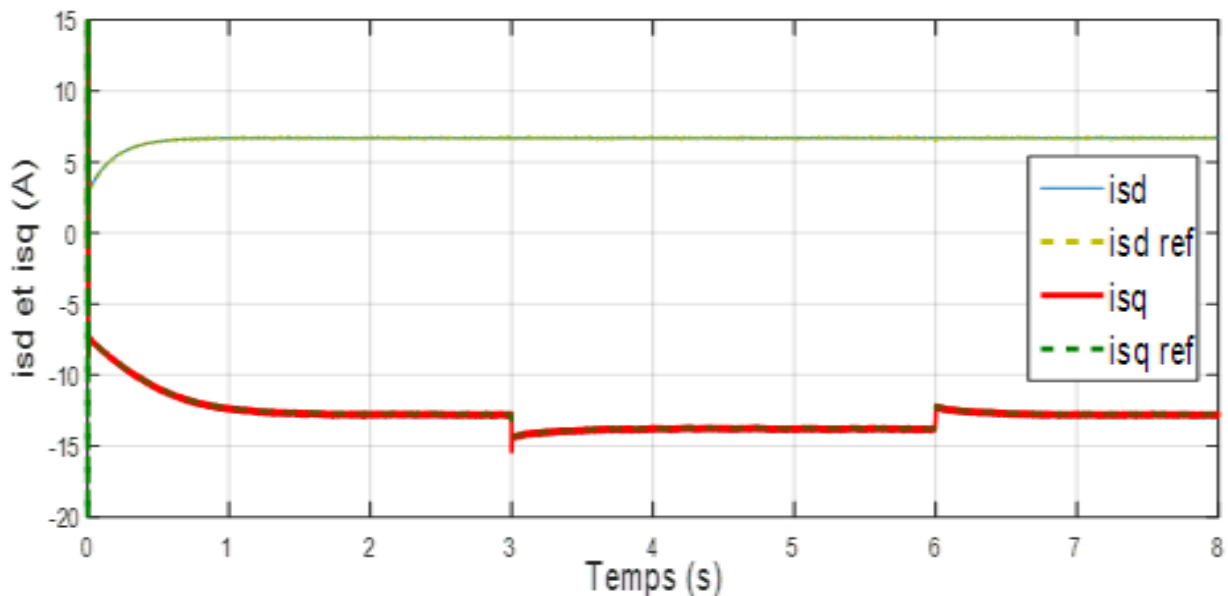
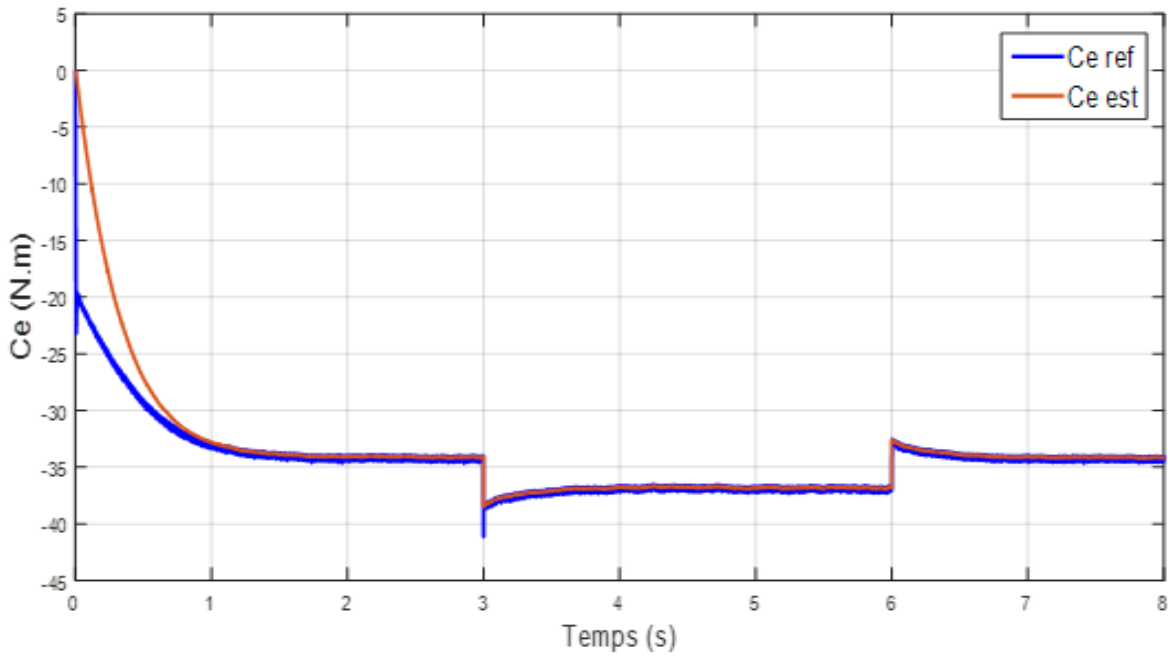


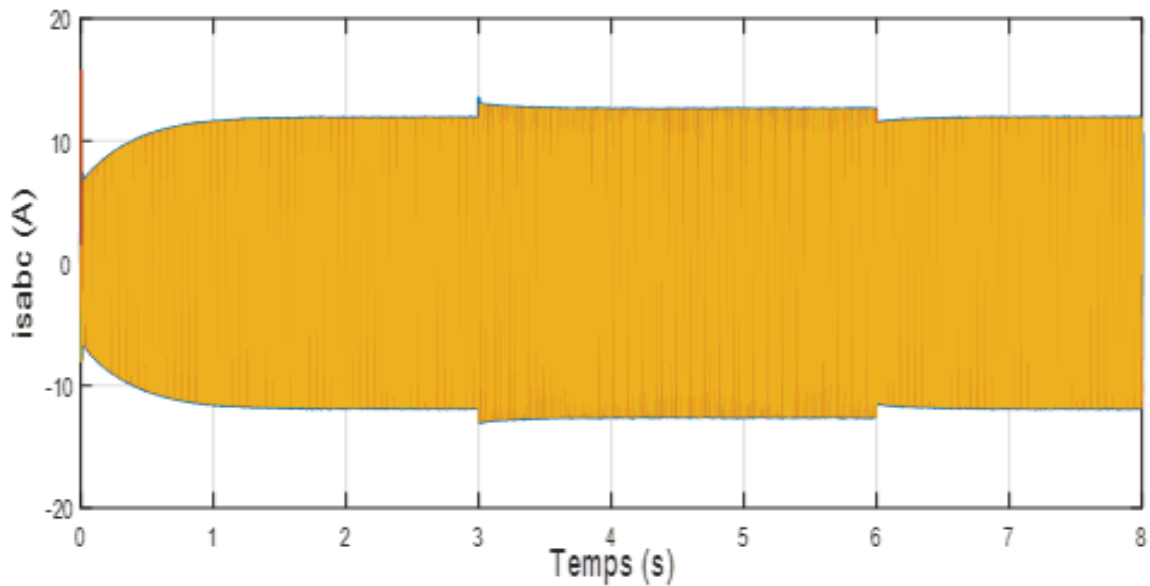
Figure III-11 Les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ .

La figure III-11 représente les courants ( $i_{sd}$ ) et ( $i_{sq}$ ). Les deux courants étant régulés indépendamment l’un à l’autre, l’évolution du courant ( $i_{sd}$ ) est similaire à celle du flux alors que celle du courant ( $i_{sq}$ ) est à l’inverse de celle de la vitesse et suit le couple électromagnétique.

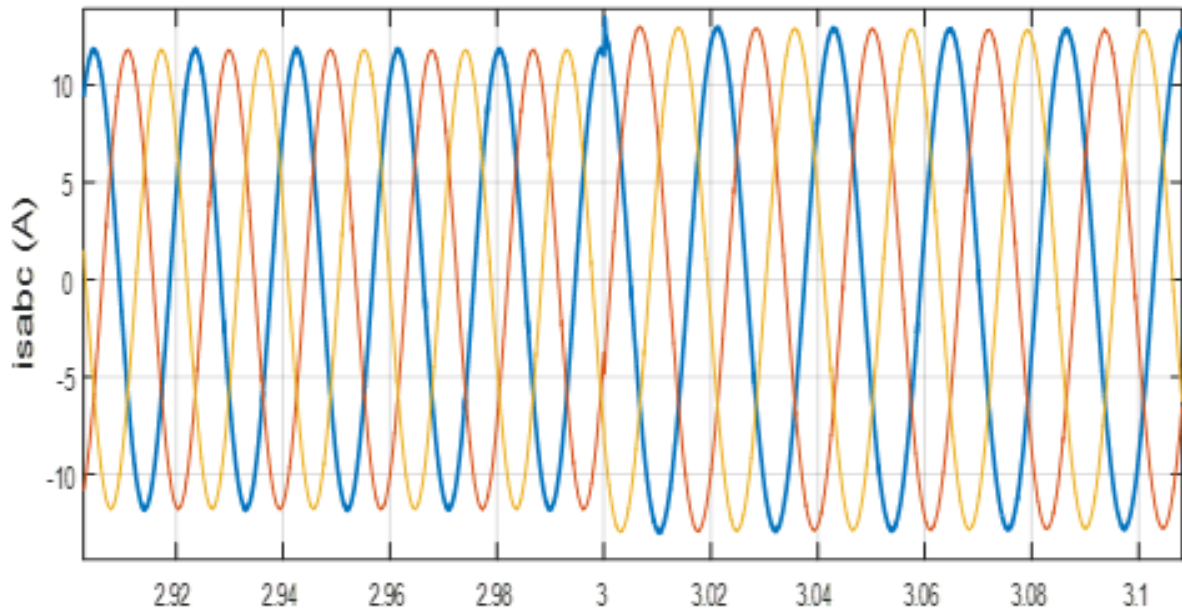


**Figure III-12** Le couple électromagnétique

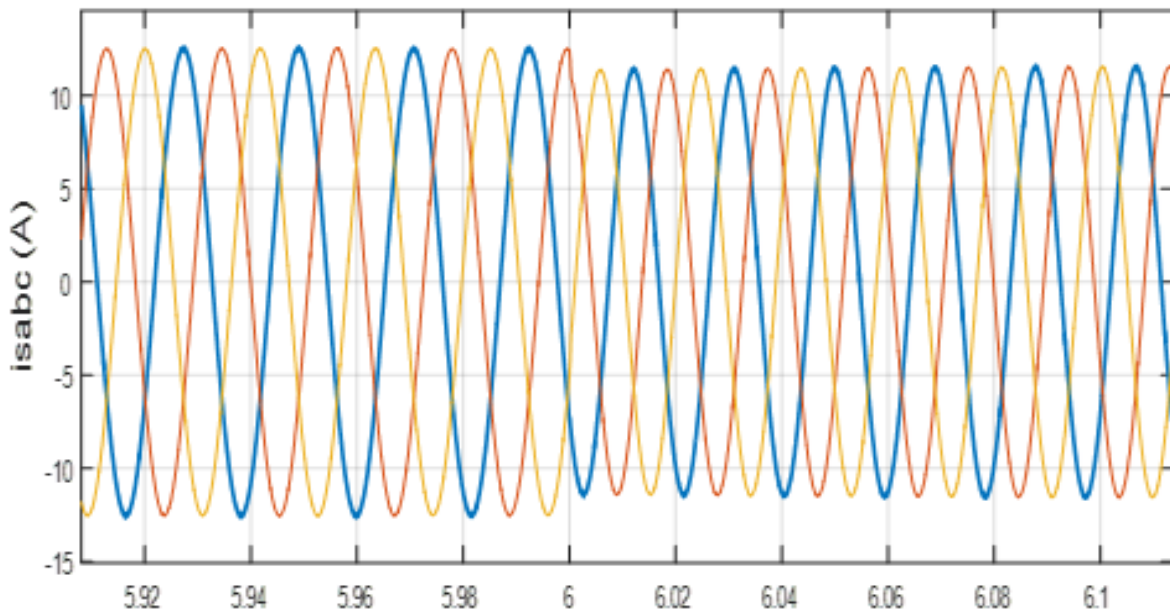
La figure III-12 représente l’allure du couple électromagnétique avec la commande vectorielle. Le couple suit bien sa valeur de référence et il est bien régulé, avec des transitions différentes des valeurs de vitesse. Donc il présente un comportement à l’inverse de la vitesse d’entraînement.



**Figure III-13** Les courants statoriques  $i_{sabc}$



**Figure III-14** Les courants statoriques  $i_{sabc}$  (zoomer au point 3s)



**Figure III-15** Les courants statoriques  $i_{sabc}$  (zoomer au point 6s)

Les figures III-14 et III-15 montrent un zoom des valeurs temporelles des courants statoriques de la figure III-13 aux alentours des variations de la vitesse, ces courants sont sinusoïdaux. La transition est relativement brusque suite à la variation de la référence de  $i_{sq}$ , les variations graduelles simultanées  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  reprend simultanément aux variations de flux et de couple.

Les résultats obtenus avec le test de l'influence de la vitesse montre qu'elle est bien régulée, donc sont très satisfaisants, les objectifs de commande sont atteints, avec une certaine sensibilité aux perturbations imposées. Cependant, le flux rotorique montre une bonne dynamique et un temps de réponse. Quant au couple, il montre aussi une très bonne dynamique.



En résumé cette stratégie impose un niveau de saturation constant, d'où une commande linéaire, (autour du point de saturation induite par le flux) donc une meilleure dynamique, par contre cela induit des variations brusque des courant lors de transition.

Les résultats de la commande vectorielle avec MRAS obtenus sont donnés ci-dessus :

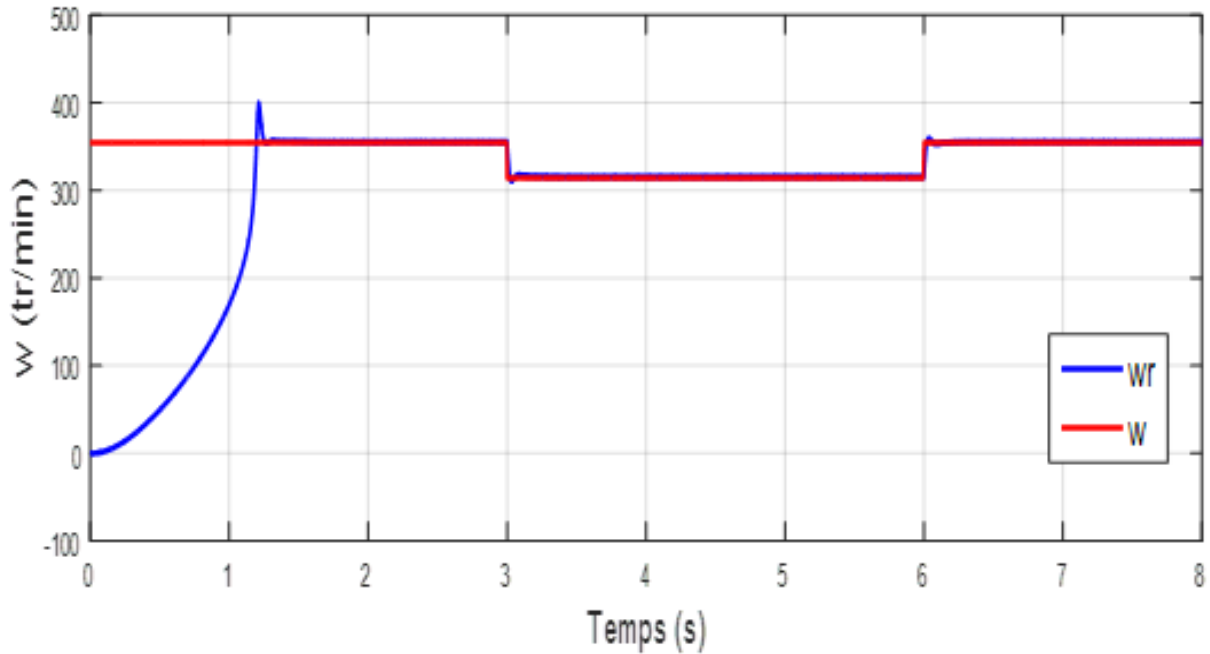


Figure III-16 Allure de vitesse

Sur la courbe de vitesse de la figure III-16, une réponse au bout de 1sec, à l'instant 1.3s nous remarquons un pic dans la phase transitoire, après cet instant un bon suivi de la référence. La vitesse estimée suit l'évolution de la vitesse réelle avec un dépassement moins important.

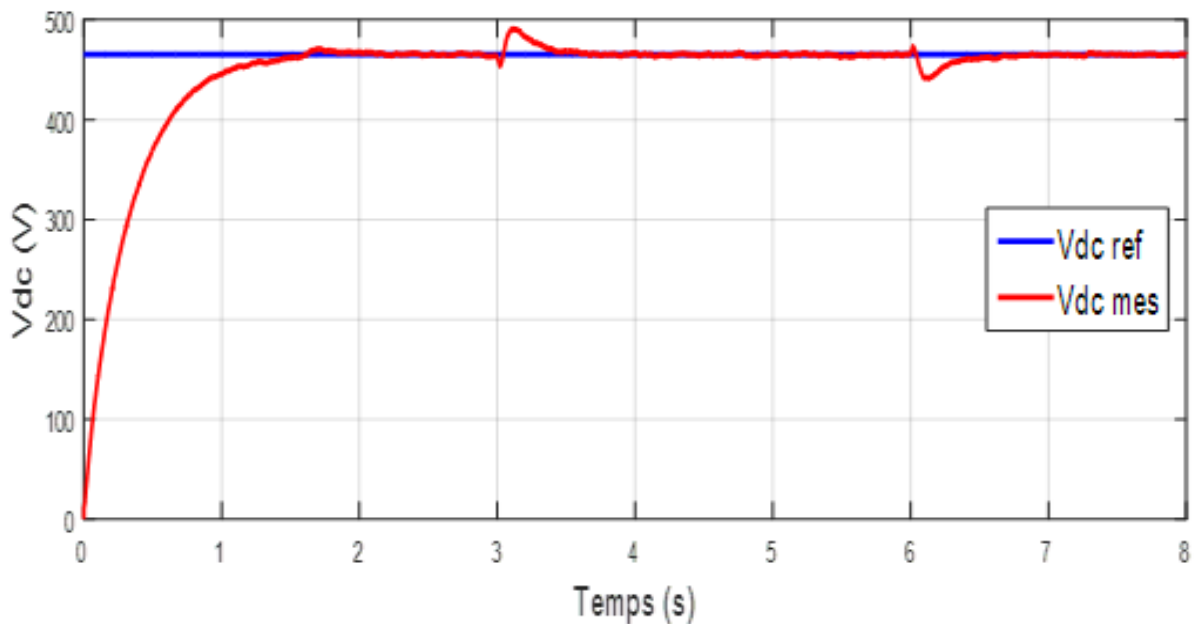


Figure III-17 Allure de la tension redressée Vdc

La figure III-17, on observe que la tension redressée augmente respectivement de 0 jusqu'à la tension du synchronisme et reste en moyenne égale à 465V. En effet, lorsque la vitesse varie, la commande intervient pour rejeter la perturbation.

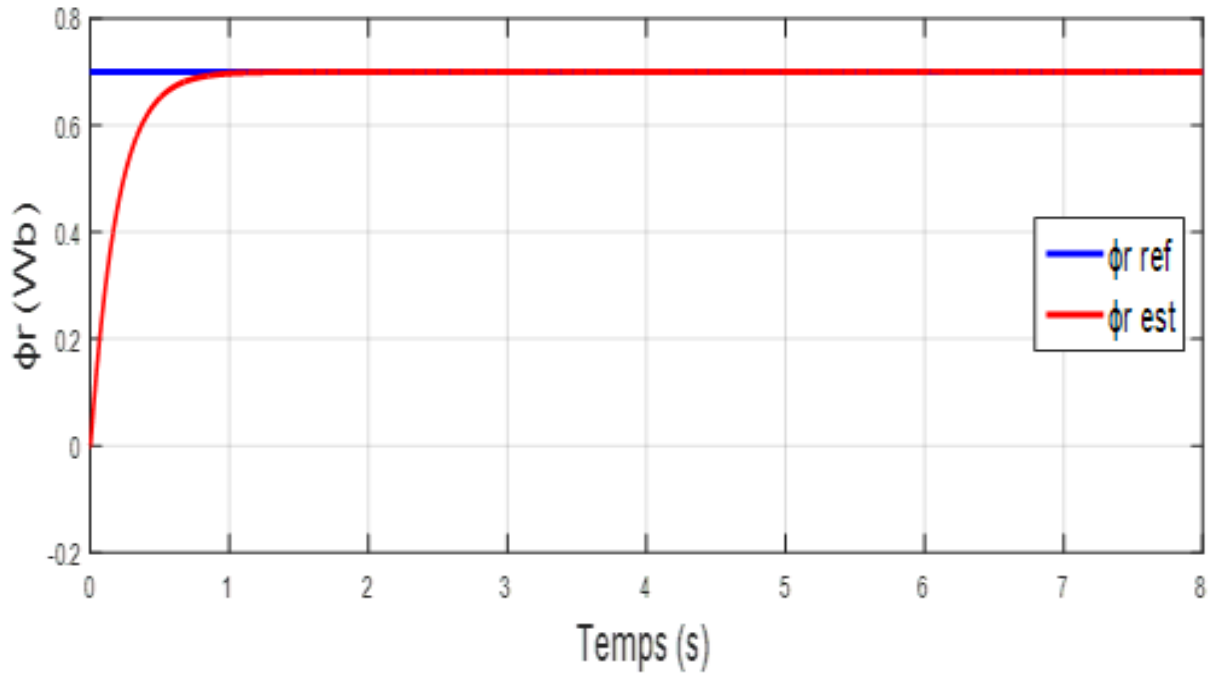


Figure III-18 Allure du flux rotorique

La figure III-18, représente l'allure du flux rotorique qui suit bien sa référence.

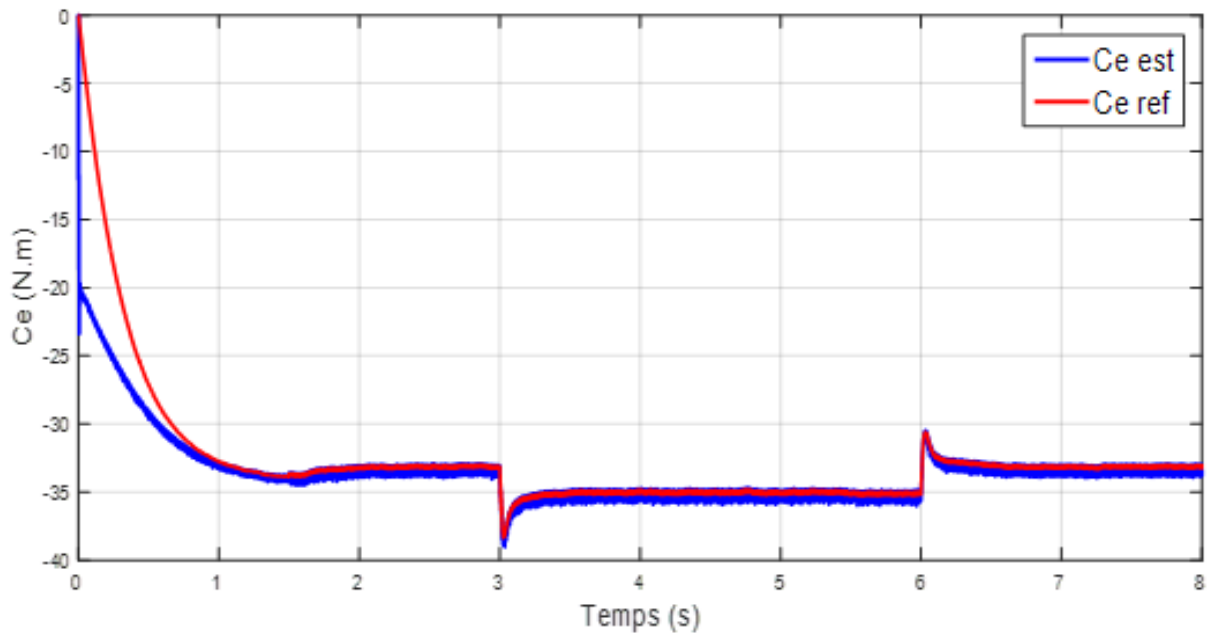


Figure III-19 Allure du couple électromagnétique.

La figure III-19 représente le couple électromagnétique qu'est d'allure habituelle, il suit parfaitement sa valeur de référence

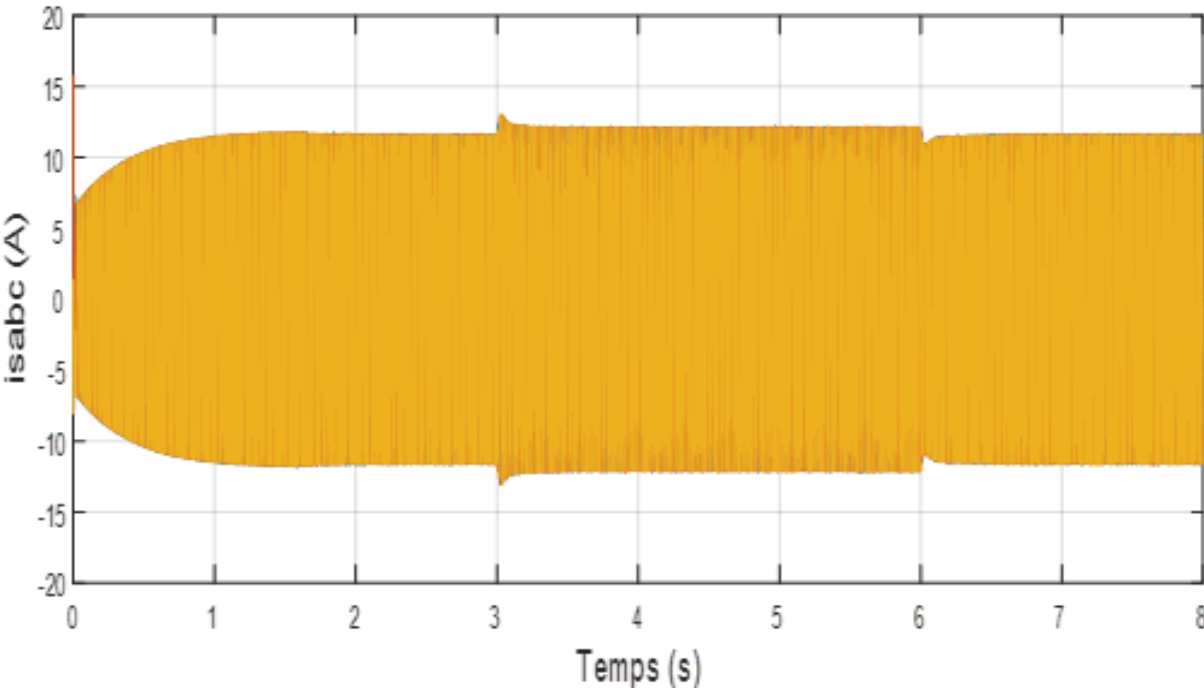


Figure III-20 Allure des courants statoriques  $i_{sabc}$

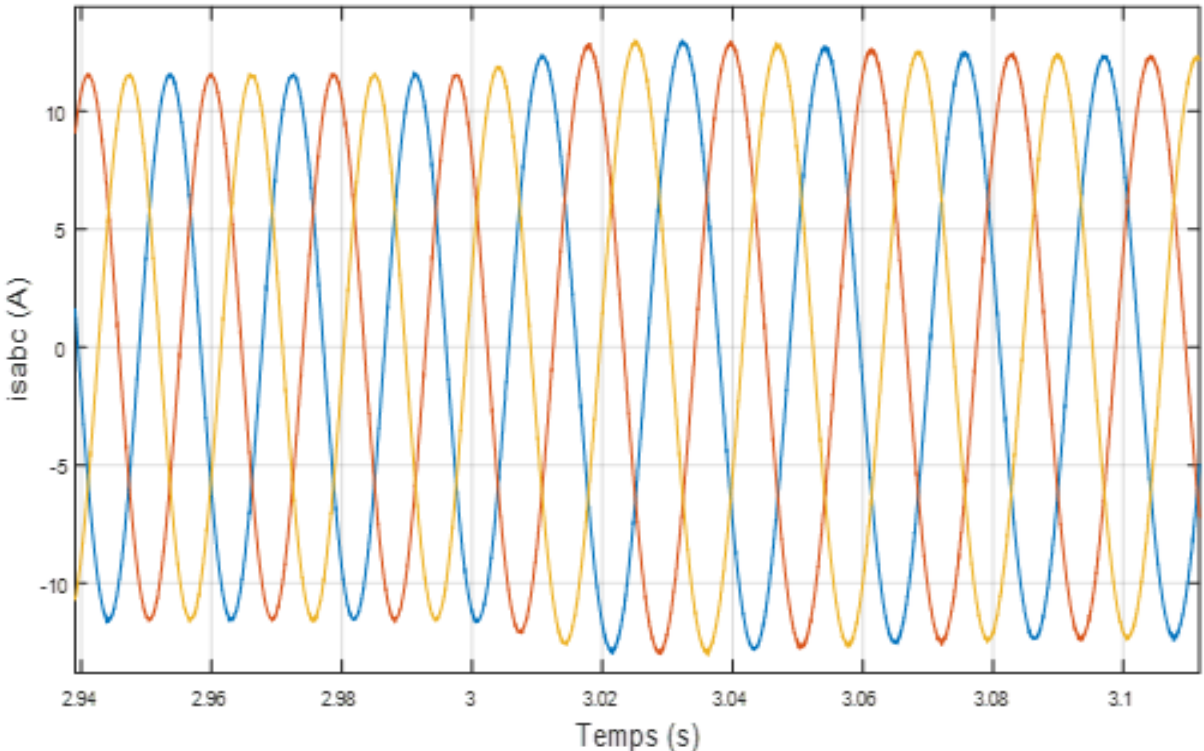
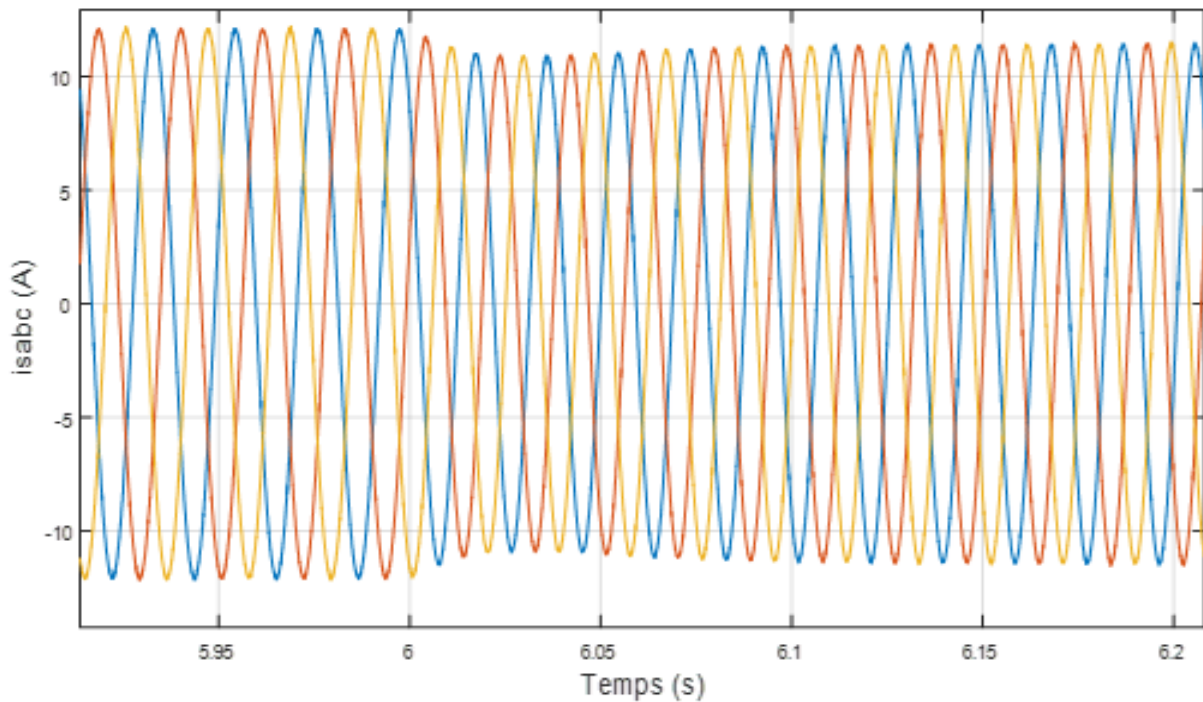
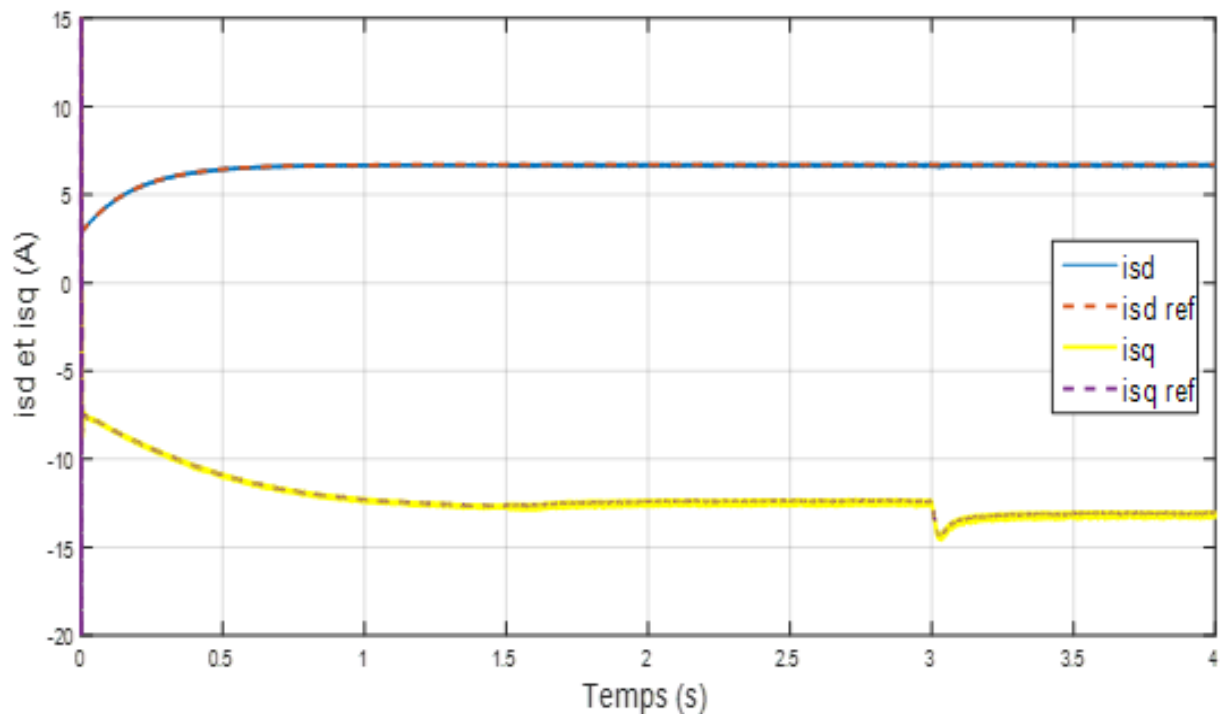


Figure III-21 Allure des courants statoriques  $i_{sabc}$  (zoom  $t=3$ s)



**Figure III-22** Allure des courants statoriques (zoom t=6s)

Les figures III-21 et III-22 montrent un zoom des valeurs temporelles des courants statoriques de la figure III-20 aux alentours des variations de vitesses à 3s et 6s, ces courants sont sinusoïdaux.



**Figure III-23** Allure des courants isd et isq

La figure III- 23 montre que le courant statorique suivant l’axe q ( $i_{sq}$ ) est l’image du couple électromagnétique. Alors que le courant suivant l’axe d ( $i_{sd}$ ) est l’image du flux.

L'étude des résultats met clairement en évidence que la commande MRAS, présente des performances très satisfaisantes, en bref, les résultats de simulation montrent les performances de notre commande sans capteur tel que :

- Une bonne poursuite de la vitesse de référence.
- Démarrage sans dépassement.
- Rejet rapide des perturbations, avec une faible chute de vitesse.

### **III.9 Conclusion**

Ce chapitre est consacré à une étude comparative entre la commande vectorielle à orientation du flux rotorique qui est fragilisée par les variations paramétriques, et la commande MRAS classique. Cette étude est consacrée à la synthèse d'une commande vectorielle sans capteur pour un générateur asynchrone. L'estimateur proposé est basé sur l'approche du MRAS classique qui intègre l'estimation des composant des flux rotorique qui est basé uniquement sur la mesure des tensions et des courants statoriques. L'objectif étant non seulement de supprimer le capteur mécanique de vitesse, mais également de rétablir le découplage entre le flux et le couple électromagnétique du contrôle vectoriel, une simulation numérique pour des fonctionnements autonome, les résultats obtenus confirment la validité de la méthode et prouvent qu'il est possible de concevoir un estimateur de vitesse pour la commande robuste d'une machine asynchrone sans capteur dotée d'excellentes performances. Par conséquent, cette méthode peut trouver une utilisation pratique dans de nombreuses applications plus systèmes d'entraînement à vitesse variable et sans capteur mécanique.

## Conclusion Générale

### Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude des petites unités éoliennes en fonctionnement autonome, l'alimentation des sites non connecté au réseau ou les sites isolés. Pour des raisons de robustesse et de prix de revient aussi que la fiabilité en a choisi d'étudier la machine asynchrone à cage d'écureuil en mode générateur, pour obtenir notre objectif de garder l'amplitude et la fréquence des tensions générés à des valeurs constante quelques soit la puissance demandé ou la vitesse de vent exercé.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un état de l'art sur les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne. Et les différents types d'éoliennes, ainsi qu'une brève explication sur les sites connectés au réseau et les sites autonome et les différents conversions utilisés.

La deuxième partie de ce travail, on a présenté la modélisation de la machine asynchrone. Pour cela, nous avons utilisé la transformation de Park. En effet, cette méthode est plus simple à utiliser pour le développement de la structure de commande présentée ainsi que la modélisation de convertisseur statique, à la fin, on a fait des tests par une simulation sur Matlab/Simulink en fonctionnement moteur et on a mis des figures et des commentaires.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté le principe du contrôle vectoriel à flux rotorique orienté (FOC). En effet, cette stratégie est basée sur le contrôle de flux rotorique, car cette dernière permet d'obtenir un découplage total entre le flux et le couple. Pour tester les performances et la robustesse du schéma de commande et d'estimation de la vitesse, des essais de simulations numériques ont été effectués sous environnement Matlab/Simulink. Puis par la suite en a élaboré une deuxième méthode sans capteur mécanique pour cette étude en choisissant la commande MRAS classique (Système Adaptatif à Modèle de Référence). L'objectif principal de l'estimation de vitesse est pour donner la valeur de flux de référence égale à celle ajustable. La faisabilité de cette implantation, associée à un DFOC a été abordée. La vitesse est comparée à partir des grandeurs mesurées et intégrées dans le modèle MRAS. Les résultats de simulation montrent l'apport significatif des performances de la stratégie de commande sans capteur proposée pour un entraînement électrique basée sur la technique MRAS y compris dans les conditions de fonctionnement autonome.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] **L. MIGUEL** «Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée», Thèse de Doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2008.
- [2] **S.A.E.M. ARDJOUN** «Commande d'un système d'énergies renouvelables Multisources relié au réseau électrique», Thèse de Doctorat, Université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2016
- [3] **K. BERABEZ** «Effets des dispositifs FACTS sur l'amélioration de la qualité d'énergie produite par un générateur asynchrone auto-excité », Mémoire de Magister en énergie électrique, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, 2015.
- [4] **F. POITIERS** « Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [5] **site.eolie-energie.fr**
- [6] **ecosources.org**
- [7] **K. IDJDARENE** « contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éolien autonomes » Thèse de Doctorat, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, Université Lille 1, 2010.
- [8] **A. ZAIMI** « Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Magister en énergie électrique, 2014.
- [9] **F. KENDOULI** «Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique», Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012.
- [10] **M. HACIL** «Amélioration des Performances des Energies Eoliennes», Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012.
- [11] **B. BENMESSAOUD, G.FEDILA** «Contrôle Directe du Couple et du Flux Rotorique dans une Génératrice Asynchrone Autonome», Projet fin d'étude master en électrotechnique, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, 2017.
- [12] **F. OUKRID, CH.RABHI** «Commande d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone double étoile », Projet fin d'étude master en électrotechnique, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, 2017.
- [13] **S. AHMED BRAHIM, S.Y.BOBOT** «Elimination des perturbations générées par une éolienne dans un réseau électrique», Projet fin d'étude master en électrotechnique, Université Abou BekrBelkaid-Tlemcen, 2017.

[14] **M.I.MESSAI, M.M.REDOUANI** «Contrôle Direct du Couple d'une Machine Asynchrone», Projet fin d'étude master académique en génie électrique, Université d'El-Oued, 2014.

[15] **M.I.BELAMBRI** «Modélisation et Commande des Convertisseurs AC-DC», Projet fin d'étude master académique en génie électrique, Université LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, 2012.

[16] **A.MECHERNENE, M.ZERIKAT, N.BENOZZA, S.CHEKROUM, N.NEHARIR** «Contrôle sans capteur de vitesse d'un moteur asynchrone basé sur l'approche du MRAS-Mutuel avec flux rotorique orienté», Article publier, Université Abou BekrBelkaid-Tlemcen, 2014.

[17] **S.TAMALOUZT** «Commande des systèmes électro-énergétiques», cour master 1 et 2 électrotechnique et électromécanique.

[18] **Site éolienne ooreka.fr**

[19] **researchgate.net**

[20] **Z.TAMINDJOUTE, A.TOUATI** «Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)», Projet fin d'étude master académique en génie électrique, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, 2017.

[21] **KH.RAMDANI, O.EL.RAMDANI** «Etude des différents types de convertisseurs utilisés dans la production des énergies renouvelables. Application dans l'éolienne à base de GSAP», Projet fin d'étude master académique en génie électrique, université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.

[22] **N. HAMDI** «Modélisation et Commande des génératrices éoliennes », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.

[23] **A.A.ZAHOU, O.A.BOUDENNA** «Etude, Modélisation et Commande d'un système éolien à base d'une turbine à axe vertical», Projet fin d'étude master académique en génie électrique, Université Ahmed Draïya Adrar, 2021.



## Annexe

Paramètre de la machine asynchrone modélisé :

### Les caractéristiques :

690Tr/min	Vitesse nominale
4	Nombre de pair de pôle
50Hz	Fréquence
5.5KW	Puissance nominale.
230/400V	Tension statorique nominale.

### Paramètres mécaniques :

$J= 0.230 \text{ kg/m}^2$	Moment d'inertie
$F=0.0025 \text{ N./rad.s}^{-1}$	Coefficient de frottement.

### Paramètres électriques

$R_s=1.07131 \ \Omega$	Résistance du stator
$R_r=1.29511 \ \Omega$	Résistance du rotor.
$L_s=0.1136782 \ \text{H}$	Inductance du stator.
$L_r=0.1096013 \ \text{H}$	Inductance du rotor.