

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DEL'ENSEIGNEMENTS SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**FACULTE DE LA TECHNOLOGIE**

**Département GENIE ELECTRIQUE**

**Projet de fin de cycle  
En vue de l'obtention du diplôme  
De Master en électrotechnique**

**Option : Commande des systèmes électriques (CSE)  
Et électromécanique (ELM)**

**Commande vectorielle d'une MADA dédiée à  
l'énergie éolienne**

**Réalisé par :**

**Mr KOURANE Yamine**

**Mr GANI Khaled**

**Encadré par :**

**Mr FELLA Boualem**

**Mr BOUDRIES Zoubir**

**Promotion 2015**



# Remerciements

*Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et d'exprimer notre gratitude envers le Bon Dieu ,qui nous a donné la patience et le courage pour que nous puissions achever ce travail.*

*Nous adressons tous nos sincères et respectueux remerciements à nos promoteurs, Monsieur B.Fella et Z.Boudries pour leur dévouement et leur disponibilité durant la préparation de ce mémoire.*

*Nous tenons également, à remercier toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à sa réalisation.*

*Enfin, nos remerciements s'adressent aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.*



*Je dédie mon travail avant tout A mes chers parents, Mon PERE qui ne cesse pas de M'encourager, et qui Ma toujours soutenu, Ma jolie MERE Symbole de Sacrifice et qui est tout pour Moi, pour Sa tendresse profonde « que dieu me les protègent ».*

✚ *Toute la famille KOURANE.*

✚ *A mes frères et Sœurs.*

✚ *A mon oncle et sa famille.*

✚ *A mon binôme K.GANI et sa famille.*

✚ *A tous mes amis.*

*Yamine KOURANE*



*Je dédie ce mémoire a :*

*Ma très chère mère et mon père.*

*Mes frère et sœurs.*

*Toute la famille GANI.*

*Mon binôme Y.KOURANE et sa famille.*

*Toute mes amies.*

*Et tout ceux que me sont chers.*

*Khaled GANI*

## LISTE DES FIGURES

### **Chapitre I : Etat de l'art de la conversion électromécanique**

Figure .I. 1: Constitution d'une centrale éolienne.....	3
Figure .I. 2: Constitution de la nacelle .....	4
Figure .I. 3: Éoliennes à axe vertical : turbine Savonius. Turbine Darrieus et Darrieus en H... 6	6
Figure .I. 4: éolienne en amont et en aval .....	7
Figure .I. 5: Coefficient de puissance des différentes configurations d'éoliennes .....	7
Figure .I. 6: Éolienne à vitesse fixe .....	8
Figure .I. 7: Caractéristique de réglage d'une éolienne à vitesse fixe de 300 kW.....	9
Figure .I. 8: Exemple de puissance générée par une éolienne à vitesse fixe de 300kw. ....	9
Figure .I. 9 : Système éolien basé sur la MAS à cage : .....	14
Figure .I. 10 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles. 15	15
Figure .I. 11 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	16
Figure .I. 12 : MAS connectée sur le réseau à travers redresseur – onduleur .....	17
Figure .I. 13 : Générateur éolien à base de MADA.....	18
Figure .I. 14: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	18
Figure .I. 15: Évolution de la configuration électrique de la machine asynchrone.....	19
Figure .I. 16: Les modes de fonctionnement de la MADA .....	21
Figure .I. 17: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless".....	22
Figure .I. 18: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	22
Figure .I. 19: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	23
Figure .I. 20: MADA, structure Kramer.....	24

### **Chapitre II : Modélisation du système éolien**

Figure .II. 1: structure à modéliser .....	25
Figure .II. 2: Schéma de la turbine éolienne.....	26
Figure .II. 3: Modèle mécanique simplifié de la turbine .....	27
Figure .II. 4: Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de la turbine et de l'angle d'orientation .....	28
Figure .II. 5: Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.....	28

Figure .II. 6: Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite .....	32
Figure .II. 7: Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT .....	33
Figure .II. 8: les quartes zones de fonctionnement de la turbine.....	33
Figure .II. 9: Schéma bloc de système d'orientation des pales .....	35
Figure .II. 10: Représentation schématique de la MADA.....	36
Figure .II. 11: Modèle de PARK de la MADA .....	39
Figure .II. 12: Représentation de la machine dans le repère diphasé .....	40
Figure .II. 13: schémas d'un onduleur de tension triphasé.....	43
Figure .II. 14: Schéma de la simulation de l'onduleur et son commande.....	45
Figure .II. 15: schéma du bus continu .....	45
Figure .II. 16: régulation de la tension du bus continu.....	46
Figure .II. 17: Représentation du filtre de liaison RL .....	47
Figure .II. 18: Modèle obtenu du filtre dans le repère diphasé (dq).....	48

**Chapitre III : Stratégies de commande et simulation.**

Figure .III. 1 Principe de la commande vectorielle .....	50
Figure .III. 2 : Schéma de principe de la commande en puissance de la MADA. ....	52
Figure .III. 3 : Description des couplages. ....	55
Figure .III. 4 : Reconstitution des tensions $V_{qr}$ et $V_{dr}$ .....	56
Figure .III. 5 : Schéma bloc du système à réguler.....	56
Figure .III. 6 : Schéma bloc du système régulé par un PI .....	57
Figure .III. 7 : Allure de la puissance active. ....	59
Figure .III. 8 : Allure de la puissance réactive. ....	59
Figure .III. 9 : Allure des courants statoriques.....	60
Figure .III. 10 : Allure des courants rotoriques. ....	60
Figure .III. 11 : Allure de tension d'une phase rotorique.....	61
Figure .III. 12 : Allure de couple électromagnétique $C_{em}$ .....	61
Figure .III. 13 : Allure du flux $\phi_{sd}$ $\phi_{sq}$ .....	62
Figure .III. 14 : Allure du courant $I_{rd}$ et $I_{rq}$ .....	62
Figure .III. 15 : Profil du vent. ....	63
Figure .III. 16 : Coefficient de puissance en fonction de temps et de $\lambda$ . ....	63
Figure .III. 17 : Allure de la vitesse et du glissement.....	64
Figure .III. 18 : Allure de la puissance active statorique.....	64
Figure .III. 19 : Allure de la puissance réactive statorique.....	65

Figure .III. 20 : Allure des courants statoriques.....	65
Figure .III. 21 : Allure des courants rotoriques.....	66
Figure .III. 22 : Allure de puissance active statoriques avec variation de $R_r' = 2 \cdot R_r$ .....	67
Figure .III. 23 : Allure de puissance réactive statoriques avec variation de $R_r' = 2 \cdot R_r$ .....	67
Figure .III. 24 : Allure de puissance active statoriques avec variation de $f' = 5 \cdot f$ .....	68
Figure .III. 25 : Allure de puissance réactive statoriques avec variation de $f' = 5 \cdot f$ .....	68

## NOTATIONS & ACRONYMES

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MSAP	Machine Asynchrone à Aiment Permanent
Matlab	Matrix Laboratory
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel Intégral
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte

### Symboles

$\beta$	Angle de l'orientation de pale
$C_p$	Coefficient de puissance
$C_{p\_max}$	Coefficient de puissance maximal
$C_t$	Couple de la turbine
$C_g$	Couple du générateur
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$c_m$	Couple mécanique
$\rho$	Densité d'air
$G$	Gain du multiplicateur
$J_t$	Inertie de la turbine
$J_g$	Inertie du générateur
$R$	Longueur de pales
$P_{aer}$	Puissance aérodynamique
$P_{aer\_ref}$	Puissance aérodynamique de référence
$P_V$	Puissance du vent
$S$	Surface circulaire balayée par la turbine
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine
$\Omega_G$	Vitesse de rotation du générateur
$V$	Vitesse du vent
$V_{est}$	Vitesse du vent estimée



$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique du MADA
$\theta_s, \theta_r$	Angle du stator et du rotor
$\sigma$	Coefficient de dispersion
$f$	Coefficient de frottement
$g$	Coefficient de glissement
$P$	Constante de Laplace
$\tau_s, \tau_r$	Constante de temps statorique et rotorique
$C_e$	Couple électromagnétique
$C_r$	Couple résistant
$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$	Courants statoriques et rotoriques dans le repère (d q)
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq}$	Flux statoriques et rotoriques dans le repère (d q)
$K_i$	Gain intégral
$K_p$	Gain proportionnel
$M$	Inductance mutuelle
$L_s, L_r$	Inductances propres du stator et du rotor
$[P]$	Matrice de transformation de Park
$J$	Moment d'inertie
$P$	Nombre de paires de pôle
$P_s, P_r$	Puissance active statorique et rotorique
$Q_s, Q_r$	Puissance réactive statorique et rotorique
$\omega_s, \omega$	Pulsation du stator et du rotor
$R_s, R_r$	Résistances du stator et du rotor
$U_c$	Tension du bus continu
$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$	Tensions statoriques et rotoriques dans le repère (d q)
$[I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T$	Vecteurs des courants rotoriques dans le repère (a b c)
$[I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T$	Vecteurs des courants statoriques dans le repère (a b c)
$[\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}]^T$	Vecteurs des flux rotoriques dans le repère (a b c)
$[\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T$	Vecteurs des flux statoriques dans le repère (a b c)
$[V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T$	Vecteurs des tensions rotoriques dans le repère (a b c)
$[V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T$	Vecteurs des tensions statoriques dans le repère (a b c)
$\Omega$	Vitesse mécanique

## SOMMAIRE

Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	1
<b><u>Chapitre I : Etat de l’art de la conversion électromécanique.</u></b>	
Introduction .....	2
I.1. Historique et croissance de l’exploitation de l’énergie éolienne .....	2
I.2. Définition d’une éolienne : .....	3
I.3. Constitution d'une éolienne.....	3
I.4. Différents types d'éoliennes .....	5
I.4.1. Éoliennes à axe vertical .....	5
I.4.2. Éoliennes à axe horizontal .....	6
I.5. Les Éoliennes à vitesse fixe .....	8
I.6. Les éoliennes à vitesse variables.....	10
I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	10
I.7.1. Avantages.....	10
I.7.2. Inconvénients .....	11
I.8. Production d’électricité par éolienne .....	12
I.8.1. Eolienne autonome.....	12
I.8.2. Eolienne raccordée au réseau.....	12
I.9. Machines électriques et système de conversion d’énergie éolienne .....	12
I.9.1. Machines à courant continu .....	13
I.9.2. Machines à reluctance variable (MRV) .....	13
I.9.3. Systèmes utilisant les machines synchrones (MS et MSAP).....	13
I.9.4. Systèmes utilisant les machines asynchrones.....	14
I.9.4.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	15
I.9.4.2 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une Interface d'électronique de puissance .....	16

---

I.9.5. La machine asynchrone double alimentation (MADA).....	17
I.9.5.1. Définition .....	17
I.9.5.2. Constitution de la MADA .....	18
I.9.5.3. Intérêt de la MADA .....	19
I.9.5.4. Différents modes de fonctionnement de la MADA .....	20
I.9.5.4.1. Stationnaire.....	20
I.9.5.4.2. Hyposynchrone .....	20
I.9.5.4.3. Synchrone .....	20
I.9.5.4.4. Hypersynchrone .....	20
I.9.5.5. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA .....	20
I.9.5.5.1. fonctionnement moteur .....	20
I.9.5.5.2. fonctionnement générateur.....	21
I.9.5.6. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless" .....	21
I.9.5.7. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	23
I.9.5.8. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer.....	23
Conclusion.....	24

## **Chapitre II : Modélisation du système éolien.**

Introduction .....	25
II.1. Description de la structure choisie à modéliser .....	25
II.2. Modélisation de Profil du vent .....	26
II.3. Modélisation de la turbine éolienne.....	26
II.3.1. Hypothèses simplificatrices .....	27
II.3.2. Modèle de la turbine .....	27
II.3.3. Modèle du multiplicateur.....	28
II.3.4 Équation dynamique de l'arbre de transmission.....	29
II.3.5 Schéma bloc du modèle de la turbine .....	30
II.3.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	30

---

II.3.6.1 Extraction du maximum de puissance (MPPT).....	30
II.3.6.2 Schéma bloc de la turbine en MPPT .....	32
II.3.6.3 Différentes phases de fonctionnement.....	33
1. La phase de démarrage .....	34
2. La phase d'extraction de la puissance maximale (phase M.P.P.T).....	34
3. Phase à vitesse mécanique quasi constante .....	34
4. Phase à puissance constante .....	34
II.3.7 Système d'orientation des pales .....	34
II.4. Modélisation de la MADA .....	35
II.4.1. Hypothèses simplificatrices .....	35
II.4.2. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan abc .....	36
II.4.2.1. Equations électriques de la machine.....	37
II.4.2.2. Equations magnétiques .....	37
II.4.2.3. Equations mécaniques de la machine .....	38
II.4.3. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan dq .....	38
II.4.3.1. Transformation de Park .....	38
II.4.4. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK.....	40
II.4.4.1. Equations électriques .....	40
II.4.4.2. Equations magnétiques .....	41
II.4.4.3. Expression du couple électromagnétique .....	41
II.4.5 .choix de référentiel .....	41
1-Référentiel lié au stator .....	41
2-Référentiel lié au rotor.....	42
3-Référentiel lié au champ tournant .....	42
II.4.6. Modélisation des convertisseurs statiques .....	42
II.4.6.1 Modèle du convertisseur statique .....	42

II.4.6.2. Commande MLI des convertisseurs .....	44
II.4.7. Modélisation du bus continu.....	45
II.4.8. Modélisation du filtre .....	47
II.5. Les expressions des puissances .....	48
Conclusion.....	49

### **Chapitre III : Stratégie de commande et simulation.**

Introduction .....	50
III.1. Principe de la commande vectorielle .....	50
III.2.Modèle de la MADA en vue de la commande .....	51
III.3.Schéma de commande .....	51
III.4.Choix du référentiel et principe de la commande.....	52
III.5. Relation entre les puissances statoriques et les courants rotoriques .....	53
III.6. Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques .....	54
III.7. Découplage entre les tensions rotoriques sur les axes directs et en quadrature .....	55
III.8. Description du système à réguler .....	56
III.9.Synthèse des régulateurs « Proportionnel – intégral (PI) ».....	57
III.10.- Simulation de la commande en puissance .....	58
Essai 01 : fonctionnement à vitesse fixe .....	58
Essai02 : essai du fonctionnement en MPPT .....	62
III.11.Test de robustes vis-à-vis des variations paramétriques .....	66
a) Variation de la résistance rotorique $R_r' = 2 \cdot R_r$ .....	67
b) Variation de coefficient de frottement $f' = 5 \cdot f$ .....	68
Conclusion.....	69
Conclusion générale .....	70
Références bibliographiques	
Annexe	



*Introduction générale*

## Introduction générale

Dans notre société moderne l'énergie est devenue un élément fondamental à cause de nos différentes exigences en plusieurs termes domestiques et industriels. Ce qui nous incite à réfléchir toujours à de nouvelles techniques de production de cette énergie.

Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Mais le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète.

En à peine plus d'un siècle, l'énergie électrique comme forme moderne a pris une place de premier plan. Sa production couvre le tiers de la consommation énergétique mondiale qui est concentrée principalement dans des machines thermomécaniques où la combustion est à sa grande échelle avec l'émission directe de plusieurs millions de tonnes de CO<sub>2</sub> provoquant des degrés élevés de pollution et la température ; ainsi que la réduction des réserves naturelles [1].

Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement à ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le bon fonctionnement des aérogénérateurs et leur insertion dans la production électrique.

Afin de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent, cette étude s'intéresse à la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) qui fait le cœur d'une grande partie des éoliennes actuelles suite à ses avantages relativement aux autres actionneurs électromagnétiques.

Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs électroniques pour s'adapter aux conditions de vent. Le système éolien est contrôlé de manière à maximiser la puissance produite en recherchant à chaque fois le point de fonctionnement à maximum de puissance.



*Chapitre I*  
*Etat de l'art de la*  
*conversion*  
*électromécanique*



## Introduction

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles ; l'énergie éolienne est véhiculée par les vents, ceux-ci sont dus indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents.

Un aérogénérateur (couramment appelé éolienne) est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire de l'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants [3].

### I.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environs 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable.

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité.

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. Mais c'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui a obligé plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985. [2]

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui a permis un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont en une contribution importante au marché mondial qui a atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW. [4]

## I.2. Définition d'une éolienne :

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est le plus souvent transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage.

Selon leur puissance, les éoliennes sont divisées en trois catégories :

- ✓ Eoliennes à petite puissance : inférieur a 40KW.
- ✓ Eoliennes à moyenne puissance : de 40KW à quelques centaines de KW.
- ✓ Eoliennes à grande puissance : supérieures à 1MW

## I.3. Constitution d'une éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes : [5]

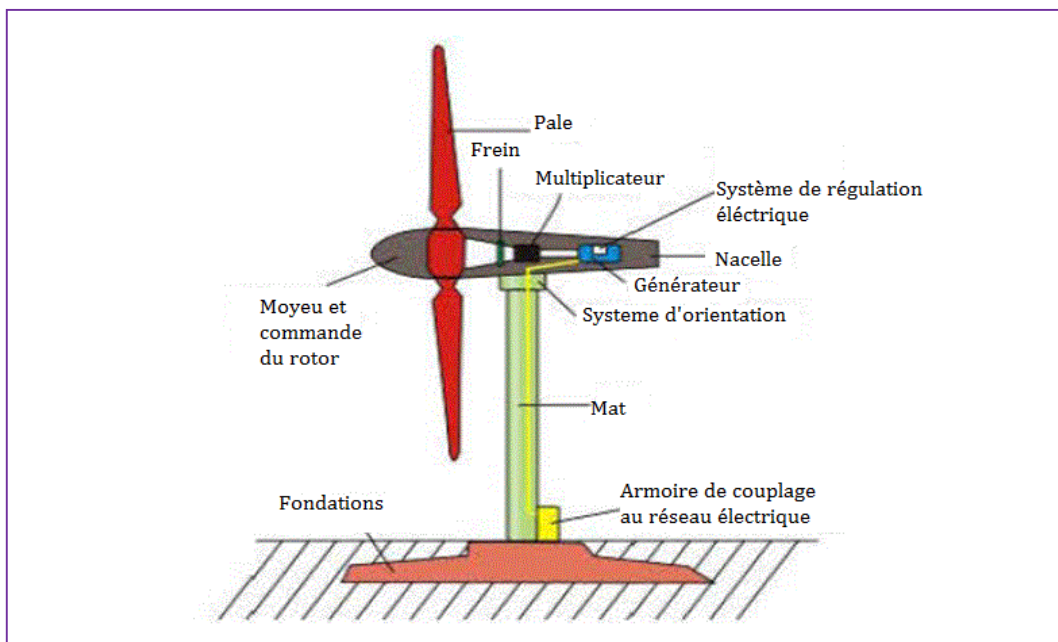


Figure .I. 1: Constitution d'une centrale éolienne

**Le mat** : qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500 kW a une hauteur de 40 à 60m.

**Les pales** : qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopôle.

**La fondation** : une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vent et dans des conditions de givrage.

**La nacelle** : qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela vient s'ajouter le système électronique de gestion de l'éolienne comme la montre la (Figure I-2.)

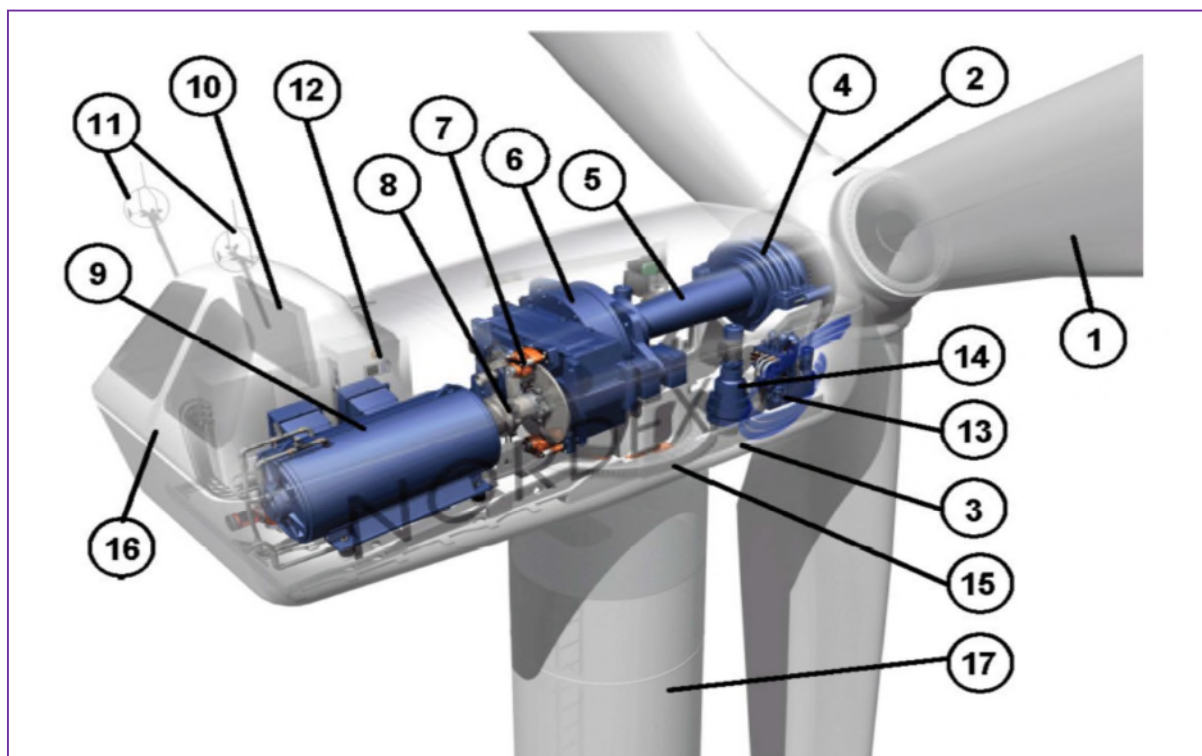


Figure .I. 2: Constitution de la nacelle

1- Pales	10- Radiateur de refroidissement
2- Moyeu rotor	11- Centrale de mesures du vent
3- Nacelle	12- Contrôle
4- Cardan	13- Centrale hydraulique
5- Transmission	14 -Mécanisme d'orientation face au vent
6- Multiplicateur de vitesse	15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque
7- Frein à disque	16- Capot
8- Accouplement	17- Tour
9- Génératrice	

## **I.4. Différents types d'éoliennes**

Les éoliennes se divisent en général en deux grands groupes selon l'axe sur lequel est montée l'hélice : [6]

- Éoliennes à axe vertical.
- Éoliennes à axe horizontal.

### **I.4.1. Éoliennes à axe vertical**

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus classique et Darrieus en forme de H (Figure 1-3) [7].

Elles sont très peu mises en jeu de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydraulique avec une direction de vent perpendiculaire à l'axe de rotation.

La conception verticale offre l'avantage de mettre la machine au sol (accès plus facile à la génératrice et au multiplicateur) mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des vents proches du sol, moins forts qu'en hauteurs. De par son axe vertical, il y'a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor.

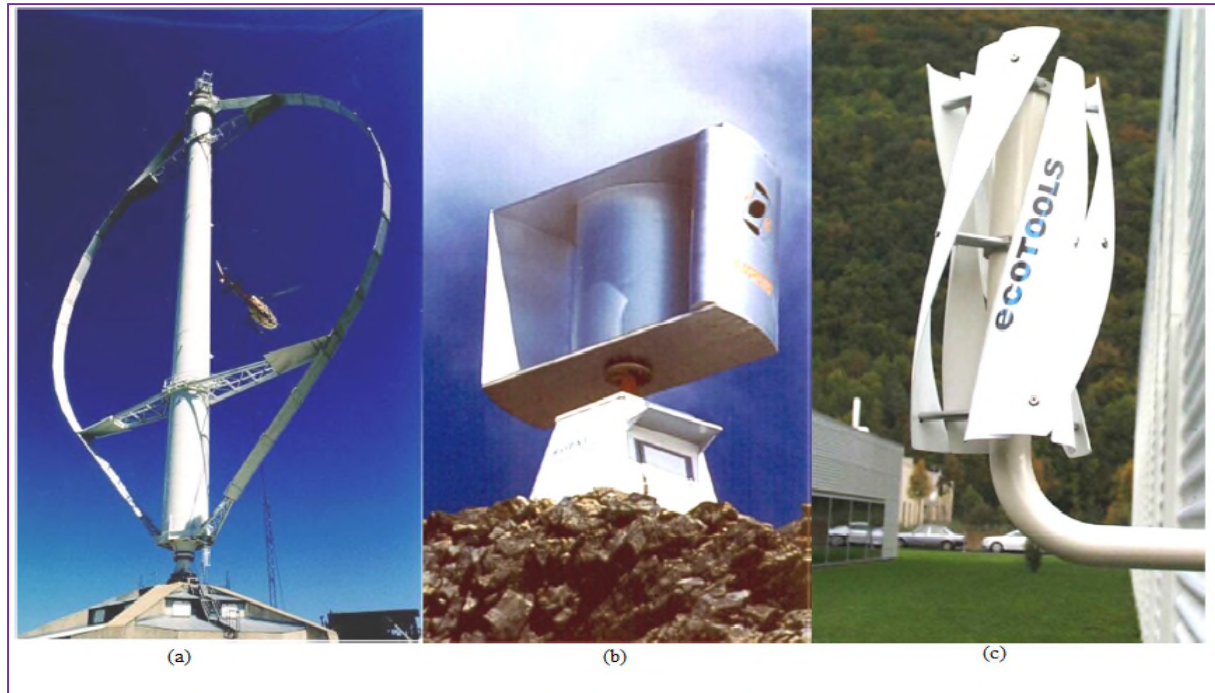


Figure .I. 3: Éoliennes à axe vertical : Turbine Darrieus (a) et Darrieus en H (b) turbine Savonius (c).

#### I.4.2. Éoliennes à axe horizontal

Une turbine à axe horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter des quantités plus importantes d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal ce choix représente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage et un coefficient de puissance (rapport entre la puissance obtenue et la puissance de la masse d'air en mouvement) relativement élevé. [8]

Toutefois, la boîte de vitesse et la machine électrique doivent être installées en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. Par ailleurs l'orientation automatique de l'hélice face au vent nécessite un organe de supplémentaire («queue», «yaw control», ...). Selon son nombre de pâles. Une éolienne à axe horizontal est dite mono-pale, bipale ou multi-pale. Mais pratiquement les turbines éoliennes du type tripales sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement.

Suivant leur orientation en fonction du vent, les éoliennes à axe horizontal sont dites en « amont » (up-wind) ou en « aval » (down-wind). La Figure 1-4 montre les deux types mentionnés. De ces deux types d'éoliennes, celle en amont est largement prédominante.

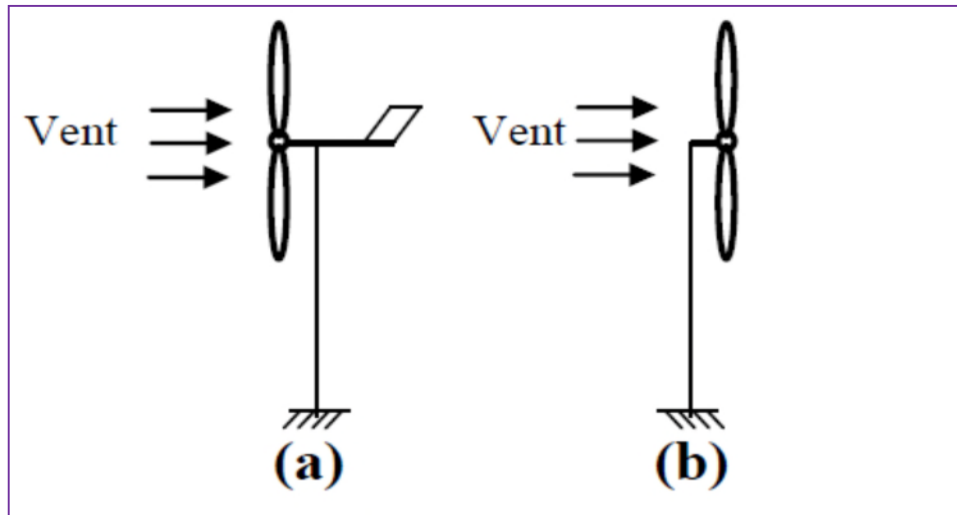


Figure .I. 4: éolienne en a) amont et en b) aval

La Figure 1-5 montre le choix des turbines éoliennes tri pales du point de vu rendement :

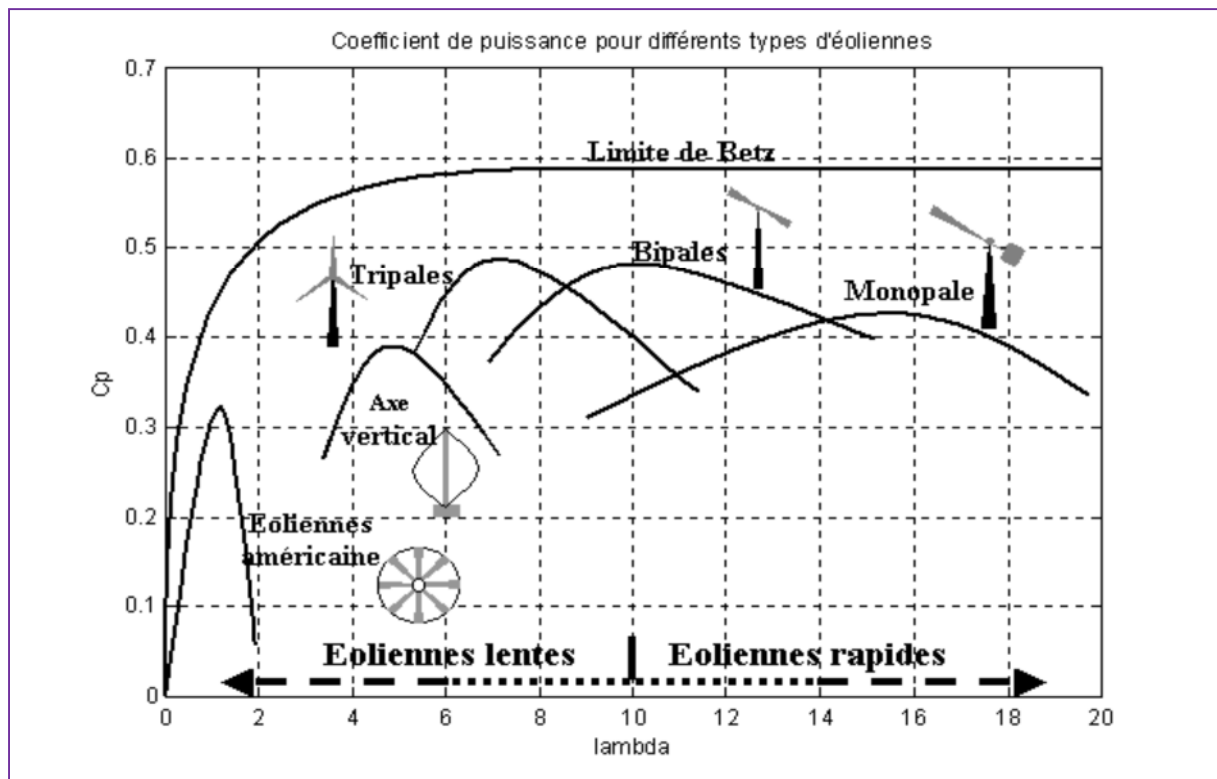


Figure .I. 5: Coefficient de puissance des différentes configurations d'éoliennes

## I.5. Les Éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure 1-6). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire à une vitesse  $\Omega_s(1-g)$  avec  $\Omega_s$  vitesse de synchronisme et  $g$  le glissement, avec  $g < 0$  pour un fonctionnement en génératrice avec une convention moteur ( $|g| \leq 1\%$ ). La rotation des pales par des actionneurs, hydrauliques ou électriques, permet l'augmentation de l'angle de calage  $\beta$ . La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de fort vent, cette technique permet la mise en drapeau des pales ( $\beta=90^\circ$ ) [9].

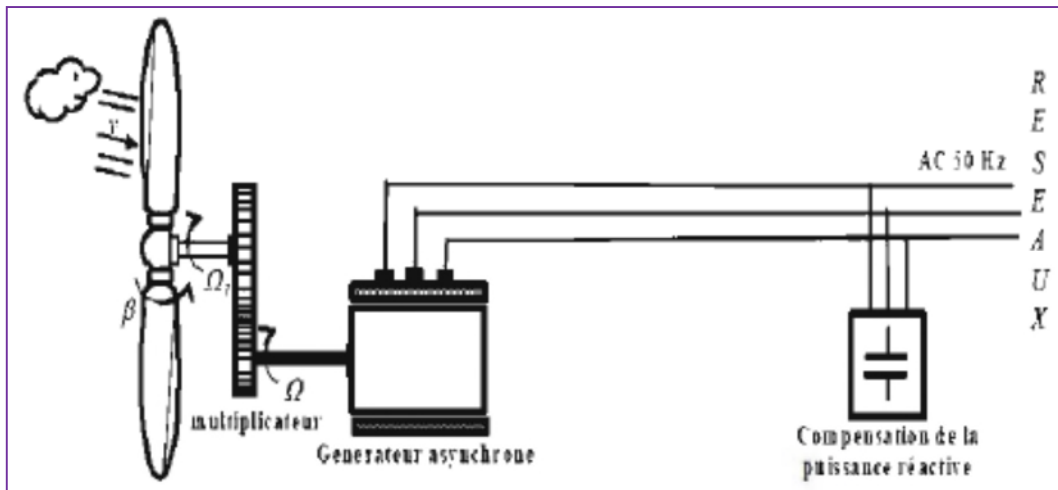


Figure .I. 6: Éolienne à vitesse fixe

La caractéristique de réglage théorique puissance-vitesse du vent est représentée en trait continu à la Figure (1-7), pour une éolienne de 300 KW. La dynamique relativement lente du vent pitch control (plusieurs dizaines de seconde) et les variations rapides de la vitesse du vent amènent ce type d'éolienne à suivre approximativement la caractéristique de réglage, comme illustrée par les points reportés sur la Figure (1-7), mesurés sur une éolienne réelle. La Figure (1-8) montre un enregistrement de la puissance générée par cette éolienne soumise, à un vent moyen de 50km/h. Cet enregistrement, qui illustre le caractère très fluctuant de la puissance générée par ce type d'éolienne, montre que cette puissance peut subir des variations de plus de 100 kW en 3 secondes et que la puissance nominale peut être dépassée de plus de 10%. Ce type d'éolienne n'offre donc quasiment pas de possibilité de

réglage de la puissance générée, d' autant plus que la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

Certaines éoliennes de ce type sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales (stall control). L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grande que la vitesse nominale appelée « Passive stall ». La puissance captée est alors réduite. La structure du rotor de la turbine est ainsi plus simple, mais les possibilités de réglage de la puissance sont encore plus limitées. Une solution intermédiaire appelée « active stals » a également été développée. Elle garde les avantages du système « stall » (décrochage aérodynamique des pales) tout en intégrant un système d'orientation des pales simplifié. Les possibilités de réglages de la puissance générée par ce type d'éolienne restent toutefois marginales [10].

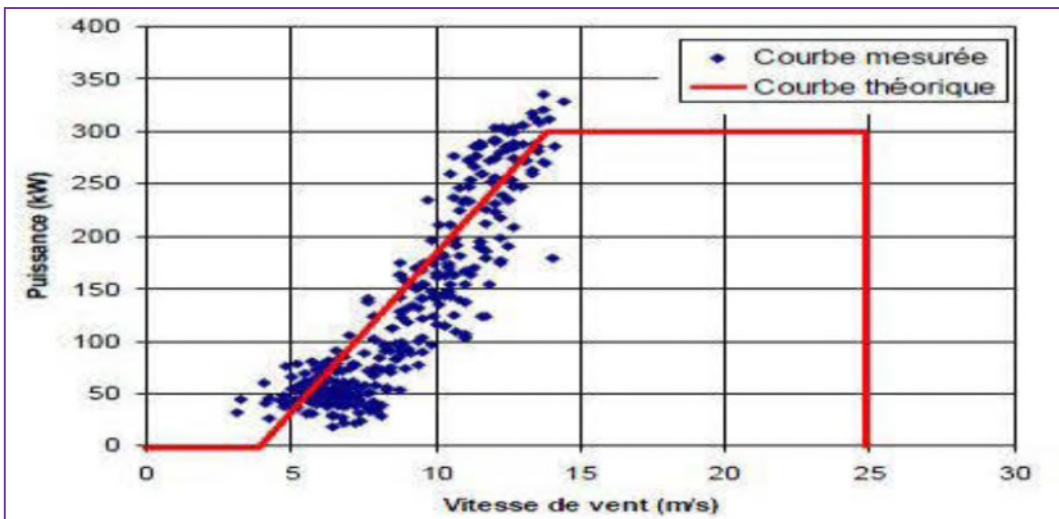


Figure .I. 7: Caractéristique de réglage d'une éolienne à vitesse fixe de 300 kW.

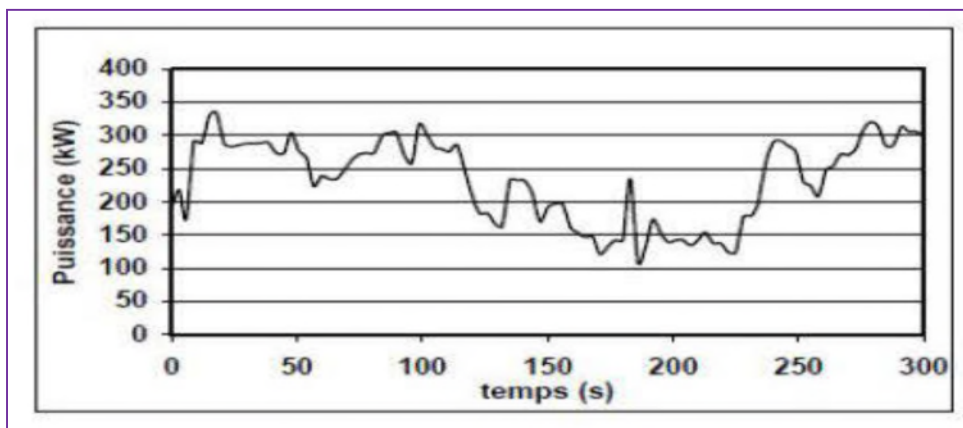


Figure .I. 8: Exemple de puissance générée par une éolienne à vitesse fixe de 300kw.



## I.6. Les éoliennes à vitesse variables

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence, une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe. [11]

## I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

### I.7.1. Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [12], [13] :

- La concentration du CO<sub>2</sub> est augmentée de 25% depuis l'ère préindustrielle. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6 °C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5 °C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement à l'énergie fossile, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> et 21 millions de tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de NO<sub>2</sub>, qui sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement.

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie dans ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales aux énergies plus traditionnelles sur les sites plus venteux. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

### I.7.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne à quelques désavantages:

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique (qm) a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études montrent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique bien qu'en terme du coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

## I.8. Production d'électricité par éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [29].

L'énergie éolienne résulte de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, lui-même est relié à une génératrice qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette dernière est fonction de la surface balayée. On distingue deux grandes familles d'éoliennes [28].

### I.8.1. Eolienne autonome

Pour ce type d'éolienne, la tension de sortie n'est pas imposée par le réseau, c'est pourquoi il faut maintenir son amplitude et sa fréquence constants pour une utilisation domestique, et ce, quelle que soit la vitesse de rotation de la turbine. Elles sont utilisées pour l'alimentation en énergie électrique des bateaux, le camping, les stations météo et l'éclairage des chalets isolés ou encore des villages [28].

Ces éoliennes sont associées à des unités de stockage d'énergie, généralement constituées de batteries d'accumulateur. Ces dernières se chargent par l'aérogénérateur soit directement par une génératrice à courant continu pour les faibles puissances, ou bien par une génératrice synchrone à aimants permanents ou bobinée par l'intermédiaire d'un pont redresseur. La tension continue des batteries est utilisée soit directement ou alors mise en forme par onduleur pour obtenir une alimentation triphasée sinusoïdale de fréquence 50 Hz [30].

### I.8.2. Eolienne raccordée au réseau

Ces éoliennes fonctionnent en permanence et les puissances produites peuvent varier de 50 kW à 6 MW et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordées à un réseau puissant, dans le cas d'utilisation des génératrices asynchrones par exemple. Il n'y a pas d'unité de stockage pour ce type de production et la puissance produite fluctue beaucoup au gré du vent [30].

## I.9. Machine électrique et système de conversion d'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machine électrique qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varier selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités. [23]

### **I.9.1. Machines à courant continu**

Les machines à courant continu sont utilisées sur les éoliennes de faible puissance. Ce type de machine comporte un stator portant le circuit inducteur (bobine ou à aimants permanents), et un rotor constituant le circuit induit connecte aux bornes de sortie, via le système balais collecteurs.

### **I.9.2. Machine à reluctance variable (MRV)**

La machine à reluctance variable, est une machine synchrone à pôles saillants, démunie de bobinage d'excitation et fonctionnant exclusivement sur le couple de reluctance. Cette machine permet de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse Suite à la diversité des applications des MRV, ces dernières se divisent en deux catégories : [19]

#### ➤ **Machine à stator lisse**

Dans ce type de machine le stator est similaire à celui de la machine asynchrone. Ces machines sont destinées à fonctionner à vitesse de rotation élevée, leurs rotors sont massifs, les courants induits dans le fer rotorique durant les régimes de fonctionnements transitoires induisent un effet amortisseur important qu'il faut aussi prendre en compte.

#### ➤ **Machine à double denture**

La machine à double denture à un stator denté. Ces machines sont destinées à fonctionner à faible vitesse de rotation et à fort couple, leurs rotors comme leurs stators sont feuilletés ; elles sont donc sans amortisseurs.

Généralement les machines à reluctances variables utilisées en mode générateur sont celles excitées soit par un bobinage ou par des aimants permanents.

### **I.9.3. Systèmes utilisant les machines synchrones (MS et MSAP)**

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Néanmoins, les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobine demandent un entretien régulier de système bagues et

balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. [20]

Les machines synchrones à aimants permanents sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défaut : suppression du multiplicateur mécanique de vitesse et des systèmes bagues et balais pour les MSAP. La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

#### 1.9.4. Systèmes utilisant les machines asynchrones

Les machines asynchrones sont robustes, simple à fabriquer et moins coûteuses. Les aérogénérateurs de forte puissance tournent à des vitesses de rotations relativement faibles, d'où la nécessité d'insérer un multiplicateur de vitesse mécanique entre la turbine et la machine asynchrone. Lorsque cette dernière est directement connectée au réseau (figure I.9.a) et pour qu'elle fournisse de l'énergie au réseau ; elle doit être entraînée à une vitesse de rotation légèrement supérieur à celle de synchronisme.

Cependant, si la machine tourne à une vitesse inférieure à celle de synchronisme, il faudra déconnecter la génératrice du réseau, pour que l'éolienne ne se transforme pas en ventilateur ; car la machine fonctionne en moteur.

L'énergie réactive nécessaire pour la magnétisation peut provenir soit de condensateurs connectés en parallèle avec les enroulements statoriques ou du réseau. [32]

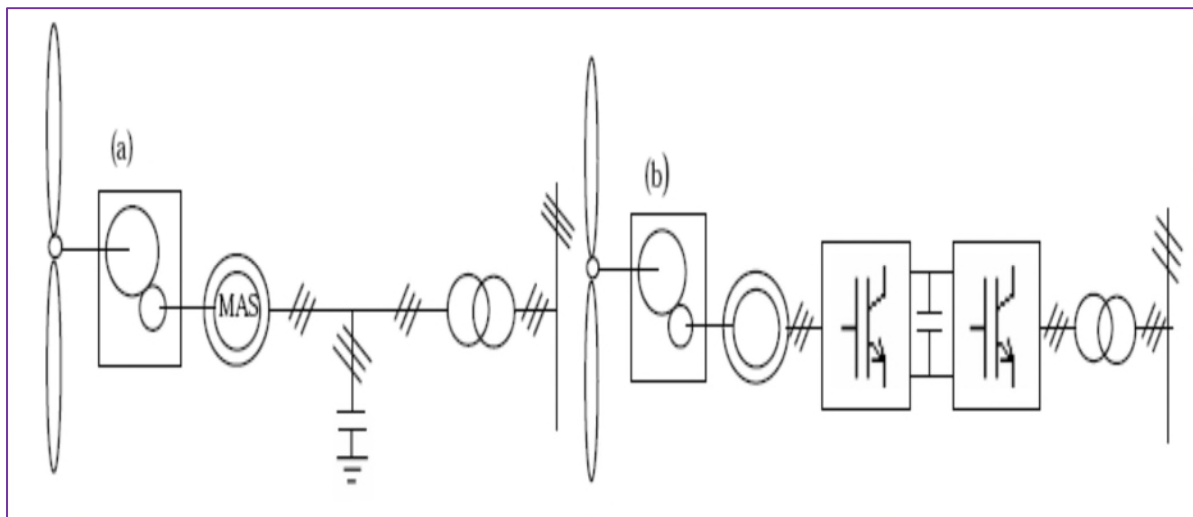


Figure .I. 9 : Système éolien basé sur la MAS à cage :

a - A vitesse fixe.

b - A vitesse variable.

### I.9.4.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la (Figure 1.10). [15]

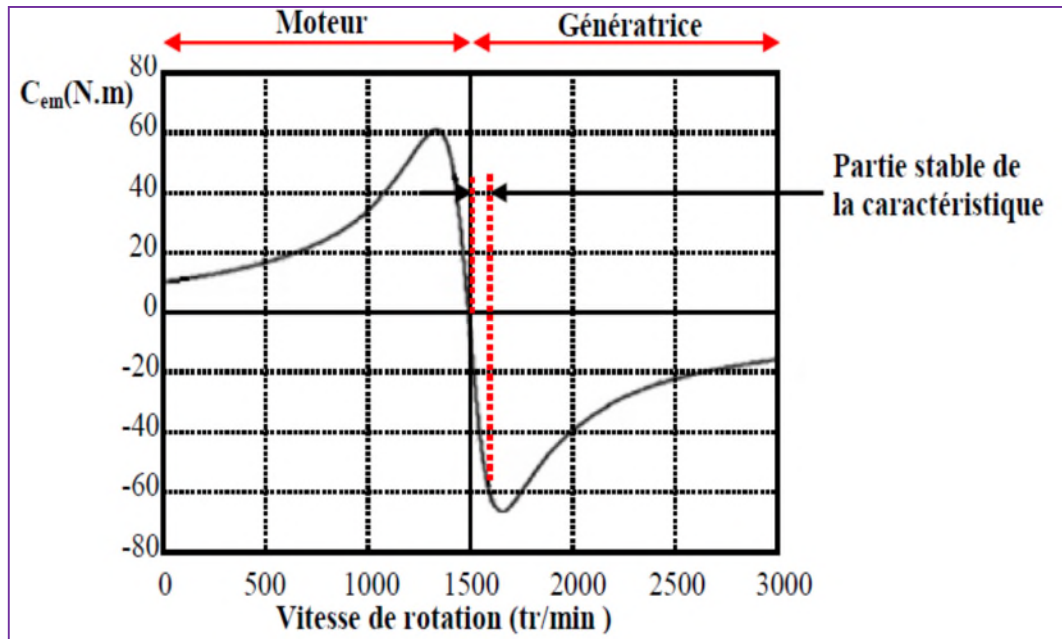


Figure .I. 10 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure 1.11).

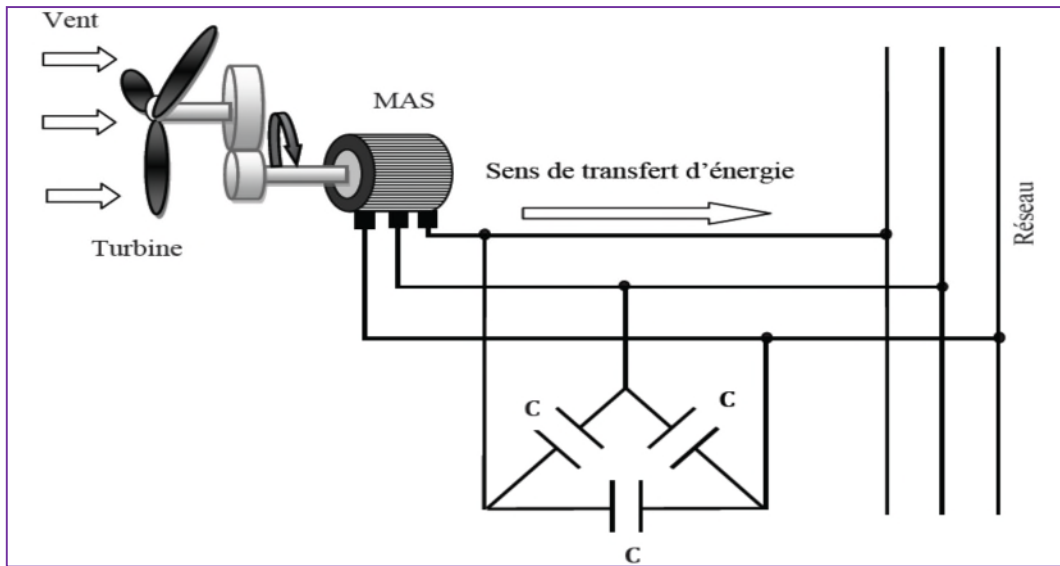


Figure .I. 11 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

### I.9.4.2 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une Interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la (Figure 1.12). Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue.

Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire.

La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel.

Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur. [15]

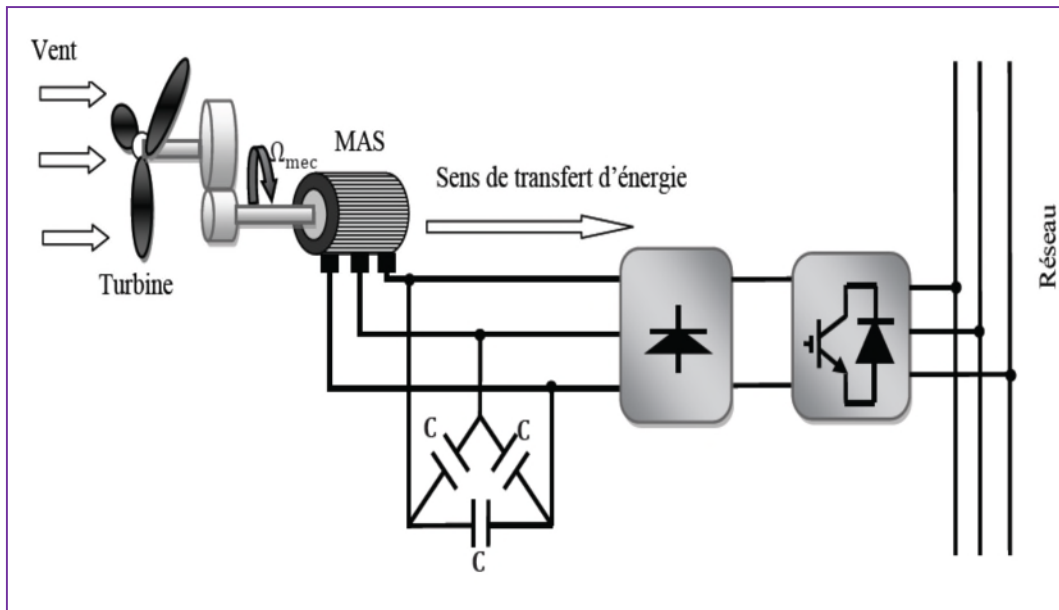


Figure .I. 12 : MAS connectée sur le réseau à travers redresseur – onduleur

## I.9.5. La machine asynchrone double alimentation (MADA)

### I.9.5.1. Définition

Connue depuis 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; la machine asynchrone à double alimentation, MADA, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général figure (I.13).



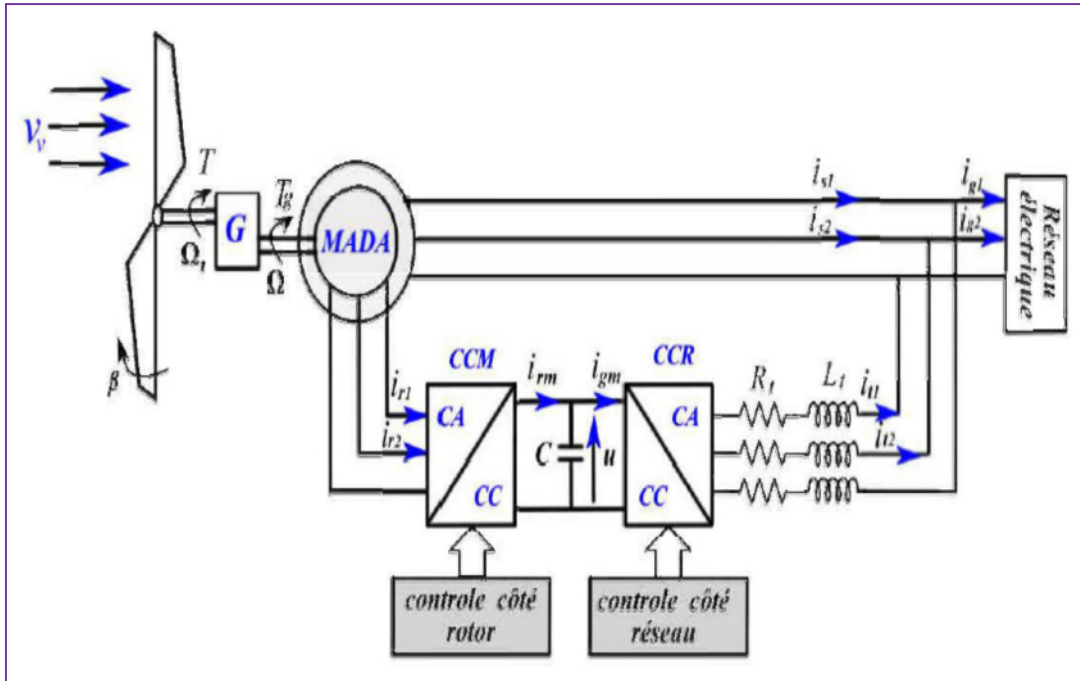


Figure .I. 13 : Générateur éolien à base de MADA

### I.9.5.2. Constitution de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques. Ce qui est particulier dans cette machine est le fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais (Figure 1-14).[15]

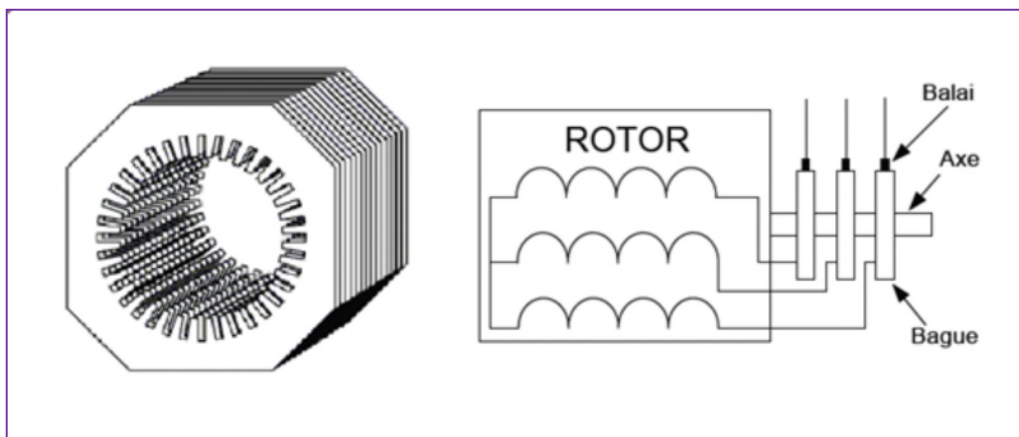


Figure .I. 14: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

### I.9.5.3. Intérêt de la MADA

La connexion directe des machines asynchrones au réseau oblige la vitesse de rotation à rester constante de façon à ce que la machine reste proche du synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite pour des applications en éolienne aux vitesses de vent élevé. L'introduction du convertisseur de puissance entre le stator et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine ce qui permet de fonctionner à vitesse variable.

Pour une application éolienne où l'utilisation de la MADA est intense, la vitesse de rotation du rotor est réglée en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hypersynchrone. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, ce qui permet de tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent.

Partant de ces constats, la configuration électrique des aérogénérateurs utilisant les machines asynchrones ont subi une grande évolution, ce qui a mené aujourd'hui à une utilisation intense de la MADA dans 80% des aérogénérateurs installés. [16]

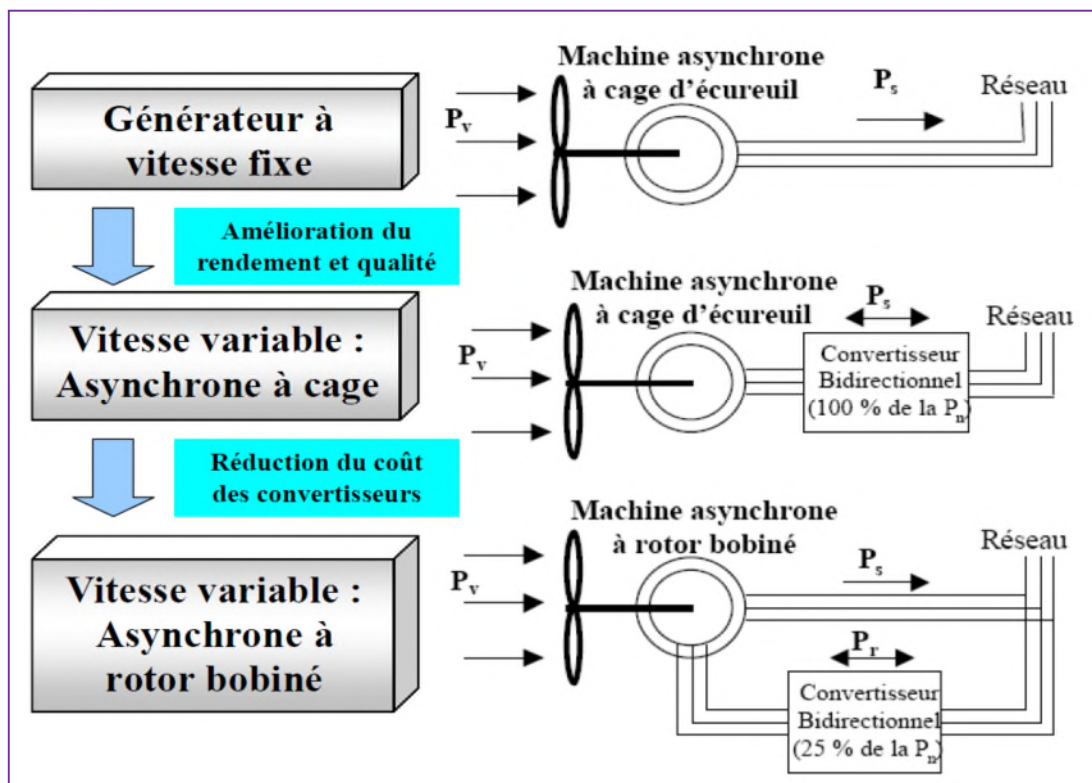


Figure .I. 15: Évolution de la configuration électrique de la machine asynchrone

#### I.9.5.4. Différents modes de fonctionnement de la MADA

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction du glissement  $g$  comme suit :

##### I.9.5.4.1. Stationnaire ( $g=1$ )

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence  $f_s$ . Le circuit rotorique est le siège d'une force électromotrice induite de fréquence  $f_r$  égale à celle du stator. Dans ce cas là la MADA se comporte comme un transformateur.

##### I.9.5.4.2. Hyposynchrone ( $0 < g < 1$ )

On fait tourner le rotor dans la même direction du flux statorique, la fréquence du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor croît, plus la fréquence  $f_r$  décroît, par conséquent la tension induite diminue linéairement et la valeur minimale à la vitesse du synchronisme.

##### I.9.5.4.3. Synchrone ( $g=0$ )

Dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence  $f_r$  du rotor est nulle, et il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.

##### I.9.5.4.4. Hypersynchrone ( $g < 0$ )

Dans ce cas  $f_r$  devient négative, ce qui signifie que l'ordre de phase du rotor ( $a_r, b_r, c_r$ ) s'inverse, ce qui engendre l'augmentation de la tension induite du rotor.

#### I.9.5.5. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

La MADA peut fonctionner en moteur comme générateur, en mode hyposynchrone et hypersynchrone. Ces modes de fonctionnement sont illustrés sur (1-12) ; avec  $P_r$ ,  $P_m$  et  $P_s$  désignent les puissances du rotor, mécanique et du stator.

##### I.9.5.5.1. fonctionnement moteur

- Mode hyposynchrone : dans ce mode la puissance  $P_r$  est fournie par le rotor.
- Mode hypersynchrone : dans ce cas la puissance  $P_r$  est absorbée par le rotor.

**I.9.5.5.2. fonctionnement générateur**

- Mode hyposynchrone : dans ce mode la puissance  $P_r$  est absorbée par le rotor.
- Mode hypersynchrone : dans ce mode la puissance  $P_r$  est fournie par le rotor.

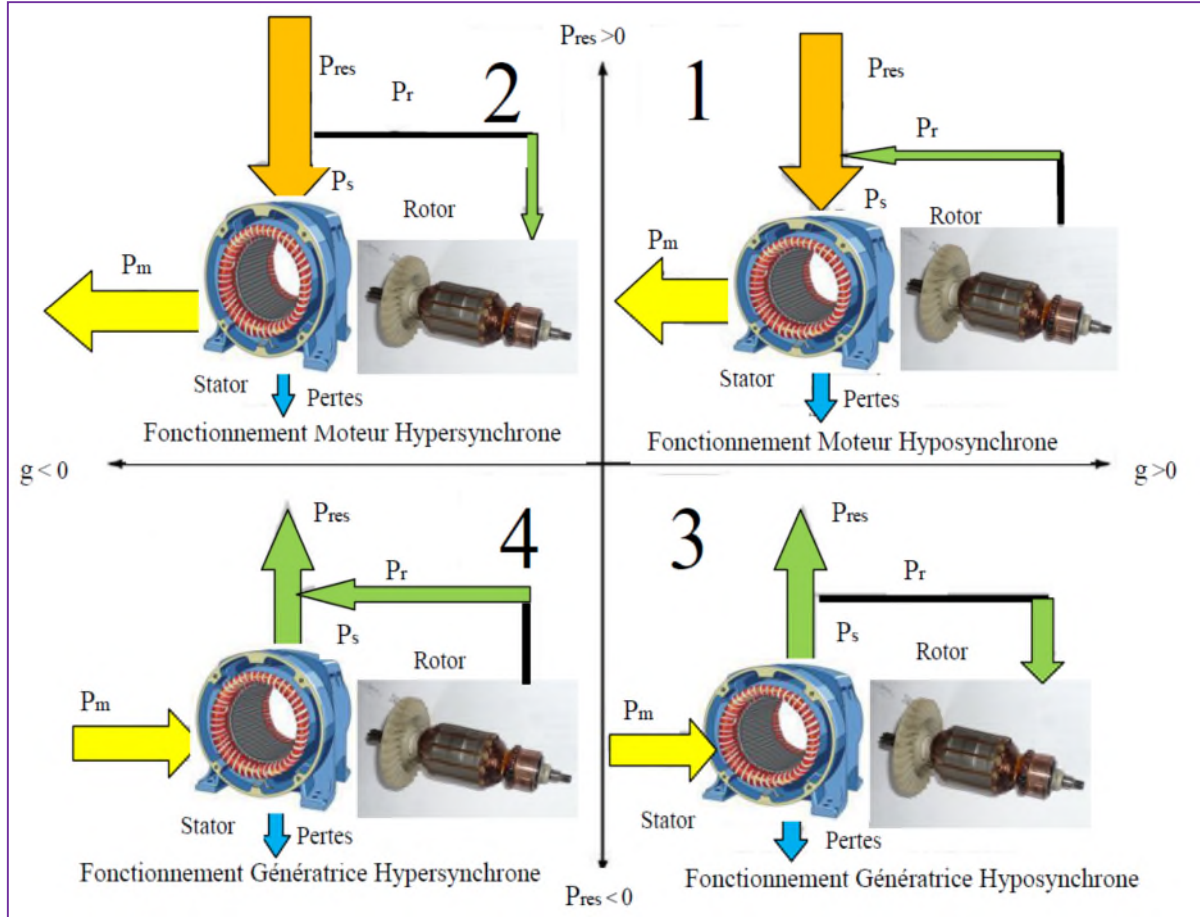


Figure .I. 16: Les modes de fonctionnement de la MADA

**I.9.5.6. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless"**

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques (Figure 1-17).

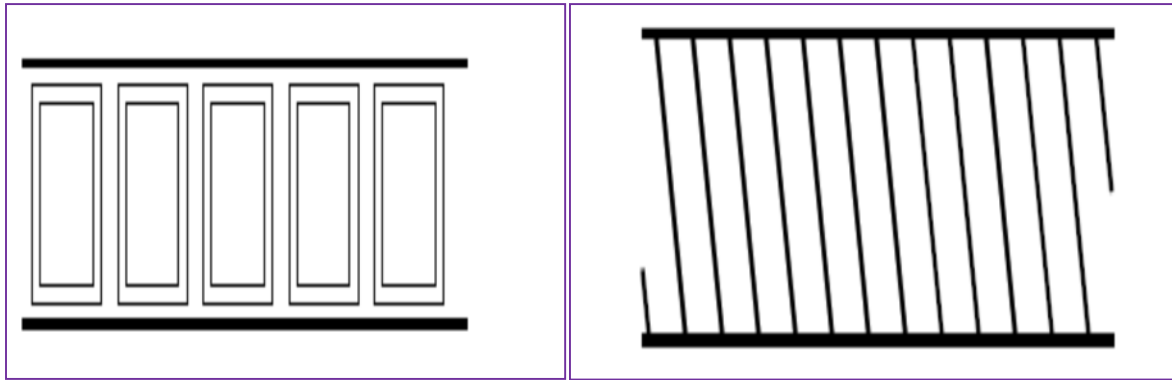


Figure .I. 17: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif de la (Figure 1-17). En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau. [17] (Figure 1-18).

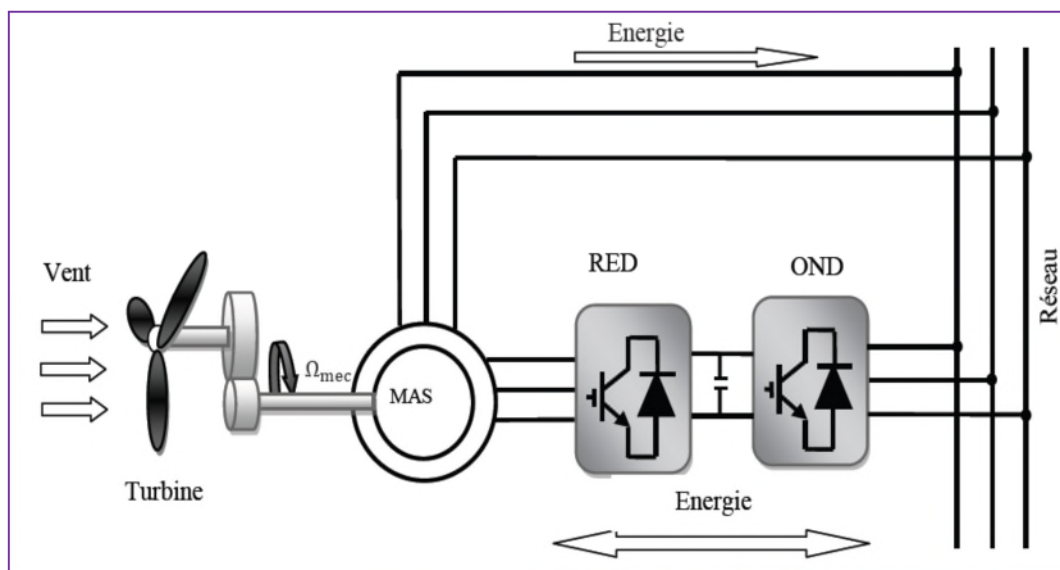


Figure .I. 18: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau

Dans ce cas, le convertisseur est dimensionné uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et est donc moins coûteux que dans le cas de la (Figure 1-17). La machine n'a pas de contacts glissants mais possède deux stators à nombre de paire de pôles différent ce qui augmente son diamètre et sa complexité de fabrication. En faisant varier la puissance réactive absorbée, le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance et d'augmenter ou diminuer les courants rotoriques. Le flux et le glissement de la machine en sont alors modifiés. La machine peut ainsi délivrer une

tension à fréquence fixe tout en ayant une vitesse de rotation variable. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum, les études montrent que si le glissement dépasse 30%, le coût du convertisseur et la diminution du rendement due aux pertes dans le rotor qui augmentent avec le glissement rendent le système peu attractif. Ce système n'est pas exploité industriellement mais existe à l'état de prototype.

### I.9.5.7. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure 1-19), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur. [18]

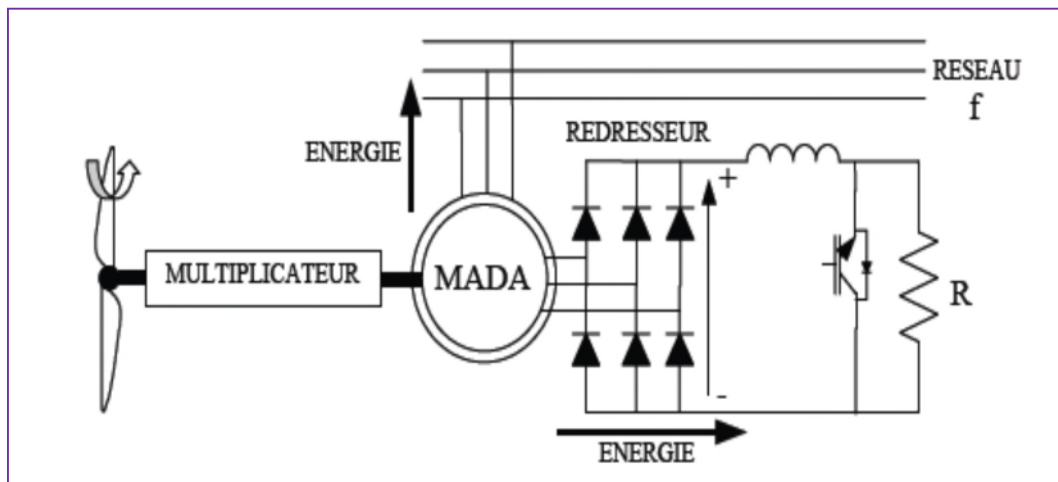


Figure .I. 19: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

### I.9.5.8. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure 1-20) [19].

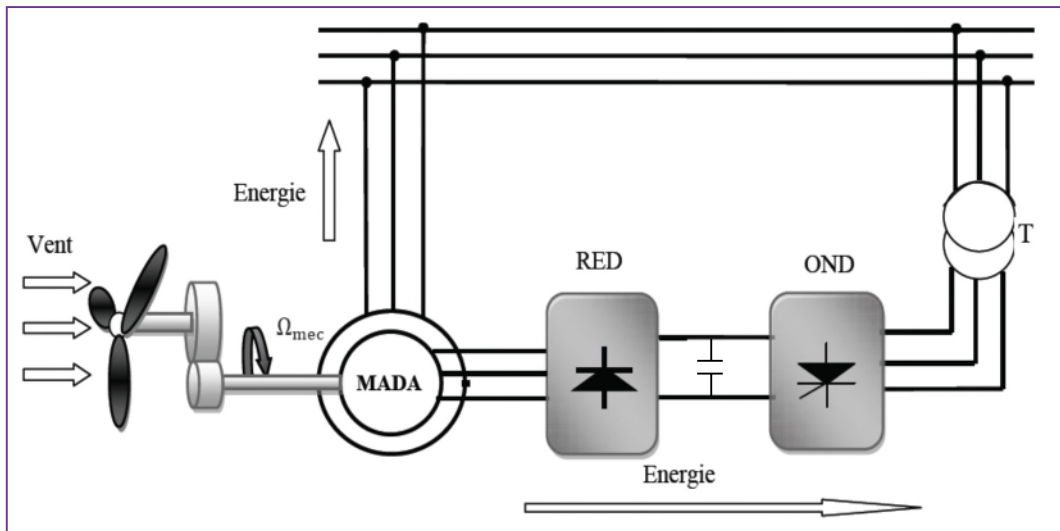


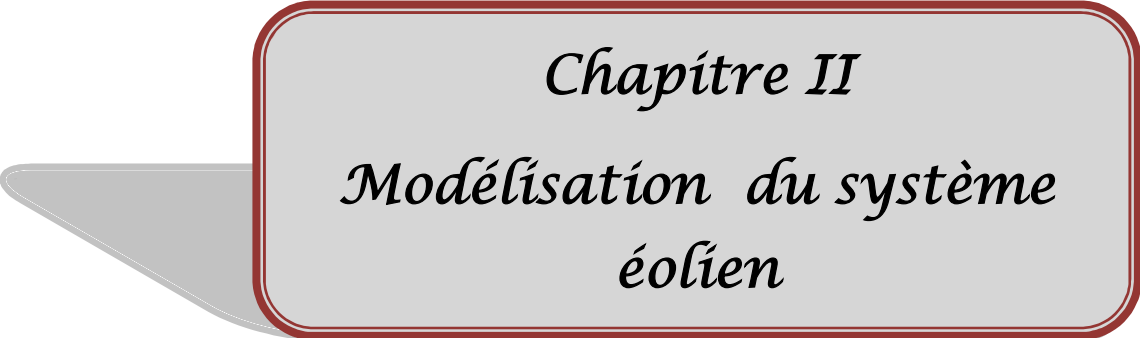
Figure .I. 20: MADA, structure Kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine brushless (figure 1-18), ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau), donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotations supérieures au synchronisme.

## Conclusion

Dans ce chapitre une description générale a été présentée et qui concerne les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements ainsi que leurs capacités de réglage. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on a présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

Les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs. Les éoliennes à vitesse variables offrent plus de possibilités de réglage, mais ont un coût plus élevé. L'éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation offre des capacités qui pourraient lui faire permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée. Ce type d'éolienne est à la base du travail de modélisation qui va suivre.



*Chapitre II*  
*Modélisation du système*  
*éolien*



**Introduction**

Après avoir présenté les différentes chaînes de conversion éoliennes au chapitre précédent, nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation associée à deux convertisseurs statiques commandés en MLI, afin de permettre une production optimale d'électricité quel que soit les conditions de vent et de vitesse de l'éolienne.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la modélisation des parties mécanique et électrique de la chaîne éolienne

**II.1. Description de la structure choisie à modéliser**

La structure proposée est constituée d'une turbine éolienne, et d'une machine asynchrone à double alimentation débitant sur un réseau triphasé, sons circuit rotorique est alimenté par le réseau, via une cascade (Redresseur Filtre Onduleur MLI), l'ensemble est représenté sur la (figure II.1)

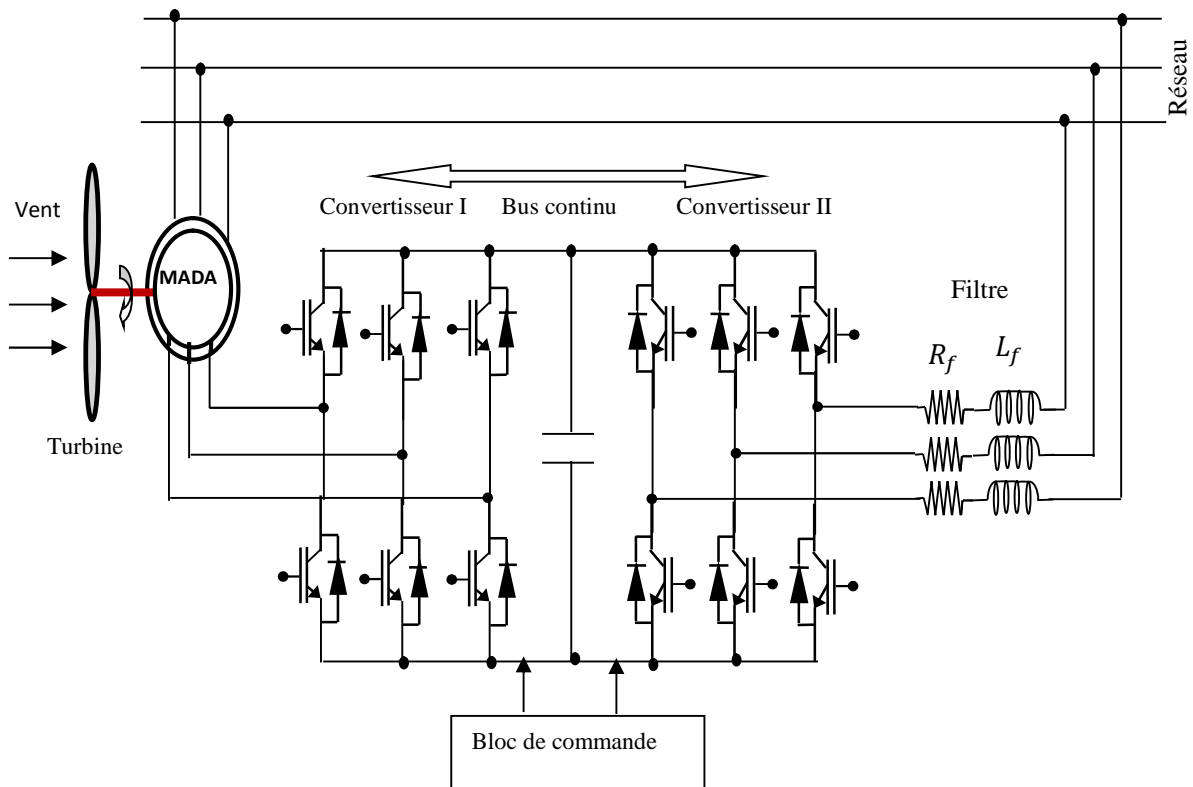


Figure .II. 1: structure à modéliser

## II.2. Modélisation de Profil du vent

Le vent est de nature aléatoire, par conséquent nous avons modélisé le vent par une fonction variable dans le temps, donnant une vitesse moyenne de 50km/h, ainsi faisant tourner la turbine éolienne dans les deux modes ; hyper et hyposynchrone, et tout en restant dans le régime nominal de la MADA.

## II.3. Modélisation de la turbine éolienne

La turbine éolienne représente la première interface de la chaîne éolienne, elle assure la conversion d'une partie de l'énergie aérodynamique véhiculée par le vent en énergie mécanique.

Nous nous intéressons dans cette partie à la modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal, la plus répandue actuellement pour la production électrique de forte puissance.

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une MADA. [9]

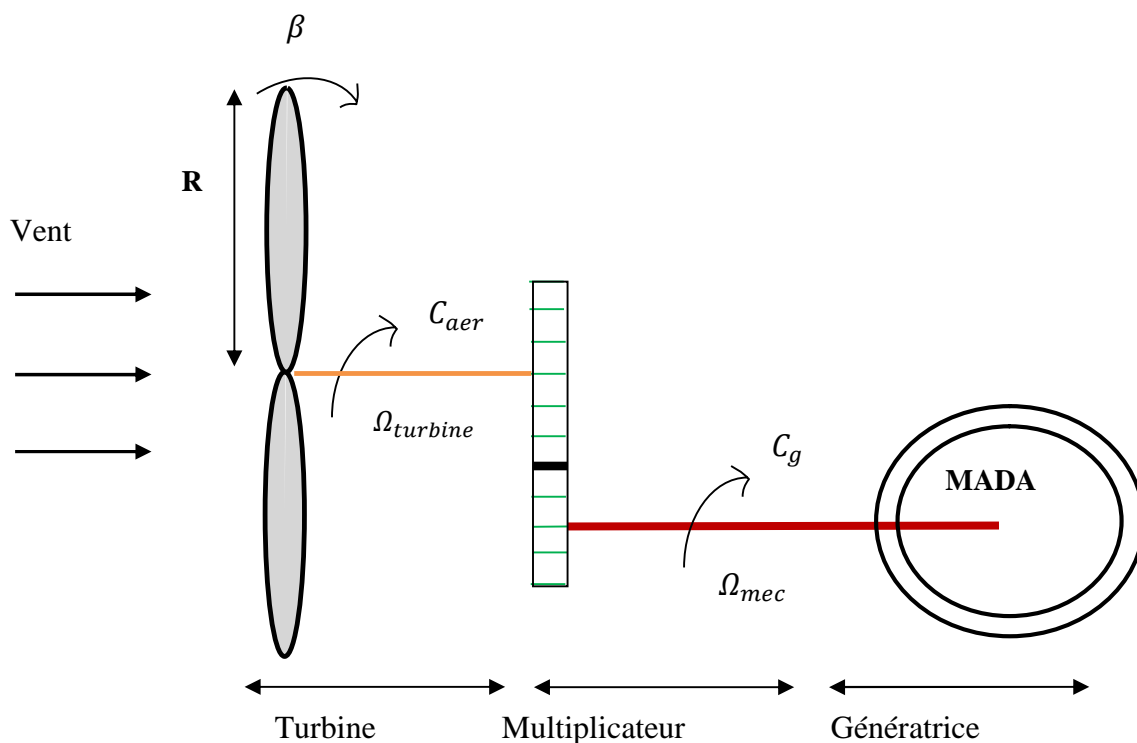


Figure .II. 2: Schéma de la turbine éolienne

### II.3.1. Hypothèses simplificatrices

Nous adoptons les hypothèses suivantes :

- Les pales sont considérées de conception identique.
- Nous considérons une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée, alors nous pouvons considérer l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.
- De part la conception aérodynamique des pales, leurs coefficients de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être ignoré.
- la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement de coté de la génératrice.
- En tenant compte de ces hypothèses, nous obtenons un modèle mécanique comportant deux masses comme représenté sur la figure (II.3). [9]

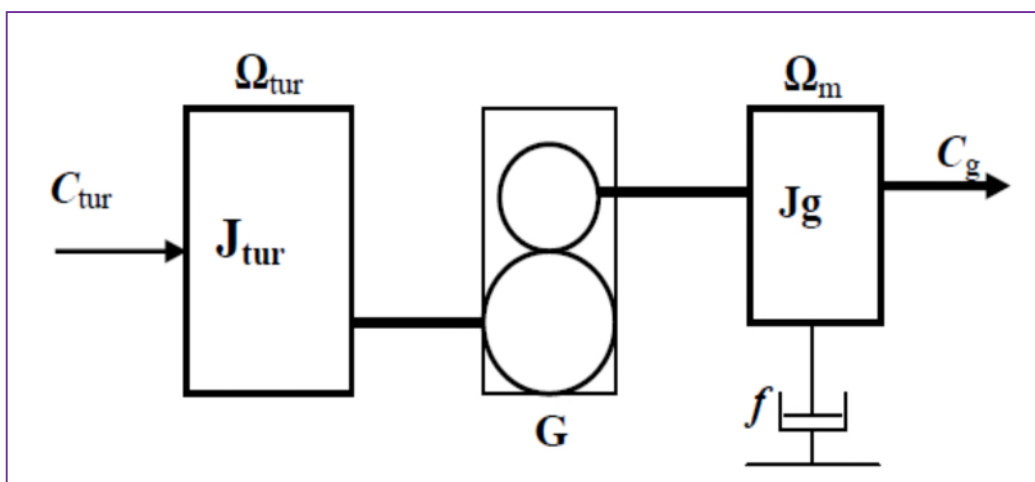


Figure .II. 3: Modèle mécanique simplifié de la turbine

### II.3.2. Modèle de la turbine

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine dépend du coefficient de puissance  $C_p$  caractérisant le rendement aérodynamique de la turbine. Ce coefficient est en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ . La figure (II.4) représente la variation de ce coefficient en fonction de ces deux paramètres par simulation MATLAB/Simulink.

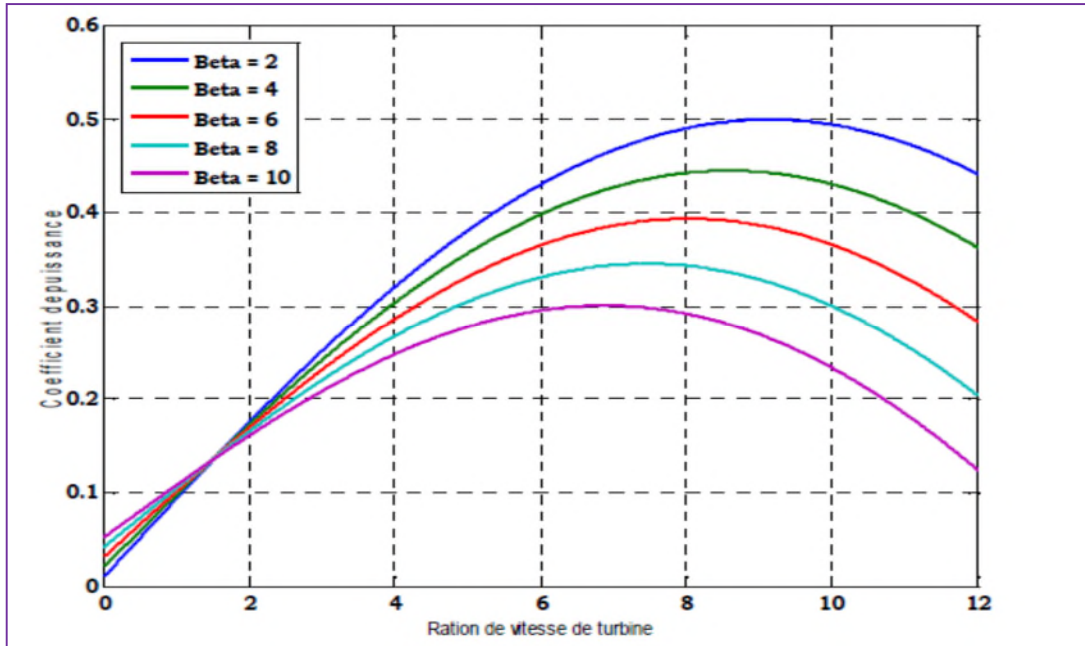


Figure .II. 4: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine  $\lambda$

L'expression approximée du coefficient  $C_p$  a été rapprochée pour une éolienne de 1.5 MW par l'équation suivante : [20]

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.44 - 0.0167\beta) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{14 - 0.44\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \tag{II.1}$$

### II.3.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice. Ce multiplicateur est considéré parfait, donc il se réduit à un simple gain de vitesse  $G$ . [9]

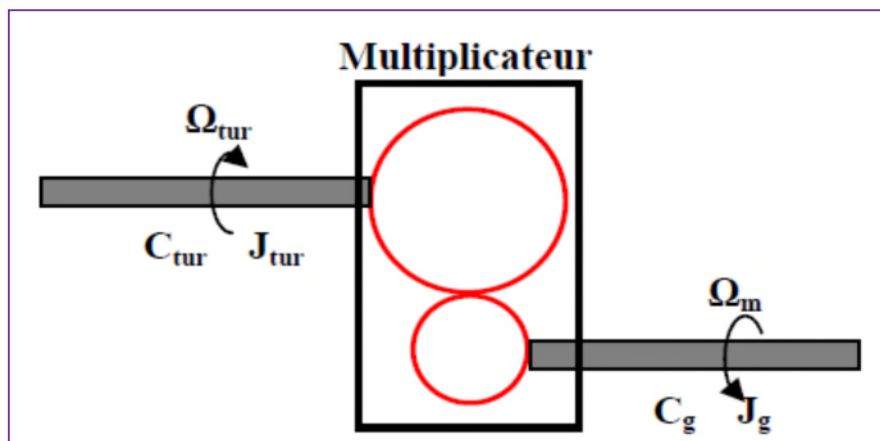


Figure .II. 5: Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

Par le principe de conservation de puissance mécanique échangée entre la turbine et la génératrice à travers le multiplicateur de vitesse est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (II.2)$$

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{turbine} \quad (II.3)$$

Avec :

$G$  : Gain du multiplicateur.

$C_g$  : Couple moteur issu du multiplicateur.

$C_{turbine}$  : Couple de la turbine.

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation du générateur.

$\Omega_{turbine}$  : Vitesse de rotation de la turbine.

### II.3.4 Équation dynamique de l'arbre de transmission

Par le principe de conservation de l'énergie cinétique de rotation échangée via le multiplicateur de vitesse, entre le rotor de la turbine et le rotor de génératrice, l'inertie totale peut s'écrire sous la forme : [9]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.4)$$

Avec :

$J_{turbine}$  : Inertie de la turbine

$J_g$  : Inertie du générateur

L'inertie de l'arbre de la génératrice est négligée devant l'inertie de la turbine ramenée à son axe de rotation. L'équation de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique de génératrice à partir du couple appliqué au rotor.

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.5)$$

Le couple mécanique  $C_{mec}$  prend en compte le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple de frottement visqueux  $C_{vis}$  et le couple moteur issu du multiplicateur  $C_g$ .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.6)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.7)$$

### II.3.5 Schéma bloc du modèle de la turbine

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Cette dernière génère le couple aérodynamique à appliquer au multiplicateur qui transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de turbine mécanique et couple de multiplicateur. Le modèle décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a deux entrées qui sont le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique opposé par la génératrice. [21]

Le schéma bloc, figure II.7 nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur l'angle de calage des pales et sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

### II.3.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne

#### II.3.6.1 Extraction du maximum de puissance (MPPT)

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Dans cette partie, nous présentons une stratégie pour contrôler le couple électromagnétique et indirectement la puissance électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance générée. On distingue deux familles de structure de commande :

- Stratégie de commande avec asservissement de vitesse mécanique.
- Stratégie de commande sans asservissement de vitesse mécanique.

La plupart des éoliennes sont contrôlées par la seconde stratégie, car en pratique la mesure de la vitesse de vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons : [9]

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la mesure de la vitesse du vent.

➤ Le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure local de vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

De ce fait, nous nous limitons ici uniquement à la stratégie de commande sans asservissement de vitesse. Cette stratégie de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.8})$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique  $C_{mec}$  développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ( $C_{vis} = 0$ ), on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (\text{II.9})$$

Le couple électromagnétique de référence (réglage) est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad (\text{II.10})$$

Le couple aérodynamique peut être déterminé partir de connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique :

$$C_{aer-est} = C_{p-max} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-est}} \cdot V_{vent-est}^3 \quad (\text{II.11})$$

Une estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine-est}$  est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.12})$$

La mesure de la vitesse de vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{vent-est} = \frac{\Omega_{turbine-est} \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II.13})$$

En regroupant ces quatre équations, on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \tag{II.14}$$

L'expression du couple de référence est alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice.

Avec :

$$C_{em-ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \tag{II.15}$$

$$A = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2G^3} \tag{II.16}$$

Le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesses est le suivant :

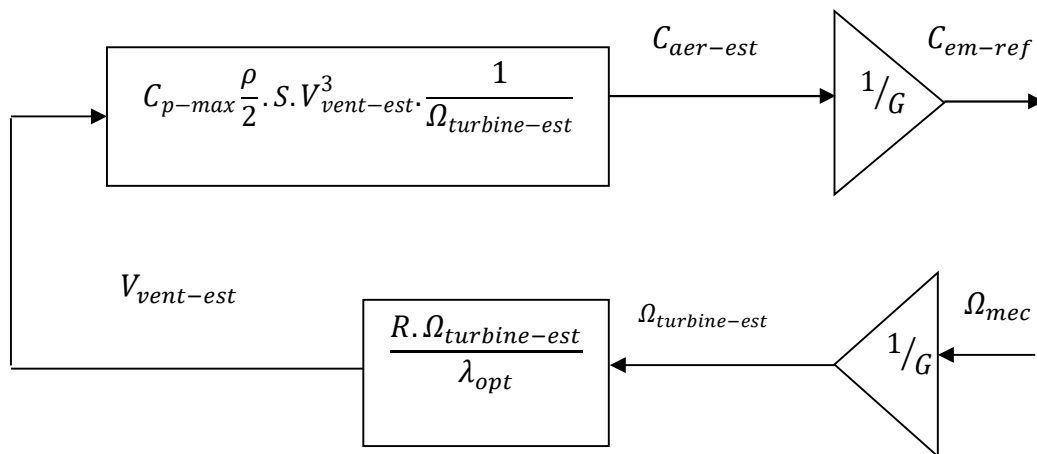


Figure .II. 6: Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite

### II.3.6.2 Schéma bloc de la turbine en MPPT

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine avec MPPT se déduit à partir des équations précédentes, qui sont représentées sur la figure (II.7)



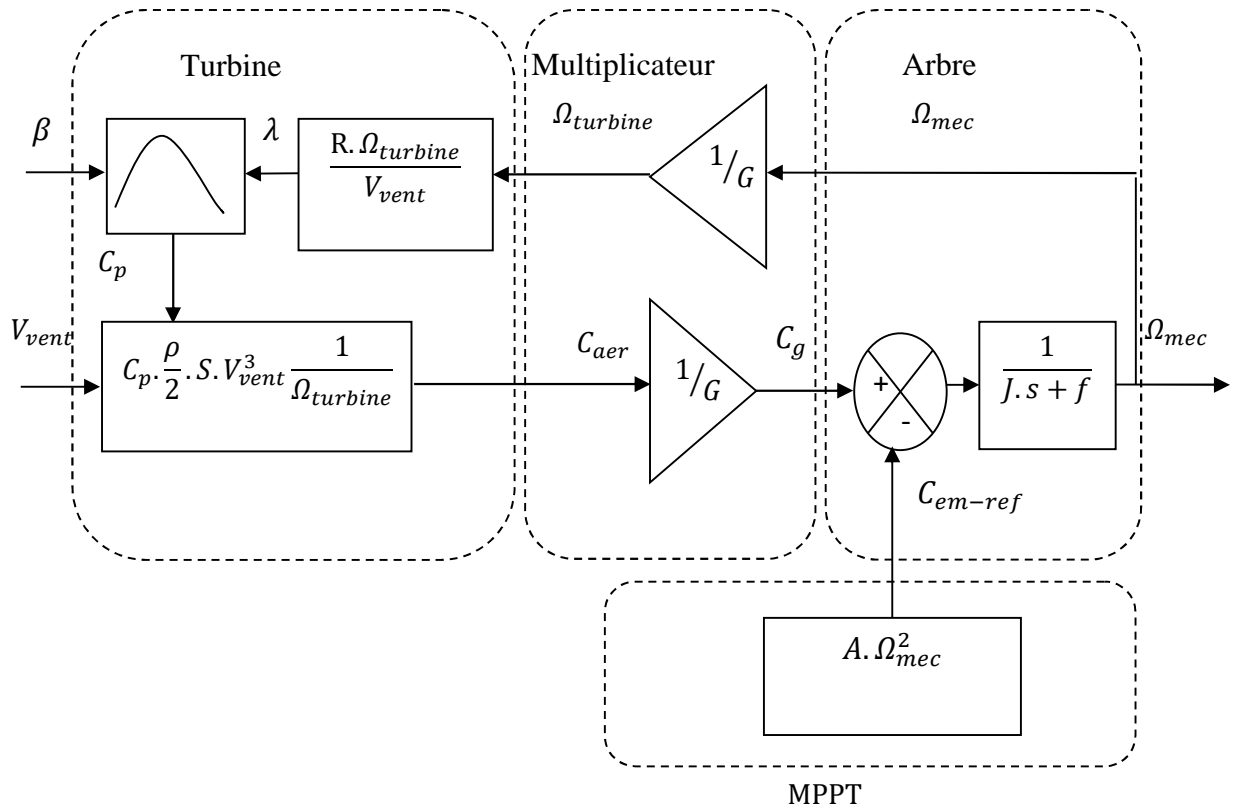


Figure .II. 7: Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT

### II.3.6.3 Différentes phases de fonctionnement

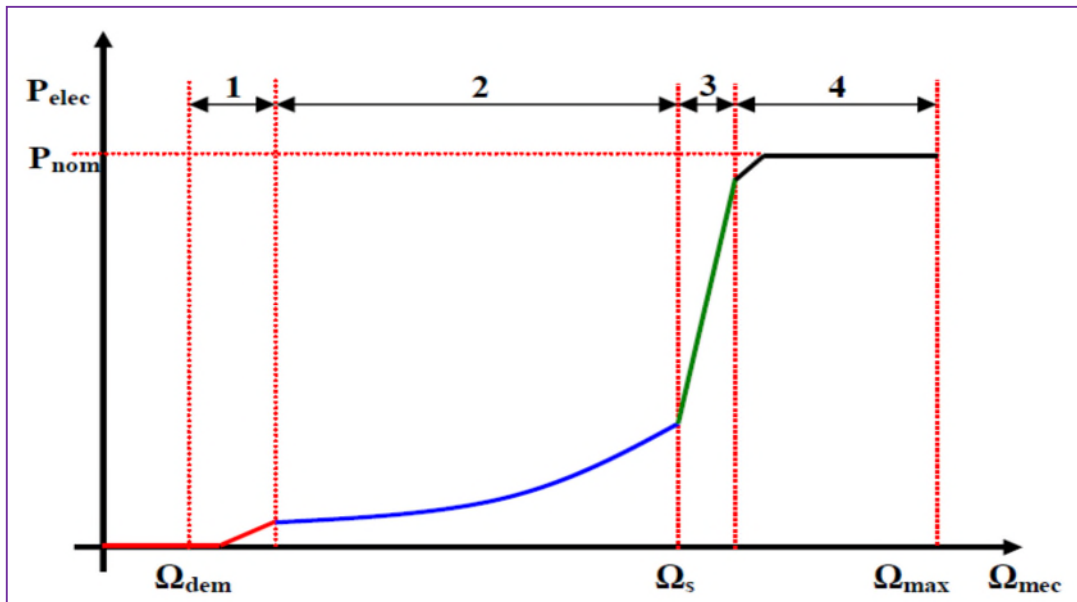


Figure .II. 8: les quatre zones de fonctionnement de la turbine

Il y a quatre phases (zones) de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

### 1. La phase de démarrage

La production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice, la puissance électrique reste assez faible. [15]

### 2. La phase d'extraction de la puissance maximale (phase M.P.P.T)

Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale de la génératrice. La puissance électrique augmente rapidement. Dans cette zone, l'angle de calage des pales  $\beta$  est maintenu constant à sa valeur nominale afin d'obtenir un  $C_p$  maximal. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes. [9] [22]

### 3. Phase à vitesse mécanique quasi constante

L'angle de calage des pales  $\beta$  varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent. C'est le pitch control La puissance électrique augmente jusqu'à sa vitesse nominale. [9]

### 4. Phase à puissance constante

Lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale. Par sécurité, si la vitesse du vent devient très importante, il y a risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe  $90^\circ$ , c'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devient moins importante [19] [23].

Le système d'orientation des pales à une dynamique mécanique bien plus lente que la dynamique électrique de la génératrice. Ainsi une lenteur de la régulation de l'angle de calage peut entraîner un dépassement de la vitesse de rotation limite lors d'une rafale de vent se produisant pendant un fonctionnement en zone III. Il est dans ce cas intéressant de concevoir une procédure permettant d'anticiper l'action du dispositif d'orientation en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation [24]

## II.3.7 Système d'orientation des pales

Les éoliennes à vitesse variable utilisent un système d'orientation des pales. Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé 'pitch control'. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus exactement

le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position en drapeau à vitesse maximale [16].

Afin d'obtenir un système de conversion d'énergie le plus efficace possible, l'angle de calage des pales  $\beta$  est adapté en permanence afin de maximiser le rendement de l'hélice.

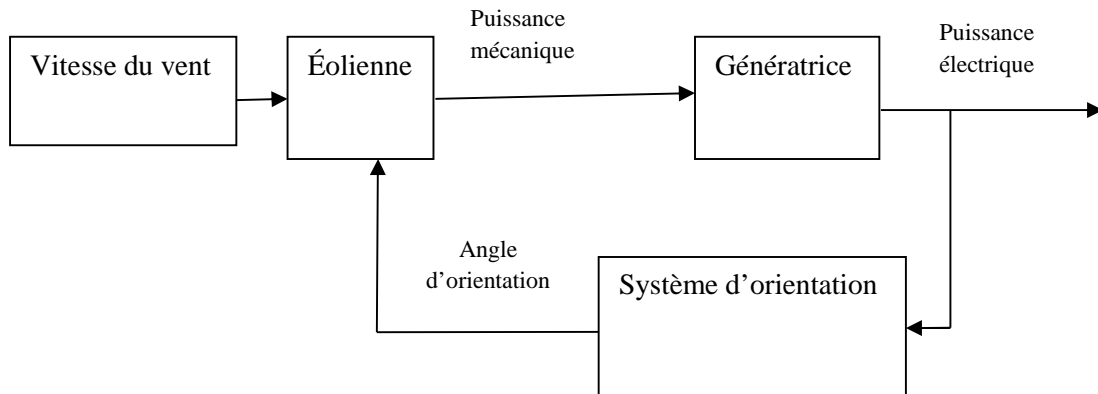


Figure .II. 9: Schéma bloc de système d'orientation des pales

Dans notre travail, nous nous limitons à phase d'extraction de la puissance maximale, donc on maintient l'angle de calage à sa valeur minimale  $\beta=0$  afin d'obtenir un  $C_p$  maximal.

## II.4. Modélisation de la MADA

### II.4.1. Hypothèses simplificatrices

Dans le cas de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe, on doit tenir compte de sa configuration exacte et certaines hypothèses simplificatrices [25].

- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Ce qui permet d'exprimer les flux et les courants en fonctions linéaires.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- Les pertes par d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor.

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- La machine est connectée à système de tension triphasé équilibré les grandeurs homopolaire seront considérées nulles.

#### II.4.2. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan abc

Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. La figure (II.10) illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à une paire de pôle.

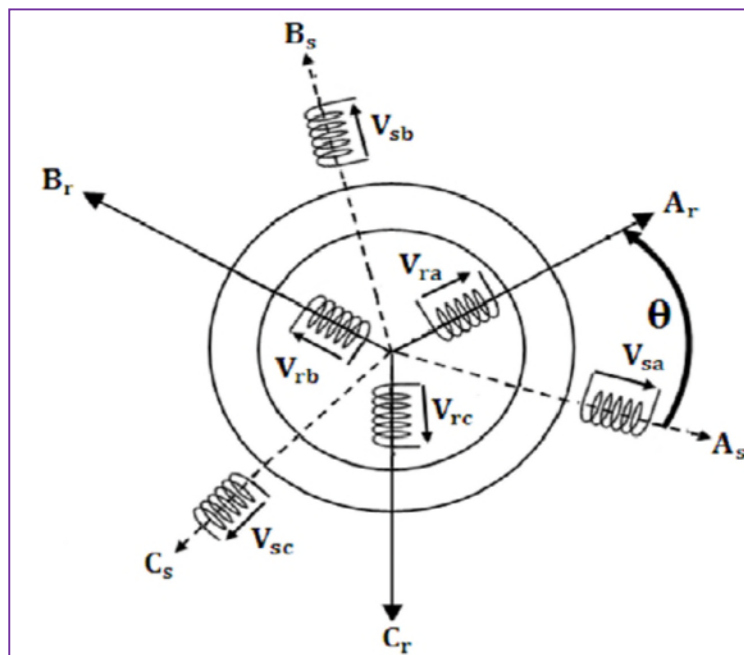


Figure .II. 10: Représentation schématique de la MADA.

$A_s, B_s, C_s$ : Phase du stator.

$A_r, B_r, C_r$ : Phase du rotor.

L'application de la loi de Faraday aux bornes des enroulements du stator et du rotor permet d'obtenir les équations de la machine.

### II.4.2.1. Equations électriques de la machine

Les équations des tensions électriques des enroulements statoriques et rotoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

Tel que :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (\text{II.17})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (\text{II.18})$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix};$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}.$$

Avec :

$[V_s], [V_r]$  : Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

$[I_s], [I_r]$  : Vecteurs des courants statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

$[\Phi_s], [\Phi_r]$  : Vecteurs des flux statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

$[R_s], [R_r]$  : Matrice de Résistances du stator et du rotor.

### II.4.2.2. Equations magnétiques

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II.19})$$

$$[\phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \quad (\text{II.20})$$

Telle que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_s & M_r \\ M_r & M_s & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$L_s$  et  $L_r$  : Inductance propre d'une phase du stator et du rotor respectivement.

$M_s$  et  $M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases du stator et du rotor respectivement.

$M_{sr}$  et  $[M_{sr}]^t$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et rotor.

En remplaçant les relations (II.19) et (II.20), respectivement dans les relations (II.17) et (II.18), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (\text{II.21})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \quad (\text{II.22})$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables ((II.21) et (II.22)). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

### II.4.2.3. Equations mécaniques de la machine

L'équation mécanique de la machine s'écrit

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad (\text{II.23})$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de  $\theta$  (angle de rotation de la machine).

### II.4.3. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan dq

Les transformations utilisées permettent la conservation de la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. Figure (II.11)

#### II.4.3.1. Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer le système triphasé équilibré (abc) en un système biphasé tournant (dq) orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système

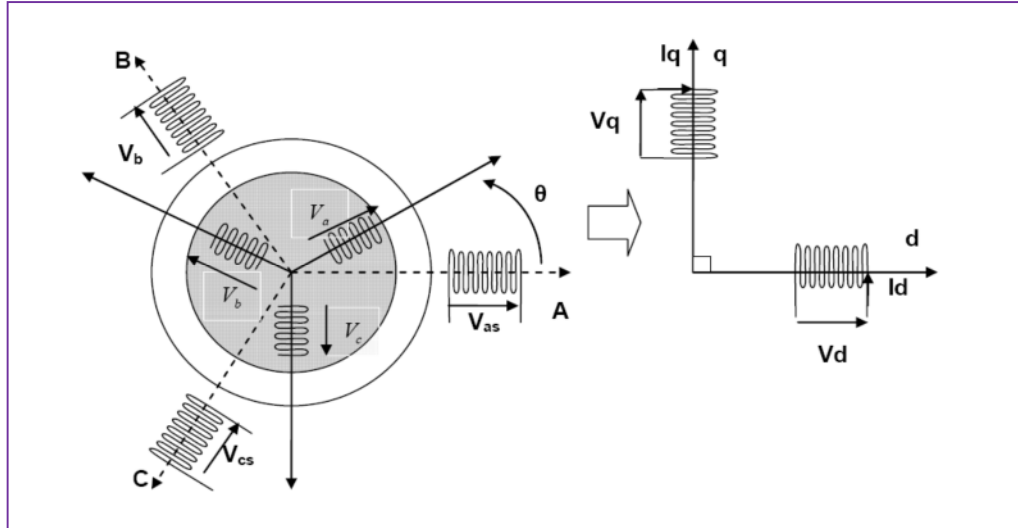


Figure .II. 11: Modèle de PARK de la MADA

On utilise la matrice de PARK (II.24) pour arriver aux équations précédentes dans le plan dq on appliquant la relation :

$$[X]_{dq} = [P(\theta)][X]_{abc} \tag{II.24}$$

Telle que :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.25}$$

$[P(\theta)]$  : Matrice de transformation de Park.

On utilise la matrice inverse de PARK (II.26) pour arriver aux équations précédentes dans le plan abc on appliquant la relation : [26].

$$[X]_{abc} = [P^{-1}(\theta)][X]_{dq} \tag{II.26}$$

Tel que la matrice inverse de PARK :

$$[P^{-1}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.27}$$

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons  $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$ .

### II.4.4. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (dq) donné par la transformation de Park [26]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park (II.27).

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  (figure II.12), celle -ci s'exprime par :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \tag{II.28}$$

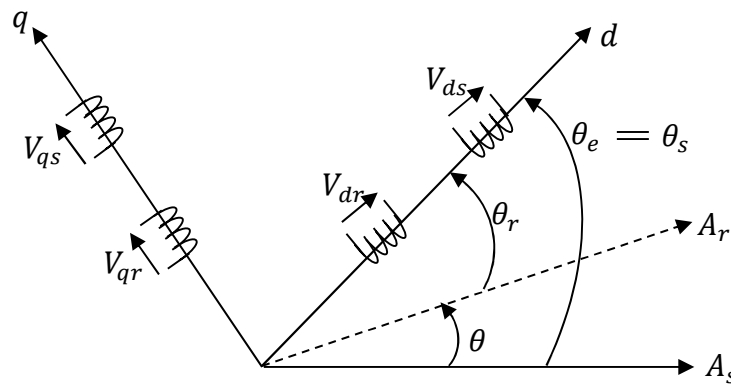


Figure .II. 12: Représentation de la machine dans le repère diphasé

Avec :

$\theta_r, \theta_s$  : Angle du stator et du rotor

#### II.4.4.1. Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \tag{II.29}$$



### II.4.4.2. Equations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = l_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = l_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$l_s = L_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique de la machine.

$l_r = L_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique de la machine.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : Inductance magnétisante la machine.

### II.4.4.3. Expression du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques s'exprime comme suite :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{l_s} \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qr} - \phi_{qs} \cdot I_{dr}) \quad (\text{II.31})$$

Avec :

P : Nombre de paires de pôles de la machine.

### II.4.5 .choix de référentiel

Les équations de la machine utilisée peuvent être exprimées dans trois référentiels selon le positionnement de ses axes par rapport aux axes de la machines [27].

- Référentiel lié au stator.
- Référentiel lié au rotor.
- Référentiel lié au champ tournant.

#### 1-Référentiel lié au stator

Ce référentiel est choisi dans le cas ou la variation de vitesse de rotation est importante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega_m \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_m \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

## 2-Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est choisi dans les problèmes des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est constante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

## 3-Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est souvent choisie dans le cas où la fréquence d'alimentation est constante et sur cette base que nous avons fait ce choix.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Nous avons choisi dans notre cas le système d'axe (d,q) lié au champ tournant car il est le plus approprié, en particulier pour les machines asynchrones à double alimentation. Il permet de ramener les grandeurs variables à des grandeurs continues et ainsi les calculs seront plus simplifiés. En plus le choix de référentiel repose sur la stratégie de commande et les grandeurs à commander.

## II.4.6. Modélisation des convertisseurs statiques

### II.5.6.1 Modèle du convertisseur statique

Les convertisseurs considérés dans notre étude sont de type parallèles double PD3 et constitués d'IGBT et de diodes montées en antiparallèle commandés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales :

- Permet un transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet les fonctionnements en hyosynchrone et hypersynchrone de la machine.

- Génère moins ou pas de perturbations sur le réseau électrique par propagation de courants harmoniques [30], [19].

Afin de simplifier le modèle des convertisseurs, en considérant les interrupteurs (IGBT et diode) parfaits. La figure (II.13) représente un onduleur de tension alimenté par une tension continu  $u$ .

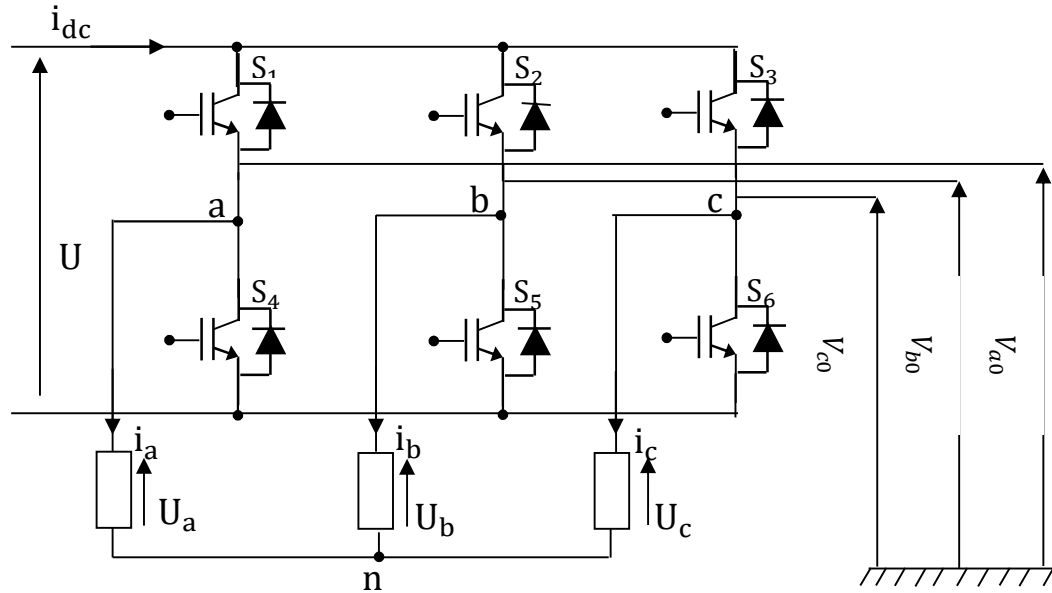


Figure .II. 13: schémas d'un onduleur de tension triphasé

La loi des mailles nous donne :

$$\begin{cases} U_{a0} = U_{an} + U_{no} \\ U_{b0} = U_{bn} + U_{no} \\ U_{c0} = U_{cn} + U_{no} \end{cases} \quad (II.35)$$

D'autre part le fait que la charge soit équilibrée donne :

$$U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0 \quad (II.36)$$

Le potentiel du point neutre est donné par :

$$U_{no} = \frac{1}{3}(U_{a0} + U_{b0} + U_{c0}) \quad (II.37)$$

D'où :

Les expressions des tensions de phases sont alors exprimées comme suit :

$$\begin{cases} U_{an} = U_a = \frac{1}{3}(2U_{a0} - U_{b0} - U_{c0}) \\ U_{bn} = U_b = \frac{1}{3}(-U_{a0} + 2U_{b0} - U_{c0}) \\ U_{cn} = U_c = \frac{1}{3}(-U_{a0} - U_{b0} + 2U_{c0}) \end{cases} \quad (II.38)$$

L'expression de la tension  $U_{jo}$ , est en fonction de l'état logique de conduction des interrupteurs du bras de l'onduleur ou il connecté. Soit à noter l'état passant du  $i^{eme}$  interrupteur par

$S_i = 1$  Et son état bloque par  $S_i = 0$ ,  $U_{jo}$  s'exprime alors par la relation suivante :

$U_{jo} = u \cdot S_i$  Pour  $i$  prenant les valeurs 1, 2,3 et  $j=a, b, c$

Nous déduisant le modèle de l'onduleur sous forme matricielle en fonction des états logique des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{u}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

De plus la relation entre les courants modulé par le convertisseur ( $I_{dc}$ ) et les courants alternatifs ( $i_a, i_b, i_c$ ) est défini par l'équation suivante

$$I_{dc} = [S_1 \ S_2 \ S_3] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

### II.4.6.2. Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signale triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont la fondamental est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet d'obtenir de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur [21].

- L'indice de modulation "  $m$  " défini comme étant le rapport de la fréquence  $f_p$  de la Porteuse à la fréquence  $f_m$  de la tension de référence :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (II.41)$$

- Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension "  $r$  " comme étant le rapport de la tension  $V_m$  de référence et l'amplitude  $V_p$  de la porteuse.

$$r = \frac{V_m}{V_p} < 1 \quad (II.42)$$

- L'avantage principal que présente la MLI est qu'elle repousse vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage. [31]
- L'inconvénient, quelle génère des impulsions dissymétrique par rapport à la période de la porteuse.
- Nous adoptons à la MLI qui s'adapte à fréquence variable coté rotor de la génératrice toute fois de coté réseau à fréquence fixe, dont sont principe est représenté dans la figure suivante :

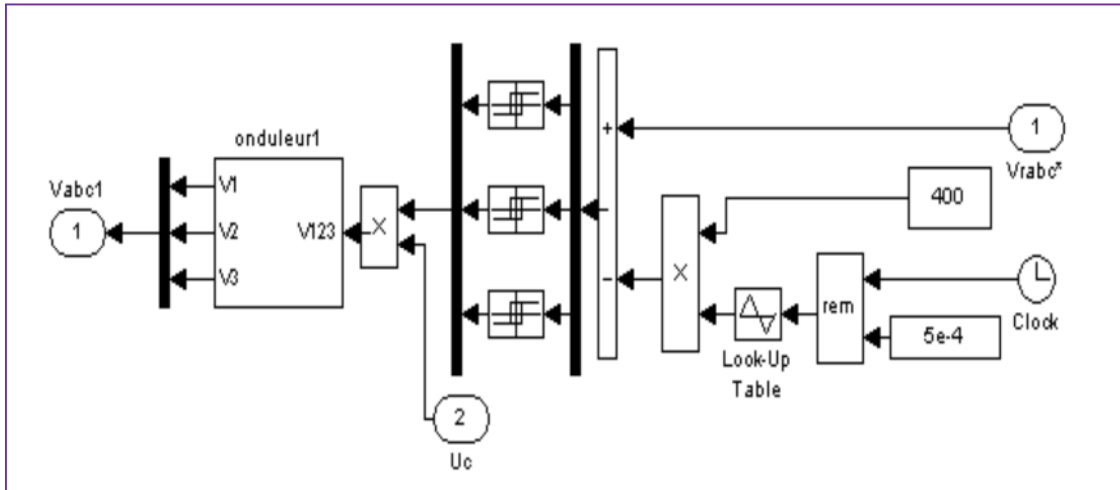


Figure .II. 14: Schéma de la simulation de l'onduleur MLI et son commande

### II.4.7. Modélisation du bus continu

Le couplage des deux convertisseurs statiques (coté rotor et coté réseau) est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme le montre la figure II.1, il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. Dans la figure II .15 est représenté en détail le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur ou sont connectés les deux convertisseurs. [21][9].

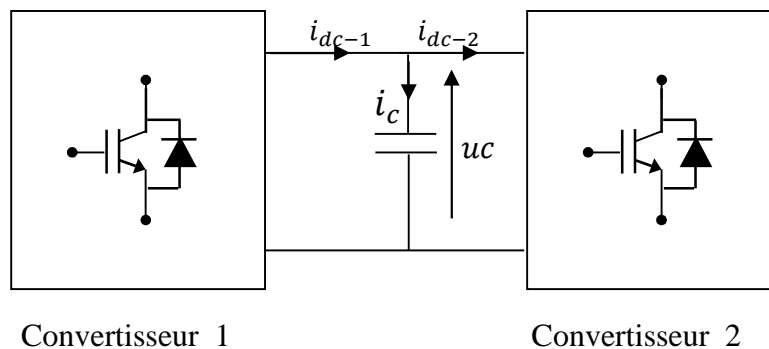


Figure .II. 15: schéma du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif

$$\frac{duc}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_c \tag{II.43}$$

$$i_c = i_{dc-1} - i_{dc-2} \tag{II.44}$$

$$u_c(t) = u_o + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \tag{II.45}$$

Avec :

$u_o$  : est la tension initiale de condensateur.

Le réglage de bus continu est réalisé en boucle de régulation permettant de maintenir une tension constante de bus continu, avec un correcteur proportionnel intégrale générant la référence du courant à injecter dans le condensateur ( $i_{c-ref}$ ).

La synthèse du régulateur est la même que celle dans le chapitre suivant, dont on a  $K_i \ll K_p$ , donc le régulateur se réduit à un gain pur, il vaut :

$$K_p = \frac{C}{\tau_{uc}} \tag{II.46}$$

$\tau_{uc}$  : est le temps de réponse désiré de la tension redressée.

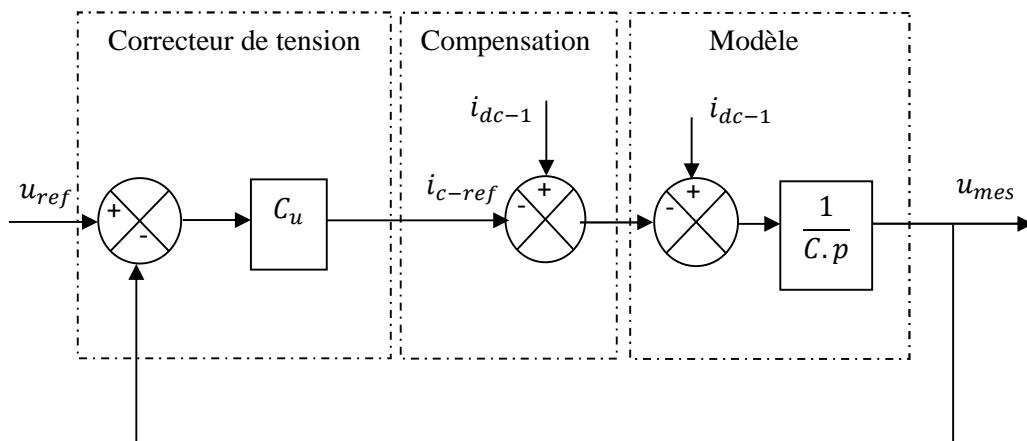


Figure .II. 16: régulation de la tension du bus continu

Le contrôle de la tension du bus continu fixe la référence de la puissance active à transiter au réseau. La puissance active transitée au bus continu est :

$$P_{dc-1} = u_c \cdot i_{dc-1} \tag{II.47}$$

La référence de la puissance emmagasinée dans le condensateur s'exprime par :

$$P_{c-ref} = u_c \cdot i_{c-ref} \tag{II.48}$$

Si on néglige les pertes dans le condensateur, puis dans le convertisseur et dans le filtre devant la puissance transitée, la référence de la puissance active à transiter au réseau s'écrit :

$$P_{f-ref} = P_{dc-1} - P_{c-ref} \tag{II.49}$$

### II.4.8. Modélisation du filtre

Le schéma de la figure (II.17) montre que la liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre d'entrée R-L.

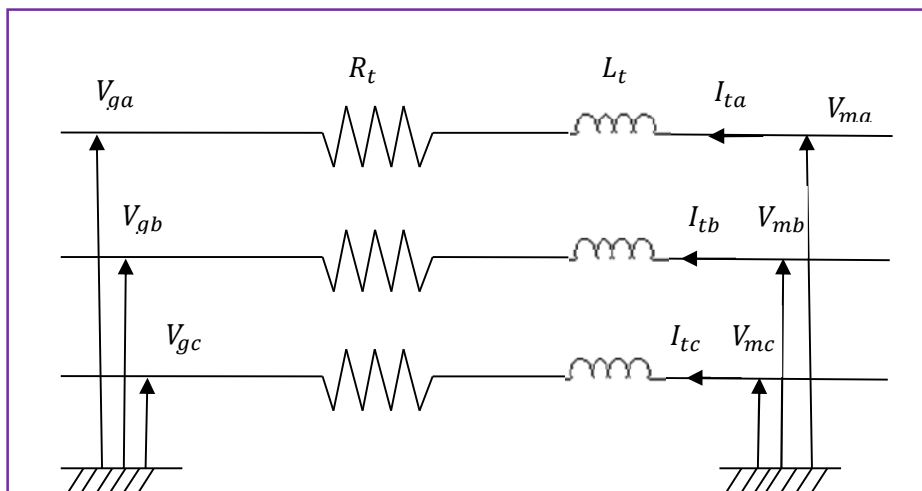


Figure .II. 17: Représentation du filtre de liaison RL

L'ensemble des équations liant les tensions modulées et les courants qui transitent le filtre sont regroupées dans l'équation différentielle suivante

$$\begin{pmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{pmatrix} = R_t \cdot \begin{pmatrix} I_{ta} \\ I_{tb} \\ I_{tc} \end{pmatrix} + L_t \cdot \frac{d}{dt} \cdot \begin{pmatrix} I_{ta} \\ I_{tb} \\ I_{tc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{pmatrix} \tag{II.50}$$

En appliquant la transformation de Park, L'équation précédente devient :

$$\begin{cases} V_{md} - V_g = (R_t + L_t s) \cdot I_{td} - W_g L_t I_{tq} \\ V_{mq} - V_g = (R_t + L_t s) \cdot I_{tq} - W_g L_t I_{td} \end{cases} \quad (II.51)$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$\begin{cases} E_{td} = V_{gd} - W_g L_t I_{tq} \\ E_{tq} = V_{gq} - W_g L_t I_{td} \end{cases} \quad (II.52)$$

De cette façon, les courants peuvent être commandés indépendamment l'un de l'autre en agissant sur les tensions d'axe d et q. Une fonction de transfert identique entre les courants et les tensions d'un même axe est obtenue.

$$F(s) = \frac{1}{R_t + L_t s} \quad (II.53)$$

Pour une réponse dynamique plus rapide et pour annuler l'erreur en régime permanent des régulateurs PI sont utilisés.

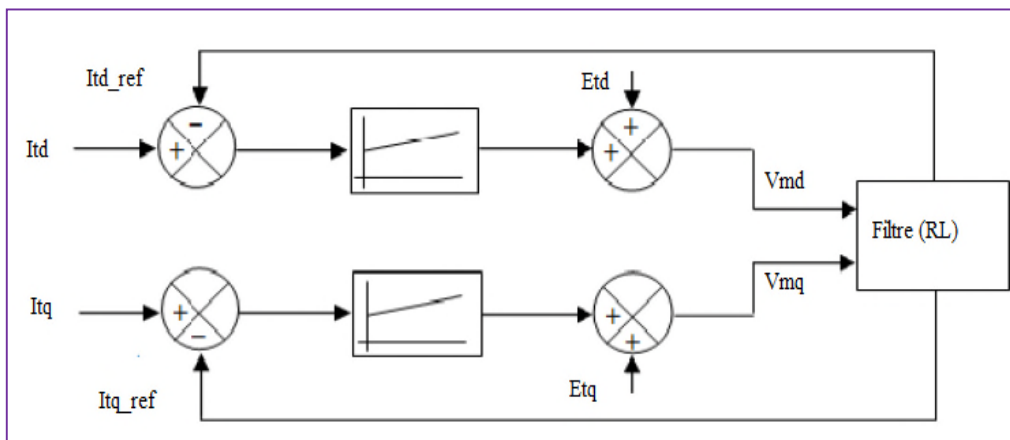


Figure .II. 18: Modèle obtenu du filtre dans le repère diphasé (dq).

### II.5. Les expressions des puissances

Les expressions des puissances active et réactive du réseau s'écrivent :

$$\begin{cases} P_{res} = P_s + P_r \\ Q_{res} = Q_s + Q_r \end{cases} \quad (II.54)$$



La puissance mécanique optimale de la turbine est déduite à partir du couple électromagnétique de référence, issu après l'application de l'algorithme MPPT.

$$P_{mec-opt} = C_{em-ref} \cdot \Omega_{mec} \quad (II.55)$$

La référence de puissance est donnée comme suit :

$$P_{res-ref} = -\eta \cdot P_{mec-opt} \quad (II.56)$$


Avec :

$\eta$  : Le rendement de la MADA

## **Conclusion**

Ce chapitre a fait l'objet de l'établissement de la modélisation de la chaîne de conversion éolienne, ainsi que la mise en équation des différentes grandeurs caractérisant le système. Ces équations permettent d'établir un modèle mathématique équivalent, dont la complexité est réduite par la transformation de Park. L'orientation de flux a pour intérêt le contrôle des puissances statoriques active et réactive à partir des courants rotoriques.

Le transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau est assuré par des convertisseurs statiques, cela permet le fonctionnement en hypo et hyper synchrone de la génératrice asynchrone.



*Chapitre III*  
*Stratégie de commande*  
*et Simulation*

## Introduction

Dans les applications industrielles des entraînements à vitesse variable, la machine à induction est utilisée, vue sa robustesse et son faible coût de fabrication, mais sa commande reste assez complexe, car son modèle mathématique est non linéaire et fortement couplé.

Ce chapitre présente le principe du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation avec le contrôle des puissances active et réactive statoriques. Les enroulements rotoriques sont alimentés par un convertisseur d'électronique de puissance et les grandeurs de commande sont le plus souvent : la vitesse et le flux, mais certains modes de fonctionnement spécifiques amènent à choisir d'autres grandeurs.

Cette commande consiste à orienter le repère tournant d'axe (d, q) tel que l'axe "d" soit confondu avec l'axe du flux statorique. Ce principe est basé sur la séparation de la grandeur flux " $\Phi$ " et du couple.

### III.1. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle est une méthode de contrôle des machines à courant alternatif, son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes ( $I_{ds}$  et  $I_{qs}$ ) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon que l'une des composantes ( $I_{qs}$ ) commande le couple et l'autre ( $I_{ds}$ ) commande le flux. Ceci permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée.

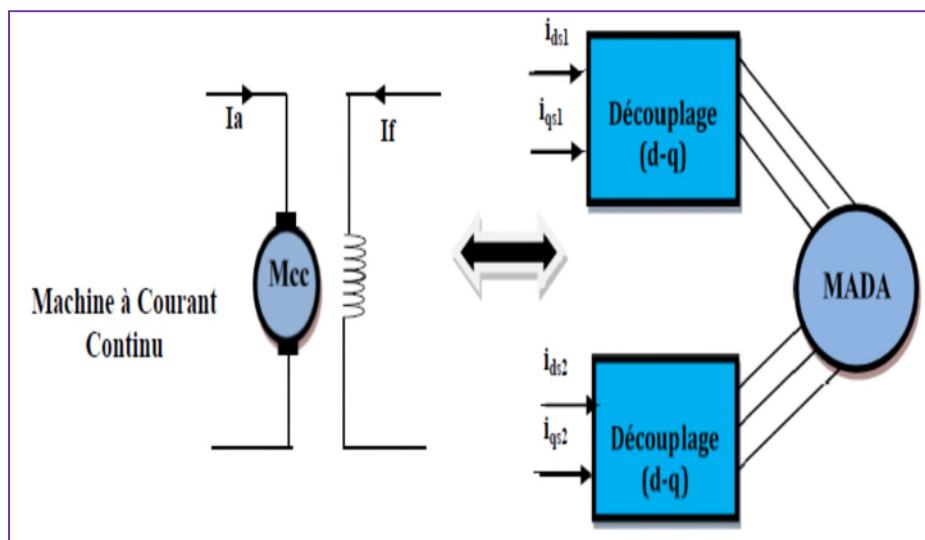


Figure .III. 1 Principe de la commande vectorielle

### III.2.Modèle de la MADA en vue de la commande

Après avoir développé les équations du (II.29) et (III.2) on aura les équations de tension :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d(L_s I_{sd} + M I_{rd})}{dt} - \omega_s (L_s I_{sq} + M I_{rq}) \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d(L_s I_{sq} + M I_{rq})}{dt} + \omega_s (L_s I_{sd} + M I_{rd}) \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d(L_r I_{rd} + M I_{sd})}{dt} - (\omega_s - \omega_m) (L_r I_{rd} + M I_{sd}) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d(L_r I_{rq} + M I_{sq})}{dt} + (\omega_s - \omega_m) (L_r I_{rq} + M I_{sq}) \end{cases} \quad (III-1)$$

Les équations des flux sont données comme suit ;

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{qs} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{dr} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \phi_{qr} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (III-2)$$

Les puissances actives et réactives statoriques sont données par :

$$\begin{cases} p_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (III-3)$$

### III.3.Schéma de commande

La figure (III-2) représente le schéma de principe de la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation. La consigne de puissance active correspond à la puissance maximale extraite du vent.

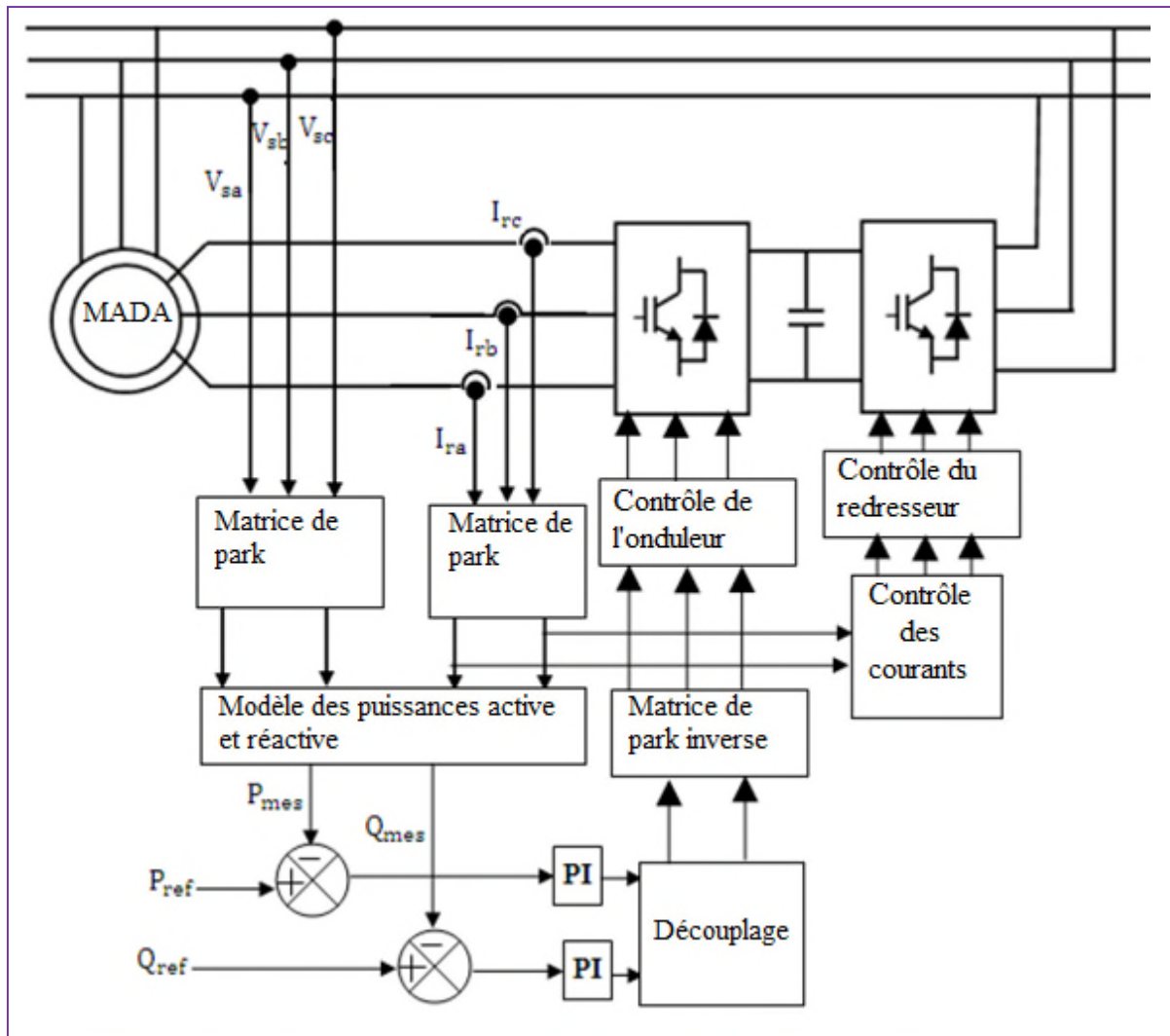


Figure .III. 2 : Schéma de principe de la commande en puissance de la MADA.

### III.4.Choix du référentiel et principe de la commande

En choisissant un référentiel diphasé  $(\alpha, \varphi)$  lié au champ tournant statorique et en alignant l'axe d sur le vecteur flux statorique  $\varphi_s$ . Ainsi :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad \text{(III-4)}$$

L'expression du couple électromagnétique de l'équation (II.31) devient alors :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{l_s} \cdot (\varphi_s \cdot I_{qr}) \quad \text{(III-5)}$$

En négligeant la résistance statorique, hypothèse réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans la production éolienne, on peut écrire alors pour la phase  $n$ :

$$V_{ns} = \frac{d\varphi_{ns}}{dt}, \quad n = a, b, \text{ ou } c \quad (\text{III-6})$$

La relation (III-6) montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur des tensions statoriques et qu'il est en avance de  $\frac{\pi}{2}$  sur ce même vecteur.

Dans l'hypothèse d'un réseau stable ayant pour tension  $v_s$ , le flux  $\varphi_s$  est constant. Cette considération nous amène à écrire :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

On peut simplifier les équations des tensions statoriques sur le repère choisi comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

### III.5. Relation entre les puissances statoriques et les courants rotoriques

Les puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone à double alimentation données par (III-3) peuvent être réécrites, en tenant compte de (III-8) comme suit :

$$\begin{cases} p_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

En tenant compte de (III-4), on peut exprimer les courants statoriques en fonction des courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

En remplaçant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  par leurs expressions données par l'équation (III-10) dans les équations des puissances rassemblées dans (III-9), on aboutit à :

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{MV_s}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

En tenant compte de (III-8), l'expression de la puissance active et réactive devient alors :

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

### III.6. Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques

A partir des équations (II.29) et (II.10) nous avons :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

A partir de cette dernière équation (III-13) et l'équation (II-25) il en découle alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{dr} - g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{qr} + g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les tensions à imposer au rotor de la machine pour obtenir les courants voulus et par conséquent les puissances à commander. Les expressions trouvées nous renseignent sur l'existence d'un couplage entre les deux axes d et q. Afin d'aboutir à une commande performante, il faut au préalable réaliser un découplage entre les deux axes.

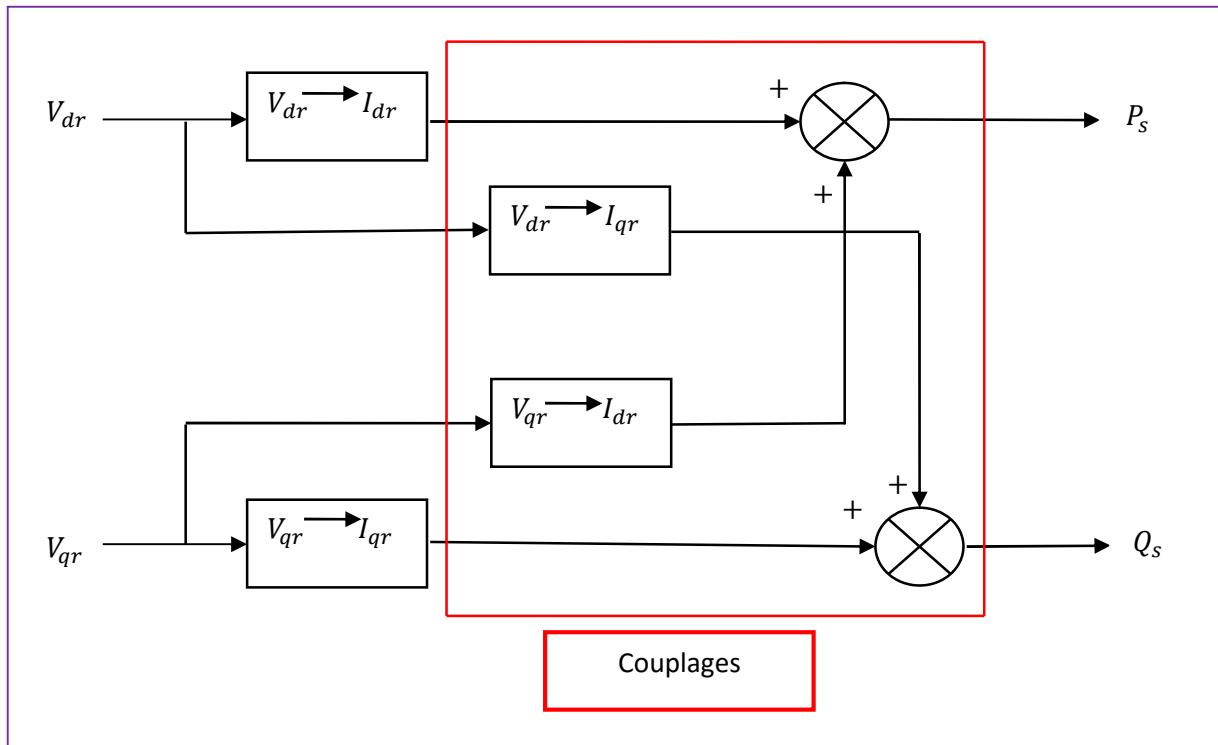


Figure .III. 3 : Description des couplages.

### III.7. Découplage entre les tensions rotoriques sur les axes directs et en quadrature

Il existe plusieurs techniques pour éliminer l'effet de l'entrée à une sortie

- ✓ Découplage par compensation.
- ✓ Découplage utilisant un régulateur.
- ✓ Découplage par retour d'état.

Nous nous intéressons au découplage par compensation pour cela on définit deux nouvelles variables de commande  $V_{dr1}$  et  $V_{qr1}$  avec :

$$\begin{cases} V_{dr} = V_{dr1} - e_{dr} \\ V_{qr} = V_{qr1} - e_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

Avec :

$e_{dr}, e_{qr}$  sont des tensions de compensation sur les axes d et q.



$$\begin{cases} e_{dr} = \omega_r I_{rq} \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \\ e_{qr} = -g \frac{M}{L_s} V_s - \omega_r I_{rd} \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \end{cases} \quad \text{(III-16)}$$

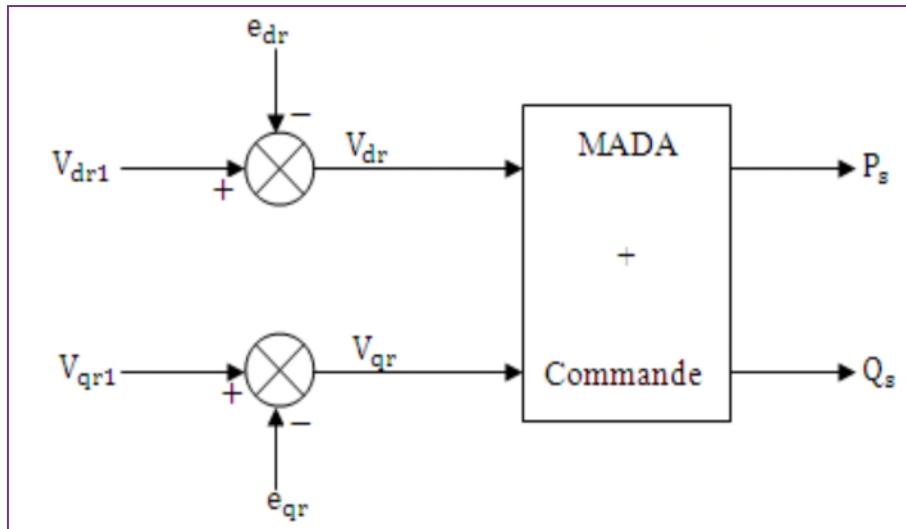


Figure .III. 4 : Reconstitution des tensions Vqr et Vdr

### III.8. Description du système à régler

Les équations (III-11), (III-12) et (III-14) permettent d'établir le schéma bloc du système à réguler ;

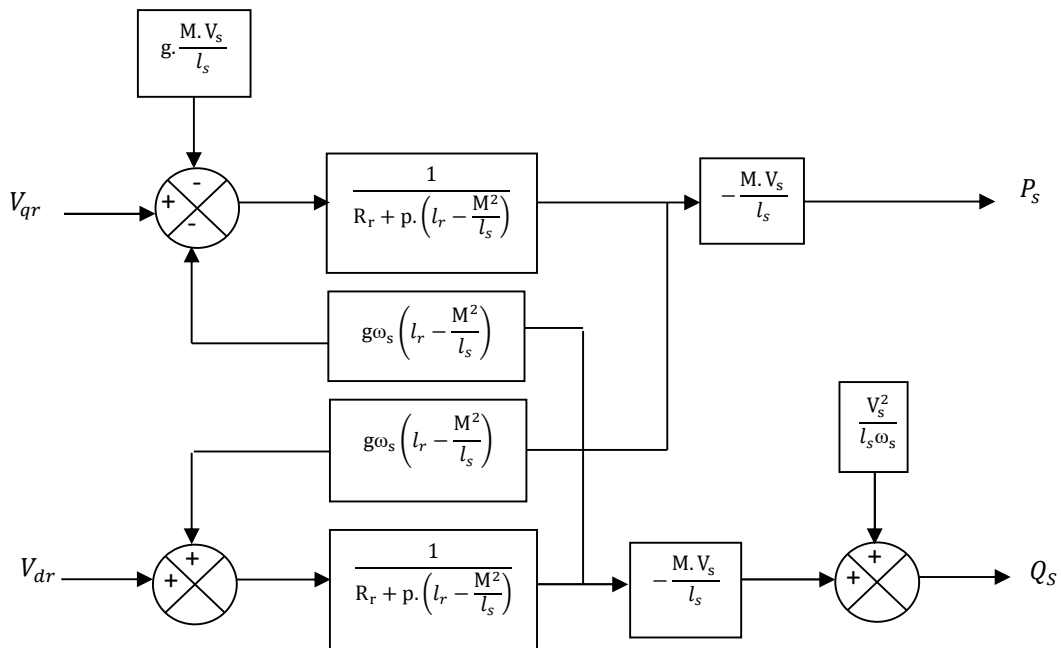


Figure .III. 5 : Schéma bloc du système à réguler

### III.9.Synthèse des régulateurs « Proportionnel – intégral (PI) »

Le rôle des régulateurs de chaque axe est d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base de modèle simplifié de la Figure (III.5) Nous avons opté pour le choix des PI vue leur simplicité et la facilité de mise en œuvre tout en offrant des performances acceptables [30] [15].

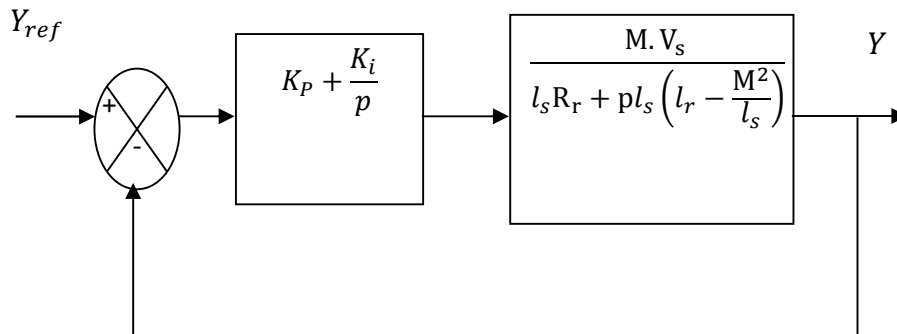


Figure .III. 6 : Schéma bloc du système régulé par un PI

La (Figure III – 6) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{p}$ , correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la (Figure III – 5)

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) s'écrit :

$$FTBO = \left( \frac{p + \frac{K_i}{K_P}}{\frac{p}{K_P}} \right) \cdot \left( \frac{\frac{M V_s}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}}{p + \frac{l_s R_r}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}} \right) \quad (\text{III-17})$$

Afin éliminer le zéro présent dans la fonction de transfert en boucle ouverte, nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse des régulateurs, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{l_s R_r}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)} \quad (\text{III-18})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_P \left( \frac{MV_s}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)} \right)}{p} \quad (\text{III-19})$$

La fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) est :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_P} \left( \frac{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}{MV_s} \right) \quad (\text{III-20})$$

Le terme  $\tau_r$  désigne ici la constante de temps du système corrigé. Nous choisissons de fixer celle-ci à 100 ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie électrique sur le réseau avec la MADA de 1,5 MW [15].

On peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et de la constante de temps  $\tau_r$  par :

$$K_P = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}{MV_s} \quad (\text{III-21})$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{l_s R_r}{MV_s} \quad (\text{III-22})$$

### III.10.- Simulation de la commande en puissance

#### Essai 01 : fonctionnement à vitesse fixe

Dans le premier essai nous avons soumis le système muni de sa commande à des échelons de puissance active et réactive statorique.

Les paramètres de la MADA et de la turbine utilisée sont donnés en annexe.

Les échelons des puissances active et réactive qui sont appliqués à la commande de la MADA sont représenté dans le tableau suivant :

Temps(s)	$P_s^*$	Temps(s)	$Q_s^*$
0 à 2	-1.25 MW	0 à 1	-0.5 MW
2 à 4	-0.25 MW	1 à 3	-0.2 MW
4 à 5	-1.25 MW	3 à 5	-0.5 MW

Tableau .III.1 : échelons de puissance active et réactive.

## Résultats :

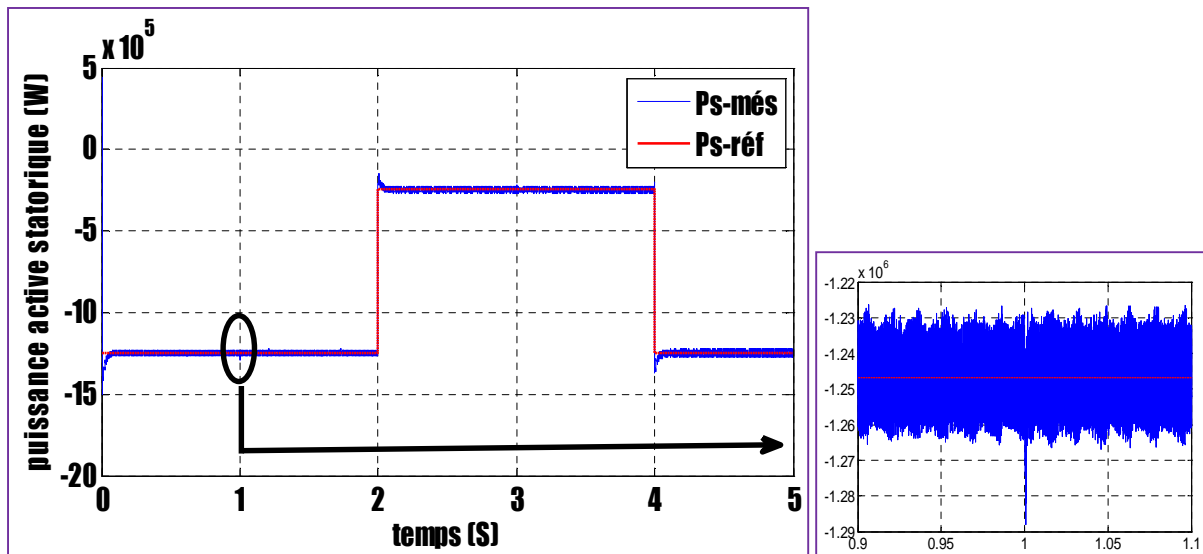


Figure .III. 7 : Allure de la puissance active.

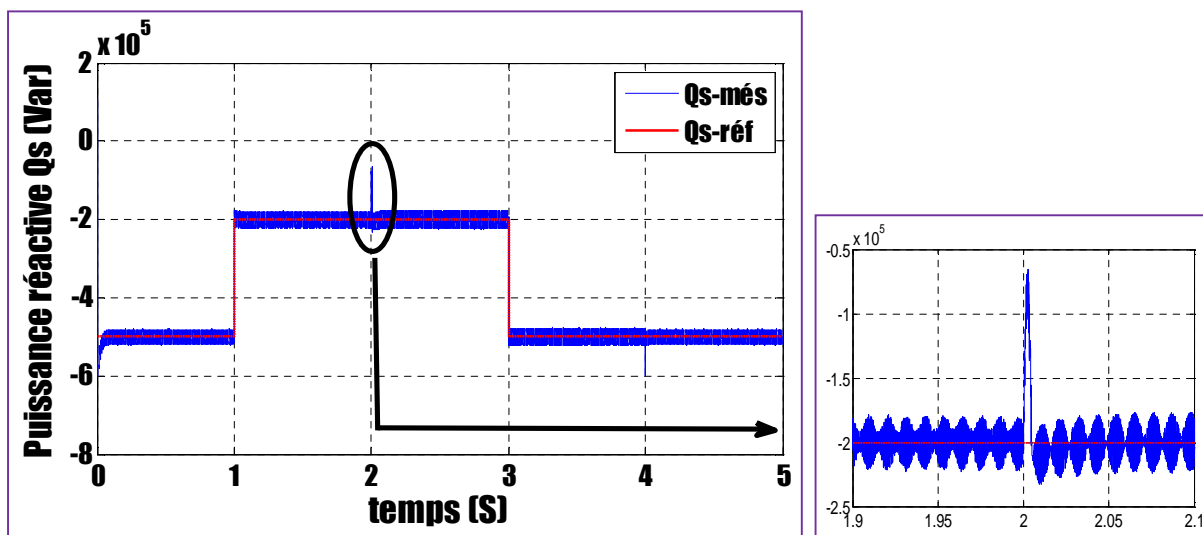


Figure .III. 8 : Allure de la puissance réactive.

On peut remarquer que les échelons de puissance active et réactive statorique sont bien suivis, le système présente de bonnes performances (système rapide, dépassement réduit). On remarque également que l'effet de couplage entre les deux axes est très réduit.

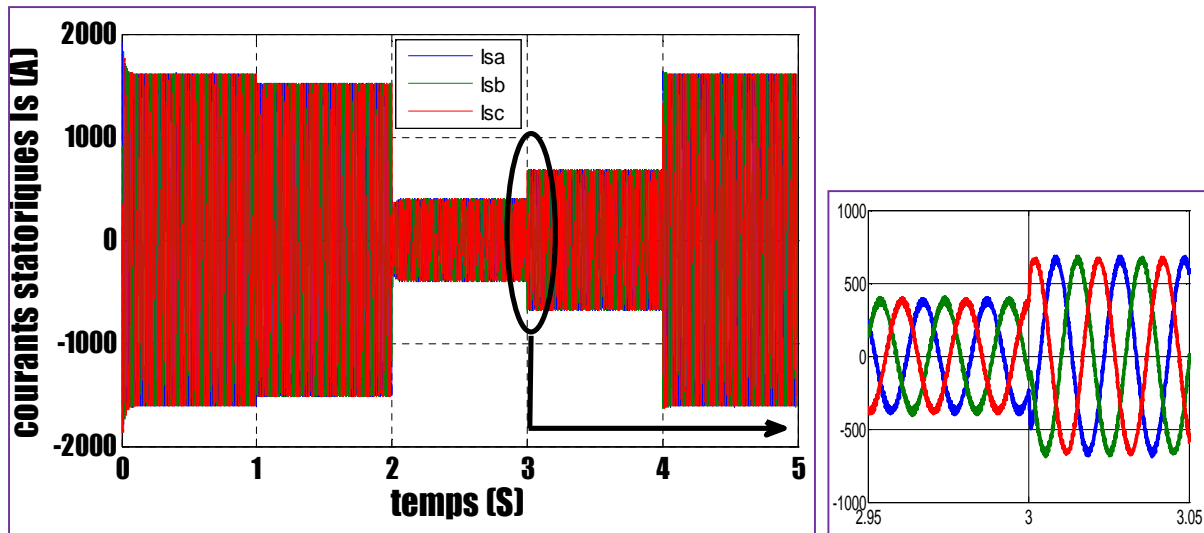


Figure .III. 9 : Allure des courants statoriques.

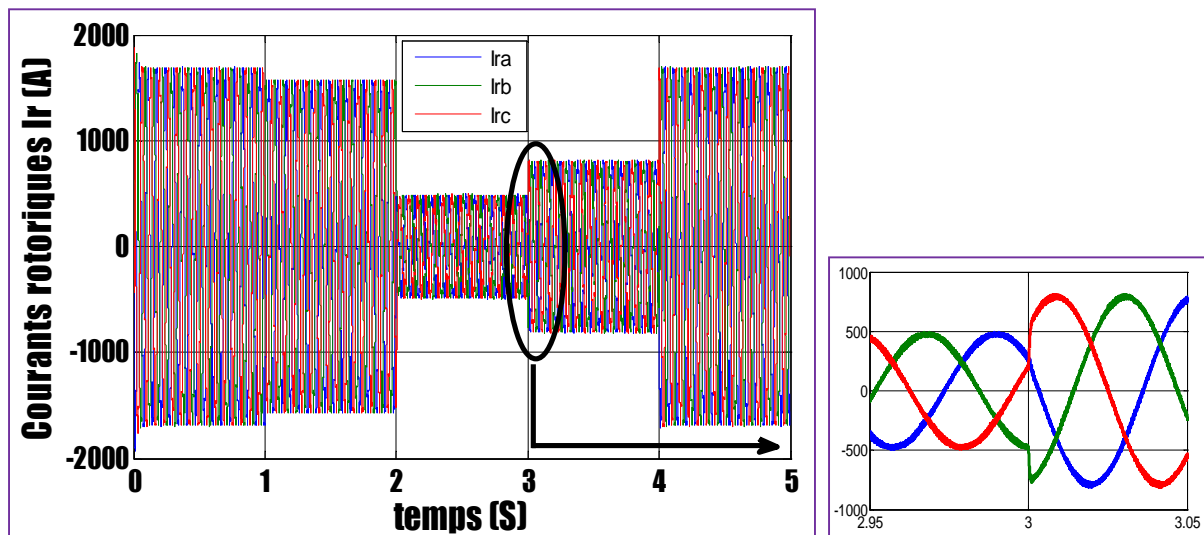


Figure .III. 10 : Allure des courants rotoriques.

On voit que la variation de la puissance active et réactive influe directement sur l'amplitude des courants statoriques

Les courants obtenus au stator et au rotor sont de formes sinusoïdales, ce qui implique une énergie propre sans harmoniques fournie ou absorbée par la MADA.

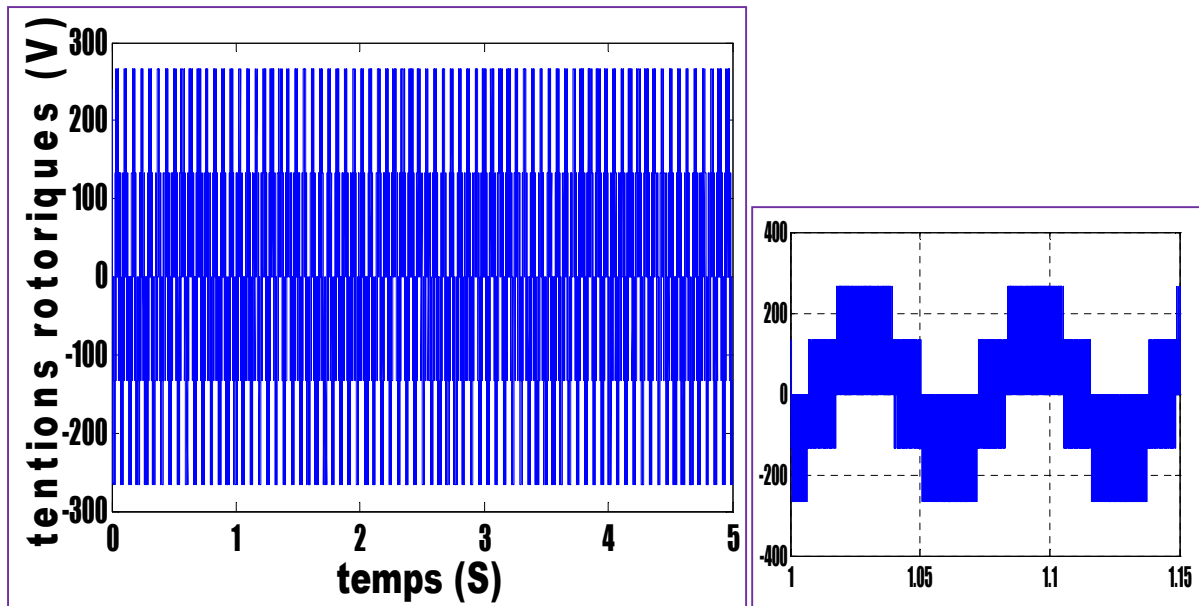


Figure .III. 11 : Allure de tension d'une phase rotorique.

La figure III.11 met en évidence la tension rotorique qui traduit le fonctionnement du convertisseur de puissance (redresseur MLI- onduleur MLI)

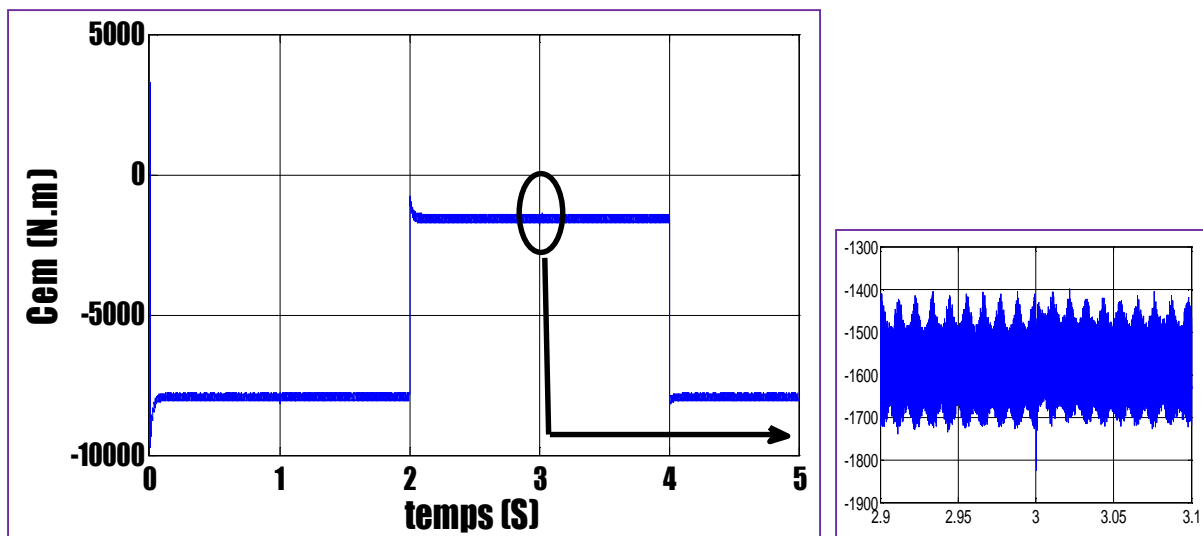
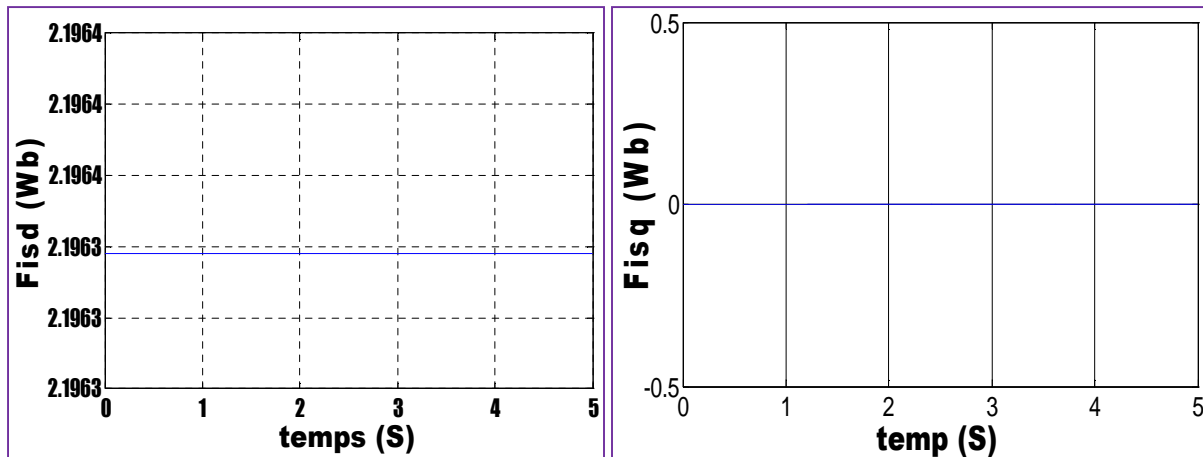
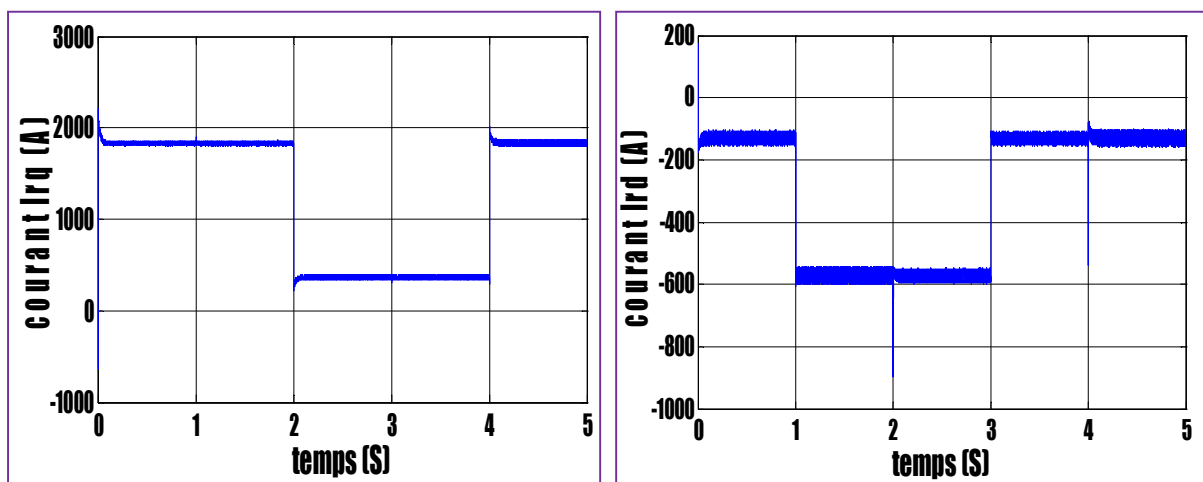


Figure .III. 12 : Allure de couple électromagnétique  $C_{em}$ .

On voit bien que le couple électromagnétique est exactement l'image de la puissance active car la vitesse est constante.

Figure .III. 13 : Allure du flux  $\phi_{sd}$   $\phi_{sq}$ 

On voit bien que le flux suivant l'axe en quadrature est nul, ce qui vérifie le découplage magnétique de la machine.

Figure .III. 14 : Allure du courant  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$ 

On voit que l'allure de la variable de commande (courant sur l'axe quadratique  $I_{qr}$ ) est en opposition avec l'allure de la puissance active, car la puissance active ne dépend que du courant  $I_{qr}$ .

## Essai02 : Essai du fonctionnement en MPPT

Vitesse de vent variable avec l'implémentation de l'algorithme MPPT

- L'angle de calage  $\beta$  est fixé à  $4^\circ$ .
- La référence de puissance est choisie selon l'MPPT.
- Un échelon de la puissance réactive de 0 pour maintenir le facteur de puissance à l'unité.

### Profil du vent aléatoire

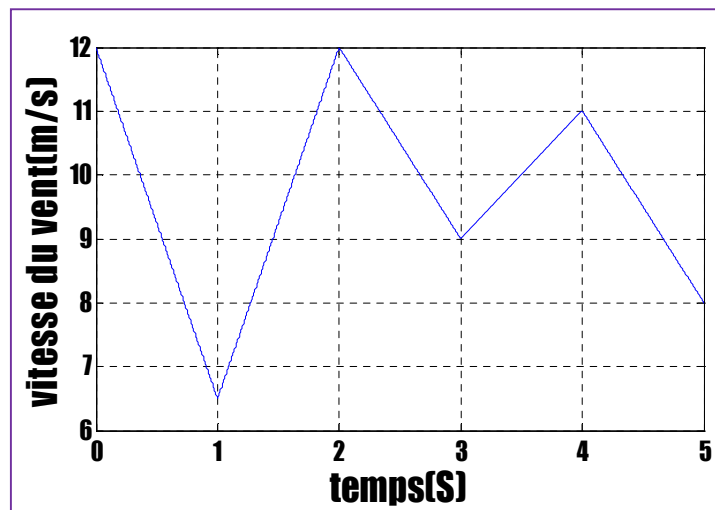


Figure .III. 15 : Profil du vent.

Le vent étant une grandeur de nature aléatoire, par conséquent nous avons choisi dans cette étude une vitesse variable selon un profil aléatoire, et de manière à prendre en considération les deux régimes de fonctionnement l'hypo et l'hyper synchronisme.

- Coefficient de puissance

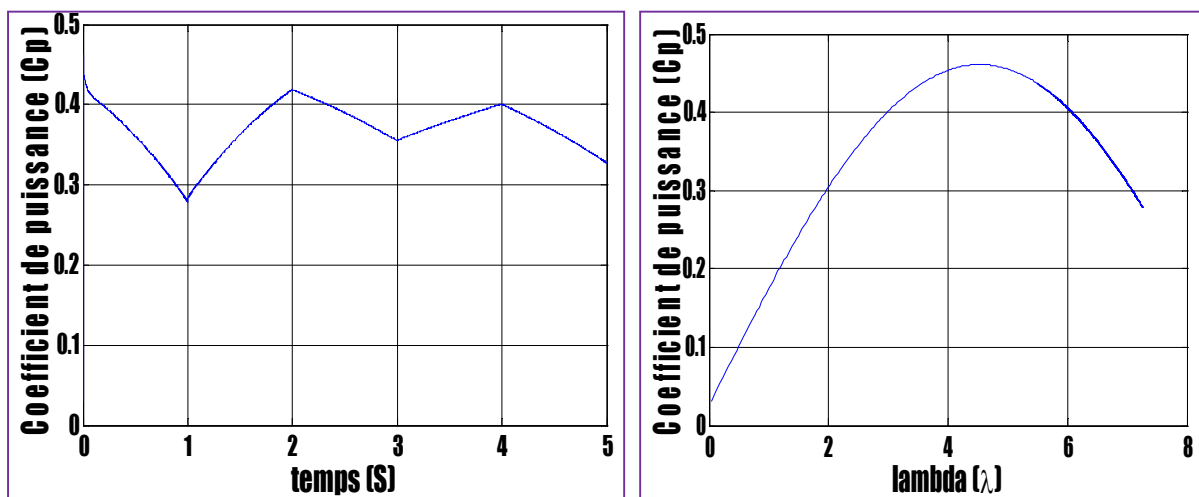


Figure .III. 16 : Coefficient de puissance en fonction de temps et de lambda.

On constate que la valeur moyenne de coefficient de puissance atteint environ 85% de la valeur maximale, ce qui est satisfaisant.



- Vitesse de la machine

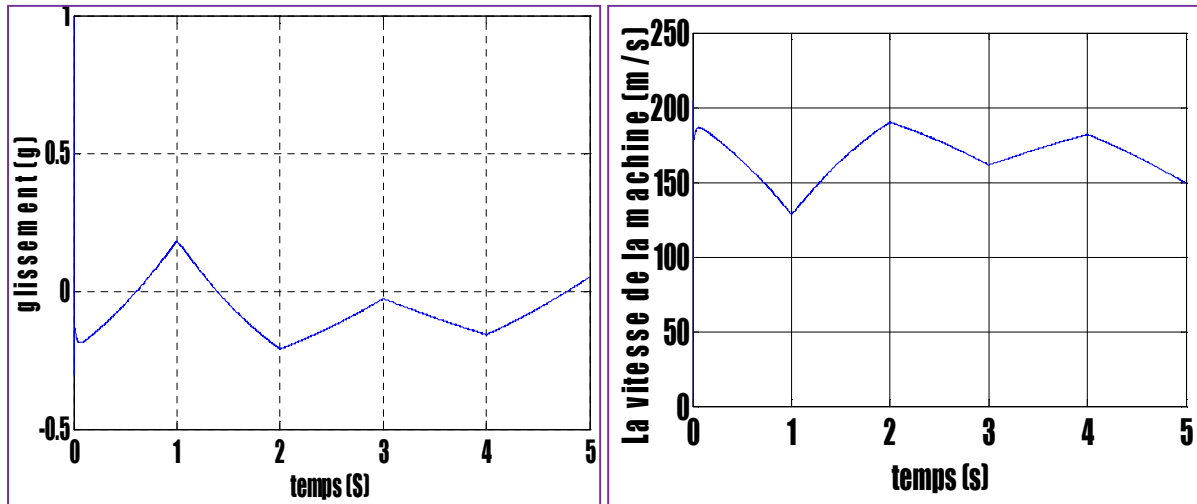


Figure .III. 17 : Allure de la vitesse et du glissement.

La variation de la vitesse de la machine dépend directement de la vitesse du vent, et son évolution suit cette dernière. De l'allure du glissement nous pouvons constater que la vitesse de la machine varie de -15% à 15% autour de la vitesse de synchronisme.

- Puissances active et réactive

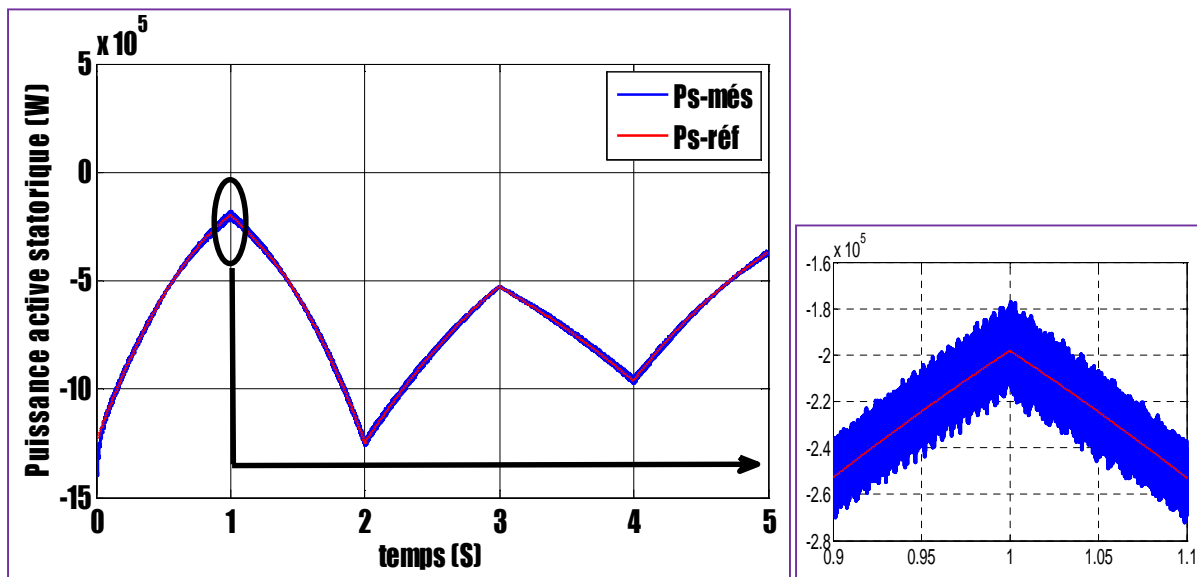


Figure .III. 18 : Allure de la puissance active

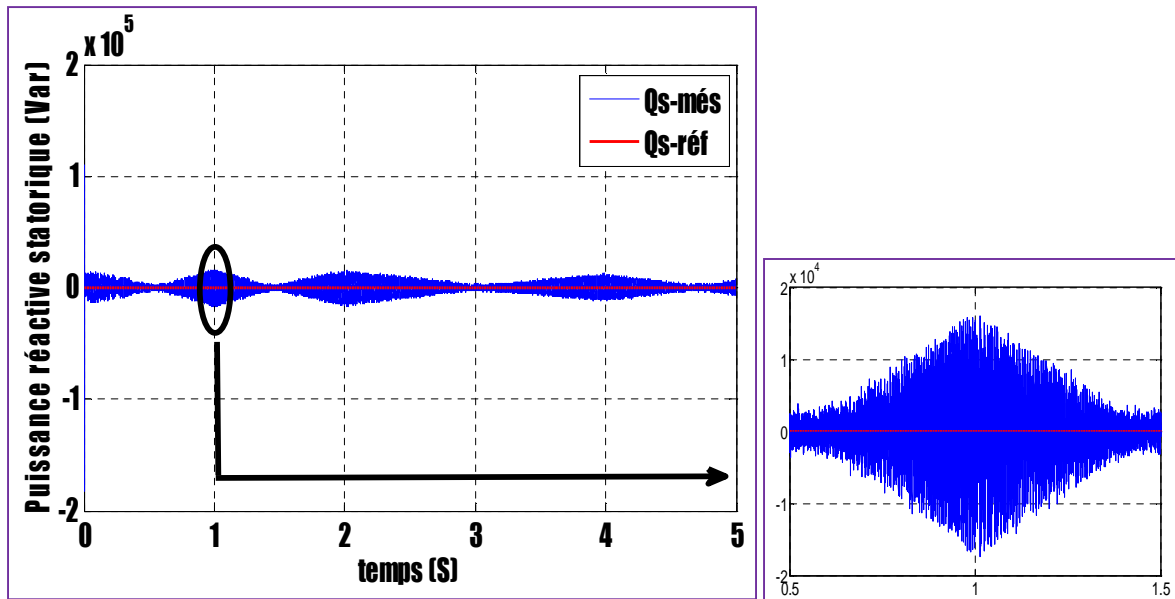


Figure .III. 19 : Allure de la puissance active.

Nous constatons que la puissance réactive est quasiment nulle, on constate que l'erreur de la puissance réactive est peu considérable, on peut diminuer cette erreur en diminuant le temps de réponse, ce qui est difficile à réaliser pratiquement. Par contre celle de puissance active suit presque parfaitement celle de référence et a une forme qui suit les variations de la vitesse du vent étant donnée  $P_{réf} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3}{2}$ . On remarque aussi que la puissance active est négative, ce qui signifie qu'elle est fournie au réseau.

- Courants statoriques

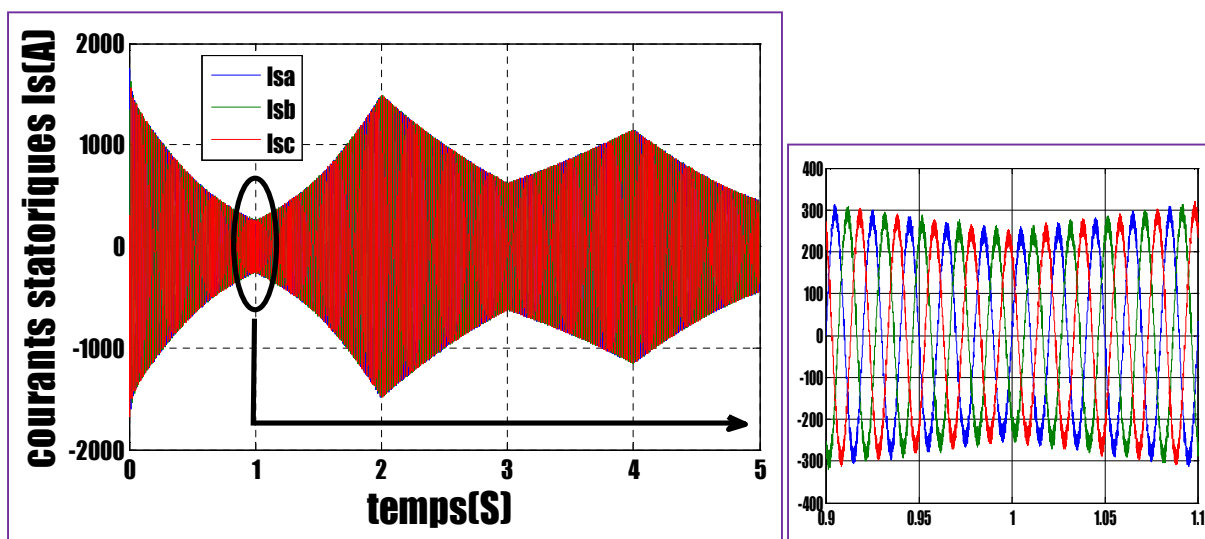


Figure .III. 20 : Allure des courants statoriques.

La figure III-20 montre que l'évolution de l'amplitude des courants statoriques suit parfaitement la puissance active, par exemple à  $t=1s$  l'amplitude de la puissance active est minimale, l'amplitude des courants statoriques l'est également. Ces courants sont de nature sinusoïdale et ont une fréquence de valeur constante égale 50Hz comme le montre la figure de zoom. Cette valeur correspond à la valeur imposée par le réseau.

- **Courants rotoriques**

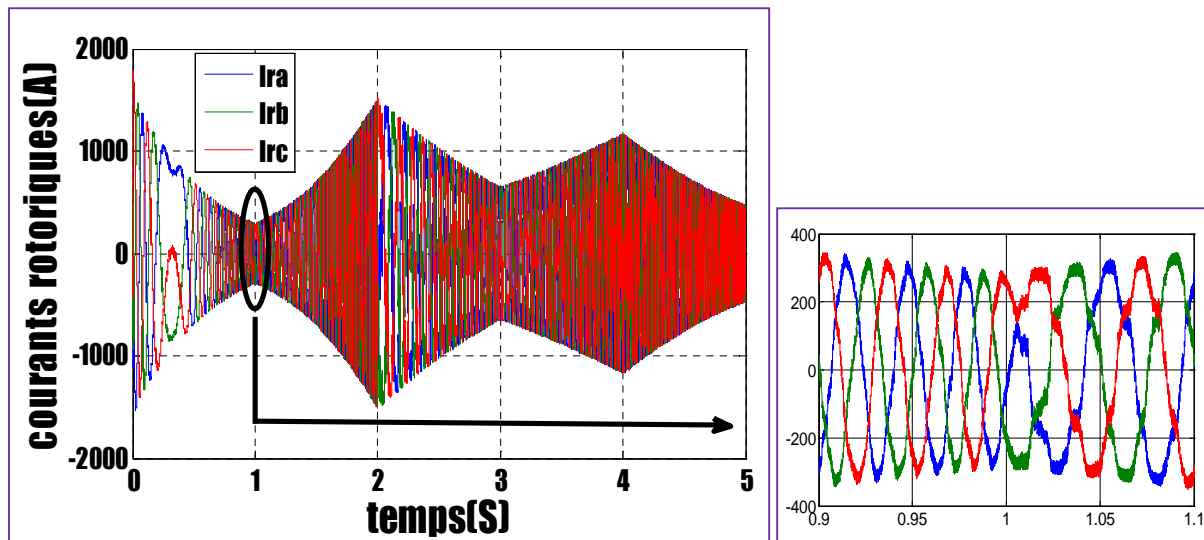
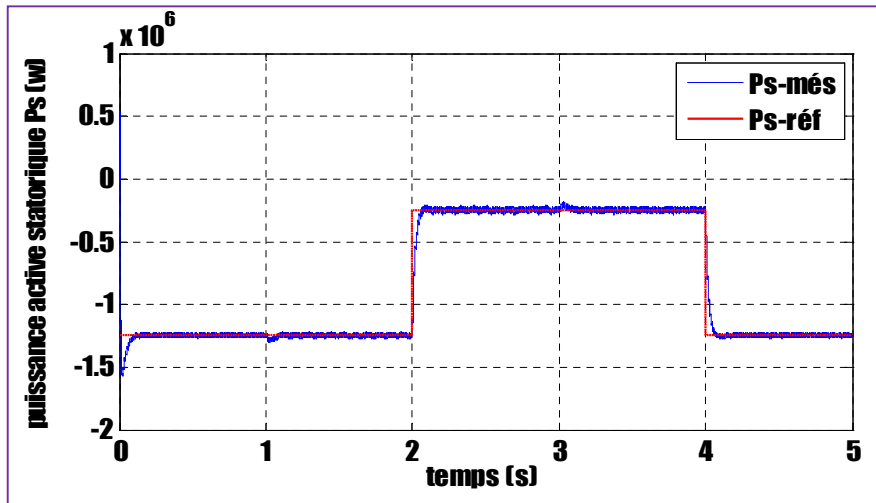
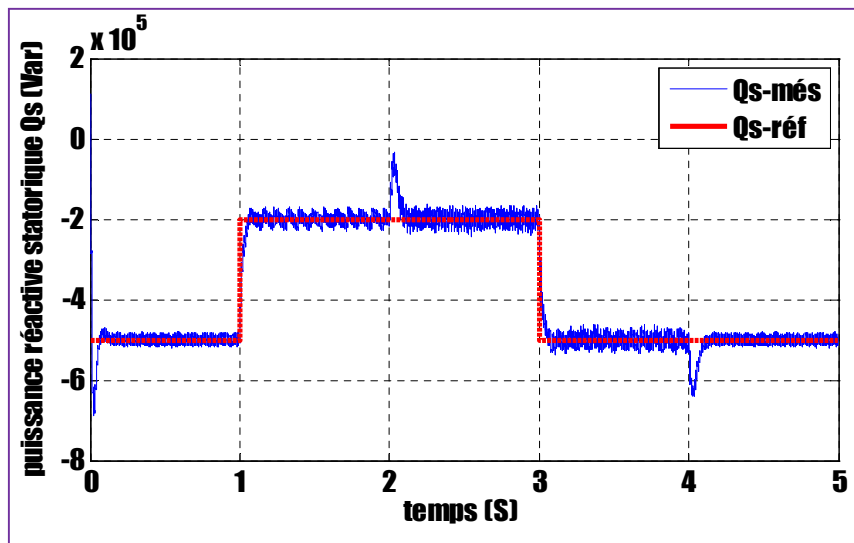


Figure .III. 21 : Allure des courants rotoriques.

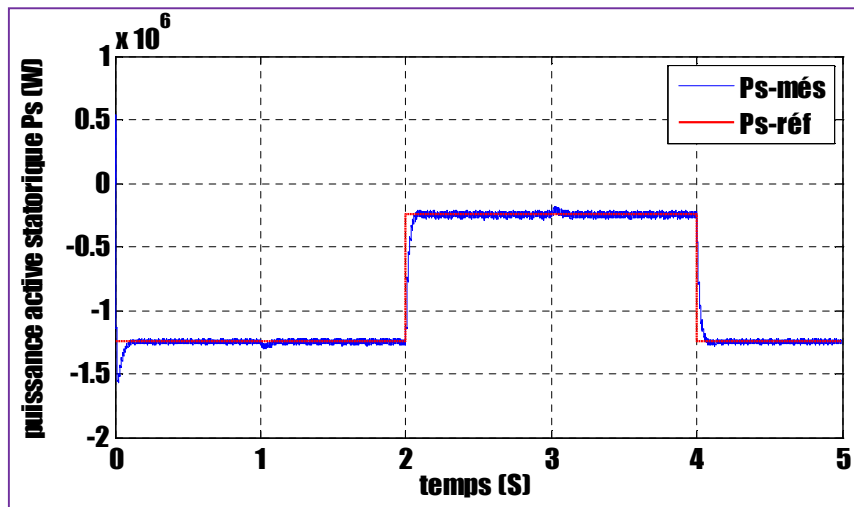
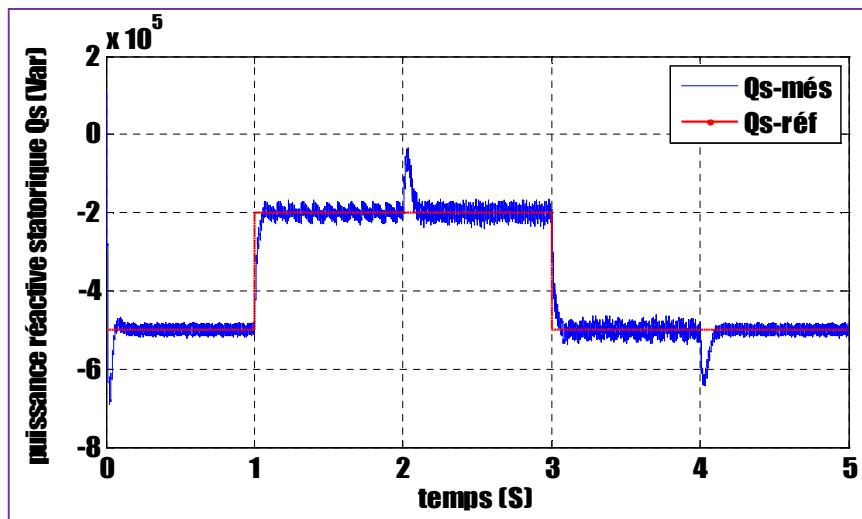
L'évolution de l'amplitude des courants rotoriques suit aussi l'évolution de l'amplitude de la puissance active, mais la fréquence de ces derniers n'est pas constante, car la fréquence des grandeurs rotoriques est:  $f_r = g f_s$  donc cette fréquence dépend de la vitesse de la génératrice. Le zoom montre aussi que ces derniers sont sinusoïdaux.

### III.11. Test de robustes vis-à-vis des variations paramétriques

Afin de tester la robustesse de la commande vectorielle en puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation vis-à-vis les variations paramétriques, deux tests sont effectués. Le premier est celui de la variation de la résistance rotorique  $R_r$  et le deuxième est la variation de coefficient de frottement  $f$  :

a) Variation de la résistance rotorique  $R'_r = 2 * R_r$ Figure .III. 22 : Allure de puissance active statoriques avec variation de  $R'_r = 2 * R_r$ .Figure .III. 23 : Allure de puissance réactive statorique avec variation de  $R'_r = 2 * R_r$ .

Dans ce test, on a fait augmenter la résistance rotorique  $R_r$  deux fois plus sa valeur nominale. Les figures (III.22 et III.23) illustre la réponse de la puissance active et réactive statorique. D'après ces résultats, on remarque de façon claire qu'aucune influence n'apparaît pendant la variation de la résistance rotorique où le découplage entre ces deux puissances reste réaliser, ce qui montre la robustesse de la commande vectorielle en puissance face à cette variation.

b) Variation de coefficient de frottement  $f' = 5 * f$ Figure .III. 24 : Allure de puissance active statoriques avec variation de  $f' = 5 * f$ .Figure .III. 25 : Allure de puissance réactive statoriques avec variation de  $f' = 5 * f$ .

Les figures (III.24 et III.25) présentes l'évolution des puissances active et réactive statorique du la MADA lors d'une variation de coefficient de frottement  $f' = 5 * f$ . On remarque que cette variation affecte peu le système et le contrôle des puissances reste efficace. Le suivi des puissances et toujours assuré et la stabilité ne pas affectée par ces variations des paramètres.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande vectorielle en puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation utilisée dans un système de production éolienne. On a alors établi un modèle mathématique du système global en vue de réaliser une commande vectorielle à flux statorique orienté visant à contrôler de manière indépendante les puissances actives et réactives échangées avec le réseau.

Le système a été testé dans un premier temps à vitesse de vent fixe et les résultats de simulation obtenus ont montré que la stratégie de la commande est efficace. En effet les performances sont satisfaisantes et l'effet du découplage a été très réduit.

Dans un deuxième pas, un profil de vent variable a été appliqué pour tester les performances moyennant un algorithme MPPT. Dans ce cas également, les résultats obtenus montrent un bon suivi des consignes appliquées et un bon découplage entre les grandeurs d'axes  $d$  et  $q$ .

Enfin, pour tester la robustesse du système vis-à-vis des variations des paramètres du modèle, deux tests ont été effectués sur la variation de la résistance rotorique (augmentation de 2 fois) et du coefficient de frottement (augmentation de 5 fois). Les résultats obtenus ont montré que le système maintient ses performances ce qui démontre sa robustesse.



*Conclusion générale*

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude de la chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable connectée directement au réseau au stator et via une interface d'électronique de puissance au rotor. L'objectif principal du travail consiste à développer une stratégie de commande à même de permettre un contrôle indépendant des puissances actives et réactives échangées avec le réseau.

Au cœur du premier chapitre, nous avons présenté l'état de l'art concernant la production d'énergie électrique à partir des éoliennes, notre étude s'est focalisée sur l'éolienne de grande puissance. Nous avons spécifié les performances des différentes structures d'aérogénérateurs couplées au réseau électrique, ceci nous a permis de montrer les avantages qui rendent la machine asynchrone doublement alimentée de plus en plus attractive.

Le second chapitre est consacré à la modélisation du système à étudier qui est basé sur une machine asynchrone à double alimentation. En premier lieu nous avons présenté le modèle de la partie mécanique (turbine, multiplicateur...), puis la modélisation du convertisseur statique (redresseur, filtre, onduleur, bus continue), enfin le modèle de PARK de la machine a été introduit.

Dans le troisième chapitre nous avons introduit la commande directe en puissance de la machine qui est basée sur l'orientation du flux statorique. Un découplage entre les deux axes  $d$  et  $q$  a été effectué afin d'éliminer les perturbations induites par les variations des grandeurs d'un axe sur l'autre.

La stratégie de commande adoptée a été testée dans un premier temps à vitesse de vent fixe afin de tester les performances du système en poursuite. Ceci nous a permis de vérifier l'efficacité de la commande réalisée et le bon découplage entre les grandeurs d'axes  $d$  et  $q$ .

A vitesse variable et avec l'algorithme MPPT, le système assure également des performances satisfaisantes aussi bien en poursuite que par rapport au découplage effectué.

Enfin, la robustesse du système par aux variations des paramètres du modèle ( $R_r$  et  $f$ ) a été vérifiée.



Face à ces constatations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à compléter ce travail et d'ouvrir de nouveaux axes de travail sont envisageables :

- Utilisation des commandes non linéaires (mode glissant, logique floue, commande prédictive...);
- Remplacer les convertisseurs à deux niveaux par des convertisseurs multi niveaux ;
- Des tests pratiques pour valider les résultats théoriques obtenus.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **B. Multon**, « L'Énergie Électrique : Analyse des Ressources et de la Production » Journées Electrotechniques, Organisées par le Club EEA, Paris, France, Janvier 1999.
- [2] **T. Sun, Z. Chen, and F. Blaabjerg**, « Flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generators », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, December 2005.
- [3] **K. Thakre**, « Dynamic performance of dfig wind turbine under unbalance grid fault condition » Rourkela 2009.
- [4] **B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed**, « Etat de l'Art dans les Aérogénérateurs Électriques », Document d'Internet, disponible à :  
[http://www.geea.org/IMG/pdf/EtatArt\\_Aerogenerateurs2002.pdf](http://www.geea.org/IMG/pdf/EtatArt_Aerogenerateurs2002.pdf).
- [5] **Étude réalisée par Hélimax Énergie inc** « Étude sur l'évaluation du potentiel éolien, de son prix de revient et des retombées économiques pouvant en découler au Québec ».
- [6] **B. Paluch**, « Introduction à l'énergie éolienne ». Revue REE, No. 5, PP. 35-50, Mai 2005.
- [7] **P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi**, « Éoliennes », techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, PP. BM 4 640 21.
- [8] **J. P. Louis**, « Modèles pour la commande des actionneurs électriques », Hermès science publications, Lavoisier, 2004.
- [9] **S El. Aïmani**, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL).

- [10] **B. Robyns, A. Davingny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Couetecuisse, B. Francois, S. Plumel, 1. Deuse**, « Impact de l'éolienne sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », BeA- Vol. 5 -Hors Série 1 (2006).
- [11] **S. Belakehal**, « conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », thèse de doctorat, université de Constantine, 2010.
- [12] **R. Baïle** «Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne.» université de Corse le 18 Octobre 2010.
- [13] **K. Ghedamsi**, «Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence Application à la conduite de la machine asynchrone.» Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [14] **S. Drid**, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : théorie & expérimentation.» Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, Novembre 2005.
- [15] **F. Poitiers**, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Déc. 19, 2003
- [16] **H. Camblong**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Thèse de Doctorat, École nationale supérieure d'arts et métiers, Déc. 18, 2003.
- [17] **N. Laverdure** « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèse de doctorat, Grenoble 2005.
- [18] **R. Drareni, Z. Ouahrani**, « Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC », Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat, ENP, 2009.

[19] **L. Aloui**, «Etude par simulation d'une éolienne basée sur une machine Asynchrone à double alimentation alimentée par convertisseur matriciel», Mémoire de Magister en électrotechnique à l'Université de Bejaia, octobre 2006.

[20] **M. Chalali et N. Khiri**, « Etude d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone double alimentée par un convertisseur matriciel», Mémoire d'ingénieur d'état de l'université de Bejaia, 2006.

[21] **F. Abdoune et A. Idir**, « Etude et simulation d'une chaine de conversion éolienne a base d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse d'ingénieur d'état en électromécanique Bejaia 2007.

[22] **F. Merrahi**, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Application à l'énergie éolienne», Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique ENP d'Alger, 2007.

[23] **L. Khattache**, «étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée», mémoire de magister, Université de Batna, 2007.

[24] **V. Rogez**, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire» ; Thèse de doctorat, Université d'Artois, 2004

[25] **H. Tamrabet**, « Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone», mémoire de magister, Université de Batna, 2006

[26] **Y.A. Benchrif**, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne», projet de fin d'études, ENSP, Juin 2008.

[27] **H. Idjouadien et S. Irbah**, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse d'ingénieur d'état Bejaia 2007.

[28] **S. Taraft**, « Etude de stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de magister, Bejaia 2008.

[29] **A. Merecki**, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées a une éolienne de petite puissance » Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2005

[30] **A. Boyette**, «Contrôle, commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1, Décembre2006.

[31] **A. Guezgouz et L. Korichi**, « commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau » mémoire d'ingénieur d'état université de Bejaia 2008/2009.

[32] **H. Amimeur**, «contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement», mémoire de magister, Université de Batna, 2008.

# ANNEXE

## A.1. Paramètre de la machine asynchrone à double alimentation

➤ Puissance nominale:	$P_n = 1.5 \text{ MW}$
➤ Tension statorique nominale:	$U_{ns} = 690 \text{ V}$
➤ Nombre de paire de pôles:	$P = 2$
➤ Résistance statorique:	$R_s = 0.012 \ \Omega$
➤ Résistance rotorique:	$R_r = 0.021 \ \Omega$
➤ Inductance statorique:	$L_s = 0.0137 \text{ H}$
➤ Inductance rotorique:	$L_r = 0.0137 \text{ H}$
➤ Inductance mutuelle:	$M = 0.0135 \text{ H}$
➤ Moment d'inertie:	$J = 0.123 \text{ kg/m}^2$
➤ Coefficient de frottement:	$f = 0.0024 \text{ m.s/rd}$

## A.2. Paramètres de la turbine éolienne

➤ Puissance nominale:	$P_n = 1.5 \text{ MW}$
➤ Gain de multiplicateur:	$G = 90$
➤ Rayon de la turbine:	$R_t = 33 \text{ m}$

## A.3. Paramètres des éléments passifs du filtrage inséré au convertisseur

➤ Capacité du bus continu:	$C = 400 \ \mu\text{F}$
➤ Inductance de lissage des courants injectés au réseau:	$L = 0.013 \text{ H}$
➤ Résistance du filtre inductif :	$R = 0.015 \ \Omega$