

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



# Mémoire de Fin D'études

En vue d'obtention du diplôme de Master 2 en Electrotechnique

Option : Energies renouvelables

## Thème

Commande en puissance d'un aérogénérateur sur une large plage de variation de vitesse, basée sur MADA

Réalisé par :

M. AMARA Karim

Encadré par :

M. S. TARAFT

Année universitaire: 2014/2015

## ***Remerciements***

Tout d'abord je remercie le bon dieu tout puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il m'a donné tout au long de mes études.

Je remercie très sincèrement M. S. TARAFT mon encadreur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses, sa patience et par ses suggestions a grandement facilité ce travail.

Je remercie le jury, M. BEKKA et M. BENDAHDMANE, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.

Enfin, je remercie vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

# Sommaire

# Sommaire

---

## Chapitre I : généralité sur l'énergie éolienne

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction.....	2
I.2 Histoire de l'énergie éolienne .....	2
I.3 Définition de l'énergie éolienne.....	2
I.3.1 Taille des aérogénérateurs .....	3
I.3.2 Les éléments constitutifs d'une éolienne .....	4
I.4 Accouplement mécanique .....	5
I.4.1 Eolienne à attaque directe .....	5
I.4.2 Eolienne à attaque indirecte .....	5
I.5 Différent type d'éolienne .....	6
I.5.2 Eolienne à axe horizontal .....	7
I.6 Modes de fonctionnements .....	8
I.6.1 Système à vitesse fixe .....	8
I.6.1.1 Avantages .....	9
I.6.1.2 Inconvénients.....	9
I.6.2 Système à vitesse variable.....	9
I.6.2.1 Vitesse variable par double alimentation stator-rotor.....	9
I.6.2.2 Avantages .....	10
I.6.2.3 Inconvénients.....	10
I.7 Zone de fonctionnement .....	11
I.8 Définition de la MPPT.....	12
I.8.1 Types de la MPPT.....	12
I.8.2 Méthode de perturbation et observation .....	12
I.9 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation des éoliennes.....	13
I.9.1 Stratégie de fonctionnement d'une éolienne Système à décrochage aérodynamique "stall".....	13
I.9.2 Système d'orientation des pales "pitch" .....	14
I.10 Conversion électromécanique.....	14
I.10.1 Système utilisant la machine synchrone.....	14
I.10.2 Système utilisant la machine asynchrone à double stator.....	15
I.10.3 Machine asynchrone à double alimentation type « brushless ».....	15
I.10.4 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipé.....	16
I.10.5 MADA-Structure de Kramer.....	17

# Sommaire

---

I.10.6	MADA – structure Scherbius avec convertisseurs MLI .....	18
I.11	Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable.....	19
I.12	Conclusion. ....	20

## Chapitre II : modélisation de système étudié

II.1	Introduction .....	21
II.2	Description de la structure choisie.....	21
II.3	Constitution globale de la chaîne de conversion à étudier .....	21
II.4	Modélisation de vent .....	22
II.4.1	La loi de BETZ .....	23
II.5	Modélisation de la turbine éolienne.....	23
II.5.1	Hypothèse simplificatrice .....	23
II.5.2	modèle de multiplicateur de vitesse.....	25
II.6	Modélisation de la MADA .....	26
II.6.1	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé.....	26
II.6.1.1	Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation .....	27
II.6.2	Modèle de la MADA dans le référentiel de Park.....	28
II.6.2.1	Les équations électriques de la MADA dans le référentiel de Park .....	29
II.7	Modélisation de l'interface d'électronique de puissance.....	30
II.7.1	Modélisation du redresseur .....	30
II.7.2	Modélisation de bus continu .....	31
II.7.3	Modélisation de l'onduleur .....	32
II.7.4	Modélisation du filtre coté réseau dans le repère naturel .....	33
II.8	Conclusion .....	34

## Chapitre III : simulation et interprétation des résultats

III.1	Introduction .....	35
III.2	Application de la commande à flux orienté à la MADA.....	35
III.2.1.	Choix du référentiel pour le modèle diphasé .....	35
III.2.2.	Commande vectorielle en puissance de la MADA .....	37
III.3.	Interprétation des résultats obtenus .....	44
III.4	conclusion.....	45
	Conclusion générale .....	46

## Listes des figures

Figure (I.1) : principe de la conversion d'énergie.....	3
Figure (I. 2) : taille d'éolienne et la puissance. ....	3
Figure (I. 3) : différentes parties de l'éolienne NORDEX N60-1,3MW.....	4
Figure (I.4) : éoliennes à axe verticale. ....	6
Figure (I.5): éoliennes en amont et en aval. ....	8
Figure (I.6) : vitesse de rotation fixe.....	8
Figure(I.7) : système à vitesse variable par double alimentation.....	10
Figure (I.8) : zones de fonctionnement caractéristique d'une éolienne à vitesse variable basé sur une MADA.....	11
Figure (I.9) : Méthode d'observation et de contrôle. ....	13
Figure (I.10) : machines synchrones reliées au réseau par un dispositif redresseur-hacheur onduleur MLI.....	14
Figure (I.11) : machine asynchrone à double stator.....	15
Figure (I.12) : machine asynchrone brushless connecté au réseau.....	16
Figure (I.13) : MADA par le contrôle de l'énergie rotorique dissipée.....	17
Figure (I.14) : MADA, Structure Kramer.....	18
Figure (I.15) : Structure Scherbius avec convertisseur MLI.....	19
Figure (I.16) : Fonctionnement de la MADA en hyper et hypo synchronisme.....	20
Figure (II. 1) :Générateur éolienne à base de MADA.....	22
Figure(II.2) profile du vent.....	22
Figure (II.3) : modèle mécanique simplifié de la turbine.....	24
Figure (II.4) : Puissance théorique disponible d'une éolienne donnée.....	25
Figure (II.5) :modèle mécanique simplifié de multiplicateur.....	25
Figure (II.6):Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	27
Figure (II.7) :Passage de triphasé au biphasé.....	28
Figure (II.8) : Redresseur MLI.....	30
Figure (II.9) : Schéma électrique du filtre (bus continue).....	31
Figure (II.10) : schéma d'un onduleur de tension.....	32

## Listes des figures

Figure (II.11) : Schéma du filtre coté réseau.....	34
Figure (III.1) : Orientation du flux statorique .....	35
Figure III.2 : schéma du principe de la commande vectorielle en puissance.....	38
Figure (III.3) : Schéma globale de la commande .....	39
Figure (III.4) : Profile du vent.....	39
Figure (III.5) : Vitesse électrique .....	40
Figure (II.6) : glissement .....	40
Figure (III.7) : Puissance mécanique.....	40
Figure (III.8) : Puissance statorique .....	41
Figure (III.9) : Puissance rotorique .....	41
Figure (III.10) : Puissance totale .....	41
Figure (III.11) : couple électromagnétique.....	42
Figure (III.12) : Puissances réactives stator/rotor .....	42
Figure (III.13) :Tension/courant envoyé au réseau .....	42
Figure (III.14) :Tension/courant rotorique .....	43
Figure (III.15) : Vitesse spécifique de l'éolienne.....	43
Figure (III.16) : Coefficient de puissance de l'éolienne.....	43
Figure (III.17) : Coefficient de puissance en fonction de vitesse spécifique .....	44
Figure (III.18) : Zones de fonctionnement de l'éolienne .....	44

## Nomenclature

- $C_p$  : Coefficient de puissance ;
- $C_{aer}$  : Couple aérodynamique (N.m) ;
- $C_g$  : Couple sur l'arbre de la machine (N.m) ;
- $C_{visq}$  : Couple visqueux (N.m) ;
- $C_m$  : Coefficient du couple ;
- $C_{mec}$  : Couple mécanique (N.m) ;
- $P_m$  : Puissance du vent (W) ;
- $P_{mt}$  : Puissance captée par la turbine (W) ;
- $\lambda$  : Vitesse spécifique de l'éolienne ;
- $\lambda_{opt}$  : Vitesse optimale;
- $C_t$  : Couple de la turbine (N.m) ;
- $m$  : Masse de l'air (Kg) ;
- $\rho$  : Masse volumique de l'air ( $Kg.m^3$ ) ;
- $R$  : Rayon de la turbine éolienne (m) ;
- $S$  : Surface balayée par les pales de la turbine éolienne ( $m^2$ ) ;
- $\Omega_t$  : vitesse de la turbine éolienne (tr/min) ;
- $\beta$  : Angle de calage des pales ;
- $G$  : gain de multiplicateur de vitesse ;
- $[V_s]_3$  : Tension d'alimentation des enroulements statoriques (V) ;
- $[V_r]_3$  : Tension d'alimentation des enroulements rotoriques (V) ;
- $[i_s]_3$  : Courant statorique (A) ;
- $[i_r]_3$  : Courant rotorique (A) ;
- $V_{sd}, V_{sq}$  : Tensions statoriques dans le repère de Park (d,q) (V) ;
- $V_{rd}, V_{rq}$  : Tensions rotoriques dans le repère de Park (d,q) (V) ;
- $i_{sd}, i_{sq}$  : Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A) ;
- $i_{rd}, i_{rq}$  : Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A) ;
- $\Phi_{sd}, \Phi_{sq}$  : flux statoriques dans le repère de Park (d,q) (Wb) ;
- $\Phi_{rd}, \Phi_{rq}$  : flux rotoriques dans le repère de Park (d,q) (Wb) ;

- $\Theta_r$  : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe directe 'd' (rad) ;
- $\Theta$  : Angle relatif entre les deux premières phases rotorique et statorique ;
- $R_s$  : Résistance statorique ( $\Omega$ ) ;
- $R_r$  : Résistance rotorique ( $\Omega$ ) ;
- $M_s$  : Inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques (H) ;
- $M_r$  : Inductance mutuelle entre deux enroulements rotoriques (H) ;
- $M_{sr}$  : Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et celui du rotor (H) ;
- $M$  : Valeur maximale de l'induction mutuelle entre une bobine statorique et une bobinerotorique (H) ;
- $L_s$  : Induction propre cyclique statorique (H) ;
- $L_r$  : Induction propre cyclique rotorique (H) ;
- $C_r$  : Couple résistant (N.m) ;
- $J$  : Moment d'inertie totale ( $\text{Kg.m}^2$ ) ;
- $f$  : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad) ;
- $\sigma$  : Coefficient de dispersion ;
- $\Omega$  : Vitesse mécanique (rad/s) ;
- $P$  : Nombre de paires de pôles ;
- $\omega_m$  : Vitesse électrique du rotor (rad/s) ;
- $g$  : Glissement ;
- $P_s$  : puissance active statorique (W) ;
- $Q_s$  : Puissance réactive statorique (VAr) ;
- $P_r$  : puissance active rotorique (W) ;
- $Q_r$  : Puissance réactive rotorique (VAr) ;
- $P_g$  : Puissance active du réseau (W) ;
- $Q_g$  : Puissance réactive du réseau (VAr) ;
- $V_{\text{ond}1}, V_{\text{ond}2}, V_{\text{ond}3}$  : Tensions simples à la sortie de l'onduleur (V) ;
- $V_{\text{ond}d}, V_{\text{ond}q}$  : Tensions simples à la sortie de l'onduleur dans le repère de Park (V) ;
- $C$  : Capacité du bus continu (F) ;
- $i_c$  : Courant capacitif (A) ;
- $i_{dc}$  : Courant du bus continu (A) ;

- $V_c$  : Tension du bus continu (V) ;
- $m$  : Indice de modulation ;
- $r$  : Taux de modulation ;
- $K_i$  : Gain intégral du correcteur PI ;
- $K_p$  : Gain proportionnel du correcteur PI ;
- $\tau_r$  : Temps de réponse.

### Introduction générale

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois [1]. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir !

Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité (en intégrant l'hydroélectricité). Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue **La filière étudiée dans ce thème est l'énergie éolienne**. Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus fort croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance.

L'objectif de notre étude, est le développement d'une commande en puissance d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à double alimentation qui nous permette le fonctionnement sur une large plage de variation. En d'autre terme nous allons essayer d'atteindre deux plus grand la vitesse nominale. Ce que nous donne automatiquement deux fois la puissance nominale.

# Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne

## I.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, en d'autre terme, les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

le présent chapitre sera consacré à la présentation des généralités sur l'énergie éolienne, son principe de conversion, les différents types de turbine (avantages et inconvénient) et les principales génératrices utilisées.

## I.2 Histoire de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a été déjà utilisée par Hamourabi (fondateur de Babylone) afin d'irriguer la Mésopotamie vers l'an 2000 avant J.-C. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. Les chinois ont également exploité la puissance du vent pour les systèmes de pompage de l'eau. Le début du Moyen Age a vu l'apparition des moulins en Europe avec comme application l'assèchement des lacs et terrains inondés au Pays-Bas ainsi que la moudre de grains. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Parmi les pionniers, on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950, Johannes JUL (élève de Paul La Cour) devint aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif [2].

## I.3 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur. Le fonctionnement général est illustré par la Figure 1. L'ensemble de la chaîne de Conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [3].

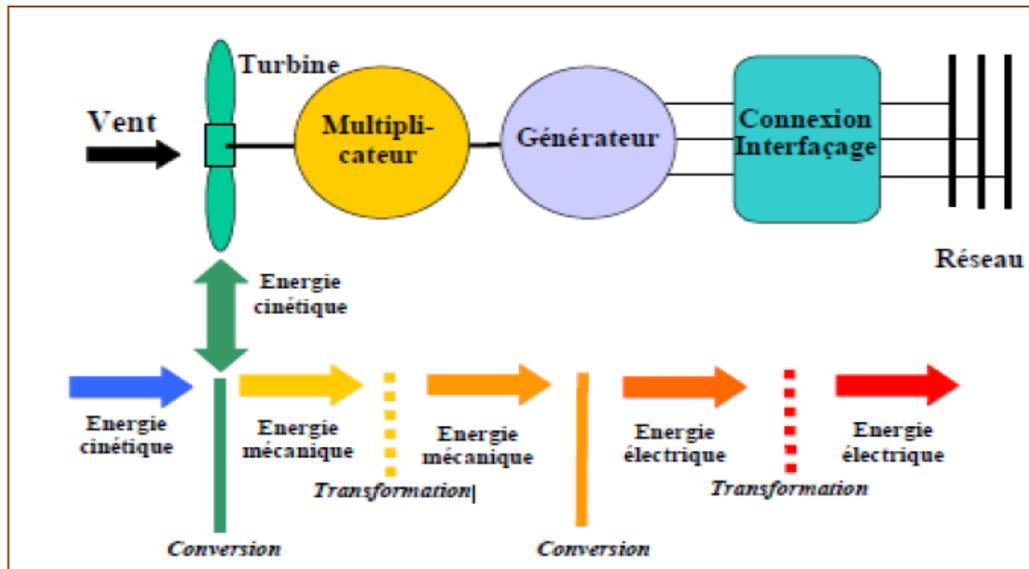


Figure (I.1) : principe de la conversion d'énergie [36].

### I.3.1 Taille des aérogénérateurs

Avant le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes donc plus grandes, figure (I.2). Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum, pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

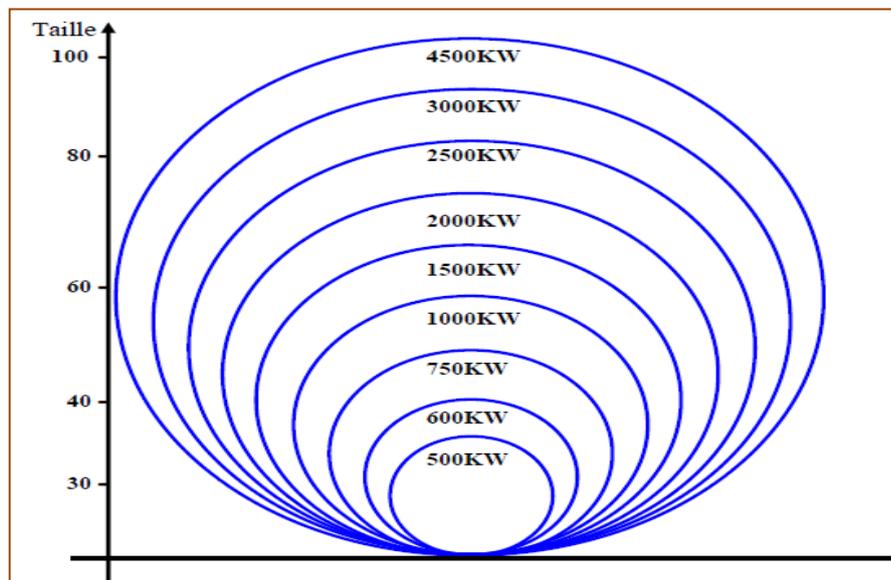


Figure (I. 2) : taille d'éolienne et la puissance [38].

### I.3.2 Les éléments constitutifs d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, Une éolienne classique est constituée principalement de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour. Chacune de ces éléments doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système avec un faible coût d'investissement:

➤ **La tour ou le mât** : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et bénéficier au maximum de l'énergie du vent.

➤ **La nacelle** : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone

➤ **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.

L'énergie captée par l'éolienne est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse de vent. Plus le diamètre du rotor est grand, plus la surface balayée est importante, [4], [5], [6].

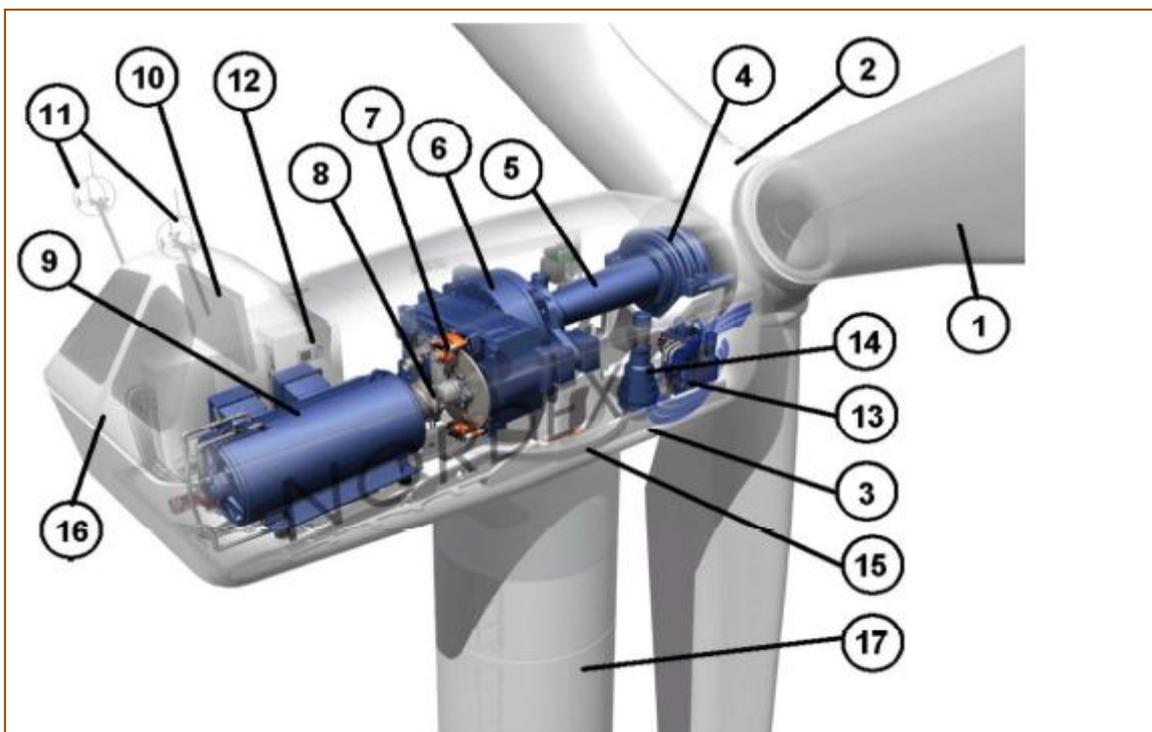


Figure (I. 3) : différentes parties de l'éolienne NORDEX N60-1,3MW [38].

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent

## **I.4 Accouplement mécanique**

### **I.4.1 Eolienne à attaque directe**

Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice liée directement sur l'hélice. Il n'y a plus de multiplicateur, siège de perte de puissance et source de bruit. La génératrice tourne à la vitesse de l'hélice, environ 18 à 50 tr/min

Les génératrices à attaque directe possèdent un grand diamètre pour obtenir une vitesse de déplacement relative importante entre le rotor et le stator et permettre de loger un grand nombre de pôles, permettant d'obtenir une fréquence de 50 Hz de l'ordre de 15 à 30 tr/min

### **I.4.2 Eolienne à attaque indirecte**

Dans ce type d'éolienne, la vitesse de rotation de la turbine est relativement faible, et le couple mécanique est élevé en sortie de l'arbre de la turbine. La transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de convertisseur électromécanique. Des problèmes de vibration, de bruit et de coût de maintenance sont liés à la présence de ces multiplicateurs [7].

## I.5 Différent type d'éolienne

Les éoliennes se divisent en général en deux grands groupes selon l'axe sur lequel est montrée l'hélice [8] :

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

### I.5.1 Eolienne à axe verticale

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieur classique et Darrieur en forme de H (Figure I.4) [9].

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. Par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. En ce qui concerne leur implantation, elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur sur un site agricole.



**Darrieur en forme de H**

**rotor de Savonius**

**rotor de Darrieur**

**Figure (I.4) : éoliennes à axe verticale.**

### I.5.2 Eolienne à axe horizontal

Une turbine à axe horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. 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 (cut-in) et un coefficient de puissance (rapport entre la puissance obtenue et la puissance de la masse d'air en mouvement) relativement élevé.

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 supplémentaire («queue», «yaw control»). Selon son nombre de pales. Une éolienne à axe horizontal est dite mono-pale, bipale ou multi-pale. Une éolienne mono-pale est moins coûteuse car les matériaux sont en moindre quantité et par ailleurs, les pertes aérodynamiques par poussée (drag) sont minimales [10].

Cependant un contre poids est nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très utilisé à cause de cela. Tout comme les rotors mono-pales, les rotors bipales doivent être munis d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour. Donc pratiquement toutes les turbines éoliennes installées ou à installer prochainement sont du type tripales. Celles-ci 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 6 montre les deux types mentionnés. Les premières ont le rotor face au vent; puisque le flux d'air atteint le rotor sans obstacle, le problème de «l'ombre de la tour» (Tower shadow) est bien moindre. Néanmoins, un mécanisme d'orientation est essentiel pour maintenir en permanence le rotor face au vent. Les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor est placé de l'autre côté de la tour: il peut donc y avoir une charge intégrale sur les pales quand elles passent dans l'ombre de la tour.

De ces deux types d'éoliennes, celle en amont est largement prédominante.

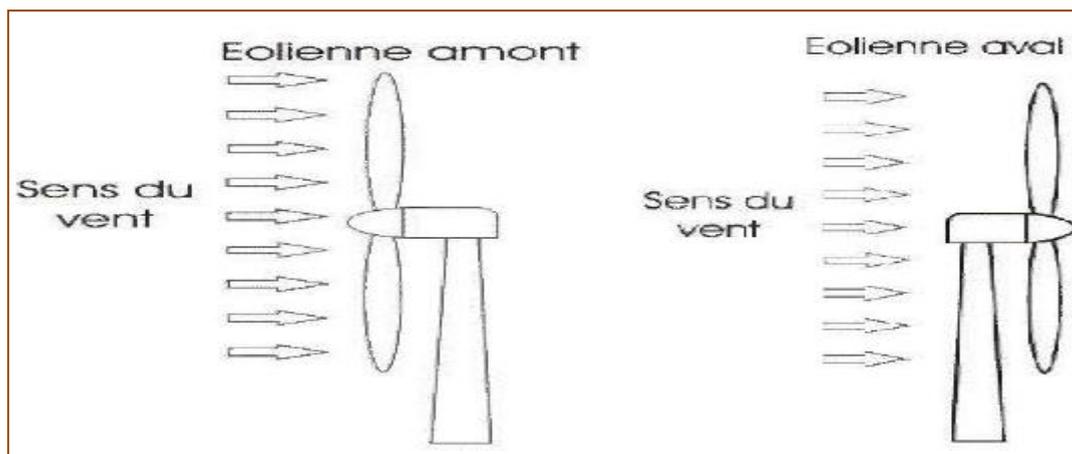


Figure (I.5): éoliennes en amont et en aval.

## I.6 Modes de fonctionnements

### I.6.1 Système à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées, ils mettent en œuvre essentiellement des générateurs asynchrones à cage tournant en hyper synchronisme à une vitesse légèrement supérieur au synchronisme [11], [12]. Cette caractéristique convient très bien aux turbines à décrochage aérodynamique qui nécessite, pour bien agir, une vitesse de rotation constante.

L'utilisation d'une machine asynchrone à cage, généralement dimensionnée pour une vitesse de rotation de 1500 tr/min pour des raisons d'encombrement et de prix, nécessite l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse de rapport relativement élevé [13].

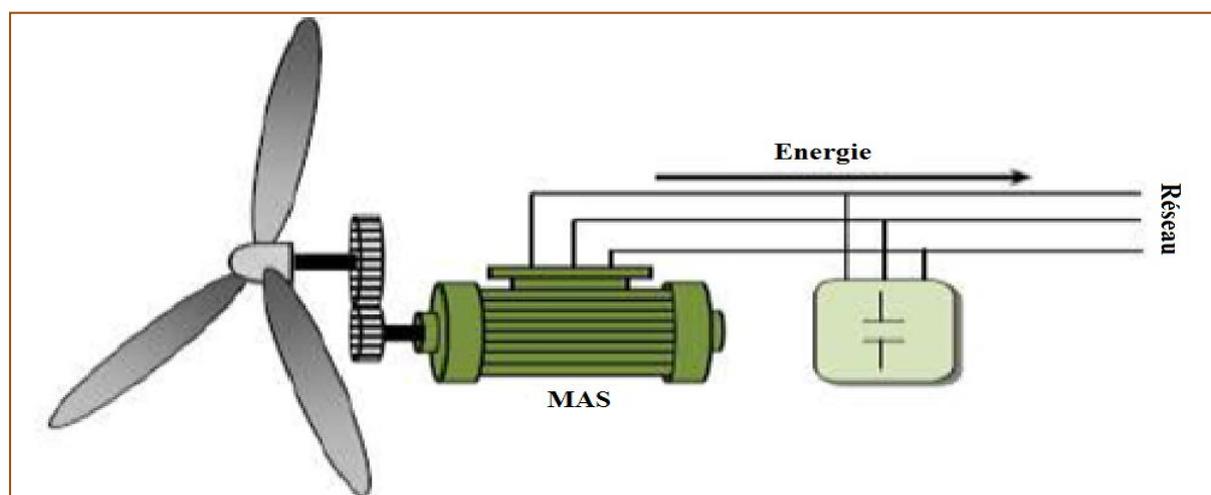


Figure (I.6) : vitesse de rotation fixe [39].

### **I.6.1.1 Avantages**

- Utilisation d'une machine standard, robuste et pas chère
- Aucune interface d'électronique de puissance.
- System de contrôle très simple.

### **I.6.1.2 Inconvénients**

- Pas de gestion de la puissance extraite.
- Maintenance de la boîte de vitesse.
- Magnétisation de la machine non gérée.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc une production d'énergie très perturbée.

Ces inconvénients ont poussé les industriels à développer d'autres systèmes plus performants et fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large

## **I.6.2 Système à vitesse variable**

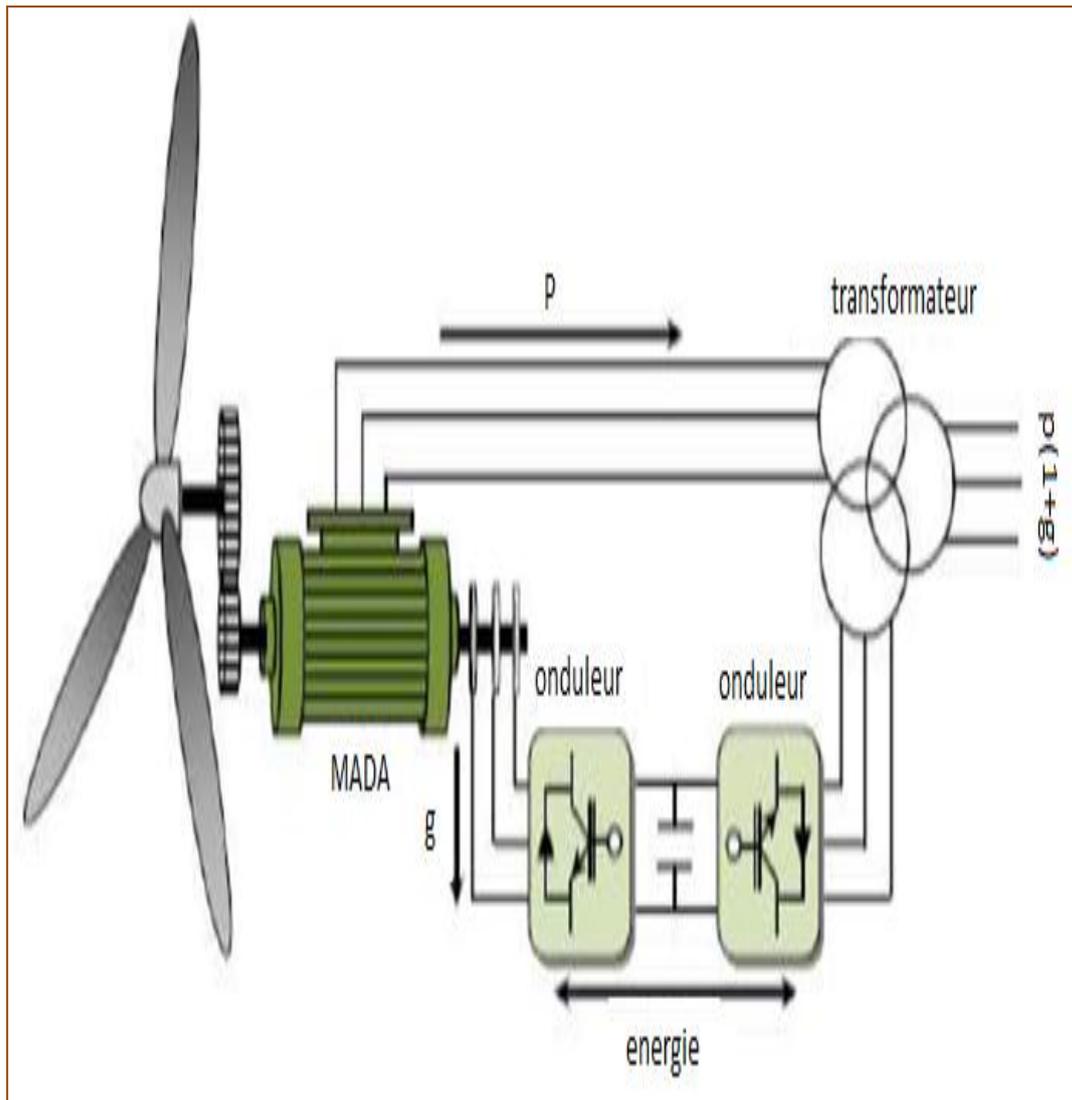
Il existe plusieurs structures possibles que nous pouvons classer suivant la gamme de variation de la vitesse de rotation de la machine électrique utilisée. Parmi ces structures on trouve.

### **I.6.2.1 Vitesse variable par double alimentation stator-rotor**

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne, [14]. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure I.7). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor

S'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor,

Actuellement, c'est la structure la plus utilisée vu les avantages qu'elle apporte. En effet, en plus de la vitesse variable, cette structure offre une gestion de puissance très efficace en utilisant une interface d'électronique de puissance dimensionnée à seulement 30% de sa puissance nominale [15], [16].



**Figure(I.7) :** système à vitesse variable par double alimentation [39].

### I.6.2.2 Avantages

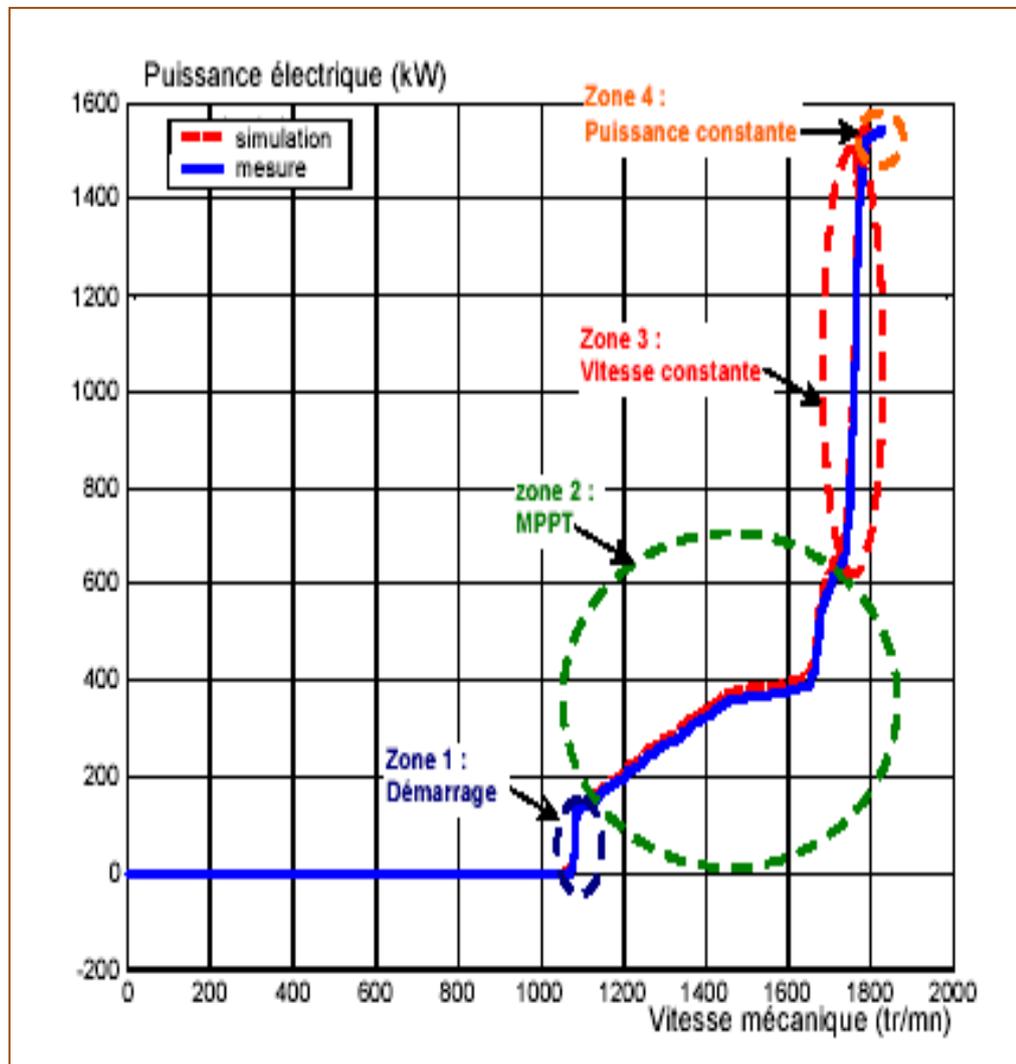
- Vitesse variable à environ  $\pm 30\%$  de la vitesse du synchronisme.
- Puissance extraite optimisée.
- Électronique de puissance dimensionnée à seulement 30% de  $P_n$ .
- Connexion au réseau plus facile à gérer.

### I.6.2.3 Inconvénients

- Maintenance de la boîte de vitesse et des contacts glissants.
- Système de contrôle très complexe.
- Coût d'électronique de puissance relatif.

### I.7 Zone de fonctionnement

La courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :



**Figure (I.8) :** zones de fonctionnement caractéristique d'une éolienne à vitesse variable basé sur une MADA [37].

On définit les zones de fonctionnement des éoliennes suivant la vitesse du vent :

- **Zone 1 ( $V < V_1$ ) :** c'est la zone de démarrage de la machine. La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie à capter reste assez faible.  **$V_1$**  : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine,  $V_1$  varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

- **Zone 2 ( $V_1 < V < V_2$ ):** est la zone d'extraction maximale de la puissance (**MPPT : Maximum Power Point Tracking**). Elle correspond au **fonctionnement à Charge Partielle (CP)**. Dans cette zone l'angle de calage des pales  $\beta$  reste constant afin d'obtenir un  $C_p$  maximal ainsi la puissance maximale est capté pour chaque vitesse de vent  $V_2$  : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice,  $V_2$  varie entre 11.5m/s et 15m/s.

- **Zone 3 ( $V_2 < V < V_3$ ):** Elle correspond à une vitesse mécanique quasiment constante. L'angle de calage des pales varie. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale. Cette zone correspond au **fonctionnement à Pleine Charge (PC)**.  $V_3$  : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes,  $V_3$  vaut 25m/s.

- **Zone 4 ( $V > V_3$ ):** La vitesse du vent devient trop forte. La puissance est limitée à sa valeur maximale (1550 kW) grâce au système d'orientation des pales [17], [18], [19].

Dans ce mémoire on s'intéresse au fonctionnement de la zone 2 ou phase **MPPT**

## I.8 Définition de la MPPT.

C'est une stratégie de commande qui permet de calculer la puissance maximale qu'on peut extraire à partir de la vitesse du vent.

### I.8.1 Types de la MPPT.

On peut distinguer deux types de la MPPT :

- La première, considère que la caractéristique du coefficient de puissance ( $C_p$ ) n'est pas connue.
- La seconde, suppose que la caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

### 1.8.2 Méthode de perturbation et observation

La méthode perturbation observation (PO) est sans doute la plus utilisée pour faire une recherche du point maximal de puissance. Ce principe de contrôleur MPPT est basé sur le « coude » de la caractéristique. C'est plus ou moins une méthode par tâtonnement, comme le Montre la Figure (I.9)

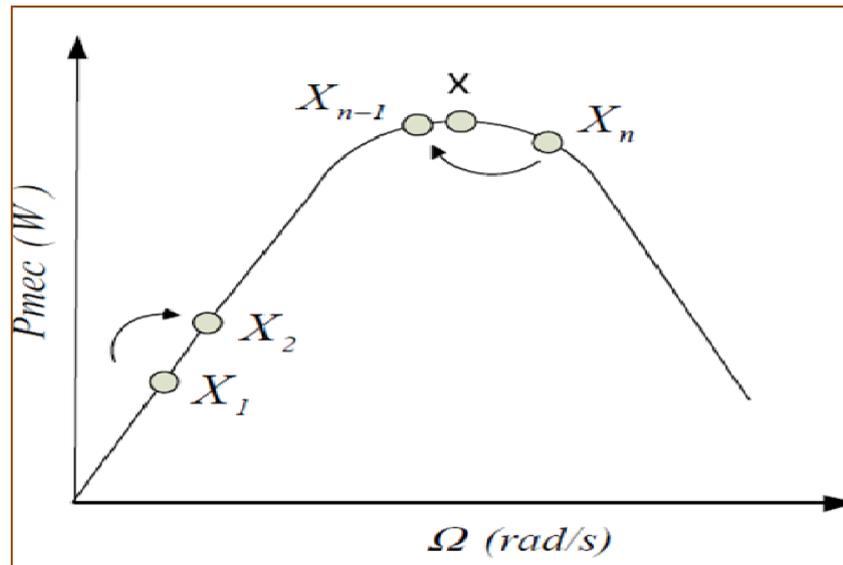


Figure (I.9) : Méthode d'observation et de contrôle [40].

## I.9 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation des éoliennes.

### I.9.1 Stratégie de fonctionnement d'une éolienne Système à décrochage aérodynamique "stall".

Le comportement aérodynamique des pales évolue également d'une manière passive selon le rapport entre la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent. En effet les pales peuvent être conçues de façon à ce qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la turbulence provoquée par le profil des pales entraîne un décrochage aérodynamique et par suite une décroissance du couple capté par chacune des pales. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales. Les pales sont fabriquées avec un pas variant suivant la position le long de la pale, permettant ainsi le décrochage aérodynamique qui se produit progressivement d'abord près du rayon moyen puis de plus en plus près de bout de la pale.

Ce genre de contrôle passif de la puissance captée par les pales est appelé (stall régulation) ou (régulation par décrochage aérodynamique).

En 2000, environ 60% des aérogénérateurs utilisaient la régulation «stall» mais les grandes machines d'aujourd'hui utilisent presque en exclusivité le contrôle «pitch» [20].

### I.9.2 Système d'orientation des pales "pitch"

Ce système de régulation par variation de l'angle de calage « $\beta$ » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses. C'est la régulation par mise en drapeaux, soit augmenter l'angle de calage, ce qui diminue l'angle d'incidence. Ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire.

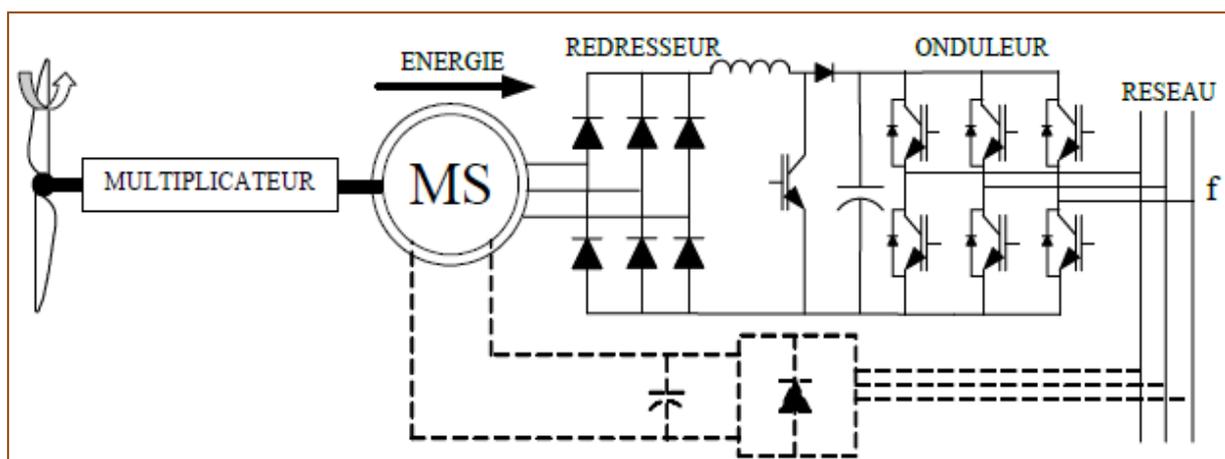
Il existe des dispositifs mixtes, dits à décrochage actif, « stall actif » dans lesquels très faible réglage de l'angle de calage associé à un profil de pale optimisé permet d'obtenir un compromis entre complexité du système de réglage et qualité de la courbe de puissance obtenue.

Ainsi, l'éolienne fonctionne sur une plage plus large de vitesse du vent.

## I.10 Conversion électromécanique

### I.10.1 Système utilisant la machine synchrone

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I.10) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [21], [22].



**Figure (I.10) :** machines synchrones reliées au réseau par un dispositif redresseur-hacheur onduleur MLI

### I.10.2 Système utilisant la machine asynchrone à double stator.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

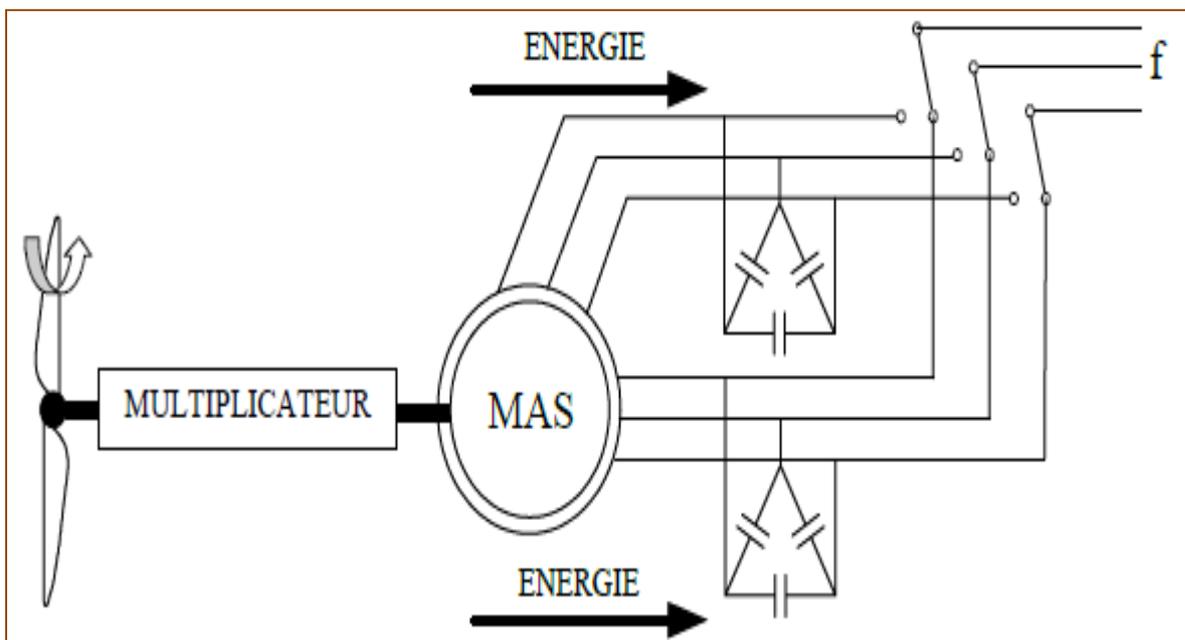


Figure (I.11) : machine asynchrone à double stator

### I.10.3 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.

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable. 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 [23] (Figure I.12).

Ce systèmes n'est pas exploité industriellement mais existe à l'état de prototype.

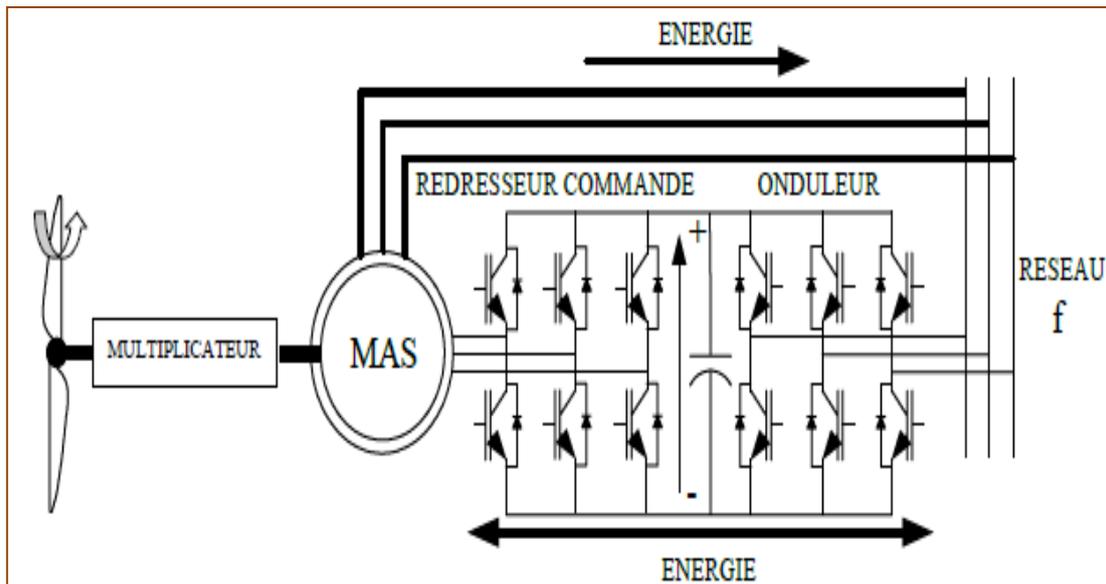


Figure (I.12) : machine asynchrone brushless connecté au réseau

**I.10.4 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipé.**

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.

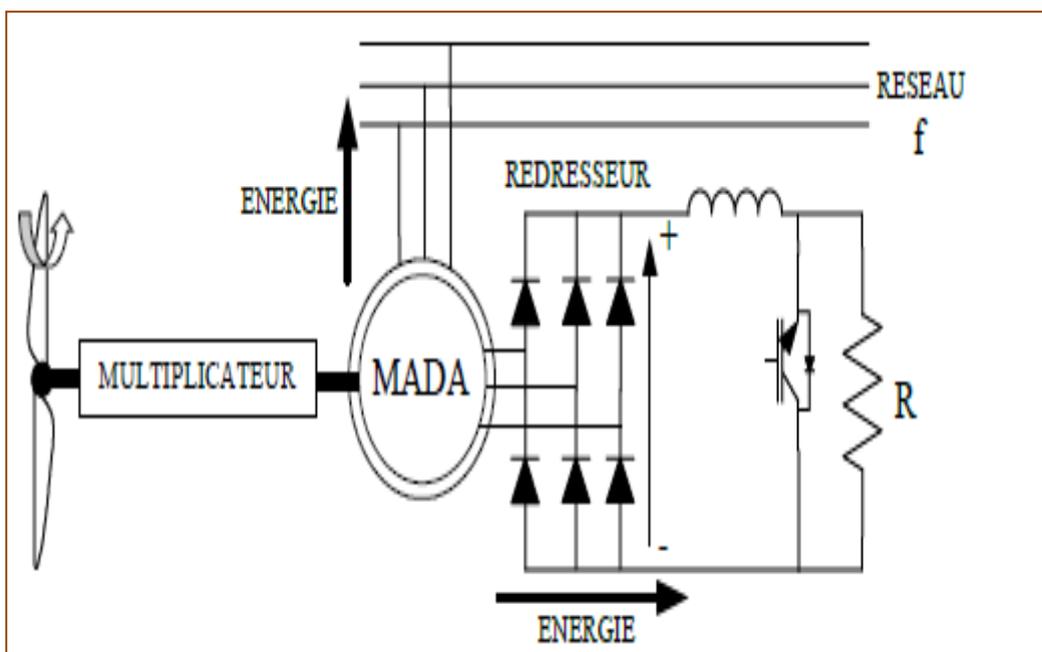


Figure (I.13) : MADA par le contrôle de l'énergie rotorique dissipé

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance  $R$ , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

### I.10.5 MADA-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 (Figure I.14) [24].

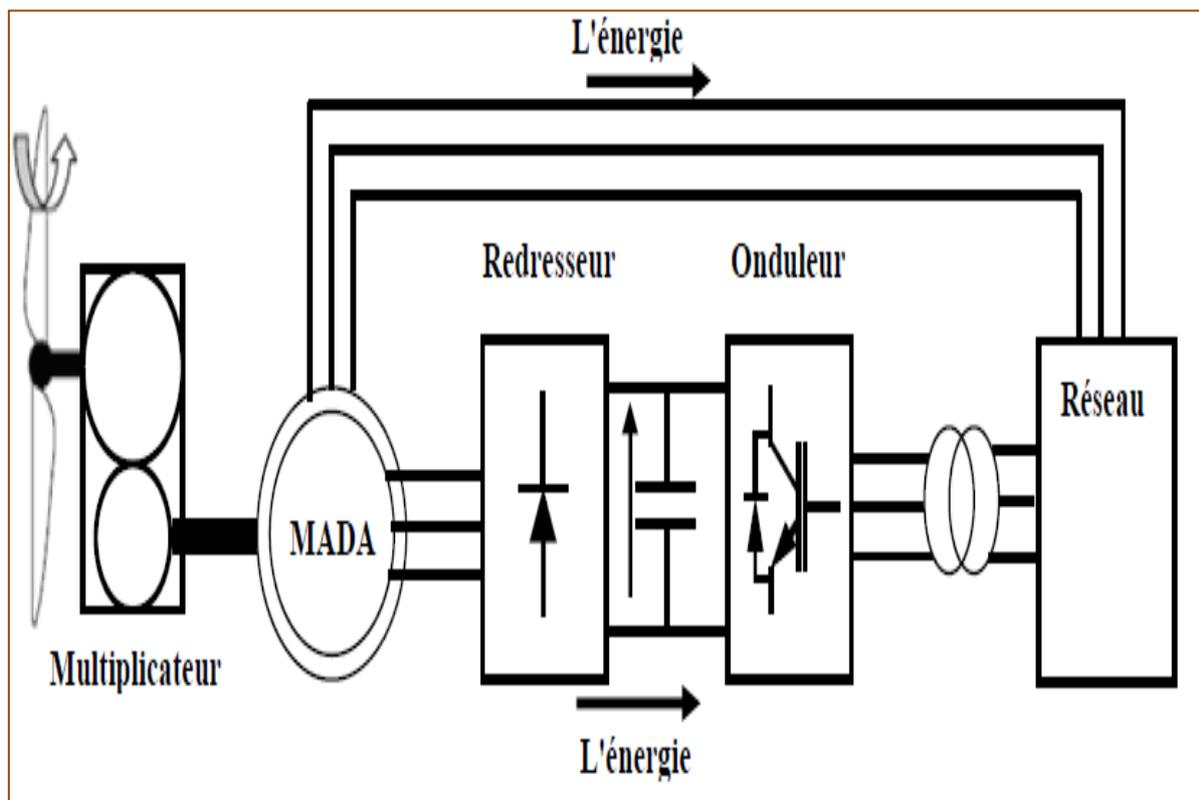
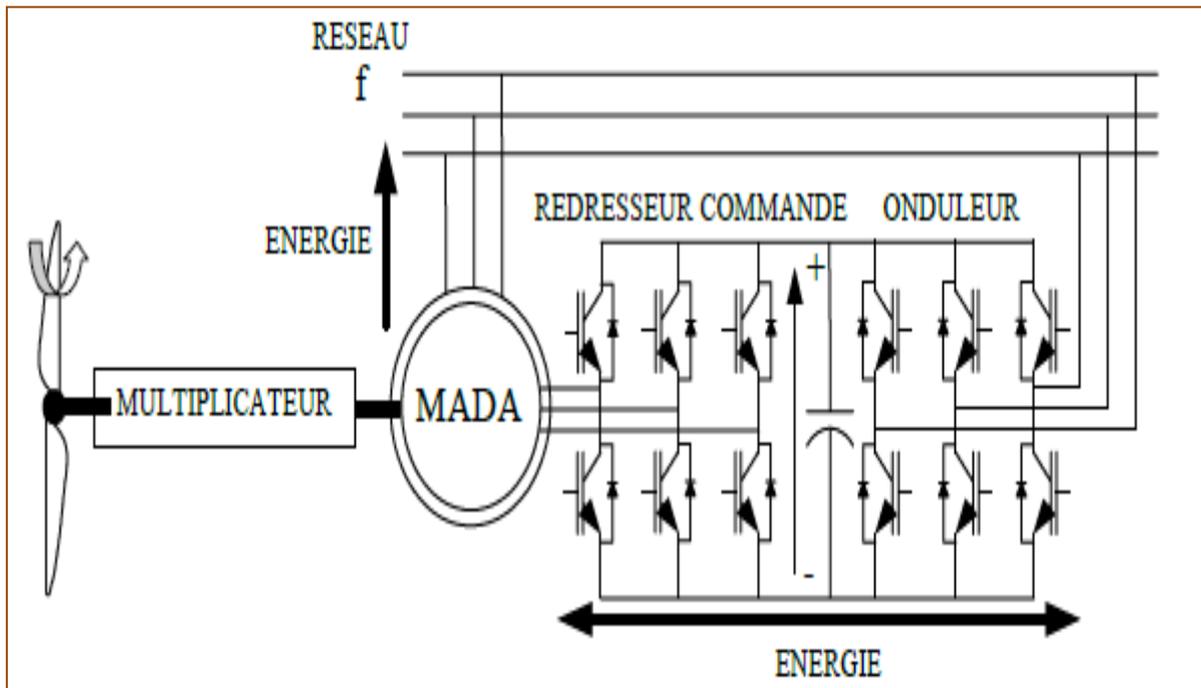


Figure (I.14) : MADA, Structure Kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. 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 rotation supérieures au synchronisme.

### I.10.6 MADA – structure Scherbius avec convertisseurs MLI.

Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [25]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).



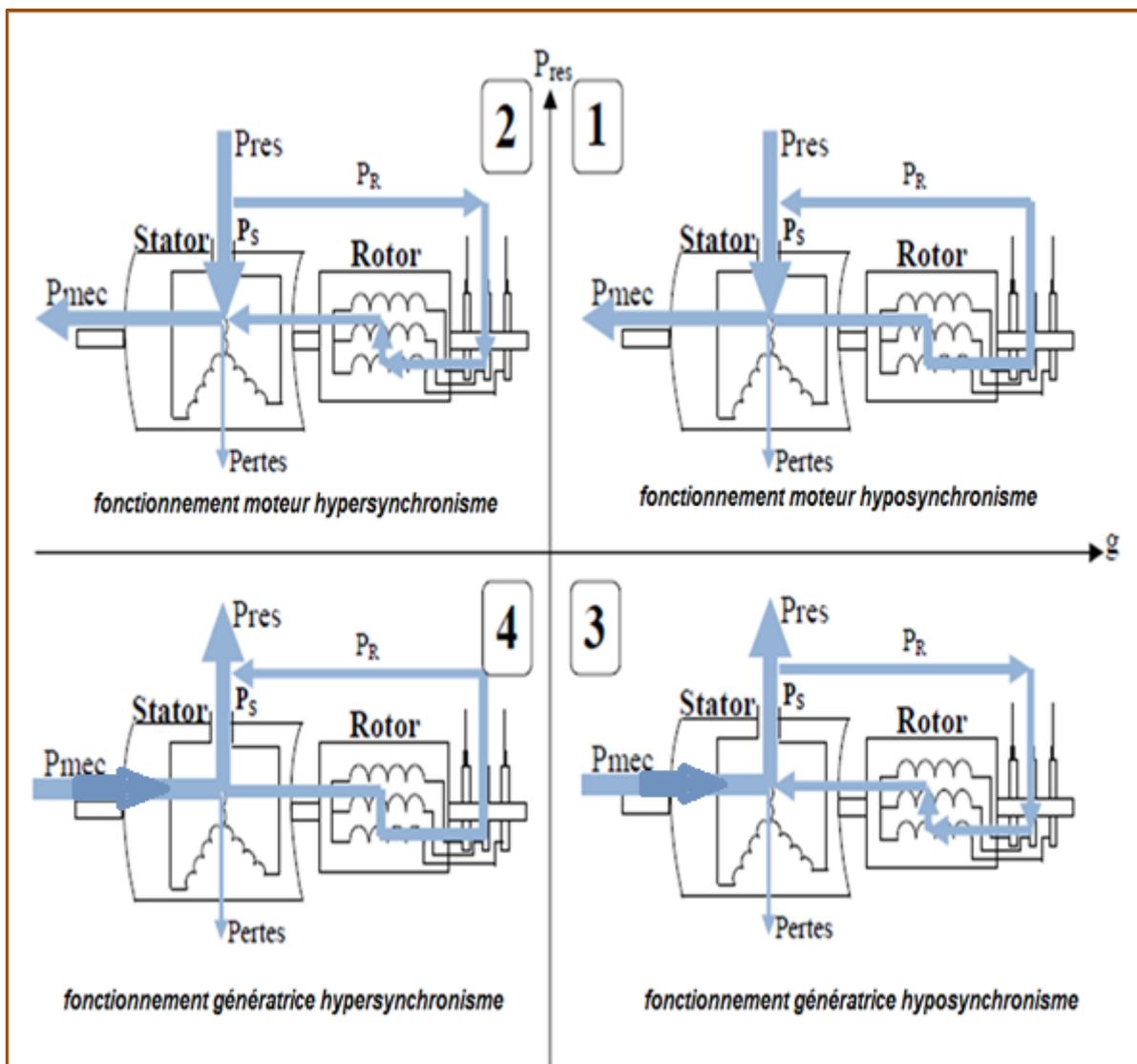
**Figure (I.15) :** Structure Scherbius avec convertisseur MLI

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless". Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor). Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

### I.11 Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable.

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [26], [27], [28].



**Figure (I.16) :** Fonctionnement de la MADA en hyper et hypo synchronisme [38].

**I.12 Conclusion.**

Après une présentation de l'énergie éolienne et des différentes parties qui participent à la conversion de cette énergie. Ce chapitre nous a permis d'avoir une idée générale sur les systèmes de conversion, de réglage et d'optimisation de l'énergie éolienne. On a conclu que : Le fonctionnement à vitesse variable permet d'exploiter le maximum de la puissance et que la présence de convertisseur est nécessaire de point de vue d'optimisation. Les systèmes basés sur la génératrice asynchrone à double alimentation proposent un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise, et la taille de convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Concernant la régulation, le système pitch contrôle nous donne de meilleurs résultats, ainsi que le système mixte dit à décrochage actif « stal actif ». On a opté pour la suite de notre étude, l'éolienne à axe horizontale à vitesse variable, basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation reliée au réseau de la manière suivante. Le stator est connecté directement, par contre le rotor est raccordé par l'intermédiaire des Convertisseurs bidirectionnels. Le chapitre suivant sera dédié à la modélisation des différentes parties de la structure choisie.

# Chapitre II

Modélisation de système étudié

## II.1 Introduction

Dans le but d'appliquer une commande pour un système de conversion quelconque, la modélisation de ce dernier est indispensable. En d'autres termes, c'est à partir des équations électromécaniques de tous les éléments de système qu'une commande sera élaborée. La modélisation d'une chaîne de conversion éolienne (système étudié) fera l'objet de ce chapitre.

## II.2 Description de la structure choisie

Aujourd'hui, les systèmes de génération d'énergie éolienne utilisent presque exclusivement les machines asynchrones à double alimentation (MADA), car elle offre de grands avantages.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice [29], [30], [31].

## II.3 Constitution globale de la chaîne de conversion à étudier

La structure proposée est constituée d'une turbine éolienne, MADA, interface d'électronique de puissance (onduleur), des filtres et un multiplicateur de vitesse

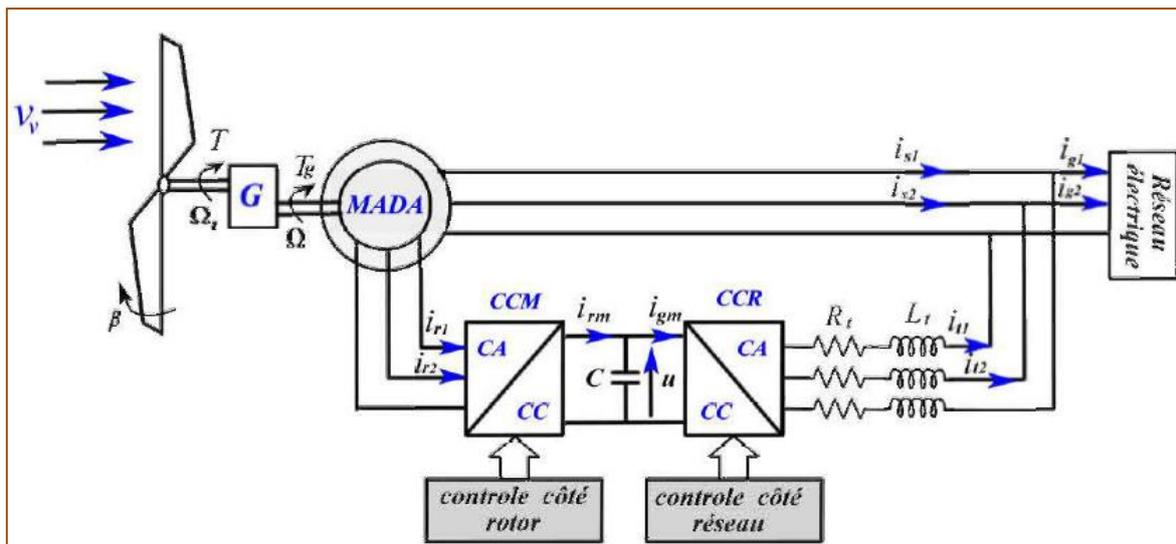


Figure (II. 1) : Générateur éolienne à base de MADA

### II.4 Modélisation de vent

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Cette dernière peut être modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps  $V_v = f(t)$ , figure(II.1)

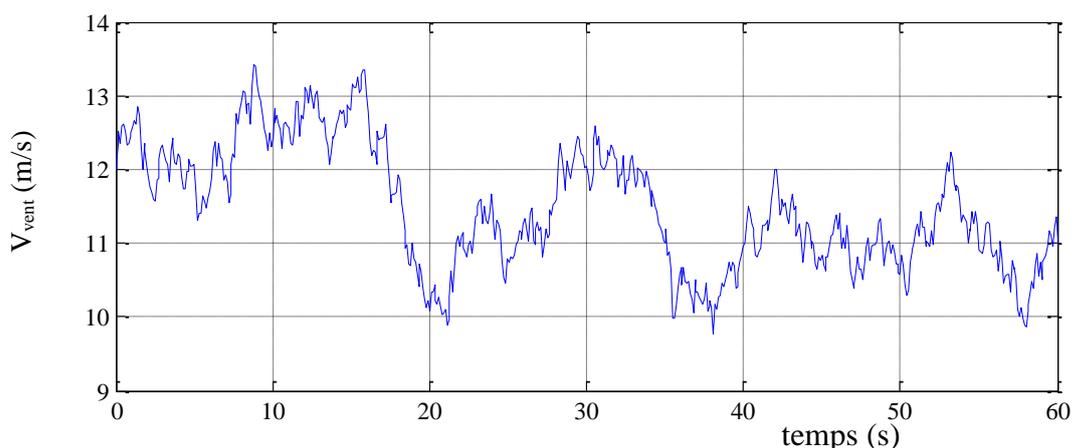


Fig. III.1 profile du vent

### II.4.1 La loi de BETZ

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale :

$$V_m = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad \text{II.1}$$

$V_m$  : Vitesse du vent traversant le rotor.

$V_1$  : Vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne.

$V_2$  : Vitesse du vent après passage à travers le rotor.

La masse d'air en mouvement :

$$M = \rho \cdot s \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad \text{II.2}$$

$m$ : Masse d'air.

$\rho$ : Masse volumique de l'air (en Kg/m<sup>3</sup>).

$S$  : Surface des pales.

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad \text{II.3}$$

## II.5 Modélisation de la turbine éolienne

### II.5.1 Hypothèse simplificatrice

La partie mécanique de la turbine qui sera étudié comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{tur}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique. Les trois pales sont considérées de conception identique.

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ( $F_1 = F_2 = F_3$ ) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques, On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses

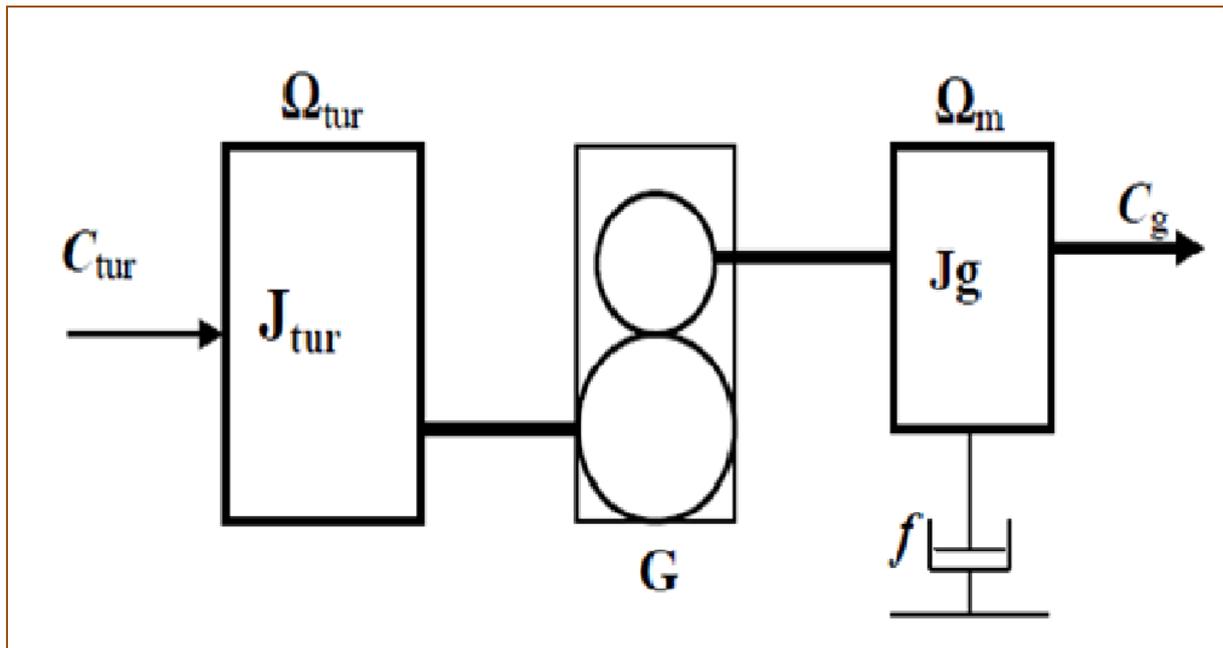


Figure (II.3) : modèle mécanique simplifié de la turbine

La puissance cinétique de vent est définie de la manière suivante

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3_v \quad \text{II.4}$$

$\rho$ : est la masse volumique de l'air ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

$V$ : est la vitesse du vent ( $\text{m/s}$ ).

$S$ : est la surface traversée par le vent

La puissance aérodynamique qui se développe sur l'arbre, s'écrit

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot c_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad \text{II.5}$$

Telle que

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad \text{II.6}$$

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V} \quad \text{II.7}$$

$C_p$ : couple aérodynamique

$\lambda$ : La vitesse spécifique propre à chaque éolienne

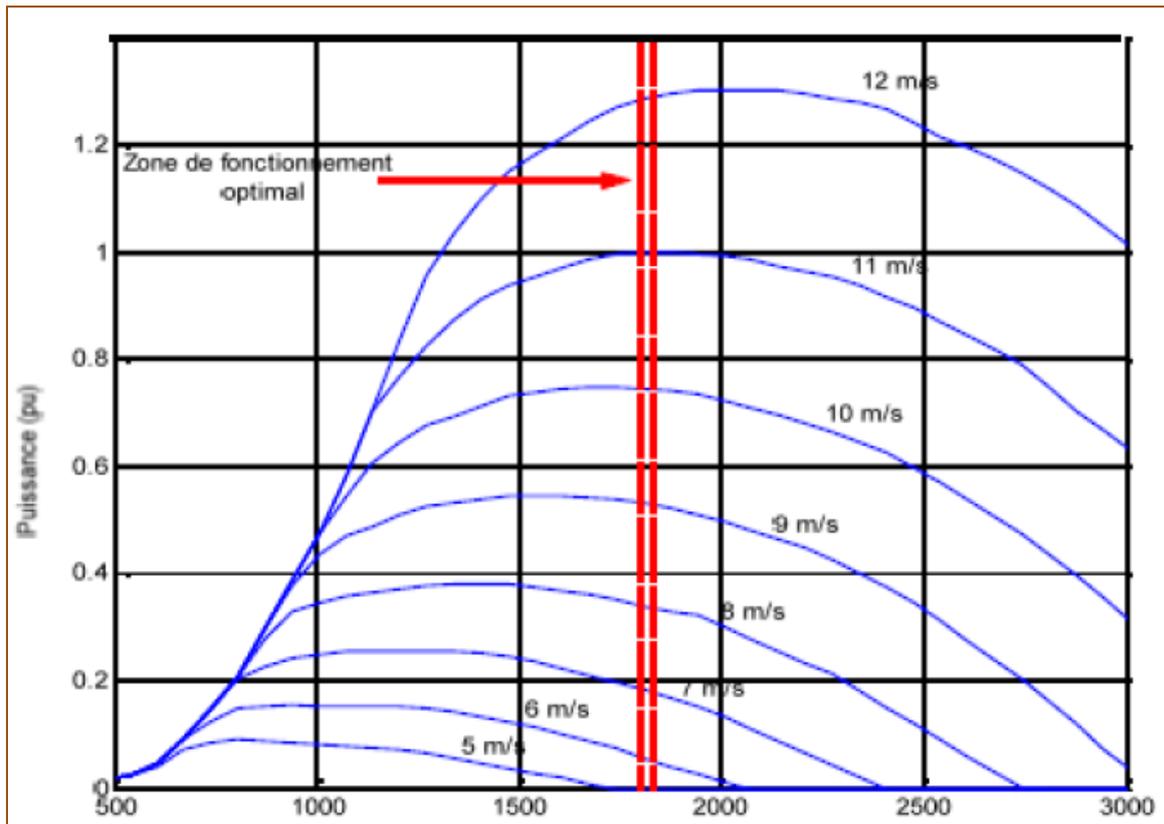


Figure (II.4) : Puissance théorique disponible d’une éolienne donnée

### II.5.2 modèle de multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure (3)). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes

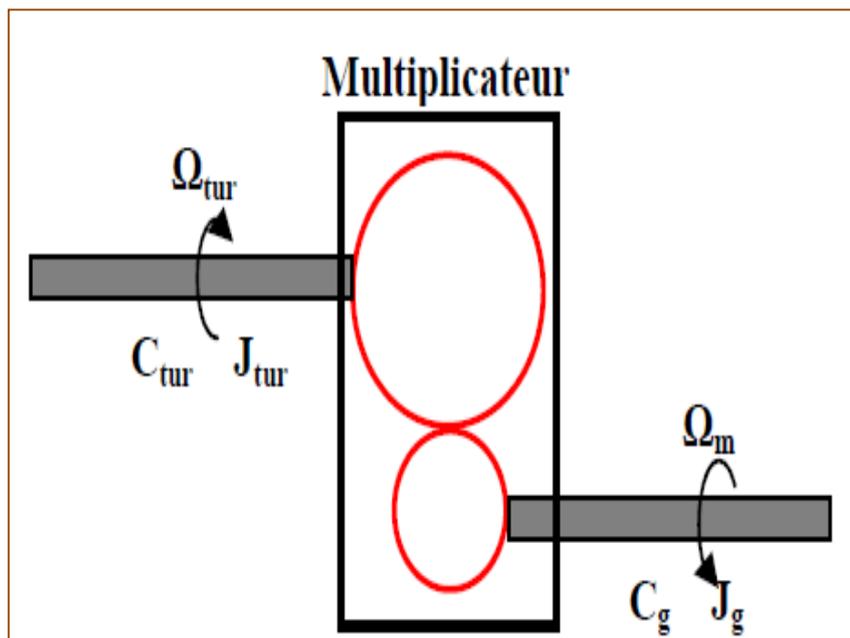


Figure (II.5) : modèle mécanique simplifié de multiplicateur

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes

La vitesse mécanique de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad \text{II.8}$$

Le couple sur l'arbre lent et sur l'arbre rapide est exprimé par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{c}{G} \quad \text{II.9}$$

Les masses des différentes parties de la turbine sont représentées par l'énergie  $J_t$ . le modèle mécanique proposé considère l'énergie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice  $J_g$ . et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal.

L'inertie totale  $J$  est donnée par l'expression suivante [32]

$$J = \frac{J}{G} + J_g \quad \text{II.10}$$

L'évolution de la vitesse mécanique  $\Omega$  dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice.

$$C_{mec} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{II.11}$$

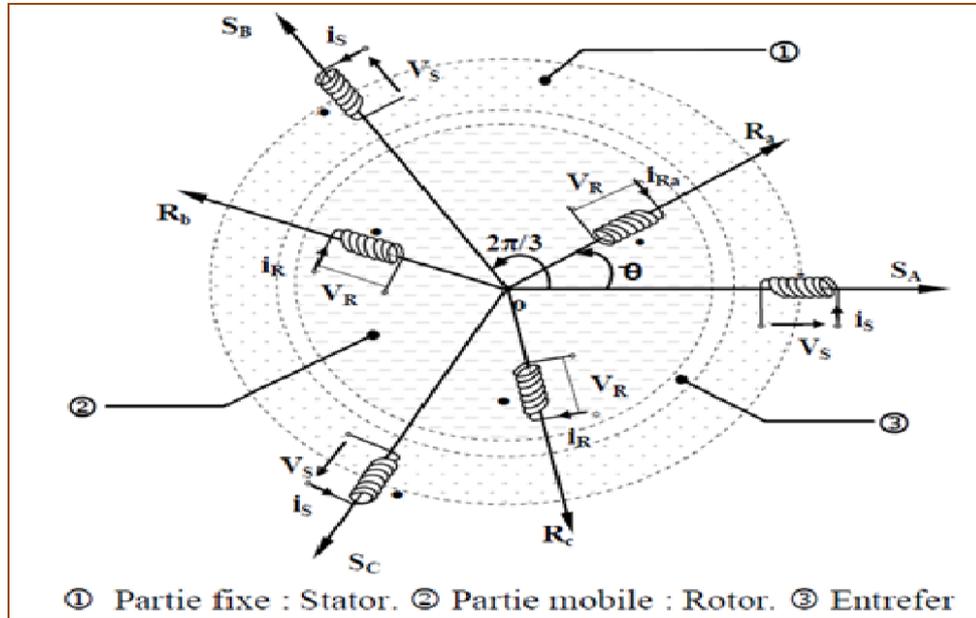
$$C_{mec} = c_{ar} - c_{em} - c_{vesq} \quad \text{II.12}$$

## II.6 Modélisation de la MADA

### II.6.1 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé

Avant d'aborder la commande vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), il faut réaliser sa modélisation. Cette dernière va nous permettre de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle d'action conduisant au calcul des correcteurs pour réaliser sa commande vectorielle ainsi que sa simulation en régimes dynamique et permanent [33], [34].

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indique sur la figure 3 .les phases rotorique sont court-circuitées sur elle-même.  $\theta$  est l'angle électrique entre l'axe d'une phase statorique et d'une phase rotorique.



**Figure (II.6):** Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

### II.6.1.1 Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère triphasé s'écrivent :

$$\begin{cases} [V_s]_3 = R_s[I_s]_3 + \frac{d[\phi_s]_3}{dt} \\ [V_r]_3 = R_r[I_r]_3 + \frac{d[\phi_r]_3}{dt} \end{cases} \quad \text{II.13}$$

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$$\begin{cases} [\phi_s]_3 = L_s[I_s]_3 + M[I_r]_3 \\ [\phi_r]_3 = L_r[I_r]_3 + M[I_s]_3 \end{cases} \quad \text{II.14}$$

Avec :

$R_s$  et  $R_r$  : respectivement les résistances statorique et rotorique par phase.

$L_s, L_r$  : Inductances propres statorique et rotorique.

$M_s, M_r$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques.

$M_{rs}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

II.6.2 Modèle de la MADA dans le référentiel de Park

La machine asynchrone a des équations compliquées dans le repère triphasé abc. La complexité provient du fait que la matrice  $[L_m]$  varie même lorsque la vitesse est en régime stationnaire. La transformation de PARK permet le passage d'un repère triphasé à un modèle diphasé. Cette transformation est un changement du repère abc au repère dq0. On utilise cette méthode pour simplifier les équations de la machine asynchrone et ainsi obtenir un modèle plus simple. Ce changement de repère permet d'éliminer les inductances variables dans le temps, notamment de rendre la matrice impédance indépendante de  $\theta_r$ .

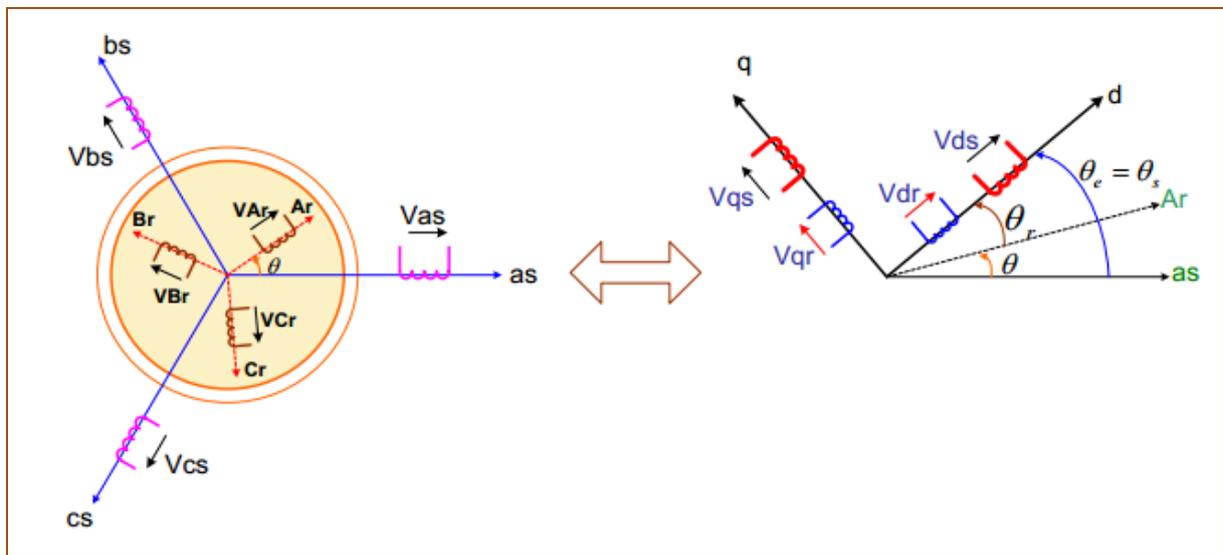


Figure (II.7) : passage de triphasé au biphasé.

$\theta_s, \theta_r$  : Angles de transformation de Park des grandeurs statorique et rotorique

Les deux bobines d et q, produisent le même effet que les trois bobines réelles fixes.

Le passage du système triphasé au système biphasé est défini par le produit matriciel suivant

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{II.15}$$

$x_a, x_b, x_c$  Sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

$x_d, x_q$  Sont les valeurs instantanées des grandeurs diphasées.

$x_o$  Est la composante homopolaire.

[P] est la matrice directe de Park.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

### II.6.2.1 Les équations électriques de la MADA dans le référentiel de Park

**Equations des tensions statoriques :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad \text{II.17}$$

**Equations des tensions rotoriques :**

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.18}$$

**Equations des flux :**

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad \text{II.19}$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{II.20}$$

Avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques.

$$C_{em} = \frac{PM}{L_s} (I_{dr} \phi_{qs} - I_{qr} \phi_{ds}) \quad \text{II.21}$$

P : nombre de paires de pôles

Dans un repère biphasé quelconque les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont exprimées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{II.22}$$

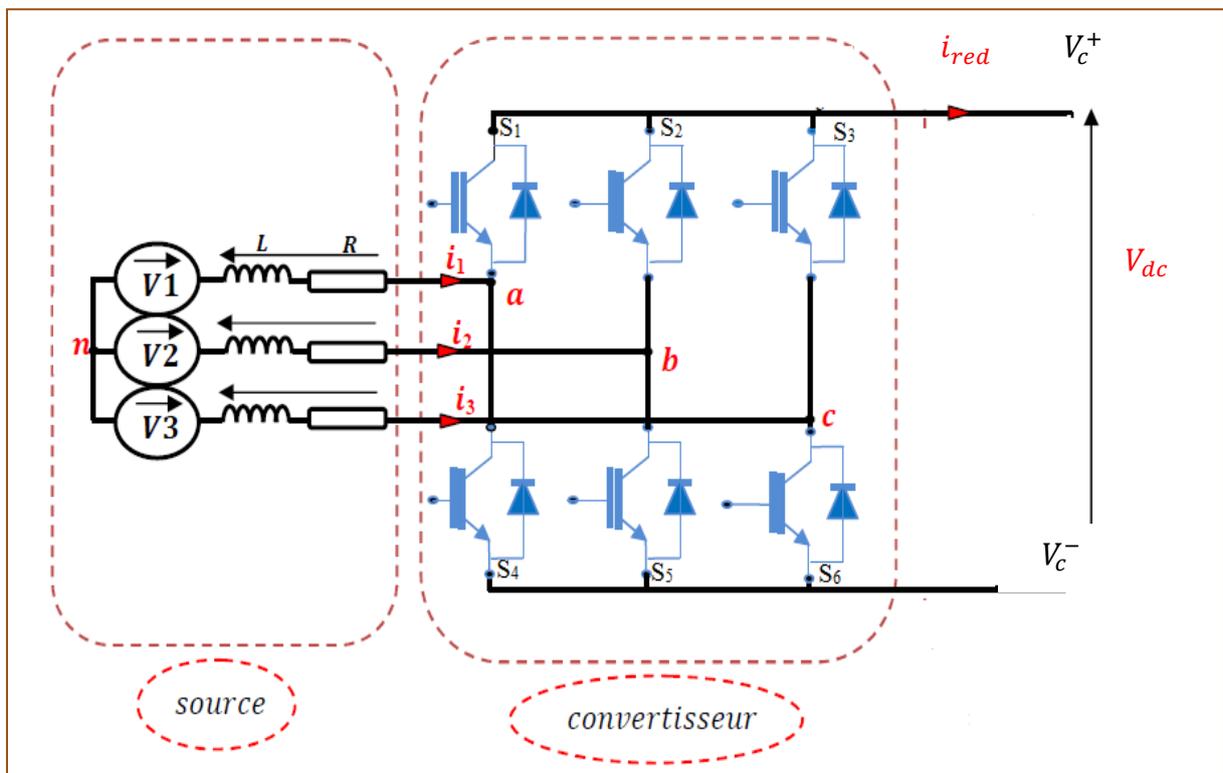
$$\begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad \text{II.23}$$

**II.7 Modélisation de l'interface d'électronique de puissance**

**II.7.1 Modélisation du redresseur**

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [35].

La figure(5) représente le schéma d'un convertisseur AC/DC triphasé.



**Figure (II.8) : Redresseur MLI**

En utilisant les fonctions de connexion  $S_i, i=1 \text{ à } 6$ , pour pour chaque interrupteur on définit la matrice de transfert de redresseur comme suite :

$$\begin{bmatrix} V_c^+ \\ V_c^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ S_4 & S_5 & S_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \tag{II.24}$$

Avec :

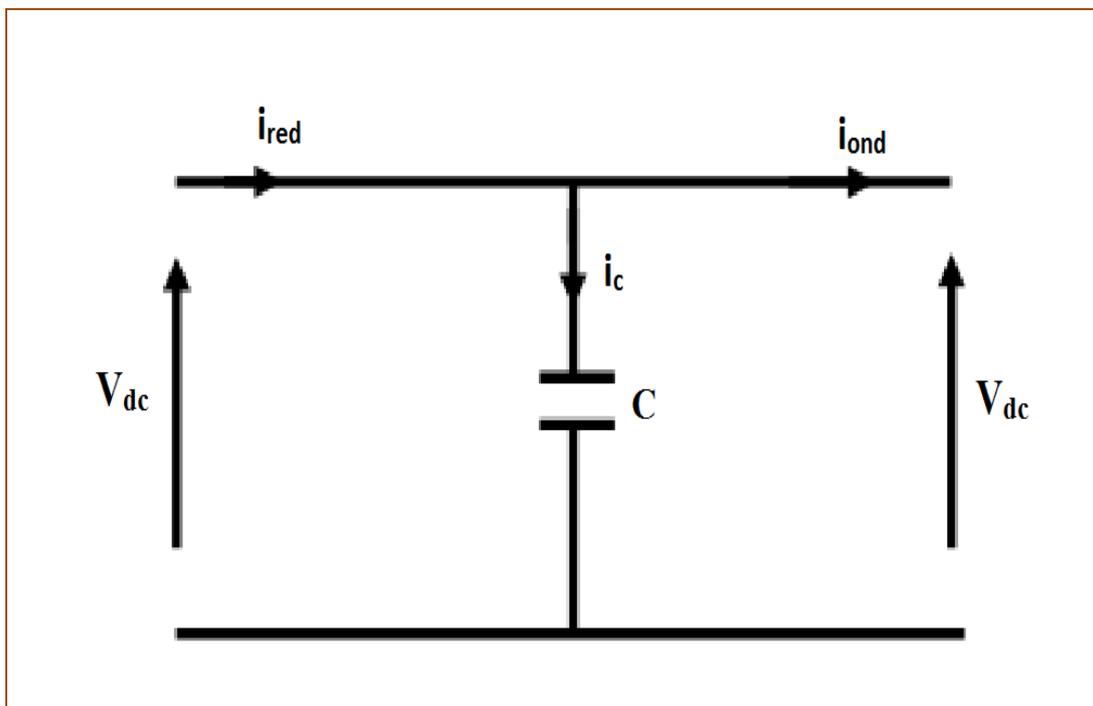
$$V_{dc} = V_c^+ - V_c^- \tag{II.25}$$

De même on peut exprimer le courant  $i_{red}$  en fonction des courants d'entrée

$$I_{red} = [S_1 \ S_2 \ S_3] \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad \text{II.26}$$

### II.7.2 Modélisation de bus continu

Le couplage des deux convertisseurs statique (cote rotor et cote réseau) est assurée par l'intermédiaire d'un bus continu figure (II.9)



**Figure (II.9) :** Schéma électrique du filtre (bus continue).

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

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{c} i_c \quad \text{II.27}$$

L'expression de la tension est :

$$V_{dc}(t) = V_0 + \frac{1}{c} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \quad \text{II.28}$$

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad \text{II.29}$$

II.7.3 Modélisation de l'onduleur

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer à la charge tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens. L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs. Figure (II.10).

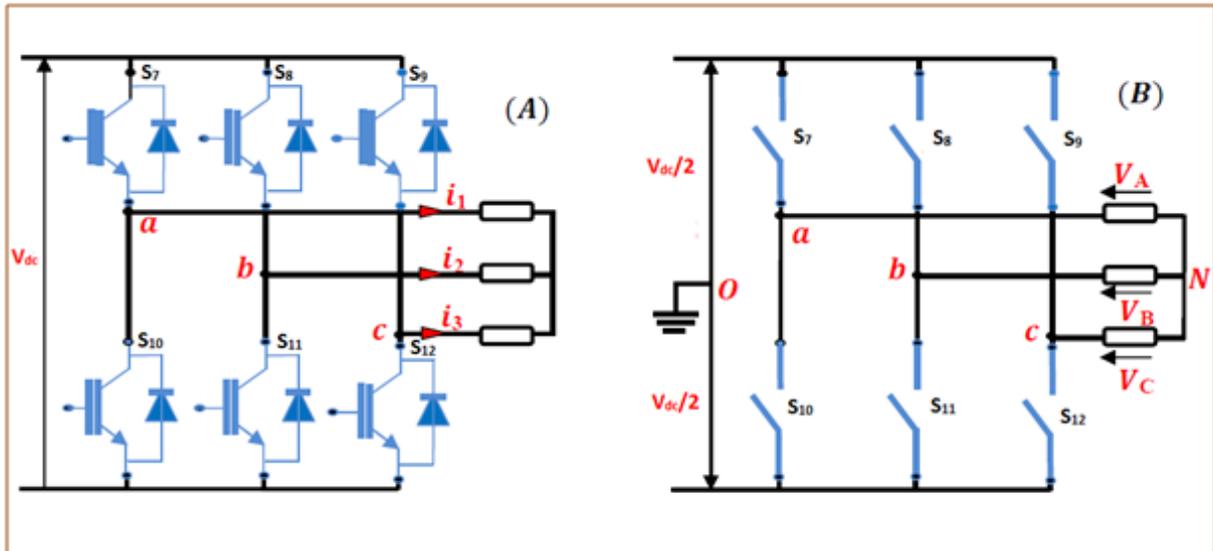


Figure (II.10) : schéma d'un onduleur de tension.

$i_{si} = 0, V_{si} \neq 0$  : interrupteur ouvert ;

$i_{si} \neq 0, V_{si} = 0$  : interrupteur fermé ;

La loi des mailles donne :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{nb} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{nc} \end{cases} \quad \text{II.30}$$

Pour une charge équilibrée :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{II.31}$$

La substitution des équations précédentes on aboutit à :

$$V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad \text{II.32}$$

En remplaçant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = \frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad \text{II.33}$$

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{bmatrix} \quad \text{II.34}$$

On peut exprimer le courant  $i_{ond}$  en fonction des courants alternatifs  $i_a, i_b, i_c$  par l'équation suivante :

$$i_{ond} = [S_7 \ S_8 \ S_9] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{II.35}$$

### II.7.4 Modélisation du filtre coté réseau dans le repère naturel

Il s'agit d'un filtre passif série raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau figure pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique.

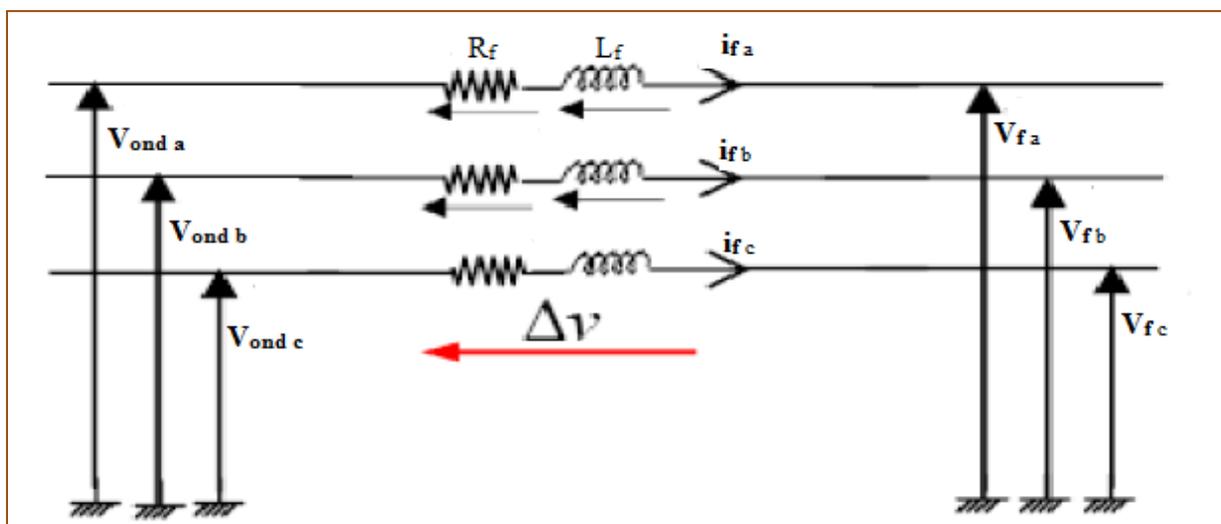


Figure (II.11) : Schéma du filtre coté réseau.

Les courants traversant le filtre sont obtenus par intégration des tensions aux bornes des bobines :

$$\begin{cases} i_{fa}(t) = \int \frac{1}{L_f} V_{fa} dt \\ i_{fb}(t) = \int \frac{1}{L_f} V_{fb} dt \end{cases} \quad \text{II.36}$$

Le courant dans la troisième phase est déduit à partir des deux premiers :

$$i_{fc} = -(i_{fa} + i_{fb}) \quad \text{II.37}$$

L'application de la loi des mailles pour chaque phase au point de raccordement du filtre donne les équations qui lient les tensions modulées par le convertisseur et les courants transitant le filtre :

$$\begin{pmatrix} V_{ond a} \\ V_{ond b} \\ V_{ond c} \end{pmatrix} = R_f \begin{pmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{pmatrix} \quad \text{II.38}$$

Modélisation de filtre dans le repère de Park

L'application de la transformation de Park sur le système d'équations précédent nous donne :

$$\begin{cases} V_{ond d} = R_f i_{fd} + L_f \frac{d}{dt} i_{fd} - L_f \omega i_{fq} + V_{fd} \\ V_{ond q} = R_f i_{fq} + L_f \frac{d}{dt} i_{fq} - L_f \omega i_{fd} + V_{fq} \end{cases} \quad \text{II.39}$$

## II.8 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre la modélisation de la structure choisi, premièrement on a présenté le modèle de la turbine et en suite la modélisation de la MADA dans les deux repères (a b c) et (d q). On a terminé par la modélisation des convertisseurs statiques ainsi que leur mode de fonctionnement.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude et simulation de la commande vectorielle en puissance active de la MADA.

# Chapitre III

Simulations et interprétation des résultats

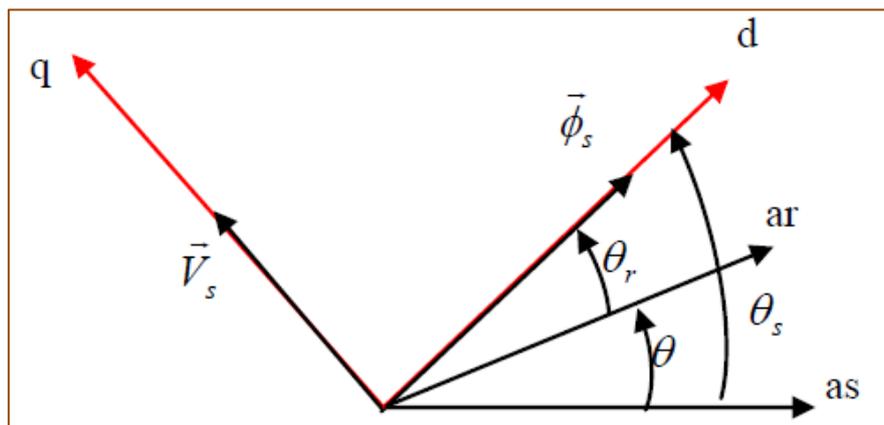
### III.1 Introduction

Ce dernier chapitre sera consacré à la présentation de la commande vectorielle, ainsi que la relation entre les différentes grandeurs (courants, tensions et flux). Nous allons terminer par la simulation du système étudié ainsi que l'interprétation des résultats obtenus.

### III.2 Application de la commande à flux orienté à la MADA

#### III.2.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé

On choisit un référentiel diphasé 'd-q' lié au champ tournant statorique, qui n'introduit pas de simplifications dans la formulation des équations de la machine. Ce modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation, figure(III.1).



**Figure (III.1) :** Orientation du flux statorique

En alignant le vecteur flux statorique  $\vec{\phi}_s$  avec l'axe 'd', nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad \text{III.1}$$

Le couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_s} (\phi_s \cdot i_{rq}) \quad \text{III.2}$$

Dans l'hypothèse où le flux  $\phi_s$  est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine dépend du courant rotorique d'axe q.

Si l'on néglige la résistance d'un bobinage statorique  $R_s$ , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne, on peut alors écrire :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Nous pouvons alors écrire les équations liant le courant statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad \text{III.4}$$

L'expression des puissances, active réactive statorique devient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} \end{cases} \quad \text{III.5}$$

En approximant  $\phi_s$  par  $\frac{V_s}{\omega_s}$ , l'expression de la puissance réactive  $Q_s$  devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} \quad \text{III.6}$$

Et les puissances, active du réseau et réactive statorique et rotorique côté réseau s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} P_t = P_s + P_r \\ Q_s = 0 \\ Q_r = 0 \end{cases} \quad \text{III.7}$$

On remplaçant (III4) dans (II24) on trouve :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} [V_{rd} - R_r \cdot i_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma i_{rq}] \\ \frac{d}{dt} i_{rq} = \frac{1}{\sigma L_r} [V_{rq} - R_r \cdot i_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma i_{rd} - g \cdot \omega_s \cdot M \phi_s] \end{cases} \quad \text{III.8}$$

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  : Coefficient de dispersion

- Relations entre tensions et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotorique d'après les équations (II.19, 20) en remplaçant les courants statorique par leurs expressions dans l'équation (III.4) :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + \frac{MV_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rq} \end{cases} \quad \text{III.9}$$

- Relations entre tensions et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations (II.19, 20) en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans l'équation (III.4) :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + \frac{MV_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rq} \end{cases} \quad \text{III.10}$$

Ces expressions des flux d'axes d et q sont alors intégrées aux tensions rotoriques diphasées, nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt} i_{rd} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt} i_{rq} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + g \cdot \omega_s \left(\frac{MV_s}{L_s \omega_s}\right) \end{cases} \quad \text{III.11}$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire l'expression des tensions rotoriques comme suite :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + g \left(\frac{MV_s}{L_s}\right) \end{cases} \quad \text{III.12}$$

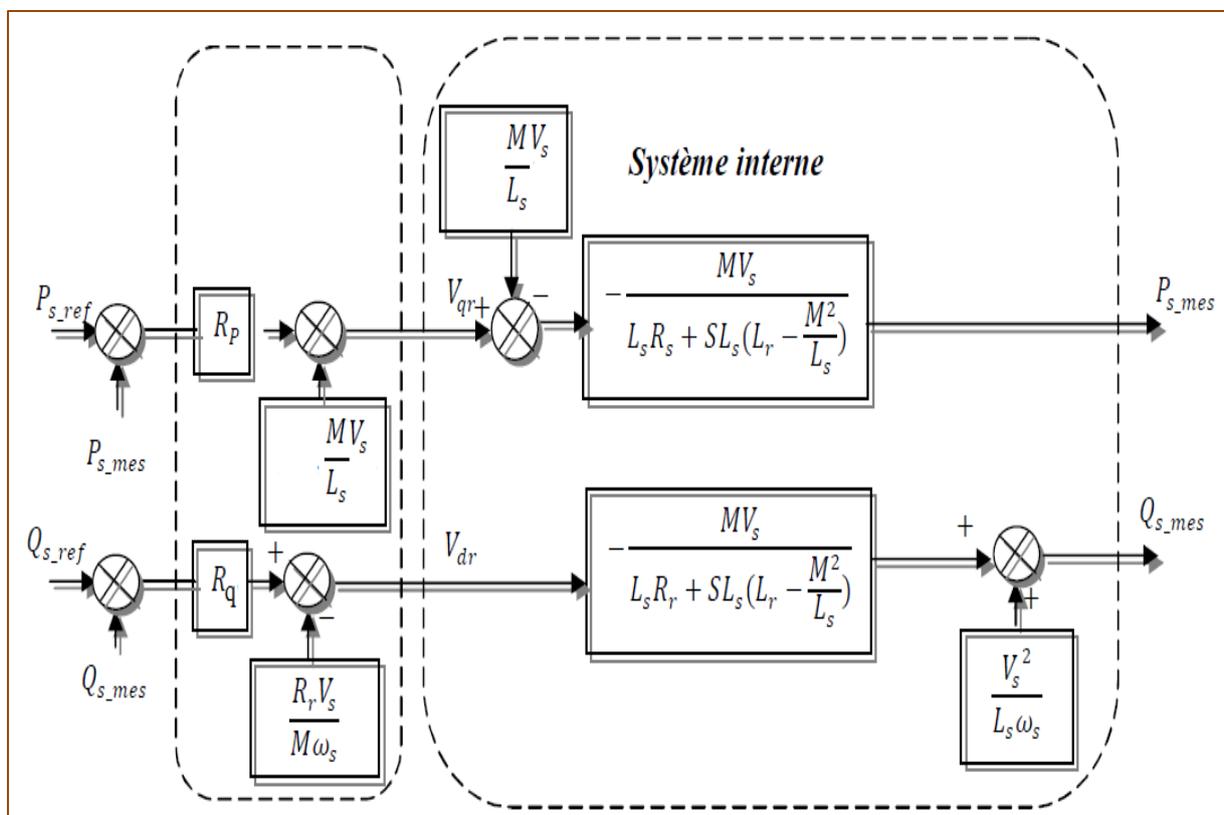
### III.2.2. Commande vectorielle en puissance de la MADA

On remarque dans le schéma de la figure (III.2) que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert de premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du

glissement  $g$ , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes  $d$  et  $q$  pourront être commandées séparément avec chacun son propre régulateur (Fig. III.2).

En revanche le terme  $g \frac{MV_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable, le contrôle du système devra donc prendre en compte de ce terme.

Le schéma du principe de la commande vectorielle en puissance active et réactive est donné par la figure suivante :



**Figure III.2 :** schéma du principe de la commande vectorielle en puissance

Les blocs  $R_p$  et  $R_q$  du schéma ci-dessus représentent les chaînes de régulation des puissances active et réactive. L'objectif de ces régulateurs est d'obtenir des performances dynamiques élevées. Pour réaliser ces objectifs on utilise des régulateurs proportionnels intégraux (PI).

Dans le cas où le réseau est perturbé (pollution harmonique, creux de tension), un deuxième régulateur est nécessaire pour chacun des deux axes.

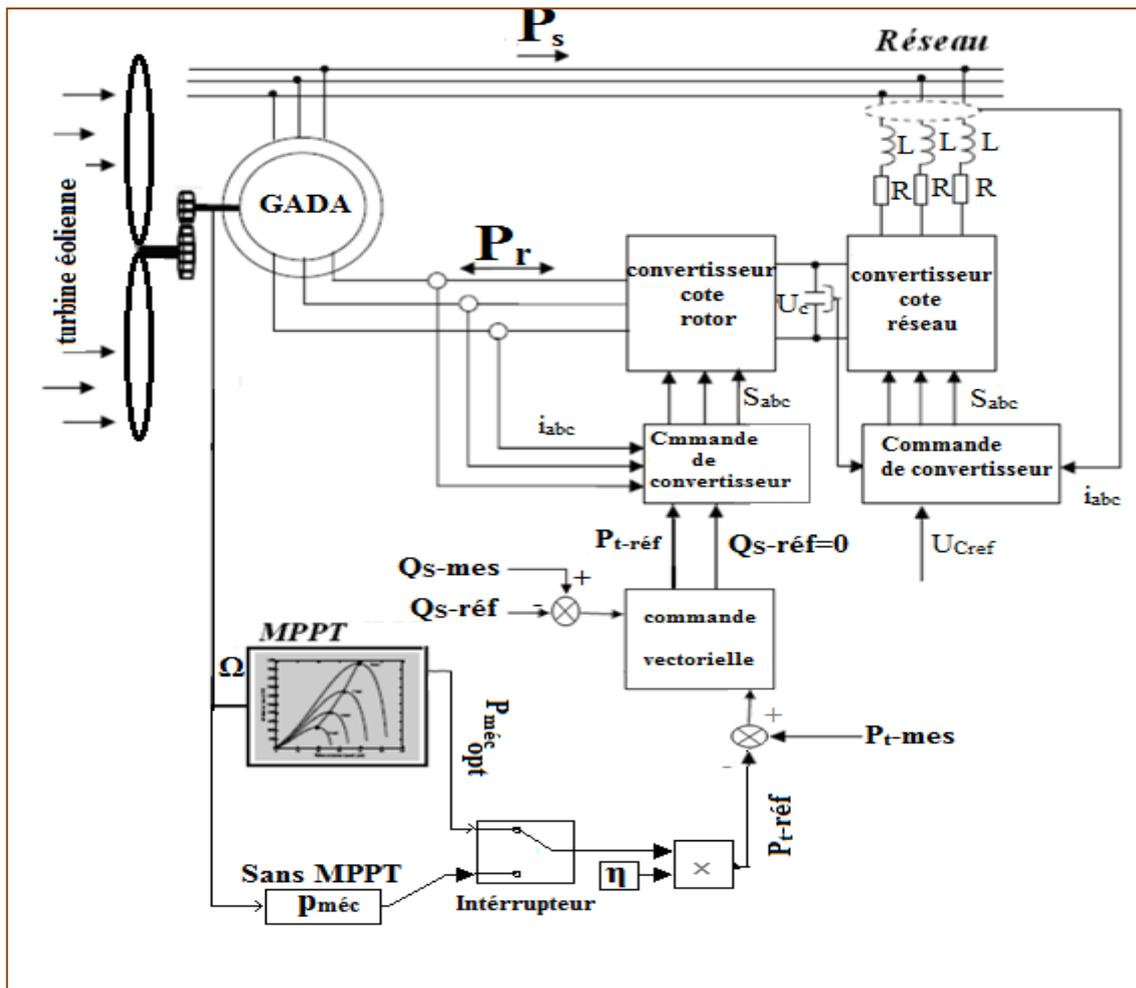


Figure (III.3) : Schéma globale de la commande

Après simulation on a obtenues les courbes générée sur les figures suivantes :

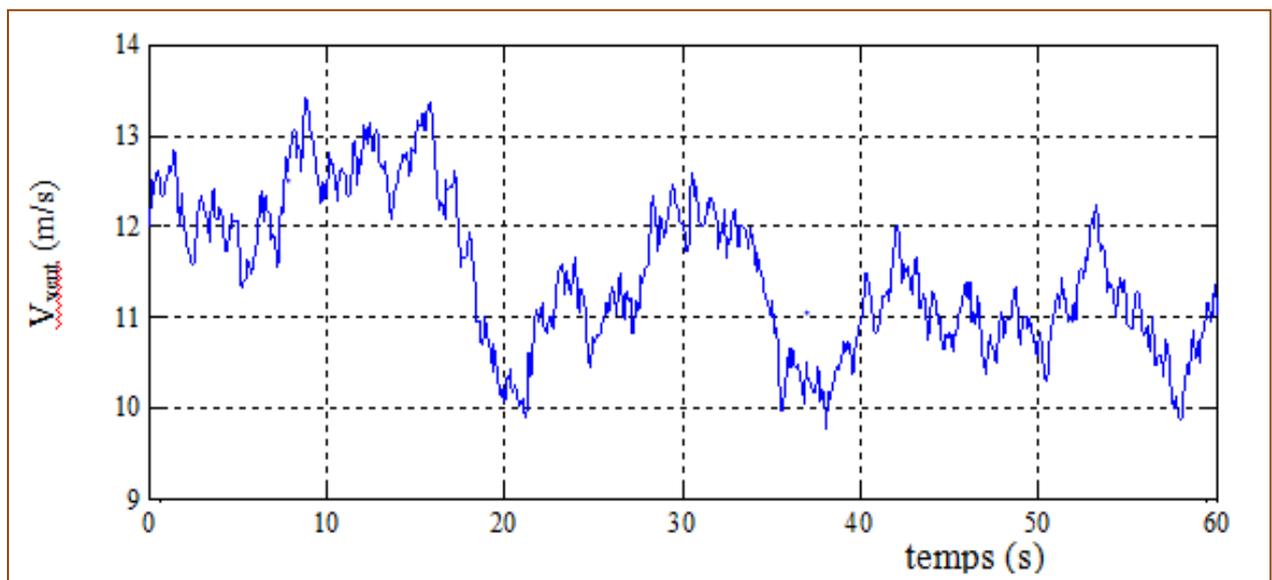


Figure (III.4) : Profil du vent

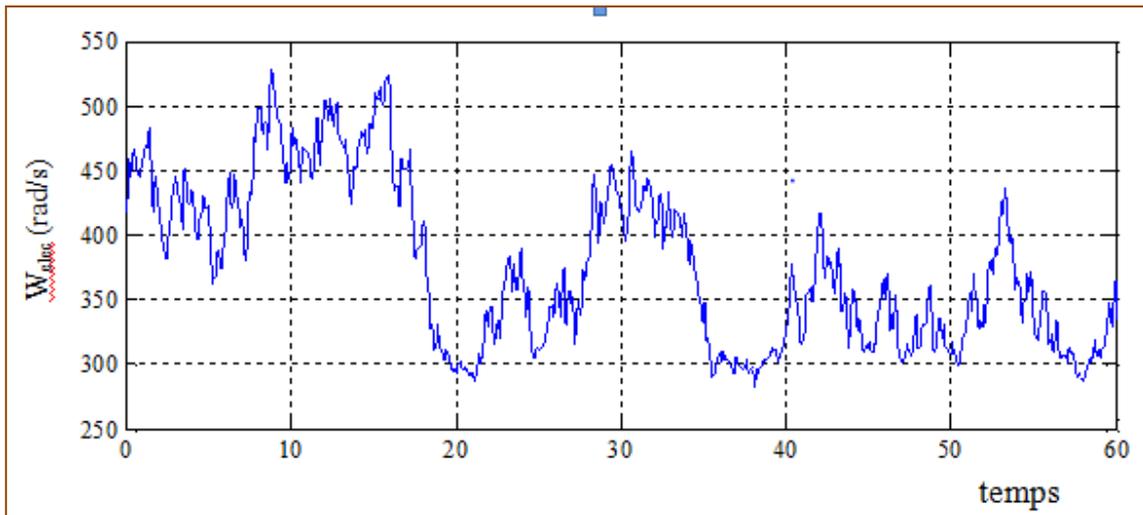


Figure (III.5) : Vitesse électrique

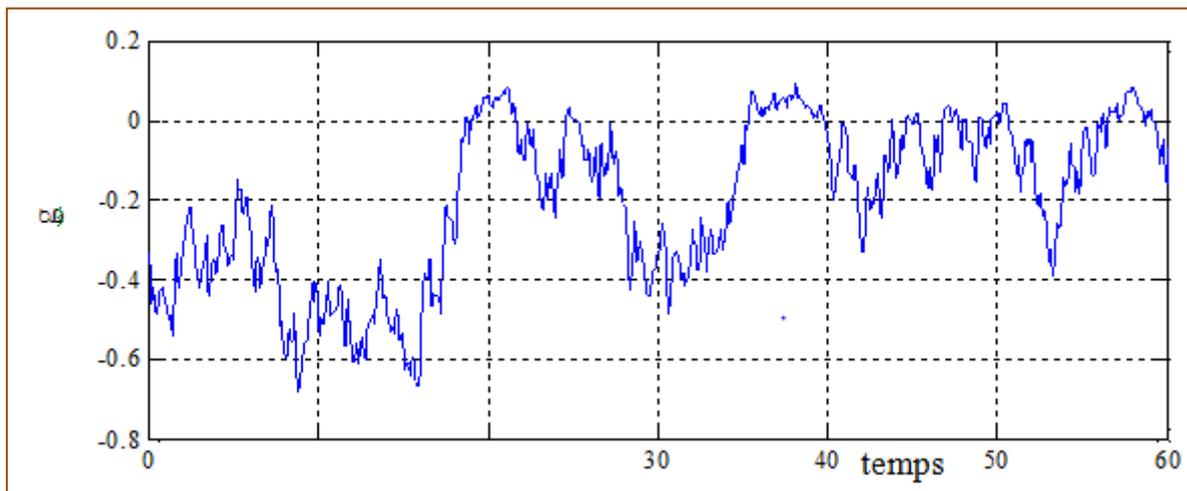


Figure (II.6) : glissement

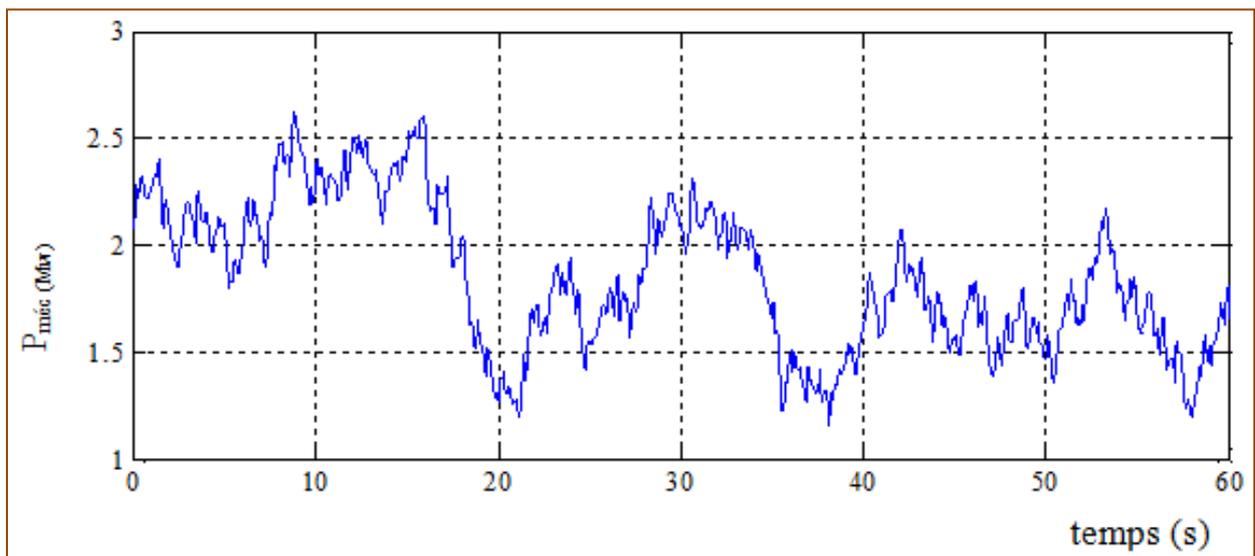


Figure (III.7) : Puissance mécanique

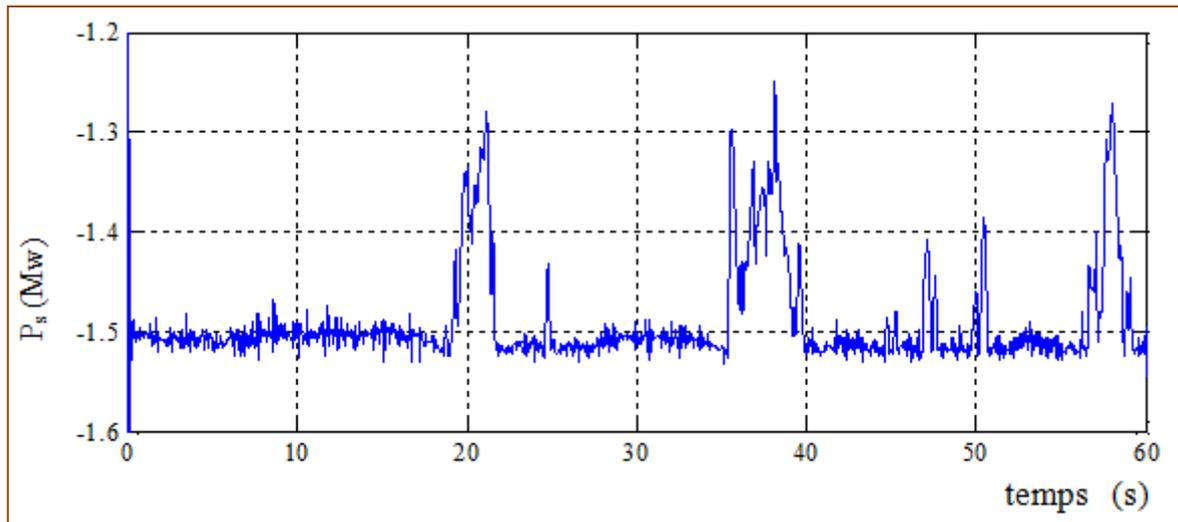


Figure (III.8) : Puissance statorique

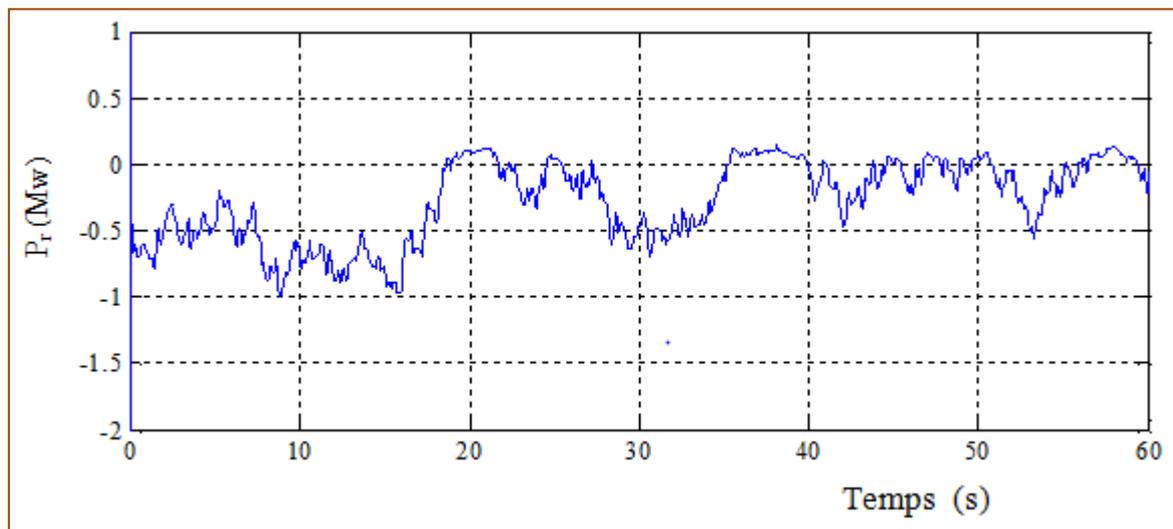


Figure (III.9) : Puissance rotorique

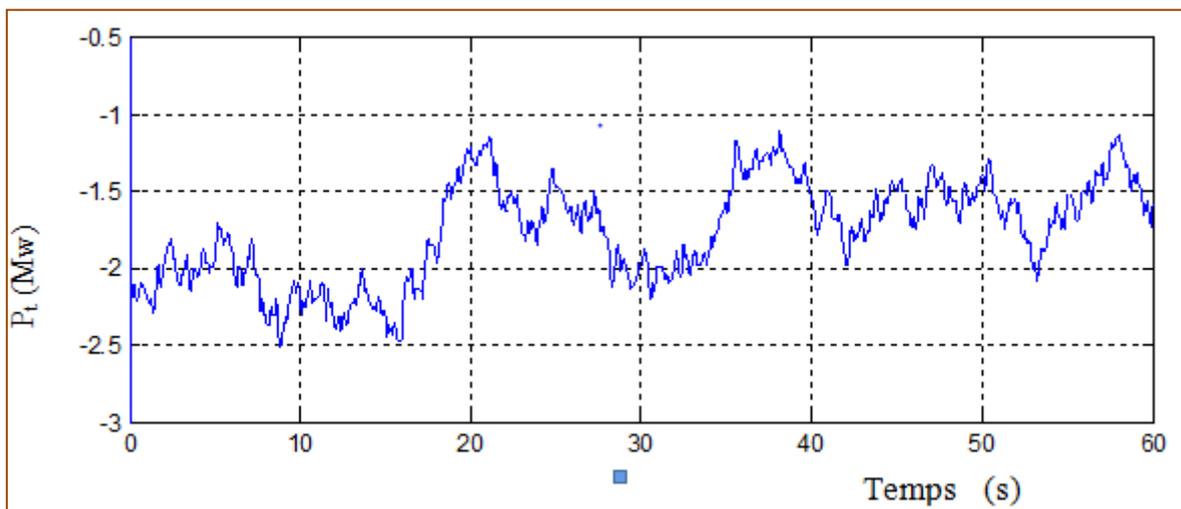


Figure (III.10) : Puissance totale

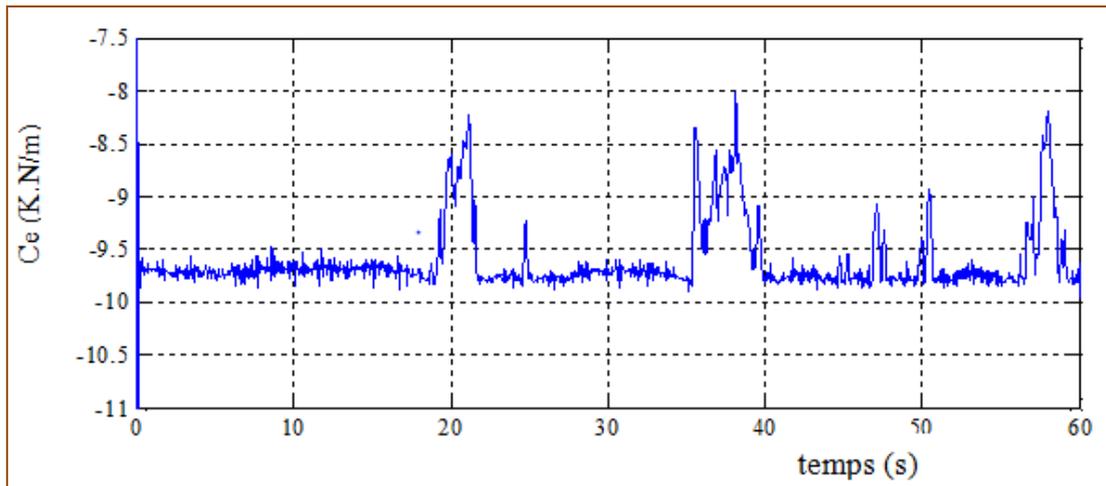


Figure (III.11) : couple électromagnétique

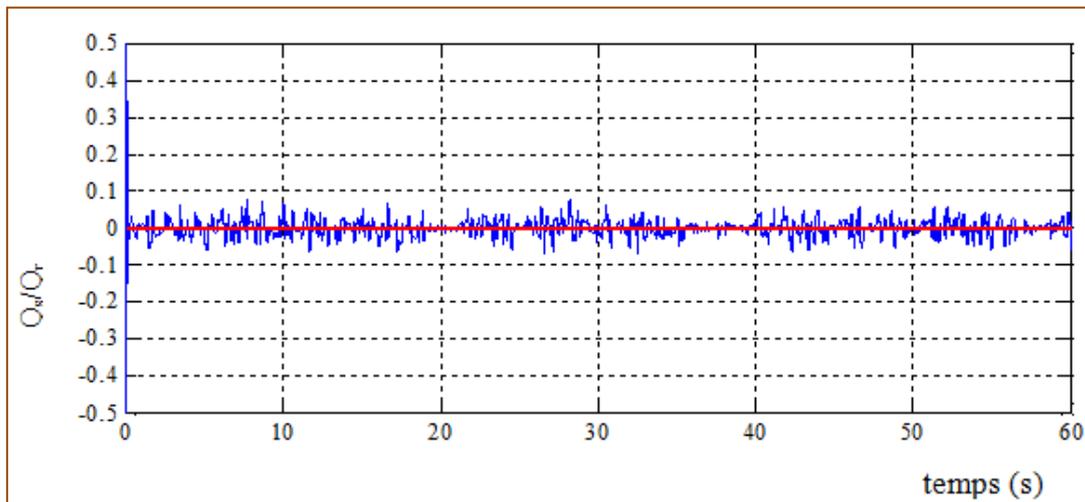


Figure (III.12) : Puissances réactives stator/rotor

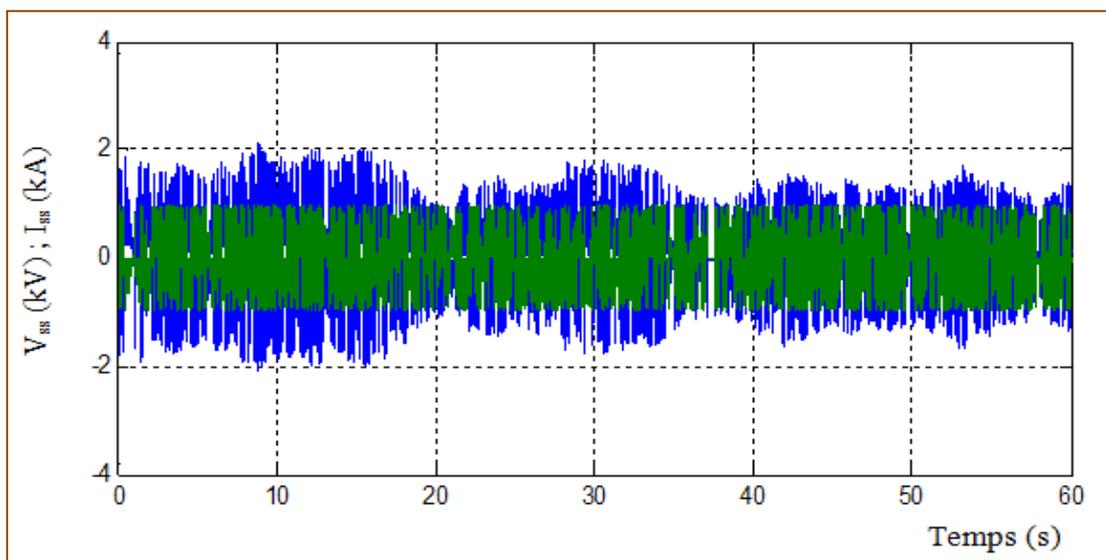


Figure (III.13) : Tension/courant envoyé au réseau

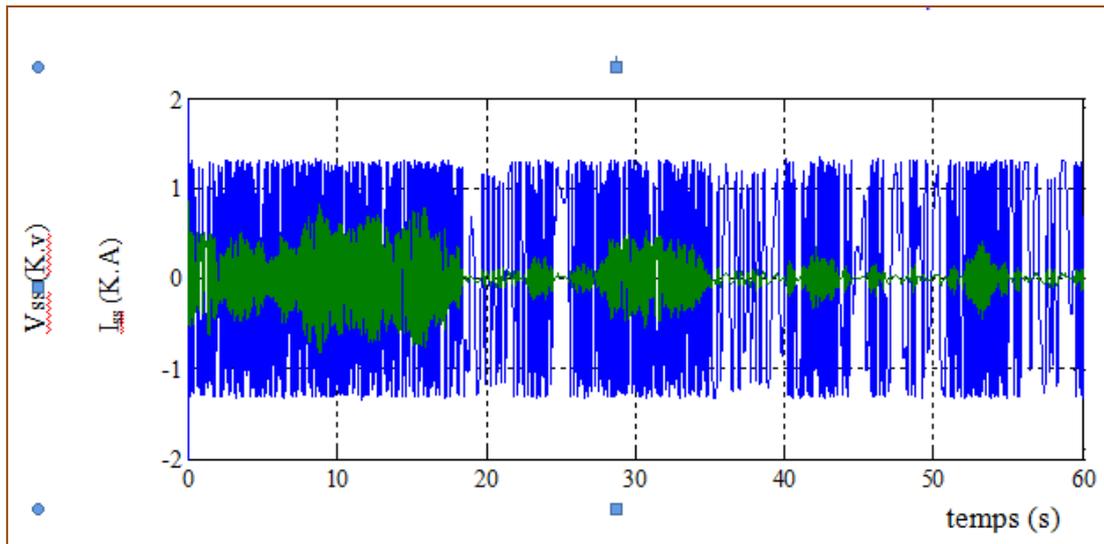


Figure (III.14) : Tension/courant rotorique

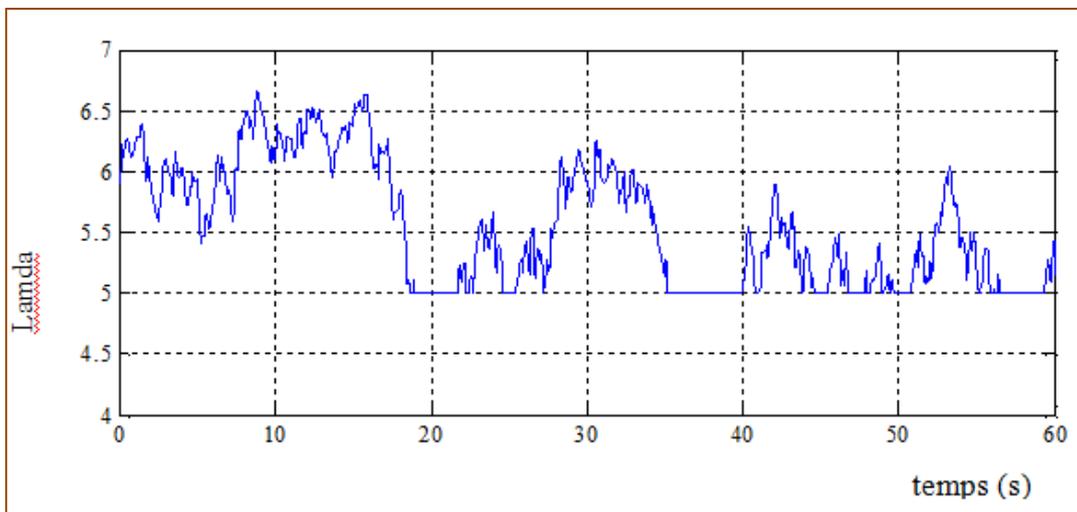


Figure (III.15) : Vitesse spécifique de l'éolienne

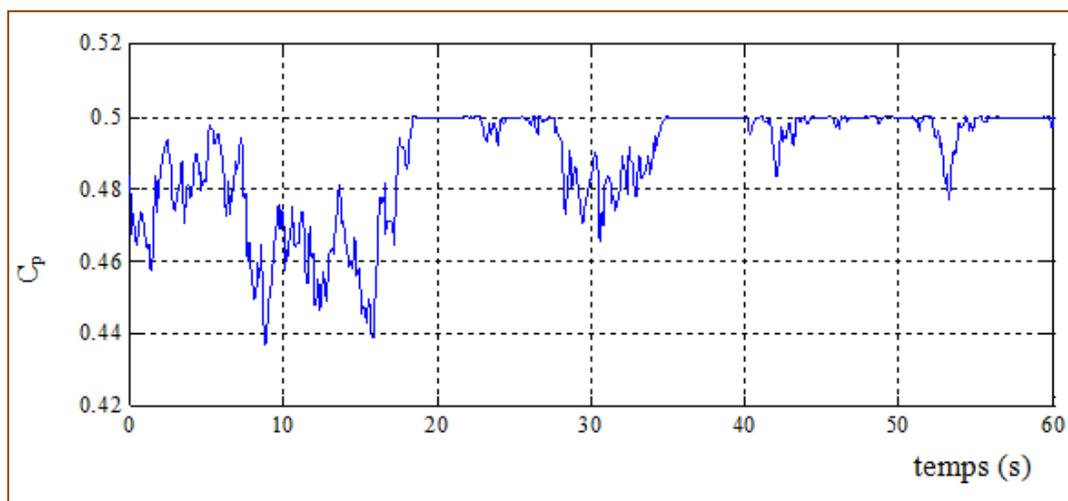


Figure (III.16) : Coefficient de puissance de l'éolienne

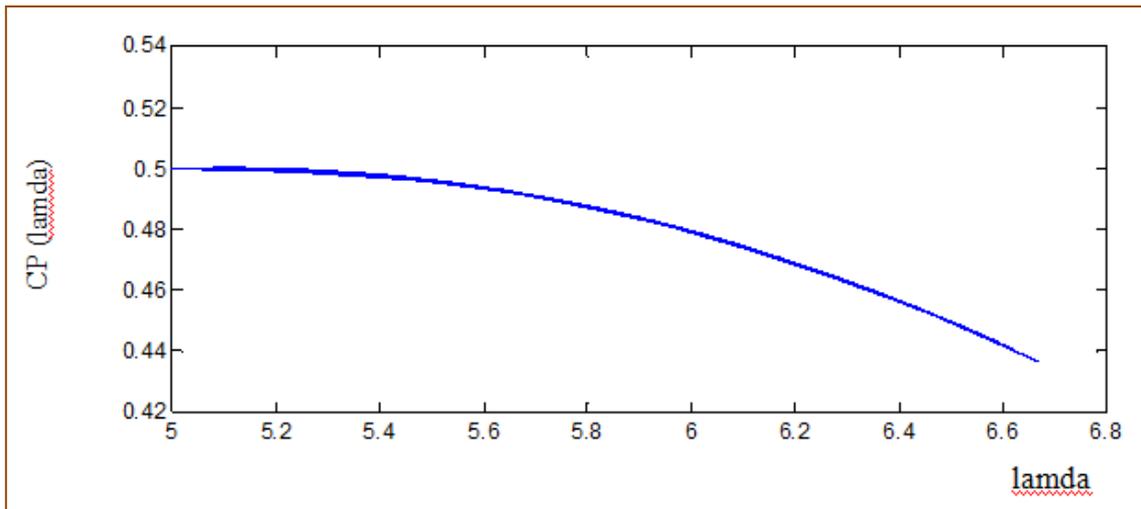


Figure (III.17) : Coefficient de puissance en fonction de vitesse spécifique

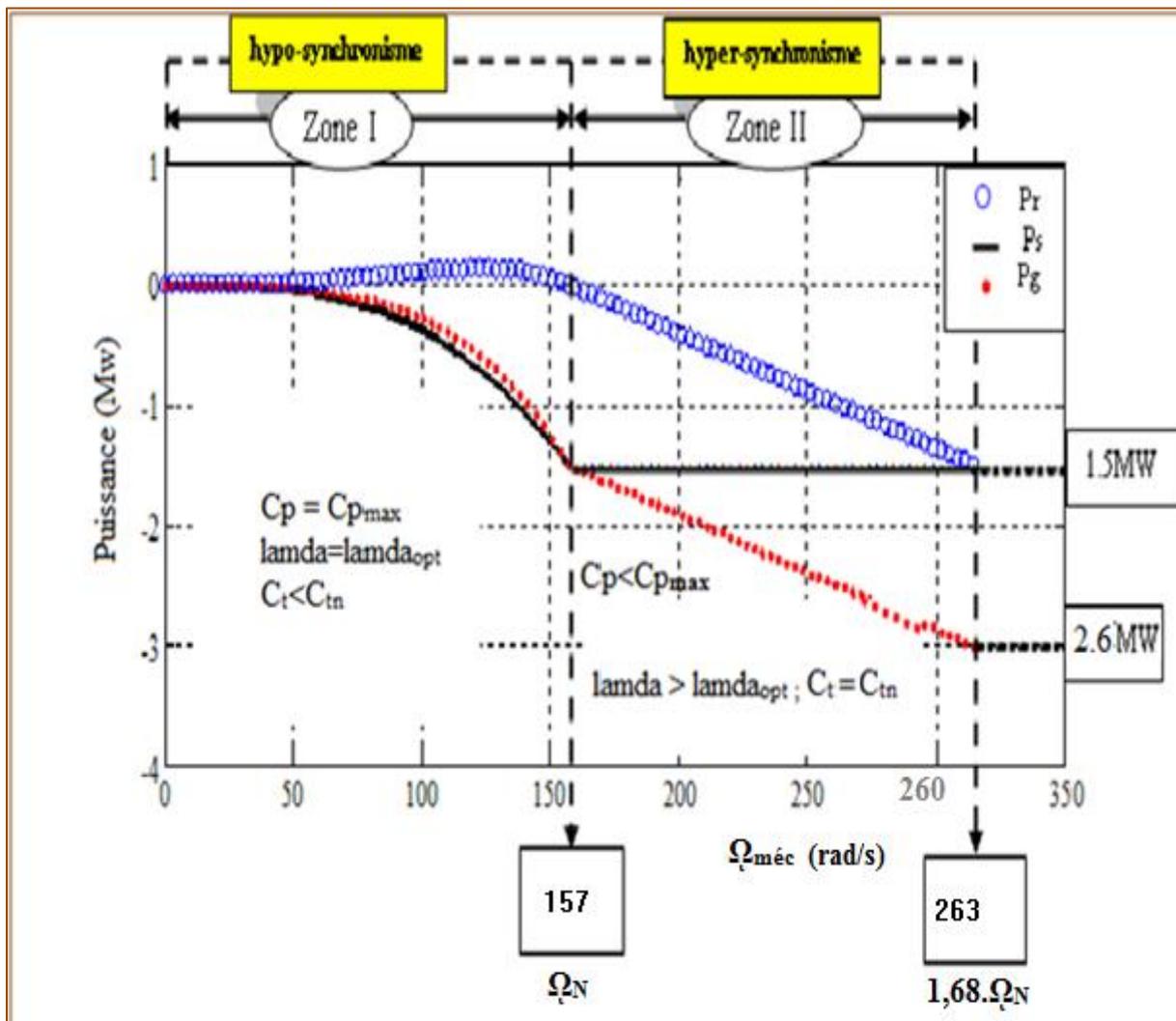


Figure (III.18) : Zones de fonctionnement de l'éolienne

### III.3. Interprétation des résultats obtenus

La figure (III.4) représente le profil du vent avec des vitesses élevées au démarrage.

On remarque que la vitesse électrique (fig.III.5) et la puissance mécanique (fig.III.7) suit la même trajectoire que la vitesse du vent, en d'autres termes, à  $t=0s$  jusqu'à  $t=19s$  leurs valeurs dépassent largement les valeurs nominales (environ 68%), c'est la zone de fonctionnement hyper-synchrone. Par contre la puissance statorique est égale à la puissance nominale (fig.III.8).

On remarque aussi que lorsque  $t=19s$  à  $23s$   $w_{elec}$  est  $P_{mec}$  sont autour des valeurs nominales (fonctionnement hypo-synchrone).

La figure (III.9) représente la puissance rotorique avec des valeurs importantes dans la première partie de fonctionnement et des faibles dans la seconde partie.

La figure (III.10) illustre la puissance totale injectée au réseau avec des valeurs largement dépassée celle des nominales dans le fonctionnement hyper, plus faible dans le fonctionnement hypo.

Le couple électromagnétique illustré sur la figure (III.11) suit la même logique que la puissance statorique.

On remarque que la puissance réactive statorique est nulle (parce que le réseau est supposé stable), par contre, la puissance réactive rotorique est nulle uniquement dans le fonctionnement hypo (fig.III.12).

La figure (III.13) représente la tension et le courant envoyés au réseau.

Les figures (III.15) et (III.16) représentent respectivement la vitesse spécifique et le coefficient de puissance de l'éolienne, elle prend des valeurs variables dans le fonctionnement hyper (sans MPPT) et des valeurs constantes dans la zone de fonctionnement hypo (avec MPPT).

La figure (III.17) représente le coefficient de puissance  $C_p$  dans la zone de fonctionnement hyper-synchrone.

La figure (III.18) montre l'évolution des puissances actives et la vitesse de rotation de la machine ainsi que les grandeurs contrôlées dans les deux zones de fonctionnement.

**III.4 conclusion**

Dans cette partie du travail nous avons simulé la chaîne de conversion, étudié dans l'espace MATLAB Simulink, qui nous a donné des résultats permettant de valider les théories citées dans le premier et le deuxième chapitre à propos du comportement de la MADA.

En effet, on constate que la MADA présente des avantages dans la production éolienne à vitesse variable.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

L'objectif de cette étude est la commande de chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) sur une large plage de variation de vitesse

Notre travail commence par une présentation de l'énergie éolienne et les différentes structures qui participent à l'optimisation de cette énergie, ainsi qu'un aperçu sur la machine asynchrone à double alimentation.

Lors de cette étude nous nous sommes intéressés à la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine, multiplicateur, MADA, convertisseurs et un filtre.

Ces derniers ont été modélisés respectivement, nous avons aussi décrit les principales méthodes utilisées pour maximiser cette énergie.

L'introduction de la commande vectorielle de la MADA en puissance dans le troisième chapitre avec orientation de flux statorique est établie, l'application de correcteur PI est également effectuée.

Enfin nous avons simulé notre système dans l'espace MATLAB/Simulink suivi d'une interprétation des résultats obtenus. Ces derniers montrent, le bon fonctionnement du système étudié et de la commande élaborée, et la puissance active générée atteint 70% au-delà du régime nominal.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes sont envisageables, elles peuvent contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA et des systèmes de conversion éolienne, dont :

- ✓ Validation des résultats obtenus par des essais pratiques.
- ✓ Intégration d'un système de stockage et optimisation technique et économique.
- ✓ Intégration de la MADA dans un parc éolien mixte avec ou sans stockage.

Tout cela demande autant d'études qui devraient apporter des solutions pour rendre encore plus facile l'insertion des éoliennes dans le réseau, afin de produire une énergie propre et durable.

# Références bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] : B. Multon, X. Roboam, B. DAKYO, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'Ingénieur, D3 960.
- [2] : RIOLETE E. « Le mini éolien » Groupe Eyrolles, 2007.
- [3] : F. Poitier, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTES, 2003.
- [4] : L. Khettache, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation » thèse de magister, université de Batna, 2007.
- [5] : L. Leclercq, « apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ».
- [6] : H. Semmache, A. Bounoua, R. Bausière and N. Benramdane. « Développement des Performances des Systèmes Energétiques dans la Production d'Energie Eolienne ». Revue Energie Renouvelable: Valorisation () 261-266 .Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France. 1999.
- [7] : J. Ancel, "Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.
- [8] : Quang N, Dittrich A, Lan P. Doubly-fed induction machine as generator in wind power plant nonlinear control algorithms with direct decoupling. EPE'05, 2005.
- [9] : B. Multon, " Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005.
- [10] : P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Eoliennes », techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 21.
- [11] : I. HAMZAOUÏ « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [12] : N. LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèses de Doctorat, ENS de Cachan, 2005.

- [13] : F.D. BIANCHI, H. De BATTISTA, R.J. MANTZ. « Wind turbine controlsystèmes, principales, Modeling and Gain Scheduling Design ». Springer 2007.
- [14] : A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [15] : A. BOYETTE. « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production d'énergie éolienne ». Thèse de doctorat, Nancy I 2006.
- [16] : J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [17] : L. Khettache, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation » thèse de magister, université de Batna, 2007.
- [18] : N. Laverdure, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ouinsulaires ». Thèse de doctorat de l'Université Grenoble.
- [19]: F.Braun. « Recherche et Développement pour la Conception d'ASIC pour Commande deMachines Electriques ». Lettre des Sciences Physiques N° 42 Mars/Avril, 1998.
- [20]: C. Colliez, A. Tounzi, F. Piriou, "Vector Control of an Autonomous InductionGenerator Connected to a PWM Rectifier", Proceedings of EPE 97, vol. 2, pp. 711-716,Trondheim, Norvège, 8-10 Septembre 1997.
- [21] :L. Refoufi, B.A.T. Al Zahawi, A.G. Jack "Analysis and modeling of the steady state.
- [22]: N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics, Converters,Applications and design", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8.
- [23] : P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, «Eoliennes» , techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 21.
- [24] :Quang N, Dittrich A, Lan P. Doubly-fed induction machine as generator inwind power plant nonlinear control algorithms with direct decoupling. EPE'05,2005.
- [25] : A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.

- [26] : FREDERIC POITIERS, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes 19-12 -2003.
- [27] : B. MULTON, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, Aérogénérateurs électriques, Techniques de l'Ingénieur, D3 960.
- [28] : J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [29] : H. BÜHLER, Electronique de réglage et de Commande, Traité d'électricité et d'électronique, vol XVI, édition Georgi, 1979.
- [30] : J. L DALMASSO, Electronique de puissance Commutation, édition Belin, 1986.
- [31.32] : A. BOYETTE, Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne, Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [33] : FREDERIC POITIERS, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes 19-12 -2003.
- [34]:Y. Zhou, Pavol BAUER, Jan PIERIK, Jan A. FERREIRA. « Integration of large offshore wind farm-doubly fed induction generators with classical HVDC», 2009.
- [35] : H. Camblong, 'Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, Décembre 2003.
- [36] F. Poitier, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTE, 2003.
- [37] A. Davigny. « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ». Thèse de doctorat en génie électrique. Université des sciences et Technologies de Lille, 2007.

[38] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.

[39] A .Melloul « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne.<< mémoire magister université Sétif 2011.

[40] : M<sup>me</sup>. Belaid « énergies photovoltaïques » ; cours master II, université A. Mira, Bejaia. 2015

[41] [www.windpower.org](http://www.windpower.org)

# Annexe

## **Annexe**

### **Paramètre de l'aérogénérateur**

#### **1. Paramètre de la turbine**

- Nombre de pales 3 ;
- Rayon :  $R=36\text{m}$  ;
- Gain de multiplicateur :  $G=124$  ;
- Inertie totale :  $J=100\text{ Kg.m}^2$  ;
- Coefficient du frottement :  $f=7.1\text{e-}3\text{ N.m.s/rd}$  ;

#### **2. Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation**

- 2 paires de pôles ;
- Résistance statorique :  $R_s = 0.012\ \Omega$  ;
- Résistance rotorique :  $R_r = 0.021\ \Omega$  ;
- Inductance statorique :  $L_s = 0.0137\text{ mH}$  ;
- Inductance rotorique :  $L_r = 0.0137\text{ mH}$  ;
- Inductance réactance mutuelle :  $L_m = 0.0135\text{ mH}$  ;
- Puissance nominale :  $P_n = 1.5\text{ MW}$  ;
- Tension nominale :  $V_s = 690\text{ V}$  ;
- Fréquence :  $f = 50\text{ Hz}$ .
- La géométrie de la machine est symétrique ;
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable ;
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires ;
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température ;
- Les forces magnétomotrices créés par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale ;
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme

### 3. Paramètre de régulateur

- Gain intégral du correcteur PI :  $K_i = 3.088 \text{ e-4}$  ;
- Gain proportionnel du correcteur PI :  $K_p = 5.84 \text{ e-6}$  ;
- Temps de réponse d correcteur PI :  $\tau_r = 100 \text{ ms}$ .