

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Commande des systèmes électriques**

## **THÈME**

**Commande par Mode Glissant d'un Système  
Eolien à Base d'une Génératrice asynchrone à  
Double Alimentation**

*Préparé par : TALBI Sabrina Siham  
ZEGRANE Nawel*

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Y.MESSLEM</b>	<b>Pr</b>	<b>Président</b>
<b>S.HASSAINE</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur 1</b>
<b>B.BELABES</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur 2</b>
<b>S.KOUADRIA</b>	<b>MAA</b>	<b>Encadreur</b>

**PROMOTION 2016 /2017**

## REMERCIEMENTS

---

*Nous remercions avons tout Allah, le tout puissant, pour nous avoir donné le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire pour accomplir ce travail.*

*Nous aimerions adresser nos plus fervent remerciements à nos parents pour leurs encouragements et leurs soutien moral et leur dévouement procurés durant cette période afin d'accomplir au mieux ce travail.*

*Nous remercions aussi notre promoteur Mr: KOUADRIA Selman pour ses compétences professionnelles, sa confiance, son aide ainsi que pour ses précieux conseils accordés durant toute cette période.*

*Nous tenant à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail, et tout l'ensemble des professeurs du département de génie électrique pour leur soutien et le aide précieuse.*

## Abréviations

---

- $V$  : La vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur.
- $\beta$  : L'angle d'orientation de pale.
- $\rho$  : Masse volumique de l'air.
- $R$  : Rayon de la surface balayée par la turbine.
- $S$  : La surface balayée par la turbine.
- $P_{aero}$  : La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
- $P_v$  : La puissance de la masse d'air.
- $C_p$  : Le coefficient de puissance.
- $\lambda$  : La vitesse relative de l'éolienne.
- $\lambda_{opt}$  : La vitesse relative optimale de l'éolienne.
- $\Omega_{tur}$  : Vitesse de rotation de la turbine.
- $\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
- $G$  : Gain du multiplicateur.
- $C_g$  : Couple résistant issue du multiplicateur.
- $P_s$  : Puissance active statorique.
- $P_r$  : Puissance active rotorique.
- $C_{aer}$  : Couple aérodynamique de l'éolienne.
- $C_{vis}$  : Couple des frottements visqueux.
- $C_{em}$  : Couple électromagnétique.
- $C_{mec}$  : couple mécanique.
- $C_{t\_est}$  : Couple de la turbine estimée.
- $f$  : Coefficient de frottement visqueux de l'arbre
- $J_t$  : Inertie de la turbine.

## Abréviations

---

- $g$ : Glissement.
- $[V_{dqs}]$ : Tensions biphasées au stator de la machine.
- $[V_{dqr}]$ : Tensions biphasées au rotor de la machine.
- $[i_{dqs}]$ : Courants statoriques.
- $[i_{dqr}]$ : Courants rotoriques.
- $[\phi_{dqs}]$ : Flux statoriques.
- $[\phi_{dqr}]$ : Flux rotoriques.
- $[e_{abc}]$ : les tensions du réseau
- $[i_{abc}]$ : les courants du réseau
- $R_s$ : Résistance des enroulements statoriques.
- $R_r$ : Résistance des enroulements rotoriques.
- $L_s$ : inductance cyclique du stator.
- $L_r$ : Inductance cyclique du rotor.
- $M_{sr}$ : Matrice inductance mutuelle stator-rotor
- $P$ : nombre de paires de pôles de la machine.
- $F$ : le coefficient de frottement visqueux de la machine en  $(N.m.s/rad)$ .
- $C_{em}$ : le couple électromagnétique en  $(N.m)$ .
- $C_r$ : le couple résistant en  $(N.m)$ .
- $\theta$ : est l'angle entre l'axe statorique  $a_s$  et l'axe rotorique.
- $\theta_r$ : est l'angle entre l'axe rotorique  $a_r$ , et l'axe de Park directe.
- $\theta_s$ : est l'angle entre l'axe statorique  $a_s$ , et l'axe de Park directe.
- $\omega$ : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q).

## Abréviations

---

- $\omega_r$  : est la vitesse angulaire électrique du rotor.
- $\omega_s$  : est la vitesse angulaire électrique du stator.
- $d$  : indice de l'axe direct de Park.
- $q$  : indice de l'axe en quadrature de Park.
- $P_s$  : Puissance active.
- $Q_s$  : Puissance réactive.
- $V_p, f_p$  : Sont respectivement la tension et la fréquence de la porteuse de l'onduleur.
- $i_{ond}, i_{red}$  : Courants modulés par le CCM et le CCR.
- $i_{cond}$  : Courant traverse condensateur.
- $U_{dc}$  : Tension de bus continu.
- $R_f, L_f$  : Résistance et l'inductance de filtre RL.
- $S_a, S_b, S_c$  : Séquence de commande du convertisseur à MLI.
- $T_s$  : Période de commutation.
- $\delta$  : l'angle entre le flux statorique-rotorique
- $S_n$  : Les secteurs.
- *MADA* : Machine Asynchrone à Double Alimentation.
- *Pi* : Proportionnel- Intégrateur.
- *CCM* : Convertisseur Cote rotor.
- *CCR* : Convertisseur Cote Réseau.
- *MLI* : Modulation à Large Impulsion.
- *MPPT* : maximum Power Point Tracking.
- *SMC* : Sliding Mod Control (régulateur mode glissant) .
- *PLL* : Power Looked Loop (Boucle de verrouillage de phase

# Sommaire

---

Remerciement

Abréviation

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

## Introduction générale

Introduction générale ----- 1

### Chapitre I :

#### Généralité sur les Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne.

I.1. Introduction ----- 3

I.2. Contexte historique ----- 3

I.3. Définition de l'énergie éolienne ----- 5

I.4. Situation actuelle d'énergie éolienne dans le monde ----- 5

I.5. Situation actuelle d'énergie éolienne en Algérie ----- 7

I.6. Principe de base de l'éolien ----- 9

I.7. Principaux composants d'une éolienne ----- 9

I.8. Taille des aérogénérateurs ----- 10

I.9. Différent types d'éoliennes ----- 11

I.9.1. Selon la conception mécanique ----- 11

I.9.1.a. Turbines éoliennes à axe horizontal ----- 11

I.9.1.b. Turbines Eoliennes à Axe Vertical ----- 12

I.9.2. Selon la technologie ----- 13

I.9.2.a. Système à vitesse fixe – Machine asynchrone à cage : structure MAS ----- 13

I.9.2.b. Systèmes à vitesse variable ----- 14

I.10. Synthèse des différents types d'éoliennes ----- 17

I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne ----- 17

I.11.1. Avantage ----- 17

## Sommaire

---

I.11.2.	Inconvénient -----	18
I.12.	Conclusion -----	19
<b>Chapitre II :</b>		
<b>Modélisation et Simulation du Système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA.</b>		
II.1.	Introduction -----	20
II.2.	Modélisation et simulation de la chaîne de production éolienne-----	20
II.2.1.	Modèle du vent-----	20
II.2.2.	Modèle de la turbine-----	21
II.2.3.	Loi de BETZ -----	21
II.2.4.	Modèle des pales -----	22
II.2.5.	Le coefficient de puissance $C_p$ -----	23
II.2.6.	Modèle du multiplicateur de vitesse -----	24
II.2.7.	Modèle de l'arbre mécanique -----	24
II.3.	Stratégie De Maximisation De Puissance MPPT-----	25
II.3.1.	Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse -----	26
II.3.2.	Simulation et interprétation des résultats-----	27
II.3.3.	Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse -----	27
II.3.4.	Simulation et interprétation des Résultats-----	29
II.4.	Les Systèmes éoliennes utilisant une machine asynchrone à double alimentation: -----	30
II.4.1.	Avantages et inconvénients -----	30
II.4.2.	Description de la MADA -----	30
II.4.3.	Mode de fonctionnement de la MADA -----	31
II.4.4.	Domaine d'applications de MADA -----	32
II.4.5.	Modèle de la machine asynchrone à double alimentation -----	32
II.4.6.	Simulation et interprétation des résultats-----	34
II.5.	Etude de l'ensemble redresseur -onduleur -MADA.-----	35
II.6.	Structure d'alimentation de la MADA par une cascade redresseur-onduleur-----	36

## Sommaire

---

II.6.1.	Contrôle du convertisseur Cote Rotor de la MADA (CCM) -----	36
II.6.2.	Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux -----	37
II.6.2.a.	Calcul des tensions de sortie du CCM -----	37
II.6.2.b.	Calcul du courant d'entrée du CCM -----	38
II.6.2.c.	Elaboration des signaux de commande -----	38
II.6.2.d.	Principe de la MLI -----	39
II.7.	Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation -----	40
II.7.1.	Procédé d'orientation du flux -----	40
II.7.2.	Modèle de la MADA à flux statorique orienté -----	41
II.7.3.	Commande vectorielle Directe -----	44
II.7.4.	Simulation et interprétation des résultats -----	45
II.7.5.	Commande vectorielle indirecte -----	45
II.7.5.a.	Commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance -----	45
II.7.5.b.	Commande vectorielle indirecte avec boucle Commande puissance -----	46
II.7.5.c.	Simulation et interprétation des résultats -----	47
II.8.	Modélisation du redresseur triphasé à MLI -----	47
II.8.1.	Calcul des courants d'entrée du CCR -----	48
II.8.2.	Calcul des tensions d'entrée du CCR -----	49
II.8.3.	Calcul du courant de sortie du CCR -----	50
II.8.4.	Contrôle par hystérésis des courants prélevés -----	50
II.8.5.	Calcul de la tension de sortie du CCR -----	51
II.8.6.	Contrôle de la tension Vdc -----	51
II.8.7.	Simulation et interprétation des résultats -----	52
II.9.	Simulation et interprétation des résultats de la chaîne complète -----	53
II.10.	Conclusion -----	53
 Chapitre III : Commande par glissant de la MADA.  		
III.1.	Introduction -----	55

## Sommaire

---

III.2. Notions d'un système à structure variable -----	55
III.3. Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable -----	55
III.3.1. Conception de la commande par mode de glissement-----	56
III.3.2. Choix de la surface de glissement-----	56
III.3.3. Conditions d'existence et de convergence du régime glissant -----	57
III.3.4. Théorie de la commande-----	58
III.4. Application de la commande à mode glissant à la MADA -----	60
III.4.1. Contrôle De La Puissance Active -----	60
III.4.2. Contrôle de la puissance réactive-----	61
III.4.3. Simulation et interprétation des résultats-----	62
III.5. Commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance -----	62
III.5.1. Surface de régulation du courant direct-----	62
III.5.2. Surface de régulation du courant en quadrature-----	63
III.5.3. Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance-----	64
III.5.4. Simulation et interprétation des résultats-----	65
III.6. Robustesse de la régulation-----	65
III.7. Simulation et interprétation des résultats de la chaine complète-----	67
III.8. Conclusion -----	68
Conclusion générale -----	68
Bibliographie-----	70
Annexe-----	75

## Liste des figures

---

Figure I. 1 : Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours -----	4
Figure I. 2 : Capacité totale installée (MW) et prévision 2006-2020. -----	5
Figure I. 3: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).-----	7
Figure I. 4 : Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10m du sol -----	8
Figure I. 5 : 1 <sup>ère</sup> ferme éolienne en Algérie -----	8
Figure I. 6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent-----	9
Figure I. 7 : L'éolienne à l'intérieur -----	9
Figure I. 8 : Taille des hélices en m et puissances en KW -----	11
Figure I. 9 : Éolienne à axe horizontale. -----	12
Figure I. 10 : Configuration à axe horizontal-----	12
Figure I. 11 : Éoliennes à axe vertical. -----	13
Figure I. 12: Génératrice asynchrone GAS à cage (souvent à deux enroulements statoriques 4 et 6 Pôles avec multiplicateur et connexion directe au réseau). -----	14
Figure I. 13 : Génératrice asynchrone GAS à bague directement connectée au réseau et contrôle électronique de glissement -----	15
Figure I. 14 : Génératrice Synchronne GS à attaque directe à excitation bobinée sans balai ou à aimant -----	16
Figure I. 15 : Génératrice Asynchrone GAS avec multiplicateur à variation de vitesse par le rotor	16
Figure II. 1 : Système de conversion éolienne à basé de la MADA -----	20
Figure II. 2 : Turbine éolienne-----	21
Figure II. 3 : Répartition des vitesses dans le tube de courant-----	21
Figure II. 4 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse -----	23
Figure II. 5 : Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne -----	24
Figure II. 6 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable -----	25
Figure II. 7 : Stratégies de commande de la turbine-----	26
Figure II. 8 : Contrôle MPPT sans Asservissement de la vitesse mécanique-----	27

## Liste des figures

---

Figure II. 9 : Résultat de simulation MPPT sans asservissement de vitesse-----	27
Figure II. 10 : Contrôle MPPT avec Asservissement de la vitesse mécanique-----	28
Figure II. 11 : Résultats du MPPT obtenus avec régulateur PI -----	29
Figure II. 12 : Résultats du MPPT obtenus avec régulateur mode glissant. -----	29
Figure II. 13: Structure de la machine asynchrone à double alimentation. -----	31
Figure II. 14 : Quadrants de fonctionnement de la GADA. -----	31
Figure II. 15 : Comportement de la MADA en boucle ouverte-----	35
Figure II. 16 : Architecture de commande du système éolien -----	36
Figure II. 17 : Schéma de principe de la commande CCM-----	36
Figure II. 18 : Structure d'un onduleur triphasé.-----	37
Figure II. 19 : Elaboration des signaux de commande-----	38
Figure II. 20 : Principe de la MLI triangulé- sinusoïdale. -----	39
Figure II. 21 : Résultat de la commande d'un onduleur MLI. -----	39
Figure II. 22 : Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC -----	40
Figure II. 23 : Schéma bloc de la MADA à réguler -----	44
Figure II. 24 : Commande vectorielle direct de la MADA -----	44
Figure II. 25 : Résultats de la Commande vectorielle Directe -----	45
Figure II. 26: Commande Indirecte sans boucles de puissance-----	46
Figure II. 27 : Commande indirecte avec boucle de puissance -----	46
Figure II. 28 : Résultats de la Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance -----	47
Figure II. 29 : Structure du contrôle par hystérésis des courants absorbés par redresseur à MLI ---	48
Figure II. 30 : principe de contrôle du courant par hystérésis -----	50
Figure II. 31 : Contrôle du bus continu -----	51
Figure II. 32 : Résultats de la Commande du convertisseur coté réseau et le Bus continu -----	52
Figure II. 33 : Résultats de la chaîne complète par la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance -----	53

## Liste des figures

---

Figure III. 1 : Modes de fonctionnement dans le plan de phase .....	56
Figure III. 2 : Fonction sign (non linéarité tout ou rien).....	59
Figure III. 3 : Commande vectorielle directe par mode glissant.....	61
Figure III. 4 : Résultats de la Commande vectorielle Directe par mode glissant. ....	62
Figure III. 5 : Schéma bloc de la commande a mode glissant en courants appliquée à la DFIG.....	64
Figure III. 6 : Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance .....	64
Figure III. 7 : Résultat de simulation de la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance .....	65
Figure III. 8 : test de robustesse de la commande vectorielle directe et indirecte avec boucle de puissance avec mode glissant.....	66
Figure III. 9 : test de robustesse de la commande vectorielle directe et indirecte avec boucle de puissance avec mode glissant.....	66
Figure III. 10 : résultats de la chaine complète .....	67

## Liste des tableau

---

Tableau I. 1 : Les puissances éoliennes totales installées dans les 10 premiers pays en 2013 .....	6
Tableau I. 2 : Comparatif Vitesse fixe et variable . .....	13
Tableau I. 3 : Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes .....	17
Tableau II. 1 : valeurs des 6 coefficients C1 à C6 de la turbine. -----	23
Tableau II. 2 : Avantages et inconvénients des machines asynchrone à double alimentation.-----	30

## *Introduction générale*

---

Dans le monde entier, le problème qui se pose quotidiennement est de répondre à la demande d'énergie qui augmente sans cesse. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés, l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé et la multiplication des appareils domestiques électriques conduisent à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Face à cette demande en augmentation, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires, source d'énergie qui présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets restent des problèmes réels qui rendent cette source d'énergie peu attractive pour les futures générations; sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières et son installation coûte chère et peut être dangereuse au niveau écologique.

Face à ces problèmes, et afin de limiter l'emploi de centrales nucléaires, ainsi que pour minimiser l'émission du CO<sub>2</sub> par les centrales thermiques, plusieurs pays, aidés par la déréglementation, se sont dirigés vers de nouvelles formes d'énergie dites « renouvelables » renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent [2],[3].

En Algérie, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social.

Le potentiel techniquement exploitable en énergies renouvelables dans notre pays est considérable et la qualité des gisements est telle que des investissements rentables peuvent être envisagés pour leur développement. Ainsi, trois raisons principales plaident en faveur d'un développement de ces énergies renouvelables :

- ❖ Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées, notamment dans les régions du Grand Sud;
- ❖ Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles ;
- ❖ La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut avoir que des retombées positives en matière d'équilibre régional et création d'emplois [4].

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 grâce à ses avantages relativement meilleurs 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. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant à chaque fois le point de fonctionnement à maximum de puissance [1].

Dans ce cadre, le présent mémoire de Master effectué au sein du **laboratoire de Génie Electrique et Des Plasmas LGEP** (Université Ibn Khaldoun -Tiaret) de thème : **Commande par mode glissant d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation** est structuré de la manière suivante :

Premier chapitre : Présentation de généralités sur le système éolien. On donne un aperçu sur les différents types d'éoliennes (axe vertical et horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation et de protection, ainsi que les différents types de génératrices et convertisseurs qui leur sont associés.

Deuxième chapitre : Porte sur la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne, basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation et pilotée par le rotor via des convertisseurs bidirectionnels à deux niveaux contrôlés par MLI, ainsi qu'une modélisation de la turbine éolienne, de l'onduleur et du redresseur.

Troisième chapitre : présente la commande par mode glissement de la DFIG. Nous présentons en premier lieu un rappel théorique sur la commande par mode glissant des systèmes à structure variable basée sur la DFIG. Nous abordons ensuite la conception de l'algorithme de commande avec ses différentes étapes.

## I.1. Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, l'éolienne détient un peu le rôle de vedette de ces énergies renouvelables. Cela est dû sans doute à son dynamisme et à sa croissance très forte, du fait qu'elle touche un secteur sensible, la production d'électricité, qui est par ailleurs en pleine mutation structurelle [5],[6].

Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [7].

En Algérie le premier pas a été fait par le groupe *Sonelgaz*, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français *Vergnet*. L'énergie produite par cette ferme, qui était opérationnelle en 2012, sera injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar [6],[8].

On s'intéresse, dans ce chapitre à l'énergie éolienne, les principales notions sur cette technologie, les différents composants constituant l'aérogénérateur, ainsi que l'étude des différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne. En dernier lieu on aborde brièvement les avantages et les inconvénients de cette énergie.

## I.2. Contexte historique:

Très tôt, dans l'histoire des techniques, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique pour : la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), les moulins (à céréales, olives...), le pompage ou, au Moyen Age pour l'industrie (forges...). La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, cependant il faut disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs.

A l'exception des régions plates, où l'énergie hydraulique s'est souvent révélée plus intéressante, ce qui explique la dominance de l'hydroélectricité. En outre l'eau s'accumule facilement dans des réservoirs et permet de stocker de l'énergie. Vers la moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, il y avait environ 200 000 moulins à vent en Europe. C'est principalement l'arrivée des machines à vapeur industrielles qui a initié leur déclin.

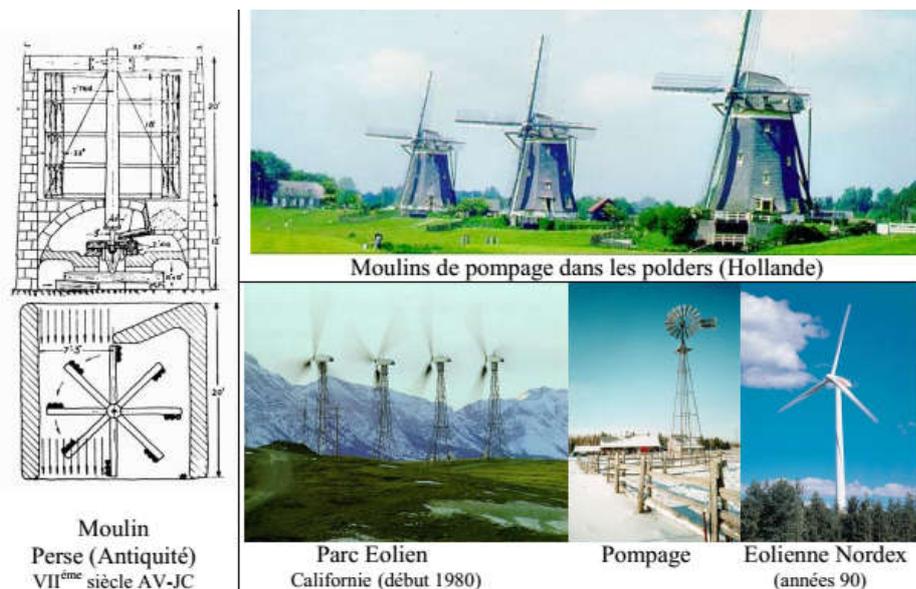


Figure I.1 : Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours

Ce n'est qu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, lorsque l'électricité pris son essor, que L'aérogénérateur électrique fit ses premiers pas. Au Danemark, *Poul La Cour* fut, sans doute, le pionnier, il a associé en 1891, une turbine éolienne à une dynamo. En France, contrairement à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920 (éolienne bipale de 20m de diamètre, compagnie CEM) puis dans les années 1950-60 (tripale de 30m et génératrice synchrone de 800 KW à Nogent le Roi, bipale de 35m et génératrice asynchrone de 1 MW à Saint Rémy des Landes). En 1941, une éolienne bipale de 1250 KW (machine synchrone) était expérimentée aux USA dans le Vermont. En 1978, les Danois, réalisèrent une machine tripale de 54m pour une puissance de 2 MW. Les nombreuses réalisations expérimentales (notamment en Californie) et leurs avatars permirent de perfectionner les turbines, les systèmes de freinage d'urgence, les pilonnes et les divers dispositifs de contrôles et d'obtenir des aérogénérateurs viables et compétitifs à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle. Diverses solutions de turbines furent explorées, notamment celles à axe vertical, connue sous le nom de Darrius (leur inventeur), mais ne subsistent aujourd'hui pratiquement que les machines à axe horizontal à 2 ou 3 pales.

C'est principalement la crise pétrolière de 1973 qui relança les études et expériences, à plus grande échelle. L'expérience californienne a été la première à grande échelle (le « Wind-rush ») au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 KW) et ce grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386 MW) en 1985. Mais ce n'est que vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollé en Europe et dans le reste aux USA en Asie et en Afrique du Nord. Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100 W à quelques 10 KW sont commercialisées depuis plus longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes

hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé) [6].

**I.3. Définition de l'énergie éolienne :**

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable (non dégradée), géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en Hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs Mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [8].

**I.4. Situation actuelle d'énergie éolienne dans le monde :**

L'énergie éolienne pourrait fournir un cinquième de l'électricité mondiale dans vingt ans. Le marché mondial a connu pour cette énergie, une croissance de 41.7% en 2009 et une hausse moyenne de 28.6% par ans au cours des treize dernières années (selon *Steve Sawyer*, secrétaire général du GWEC « Global Energy Wind Council »).

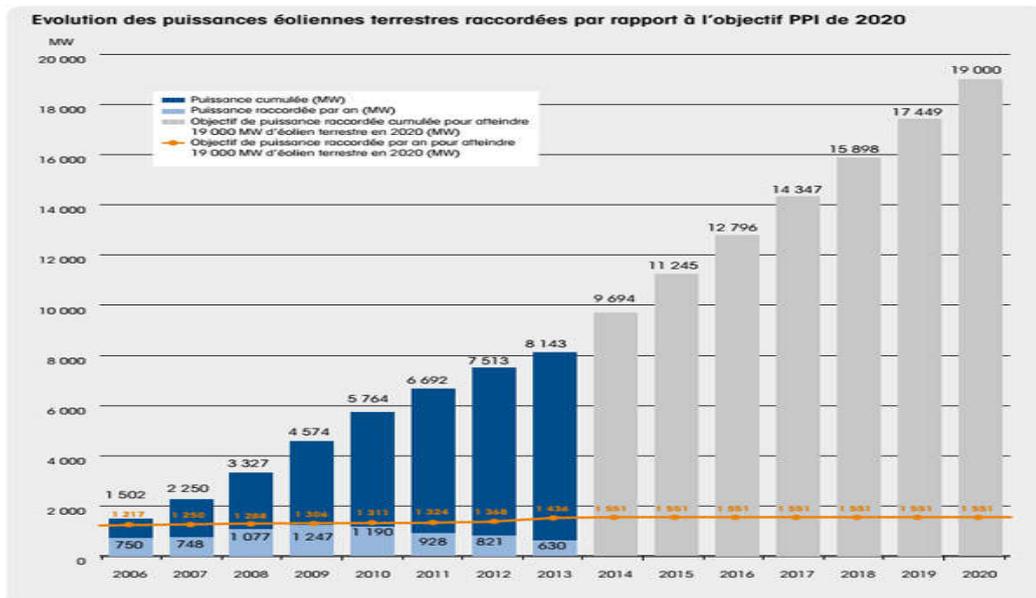


Figure I. 2 : Capacité totale installée (MW) et prévision 2006-2020.

Dans un scénario optimiste, la capacité totale des éoliennes installées en 2020 serait de 19000 Mégawatts/heure (MW/h), soit entre 11.5% et 12.3% de la demande mondiale en électricité (figure I.2). En 2030, cette forme d'énergie pourrait produire 54000 TW/h, entre 18.8% et 21.8% de la demande mondiale, selon le rapport. Un autre scénario, plus conservateur, basé sur des projections de l'Agence internationale de l'énergie de l'ONU, table sur 4.8% de l'électricité mondiale produite par l'éolien en 2020, correspondant à un triplement par rapport à la production actuelle. En fin, un

scénario médian prévoit que l'énergie éolienne fournira 9.5% de l'électricité produite dans le monde à la fin de la prochaine décennie.

La puissance éolienne installée dans le monde devrait être multipliée par 3 pour atteindre 910 GW en 2025 et le marché mondial de l'éolien devrait, pour sa part, plus que doubler au cours de cette période, passant de 21 à 47 milliards d'euros. Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service dans le champ d'éoliennes qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence, mais à des rythmes différents selon les pays et classer les états par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont les pays occidentaux (USA et Europe), mais l'Asie, avec la Chine commence à tenir un rang important.

Tableau I. 1 : Les puissances éoliennes totales installées dans les 10 premiers pays en 2013

Country	MW	% SHARE
**PR China	16,100	45.4
Germany	3,238	9.1
UK	1,883	5.3
India	1,729	4.9
Canada	1,599	4.5
USA	1,084	3.1
*Brazil	948	2.7
Poland	894	2.5
Sweden	724	2.0
Romania	695	2.0
Rest of the world	6,573	18.5
<b>Total TOP 10</b>	<b>28,894</b>	<b>81</b>
<b>World Total</b>	<b>35,467</b>	<b>100.0</b>

En 2013, la région Europe –Moyen–Orient domine le marché éolien en détenant 40% du marché mondial. Mais alors que la Chine investit des milliards d'euros dans l'énergie éolienne, plusieurs gouvernements européens ont décidé de réduire les subventions accordées à l'électricité éolienne. Ces décisions pourraient ralentir le marché de l'éolien sur le Vieux continent, qui ne devrait plus représenter que 34% du marché mondial en 2030.

Selon le rapport du cabinet de conseil Global Data, le marché mondial de l'éolien **marin**, lui, va continuer sa croissance et pourrait être multiplié par dix d'ici la fin de la décennie, passant de 5 gigawatts de puissance installée à 55 GW.

En Afrique du Nord, le développement de la puissance éolienne continue en Egypte, Maroc et Tunisie avec respectivement 55 MW, 10 MW et 34 MW de nouvelles capacités installées [8].

### I.5. Situation actuelle d'énergie éolienne en Algérie :

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à l'autre, ce qui est dû principalement, à la diversité de la topographie et du climat. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen qui est caractérisé par un littoral de 1200km et un relief important, représenté par deux grandes chaînes de montagnes : l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. Le Sud Algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le Nord, surtout du côté Sud-ouest où les vitesses sont supérieures à 4m/s, et dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque que la vitesse moyenne est globalement peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au Sud [9],[6].

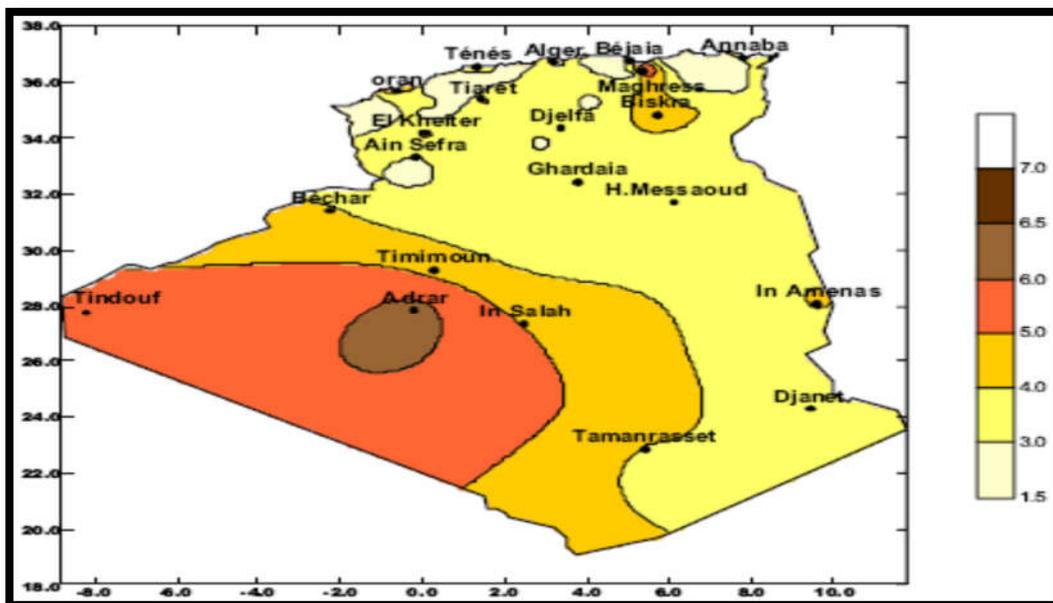


Figure I. 3: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons ce qui ne faut pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures I.4 (Été, Printemps, Hiver et Automne). On remarque en général, que les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année.

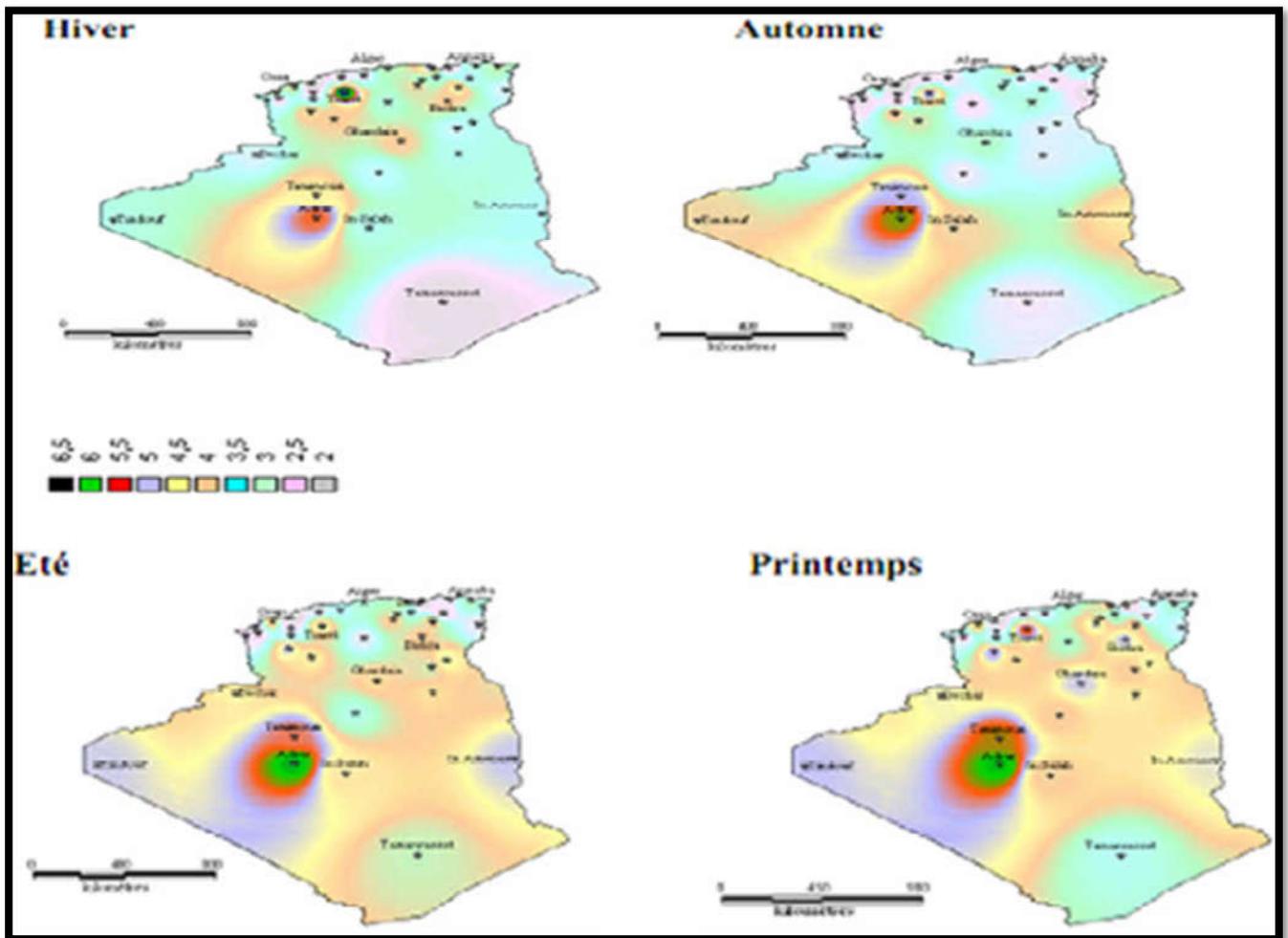


Figure I. 4 : Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10m du sol [9],[10].

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (Sud-Ouest), a été confiée le 21/01/2010 au groupe Français *VERGNET*. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ [11].



Figure I. 5 : 1ère ferme éolienne en Algérie [12].

**I.6.Principe de base de l'éolien :**

Le système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes.

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré dans la figure I.6. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques et automatiques [4].

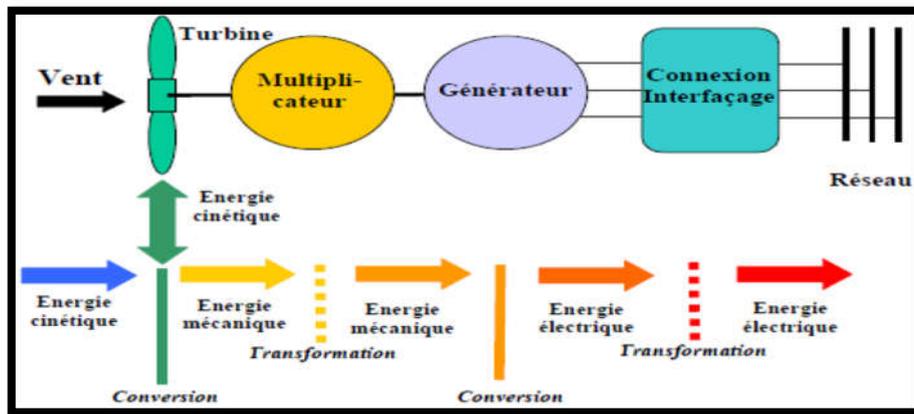


Figure I. 6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

**I.7.Principaux composants d'une éolienne:**

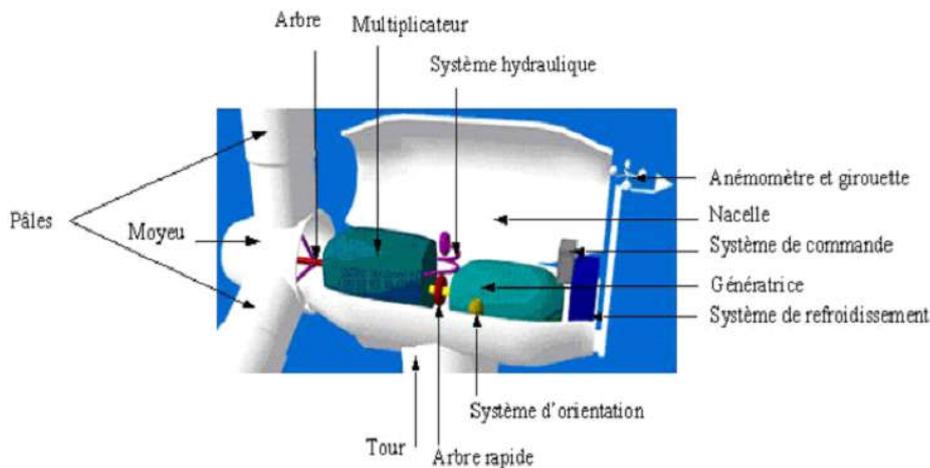


Figure I. 7 : L'éolienne à l'intérieur [6],[13].

Un mât, ou tour, supporte la nacelle et la turbine. 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. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle partiellement insonorisée avec une armature métallique, accueille la génératrice et son système de refroidissement, le multiplicateur de vitesse et

différents équipements électroniques de contrôle qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent supportant la turbine et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque, auquel est accouplé le générateur. Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement à huile.

La turbine possède trois pales qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette 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 [14], [15].

On peut classer les éoliennes selon leurs puissances nominales, ou chaque type a sa propre utilisation :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 KW. Elles sont utilisées hors réseau dans des sites non interconnectés, soit pour chargement de batteries soit pour pompage d'eau.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW, elles sont utilisées dans des réseaux isolés, avec des systèmes hybrides éolien-diesel pour réduire les coûts des productions dans les régions éloignées.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1MW. Elles sont connectées au réseau central qui peut être constitué de plusieurs machines [16].

### **I.8. Taille des aérogénérateurs:**

Les chercheurs ont eu l'idée que pour exploiter le mieux possible la force du vent, il faut que l'hélice balaie la surface où le vent est maximum, c'est-à-dire le plus haut possible du sol, ce qui demande aux constructeurs des hélices hautes perchées, donc de grands diamètres [17][18].

Plus le diamètre du rotor sera grand, plus la puissance récupérable sera importante pour un vent donné. Actuellement la gamme des éoliennes disponible sur le marché des éoliennes est très large, de 50 Watt (diamètre de 90Cm) à 5 MW et plus (+ de 124 m de diamètre). Les perspectives de l'avenir sont représentées dans la figure I.8.

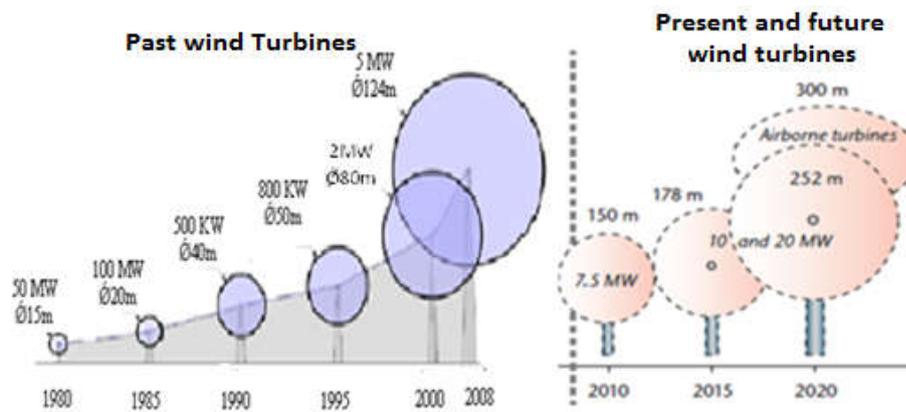


Figure I. 8 : Taille des hélices en m et puissances en KW [4].

## I.9. Différent types d'éoliennes:

La classification des éoliennes peut se faire selon d'autres critères qui influencent beaucoup le procédé de conversion et qui aboutissent à des éoliennes totalement différentes que ce soit au niveau de la conception mécanique (axe horizontal ou vertical) ou leur technologie (vitesse fixe ou variable) pour la connexion au réseau [2], [18].

### I.9.1. Selon la conception mécanique :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal. Bien qu'il existe des turbines à axe vertical (Darrieus, Savonius...), les machines à axe horizontal dominent très largement le marché de petites puissances (quelques W aux plus élevées, quelques MW).

#### I.9.1.a. Turbines éoliennes à axe horizontal :

Une turbine à axe de rotation 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 une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal. Ce choix présente 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, le démarrage de façon autonome et le faible encombrement au niveau du sol. Toutefois, la boîte de vitesses 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. Selon son nombre de pales, une HAWT est dite mono-pale, bipale tripale ou multi-pale [19].



Figure I. 9 : Éolienne à axe horizontale.

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ».

✚ **Amont** : Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

✚ **Aval** : Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction [20].

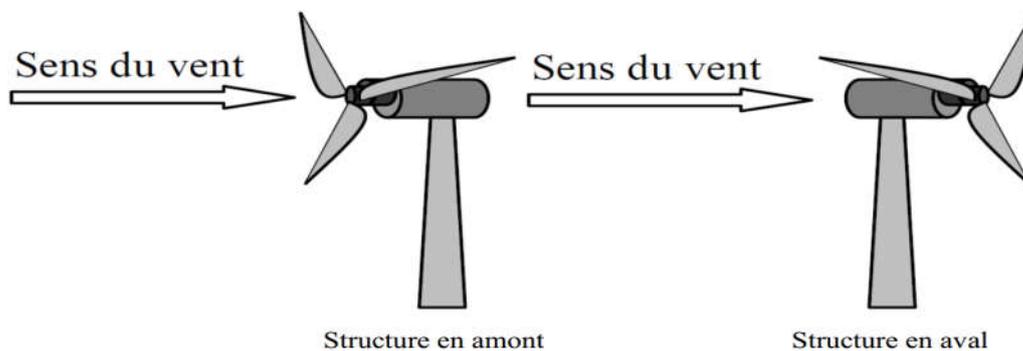


Figure I. 10 : Configuration à axe horizontal [21].

### I.9.1.b. Turbines Eoliennes à Axe Vertical :

L'axe de rotation d'une VAWT est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée dans la

mesure où elle se fait au sol. Ces turbines ne disposent pas de commande d'angle de pale comme certaines HAWT. L'inconvénient, pour certaines VAWT, est la nécessité d'un dispositif auxiliaire de démarrage [19].

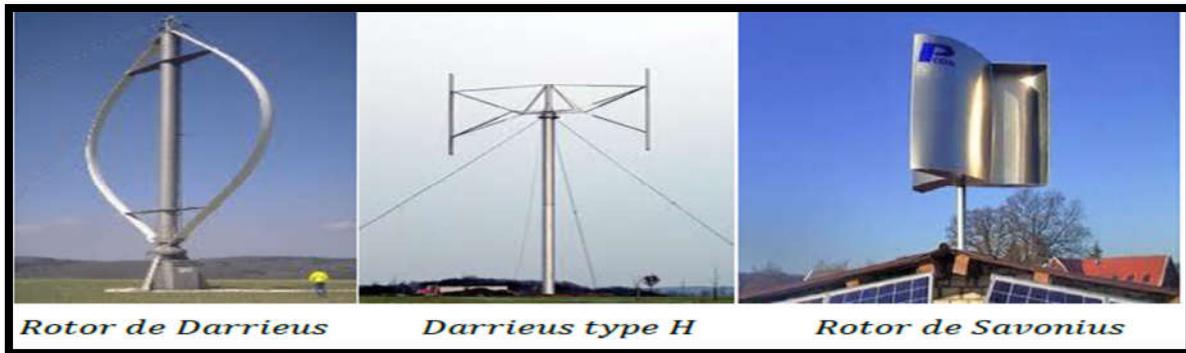


Figure I. 11 : Éoliennes à axe vertical.

**I.9.2. Selon la technologie :**

Il s'agit de différents types de machines électriques utilisées. On distingue deux grandes familles: les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

Le Tableau I.2 illustre un comparatif simple entre les différents fonctionnements.

Tableau I. 2 : Comparatif Vitesse fixe et variable [22].

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
Simplicité du système électrique Plus grande fiabilité Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne. Moins cher. Fonctionnement a vitesse variable (±30% de la vitesse nominale)	Augmentation du rendement énergétique Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance. Réduction des efforts subis par le train de puissance. Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

**I.9.2.a. Système à vitesse fixe – Machine asynchrone à cage : structure MAS**

Nous avons vu précédemment que la méthode de contrôle de puissance la plus simple au niveau de la turbine est le décrochage passif, qui nécessite pour bien agir une vitesse de rotation constante. Des systèmes éoliens se caractérisant par une vitesse de rotation pratiquement constante, indépendamment de la vitesse du vent, ont donc été développés [15][23]. Ils mettent en œuvre essentiellement des générateurs asynchrones tournant en hyper synchronisme à la vitesse  $\omega_{sync}(1-g)$ , où  $g$  est le glissement de la machine ( $g < 0$  dans ce cas). La variation reste très faible, puisque le glissement nominal d'une génératrice asynchrone de 1.5 MW est de l'ordre de 1%. Pour des raisons d'encombrement et de prix de revient, la machine, standard, est le plus souvent

dimensionnée pour une vitesse nominale de 1500 tours/min, ce qui impose la présence d'un multiplicateur de vitesse avec un rapport élevé de 30 à 100 environ suivant les puissances.

On qualifie également de systèmes éoliens à vitesse fixe, les systèmes comportant une machine asynchrone à deux enroulements statoriques avec un nombre de pôles différents (généralement 4 et 6), l'un étant utilisé pour les faibles vitesses de vent (faible puissance) et l'autre pour les plus fortes vitesses de vent (forte puissance). C'est le cas pour les constructeurs danois NEG MICON, BONUS et NORDEX [15].

#### ➤ Structure du système :

Cette structure est communément appelée le concept danois. Elle est simple et robuste.

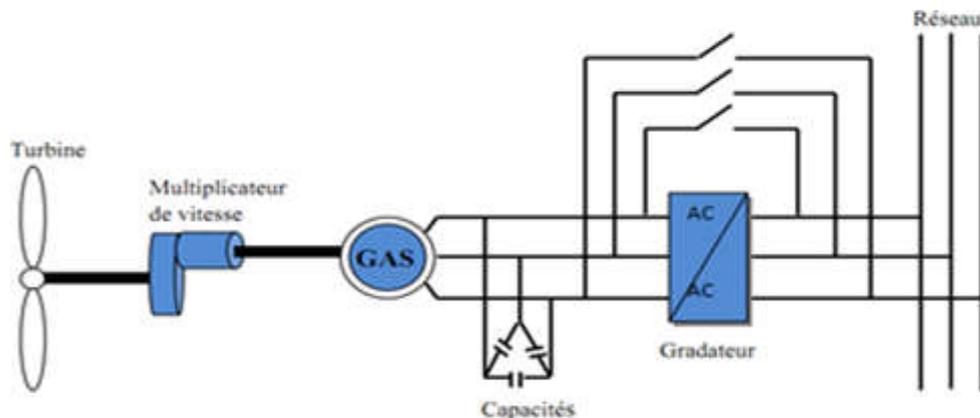


Figure I. 12: Génératrice asynchrone GAS à cage (souvent à deux enroulements statoriques 4 et 6 Pôles avec multiplicateur et connexion directe au réseau). [4]

On peut noter la présence du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice et celle éventuelle d'un système de contrôle de l'angle de calage des pales. On note également la présence d'un convertisseur qui est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine ce qui détériore le facteur de puissance globale du réseau utilisé ici de façon temporaire pour le couplage et non l'interfaçage de la génératrice [15].

#### I.9.2.b. Systèmes à vitesse variable :

Des systèmes éoliens, à vitesse de rotation variable, vont permettre d'optimiser les conditions de fonctionnement de la turbine.

Trois structures différentes sont proposées :

✚ La première est l'utilisation d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance permettant le fonctionnement à vitesse variable ;

✚ La deuxième utilise une machine synchrone à rotor bobiné ou à aimant ;

✚ La troisième est l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation pilotée au rotor par un convertisseur électronique [18].

### 1) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à cage :

La figure I.13 montre la structure concernée.

Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable, sans limite physique théorique. 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 [2][18].

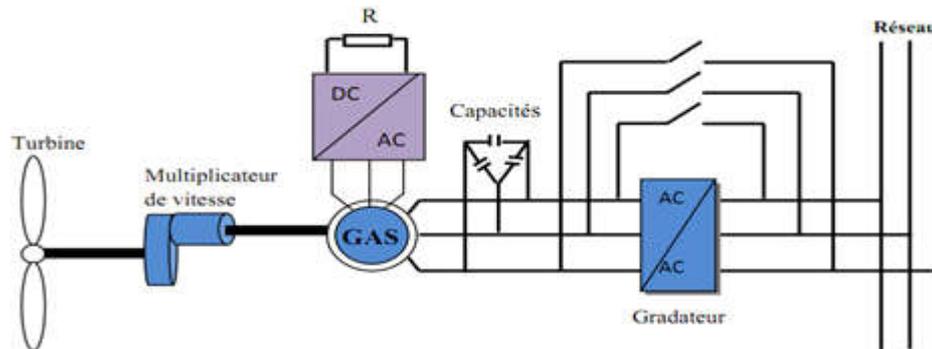


Figure I. 13 : Génératrice asynchrone GAS à bague directement connectée au réseau et contrôle électronique de glissement [4].

De plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des variations de tension importantes, qui peuvent réduire leur durée de vie [2], [15]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.

### 2) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone :

Les éoliennes basées sur une génératrice synchrone, représentent une alternative significative aux génératrices asynchrones à rotor bobiné nécessitant des bagues et des balais, ainsi des multiplicateurs surtout dans les projets offshore qui induisent un coût élevé de maintenance.

Elles sont développées en utilisant des machines à aimant à grand nombre de paires de pôles couplées directement à la turbine, éliminant à la fois le système de bagues, de balais et le multiplicateur, pièce mécanique complexe entraînant des pertes et des pannes fréquentes.

Leurs inconvénients se résument du fait que l'augmentation du nombre de pôles implique une machine de très grand diamètre représentant un barrage important pour l'écoulement du vent. Ainsi le coût de l'interface électronique est important du fait qu'elle est dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice (Figure I.14).

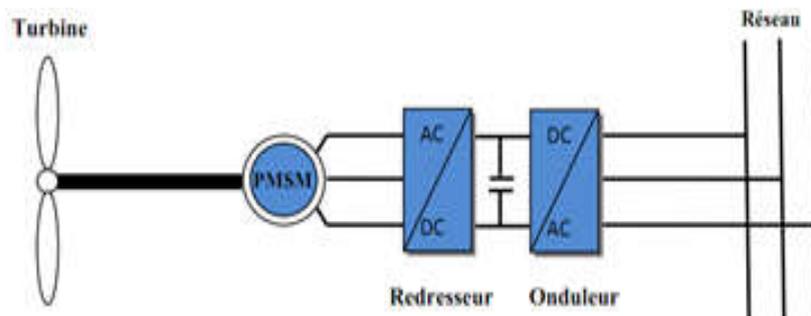


Figure I. 14 : Génératrice Synchrone GS à attaque directe à excitation bobinée sans balai ou à aimant [4].

### 3) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation :

C'est une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes.

La structure (Figure I.15) dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur électronique fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor[24].

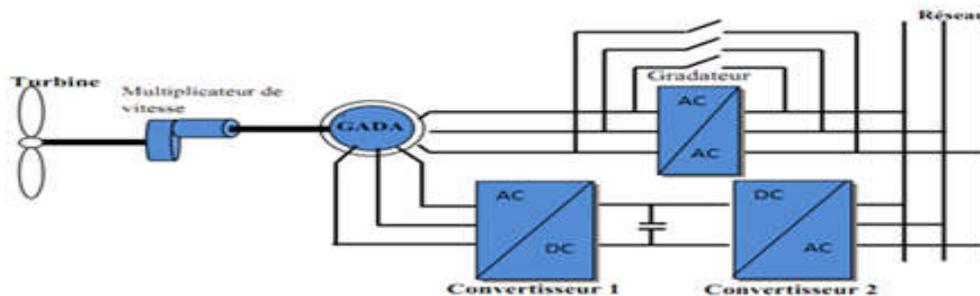


Figure I. 15 : Génératrice Asynchrone GAS avec multiplicateur à variation de vitesse par le rotor [4].

On peut citer parmi les avantages de ce système :

- Sa capacité de commander la puissance réactive, et de cette façon de découpler la commande des puissances active et réactive ;
- Il peut se magnétiser à partir du rotor, sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire ;
- Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension ;
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.[6]

### I.10. Synthèse des différents types d'éoliennes :

Nous résumons dans le tableau I-3 les avantages et les inconvénients de chaque type

Tableau I. 3 : Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes [25].

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse Fixe	Machine standard Robuste Faible coût Pas d'EP pour l'interfaçage	Puissance extraite non optimisée Maintenance boîte de vitesse Pas de gestion de l'énergie réactive par générateur Magnétisation de la machine non gérée
GADA Vitesse Variable	Fonctionnement à vitesse variable Puissance extraite optimisée Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale Machine standard Connexion de la machine plus facile à gérer Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau	Maintenance boîte de vitesse Prix de l'électronique de puissance. Contrôle – commande complexe Contact glissant bagues – Balais
MSAP Vitesse Variable	Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. Connexion de la machine facile à gérer Possibilité d'absence de boîte de vitesse	Prix de l'électronique de puissance Machine spécifique Grand diamètre de machine Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

### I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne : [26],[27],[6],[7]

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 désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

#### I.11.1. Avantage :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;

- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du Co2 ;
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique ;
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace ;
- 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 entre les énergies renouvelables ;
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle ;
- 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 en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales ;
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles ;
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà ;
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation (en hiver par exemple).

#### **I.11.2. Inconvénient :**

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux ;
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés ;

- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs ;
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent 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 ;
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en Cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire ;
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne ;
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontrée la réalité du danger pour les oiseaux ;
- 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. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

### **I.12. Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons présenté une brève description du domaine des énergies renouvelables en se basant sur la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes.

Ensuit un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement.

Enfin nous avons présenté les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien que ce soit les machines asynchrones à cage ou à rotor bobiné et les machines synchrones à rotor bobiné ou à aimants permanents.

## II.1. Introduction

Aujourd'hui, les systèmes de génération d'énergie éolienne d'une puissance moyenne utilisent presque exclusivement les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Celles-ci présentent des avantages déterminants pour la production électrique dans le marché des turbines éoliennes de grande puissance. Le système de conversion éolienne à base de la MADA (figure II.1) est constitué d'une turbine éolienne, d'une génératrice asynchrone à double alimentation, d'un bus continu, de deux convertisseurs statiques de puissance et d'un filtre triphasé de courant.

La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique, tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu. La présentation des modèles dynamiques des sous-ensembles du système éolien ainsi constitué, fera l'objet de ce deuxième chapitre. Les outils d'analyse adoptés à cet effet, à savoir le schéma bloc, y seront également abordés.

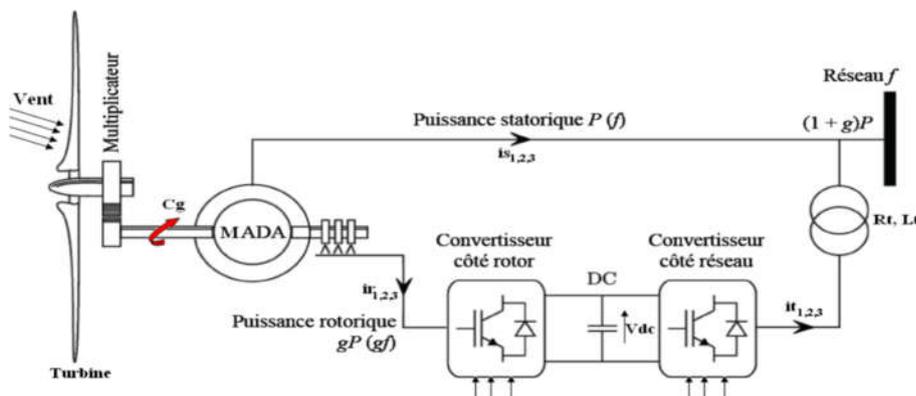


Figure II. 1 : Système de conversion éolienne à basé de la MADA [28].

## II.2. Modélisation et simulation de la chaîne de production éolienne

Dans cette partie, nous nous intéressons à un système de conversion éolienne à base de la MADA. Nous modéliserons premièrement la turbine éolienne, ensuite la machine asynchrone à double alimentation, l'onduleur de tension à commande MLI et le redresseur.

### II.2.1. Modèle du vent

Le vent est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc pour la rentabilité. 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.

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [29], [30], [6]:

$$V_{vent}(t) = 6 + 0.2 \sin(0.1047.t) + 2 \sin(0.2665.t) + \sin(1.2930.t) + 0.2 \sin(3.6645.t) \quad (II.1)$$

### II.2.2. Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne de 10 KW munie de pales de longueur R=3m entrainant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G=5.4.[28]

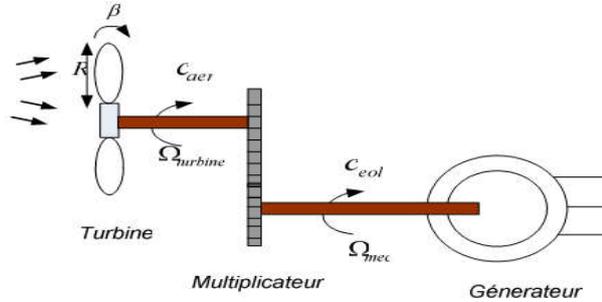


Figure II. 2 : Turbine éolienne.

### II.2.3. Loi de BETZ [2],[30],[4],[31],[32],[13],[33]

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active S de la voilure.



Figure II. 3 : Répartition des vitesses dans le tube de courant.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure II-3 sur lequel on a représenté la vitesse du V<sub>1</sub> en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V<sub>2</sub> en aval en supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V<sub>1</sub> et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V<sub>2</sub> soit

$$\frac{V_1 + V_2}{2} \quad (II.2)$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (II.3)$$

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).

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (II.4)$$

Soit en remplaçant m par son expression :

$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (II.5)$$

Le vent théorique non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (II.6)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible et alors:

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (II.7)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ratio  $\frac{P_m}{P_{mt}}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $\frac{16}{27}$  soit 0.59; c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

#### II.2.4. Modèle des pales

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (II.8)$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (II.9)$$

Son Couple aérodynamique  $C_{aéro}$  est donné par l'expression suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (II.10)$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V} \tag{II.11}$$

**II.2.5. Le coefficient de puissance Cp**

Le coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. La modélisation du couple éolien va donc dépendre essentiellement de la prise en compte de la spécificité du coefficient  $C_p(\lambda, \beta)$ , puisqu'il dépend grandement du type et de la caractéristique de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse  $\lambda$  et l'angle d'orientation de pale  $\beta$ ). Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature, ou par des constructeurs de turbines éoliennes.

L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left( C_2 \cdot \frac{1}{\lambda i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda i}} + C_6 \cdot \lambda \tag{II.12}$$

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Tableau II. 1 : valeurs des 6 coefficients C1 à C6 de la turbine.

Coefficient	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Valeur	0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

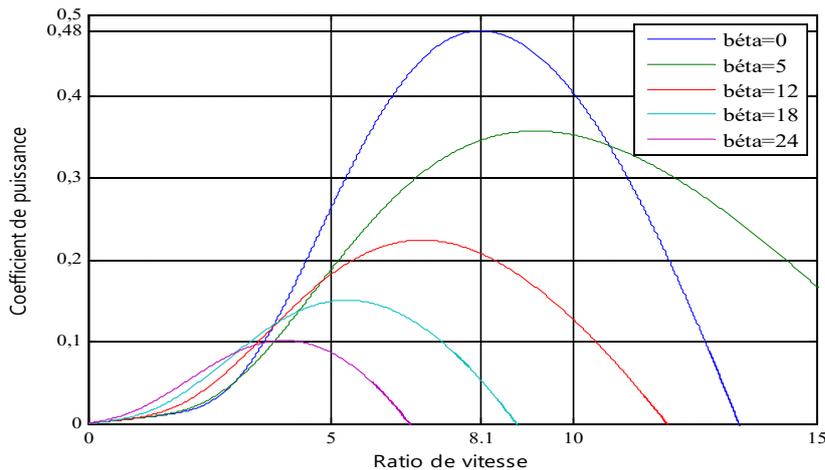


Figure II. 4 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse

A l'aide de la Figure (II.4), nous pouvons remarquer que l'augmentation de l'angle d'orientation de pales permet de diminuer le coefficient  $C_p$ . Le point optimal est défini par

$\beta = 0, \lambda_{opt} = 8.1, C_{p_{max}} = 0.48$ . C'est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance  $C_{p_{max}}$  et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

### II.2.6. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_t$ , assez lente, à celle que nécessite la génératrice  $\Omega$ . Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.13)$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.14)$$

### II.2.7. Modèle de l'arbre mécanique

Ainsi, l'équation mécanique de ce modèle, ramenée sur l'arbre du générateur, se simplifie sous la forme suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.15)$$

Avec :

$$f = \frac{f_{turbine}}{G^2} + f_g \quad (II.16)$$

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g$$

Basée sur les équations présentées précédemment, la figure (II.5) peut définir un modèle physique de la turbine ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice. L'ensemble des modèles de la turbine (pales, multiplicateur de vitesse et arbre mécanique) ont été simulés sous un logiciel MATLAB/Simulink.[6],[34],[28],[8].

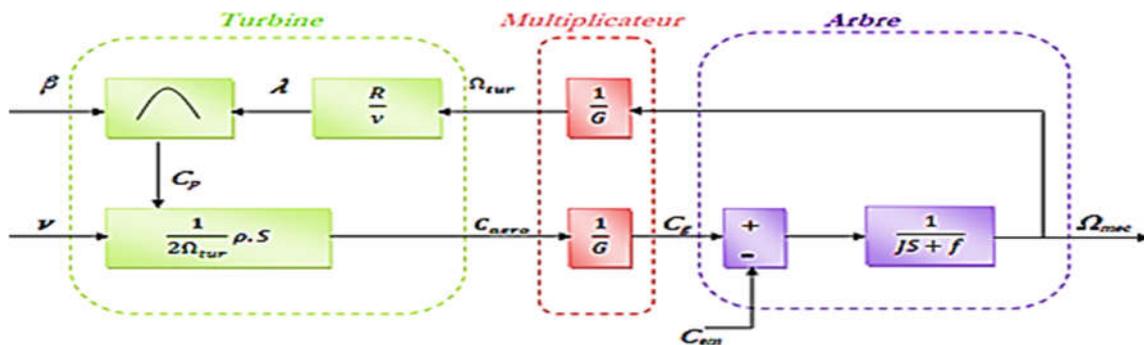


Figure II. 5 : Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne

### II.3. Stratégie De Maximisation De Puissance MPPT

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, telle qu'illustré sur la Figure II.6 [2],[35] :

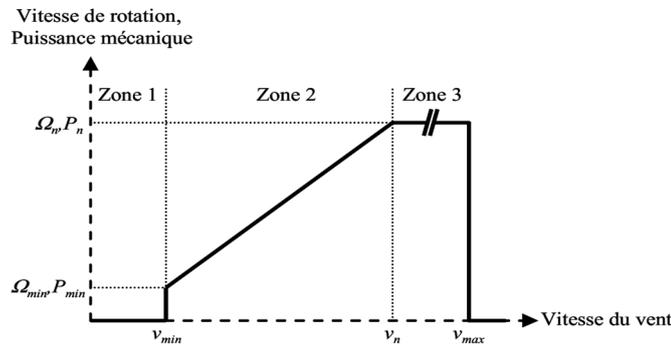


Figure II. 6 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

- Zone 1 : La vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne, à cet effet la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro,
- Zone 2 : Le vent atteint une vitesse minimale  $V_{min}$  pour permettre le démarrage. Une fois le démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_n$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_n$
- Zone 3 : Le vent atteint des vitesses élevées, supérieures à la vitesse nominale et la vitesse de rotation ainsi que la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de L'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales  $\beta$ ). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale  $V_{max}$ , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, la valeur maximale de  $C_{P_{max}} = 0.48$  est atteinte pour  $\beta = 0$  et  $\lambda = 8.1$  figure (II.4). Cette valeur particulière de  $\lambda$  est définie comme étant la valeur nominale  $\lambda_{nom}$ .

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle [31],[35]:

- ✓ Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.
- ✓ Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.

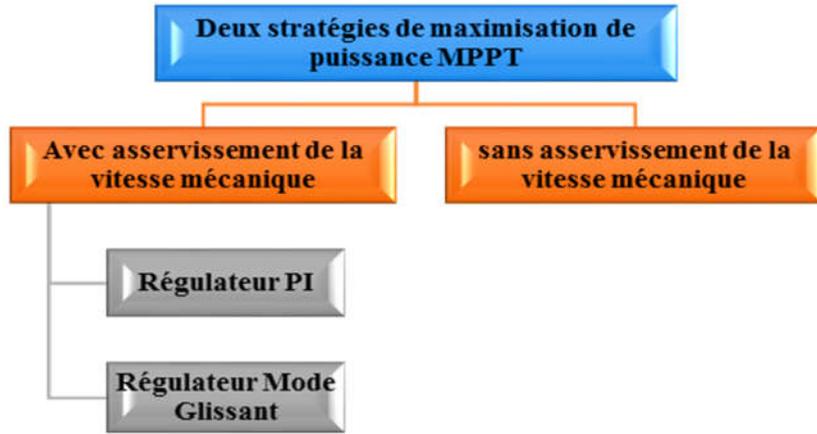


Figure II. 7 : Stratégies de commande de la turbine

### II.3.1. Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Le principe de cette stratégie consiste à supposer que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Ce qui revient à négliger l'effet du couple des frottements visqueux  $C_{vis}$  ( $C_{em} = 0$ ). Dans ces conditions, on aura :

$$C_{em} = C_{turbine} \quad (II.17)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir du couple éolien estimé, tel que :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{t-est}}{G} \quad (II.18)$$

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

$$C_{t-est} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \Omega_{t-est}} \quad (II.19)$$

La vitesse estimée de la turbine est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.20)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue par :

$$V_{est} = \frac{R \cdot \Omega_{t-est}}{\lambda} \quad (II.21)$$

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

$$C_{em-ref} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2}{2 \cdot \lambda^2 \cdot G^2} \quad (II.22)$$

Le couple électromagnétique doit être réglé à la valeur du couple de référence suivant :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p_{max}} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2}{2 \cdot \lambda_{opt}^2 \cdot G^2} \quad (II.23)$$

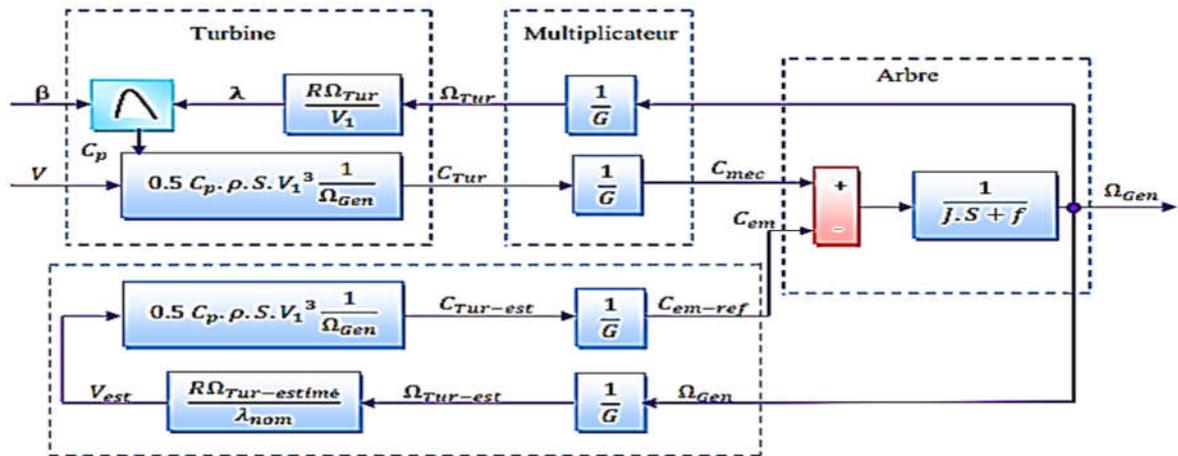


Figure II. 8 : Contrôle MPPT sans Asservissement de la vitesse mécanique.

### II.3.2. Simulation et interprétation des résultats

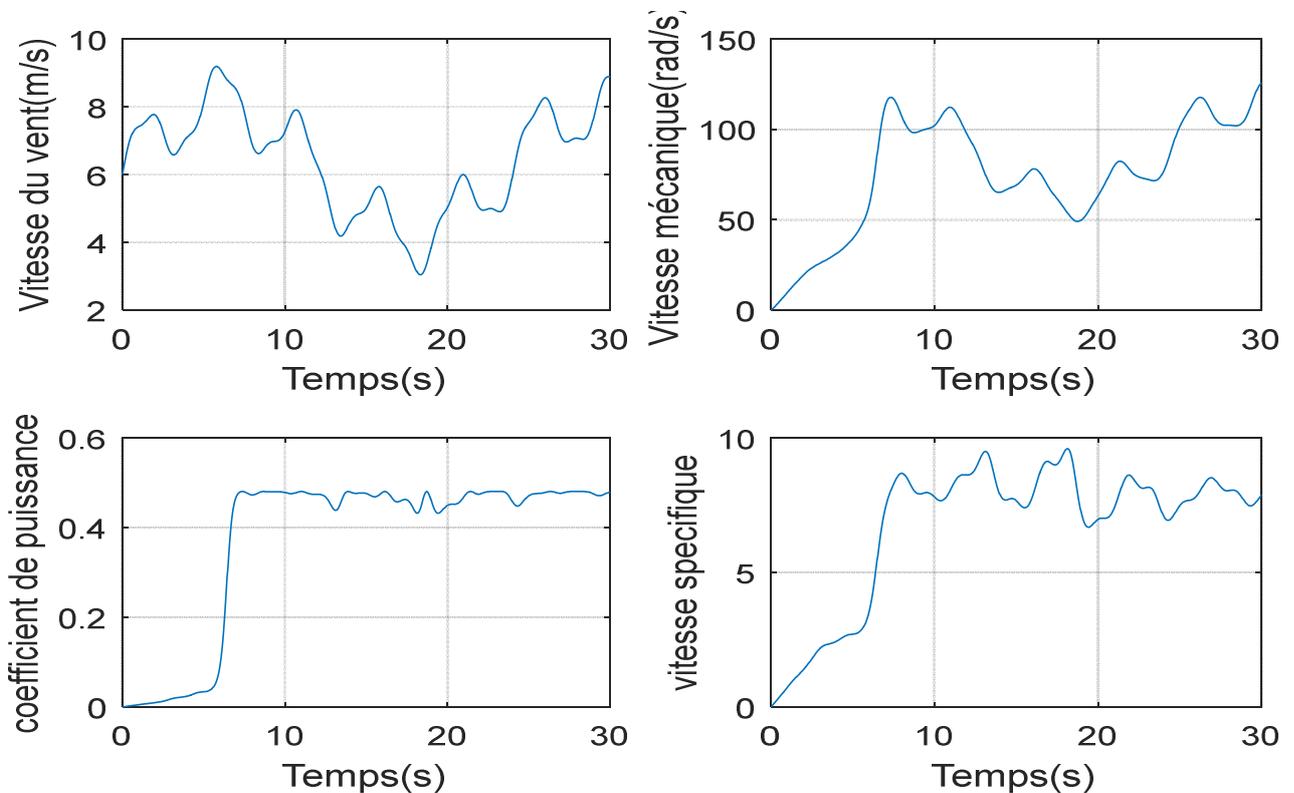


Figure II. 9 : Résultat de simulation MPPT sans asservissement de vitesse

Les résultats de simulation correspondant à cet algorithme de commande montrent que les variations de vitesse mécanique sont adaptées à la variation de la vitesse du vent mais avec une dynamique lente Fig. II.9. La puissance aérodynamique est très fluctuante, de fait que le coefficient de puissance et le ratio de vitesse ne sont pas ajustés à leurs valeurs optimales.

### II.3.3. Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Cette technique consiste à ajouter la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice, afin d'obtenir le maximum de

puissance générée, donc le maximum du couple électromagnétique, qui correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne.

La puissance mécanique de la génératrice est donnée par :

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (II.24)$$

On suppose que la machine électrique et son variateur idiot et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égale à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (II.25)$$

Le couple électromagnétique de référence  $C_{em-ref}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  est donné par la relation suivante :

$$C_{em-ref} = Reg(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II.26)$$

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer  $\Omega_{t-ref}$  pour maximiser la puissance extraire. En tenant compte du gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{t-ref} \quad (II.27)$$

La vitesse de référence de la turbine permettant d'obtenir une valeur maximale du couple.

Le coefficient de puissance  $C_{Pmax}$  est obtenu à partir de l'équation suivante :

$$\Omega_{t-ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (II.28)$$

L'action des correcteurs de vitesse doit accomplir deux tâches :

- ❖ Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- ❖ Atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Dans notre travail, le régulateur de vitesse est réalisé par deux types de régulateurs tel que présenté au sein de la figure (II.10). [28], Dans l'annexe B nous détaillons les deux types de régulateurs.

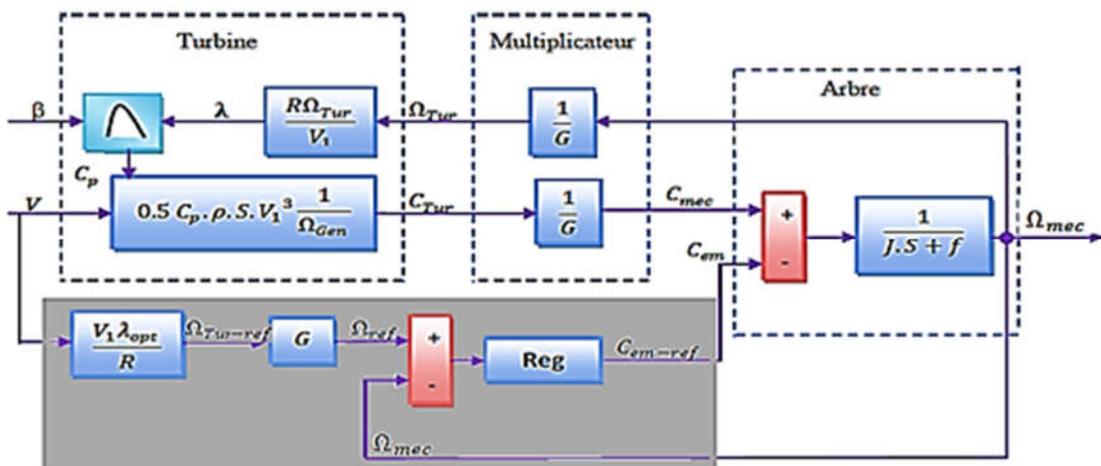


Figure II. 10 : Contrôle MPPT avec Asservissement de la vitesse mécanique.

II.3.4. Simulation et interprétation des Résultats

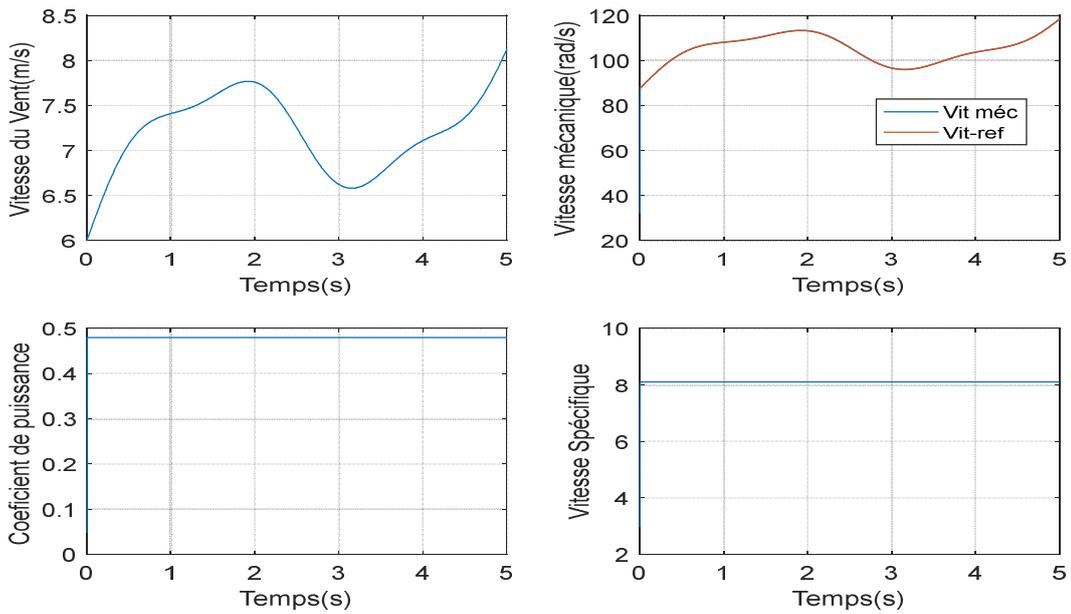


Figure II. 11 : Résultats du MPPT obtenus avec régulateur PI

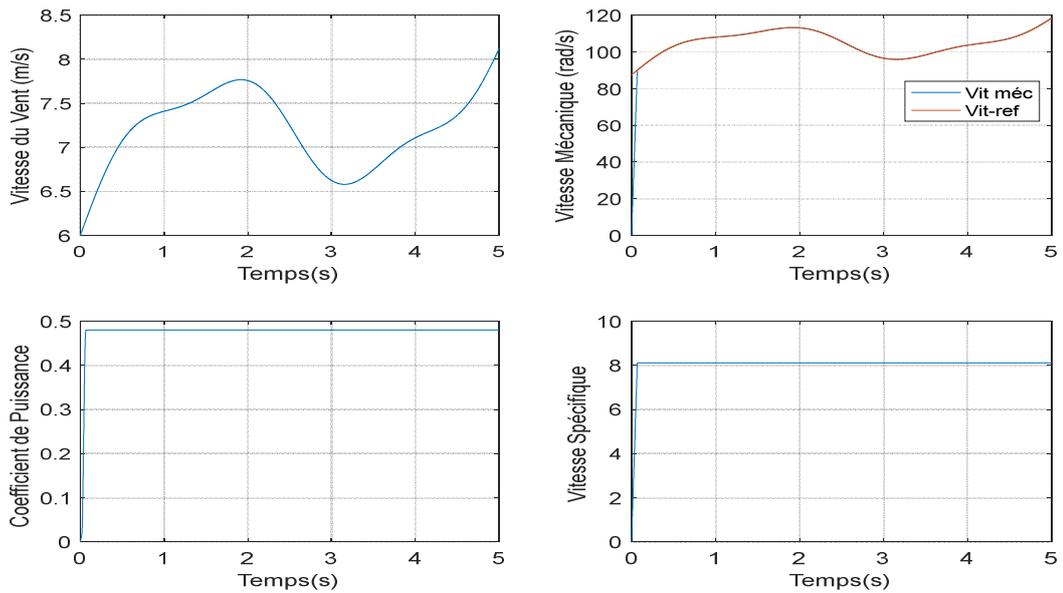


Figure II. 12 : Résultats du MPPT obtenus avec régulateur mode glissant.

Après avoir simulé le schéma de la figure (II.10) sous MATLAB\_SIMULINK, nous avons obtenu les résultats illustrés sur les figures (II.11), (II.12). Ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent.

Ce contrôle est très dynamique et la puissance aérodynamique obtenue en régime transitoire est donc plus importante. Le coefficient de puissance et le rapport de vitesse sont ajustés à leurs valeurs optimales. Les résultats obtenus montrent les meilleures performances statiques et dynamiques, meilleurs poursuite de la consigne contrôlée (vitesse) et un temps de réponse souhaitable offertes par les deux régulateurs.

**II.4. Les Systèmes éoliennes utilisant une machine asynchrone à double alimentation:**

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA.

Ce qui est en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple). En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci sont connectés entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique.

**II.4.1. Avantages et inconvénients :**

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance, du fait que la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique. Le Tableau (II.2) résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de cette génératrice [28], [8].

Tableau II. 2 : Avantages et inconvénients des machines asynchrone à double alimentation.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance extraite optimisée pour les vents faible et moyens.</li> <li>- Electronique de puissance dimensionnée a 30% de la puissance nominale.</li> <li>- Fonctionnement a vitesse variable (<math>\pm 30\%</math> de la vitesse nominale).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenance du multiplicateur.</li> <li>- Commande complexe.</li> <li>- Oscillations mécaniques.</li> </ul>

**II.4.2. Description de la MADA :**

La Machine Asynchrone à Double Alimentation présente un stator analogue à celui d'une machine triphasée classique (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. (Figure II.13).

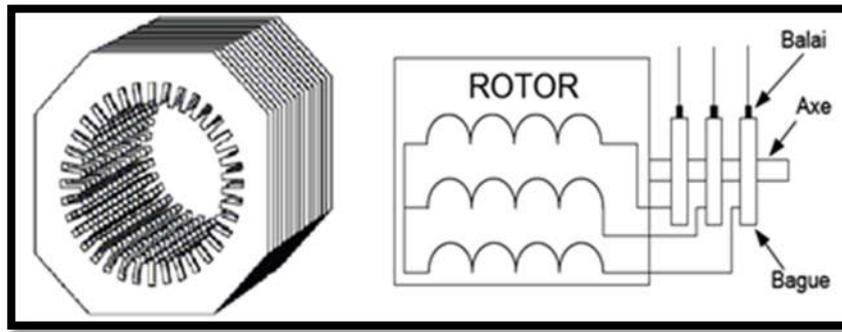


Figure II. 13: Structure de la machine asynchrone à double alimentation.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [2], [18].

### II.4.3. Mode de fonctionnement de la MADA :

La MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement **moteur** ou **générateur**.

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotorique qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en **hyper** ou **hypo synchronisme** aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [2],[8].

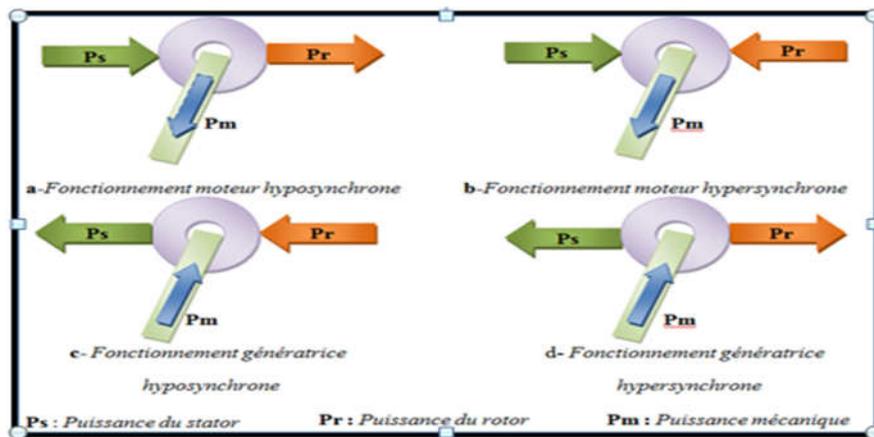


Figure II. 14 : Quadrants de fonctionnement de la MADA.

**(a) Fonctionnement moteur hyposynchrone ( $g > 0$ ) :** Le fonctionnement en mode hyposynchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme à une vitesse plus faible. La puissance est fournie par le réseau au stator; la vitesse de

rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor (Figure (II.14.a)).

**(b) Fonctionnement moteur hypersynchrone ( $g < 0$ ) :** Le fonctionnement en mode hypersynchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme. Dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques est convertie en puissance mécanique (Figure (II.14.b)).

**(c) Fonctionnement générateur hyposynchrone ( $g > 0$ ) :** Dans ce mode de fonctionnement la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor (Figure (II.14.c)).

**(d) Fonctionnement générateur hypersynchrone ( $g < 0$ ) :** Dans ce mode de fonctionnement, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant a été transmise par l'intermédiaire du rotor (Figure (II.14.d)) [17], [2].

#### **II.4.4. Domaine d'applications de MADA :**

La machine asynchrone double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles et surtout en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tels que :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant [36].

#### **II.4.5. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation [6],[36],[28],[8],[21]**

La machine est représentée par son modèle de Park, dont les équations sont établies dans un référentiel où les puissances sont conservées. Les équations de la MADA dans un repère tournant à la vitesse électrique  $\omega_s$  et pour un rotor tournant à la vitesse électrique  $\omega = P \cdot \Omega$  sont données comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \end{cases} \quad (II.29)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II.30)$$

Avec  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ ;  $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ ;  $\theta_s = \theta + \theta_r$

Le couple électromagnétique est exprimé par :

$$C_{em} = P (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \quad (II.31)$$

Equation mécanique, le principe fondamental de la dynamique nous permet d'écrire :

$$\frac{J}{P} \frac{d\omega}{dt} = (C_{em} - C_r - C_f) \quad (II.32)$$

Les puissance active et réactive statorique et rotorique de la MADA sont respectivement :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \\ P_r = V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} \cdot I_{dr} - V_{dr} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (II.33)$$

### Choix de référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axe d, q qui dépendent des objectifs de l'application.

#### Référentiel lié au stator

Ce référentiel est préférable lors de l'étude des grandeurs rotoriques. Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0; \quad \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (II.34)$$

#### Référentiel lié au rotor

Il est avantageux pour l'étude des grandeurs statorique. Il se traduit par la relation :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0; \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (II.35)$$

#### Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \quad (II.36)$$

Ce choix est préférable en vue d'étudier la commande ou on a besoin d'une orientation du flux, et ne résume aucune simplification.

### Mise sous forme d'équation d'état

Pour une bonne représentation de la machine asynchrone double alimentation, nous considérons comme variable d'état  $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, I_{qr}, I_{dr}, \omega]^T$  et les grandeurs  $V_{dr}, V_{qr}$  comme variable de commande

Le système d'équation présentant la machine dans le repère (d-q) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme  $\omega_s$ . Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\begin{cases} \frac{dI_{dr}}{dt} = -\left[\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2}\right] I_{dr} + (\omega_s - \omega) I_{qr} + \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \Phi_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \Phi_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma L_r}\right) V_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = -\left[\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2}\right] I_{qr} - (\omega_s - \omega) I_{dr} + \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \Phi_{qs} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \Phi_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma L_r}\right) V_{qr} \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \frac{R_s M_{sr}}{L_s} I_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \frac{R_s M_{sr}}{L_s} I_{qr} + V_{qs} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{P^2 M_{sr}}{L_s J} (\Phi_{qs} I_{dr} - \Phi_{ds} I_{qr}) - \frac{F}{J} \omega - \frac{P}{J} Cr \end{cases} \quad (II.37)$$

Où  $\sigma$  est le coefficient de dispersion de Blondel :

$$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_r L_r} \quad (II.38)$$

### II.4.6. Simulation et interprétation des résultats

La simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB/Simulink traitant le comportement d'une machine asynchrone à double alimentation. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan (d-q)) liés au champ tournant. Les paramètres de la machine utilisés en simulation sont donnés en (annexe A).

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous (figure II.15) sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 7.5 KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau sinusoïdal 220/380V, 50Hz, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12.44V et une fréquence égale fréquence rotorique  $g\omega_s$ .

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1440 tr/min.

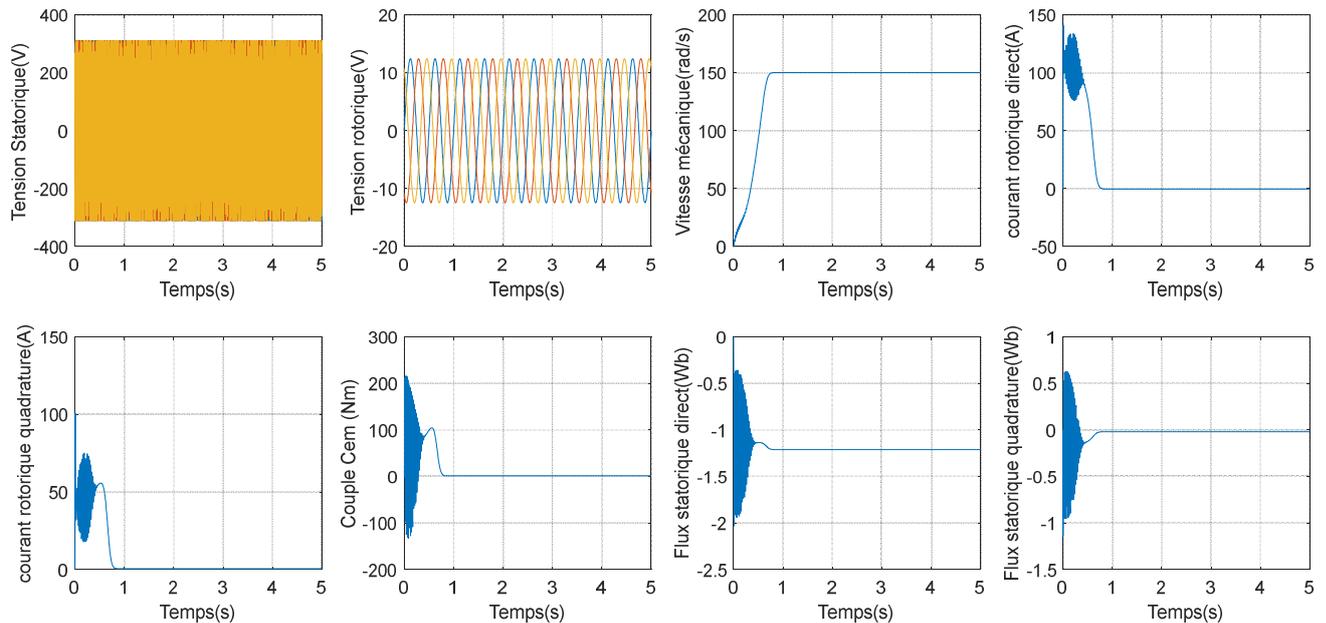


Figure II. 15 : Comportement de la MADA en boucle ouverte

Lors du démarrage à vide, l'oscillation du couple électromagnétique est l'élément marquant de cette figure (régime transitoire). L'amplitude du couple électromagnétique atteint une valeur voisine de (200 N.m) pendant le démarrage puis diminue et se stabilise en régime établi. Les oscillations du couple électromagnétique se font évidemment ressentir sur l'évolution de la vitesse de rotation qui oscille légèrement en régime transitoire avant de se stabiliser à environ (150 rd/s) en régime permanent au bout d'un temps de réponse de 0.6 s environ.

Les courbes représentant l'évolution des flux statoriques ( $\phi_{sd}$  et  $\phi_{sq}$ ) montre que ces flux atteignent respectivement durant la phase transitoire des valeurs avoisinant les (-1.8 Wb) et (0.5 Wb), puis tendent vers (-1.21Wb) et (-0.02 Wb) au bout d'un temps  $t=0.5s$ .

Pendant le démarrage, les courants rotoriques sont fortement oscillatoires ; la valeur de ( $i_{rd}$ ) atteint une valeur voisine de (150 A), tandis que ( $i_{rq}$ ) atteint une valeur voisine de (75A). En régime permanent, ces courants tendent vers zéro à  $t=0.6s$ .

## II.5. Etude de l'ensemble redresseur -onduleur -MADA.[17],[21],[35],[19],[8]

Cette étape est destinée à montrer l'influence de la présence du convertisseur dans la branche rotorique sur les performances de la commande en puissance de la MADA. Ce convertisseur est un ensemble redresseur (CCR)-onduleur (CCM) séparé par un étage à tension continu comme le montre la figure (II.16). Le Convertisseur Coté Réseau (CCR) fonctionne en redresseur dans un régime hyposynchrone, il est commandé en MLI de façon à assurer une tension du bus continue constante et un facteur de puissance désiré. Le Convertisseur Coté Machine (CCM) fonctionne en onduleur dans

un régime hyposynchrone, il est commandé en MLI de façon à fournir une puissance active et réactive données par le stator. Cette cascade de convertisseurs permet un transfert bidirectionnel de la puissance rotorique, c'est-à-dire qu'en régime hyper-synchrone le CCM fonctionnera en redresseur et le CCR en onduleur. Les convertisseurs CCR et CCM sont à simple niveau, c'est-à-dire que chacun est composé de six interrupteurs (IGBT + une diode en antiparallèle) commandés par une seule porteuse.

## II.6. Structure d'alimentation de la MADA par une cascade redresseur-onduleur

Dans cette partie, nous expliciterons les modèles utilisés pour les deux convertisseurs alimentant le rotor de la MADA, moyennant quelques hypothèses simplificatrices.

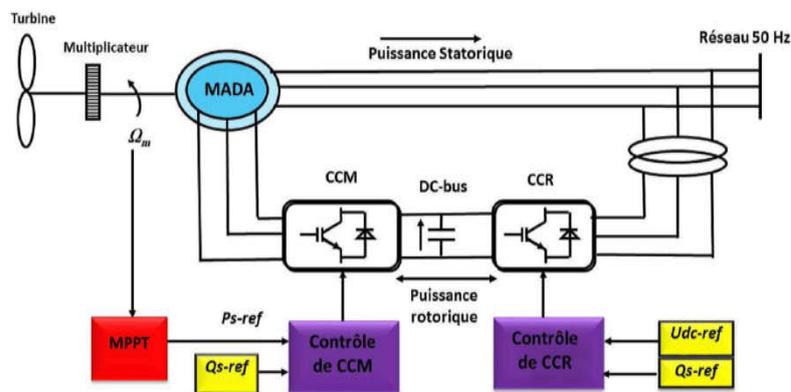


Figure II. 16 : Architecture de commande du système éolien

### II.6.1. Contrôle du convertisseur Cote Rotor de la MADA (CCM) :

Le CCM de la figure II.17 à travers une commande appropriée sert à alimenter le rotor de la MADA de façon à ce qu'elle fournisse par le stator une puissance active et réactive donnée.

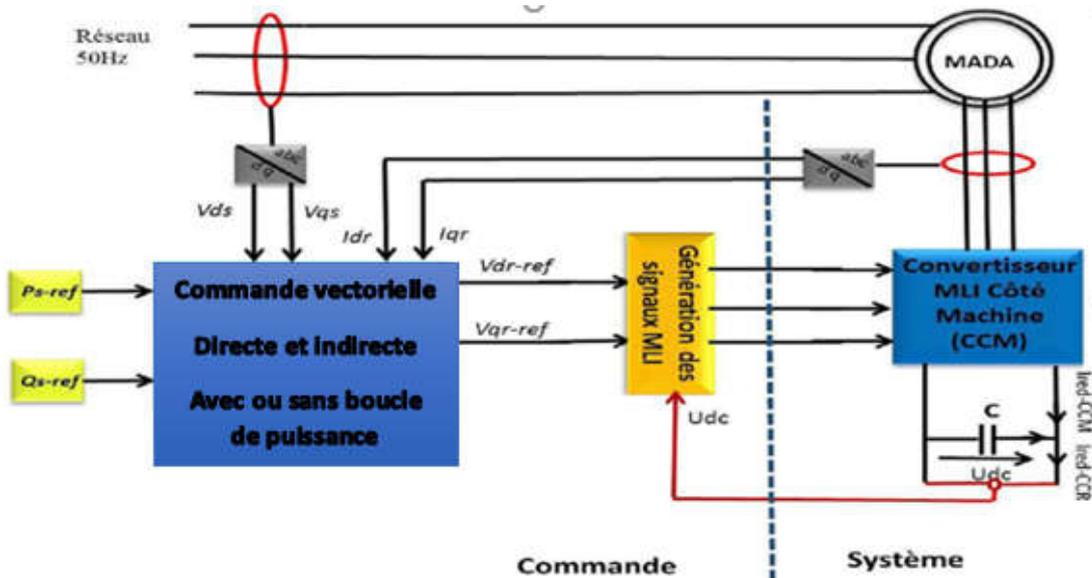


Figure II. 17 : Schéma de principe de la commande CCM

## II.6.2. Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Il est constitué de six interrupteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture. Chaque interrupteur est composé d'un transistor (IGBT ou GTO) et d'une diode montée en antiparallèle. Chaque paire d'interrupteurs commandée en complémentaire forme un bras et chaque bras commande une phase (voir le schéma de la figure II.18). Nous nous limiterons donc à la commande des interrupteurs du haut de chaque bras

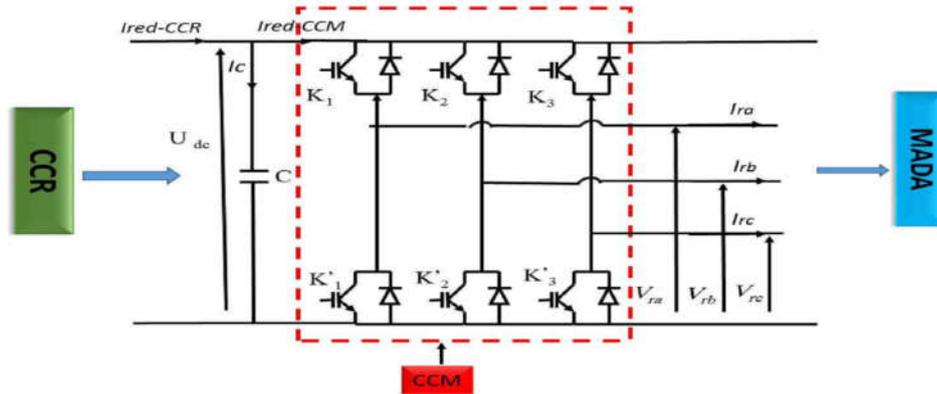


Figure II. 18 : Structure d'un onduleur triphasé.

### II.6.2.a. Calcul des tensions de sortie du CCM

Dans notre application, Le CCM est commandé par des fonctions de commutations ( $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ ) prenant les valeurs de 0 ou +1. Chaque interrupteur peut être commandé en ouverture ou en fermeture, c'est-à-dire si un interrupteur du bras haut est bloqué  $K_i = 0$  et s'il est passant alors  $K_i = 1$  (avec  $i = 1, 2$  ou  $3$ ). De plus, lorsque  $K_i = 1$ , alors son complément, pour ne pas court-circuiter un bras du redresseur ou l'ouverture brusque,  $K_i' = 0$ . Les tensions d'entrée ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) sont en fonction des états de ces interrupteurs.

On cherchera alors une expression reliant la tension  $U_{dc}$  aux tensions  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  qui soit une fonction de l'état des interrupteurs. On commencera d'abord par trouver l'expression des tensions composées en fonction de l'état des interrupteurs:

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = U_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = U_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (II.39)$$

$S_a, S_b, S_c$  Sont les ordres de commande des trois bras du CCM.

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$V_{ra} + V_{rb} + V_{rc} = 0$  On déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} V_{ra} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{rb} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{rc} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (II.40)$$

On remplace (II.39) dans (II.40) on trouve :

$$\begin{cases} V_{ra} = \frac{U_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ V_{rb} = \frac{U_{dc}}{3}(S_a - 2S_b - S_c) \\ V_{rc} = \frac{U_{dc}}{3}(S_a - S_b - 2S_c) \end{cases} \quad (II.41)$$

Le système d'équations (II.41) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{pmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (II.42)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

### II.6.2.b. Calcul du courant d'entrée du CCM

$$I_{ref-CCM} = S_a I_{ra} + S_b I_{rb} + S_c I_{rc} \quad (II.43)$$

$I_{ra}$ ,  $I_{rb}$ ,  $I_{rc}$  sont les trois courants des phases rotoriques de la MADA.

### II.6.2.c. Elaboration des signaux de commande

Les signaux de commande  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  sont déterminés par l'intersection des trois tensions de références et la porteuse.

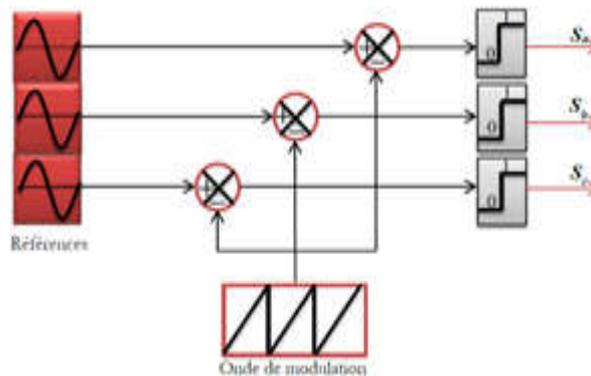


Figure II. 19 : Elaboration des signaux de commande

II.6.2.d. Principe de la MLI

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale.

Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale :

- L'indice de modulation  $m$  qui définit le rapport entre la fréquence  $f_p$  de la porteuse et la fréquence  $f$  de la référence :  $m = \frac{f_p}{f}$
- Le taux de modulation  $r$  (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante  $V_r$  à la valeur crête  $V_p$  de la porteuse :  $r = \frac{V_r}{V_p}$

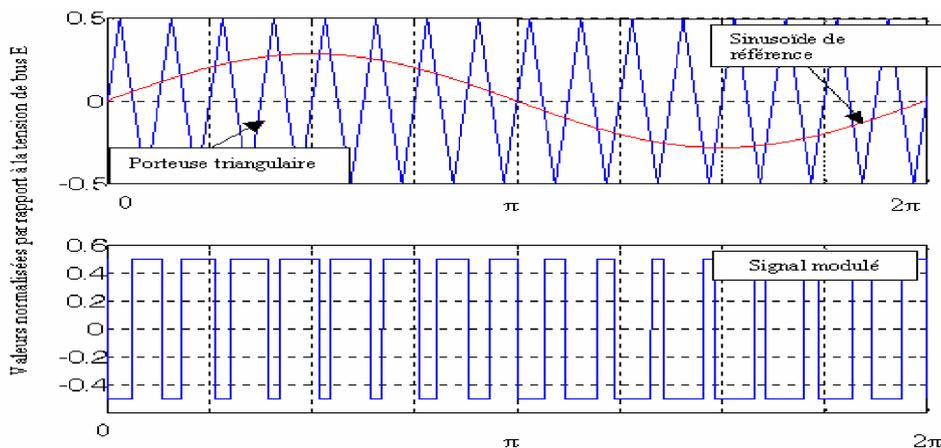


Figure II. 20 : Principe de la MLI triangulé- sinusoïdale.

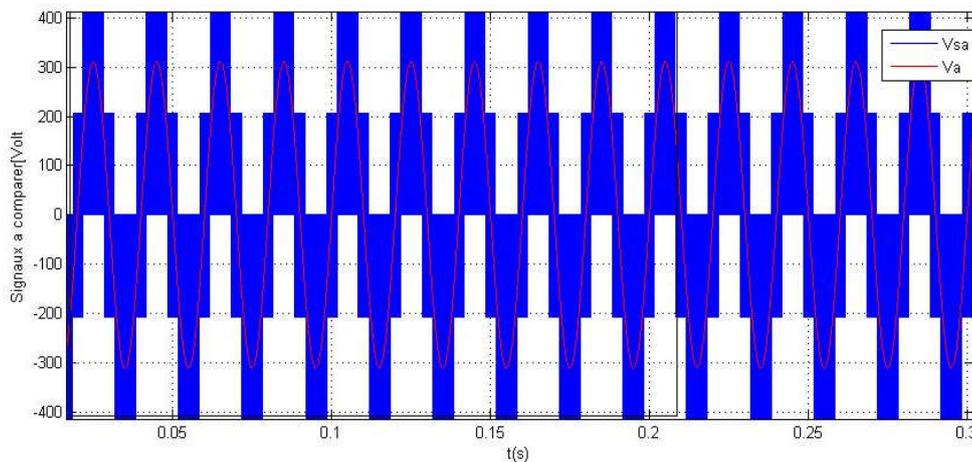


Figure II. 21 : Résultat de la commande d'un onduleur MLI.

**II.7. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation [36], [6],[35],[37],[3]**

Le principe de la commande vectorielle c'est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu, à excitation indépendante, où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (courant d'excitation) et celle liée au couple (courant d'induit). L'expression du couple électromagnétique d'une machine à courant continu compensée à excitation séparée est:

$$C_{em} = K_a \Phi_f . I_a$$

$$\Phi_f = K . I_f$$
(II.44)

Selon l'expression (II.44), le flux dépend du courant d'excitation. Alors, si le flux est constant le contrôle du couple se fait uniquement par le courant. Donc la production du couple et la création du flux sont indépendantes.

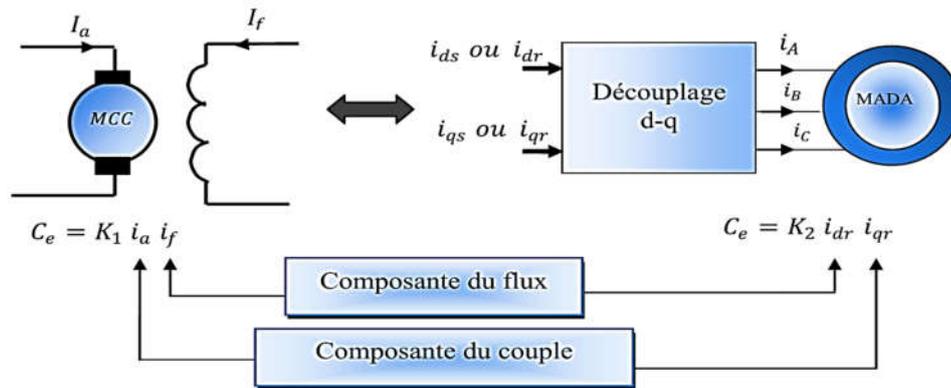


Figure II. 22 : Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.

**II.7.1. Procédé d'orientation du flux**

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découple que le flux à orienter statorique, rotorique ou d'entrefer doit coïncider avec l'axe d. Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes :

**Orientation du flux rotorique :**  $\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases}$  (II.45)

**Orientation du flux statorique :**  $\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases}$  (II.46)

**Orientation du flux magnétisant :**  $\begin{cases} \Phi_d = \Phi \\ \Phi_q = 0 \end{cases}$  (II.47)

Dans le cadre de cette thèse, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant le flux statorique. Cette dernière se décompose en trois parties :

- Le contrôle du flux
- Le contrôle des courants statorique
- Le découplage ou compensation

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statorique ou rotorique de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composants homopolaires sont annulés.

### II.7.2. Modèle de la MADA à flux statorique oriente

Dans ce qui suit, nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard, mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constat au stator de la machine.

Nous rappelons le système d'équations différentielles électrique et magnétique décrivant la machine asynchrone à double alimentation dans un repère lié au champ tournant qui est donné dans les systèmes d'équation :

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine asynchrone à double alimentation en orientant le repère (d, q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique  $\Phi_s$ .

$$\text{Ainsi : } \begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (II.48)$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne, les systèmes d'équation (II.29) et (II.30) peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II.49)$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \end{cases} \quad (II.50)$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_{em} = -P \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot \Phi_s \cdot I_{qr} \quad (II.51)$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée, donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC.

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique  $\Phi_s$  constant. Cette considération associée à l'équation (II.51) montre que le couple électromagnétique  $C_{em}$  est directement proportionnel au courant rotorique  $I_{qr}$  en quadrature.

Pour avoir contrôlé facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques.

### Expressions des puissances actives et réactives statoriques

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (II.52)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (II.53)$$

Les puissances active  $P$  et réactive  $Q$  sont donc en fonction des courants statoriques  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$  respectivement, sur lesquels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M_{sr}}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (II.54)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M_{sr}}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (II.55)$$

Il ressort de l'expression (II.55) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique de l'axe d à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  imposée par le réseau.

### ➤ Expressions des tensions rotoriques

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux les courants statorique par l'expression (II.54), on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} \end{cases} \quad (II.56)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques, on trouve :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.57)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques déphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.58)$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, il est possible d'établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. En examinant les équations (II.55) et (II.57), on peut imaginer le schéma bloc de la MADA qui est le

système à réguler, comportant en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives engendrées figure (II.23)[36].

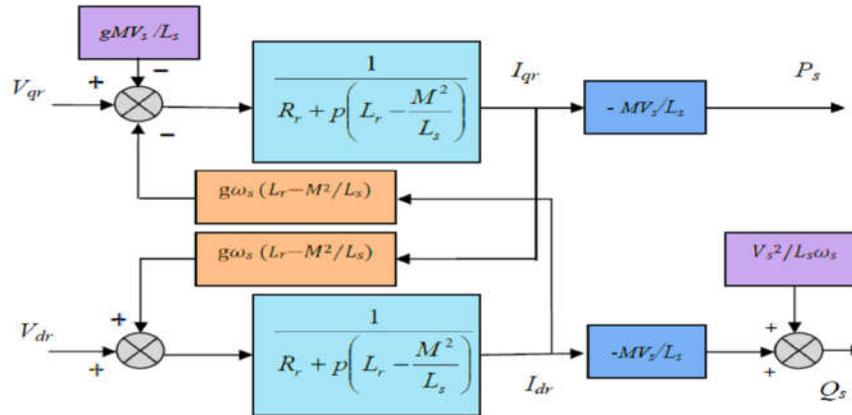


Figure II. 23 : Schéma bloc de la MADA à réguler

Il existe deux types de la commande vectorielle [8]:

- La commande vectorielle Directe.
- La commande vectorielle Indirect.

### II.7.3. Commande vectorielle Directe :

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et de mettre en place un régulateur (PI) indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives (figure II.24). Cette méthode est dite méthode directe, car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [28].

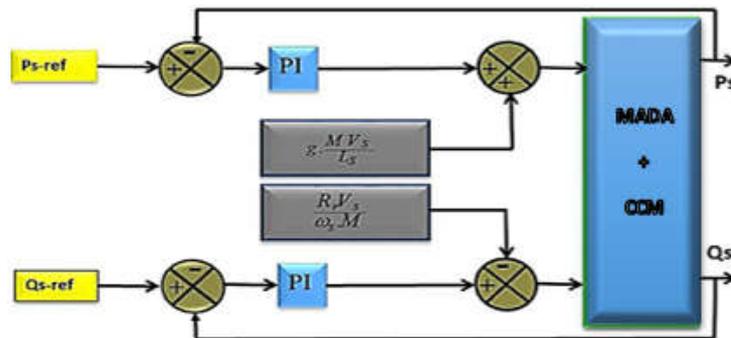


Figure II. 24 : Commande vectorielle direct de la MADA

#### Type du régulateur :

Dans plusieurs structures de commande comme par exemple utilisée dans [17][18] [38] des régulateurs PI ont été utilisés pour commander la MADA. On adopte à l'utiliser pour sa simplicité, sa rapidité et sa facilité à mettre en œuvre notamment que ses performances sont suffisamment acceptables. Le calcul des gains du régulateur est représenté dans l'annexe C dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

### II.7.4. Simulation et interprétation des résultats

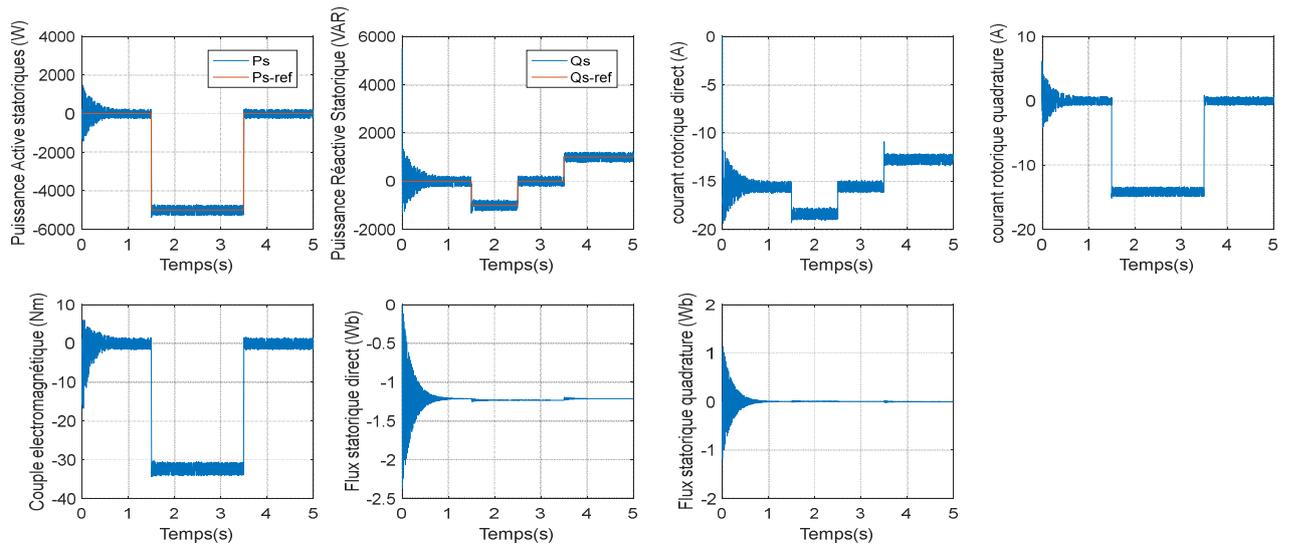


Figure II. 25 : Résultats de la Commande vectorielle Directe.

Les résultats de simulation présentent respectivement les courbes de la puissance active et réactive, les courants et les flux rotorique et le couple électromagnétique. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances du générateur. D'après les résultats obtenus, on peut dire que le contrôle direct utilisant les régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances actives et réactives au niveau du rotor de la machine.

Après le régime transitoire, on note une bonne poursuite des allures aux valeurs de références imposées.

### II.7.5. Commande vectorielle indirecte :

Dans cette méthode on régule indirectement les courants rotoriques qui sont déterminés à partir des puissances de références, ensuite, et dans un deuxième sous-système on détermine les tensions rotoriques à partir des courants rotoriques.

#### II.7.5.a. Commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance :

Cette méthode consiste à réguler les courants rotoriques par une boucle de régulations. Les valeurs de référence sont imposées par les puissances active et réactive fixées à des valeurs désirées. Les régulateurs dans ce cas sont déterminés de la même façon que dans le cas de la régulation directe [36].

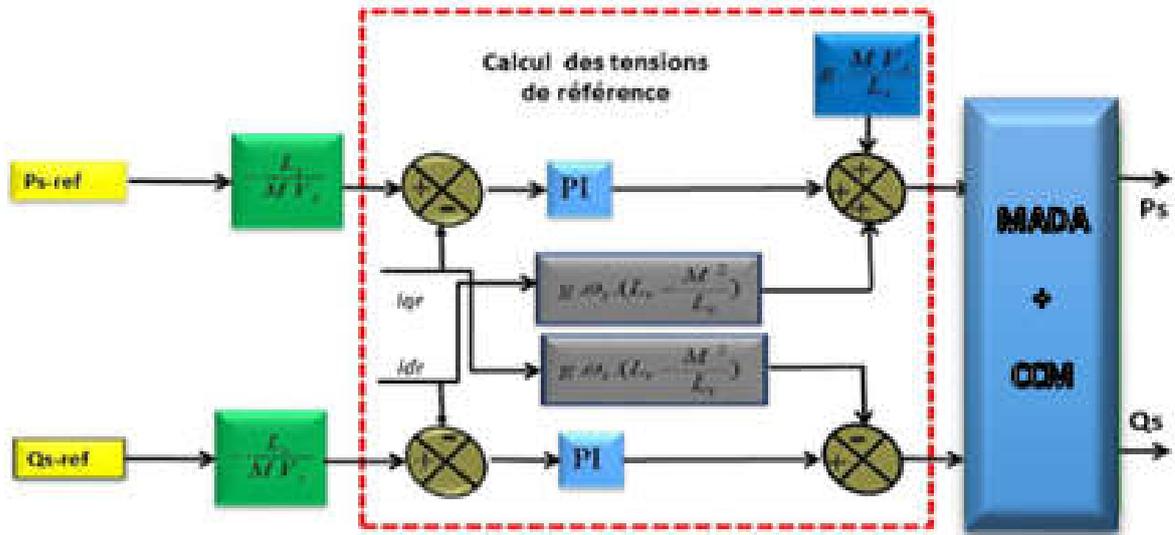


Figure II. 26: Commande Indirecte sans boucles de puissance.

**II.7.5.b. Commande vectorielle indirecte avec boucle Commande puissance :**

Afin d'améliorer la méthode précédente et éliminer l'erreur statique sur les puissances, on ajoute en plus de la boucle de régulations des courants rotorique, une deuxième boucle de régulation des puissances active et réactive. Le gain de régulateur de courant rotorique est déterminé de la même manière que dans la méthode précédente, et pour la régulation de puissance, on utilise un régulateur PI, qui permet d'éliminer l'erreur statique toute en conservant la dynamique du système [17], [39].

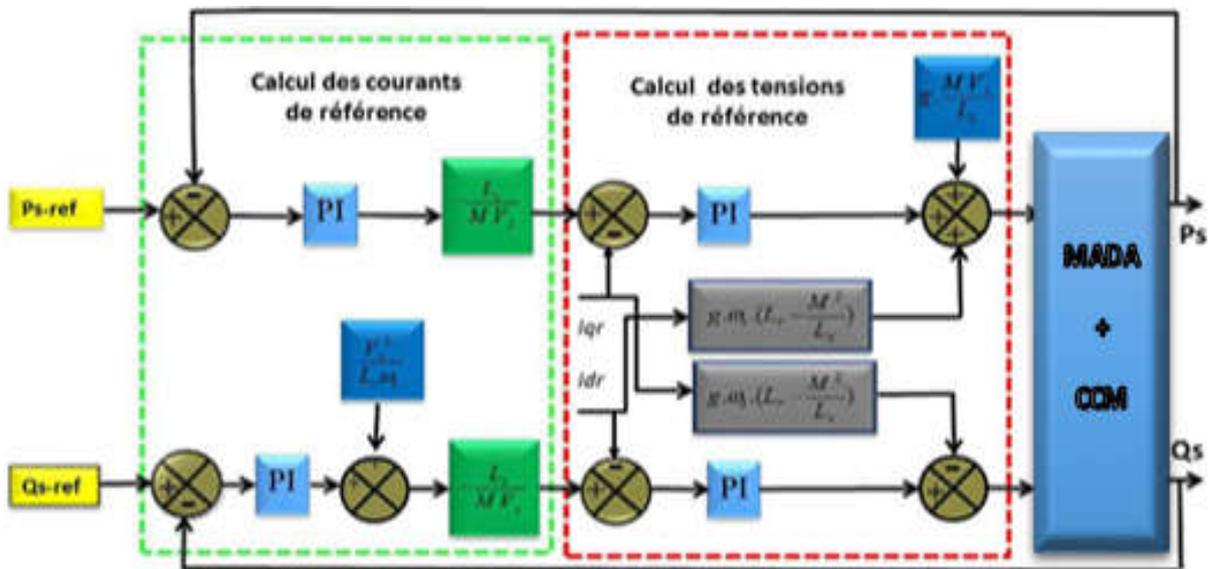


Figure II. 27 : Commande indirecte avec boucle de puissance.

II.7.5.c. Simulation et interprétation des résultats

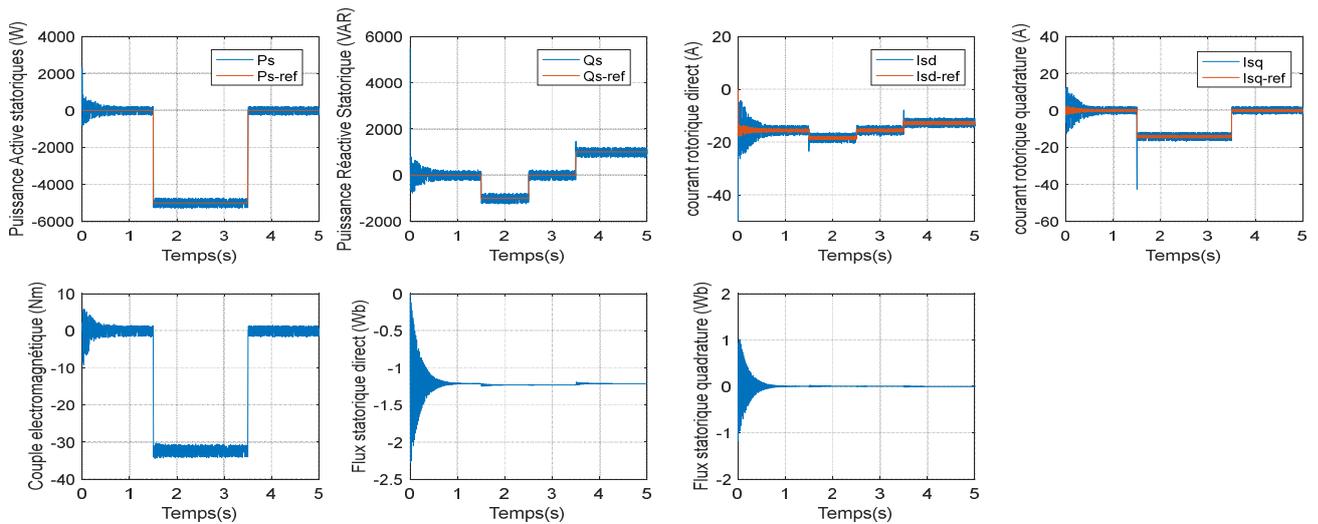


Figure II. 28 : Résultats de la Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

La Figure (II.28) représente les résultats obtenus de la commande vectorielle indirect avec boucle de puissance par le correcteur PI. Cette commande est plus performante par rapport à la commande directe.

Cette commande permet de découpler les expressions de puissance active et réactive du générateur. D'après les résultats obtenus, on constate que le contrôle direct utilisant des régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances actives et réactives au niveau du stator. Après un régime transitoire. Une bonne poursuite des allures à leurs valeurs de références imposées dans le cas d'un entraînement à vitesse constante.

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive.

En outre, une proportionnalité apparaît entre le courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$  et la puissance active, d'autre part le courant direct  $I_{dr}$  est l'image de la puissance réactive.

On note que le couple électromagnétique réagit spontanément quand il y a une demande en puissance active, indépendamment de la puissance réactive.

II.8. Modélisation du redresseur triphasé à MLI [17],[40],[21]

Le convertisseur coté réseau (CCR) de la figure (II.29) sert à assurer une tension de bus continu, constante. Il assure également un facteur de puissance coté réseau unitaire, comme il peut fournir à la demande une puissance réactive au réseau. Il peut aussi servir de filtre électromagnétique pour dépolluer le réseau [17]. Le CCR à deux niveaux est constitué de six interrupteurs, chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en antiparallèle. Dans le cas des moyennes puissances, les transistors sont des IGBT. Les six interrupteurs forment ainsi trois bras et chaque bras

commande une phase. La commande des interrupteurs de chaque bras est dite complémentaire. Nous nous limiterons donc à la commande des interrupteurs du haut de chaque bras

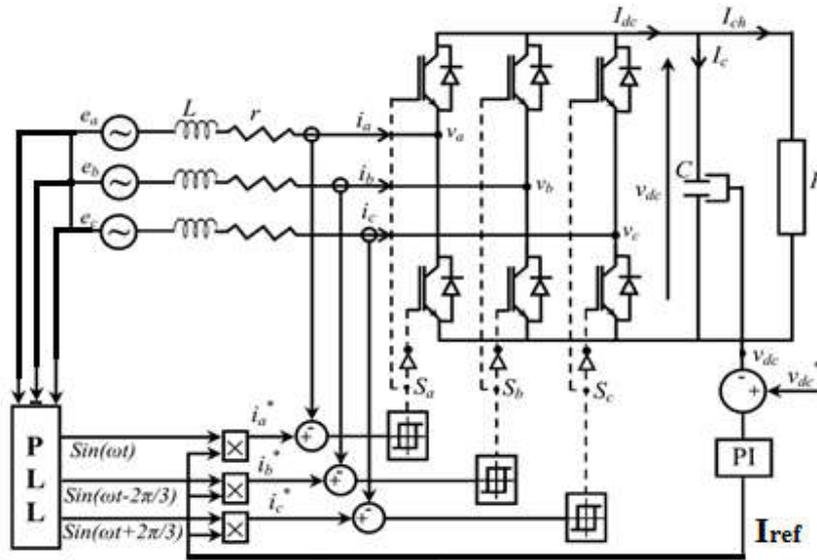


Figure II. 29 : Structure du contrôle par hystérésis des courants absorbés par redresseur à MLI.

Nous avons utilisé une boucle à verrouillage de phase appelée PLL (Phase Locked Loop), comme illustre la figure. II.29. Cette PLL permet d'estimer avec précision la fréquence et l'amplitude de la tension du réseau.

### II.8.1. Calcul des courants d'entrée du CCR

La source est composée d'une f.é.m. triphasée parfaitement sinusoïdale en série avec une résistance R et une inductance L sur chaque phase. Le réseau est supposé parfaitement équilibré, les impédances des trois phases sont identiques. Les trois tensions du réseau sont :

$$\begin{cases} e_a = e_{\max} \cdot \sin \theta \\ e_b = e_{\max} \cdot \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_c = e_{\max} \cdot \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (II.59)$$

Avec

$e_{\max}$  : L'amplitude maximale de la tension de source

En appliquant la loi du Kirchhoff côté alternatif, on obtient :

$$\begin{cases} -e_a + RI_a + L \frac{d}{dt} I_a + V_a = 0 \\ -e_b + RI_b + L \frac{d}{dt} I_b + V_b = 0 \\ -e_c + RI_c + L \frac{d}{dt} I_c + V_c = 0 \end{cases} \quad (II.60)$$

Où  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  sont les tensions simples à l'entrée du convertisseur (CCR). Le système d'équations (II.60) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{R}{L} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} e_a - V_a \\ e_b - V_b \\ e_c - V_c \end{pmatrix} \quad (II.61)$$

### II.8.2. Calcul des tensions d'entrée du CCR

Après avoir calculé les courants d'entrée au convertisseur (CCR), maintenant on cherche les tensions d'entrées. Les tensions composées à l'entrée du CCR s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (II.62)$$

Pour passer des tensions composées aux tensions simples, étant donné que la somme instantanée des courants  $I_a + I_b + I_c$  est nulle (le point neutre n'est pas relié), et que le réseau est équilibré et sinusoïdal impliquant la somme des forces électromotrices nulle ( $e_a + e_b + e_c = 0$ ).

Alors :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (II.63)$$

A partir des équations (II.62) et (II.63) on trouve :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_{ab} - U_{ca}}{3} \\ V_b = \frac{U_{bc} - U_{ab}}{3} \\ V_c = \frac{U_{ca} - U_{bc}}{3} \end{cases} \quad (II.64)$$

Qui sous forme matricielle sont :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{pmatrix} \quad (II.65)$$

Les interrupteurs du CCR sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit. Les tensions composées à la sortie du convertisseur (CCR) s'expriment par :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{dc} (S_a - S_b) \\ U_{bc} = U_{dc} (S_b - S_c) \\ U_{ca} = U_{dc} (S_c - S_a) \end{cases} \quad (II.66)$$

On remplace (II.66) dans (II.64) on trouve :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ V_b = \frac{U_{dc}}{3}(S_a - 2S_b - S_c) \\ V_c = \frac{U_{dc}}{3}(S_a - S_b - 2S_c) \end{cases} \quad (II.67)$$

Le système d'équations peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (II.68)$$

### II.8.3. Calcul du courant de sortie du CCR

L'état ouvert ou fermé des interrupteurs permet de passer directement des courants d'entrée  $I_a, I_b, I_c$  en fonction des courants dans les interrupteurs  $I_{k11}, I_{k21}, I_{k31}$  au courant à la sortie du CCR  $I_{dc}$ .

$$\text{Avec : } \begin{cases} I_{k11} = S_a I_a \\ I_{k21} = S_b I_b \\ I_{k31} = S_c I_c \end{cases} \quad (II.69)$$

On en déduit que le courant à la sortie du redresseur est donné par :

$$I_{ref-ccr} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c \quad (II.70)$$

### II.8.4. Contrôle par hystérésis des courants prélevés

Le contrôle du courant par hystérésis (*Hysteresis Current Control : HCC*) consiste à maintenir le courant dans une bande enveloppant sa référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation aux interrupteurs. La figure II.30 illustre le principe de contrôle du courant par hystérésis à bande fixe à deux niveaux. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit l'ordre de commande du bras correspondant du pont [41], [40].

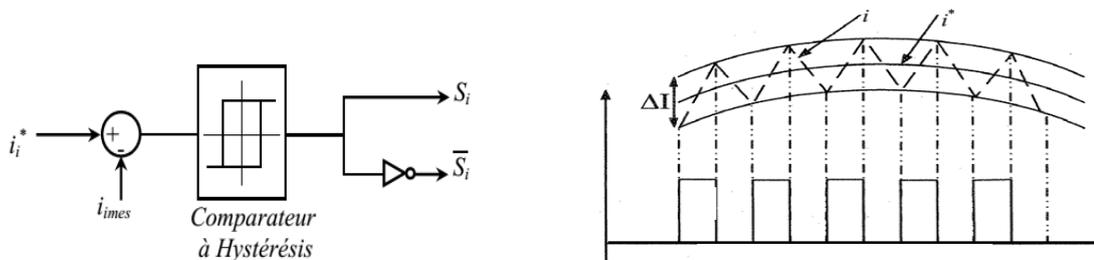


Figure II. 30 : principe de contrôle du courant par hystérésis

Cette technique de contrôle fait partie des commandes non linéaires, parce qu'elle fonctionne en tout ou rien. Elle est bien connue et présente de gros avantages au niveau de la robustesse et de la simplicité de mise en œuvre. Elle possède un temps de réponse rapide en régime dynamique, une stabilité et une précision satisfaisante et de plus limite automatiquement le courant. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation bien que cette dernière reste inconnue et variable. La technique de régulation par bande hystérésis est une des méthodes les plus appropriées pour les différentes applications d'onduleurs contrôlés en courant tels que les entraînements électriques et les filtres actifs [42],[40]. Le principe de génération des ordres de commande est représenté sur la figure II.30, où  $\Delta I$  est la largeur de la bande hystérésis

### II.8.5. Calcul de la tension de sortie du CCR

Pour compléter le modèle du redresseur dans le repère triphasé (a b c), on rajoute l'équation traduisant la charge de la capacité C qui est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{dU_{dc}}{dt} &= \frac{1}{C} I_c \\ \frac{dU_{dc}}{dt} &= \frac{1}{C} (I_{red-CCR} - I_{ond-CCM}) \end{aligned} \quad (II.71)$$

Avec  $I_{ond-CCM}$  : le courant d'entrée du convertisseur coté machine (CCM)[21].

### II.8.6. Contrôle du la tension Vdc :

La tension aux bornes du condensateur est donnée par l'équation (II.71). Le correcteur Proportionnel Intégrateur (PI) permet de maintenir une tension constante du bus continu en générant la référence du courant à injecter dans le condensateur [28], [8].

Le schéma bloc du contrôle du bus continu est montré dans la figure II.31.

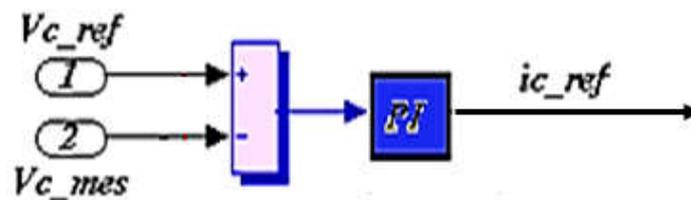


Figure II. 31 : Contrôle du bus continu.

II.8.7. Simulation et interprétation des résultats

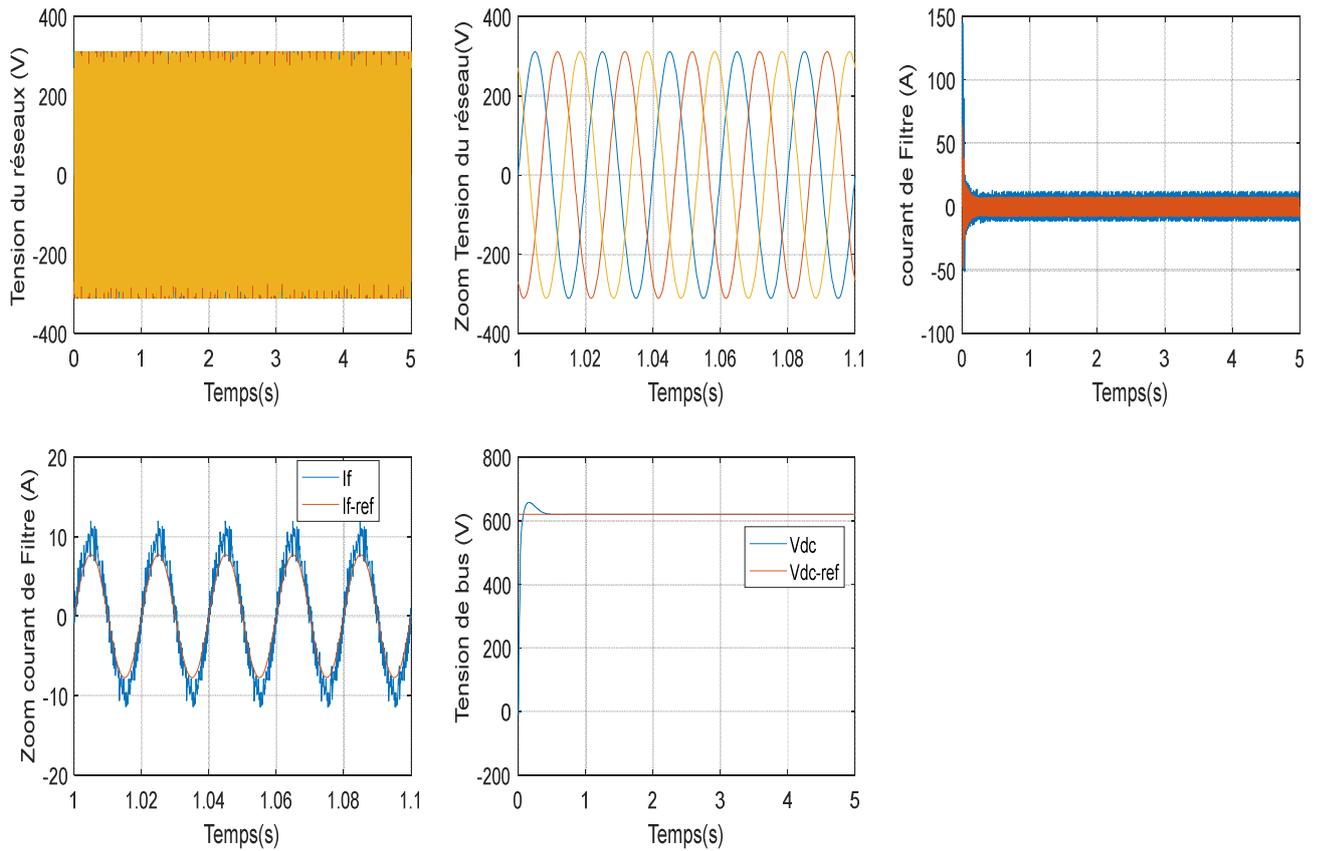


Figure II. 32 : Résultats de la Commande du convertisseur coté réseau et le Bus continu.

On peut remarquer que la tension du bus continu suit parfaitement sa consigne (620 V), avec présence des performances dynamiques (rapidité, stabilité, précision) en utilisant un régulateur classique (PI), (le dimensionnement d'un régulateur PI est représenté dans l'annexe B). Le réglage de la tension du bus continu va nous permettre dans la suite de notre étude, d'assurer le transfert d'énergie entre le réseau et la machine. Cependant le réglage du courant a été fait par un régulateur à hystérésis afin de garder les courants du filtre sous une forme sinusoïdale.

## II.9. Simulation et interprétation des résultats de la chaîne complète

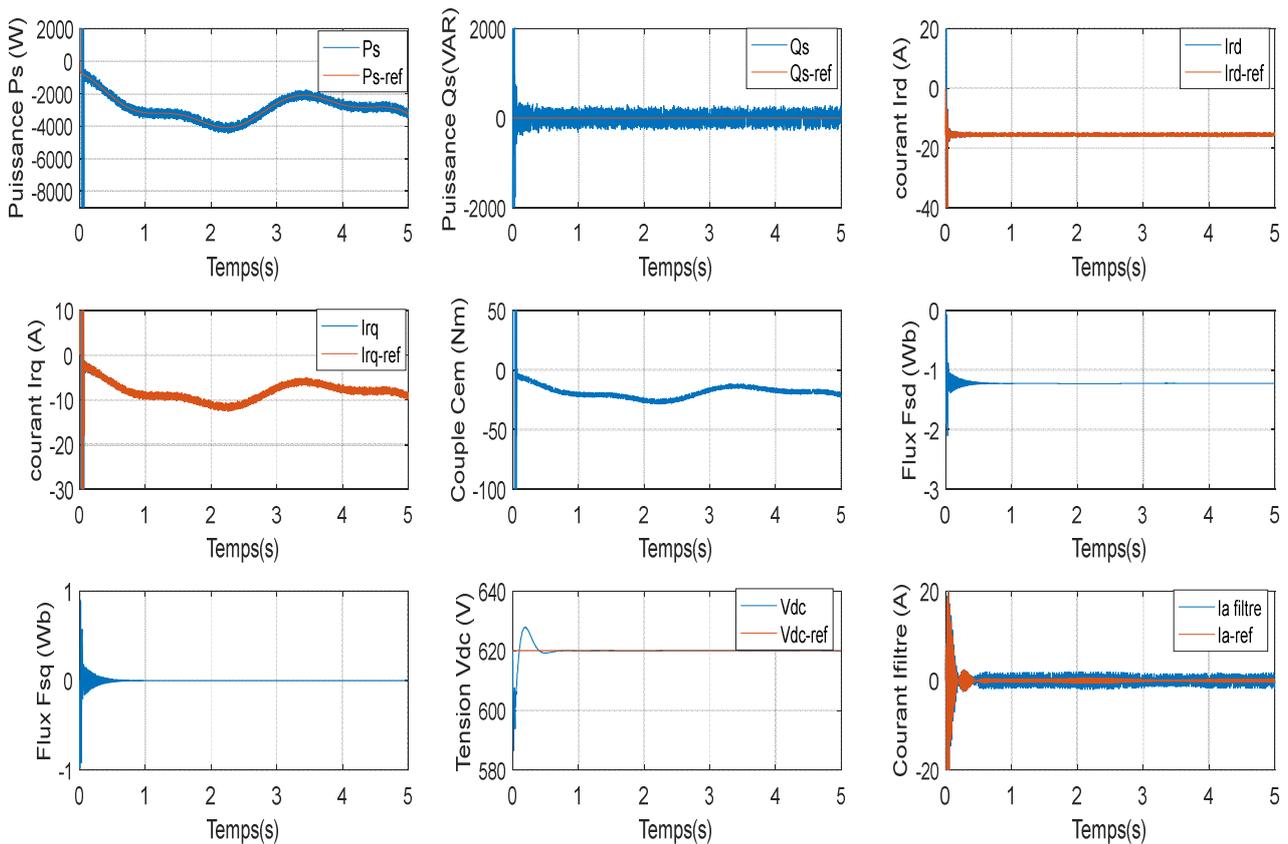


Figure II. 33 : Résultats de la chaîne complète par la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

Les résultats montrent que les grandeurs mesurées des puissances active, réactive, courant rotorique quadrature, courant rotorique directe et la tension de bus continu suivent leurs références parfaitement.

## II.10. Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la modélisation et à la commande d'une chaîne éolienne nous avons décrit en premier lieu un modèle mathématique de la turbine a été établi par sa simulation.

Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, nous avons détaillé la zone particulière, ou la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Par la suite, nous allons étudier la modélisation et la commande vectorielle directe et indirecte avec ou sans boucle de puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Ces tests sont effectués dans un premier temps sans prendre en compte la présence des convertisseurs du côté rotor. Ces résultats sont à considérer comme étant idéaux. Par la suite, les mêmes tests sont effectués dans les mêmes conditions en tenant compte des modèles des convertisseurs.

De bons suivis de consigne et de bons rejets de perturbations sont obtenus dans le cas idéal. La présence des convertisseurs du côté rotor a engendré des fluctuations dans la forme

des puissances active et réactive même en régime permanent. Cela est dû aux harmoniques générés par les deux convertisseurs CCR et CCM.

### III.1. Introduction :

Le mode glissement est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. La théorie de ces systèmes a été étudiée et développée en union soviétique, tout d'abord par le professeur EMELYANOV, puis par d'autres collaborateurs également UTKIN [43], à partir des résultats des études du mathématicien FILIPOVE sur les équations différentielles à second membre discontinu. Ensuite, les travaux ont été repris aux Etats-Unis par SLOTINE [44],[45],[46] et au Japon par Young, HARASHIMA et HASHIMOTO [47]. Ce n'est qu'à partir des années 80 que la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis [19].

Dans ce chapitre, nous montrons comment la commande par mode de glissement peut être appliquée au contrôle de la MADA. Pour cela, nous présentons tout d'abord un rappel théorique sur la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable, nous abordons ensuite la conception de l'algorithme de commande avec ces différentes étapes, nous donnons aussi l'application de la commande sur la MADA et nous allons enfin montrer les avantages apportés par ce type de réglage par rapport à ceux obtenus par les régulateurs classiques PI, après illustration et visualisation des résultats de simulation.

### III.2. Notions d'un système à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Le terme «Système à structure variable» apparaît à cause de la commutation (variation discontinue) du système et de son contrôleur (ou observateur) entre deux ou plusieurs structures [Mez-06],[Nem-02]. L'étude de tels systèmes présente un grand intérêt, notamment en physique, en mécanique et en électricité. Cela est principalement dû aux propriétés de stabilité que peut avoir le système global indépendamment de celles de chacun des sous-systèmes pris seuls.

### III.3. Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable :

La commande par modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien de glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase comme montré sur la figure (III. 1) [48],[49].

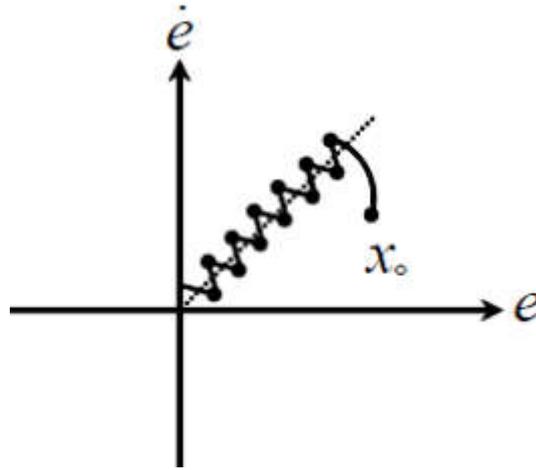


Figure III. 1 : Modes de fonctionnement dans le plan de phase

### III.3.1. Conception de la commande par mode de glissement :

Les avantages de la commande par mode de glissement sont importants et multiples, comme la haute précision, la stabilité, la simplicité, un temps de réponse très faible et notamment la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour traiter les systèmes à modèle imprécis, dû soit à un problème d'identification soit à un problème de modélisation. Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence. Dans ce cas, la structure du contrôleur comporte deux parties. Une première continue représentant la dynamique du système durant le mode de glissement et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette deuxième est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et de perturbation sur le modèle.

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes. Ces étapes concernent [50],[49],[51],[19]:

- Le choix des surfaces.
- L'établissement des conditions d'existence et de convergence
- La détermination de la loi de commande.

### III.3.2. Choix de la surface de glissement

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][U] \quad (III.1)$$

où  $[x] \in R^n$  est le vecteur d'état,  $U \in R^m$  le vecteur de commande, avec  $n > m$ .

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande  $[U]$ .

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état  $x$  vers sa valeur de référence  $x^n$ , il faut choisir une surface de glissement. Elle est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface. Nous trouvons dans la littérature différentes formes de surface de glissement, et chaque surface présente de meilleures performances pour une application donnée. Dans ce travail, nous nous intéressons à une surface non linéaire [52],[19],[53].

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-n} e^x \quad (III.2)$$

Avec :

$e(x) = x^n - x$  Écart de la variable à réguler :

$r$  : est un degré relatif qui représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande ;

$\lambda$  : gain positif.

L'objectif de la commande est de garder la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$ .

### III.3.3. Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence

#### 1) Approche directe

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro, elle est donnée sous la forme [49],[19].

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (III.3)$$

#### 2) Approche LYAPUNOV

Il s'agit de choisir une fonction scalaire positive  $V(x) > 0$  pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction  $\dot{V}(x) < 0$ .

Cette fonction de LYAPUNOV est définie comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (III.4)$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (III.5)$$

Pour que la fonction  $V(x)$  puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (III.6)$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires [52],[54],[55],[56].

### III.3.4. Théorie de la commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de surface). C'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande. Actuellement, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte  $U_{eq}$  et l'autre la stabilité  $U_n$ .

$$U = U_{eq} + U_n \quad (III.7)$$

$U_{eq}$  Correspond à la commande proposée par FILIPOV. Elle sert à garder la variable à commander sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ . La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle  $\dot{S}(x) = 0$ .

La commande discrète  $U_n$  est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système.

Pour mettre en évidence le développement précédent, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (III.1). On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande  $U$ .

La dérivée de la surface  $S(x)$  est :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (III.8)$$

En remplaçant (III.1) et (III.7) dans (III.8), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dx} \{ [A][x] + [B]U_{eq} \} + \frac{ds}{dx} [B]U_n \quad (III.9)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, logiquement sa dérivée et la partie discontinue le sont aussi. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente

$$U_{eq} = \left\{ \frac{ds}{dx} [B] \right\}^{-1} + \left\{ \frac{ds}{dx} [A][x] \right\} \quad (III.10)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{ds}{dx} [B] \neq 0 \quad (III.11)$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (III.9), on trouve la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dx} [B]U_n \quad (III.12)$$

et la condition d'attractivité  $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$  devient :

$$S(x) = \frac{ds}{dx} [B]U_n < 0 \quad (III.13)$$

Afin de satisfaire la condition, le signe de  $U_n$  doit être opposé à celui de  $S(x) = \frac{ds}{dx} [B]$ . La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction *Sign* (figure III.2) [19],[52],[48],[51],[56],[54],[57],[53].

$$U_n = K_x \text{Sign} \cdot S(x) \quad (III.14)$$

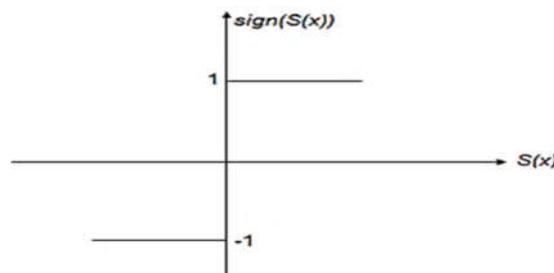


Figure III. 2 : Fonction sign (non linéarité tout ou rien)

### III.4. Application de la commande à mode glissant à la MADA

#### III.4.1. Contrôle De La Puissance Active

Pour contrôler la puissance on prend  $n=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme [54],[53],[55],[58] :

$$S(P) = (P_{sref} - P_s) \quad (III.15)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{sref} - \dot{P}_s) \quad (III.16)$$

On remplace l'expression de la puissance équation (II.55) :

$$\dot{S}(P) = \left( \dot{P}_{sref} + V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{qr} \right) \quad (III.17)$$

On tire l'expression du courant  $\dot{I}_{qr}$  de l'équation de la tension  $V_{qr}$  équation (II.57) en le remplace dans (II.17) en trouve :

$$\dot{S}(P) = \left( \dot{P}_{sref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{qr} - R_r I_{qr}) \right) \quad (III.18)$$

En remplaçant l'expression de  $V_{qr}$  par  $V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n$ , la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(P) = \left( \dot{P}_{sref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( (V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) - R_r I_{qr} \right) \right) \quad (III.19)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(P) = 0, \quad \dot{S}(P) = 0, \quad V_{qr}^n = 0 \quad (III.20)$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente  $V_{qr}^{eq}$  qui s'écrit :

$$V_{qr}^{eq} = - \left( \dot{P}_{sref} + \frac{\sigma L_s L_r}{V_s M} + R_r I_{qr} \right) \quad (III.21)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $S(P) \cdot \dot{S}(P) \leq 0$  soit vérifiée, on pose :

$$\dot{S}(P) = -V_s \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{qr}^n \quad (III.22)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{qr}^n = K_{V_{qr}} \cdot \text{sign}(S(P)) \quad (III.23)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K_{V_{qr}}$  doit être positif.

III.4.2. Contrôle de la puissance réactive

Les mêmes procédures que la puissance active sont suivies en remplaçant  $P$  par  $Q$  et en tenant compte de l'expression de puissance réactive (II.55) pour obtenir [59],[58],[55],[60],[53] :

$$\dot{S}(Q) = \left( \dot{Q}_{sref} - \left( -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \right) \right) \tag{III.24}$$

On tire l'expression du courant  $i_{dr}$  de l'équation de la tension  $V_{dr}$  équation (II.57) :

$$\dot{S}(Q) = \left( \dot{Q}_{sref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{dr} - R_r I_{dr}) \right) \tag{III.25}$$

En remplaçant l'expression de  $V_{dr}$  par  $V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n$  la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(Q) = \left( \dot{Q}_{sref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( (V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) - R_r I_{dr} \right) \right) \tag{III.26}$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente  $V_{qr}^{eq}$  qui s'écrit :

$$V_{dr}^{eq} = - \left( \dot{Q}_{sref} \frac{\sigma L_s L_r}{V_s M} + R_r I_{dr} \right) \tag{III.27}$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $S(Q) \cdot \dot{S}(Q) \leq 0$  soit vérifiée, on pose :

$$\dot{S}(Q) = -V_s \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{dr}^n \tag{III.28}$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{dr}^n = K_{V_{dr}} \text{sign}(S(Q)) \tag{III.29}$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K_{V_{dr}}$  doit être positif.

Le schéma du bloc de la commande par mode glissant appliquée à la DFIG est illustré par la figure (III. 3)

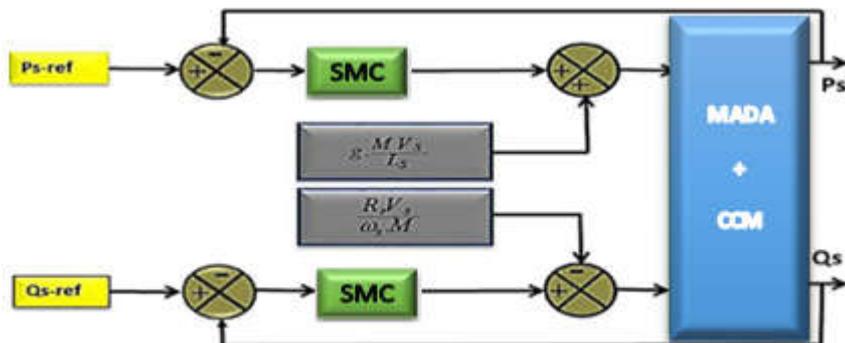


Figure III. 3 : Commande vectorielle directe par mode glissant

III.4.3.Simulation et interprétation des résultats

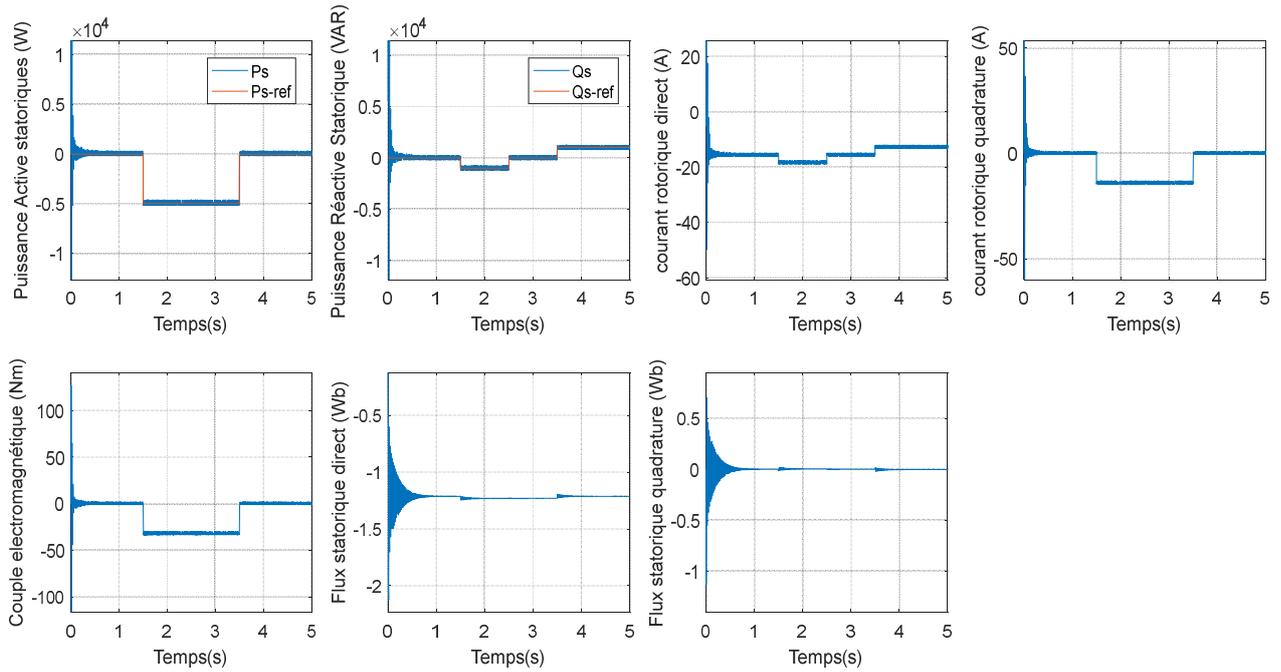


Figure III.4 : Résultats de la Commande vectorielle Directe par mode glissant.

Ces résultats montrent les performances de régulation pour la commande par mode de glissement, d’après ces résultats on constate que la commande par mode glissant à une meilleure régulation telle que précision et stabilité au niveau des puissances statoriques ainsi au niveau des courants rotoriques. Noter que on a pu avoir un très bon temps de réponse par rapport aux régulateurs PI.

III.5. Commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance

III.5.1. Surface de régulation du courant direct [19],[61],[56],[62]

Dans cette partie, on va régler le courant direct et en quadrature de manière similaire à ce qui a été vu au niveau de la régulation des puissances actives et réactives. Nous aurons pour la surface de contrôle

$$S(I_{dr}) = (I_{dr}^{ref} - I_{dr}) \tag{III.30}$$

La dérivée de la surface (III.30) est :

$$\dot{S}(I_{dr}) = (\dot{I}_{dr}^{ref} - \dot{I}_{dr}) \tag{III.31}$$

En remplaçant la dérivée du courant d’équation (II.57) dans (III.31), on aura :

$$\dot{S}(I_{dr}) = \left( \dot{I}_{dr}^{ref} - \frac{1}{\sigma L_r} (V_{dr} - R_r I_{dr} + \omega_r \sigma L_r I_{qr}) \right) \tag{III.32}$$

En remplaçant l’expression de  $V_{dr}$  par  $V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n$ , la commande apparaît clairement dans l’équation suivant :

$$\dot{S}(I_{dr}) = \left( \dot{I}_{dr}^{ref} - \frac{1}{\sigma L_r} \left( (V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n) - R_r I_{dr} + \omega_r \sigma L_r I_{qr} \right) \right) \quad (III.33)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$S(I_{dr}) = 0$ ,  $\dot{S}(I_{dr}) = 0$  et  $V_{dr}^n = 0$  d'où l'on tire la formule de la commande équivalente à partir de la relation (III.33)

$$V_{dr}^{eq} = \left( \sigma L_r \dot{I}_{dr}^{ref} - (-R_r I_{dr} + \omega_r \sigma L_r I_{qr}) \right) \quad (III.34)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $S(I_{dr}) \cdot \dot{S}(I_{dr}) \leq 0$  soit vérifiée, on pose :

$$\dot{S}(I_{dr}) = \left( -\frac{1}{\sigma L_r} V_{dr}^n \right) \quad (III.35)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{dr}^n = K_{V_{dr}} \cdot \text{Sign} \cdot S(I_{dr}) \quad (III.36)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K_{V_{dr}}$  doit être positif.

### III.5.2. Surface de régulation du courant en quadrature [19],[61],[56],[62]

Nous aurons pour la surface du courant en quadrature

$$S(I_{qr}) = \left( I_{qr}^{ref} - I_{qr} \right) \quad (III.37)$$

La dérivée de la surface (III.37) donne :

$$\dot{S}(I_{qr}) = \left( \dot{I}_{qr}^{ref} - \dot{I}_{qr} \right) \quad (III.38)$$

On remplace la dérivée du courant d'équation (II.57) dans (III.38), on aura :

$$\dot{S}(I_{qr}) = \left( \dot{I}_{qr}^{ref} - \frac{1}{\sigma L_r} \left( V_{qr} - R_r I_{qr} - \omega_r \sigma L_r I_{dr} \right) \right) \quad (III.39)$$

En remplaçant l'expression de  $V_{qr}$  par  $V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n$ , la commande apparaît clairement dans l'équation suivant :

$$\dot{S}(I_{qr}) = \left( \dot{I}_{qr}^{ref} - \frac{1}{\sigma L_r} \left( (V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) - R_r I_{qr} - \omega_r \sigma L_r I_{dr} \right) \right) \quad (III.40)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$S(I_{qr}) = 0$ ,  $\dot{S}(I_{qr}) = 0$  et  $V_{qr}^n = 0$  d'où on tire la formule de la commande équivalente à partir de la relation (III.40)

$$V_{qr}^{eq} = \left( \sigma L_r \dot{I}_{qr}^{ref} - (-R_r I_{qr} - \omega_r \sigma L_r I_{dr}) \right) \quad (III.41)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $S(I_{qr}) \cdot \dot{S}(I_{qr}) \leq 0$  soit vérifiée, on pose :

$$\dot{S}(I_{qr}) = \left( -\frac{1}{\sigma L_r} V_{qr}^n \right) \tag{III.42}$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{qr}^n = K_{Vqr} \cdot \text{Sign} \cdot S(I_{qr}) \tag{III.43}$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K_{Vqr}$  doit être positif.

Le schéma du bloc de la commande par mode glissant des courants appliquées à DFIG est illustré par la figure (III.5).

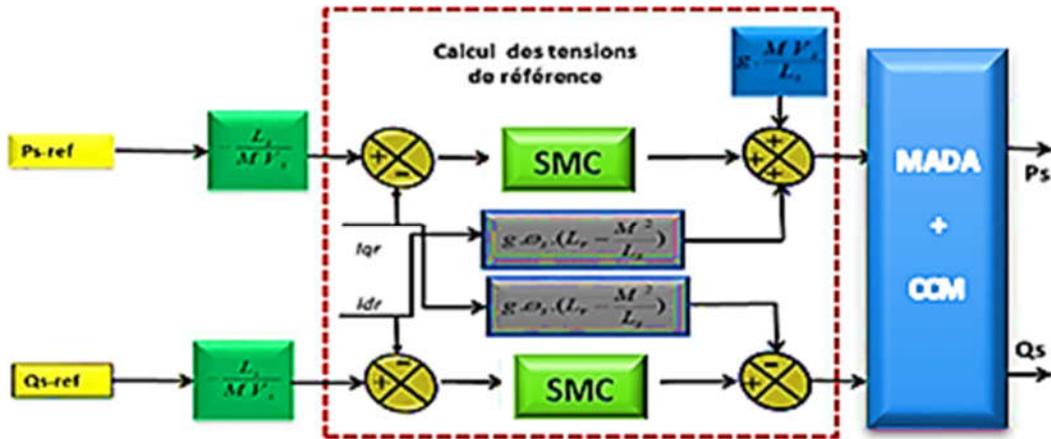


Figure III. 5 : Schéma bloc de la commande a mode glissant en courants appliquée à la DFIG

### III.5.3. Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

Afin d'améliorer la méthode précédente et éliminer l'erreur statique sur les puissances, on ajoute en plus de la boucle de régulations des courants rotorique, une deuxième boucle de régulation des puissances active et réactive. Le gain de régulateur de courant rotorique est déterminé de la même manière que dans la méthode précédente, et pour la régulation de puissance, on utilise un régulateur PI, qui permet d'éliminer l'erreur statique toute en conservant la dynamique du système. [17], [39].

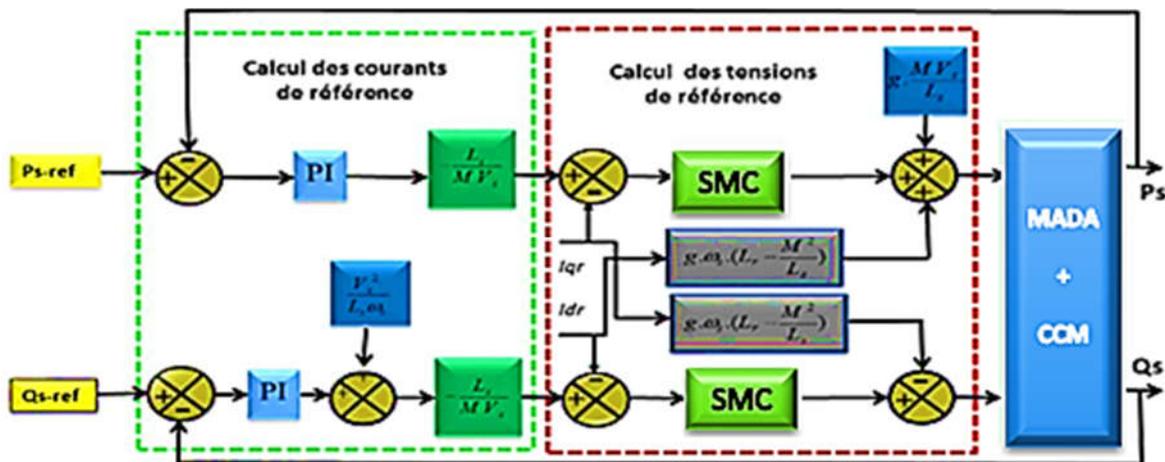


Figure III. 6 : Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

### III.5.4. Simulation et interprétation des résultats

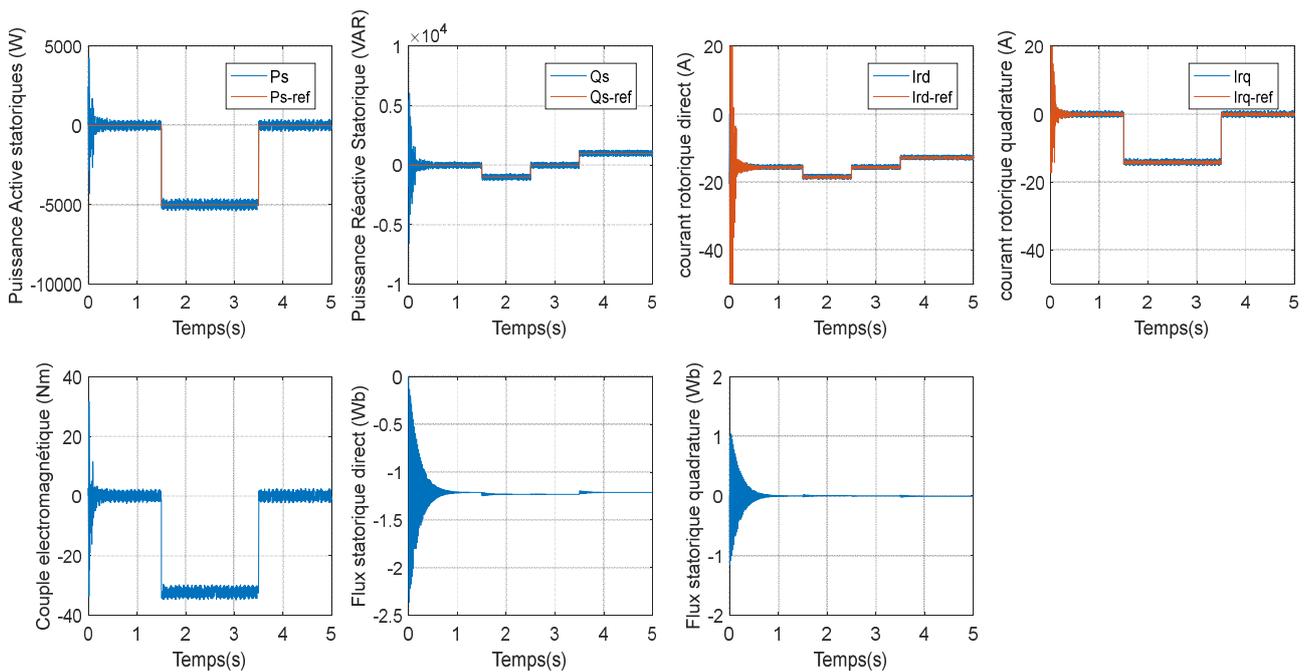


Figure III. 7 : Résultat de simulation de la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

Ces résultats montrent les performances de régulation pour la commande par mode de glissement, d'après ces résultats on constate que la commande par mode glissant à une meilleure régulation telle que précision et stabilité au niveau des puissances statoriques ainsi au niveau des courants rotoriques. La composante quadrature du courant rotorique atteint sa référence rapidement comparativement au régulateur PI sans dépassement et même de la composante directe du courant rotorique.

### III.6. Robustesse de la régulation

Pour une évaluation plus juste de la méthode de contrôle, on fait appel à des tests de robustesses qui seront l'objectif de cette section.

L'évaluation de la robustesse des systèmes de contrôles est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres, ainsi que dans le cas où la mesure des paramètres demeure des incertitudes importantes.

L'objectif de l'essai de robustesse est d'examiner la sensibilité de la commande face aux éventuelles variations des paramètres du système. En effet les calculs de régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés fixes. Toutefois, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances ...). Ajoutons à cela que l'identification de ces paramètres est soumise à des imprécisions dues à la méthode employée et aux appareils de mesure. Conditions de l'essai :

- Résistances  $R_s$ , et  $R_r$ , multipliées par 5.

- Inductances  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M_{sr}$  divisées par 2 [36].

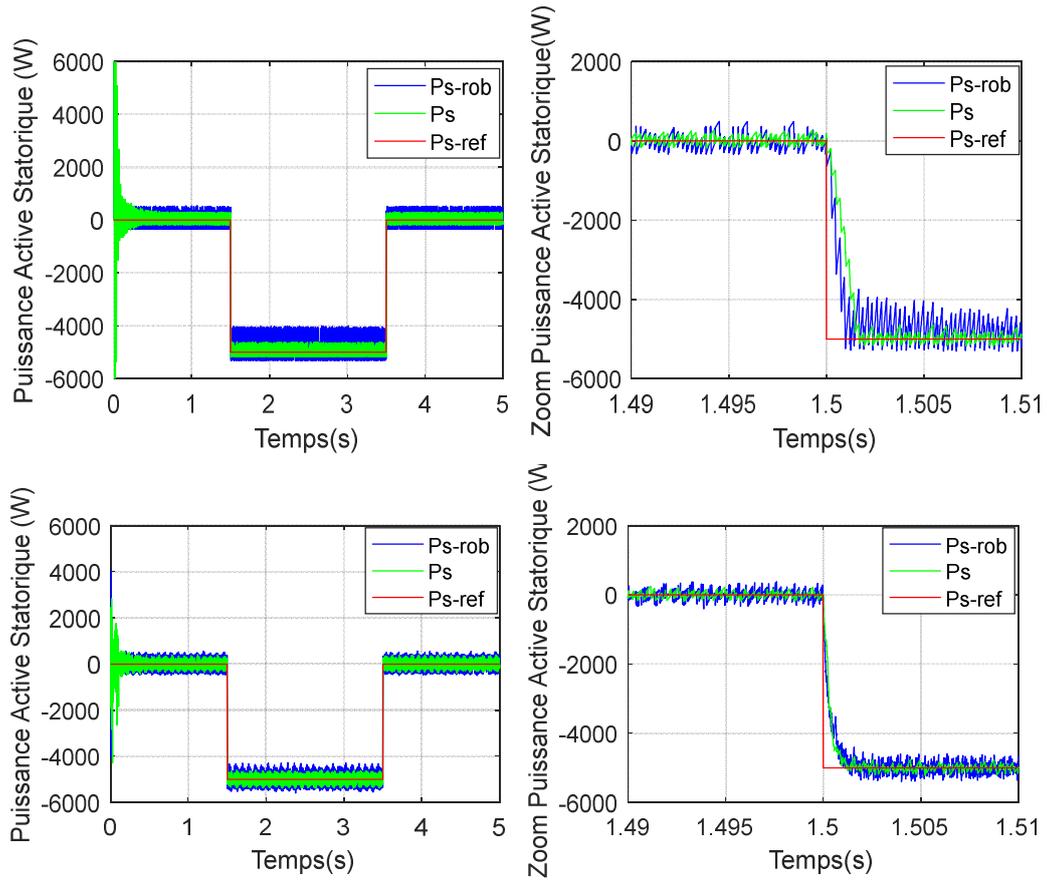


Figure III. 8 : test de robustesse de la commande vectorielle directe et indirecte avec boucle de puissance avec mode glissant

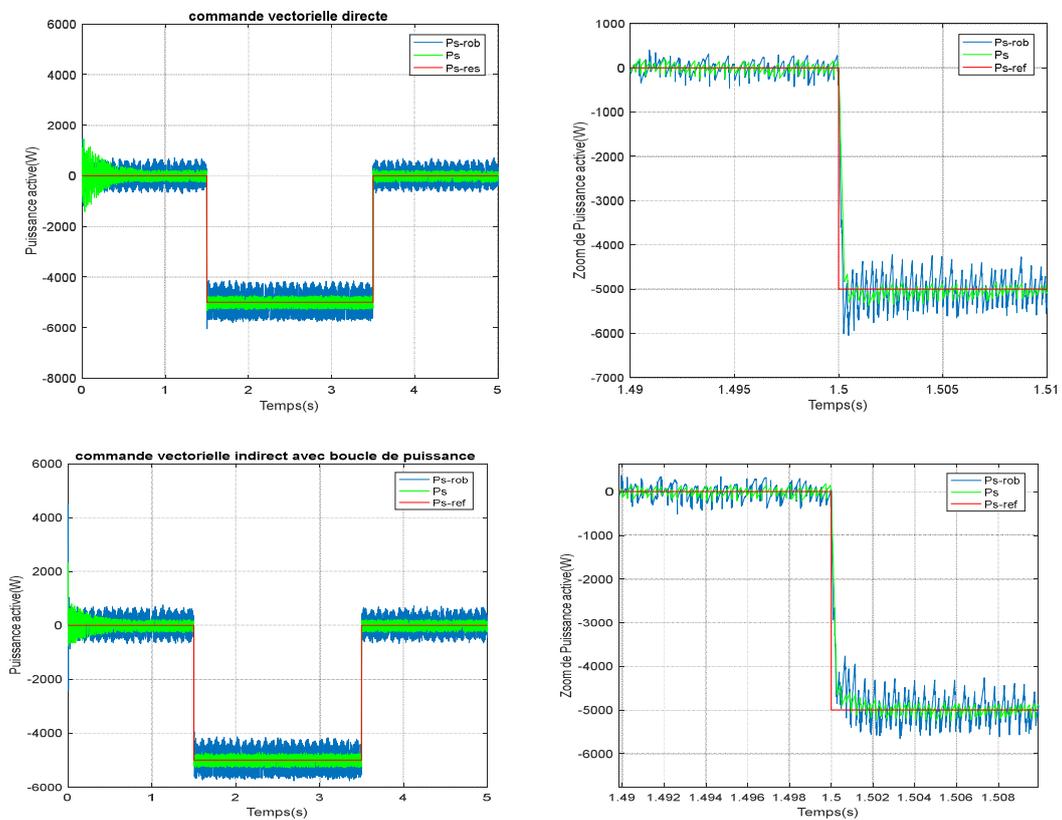


Figure III. 9 : test de robustesse de la commande vectorielle directe et indirecte avec boucle de puissance avec PI

Les figure III.8, III.9 présentent respectivement l'évolution de la puissance active lors des variations des paramètres de la machine asynchrone à double alimentation avec le régulateur PI et régulateur mode glissant. On remarque que ces variations affectent le système de commande avec le contrôleurs PI qui parvient tout de même à garantir le contrôle des puissances. On note certaines ondulations dans la réponse de puissance dans la commande directe et indirecte avec boucle de puissance.

Cependant, ces variations ont posé un effet minime (petites ondulations) pour le réglage a mode glissant comparé au réglage classique par PI. On constate sur l'allure de puissance active que la poursuite est bien réalisée avec une bonne dynamique.

Ces essais de robustesse nous ont dévoilé les points faibles de la commande classique directe et indirecte sans boucle de puissance vis-à-vis des variations des paramètres du système.

En effet, la variation des paramètres de la machine asynchrone à double alimentation a engendré une légère augmentation de temps de réponse pour la commande directe et indirecte sans boucle de puissance, alors qu'elle ne varie pas pour la commande indirecte avec boucle de puissance. Cependant, l'utilisation d'une boucle supplémentaire sur la puissance va permettre de corriger l'erreur statique de la commande sans boucle de puissance et d'attenué le retard de la réponse que présente cette commande.

**III.7. Simulation et interprétation des résultats de la chaine complète**

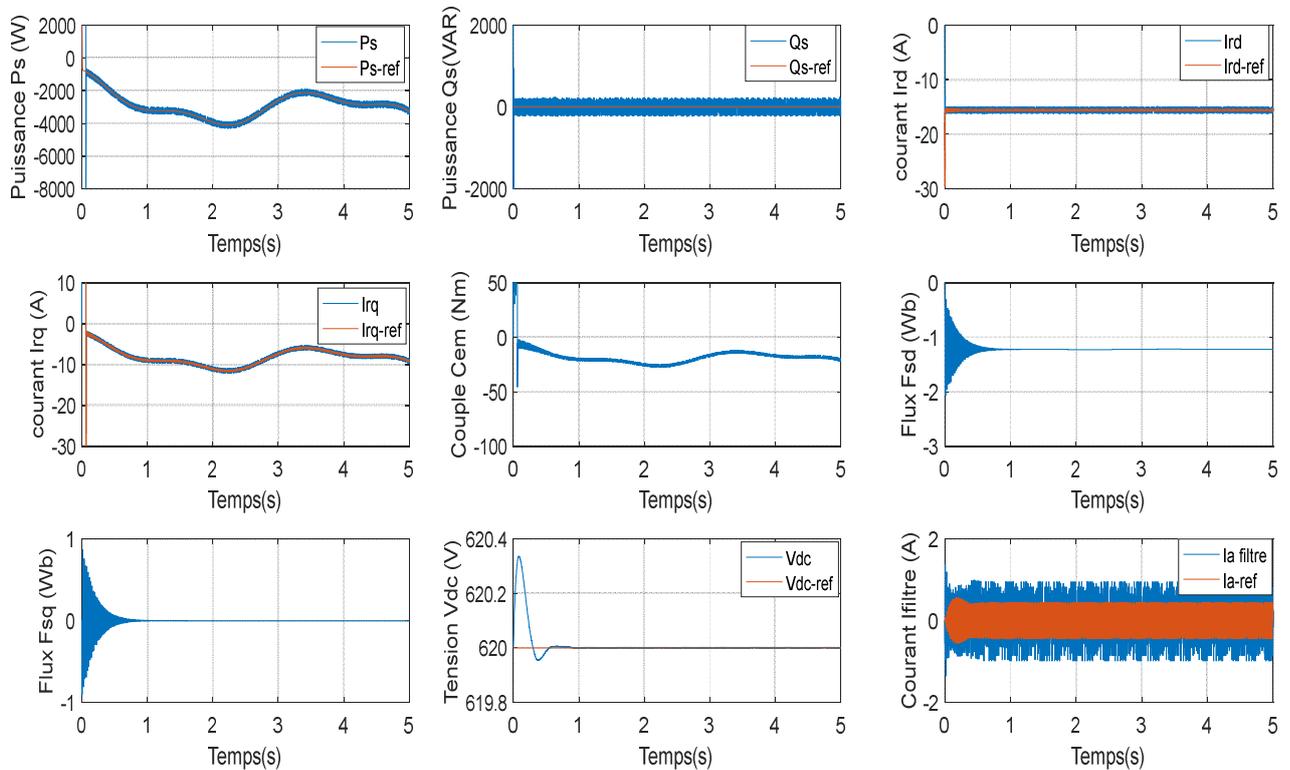


Figure III. 10: résultats de la chaine complète

Malgré la variation des paramètres de la MADA (figure.III.10) nous avons trouvé la puissance active statorique suit sa référence parfaitement ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès ce qui montre bien la robustesse de la commande par mode glissant statorique face à la variation des paramètres de la machine.

### **III.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté en premier lieu les bases théoriques des régulateurs à mode glissant (SMC), après on a procédé à leurs applications dans la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation. Nous avons analysé et ce pour diverses conditions de fonctionnement d'une MADA, puis on a appliqué cette dernière sur le MADA. En outre, des tests de robustesse, ont été effectués pour cette commande en variant les paramètres de la MADA, on a constaté que le réglage par mode glissant avait des meilleures performances par rapport au réglage par PI.

## *Conclusion générale*

---

Le travail que nous avons présenté est une contribution à l'analyse et la synthèse des lois de commande robuste appliquées à la génératrice asynchrone à double alimentation utilisées dans les systèmes éoliens.

Face à cet objectif, notre étude s'est déroulée selon les étapes suivantes :

Dans la première partie de ce mémoire, on a présenté un survol des systèmes de conversion éolienne, et leur évolution durant les dernières années. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie. Ensuite nous avons présenté les différents types des aérogénérateurs à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable. A la fin de cette partie, nous avons pu noter, que la structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en termes de production de puissance élevée en fonctionnement à vitesse variable sur la zone 2 à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines.

Dans la deuxième partie nous avons effectué une modélisation et simulation de la chaîne globale d'un système éolien. Nous avons modélisé dans un premier temps la turbine éolienne et ça commande MPPT, ensuite on s'est intéressé à la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation pour le fonctionnement en mode génératrice. Le développement de différentes méthodes de commande a permis de mettre en évidence des aspects intéressants pour la poursuite de l'étude du système éolien. Après avoir réalisé les différentes commandes appliquées à la MADA, on peut conclure que la commande directe, est la plus simple à mettre en œuvre par rapport à la commande indirecte, cette dernière permet d'obtenir un système performant et robuste fonctionnant en mode génératrice. La fin de ce chapitre présente des modèles de convertisseurs statiques bidirectionnels à deux niveaux (CCM/CCR) qui sont introduits dans la branche rotorique, pour obtenir des représentations plus proches de la réalité d'un système éolien.

La troisième partie est consacrée à l'application de l'une des techniques de commande robuste non linéaire, nommée commande par mode glissant. Les résultats obtenus ont montrés que cette technique de réglage apporte des améliorations remarquables par rapport au contrôle vectoriel, car cette technique offre de bonnes performances statiques et dynamiques, comme elle accorde aussi une meilleure poursuite.

Enfin, nous proposons un certain nombre de perspectives qui peuvent être envisagées :

- Développer des observateurs par commande sans capteur de vitesse ;
- Proposer des stratégies de commande non linéaire telle que le super twisting ;
- L'utilisation de structures différentes des convertisseurs statiques pour le CCM et CCR.

## Bibliographie

---

- [1] M. K. Touati, « Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2015.
- [2] F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [3] S. METATLA, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Mémoire de Magister, École nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.
- [4] G. AGGOUN, « Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne », Mémoire de Magister, Université Mouloud MAMMOURI, Tizi-Ouzou.
- [5] M. Allam, B. Dehiba, M. Abid, Y. Djeriri, and R. Adjoudj, « Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne », J. Adv. Res. Sci. Technol., vol. 1, n° 2, pp. 88–100, 2014.
- [6] S. KOUADRIA, « Etude et réalisation d'un émulateur d'une turbine éolienne », Mémoire de Magister, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2012.
- [7] M. DJAFER, « Etude et contrôle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme Aérogénérateur », Mémoire de Master, Université de M'sila, 2014.
- [8] H. C. BEN DJOUDI and M. A. ARARIA, « Stratégies de Commande DTC-SVM appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », Mémoire de Master Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2016.
- [9] HASSINI née BELGHITRI Houda, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [10] N. K. Merzouk, « Evaluation du Gisement Energétique Eolien-Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie », Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2006.
- [11] A. MAAFA, « Etude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2011.
- [12] M. MALKI and S. A. BELARBI, « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine+ MADA+ Réseau) en mode continu et discret », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2014.

## Bibliographie

---

- [13] N. HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire de Magister, Université MENTOURI de Constantine, 2008.
- [14] B. M. Ali, « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne », Mémoire de Magister, Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou, 2011.
- [15] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [16] I. HAMZAOU, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [17] 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, Nancy 1, 2006.
- [18] A. S. BELFEDHAL, « Modélisation et commande d'une chaîne éolienne avec intégration du stockage inertiel », Mémoire de Magister, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2010.
- [19] H. NAOUEL, « Amélioration des performances des aérogénérateurs », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2013.
- [20] K. FERKOUS, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magister, Université MENTOURI - Constantine, 2009.
- [21] M. S. BRAHIM, « Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [22] B. BELTRAN, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat, Université de BRETAGNE OCCIDENTALE, 2010
- [23] F. AKEL, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne », Mémoire de Magister, Ecole militaire polytechnique d'Alger, 2009.
- [24] M. LOPEZ, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, 2008.
- [25] A. DAVIGNY, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, 2008.
- [26] R. REDJEM, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magister, Université MENTOURI de Constantine, 2009.
- [27] T. DOUADI, « Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone », Mémoire de Magister, Université de Batna

## Bibliographie

---

- [28] A. MOUALDIA, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », Ecole Nationale polytechnique d'Alger, 2014.
- [29] D. H. TRAN, « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne 'passive': analyse de robustesse, validation expérimentale », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [30] A. MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [31] S. Al AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées à un réseau de distribution moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille; Université des sciences et technologies de Lille, 2004.
- [32] L. LOUZE, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée », Thèse de Doctorat, Université MENTOURI - Constantine, 2010.
- [33] B. TOUAL, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2010.
- [34] T. GHENNAM, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille et l'Ecole militaire polytechnique d'Alger, 2011.
- [35] A. GAILLARD, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [36] B. BELABBAS, « Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local », Mémoire de Magistère, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2012
- [37] B. BOUKHEZZAR, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 2006.
- [38] F. MERRAHI, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) », Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique d'Alger, 2007.

## Bibliographie

---

- [39] H. BILAL, « Modélisation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Application à un Système Eolien », Mémoire de Magistère, Université de Sétif, 2012.
- [40] A. BOUAFIA « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI », Thèse de Doctorat Université FERHAT ABBAS - SETIF, 2010.
- [41] E. GHOLIPOUR SHAHRAKI, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1, 2003.
- [42] S. BEAULIEU, « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », Mémoire de la maîtrise en ingénierie Université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [43] V. UTKIN, « Variable structure systems with sliding modes », IEEE Trans. Auto. Control, vol. 22, no. 2, pp. 212–222, 1977.
- [44] J.-J. E. SLOTINE, « Sliding controller design for non-linear systems », Int. J. Control, vol. 40, n°. 2, pp. 421–434, 1984.
- [45] J. J.SLOTINE J. K. HEDRICK E. A. MIZAWA « On sliding observer for nonlinear Systems », Jour. Dynam. Syst. Measur. Control, Vol.109-245, 1987.
- [46] J.-J. E. SLOTINE, « Applied nonlinear control », vol. 199. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [47] F. HARASHIMA, H. HASHIMOTO, and S. KONDO, « MOSFET converter-fed position servo system with sliding mode control », IEEE Trans. Ind. Electron., n°. 3, pp. 238–244, 1985.
- [48] A. HUSSAIN, « Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants », Thèse de Doctorat, Université de Reims, France 2008.
- [49] B. CHERIF, « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Magister, Université de Biskra 2014.
- [50] A. BOUMEDIENE, « Recherche et développement de nouvelles approches de commandes d'une machine synchrone autopilotée alimentée en tension », Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique d'Alger, 2007.
- [51] A. OUKACI, « Commande par mode glissant des paramètres électriques de la machine asynchrone », Mémoire de Magister Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.
- [52] SAIBI. A, MAHMOUDI.M .O .H, L. NAZLI, « Commande par mode de glissement d'une machine synchrone double étoile alimentée par onduleurs `a MLI à trois niveaux »,

## Bibliographie

---

- 4<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering, CEE'06, Batna University, pp. 215–220, 2006.
- [53] S. KOUADRIA, Y. MESSLEM, and E. M. BERKOUK, « Sliding mode control of the active and reactive power of DFIG for variable-speed wind energy conversion system », in Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC'15), third International, 2015, pp. 1–8.
- [54] M. ADJOUJ, M. ABID, A. G. AISSAOUI, Y. RAMDANI, and H. BOUNOUA, « Sliding mode control of a doubly fed induction generator for wind turbines », *Convers. Syst. Rev Roum Sci Techn–Électrotechn Énerg*, vol. 56, no. 1, pp. 15–24, 2011.
- [55] A. MEHDI, A. REAMA, H. E. MEDOUCE, S. E. REZGUI, and H. BENALLA, « Direct active and reactive power control of DFIG based wind energy conversion system », In International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), p. 1128-1133, 2014.
- [56] B. BELABBAS, « Hybrid Fuzzy sliding mode performance control applied to a DFIG system for the production and integrated wind energy into a power grid based three-level converters », *Balkan Journal Of Electrical & Computer Engineering*, Vol.1, N° .2, 2013.
- [57] D. KAIROUS, R. WAMKEUE, and B. BELMADANI, « Sliding mode control of DFIG based variable speed WECS with flywheel energy storage », in *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, 2010, pp. 1–6.
- [58] S. EL. MEHDI, M. ABID, « Commande par Mode Glissant Flou d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation », 2<sup>ème</sup> Journées Internationales sur les Énergies Renouvelables et le Développement Durable. Laghouat, 2012.
- [59] S. ARDJOUN, M. ABID, A. AISSAOUI, and A. NACERI, « Commande par Mode Glissant d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation », in *ICRE*, 2012, vol. 15, p. 16.
- [60] S. V. PATURCA, M. COVRIG, and L. MELCESCU, « Direct torque control of permanent magnet synchronous motor (PMSM)—an approach by using space vector modulation (SVM) », in *Proceedings of the 6<sup>th</sup> WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Tenerife, Spain*, 2006.
- [61] B. HAMANE, M. L. DOUMBIA, A. M. BOUHAMIDA, and M. BENGHANEM, « Direct active and reactive power control of DFIG based WECS using PI and sliding mode controllers », in *Industrial Electronics Society, IECON 2014-40<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE*, 2014, pp. 2050–2055.

## Bibliographie

---

- [62] Y. BEKAKRA and D. B. ATTOUS, « DFIG sliding mode control fed by back-to-back PWM converter with DC-link voltage control for variable speed wind turbine », Front. Energy, vol. 8, n° 3, p. 345, 2014.

ANNEXE A

Les paramètres du système de conversion d'énergie éolienne :

❖ Paramètres de la turbine :

Nombre de pales : 3 ; Rayon  $R=3\text{m}$   
Vitesse du vent  $V=6\text{m/s}$  ; La masse volumique de l'air  $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$   
Coefficient de frottement  $f=0.00731\text{ N}$  ; Moment d'inertie  $J=0.3139\text{ Kg. m}^2$   
Gain du multiplicateur  $G=5.4$  ; Coefficient de puissance max  $C_{p_{\max}}=0.48$   
Ratio de vitesse optimale  $\lambda_{\text{opt}}=8.1$

❖ Paramètres de la MADA

Le coefficient de frottement  $F=6.73\text{e-}3\text{ Nm/rad/s}$  ; La tension rotorique nominale  $V_{rn}=12.44\text{V}$   
La fréquence statorique  $F_{sn}=50\text{ Hz}$  ; La fréquence rotorique  $F_{rn}=2\text{ Hz}$   
Puissance nominale  $P_n=7.5\text{e}3\text{ W}$  ; Le courant nominal  $I_{sn}=2.7\text{ A}$   
La vitesse nominale  $N_n=1440\text{ tr/min}$  ; Le nombre de pair de pôles  $p=2$   
La résistance statorique  $R_s=0.455\text{ohm}$  ; La résistance rotorique  $R_r=0.62\text{ohm}$   
L'inductance cyclique statorique  $L_s=0.084\text{H}$  ; L'inductance cyclique rotorique  $L_r=0.081\text{H}$   
L'inductance mutuelle  $M_{sr}=0.078\text{H}$  ; Moment d'inertie  $J=0.3125\text{ Kg/m}^2$

❖ Le bus continu :

La capacité du condensateur  $C=4700\text{e-}6\text{ F}$  ; La tension  $V_{dc}=620\text{V}$

❖ Le réseau électrique :

La tension du réseau  $V=220/380\text{V}$  ; La fréquence du réseau  $F=50\text{Hz}$

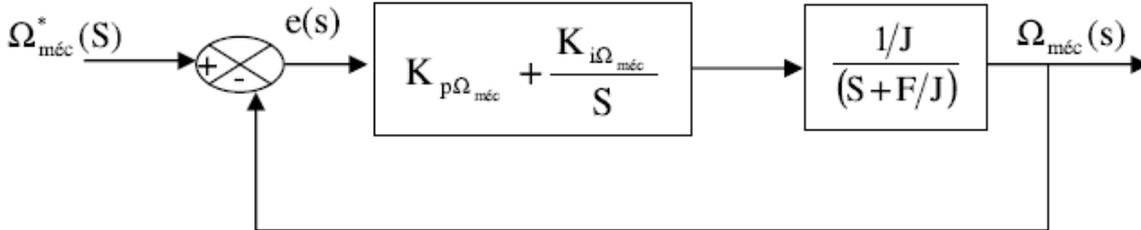
❖ Le filtre RL :

La résistance du filtre  $R_f=0.2\text{ ohm}$  ; L'inductance du filtre  $L_f=11.5\text{e-}3\text{ H}$

ANNEXE B

**Dimensionnement du régulateur de la vitesse (MPPT) :**

Le calcul des régulateurs est basé sur la dynamique en boucle fermée à l'aide du principe de compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est présentée par le schéma bloc de la figure suivante.



Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{p\Omega_{méc}}}{S} \left( S + \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \right) \quad (B.1)$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (B.2)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{méc}^*} = \frac{1}{\frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} S + 1} \quad (B.3)$$

$$\tau = \frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (B.4)$$

Le régulateur de la vitesse  $\Omega_{méc}$ , est :

$$\begin{cases} K_{p\Omega_{méc}} = \frac{J}{\tau} \\ K_{i\Omega_{méc}} = \frac{F}{\tau} \end{cases} \quad (B.5)$$

**Le régulateur mode glissant**

La conception du régulateur mode glissant se fait en trois étapes :

- Choix de la surface : la surface de régulation de la vitesse dont le degré relatif  $r=1$  a la forme suivante :

$$S\Omega = \Omega_{ref} - \Omega_{méc} \quad (B.6)$$

La dérivée de la surface est donnée par :

## Annexe

$$\Delta S\Omega = \Delta\Omega_{ref} - \Delta\Omega_{méc} \quad (B.7)$$

La dérivée de la vitesse mécanique est définie :

$$\Delta\Omega_{méc} = \frac{C_{em} - C_r - Kf\Omega}{J} \quad (B.8)$$

Nous décomposons le couple électromagnétique en deux entiers  $C_{em-eq}$  et  $C_{em-n}$  : En remplaçant le couple par les deux entiers l'équation précédente, la dérivée de la surface devient :

$$\Delta\Omega_{méc} = \Delta\Omega_{ref} - \left[ \frac{(C_{em} - eq + C_{em-n}) - Cr - Kf\Omega}{J} \right] \quad (B.9)$$

Condition de convergence : durant le mode de convergence nous avons :

$$(S\Omega) \cdot (\Delta S\Omega) \leq 0 \quad (B.10)$$

Calcul de la commande : l'algorithme de commande est défini par la relation :

$$C_{ref} = C_{em-eq} + C_{em-n} \quad (B.11)$$

Le couple électromagnétique nominale est celle d'une fonction saturation :

$$C_{em-n} = K\Omega Sat(S\Omega) \quad (B.12)$$

Le choix de  $K\Omega$ , se fait de façon à imposer la valeur désirée à la sortie du régulateur. Donc nous obtenons :

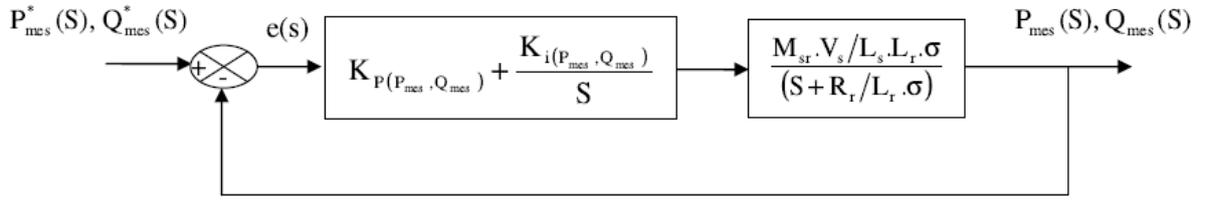
$$\begin{cases} C_{em-n} = K\Omega sat(S\Omega) \\ C_{em-eq} = Cr + Kf\Omega - J \cdot \Delta\Omega_{ref} \end{cases} \rightarrow \Delta S\Omega = 0 \quad (B.13)$$

ANNEXE C :

Dimensionnement des régulateurs de la commande vectorielle

Commande Vectorielle directe

La figure suivante montre une partie de notre système bouclé est corrigé par un régulateur (PI) dont la fonction de transfert est de la forme  $K_{p(p_{mes}, Q_{mes})} + \frac{K_{i(p_{mes}, Q_{mes})}}{S}$ . La détermination des paramètres  $K_{p(p_{mes}, Q_{mes})}$  et  $K_{i(p_{mes}, Q_{mes})}$  du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans cette partie.



Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})}}{S} \left( S + \frac{K_{i(p_{mes}, Q_{mes})}}{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})}} \right) \quad (C.1)$$

Par compensation :

$$\frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{i(p_{mes}, Q_{mes})}}{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})}} \quad (C.2)$$

La fonction de transfert en boucle fermé est la suivante :

$$\frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau \cdot S} \quad (C.3)$$

$$\tau = \frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})} \cdot M_{sr} \cdot V_s} \quad (C.4)$$

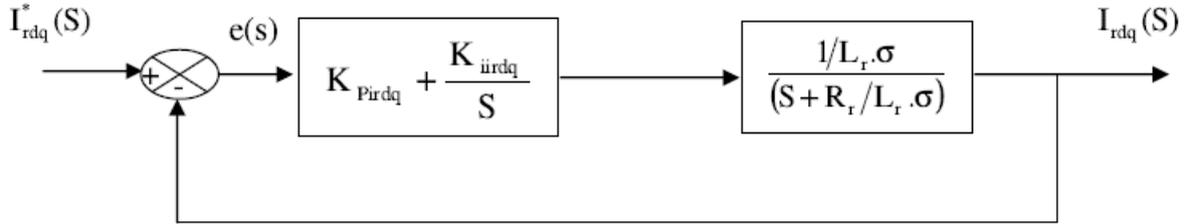
Le Régulateur de la puissance active est réactif est :

$$\begin{cases} K_{p(p_{mes}, Q_{mes})} = \frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{\tau \cdot M_{sr} \cdot V_s} \\ K_{i(p_{mes}, Q_{mes})} = \frac{L_s \cdot R_r}{\tau \cdot M_{sr} \cdot V_s} \end{cases} \quad (C.5)$$

## Commande Vectorielle indirecte

### Commande Vectorielle indirecte sans boucle de puissance

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe.



Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{pirdq}}{S} \left( S + \frac{K_{iirdq}}{P_{pirdq}} \right) \quad (C.6)$$

Par compensation :

$$\frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{iirdq}}{K_{pirdq}} \quad (C.7)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{pirdq}} S + 1} \quad (C.8)$$

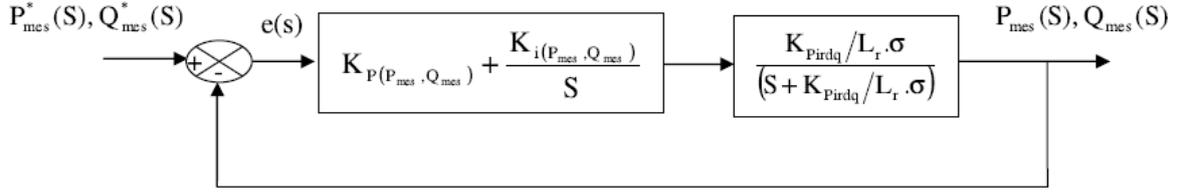
Le système du premier ordre, sa fonction de transfert s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{K}{\tau_1 S + 1} \\ \tau_1 = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_{pirdq}} \end{cases} \quad (C.9)$$

Le régulateur du courant rotorique dans les deux axes est :

$$\begin{cases} K_{pirdq} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_1} \\ K_{iirdq} = \frac{R_r}{\tau_1} \end{cases} \quad (C.10)$$

**Commande Vectorielle indirecte avec boucle puissance**



Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})}}{S} \left( S + \frac{K_{i(p_{mes}, Q_{mes})}}{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})}} \right) \quad (C.11)$$

Par compensation :

$$\frac{K_{pirdq}}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{i(p_{mes}, Q_{mes})}}{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})}} \quad (C.12)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})} \cdot K_{pirdq}} S + 1} \quad (C.13)$$

Le système de premier ordre, sa fonction de transfert s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau_2 \cdot S} \\ \tau_2 = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_{p(p_{mes}, Q_{mes})} \cdot K_{pirdq}} \end{cases} \quad (C.14)$$

Le régulateur de la puissance active et réactive est :

$$\begin{cases} K_{p(p_{mes}, Q_{mes})} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_2 \cdot K_{pirdq}} \\ K_{i(p_{mes}, Q_{mes})} = \frac{1}{\tau_2} \\ \text{avec:} \\ \tau_2 > \tau_1 \end{cases} \quad (C.15)$$

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة مختلف طرق التحكم وذلك من أجل تحسين أداء المولدات اللاتزامنية ثنائية التغذية التي تستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية. بعد الخلفية الوجيزة على نظام تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية، قمنا بنمذجة مختلف الأجزاء المكونة لهذا النظام، ثم قمنا بعرض وتطبيق مختلف طرق التحكم الشعاعي المباشر وغير المباشر على الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية وذلك باستعمال المصحح الكلاسيكي، ثم قمنا بتطبيق تقنية التحكم الغير خطي عن طريق المصحح الانزلاقي، من أجل تحسين برنامج التحكم الشعاعي، وفي الأخير أجرينا مقارنة بين المصححين (الكلاسيكي، والمصحح الانزلاقي). برمجة رقمية في الماتلاب سيميلينك تم إنجازها لاختبار مدي فعالية الطرق التي تم طرحها.

**الكلمات المفتاحية:** المولدات اللاتزامنية ثنائية التغذية، التحكم الشعاعي المباشر، التحكم الشعاعي الغير المباشر، المصحح الكلاسيكي، المصحح الانزلاقي.

## Résumé

L'objectif de ce mémoire de fin d'étude est d'introduire des stratégies de commandes Robuste pour améliorer les performances de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée pour la production de l'énergie électrique. Après un bref rappel théorique sur la chaîne de conversion d'énergie éolienne, on dresse un état de l'art en exposant quelques travaux effectués dans le domaine. On modélise la chaîne de conversion d'énergie éolienne puis, on aborde le contrôle vectoriel direct et indirect avec ou sans boucle de puissance appliqués de la MADA. La technique de commande non linéaire « dite en mode glissant » est ensuite introduite. Ont conclue avec un test de robustesse de cette commande et on la compare avec la commande par le régulateur classique PI. Des simulations numériques sur Matlab/Simulink ont été implantées pour valider les méthodes proposées.

**Mots clés :** Machine asynchrone à double alimentation (MADA), Commande vectoriel direct, Commande vectoriel indirect, contrôle vectoriel indirecte, Mode glissant.