

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergies Renouvelables**

*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

Intitulé :

---

### UTILISATION DE LA LOGIQUE FLOUE POUR LA COMMANDE D'UNE ÉOLIENNE À BASE DE LA MADA

---

Présenté par :

- Benabdallah Marwa
- Goffa Nadjat
- Abdellaoui Yamina

*Soutenu le : 30/06/2022*

*devant le Jury :*

<b>M. TAIBI Brahim</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Président</b>
<b>M. HABCHI Yassine</b>	<b>MCA</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Encadreur</b>
<b>M. KENDZI Mohammed</b>	<b>DR</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Co-Encadreur</b>
<b>M. BRAHIMI Mohammed</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. BENMOHAMED FAYSSAL</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Invité</b>

## REMERCIEMENT

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté ainsi que la santé et la paix de l'esprit et de nous avoir aidé d'achever ce travail.

Nous remercions **Mr HABCHI YASSINE** pour avoir accepté d'être l'encadreur de ce mémoire et pour son aide et ses conseils judicieux.

Nous voudrions exprimer aussi, combien est notre reconnaissance envers notre Co-encadreur **Mr KENDZI MOHAMMED** qui n'a pas épargné aucun effort pour nous diriger et nous orienter, ainsi que pour sa gentillesse et son aide illimité.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, ayant intervenu par leurs conseils, leurs encouragements, et ayant accepté de nous rencontrer et répondre à nos questions durant la réalisation de ce travail.

Nos vifs remerciements vont aussi à **Mr TAIBI Brahim** qui a accepté de présider le jury de soutenance, ainsi qu'à **Mr BRAHIMI Mohammed** qui a accepté de participer en qualité d'examineur dans ce jury.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

## Dédicace

J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail,

À mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privation pour m'aider à avancer dans la vie, puisse DIEU faire en sorte que ce travail porte son fruit.

À ma chère mère, pour son soutien inconditionnel, ses encouragements, et bien sûr pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.

À mon très cher frère ABDESSAMED, et à mes sœurs ASMA et LINA et mon adorable petite sœur RABAB.

À mes chères collègues NADJET et AMINA pour leur soutien moral, leur patience et leur compréhension tout au long de ce projet.

À mes chères copines ARWA, AICHA, NADJET, IMENE, FATIMA qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours universitaire.

À ma famille et toutes les personnes que j'aime.

À tous mes aimables amis de promotion de 2<sup>ème</sup> année Master en Electrotechnique.

**MARWA BENABDALLAH**

« Aux grands cœurs pleins d'amour passion et d'espoir »

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la patience à fin

D'effectuer ce travail.

Je dédie ce modeste travail à :

À tous ceux qui me sont les plus chères sur la terre

Mon cher père qui est mon maître pour toujours

Ma très chère mère que le DIEU me la garde

À mes sœurs et mes frères BOUALLAM et NOUREDDINE

À tous les membres de ma famille et mes proches et toute personne qui  
porte le nom ABDELLAOUI

À mes chères collègues NADJET et MARWA pour leur soutien moral, leur  
patience et leur compréhension tout au long de ce projet

À mes chères copines IKRAM, FATIMA, INESS qui m'ont accompagné tout  
au long de mon parcours universitaire

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce  
travail, je vous dis merci.

À tous mes aimables amis de promotion de 2<sup>ème</sup> année Master en  
Electrotechnique, et toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

**YAMINA ABDELLAOUI**

J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail,

À mon père, qui m'a toujours soutenu et a imprégné dans mon cœur le sens de la morale et de la tolérance, et a établi dans mon esprit l'idée d'obtenir les choses avec mérite.

À ma mère, qui s'est toujours sacrifiée pour moi, qui m'a encouragée tout au long de mes études, "je prie Dieu de les protéger".

À mes chers frères et sœurs et leurs familles.

À mon grand-père et ma grand-mère que DIEU leurs donne une longue et joyeuse vie.

À mes chères collègues MARWA et AMINA pour leur soutien moral, leur patience et leur compréhension tout au long de ce projet.

À mes chères copines ARWA, AICHA, MARWA, IMENE, FATIMA qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours universitaire.

À ma famille et toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé à compléter ce mémoire.

À tous mes aimables amis de promotion de 2<sup>ème</sup> année Master en Electrotechnique, et toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

**NADJET GOFFA**

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Figure I.2 : Différentes rotor de type Darrieus	5
Figure I.3 : Le roto de Savonius	6
Figure I.4 : Différents configuration éoliennes	7
Figure I.5 : Les éléments d'une éolienne	8
Figure I.6 : Principales composantes d'une turbine éolienne	8
Figure I.7 : Tube de courant autour d'une éolienne	10
Figure I.8 : La conversion De l'énergie cinétique du vent	11

### CHAPITRE II

Figure II.1 : Système de conversion d'énergie éolienne à base de MADA	13
Figure II.2 : Modèle d'une turbine éolienne avec MADA	14
Figure II.3 : Caractéristique de coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de $\lambda$	16
Figure II.4 : Schéma équivalent d'une turbine éolienne	17
Figure II.5 : Schéma bloc du modèle de turbine	18
Figure II.6 : Présentation d'alimentation d'une MADA	19
Figure II.7 : Fonctionnement moteur hypo-synchrone	20
Figure II.8 : Fonctionnement moteur hyper- synchrone	20
Figure II.9 : Fonctionnement générateur hypo- synchrone	21

Figure II.10 : Fonctionnement générateur hyper- synchrone	21
Figure II.11 : Les enroulements statorique et rotorique de La MADA	23
Figure II.12 : Principe de la transformation de PARK	25
Figure II.13 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé	27
Figure II.14 : Redresseur triphasé à diodes	29
Figure II.15 : Modèle de filtre	30

### CHAPITRE III

Figure III.1 : Schéma de principe de la commande vectorielle	32
Figure III.2 : Commande vectorielle par orientation du flux statorique	33
Figure III.3 : Schémas bloc de la MADA	35
Figure. III.4 : Boucle de régulation de la puissance active/réactive	36
Figure III.5 : Schéma bloc de la commande directe	38
Figure III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle	39
Figure III.7 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle.	40
Figure III.8 schéma de la structure interne de la mise en œuvre d'un contrôleur flou.	41
Figure III.9 Opérateur ET.	42
Figure III.10 Opérateur OU.	43
Figure III.11 Opérateur NON.	43
Figure III.12 Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive.	45

## CHAPITRE IV

Figure IV.1 La commande par logique floue.	46
Figure IV.2 Les fonctions d'appartenance : (A) : Erreur $K_e$ , (B) : Changement d'erreur $\Delta K_e$ , (C) : La fonction de sortie $K_u$ .	47
Figure IV.3 Schéma bloc de la MADA sans contrôle	48
Figure IV.4 Variation de la puissance active statorique ( $P_s$ ) sans contrôle en fonction du temps.	48
Figure IV.5 Variation de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) sans contrôle en fonction du temps	49
Figure IV.6 Schéma bloc de la MADA avec contrôleur PI	49
Figure IV.7 Adaptation de la puissance active statorique ( $P_s$ ) en fonction du temps par le contrôleur PI.	50
Figure IV.8 Adaptation de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) en fonction du temps par le contrôleur PI.	50
Figure IV.9 Contrôle de la puissance active statorique ( $P_s$ ) par le contrôleur PI.	51
Figure IV.10 Contrôle de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) par le contrôleur PI.	51
Figure IV.11 Schéma bloc avec contrôleur logique floue	52
Figure IV.12 Adaptation de la puissance active statorique ( $P_s$ ) en fonction du temps par deux contrôleurs PI et logique floue.	52
Figure IV.13 Adaptation de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) en fonction du temps par deux contrôleurs PI et logique floue.	53
Figure IV.14 Contrôle de la puissance active statorique ( $P_s$ ) par deux contrôleurs PI et logique floue.	53

Figure IV.15 Contrôle de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) par deux contrôleurs PI et logique flou	54
--	----

# LISTE DES SYMBOLES

## Nomenclature

- $\beta$  : Angle d'orientation des pales
- $\theta$  : Angle électrique de position
- $C_{em}$  : Couple électromagnétique
- $g$  : Glissement
- $L_r$  : Inductance cyclique rotorique
- $L_s$  : Inductance cyclique statorique
- $M$  : Inductance magnétisante
- $p$  : Nombre de paires de pôles
- $P_s$  : Puissance active statorique
- $Q_s$  : Puissance réactive statorique
- $\omega_s$  : Pulsation des grandeurs statoriques
- $\omega_r$  : Pulsation des grandeurs rotoriques
- $R_r$  : Résistance rotorique
- $R_s$  : Résistance statorique
- $I_{ds}$  : Courant statorique sur l'axe d
- $I_{qs}$  : Courant statorique sur l'axe q
- $I_{dr}$  : Courant rotorique sur l'axe d
- $I_{qr}$  : Courant rotorique sur l'axe q
- $V_{ds}$  : Tension statorique sur l'axe d
- $V_{qs}$  : Tension statorique sur l'axe q
- $V_{dr}$  : Tension rotorique sur l'axe d

- $V_{qr}$  : Tension rotorique sur l'axe q
- $\phi_{ds}$  : Flux statorique sur l'axe d
- $\phi_{qs}$  : Flux statorique sur l'axe q
- $\phi_{dr}$  : Flux rotorique sur l'axe d
- $\phi_{qr}$  : Flux rotorique sur l'axe q
- $\theta_s$  : Angles électriques statorique
- $\theta_r$  : Angles électriques rotorique
- $C_p$  : Coefficient de puissance.
- $G$  : Gain du multiplicateur.
- $\rho$  : La masse volumique de l'air
- $S$  : La surface circulaire balayée par la turbine
- $V_{vent}$  : La vitesse du vent
- $P_{aéro}$  : La puissance aérodynamique de la turbine
- $\lambda$  : Le coefficient de la vitesse relative
- $P_v$  : La puissance du vent
- $R$  : Le rayon de l'aérogénérateur
- $C_{aéro}$  : Le couple aérodynamique de la turbine
- $C_{méc}$  : Le couple mécanique
- $C_t$  : Le couple de la turbine
- $\Omega_t$  : La vitesse de rotation de la turbine avant le multiplicateur
- $\Omega_{mec}$  : La vitesse de rotation de la turbine après le multiplicateur
- $J_{turbine}$  : L'inertie de la turbine
- $J_{mec}$  : L'inertie de la génératrice
- $C_g$  : Couple issu de multiplicateur
- $C_f$  : Couple des frottements visqueux

- $f_t$  : le coefficient de frottement visqueux
- $M_{sr}$  : La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase de stator et rotor
- $P_m$  : Puissance mécanique
- $P_r$  : Puissance active rotorique
- $I_{as} I_{bs} I_{cs}$  : Les courants statoriques dans le repère triphasé
- $I_{ar} I_{br} I_{cr}$  : les courants rotoriques dans les repères triphasés
- $V_{s abc} V_{r ab}$  : Tension triphasé statorique et rotorique de la machine
- $\phi_{as} \phi_{bs} \phi_{cs}$  : Flux statorique dans le repère triphasé
- $\phi_{ar} \phi_{br} \phi_{cr}$  : Flux rotorique dans le repère triphasé
- [P] : La matrice de PARK
- $V_{red}$  : Tension redressé
- $K_i$  : Gain intégral du contrôle des puissances statoriques.
- $k_p$  : Gain proportionnel du contrôle des puissances statoriques
- $E_p$  : Entrée d'erreur régulatrice floue de puissance
- $dE_p$  : Entrée dérivée d'erreur régulatrice floue de puissance.
- $dI_{qr}$  : Signale de command du système
- ref : Indice indiquant la référence (la consigne)
- $P_{mes}$  : Puissance active mesuré
- $Q_{mes}$  : Puissance réactive mesuré
- $P_{ref}, Q_{ref}$  : Puissance active et réactive référence

---

## Glossaire

MADA : Machine asynchrone double alimentation

GADA : Générateur asynchrone double alimentation

CCM : Convertisseur coté machine

CCR : Convertisseur coté réseau

RLF : Régulateur à logique floue

PI : Proportionnel-Intégrale

FTBO : Fonction de transfert en boucle ouvert

FTBF : Fonction de transfert en boucle fermé

---

## Liste de tableaux

Tableau I.1 Classification des turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.	7
Tableau IV.1 Règles de control possible basées sur cinq fonctions d'appartenance	47

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS</b>	
I.1. Introduction .....	4
I.2. Définition et généralités sur le système éolien .....	4
I.3. Différents types d'éolienne et leur utilisation .....	5
I.3.1. Eolienne à axe verticale .....	5
I.3.2. Eolienne à axe horizontal .....	7
I.4. Structure d'une éolienne .....	8
I.5. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .....	10
I.5.1 Loi de Betz .....	10
I.5.2 La chaîne de conversion éolienne .....	11
I.5.3 Principe de la conversion d'énergie éolienne .....	11
I.5.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	12
I.6 Conclusion .....	12
<b>CHAPITRE II : MODELISATION D'UN SYSTEME DE CONVERSION EOLIENNE A BASE DE MADA</b>	
II.1. Introduction .....	13
II.2. Structure générale d'un système éolien basé sur une MADA .....	13
II.3. Modélisation d'une turbine éolienne .....	14
II.3.1. Multiplicateur .....	16
II.3.2. Modèle de l'arbre mécanique .....	16
II.3.3. Schéma bloc du modèle de la turbine .....	18

---

II.4. Présentation de la machine asynchrone double alimentation .....	19
II.4.1. Fonctionnement de MADA .....	19
II.4.2. Domaine d'application de MADA .....	21
II.4.3. Avantages et inconvénients de la MADA .....	22
II.5. Modélisation de la MADA .....	22
II.5.1. Hypothèse simplificatrice .....	22
II.5.2. Modèle mathématique de la MADA .....	23
II.5.3. Application de la transformation de PARK a la MADA .....	25
II.6. Modélisation des convertisseurs statiques .....	27
II.6.1. Modélisation de l'onduleur .....	27
II.6.2. Modélisation de redresseur .....	28
II.6.3. Modélisation de filtre .....	29
II.7. Conclusion.....	30

### **CHAPITRE III : Modélisation de la commande vectorielle et la logique floue pour le control de la MADA**

III.1. Introduction .....	31
III.2. Commande vectorielle de la MADA .....	31
III.2.1. But et principe de la commande vectorielle .....	31
III.2.2. Variantes de la commande vectorielle .....	32
III.2.3. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances .....	33
III.2.4. Synthèse du régulateur proportionnel intégrale (PI) pour le contrôle des puissances ...	36
III.2.5. Structure de la commande .....	38
III.2.5.1. Commande directe .....	38
III.2.5.2. Commande indirecte.....	39

---

III.2.5.2.a. Commande indirecte sans boucle .....	39
III.2.5.2.b. Commande indirecte avec boucle .....	39
III.2.6. Les avantages et les inconvénients de la commande vectorielle .....	40
III.3. Commande par logique floue .....	41
III.3.1. Principe de la logique floue .....	41
III.3.2. Opérateurs utilisés dans la logique floue .....	42
III.3.3. Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue .....	44
III.3.4. Application de la logique floue à la commande de la puissance active et réactive de la MADA .....	44
III.4. Conclusion .....	45
<b>CHAPITRE IV : Simulation et Interprétation de Résultats</b>	
IV.1. Introduction.....	46
IV.2. Choix des paramètres de la stratégies du contrôle par logique floue .....	46
IV.3. Simulation de la MADA sans contrôle .....	48
IV.4. Simulation de la MADA contrôlé par le contrôleur PI .....	49
IV.5. Simulation par la logique floue .....	52
IV.6. Interprétation des résultats .....	54
IV.7. Conclusion .....	55
<b>Conclusion générale</b> .....	56
<b>Bibliographie</b>	

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

L'énergie est devenue un élément primordial dans notre société, avec la croissance économique les pays ont besoin plus d'énergie, mais avec l'utilisation des ressources non renouvelables tel que les énergies fossiles, ils ne vont pas satisfaire leurs besoins, car d'après le forum d'énergie mondiale les sources d'énergies fossile seront épuisées d'ici une dizaine de décennies [1][2].

Depuis des siècles, la production de l'énergie était basée sur les combustibles, les fossiles et l'uranium, mais à cause des inconvénients qui accompagne ce type d'énergie comme l'émission de gaz, on a besoin d'autres sources énergétiques pour éviter le problème de la pollution. Donc les énergies renouvelables sont le bon choix [3].

Lorsque nous comparons les sources d'énergies renouvelables en ce qui concerne leur qualité d'énergie et leur bon fonctionnement, on trouve que le système éolien est la ressource la plus économique et la plus efficace [4].

L'énergie éolienne a été utilisé dans le domaine mécanique, on donne comme exemple le moulin a vent : il été utilisé pour la transformation du blé en farine. Par la suite, et en 1891 la première éolienne a été construite pour la production d'électricité par le danois Poul La Cour [5].

Actuellement, La machine asynchrone à double alimentation est devenue très utilisée dans les systèmes éoliens en mode génératrice grâce à ces avantages : robustesse, facile à maintenir...etc.

Ce type de machine est connu par sa difficulté de commande avec un problème de couplage de couple électromagnétique et flux magnétique, mais avec la commande vectorielle on pourrait rendre la commande de la MADA similaire à celle de la machine à courant continu [3][6].

Pour assurer le bon fonctionnement de notre système et pour l'amélioration du rendement de la machine, dans notre étude nous nous sommes intéressés par deux techniques de commande pour synthétiser des régulateurs robustes vis-à-vis aux variations des paramètres de la machine.

Premièrement on va appliquer la technique de la commande vectorielle, cette commande est basée sur des régulateurs classiques (PI), ces derniers présentent des inconvénients par exemple une faible robustesse si les paramètres de la machine sont variés [7].

C'est pourquoi nous nous sommes tournés vers une autre technique qui s'intègre à l'intelligence artificielle. C'est la commande par logique floue.

Le professeur Lotfi Zadeh est le premier qui a été présenté la logique floue en 1965. Initialement elle a été utilisée comme un algorithme de classification des données dans plusieurs domaines [8]. Puis en 1975 le professeur Mamdani à tester la théorie de Zadeh sur une chaudière.

En 1985, grâce au chercheur Sugeno la logique floue a été introduite au japon [9].

Dernièrement, l'application de la logique floue a atteint sa maturité et se trouve dans nombreuses applications industrielles et de gestion.

En 2017, les chercheurs marocains W. ARIRI et autres, ont présenté un travail qui traite le control vectoriel appliqué à une éolienne basée sur MADA [10].

Puis en 2018, l'auteur A. HAROUZ et autres, ont fait des recherches pour tester la stabilisation de la machine asynchrone avec l'utilisation du contrôleur floue [11].

En 2019, l'auteur : ZIDANI, M.Y et son groupe de recherche étudié la conception d'un contrôle robuste à l'aide d'un contrôleur à logique floue pour les moteurs à induction à double alimentation [12]. A la fin d'année 2019, des chercheurs Mauritanien et Marocain, réalisent des recherches sur le control des puissances d'une GADA en utilisant un contrôleur de logique floue, ils ont testé ce dernier par la simulation dans l'environnement Matlab/Simulink avec des résultats qui montre les meilleures performances de régulateurs floue [13].

En 2020, l'auteur M. NAGIAH et K. SEKHAR ont testé la commande par logique floue sur un système hybride. La principale nouveauté de cette recherche est le système de gestion de batterie basé sur la logique floue qui charge et décharge dans le système de bus continu en fonction de la demande de charge [14].

### **Objectifs de notre projet :**

Ce projet consiste à étudier des techniques modernes de haute performance dans la commande pour résoudre le problème de robustesse et la stabilité contre les perturbations et les variations des paramètres du système.

Ainsi, dans le cadre de cette étude nous avons choisi de travailler sous environnement Matlab / Simulink. Notre thèse sera structurée comme suit :

**Le premier chapitre** sera consacré à la présentation des généralités sur les systèmes éoliens. Nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes et ses composants d'une façon générale. Puis on a passé par la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

**Le deuxième chapitre** portera sur la modélisation de la partie mécanique de la chaîne de conversion éolienne : turbine, arbre mécanique et le multiplicateur. Puis on a fait une modélisation de la partie électrique concernant la machine asynchrone à double alimentation avec une modélisation des convertisseurs statiques.

**Le troisième chapitre** sera étudié en deux parties, la première sur la modélisation des méthodes de la commande vectorielle à partir d'un contrôleur PI classique, et la deuxième elle est à l'apport de l'intelligence artificielle par la modélisation et l'application de la commande logique floue pour le remplacement du régulateur classique de type PI par le contrôleur floue pour le contrôle des puissances générés par MADA.

**Le quatrième chapitre** présentera une étude comparative entre deux méthodes de commande du MADA (commande vectorielle par PI classique et la logique floue) pour le contrôle des puissances générés par La MADA dans le cadre d'amélioration de la stabilité et la robustesse du notre système contre les perturbations et les variations paramétriques.

Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion générale qui devrait permettre d'ouvrir de nouvelles perspectives.

**CHAPITRE I**

**GENERALITE SUR LES**

**SYSTEMES EOLIENS**

## I.1. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) [15].

Après l'an 2000, et avec l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien a émergé et occupe une place privilégiée [16].

L'utilisation de vent pour produire de l'énergie électrique est une technologie qui existe depuis longtemps. Cette procédure se fait par l'utilisation des éoliennes qui vont convertir l'énergie cinétique de vent en énergie électrique en utilisant des générateurs [17].

Dans ce chapitre, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, et l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies.

## I.2. Définition et généralités sur le système éolien

Un aérogénérateur, appelé éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur électrique, appelée Système de Conversion Eolien (SCE) [18].

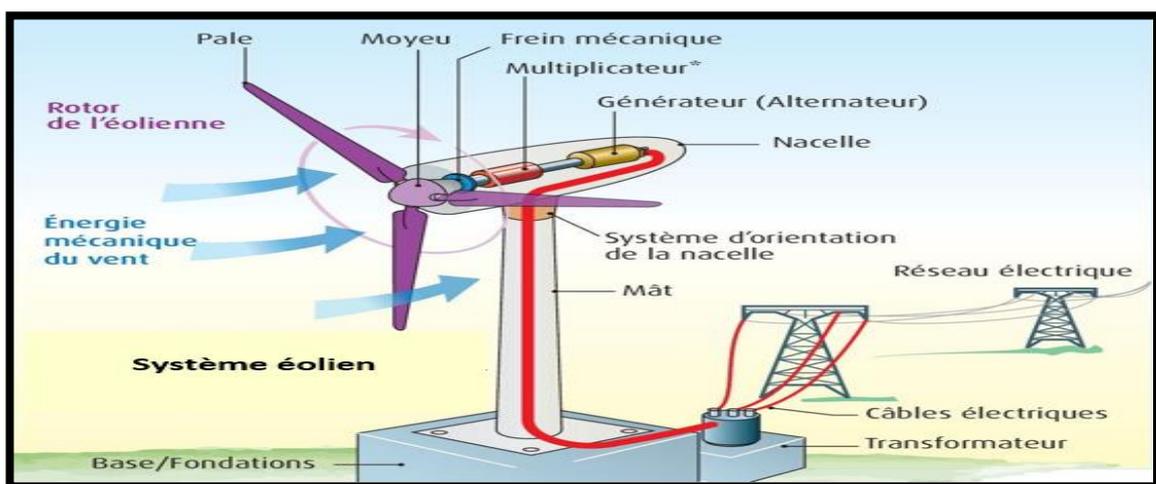


Figure I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent

En général, Une chaîne de conversion éolienne est constituée d'un générateur électrique, entrainé par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique et enfin un transformateur pour assurer la connexion au réseau électrique.

### I.3. Différents types d'éolienne et leur utilisation

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : Les aérogénérateurs à axe vertical et ceux à axe horizontal.

#### I.3.1. Eolienne à axe verticale

L'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale. L'un des principaux atouts de ce type d'éolienne est de réussir à capter des vents faibles et de produire de l'énergie même avec une vitesse de vent plus légère, Cette catégorie d'éolienne a vu plusieurs prototypes, mais deux seulement ont atteint l'étape d'industrialisation [19] :

##### I.3.1.a. Le rotor Darrieus

Inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe trois sortes de rotors de Darrieus : le rotor cylindrique, le rotor tronconique, et le rotor parabolique.

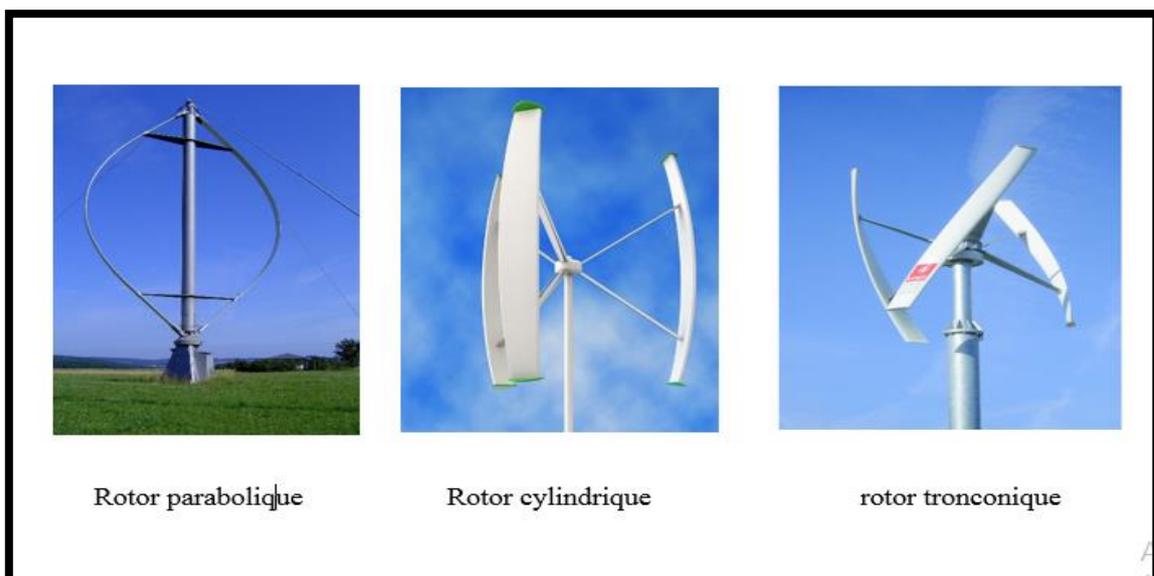


Figure I.2 différents rotors de type Darrieus

Ce type d'éolienne verticale a de nombreux avantages dont celui de pouvoir être installé dans des endroits très éventés et de faire très peu de bruit comparé aux autres éoliennes du marché. L'inconvénient de ce type d'éolienne est d'avoir besoin d'un vent relativement fort pour commencer à tourner et donc à produire de l'énergie [17][20].

### I.3.1.b. Le rotor de Savonius

Inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924, ce rotor est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.



Figure I.3 Le rotor de Savonius

Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante. Le principe consiste à ce que deux demi-cylindres tournent, s'entraînant l'un et l'autre, et ce même avec un vent très léger. Outre un esthétisme très design qui permet facilement aux installateurs de se projeter avec cette éolienne, L'inconvénient de ce type d'éolienne faible rendement par rapport à une éolienne à pôle [20] [21].

### I.3.2. Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale (avec 3 pales) étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur [22].

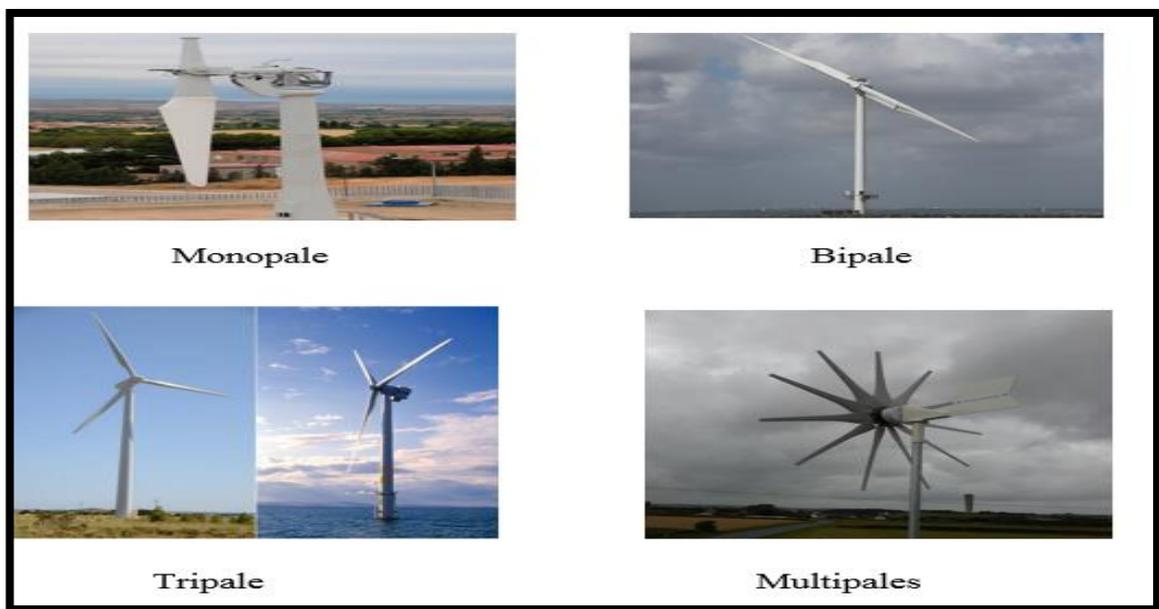


Figure I.4 Différentes configuration éoliennes

Le tableau 1.1 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [23].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivré
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 à 45 m	40 KW à 1 MW
Grande	46 met plus	1 MW

## I.4. Structure d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [24].

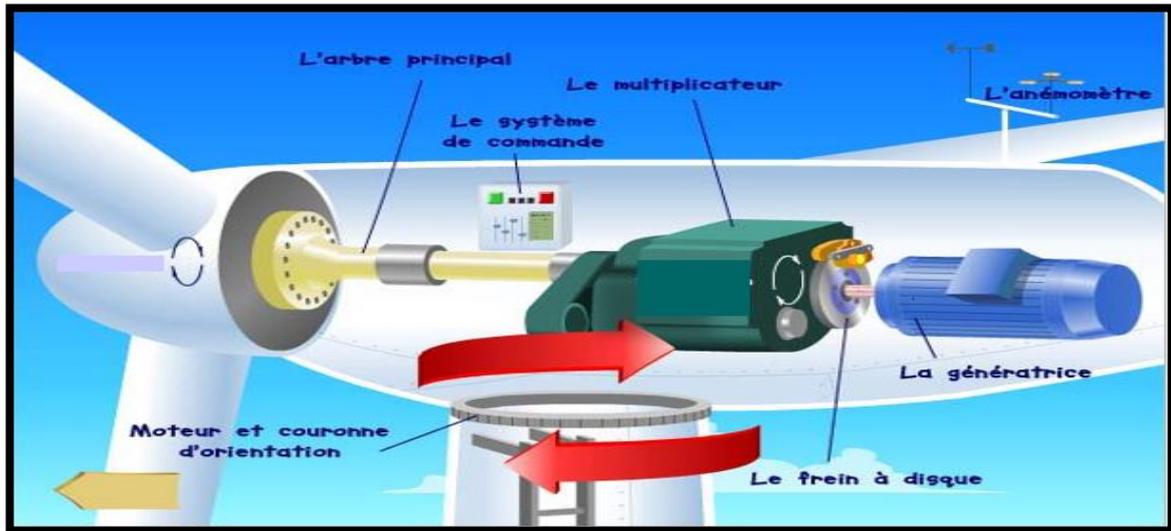


Figure I.5 Les éléments d'une éolienne

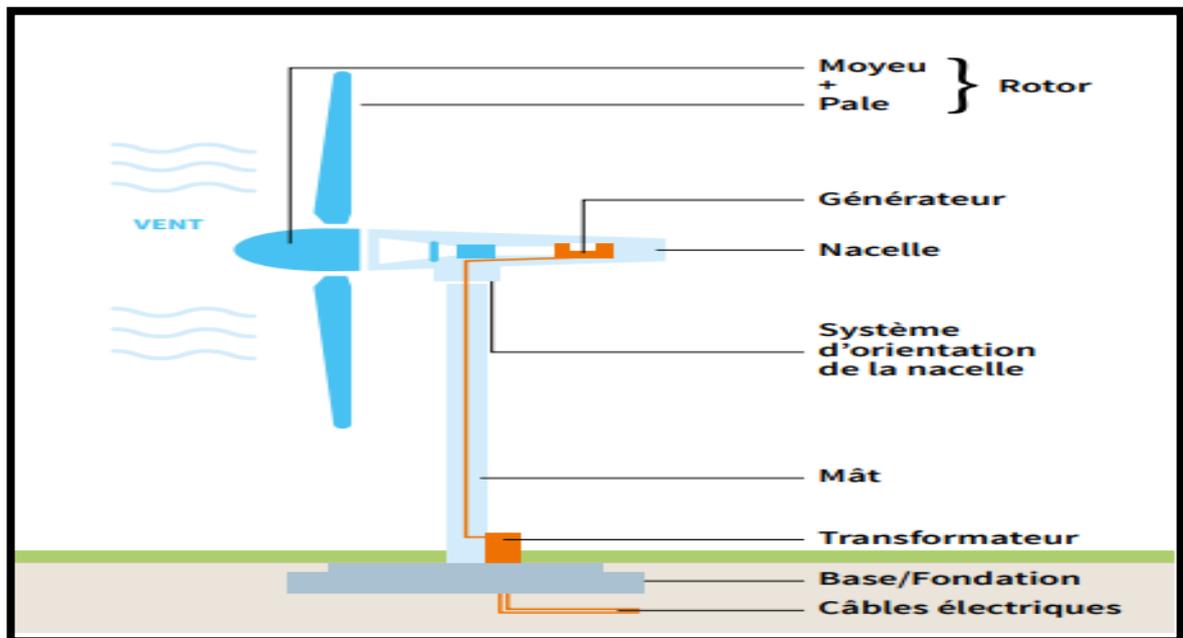


Figure I.6 Principales composantes d'une turbine éolienne.

**• Mat (Tour)**

En manier général un tube d'acier doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations au niveau du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. (Exemple éolienne la Multibrid M5000 6 MW diamètre de turbine de 116, mat 135 m hauteur).

**• La nacelle**

Elle tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique (Figure 1.5). Elle comprend les éléments suivants :

1. Arbre primaire et secondaire.
2. Multiplicateur.
3. Deux refroidisseurs.
4. Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
5. La génératrice qui est dans le cas de ce travail une machine asynchrone à double alimentation.
6. Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée Par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

**• Les pales**

Elles capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

**• Le moyeu**

C'est élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse du vent [18].

## I.5. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [24]. Le rapport entre l'énergie de vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor est déterminé par trois facteurs :

La densité de l'air et la vitesse du vent (ces deux derniers sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site), et la surface balayée par le rotor.

### I.5.1. Loi de Betz

La loi de BETZ a été formulée par l'Allemand Albert BETZ. Elle définit qu'une éolienne ne pourra pas convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique plus de 59%.

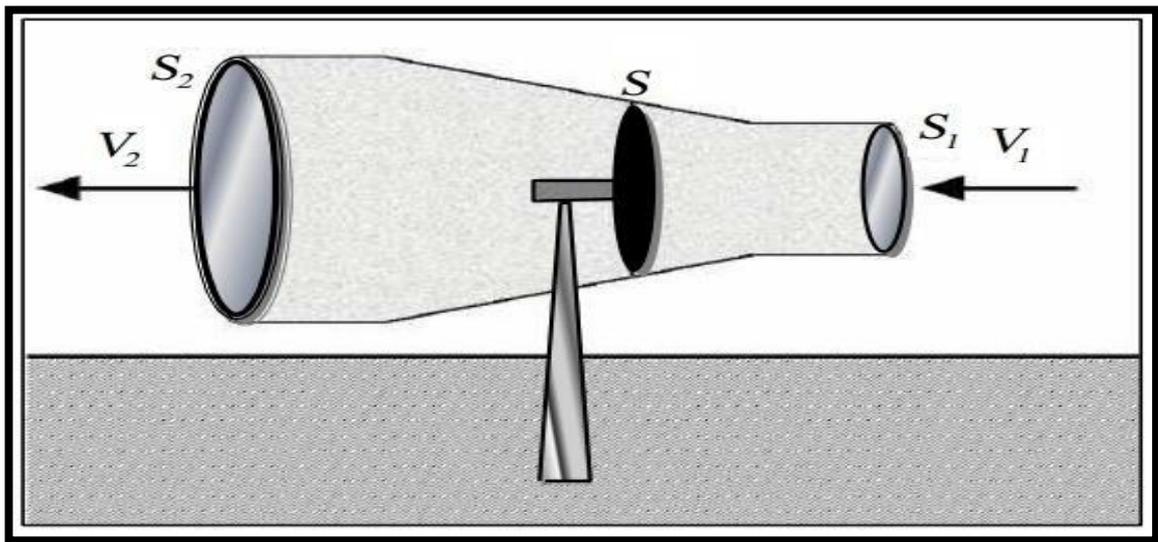


Figure I.7 Tube de courant autour d'une éolienne

On donne la puissance réelle extraite par :

$$P_m = \frac{m_0(V_1 - V_2)}{2}$$

Où : La masse d'air est donnée par

$$m_0 = \frac{\rho \cdot S(V_1 - V_2)}{2}$$

### I.5.2. La chaîne de conversion éolienne

Dans une chaîne de conversion éolienne et pour obtenir l'électricité à partir du vent on trouve :

- Une turbine éolienne
- Une transmission mécanique
- Une génératrice
- Un système de liaison électrique

### I.5.3. Principe de la conversion d'énergie éolienne

L'arbre principal entraîne le générateur qui produit l'électricité. Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation de rotor jusqu'à la vitesse de synchronisme de la génératrice.

Les convertisseurs qui se trouvent dans la chaîne de conversion ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique [25].

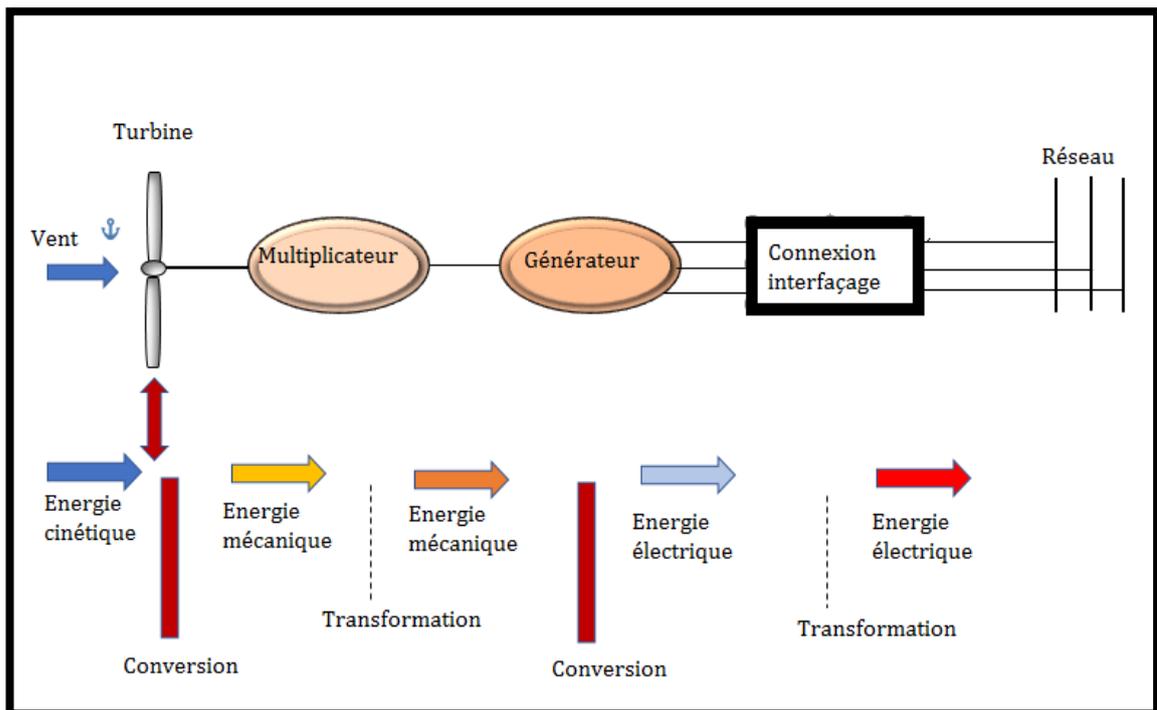


Figure I.8 la conversion de l'énergie cinétique du vent

### **I.5.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

#### **➤ Avantages**

- L'énergie éolienne est propre, fiable et elle respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable donc les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- C'est une source d'énergie local.
- Elle ne laisse pas de trace si on la démonte.

#### **➤ Inconvénients**

- Le bruit mécanique
- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante, ce qui donne une qualité de puissance produite pas toujours bonne.
- C'est un système couteux [25].

### **I.6. Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur les systèmes éoliens, ainsi leur principe de fonctionnement. Puis on a passé par les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

Vue l'importance de l'énergie éolienne et son rôle dans l'augmentation et l'amélioration de la production de l'électricité, on s'intéresse dans les chapitres suivants à la modélisation et la simulation d'un système éolien associé avec une machine asynchrone a doublé alimentation.

**CHAPITRE II**  
**MODÉLISATION D'UN**  
**SYSTÈME DE CONVERSION**  
**ÉOLIENNE À BASE DE**  
**MADA**

## II.1. Introduction

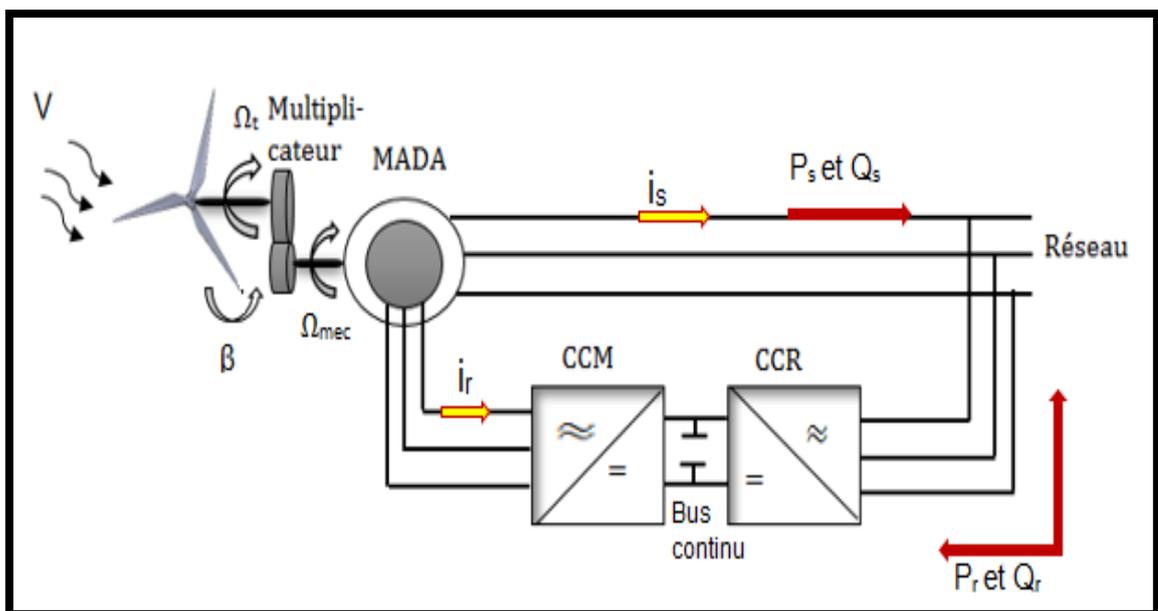
Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, et la génératrice est la composante qui assure la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.

Après avoir présenté les différents types et les composants d'une turbine éolienne on passe à sa modélisation.

Ensuite, nous allons passer à la modélisation de la MADA en tenant compte des considérations du certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

## II.2. Structure générale d'un système éolien basé sur une MADA

Le système éolien basé sur une MADA est illustré dans la figure (II-1), la turbine d'après un multiplicateur entraîne la MADA, qu'elle est reliée au réseau électrique directement par un stator. Par contre le rotor est connecté au réseau électrique via une interface qui contient deux convertisseur électronique (CCM/CCR) comme illustré sur la figure II.1.



**Figure II.1** : Système de conversion d'énergie éolienne à base de MADA

### II.3. Modélisation d'une turbine éolienne

La turbine modélisée dans notre travail comporte 3 pales de longueur R, qui pivotent sur leur axe. Entraînant une génératrice MADA à travers un multiplicateur de vitesse de gain [26][27]. Comme illustré dans la figure II.2.

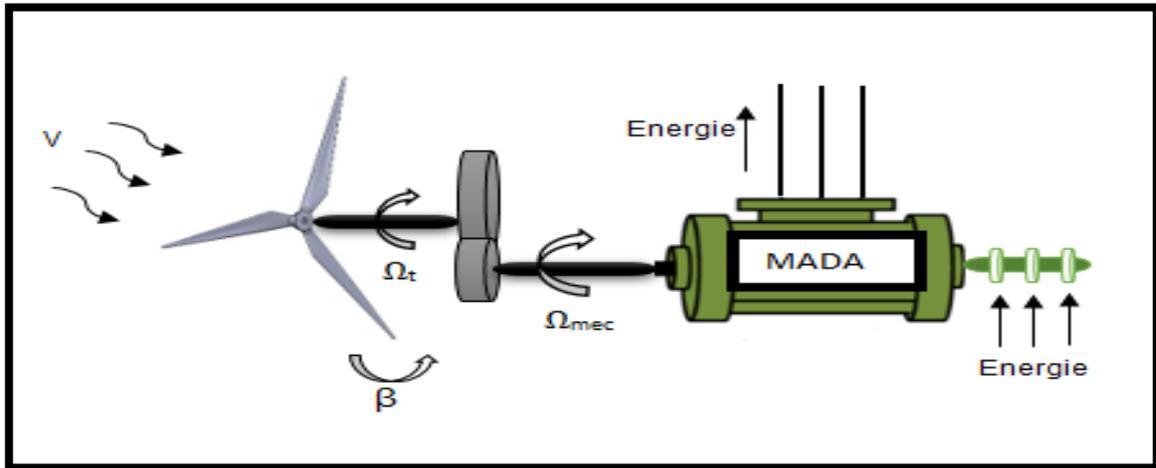


Figure II.2 : Modèle d'une turbine éolienne avec MADA

#### a) La puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R, est donnée par la relation suivante [28] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (\text{II.1})$$

#### b) La puissance aérodynamique

Le vent applique une vitesse (V) sur les pales de l'éolienne, ce qui fait tourner ces dernières et crée par conséquent une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine. Cette puissance est exprimée comme suit [29] :

$$P_{aero} = C_p \cdot P_{vent} \quad (\text{II.2})$$

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.3})$$

Avec  $\lambda = \frac{\Omega \tau \cdot R}{V}$

- $\rho$  : la masse volumique de l'air (approximativement  $1,225 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique et à  $15^\circ\text{C}$ ).
- $R$  : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.
- $C_p$  : Le coefficient de puissance (rendement aérodynamique de la turbine).
- $\lambda$  : le coefficient de la vitesse relative (le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent).
- $\beta$  : l'angle des pâles ou bien l'angle de calage.
- $V$  : la vitesse du vent.
- $\Omega_t$  : La vitesse de rotation de la turbine

### c) Coefficient de puissance

Le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne, il dépend de la caractéristique de la turbine et les conditions de fonctionnement [29][26]. Il est présenté par l'expression suivante :

$$C_p = 0.5 - 0.00167(\beta - 2) \sin \left[ \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II.4})$$

Le couple aérodynamique dépend de la puissance aérodynamique et la vitesse de rotation de la turbine éolienne, il est donné par l'expression suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega \tau} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot \frac{1}{\Omega \tau} \quad (\text{II.5})$$

Les caractéristiques de  $C_p$  en fonction de coefficient de la vitesse relative ( $\lambda$ ) sont illustrées sur la figure II.3.

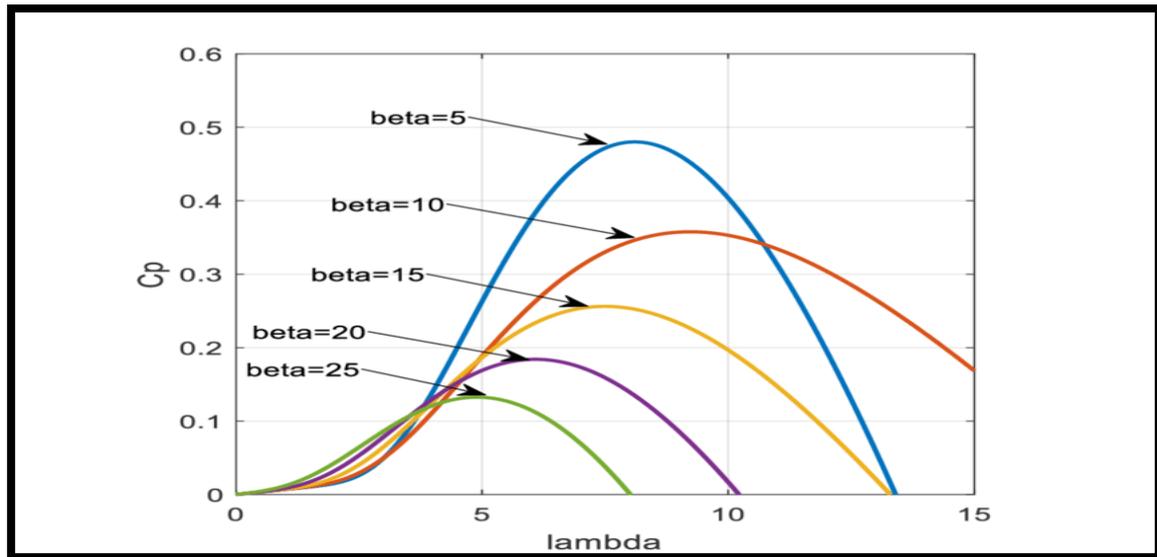


Figure II.3 : Caractéristique de coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de  $\lambda$

### II.3.1. Multiplicateur

On peut considérer le multiplicateur comme une liaison entre la turbine et la génératrice. Son rôle est d'augmenter la vitesse lente de la turbine, en une grande vitesse pour tourner la génératrice plus fort.

Donc il est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [30] :

$$C_{mec} = \frac{C_t}{G} \quad (II.6)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.7)$$

Avec :

- $C_{mec}$  : Couple mécanique de la génératrice
- $C_t$  : Couple de la turbine
- $G$  : Rapport de multiplicateur (Gain)
- $\Omega_t$  : Vitesse de rotation de la turbine avant le multiplicateur
- $\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation de la turbine après le multiplicateur

### II.3.2. Modèle de l'arbre mécanique

L'inertie totale de la turbine se compose de l'inertie de rotor de la turbine plus l'inertie de la génératrice ( $J_g$ ).

$$J = \frac{J_{Turbine}}{G^2} + J_{mec} \quad (II.8)$$

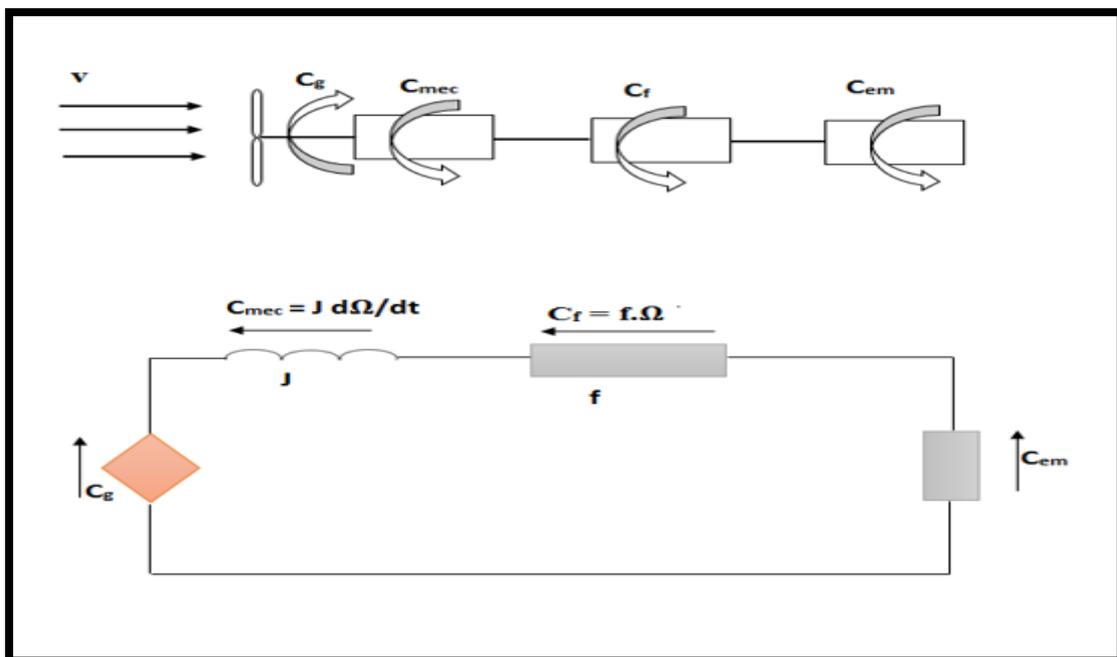
- $j_{\text{Turbine}}$  : L'inertie de la turbine [Kg.m<sup>2</sup>]
- $J_{\text{mec}}$  : L'inertie de la génératrice [Kg.m<sup>2</sup>]

Il faut s'avoir que l'inertie de rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine.

D'après l'équation fondamental de la dynamique, on trouve :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{mec}} \tag{II.9}$$

La figure suivante représente un schéma électrique équivalent d'une turbine éolienne :



**Figure II.4** : Schéma équivalent d'une turbine éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{\text{mec}} = C_g - C_{\text{em}} - C_f \tag{II.10}$$

$$C_g - C_{\text{em}} = J \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} + f \cdot \Omega_{\text{mec}} \tag{II.11}$$

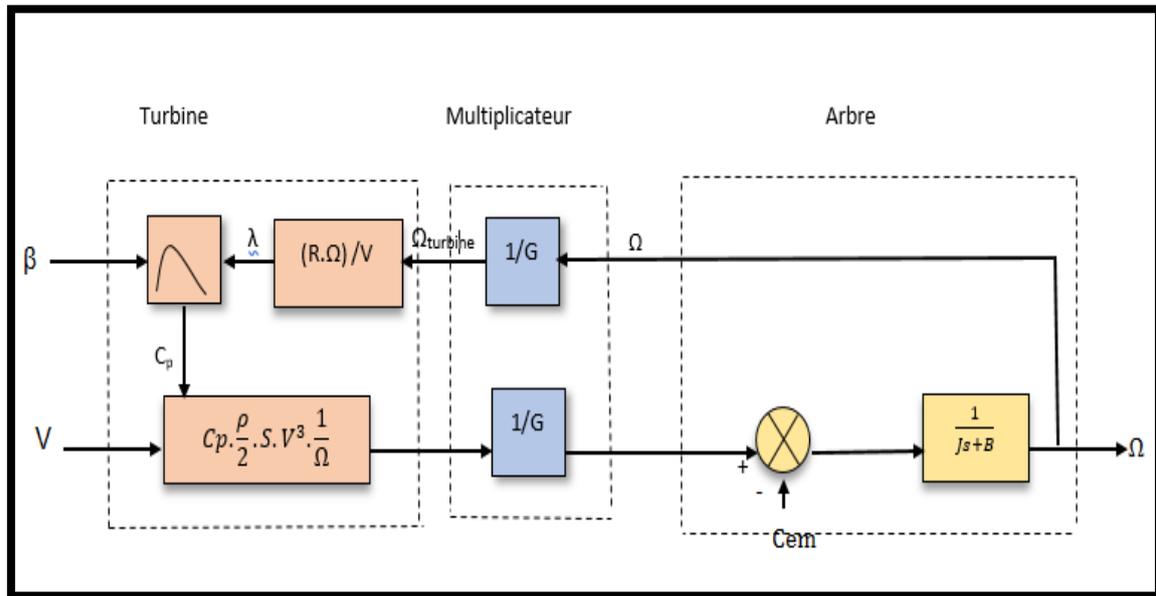
- $C_{\text{mec}}$  : Couple mécanique
- $C_{\text{em}}$  : Couple électromagnétique
- $C_g$  : Couple issu de multiplicateur
- $C_f$  : Couple des frottements visqueux

On peut modéliser le couple des frottements visqueux par son coefficient ( $f_T$ ) comme suit :

$$C_f = f_T \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.12})$$

### II.3.3. Schéma bloc du modèle de la turbine

On présente le modèle de schéma bloc de turbine par la figure suivante [31][26] :



**Figure II.5** : Schéma bloc du modèle de turbine

➤ **Partie de la turbine :**

On considère la vitesse du vent et l'angle d'orientation des pales( $\beta$ ), comme des entrées de la turbine.

➤ **Partie de multiplicateur :**

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique en vitesse de turbine, et le couple aérodynamique en couple de multiplicateur.

➤ **Partie de l'arbre mécanique :**

On considère le couple de multiplicateur et le couple électromagnétique fourni par la génératrice comme entrées de l'arbre mécanique.

## II.4. Présentation de la machine asynchrone double alimentation

La machine asynchrone double alimentation est un générateur à induction à rotor bobiné. Le stator est relié directement avec le réseau, d'autre part on trouve le rotor alimenté par des convertisseurs statique. Comme illustré dans la figure suivante :

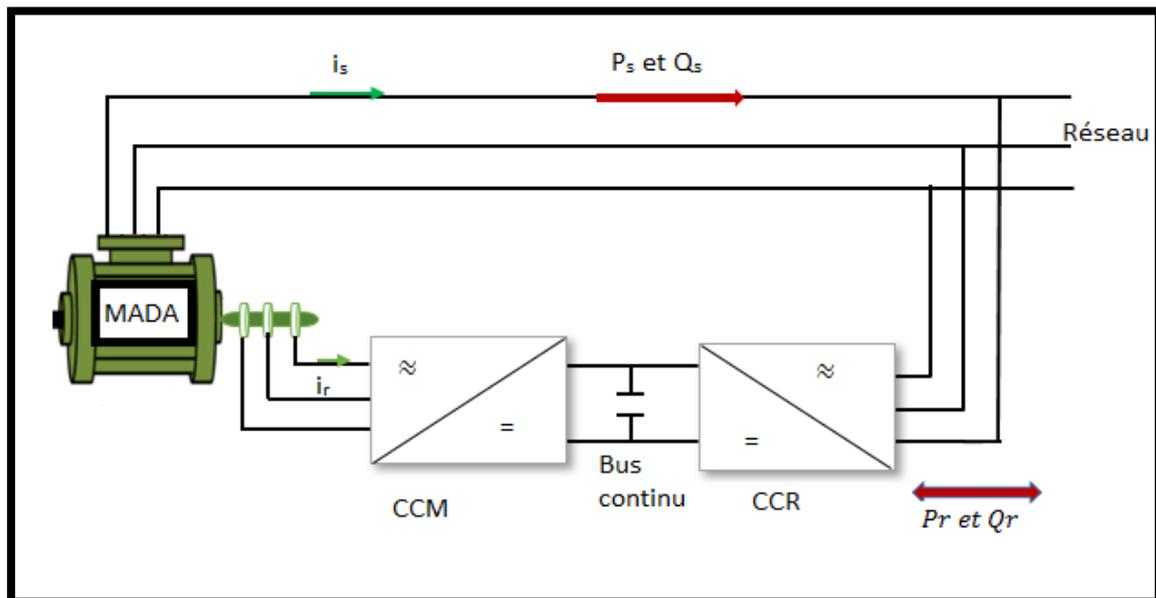


Figure II.6 : Présentation d'alimentation d'une MADA

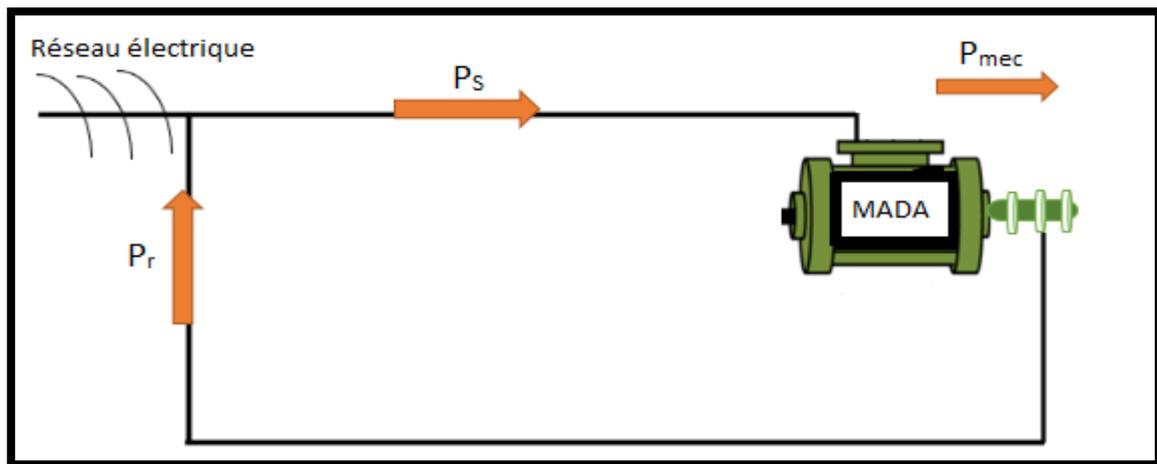
### II.4.1. Fonctionnement de MADA

La machine asynchrone double alimentation peut fonctionner en mode générateur ou bien en mode moteur. Il faut s'avoir aussi que la commande des tensions rotorique permet de déterminer le mode de fonctionnement de la MADA [32].

Donc on va présenter dans ce tableau les quatre modes de fonctionnements de la MADA :

➤ **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :**

Dans ce cas de fonctionnement, la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est renvoyée au réseau par le rotor.



**Figure II.7 :** Fonctionnement moteur hypo-synchrone

➤ **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone**

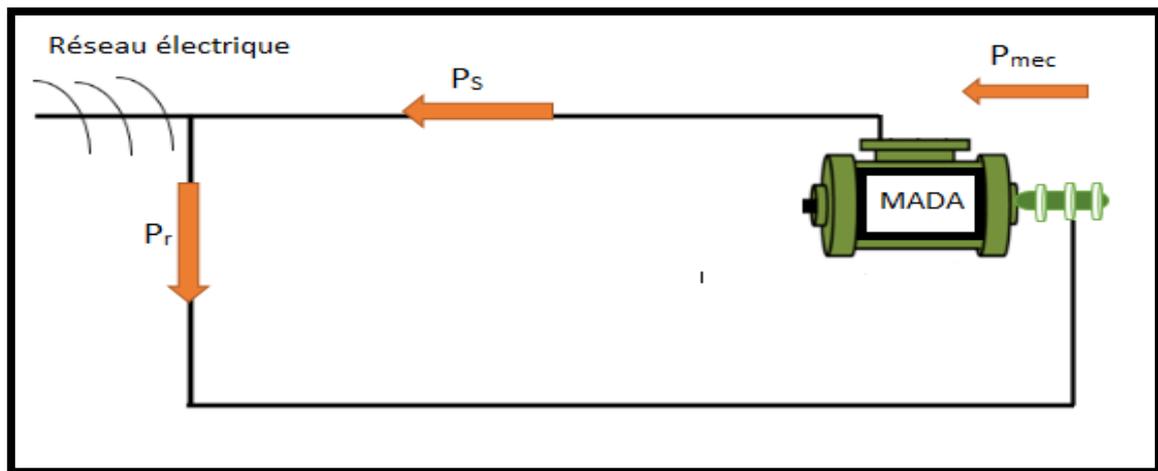
Dans ce cas la puissance est fournie par le réseau au stator et au rotor également.



**Figure II.8 :** Fonctionnement moteur hyper-synchrone

➤ **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone**

Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator. Donc la génératrice a besoin d'une puissance pour faire la magnétisation entre le rotor et le stator, alors cette puissance sera fournie par le réseau au rotor.

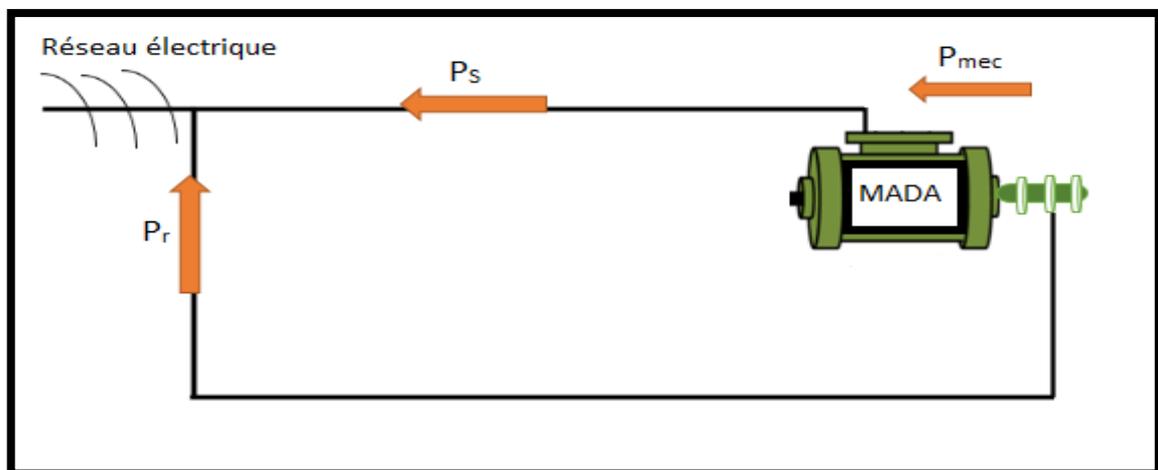


**Figure II.9 :** Fonctionnement générateur hypo-synchrone

➤ **Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone**

Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est injectée au réseau via le rotor.

On note que pour une utilisation dans un système éolien les deux derniers modes sont intéressants.



**Figure II.10 :** Fonctionnement générateur hyper-synchrone

## II.4.2. Domaine d'application de MADA

Actuellement la MADA est utilisée dans plusieurs applications industrielles grâce à ces avantages. Elle est utilisée plus en mode générateur dans les domaines des énergies renouvelables (comme étudié dans notre thème dans les systèmes éoliens). Parmi ces applications on cite :

- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eolienne a vitesse variable

On note que l'application de la MADA en mode moteur est limité, on peut citer parmi celle-ci les systèmes de pompage [33].

### **II.4.3. Avantages et inconvénients de la MADA**

Parmi les nombreux avantages de la machine asynchrone double alimentation on cite [34]

#### ➤ **Avantages**

- La mesure des courants au rotor et au stator
- La possibilité de la reconfiguration grâce à sa double alimentation
- Une puissance massique plus élevée par rapport au d'autre machine

#### ➤ **Inconvénients**

- La machine asynchrone nécessite une maintenance périodique
- Elle est plus volumineuse que la machine asynchrone classique

## **II.5. Modélisation de la MADA**

Avant de passer à l'étude de la commande vectoriel de la machine asynchrone à double alimentation, il faut réaliser sa modélisation pour bien comprendre ses principes de fonctionnements. Pour faire cette modélisation on utilise la théorie de l'espace vectoriel pour passer d'un système triphasé a un système biphasé.

### **II.5.1. Hypothèse simplificatrice**

Pour simplifier l'étude de la machine étudiée nous allons prendre en considération les hypothèses suivantes [35] :

- L'entrefer est constant
- Le circuit magnétique non saturé
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables
- Les forces magnétomotrices ont une répartition sinusoïdale
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température et l'effet de peau n'est pas prise en compte

## II.5.2. Modèle mathématique de la MADA

La figure suivante représente les enroulements rotoriques et statoriques de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé, à noter que les trois enroulements sont décalés entre eux par un angle de  $\frac{2\pi}{3}$ .

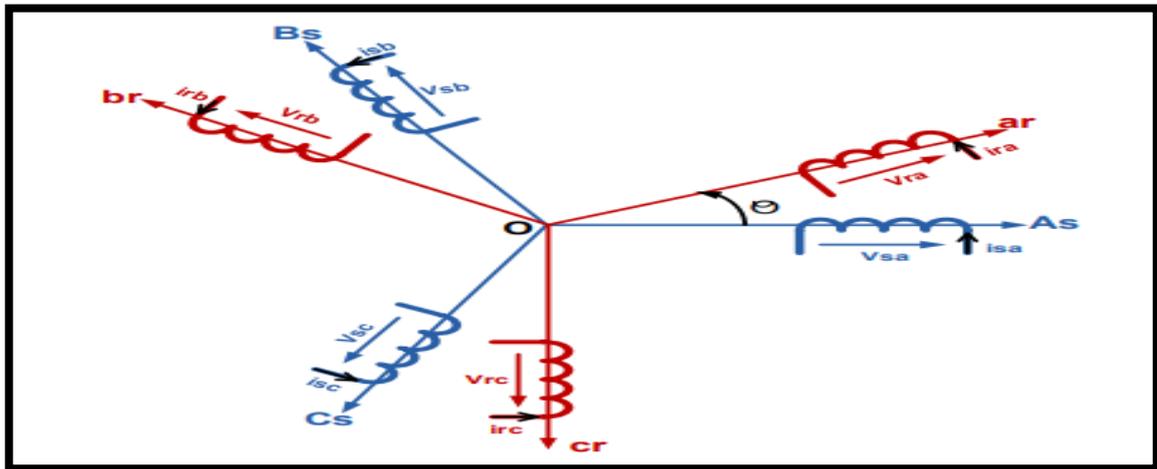


Figure II.11 : Les enroulements statorique et rotorique de la MADA

Les équations générales de la MADA dans le repère triphasé s'écrivent comme suit [36]

### ➤ Equations des tensions

#### ○ Au stator

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Pour les trois phases statoriques on peut résumer cette écriture par l'écriture matricielle suivante :

$$v_{abcs} = [R_s][I_{abcs}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abcs}] \quad (\text{II.14})$$

$R_s$  : La résistance des enroulements statoriques

#### ○ Au rotor

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Pour les trois phases rotoriques on peut résumer cette écriture par l'écriture matricielle suivante :

$$[v_{abc_r}] = [R_r][I_{abc_r}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abc_r}] \quad (\text{II.16})$$

$R_r$ : La résistance des enroulements rotoriques

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

### ➤ Equations magnétiques

#### ○ Au stator

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + M_{sr} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

#### ○ Au rotor

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = L_r \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}]^T \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

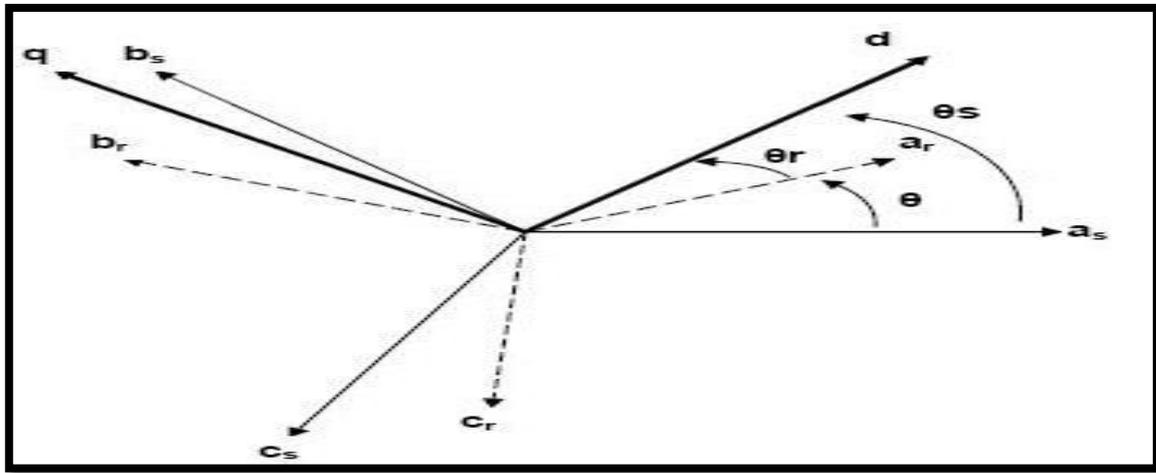
Où :

$$[M_{sr}]^T = [M_{rs}] = M' \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\frac{\theta_r + 2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

- ✚  $L_s$  : Inductance cyclique statorique de la machine
- ✚  $L_r$  : Inductance cyclique rotorique de la machine
- ✚  $M_{sr}$  : La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase de stator et rotor
- ✚  $M$  : Inductance magnétisante

### II.5.3. Application de la transformation de PARK à la MADA

Par l'application de la transformation de PARK on fait le passage des composantes du système triphasé aux composantes du système diphasé [26][34].



**Figure II.12 :** Principe de la transformation de PARK

- $\theta_s$  : est la position angulaire relative de l'axe d du repère tournant (d, q) par rapport à la bobine diphasée équivalente du stator notée  $a_s$ .
- $\theta_r$  : est la position angulaire relative de l'axe d du repère tournant par rapport à la bobine diphasée équivalente notée  $a_r$ .

La transformation de PARK s'écrit par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P^{-1}(\theta_s) \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}$$

$P(\theta_s)$  est donné par :

$$P(\theta_s) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Son inverse est donné par :

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

En appliquant la transformation de PARK, on peut citer les expressions des tensions statoriques et rotoriques dans le repère (d, q)

○ **Au stator**

$$v_{ds} = R_s I_{ds} \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \quad (\text{II.24})$$

$$v_{qs} = R_s I_{qs} \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \quad (\text{II.25})$$

○ **Au rotor**

$$v_{dr} = R_r I_{dr} \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{qr} \quad (\text{II.26})$$

$$v_{qr} = R_r I_{qr} \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} \quad (\text{II.27})$$

○ **Les flux magnétiques statorique**

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

○ **Les flux magnétiques rotorique**

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Où :

- ✚  $L_s$  : Inductance propre cyclique du stator
- ✚  $L_r$  : Inductance propre cyclique du rotor
- ✚  $M$  : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor

On peut donner le couple électromagnétique par l'équation suivante :

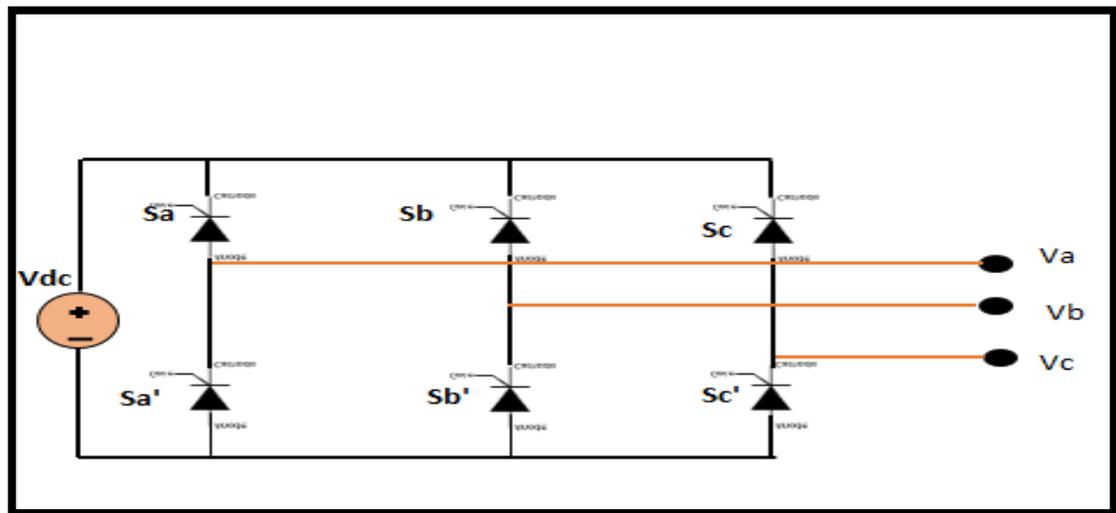
$$C_{em} = P(\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.30})$$

## II.6. Modélisation des convertisseurs statiques

### II.6.1. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur coté MADA (DC/AC), il permet aussi de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau. Ce dernier est formé de trois bras, chacun d'eux comportent deux interrupteurs. Son objectif principal est la bidirectionnalité de passage des puissances, ce qui permettent à la MADA le fonctionnement en deux régimes hypo et hyper-synchrone.

La figure (II.13) illustre un onduleur triphasé. On distingue les tensions de branche  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ ,  $V_{CN}$  mesurées par rapport à la borne négative de la tensions  $V_{dc}$ . D'autre coté on a les tensions de phases  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  mesurées par rapport à un point neutre [5].



**Figure II.13 :** Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé

On donne les expressions de tensions de branche de sortie mesurées par rapport à la borne négative comme suit :

$$\begin{cases} V_{AN} = S_a \cdot V_{dc} \\ V_{BN} = S_b \cdot V_{dc} \\ V_{CN} = S_c \cdot V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

A noter que  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  se sont les états de l'interrupteur par un bras (A, B, C) respectivement [25].

○ **Les tensions composés**

$$\begin{cases} V_{AB} = (S_a - S_b)V_{dc} \\ V_{BC} = (S_b - S_c)V_{dc} \\ V_{CA} = (S_c - S_a)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

○ **Les tensions simples**

On obtient les tensions simples par la différence entre deux tensions composées.

$$\begin{cases} V_{AB} - V_{CA} = V_{AN} - V_{BN} - V_{CN} + V_{AN} = 3V_{AN} \\ -2V_{AN} - V_{BN} - V_{CN} = 3V_{AN} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Donc :

$$V_{AN} = \frac{1}{3}(2V_{AN} - V_{BN} - V_{CN}) \quad (\text{II.34})$$

Avec la même façon on aura :

$$\begin{cases} V_{BN} = \frac{1}{3(2V_{BN} - V_{AN} - V_{CN})} \\ V_{CN} = \frac{1}{3(2V_{CN} - V_{AN} - V_{BN})} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

On remplace les équations (II.31) dans (II.34) et (II.35) on obtient :

$$\begin{cases} V_{AN} = \frac{V_{dc}}{3(2S_a - S_b - S_c)} \\ V_{BN} = \frac{V_{dc}}{3(2S_b - S_a - S_c)} \\ V_{CN} = \frac{V_{dc}}{3(2S_c - S_a - S_b)} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

On pose que :

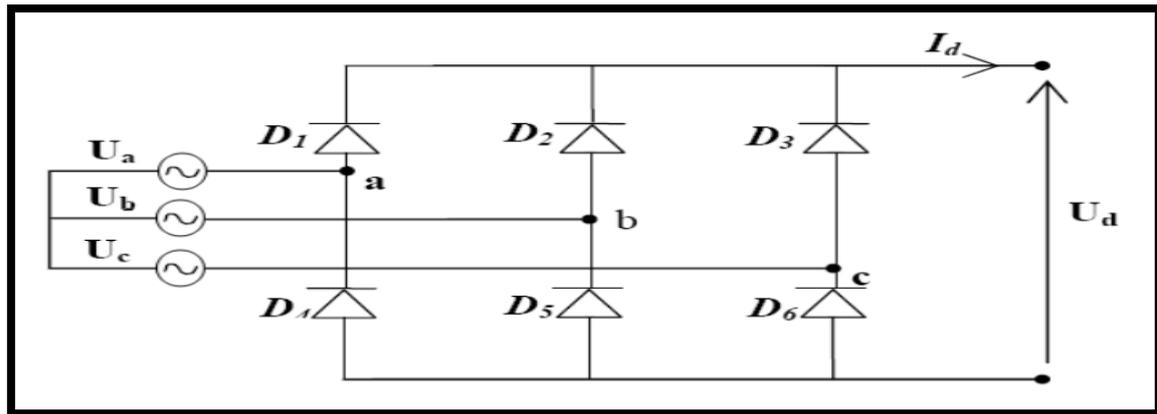
$$V_{AN} = V_{as}, V_{BN} = V_{bs}, V_{CN} = V_{cs}$$

Alors on obtient finalement les équations de l'onduleur :

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{V_{dc}}{3(2S_a - S_b - S_c)} \\ V_{bs} = \frac{V_{dc}}{3(2S_b - S_a - S_c)} \\ V_{cs} = \frac{V_{dc}}{3(2S_c - S_a - S_b)} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

## II.6.2. Modélisation de redresseur

Le redresseur est un convertisseur coté réseau (CCR), il permet la conversion alternatif/continue. la figure (II.14) illustre un schéma d'un redresseur [5].



**Figure II.14 :** Redresseur triphasé à diodes

Ce redresseur comporte trois diodes ( $D_1, D_2, D_3$ ) à cathodes communes permet l'aller de courant  $I_d$ , et trois diodes ( $D_4, D_5, D_6$ ) à anode commune permet le retour du courant  $I_d$ .

Supposant que ce dernier est alimenté par un réseau triphasé :

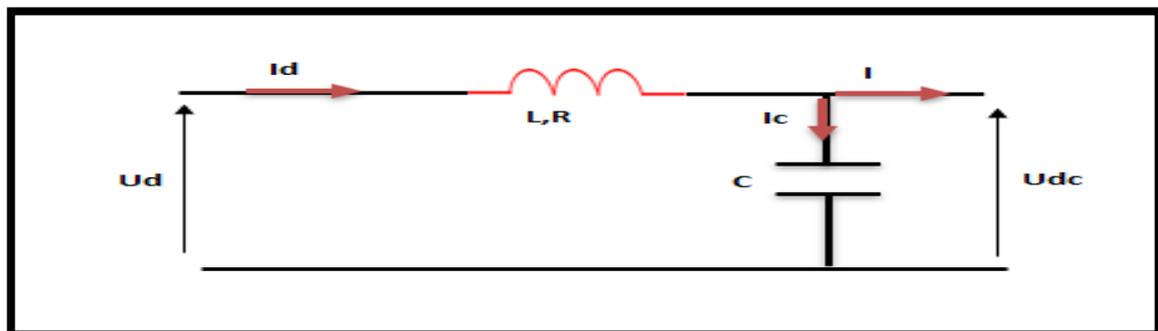
$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Donc la tension de sortie de redresseur est donnée par :

$$V_{red}(t) = \text{Max}[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] - \text{Min}[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] \quad (\text{II.39})$$

### II.6.3. Modélisation de filtre

La tension obtenue par le redresseur à des ondulations, alors pour éliminer ces hautes fréquences on utilise un filtre passe bas L-C comme illustré dans la figure (Figure II.15).



**Figure II.15 :** Modèle de filtre

Le condensateur permet d'absorber le courant négatif restitué par la charge, et l'inductance (L) est placée pour but de réduire les ondulations du courant [26][37]

Le modèle de filtre est donné par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L(U_d - U_{dc} - RI_d)} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C(I_d - 1)} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

## II.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous sommes intéressées à l'étude de la chaîne de conversion éolienne par la modélisation de la turbine éolienne et la présentation de la MADA avec son modèle mathématique. Le modèle simplifié de la MADA est bien choisi comme une hypothèse simplificatrice de notre cas.

Le suivant chapitre, sera consacré à la modélisation des deux méthodes de contrôle : la commande vectorielle par contrôleur PI classique et la commande par logique floue pour l'adaptation des puissance active et réactive générée par la MADA.

**CHAPITRES III**

**MODÉLISATION DE LA**

**COMMANDE VÉCTORIELLE**

**ET LA LOGIQUE FLOUE**

**POUR LE CONTRÔLE DE LA**

**MADA**

## **III.1. Introduction**

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable dans le cas d'une MADA.

La commande vectorielle par PI-classique est basée sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de la fonction de transfert ou d'équations d'état. Malheureusement, celles-ci ne sont pas toujours disponibles. Afin d'apporter une solution à ces problèmes, il y a une nouvelle stratégie de commande basée sur "la logique floue".

La logique floue est une branche de l'intelligence artificielle, suscite un intérêt certain dans la communauté scientifique, tout comme les réseaux de neurones artificiels, les algorithmes génétiques et les systèmes experts. Est une technique de résolution de problèmes très puissants avec une large applicabilité dans le contrôle et la prise de décision.

Ce chapitre est consacré à la modélisation mathématique de la commande vectorielle et la commande par logique flou dans le domaine d'application sur la MADA pour le contrôle des puissances statoriques actives et réactives.

## **III.2. Commande vectorielle de la MADA.**

### **III.2.1. But et principe de la commande vectorielle**

Le but de la commande vectorielle éliminé le problème de couplage entre l'induit et l'inducteur en dissociant le courant statorique en deux composantes en quadrature. Elle permet un contrôle de la vitesse et du couple électromagnétique, avec des performances statiques et dynamiques élevées. Le but recherché lors de sa conception est d'obtenir une situation identique à celle rencontrée dans la machine à courant continu à excitation séparée en séparant la commande du flux de celle du couple [38] [39].

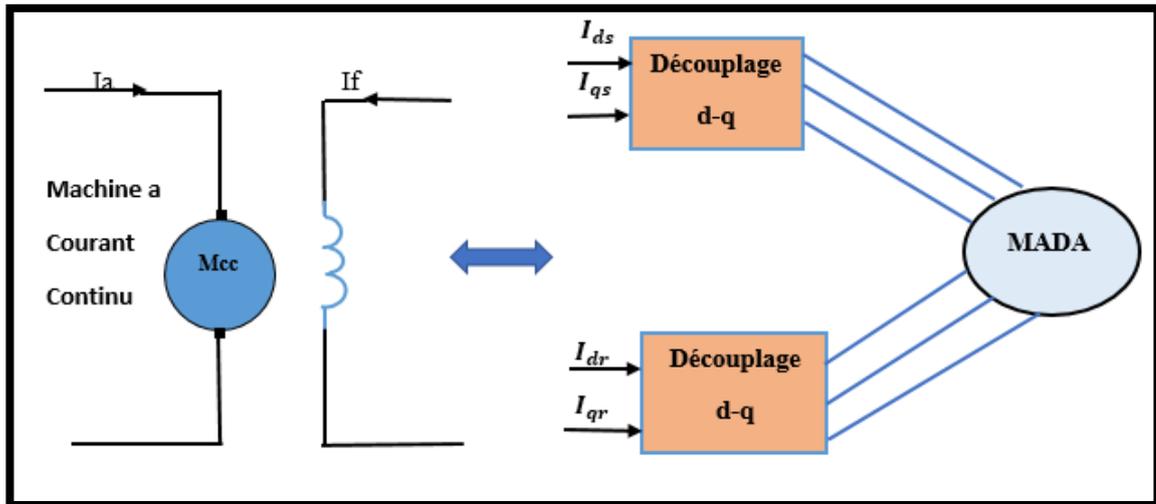


Figure III.1 Schéma de principe de la commande vectorielle.

La figure III.1 montre l'équivalence entre la formule du couple que l'on réalise avec découplage pour la MADA par analogie avec la machine à courant continu.

### III.2.2. Variantes de la commande vectorielle

- Suivant la source d'énergie :
  - Commande en tension
  - Commande en courant
- Suivant les opérations désirées pour le flux :
  - Commande vectorielle de flux rotorique.
  - Commande vectorielle de flux statorique.
  - Commande vectorielle de flux d'entrefer.
- Suivant la détermination de la position du flux :
  - Directe par mesure ou observation du vecteur de flux.
  - Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement [40].

### III.2.3. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances

Pour contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions, aux puissances actives et réactives statoriques [15] [41] [42].

En choisissant un référentiel diphasé (d-q) lié au champ tournant le vecteur flux statorique  $\Phi_s$  sur l'axe direct comme le montre la figure III.2, ce qui permet d'écrire :

$$\phi_{ds} = \phi_s \text{ et } \phi_{qs} = 0 \quad (\text{III.1})$$

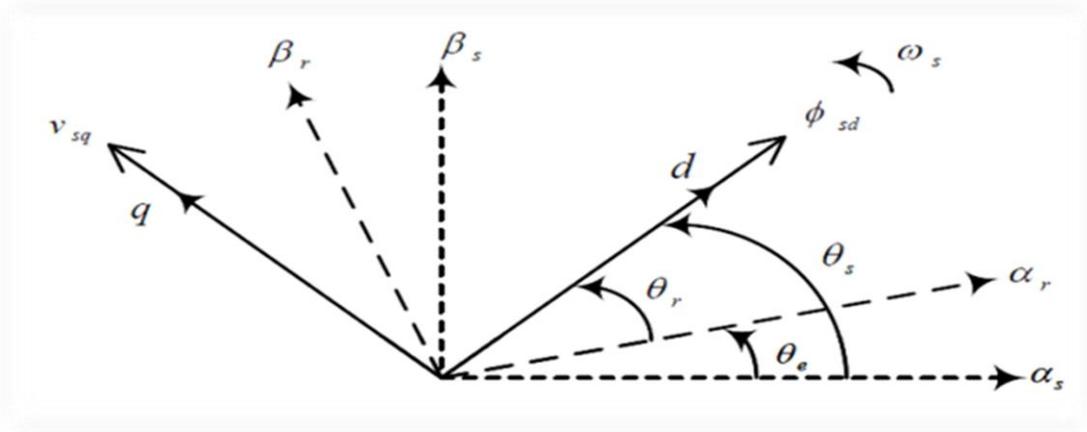


Figure III.2 Commande vectorielle par orientation du flux statorique

Nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine asynchrone dans le référentiel \$(q, d)\$ lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la MADA :

- **Les équations des tensions statoriques et rotorique**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

- **Les équations des flux statorique et rotorique**

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant l'équation (III.1) dans (III.4), nous obtenons :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} = \phi_s \\ \phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

A partir de l'équation (III.6), les expressions des courants statoriques sont

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\phi_s - M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Le couple électromagnétique s'écrit alors :

$$\begin{cases} C_{em} = p \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} - \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \\ C_{em} = -p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Rappelons que ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative.

En utilisant les simplifications (III.2), nous pouvons simplifier les équations des tensions comme suit :

Si l'on néglige la résistance du stator 'R', les tensions statoriques  $V_{ds}, V_{qs}$  sont :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\phi_{ds}}{dt} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \phi_s \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

- **Relation entre puissance statorique et courant rotorique**

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} + V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

En remplaçant les courants statoriques directs  $I_{ds}$  et en quadratures  $I_{qs}$  par leurs expressions (III.11), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

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

Il ressort de l'expression (III.12) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près ( $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ ) imposée par le réseau.

- **Relation entre tension rotorique et courant rotorique**

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (III.5) les valeurs des courants statoriques de l'équation (III.7) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (III.3). Ainsi, nous obtenons :

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

A partir des équations (III.11), (III.12) et (III.13) un schéma bloc qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques est établi dans la Figure III.3.

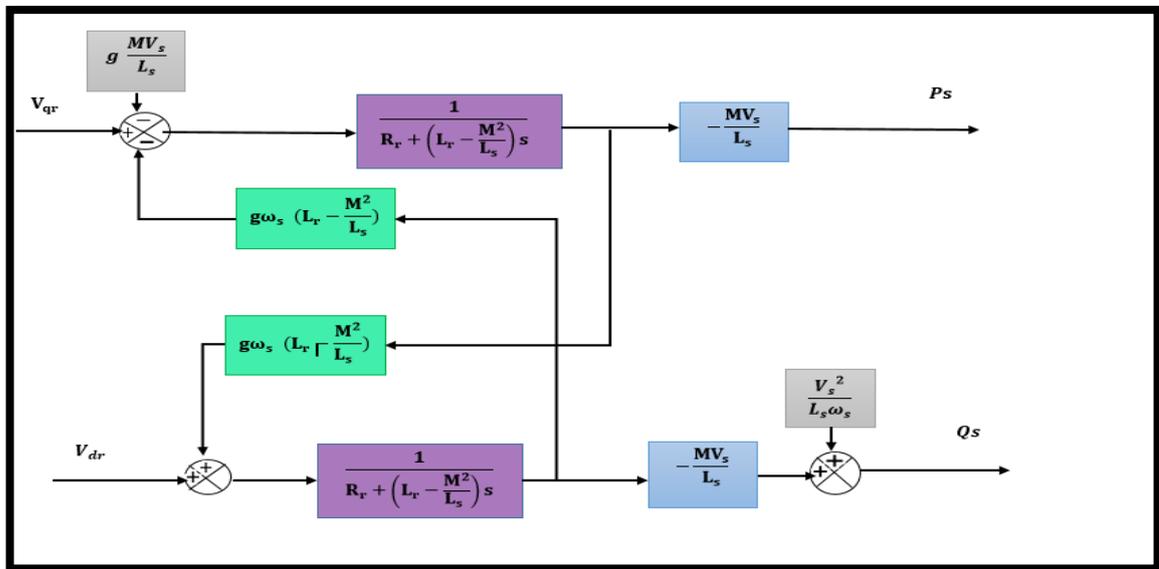


Figure III.3 schémas bloc de la MADA

On remarque dans ce schéma que les puissances statoriques et les tensions rotoriques sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. Du fait de la faible valeur du glissement,

il est possible d'établir une commande vectorielle, car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront être commandés séparément avec leurs propres régulateurs PI.

### III.2.4. Synthèse du régulateur proportionnel intégrale (PI) pour le contrôle des puissances

Les régulateurs PI ont une conception simple, son action intégrale permet d'éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne dont la fonction de transfert est de la forme  $k_p + k_i \frac{1}{s}$

Alors que, l'action proportionnelle influe sur la rapidité de la régulation du système [7].

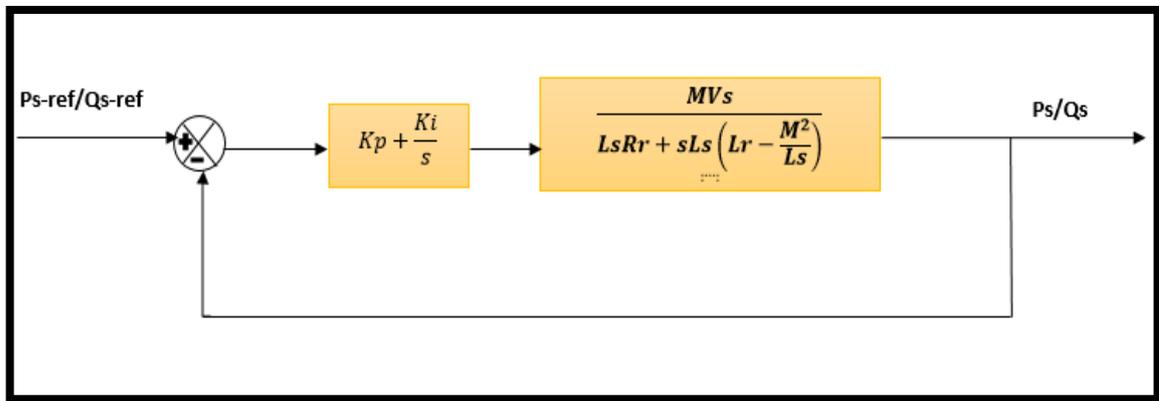


Figure. III.4 Boucle de régulation de la puissance active/réactive

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \left( \frac{s + \frac{ki}{kp}}{\frac{s}{kp}} \right) \cdot \frac{\frac{M.V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{s + \frac{L_s.R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (III.14)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{ki}{kp} = \frac{L_s.R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (III.15)$$

Après la compensation, on obtient la fonction FTBO suivante :

$$FTBO = kp \cdot \frac{M.V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} / s \quad (\text{III.16})$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$FTBF = \frac{1}{1 + s \tau_r} \quad (\text{III.17})$$

Avec

$$\tau_r = \frac{1}{kp} \cdot \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M.V_s} \quad (\text{III.18})$$

Le terme  $\tau_r$  désigne ici la constante du temps du système. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$\begin{cases} k_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M.V_s} \\ k_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r.L_s}{M.V_s} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

### III.2.5. Structure de la commande

Il apparait deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine, qui sont :

#### III.2.5.1. Commande directe

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe [42].

Ce principe de commande est montré dans la figure III.5.

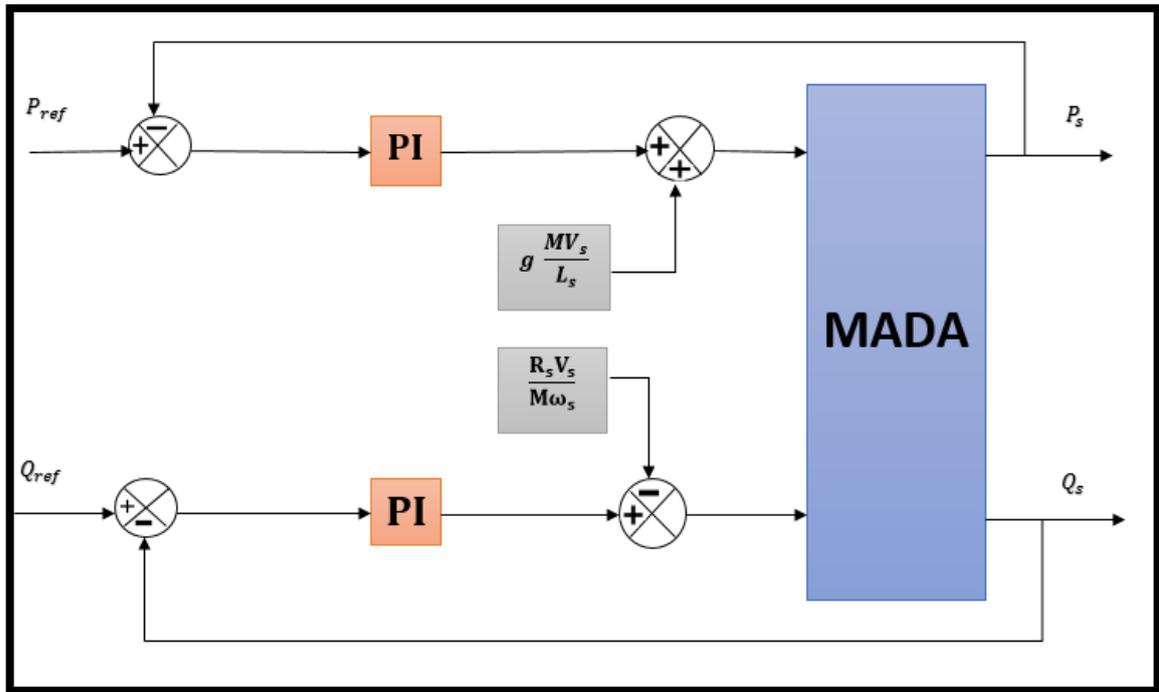


Figure III.5 schéma bloc de la commande directe

### III.2.5.2. Commande indirecte

La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc de la MADA [7].

Cette méthode est très sensible aux variations paramétriques de la machine. il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et plus utilisée que la méthode directe [6].

#### III.2.5.2.a. Commande indirecte sans boucle

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la Figure III.6 où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

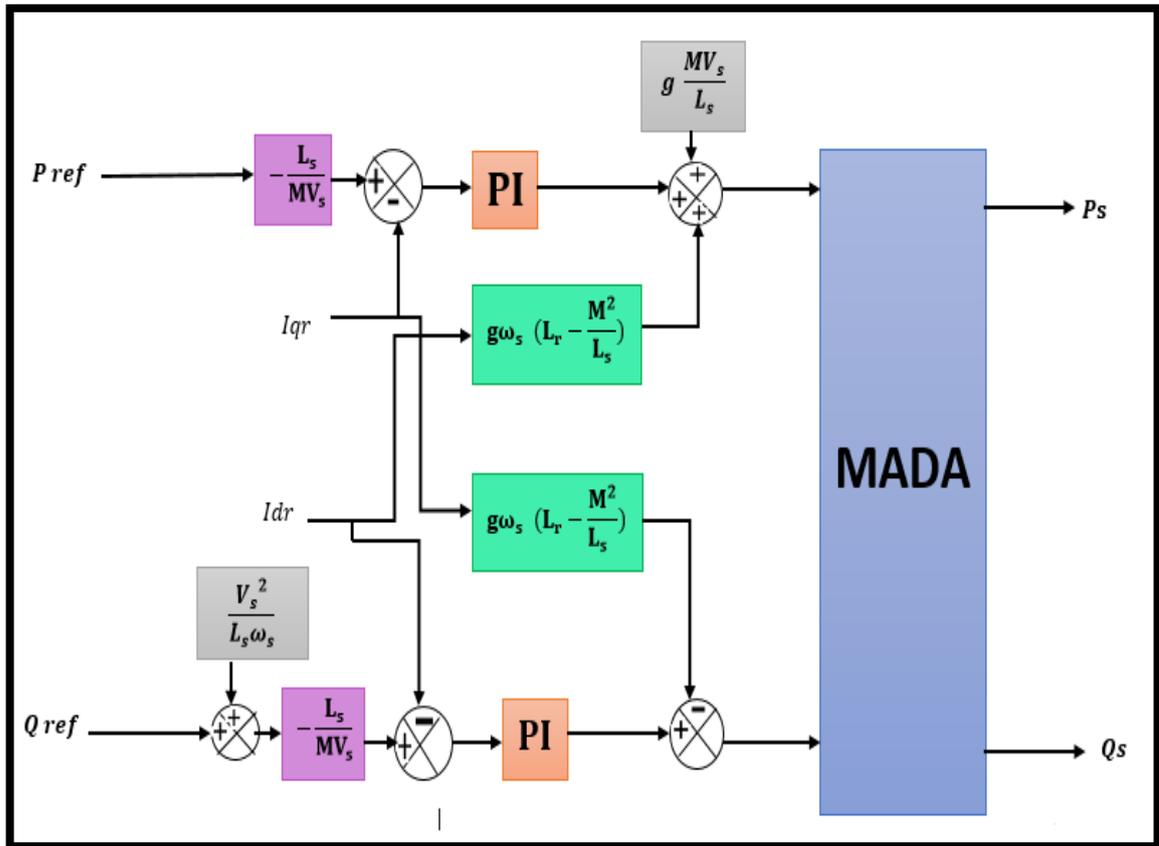


Figure III.6 Schémas bloc de la commande indirecte sans boucle

### III.2.5.2.b. Commande indirecte avec boucle

Pour d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances de minimiser d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système [7].

Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure III.7 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

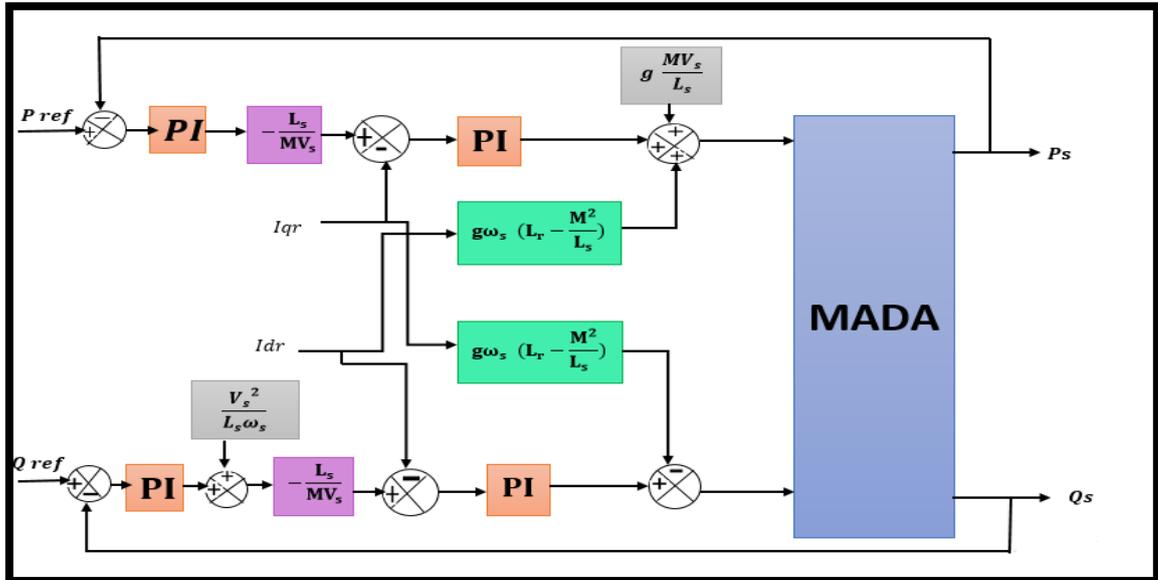


Figure III.7 schéma bloc de la commande indirecte avec boucle

### III.2.6. Les avantages et les inconvénients de la commande vectorielle

#### ❖ Les avantages :

- Simplicité.
- Erreur statique nulle.
- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique)
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase

#### ❖ Les inconvénients :

- Dépassement.
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle  $\theta_s$  estimé.
- De mauvais paramètres entraînent une erreur sur le couple [41].

### III.3. Commande par logique floue

#### III.3.1. Principe de la logique floue

Le principe de la logique floue se base sur les trois blocs comme illustré dans la figure suivante :

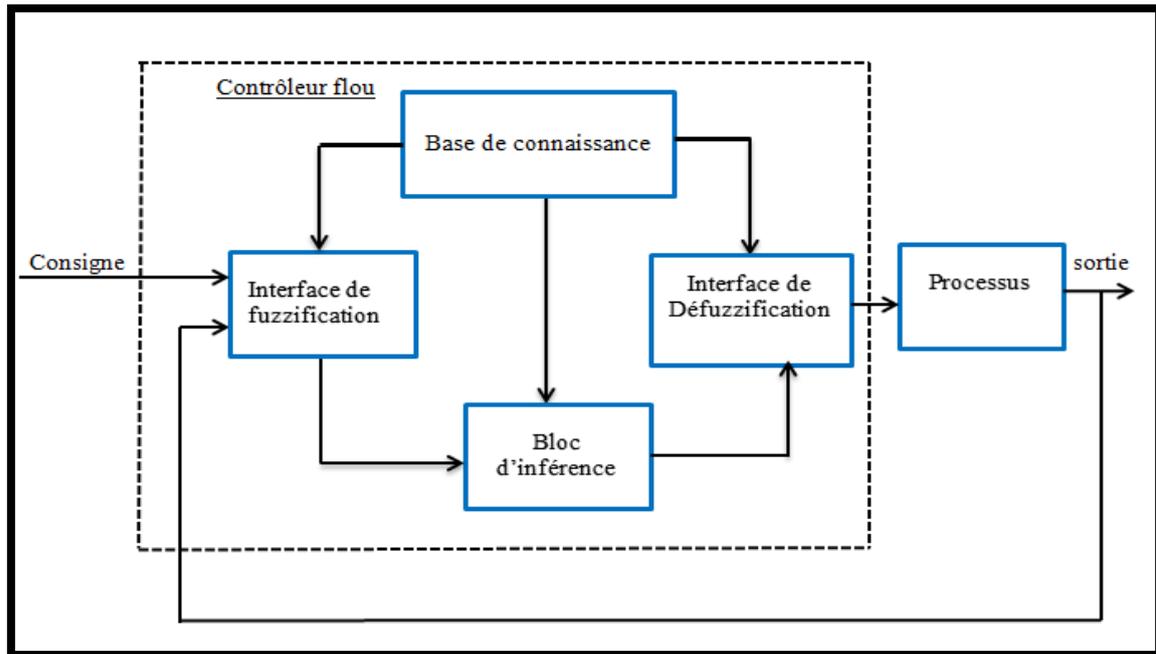


Figure III.8 schéma de la structure interne de la mise en œuvre d'un contrôleur flou.

##### III.3.1.1. Interface de fuzzification

La fuzzification fait la décomposition des entrées variable qui sont définies par des ensemble flous [10].

##### III.3.1.2. Inférence floue

Elle fait la comparaison entre les variables et l'ensemble prédéfinis pour déterminer la réponse appropriés [43] [44].

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont

- ✚ Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen)
- ✚ Méthode de Sugeno
- ✚ Méthode d'inférence MAX-MIN (méthode de Mamdani)

Dans notre étude on va travailler avec la dernière méthode, c'est une méthode effectuée au niveau conditionnel de l'opérateur "ET" par la formulation de la valeur minimale. La

conclusion dans chaque règle, introduite par "ALORS", relie les facteurs d'appartenance des prémisses aux fonctions d'appartenance des variables de sortie, en formant une valeur minimale. Enfin, l'opérateur "ou" relie différentes règles est réalisé en formant la valeur maximale.

### III.3.1.3. Interface de défuzzification

La défuzzification est l'étape finale de la conception d'un contrôleur flou, qui consiste à convertir les résultats d'inférence en fonctions appartenant en quantités physiques qui sont produites. On a plusieurs méthodes de défuzzification du système de commande flou [45] :

- Défuzzification par centre maximum.
- Défuzzification par valeur de maximum.
- Défuzzification par centre de gravité.

Sachant que dans notre étude on s'intéresse par la dernière méthode.

### III.3.2. Opérateurs utilisés dans la logique floue

#### a) L'opérateur ET :

L'opérateur ET est réalisé par le minimum (intersection) des fonctions d'appartenance dans la plupart des cas

$$\mu_{p \cap m} = \min(\mu_p(x), \mu_m(x)) \quad (\text{III.21})$$

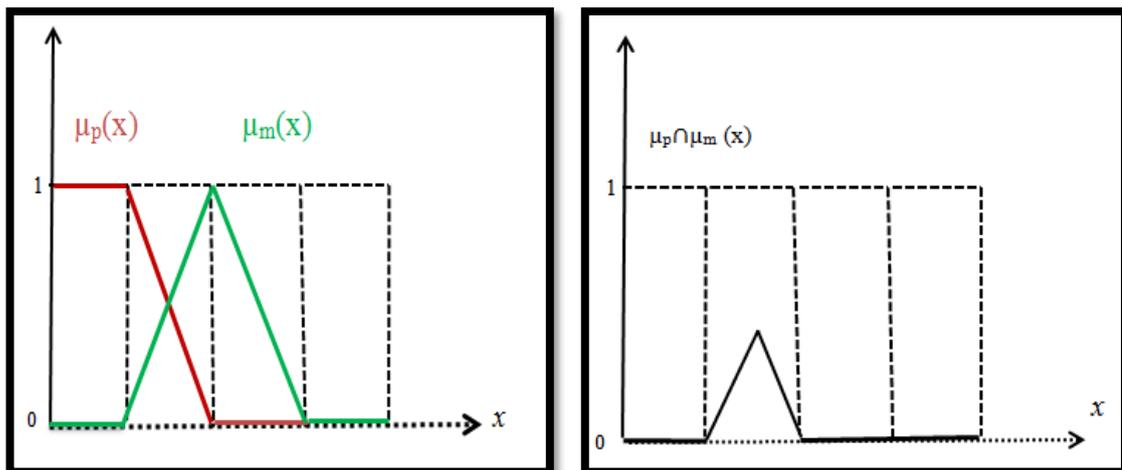


Figure III.9 Opérateur ET.

#### b) L'opérateur OU

En général, l'opérateur OU est réalisé le maximum des deux fonctions d'appartenance.

$$\mu_{p \cup m} = \min(\mu_p(x), \mu_m(x))$$

(III.22)

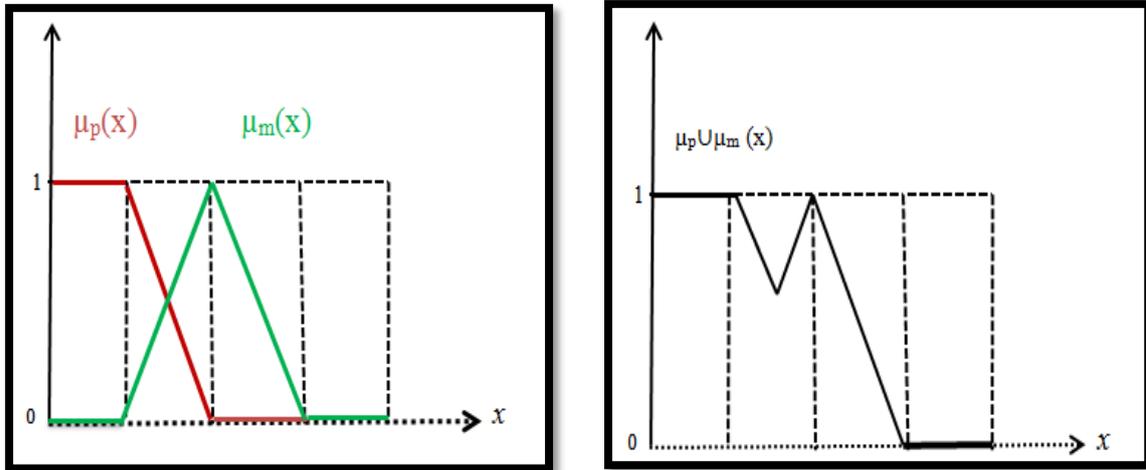


Figure III.10 Opérateur OU.

### c) L'opérateur NON :

Le complément permet de vérifier de combien un élément n'appartient pas à un ensemble

$$\mu_{\bar{p}}(x) = 1 - \mu_p(x)$$

(III.23)

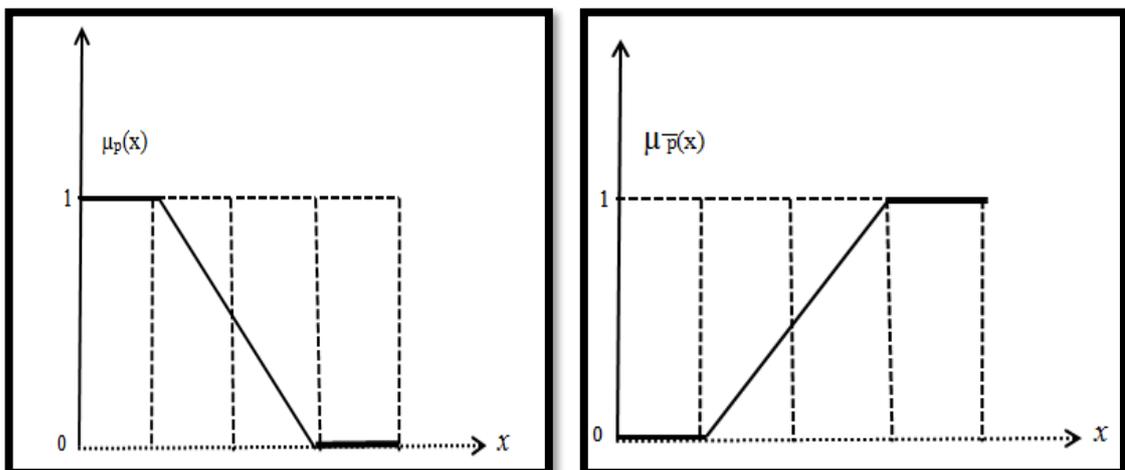


Figure III.11 Opérateur NON.

### III.3.3. Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

#### ❖ Avantage :

- Résolution de problèmes complexes à plusieurs variables
- Possibilité d'intégrer une expertise

- La non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser)
- La réduction du temps de développement et de maintenance
- La simplicité de définition et de conception [46] [47].

#### ❖ Inconvénients :

- La méthode d'ajustement est totalement empirique.
- Le rendement repose directement sur l'expertise.
- Il n'existe pas de démonstration possible, par exemple il est impossible de démontrer la stabilité de la boucle [18].

### III.3.4. Application de la logique floue à la commande de la puissance active et réactive de la MADA

Le régulateur logique floue est utilisé dans le système pour la commande des puissances statorique de la MADA. La figure (III.12), montre que la valeur de référence ( $P_{sref}$ ,  $Q_{sref}$ ) est comparée à la valeur réelle (mesurée) ( $P_{smes}$ ,  $Q_{smes}$ ) dans la boucle de contrôle floue pour déterminer l'erreur  $E_p$ .

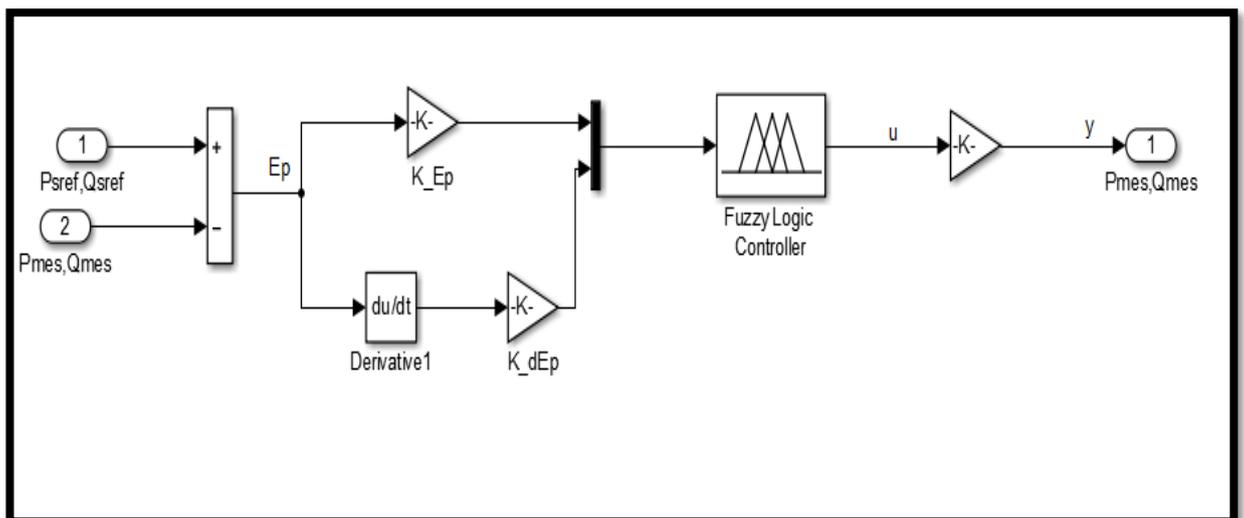


Figure III.12 Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive.

Les entrées du RLF sont calculées à temps  $K$  comme suit [7]

$$\begin{cases} E_p(k) = P_{sref}(k) - P_s(k) \\ E_p(k) = Q_{sref} - Q_s(k) \end{cases} \quad (III.24)$$

$$dE_p(k) = E_p(k) - E_p(k-1) \quad (III.25)$$

$$u = k_{Ep} \cdot E_p + k_{dEp} \cdot dE_p \quad (III.26)$$

$$y = k_u \cdot u \quad (III.27)$$

### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un détail sur la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentation, Pour le fonctionnement en génératrice les puissances active et réactive qui sont commandée par les tensions rotoriques  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  avec utilisant un régulateur proportionnel intégral, et nous avons également étudié la stratégie de la logique floue, utilisant la méthode Mamdani, basée principalement sur la notion de table de décision est implantée pour commander la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Ensuite et à partir d'une simulation sur l'environnement Matlab/Simulink nous avons présenté une comparaison numérique entre la commande vectorielle par PI classique et la stratégie de la logique floue pour la régulation des puissances du système.

**CHAPITRE IV**  
**SIMULATION ET**  
**INTERPRETATION DES**  
**RESULTATS**

## IV.1. Introduction

L'objectif d'utilisation de la commande en général et de leur application sur une machine asynchrone à double alimentation intégré dans un système éolien en particulier est d'obtenir un système de haute performance, avec la précision de la poursuite et la régulation (temps de montée, temps de réponse, dépassement et stabilité), la bonne robustesse vis-à-vis des perturbations, et l'adaptation en sensibilité à la variation de paramètres.

À partir de ce point de vue, nous pouvons analyser et comparer les résultats obtenus par la simulation des méthodes de commande pour voir la fiabilité et la robustesse contre les perturbations du système.

Donc, dans ce chapitre nous allons effectuer une comparaison par simulation numérique, et ce dans les mêmes conditions de fonctionnement entre deux techniques de commande (PI classique, la logique floue) pour le contrôle des puissances active et réactive générée par notre système

## IV.2. Choix des paramètres de la stratégie du contrôle par logique floue

Dans notre cas, nous allons procéder au remplacement du régulateur classique par un régulateur floue et simuler le comportement de la MADA. Pour cela, il faut définir un ensemble de stratégies de contrôle basé sur l'erreur entre une consigne prédéterminée et la sortie réelle du processus qui est, dans ce cas, les puissances actives et réactives de la machine et la variation de cette erreur.

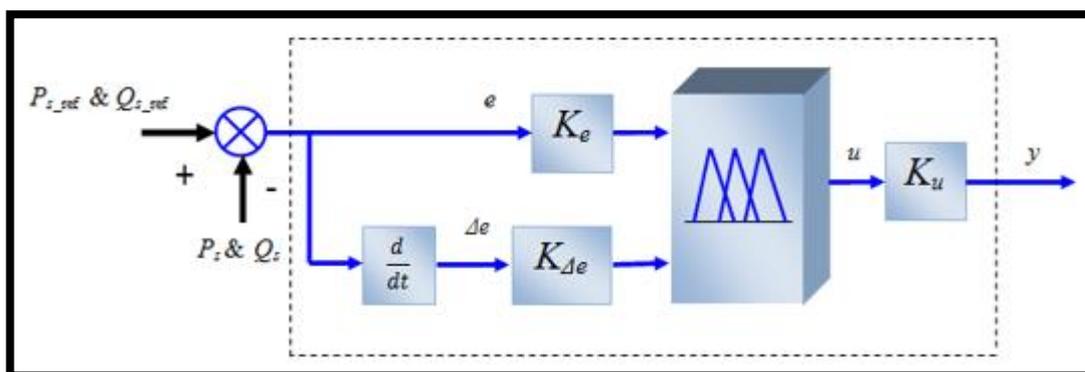


Figure IV.1 La commande par logique floue.

Pour le paramétrage, nous avons supposé le contrôleur floue avec cinq sous-ensembles flous construits à partir de la règle de condition suivante :

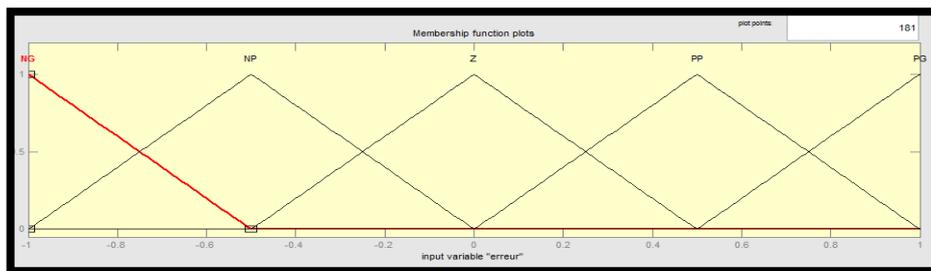
Rule (i): if  $s$  is  $F^i_s$ , then  $u_f$  is  $F^i_{uf}$ ,  $i=1, \dots, 5$

Le tableau suivant montre l'une des règles de control possible basées sur cinq fonctions d'appartenance.

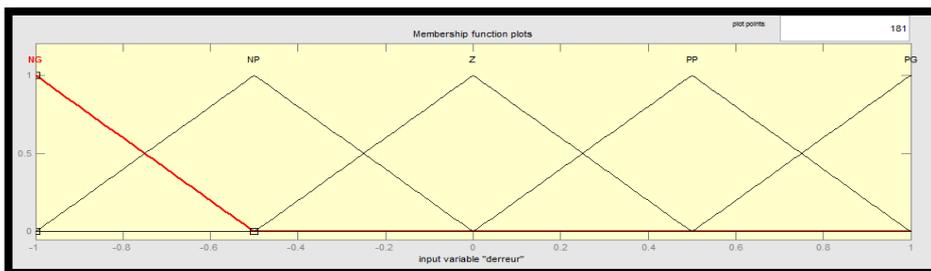
Tableau IV.1 Règles de control possible basées sur cinq fonctions d'appartenance

$E \backslash \Delta e$	<i>NG</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>PP</i>	<i>PG</i>
<i>NG</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>
<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>PP</i>	<i>PP</i>	<i>PP</i>
<i>ZE</i>	<i>PP</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NP</i>
<i>PP</i>	<i>NP</i>	<i>NP</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>
<i>PG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>

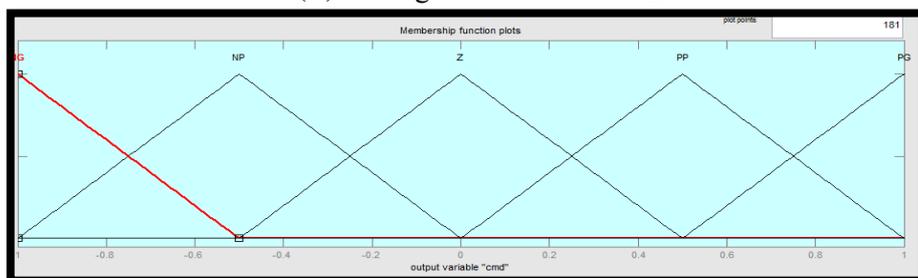
NG : Négatif grand, PG : Positif grand, NP : Négatif petit, PP : Positif petit, ZE : Zéro



-(A)- Erreur  $K_e$



-(B)- Changement d'erreur  $\Delta K_e$



-(C)- La fonction de sortie  $K_u$

Figure IV.2 Les fonctions d'appartenance : (A) : Erreur  $K_e$ , (B) : Changement d'erreur  $\Delta K_e$ , (C) : La fonction de sortie  $K_u$ .

### IV.3. Simulation de la MADA sans contrôle :

Dans ce cas, on a simulé notre machine MADA sans contrôle à partir du choix des valeurs quelconques et fixe des tensions d'alimentation rotorique  $V_{dr}=10V$ ,  $V_{qr}= 62V$ .

- Paramètre de la MADA :

La puissance nominal  $P_n : 7.5 \text{ KW}$ , la tension statorique  $V_s : 220 \text{ V}$ , la résistance rotorique  $R_r : 1.8 \Omega$ , la résistance statorique  $R_s : 0.95\Omega$ , inductance rotorique  $L_r : 0.088 \text{ H}$ , inductance statorique  $L_s : 0.094\text{H}$ , Inductance magnétisante  $M : 0.082\text{H}$ .

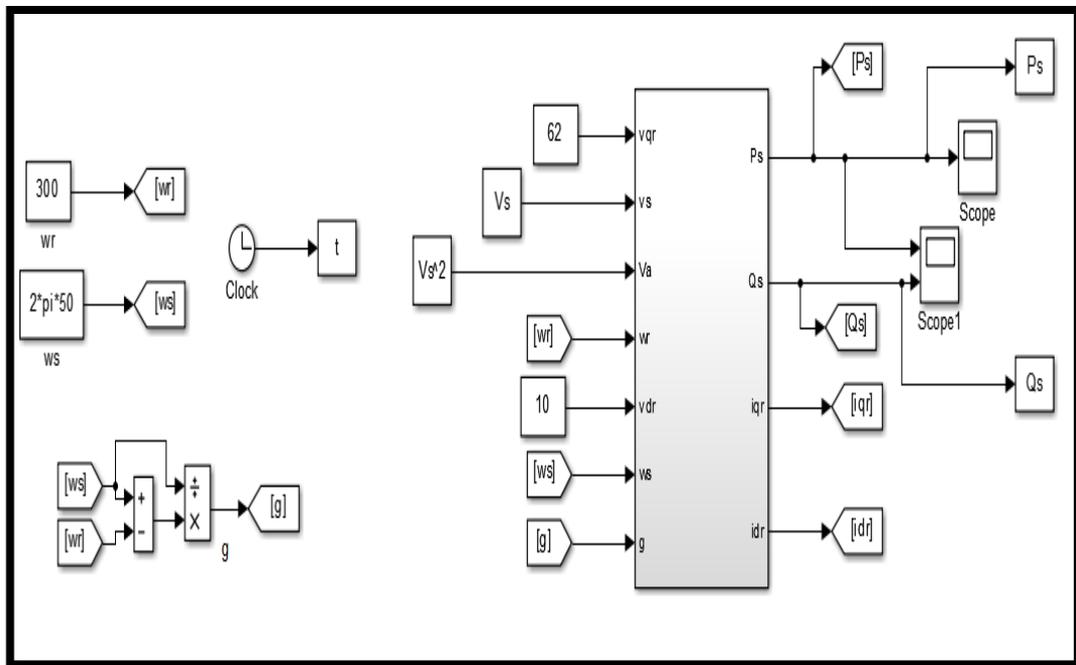


Figure IV.3 Schéma bloc de la MADA sans contrôle

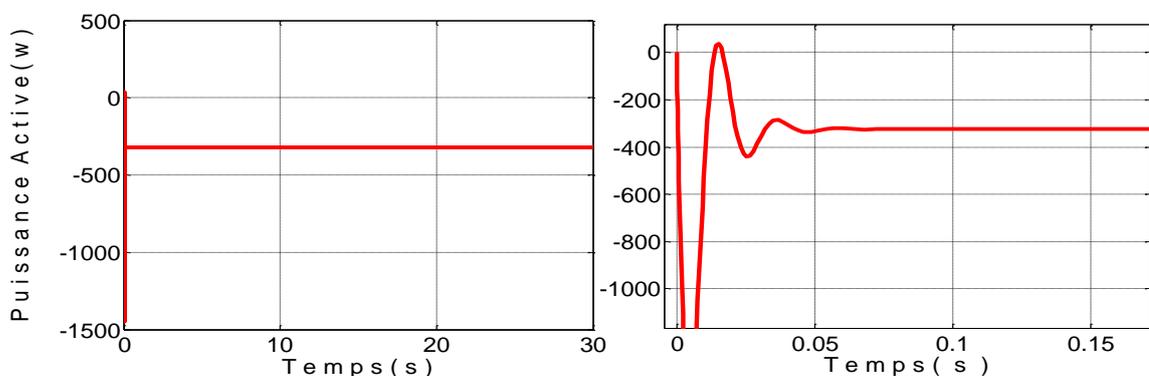


Figure IV.4 Variation de la puissance active statorique ( $P_s$ ) sans contrôle en fonction du temps.

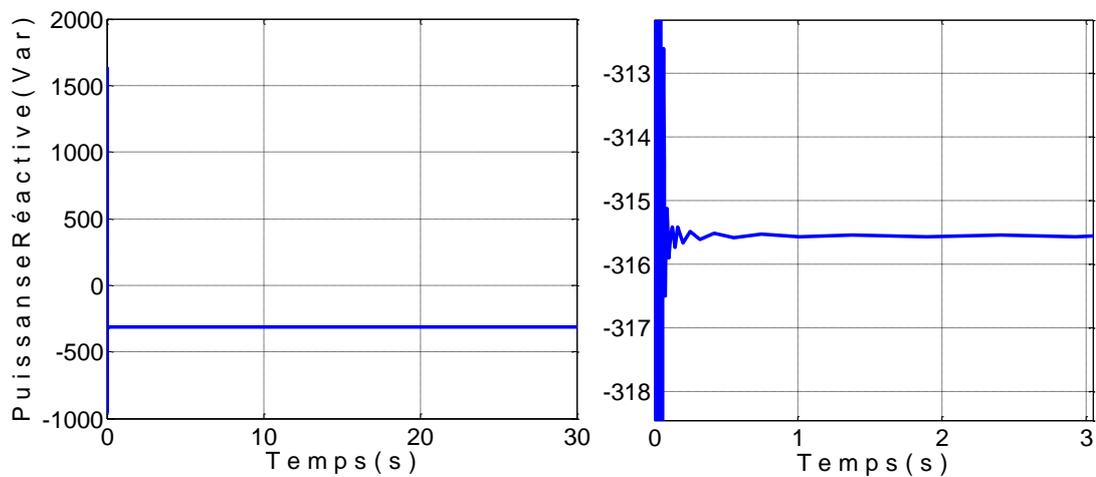


Figure IV.5 Variation de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) sans contrôle en fonction du temps

On a choisi la simulation de la machine sans contrôle pour voir leur réponse correspondant à des valeurs aléatoire, ce qui est illustré dans les figures (IV.4 et IV.5) .

### IV.4. Simulation de la MADA contrôlé par le contrôleur PI

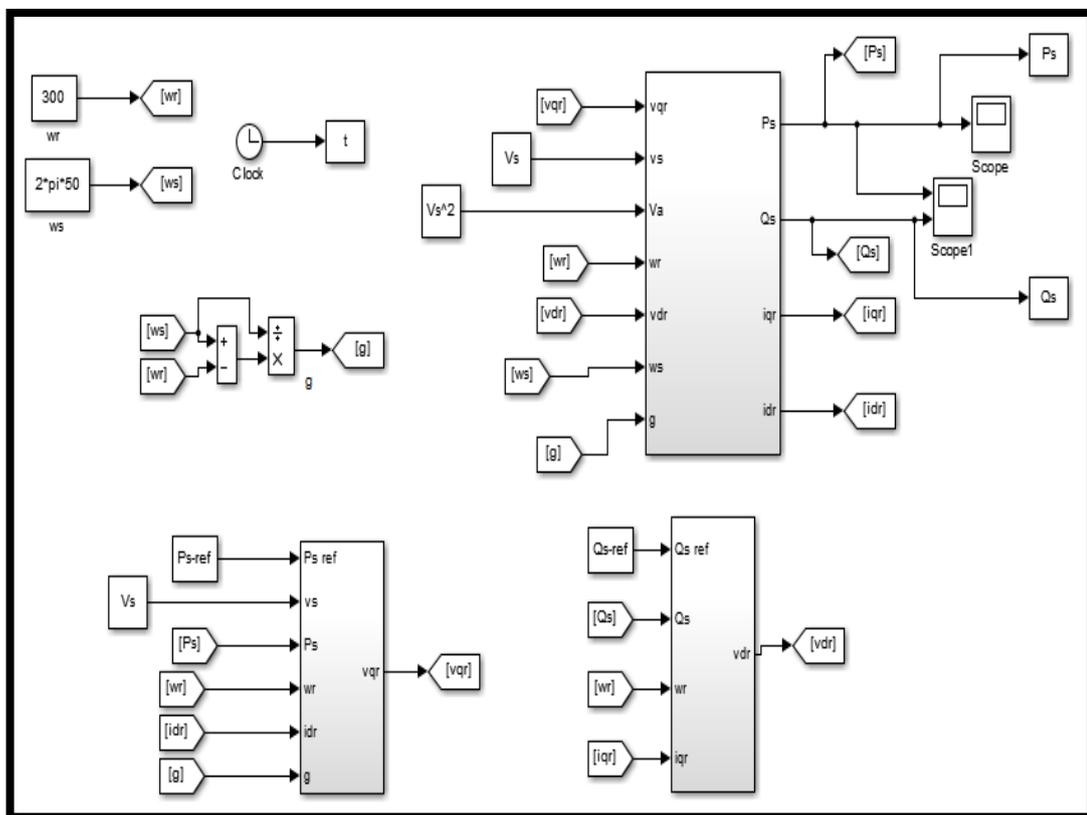


Figure IV.6 Schéma bloc de la MADA avec contrôleur PI

✓  $P_{s-ref} = -3000w$  et  $Q_{s-ref} = -2000var$  :

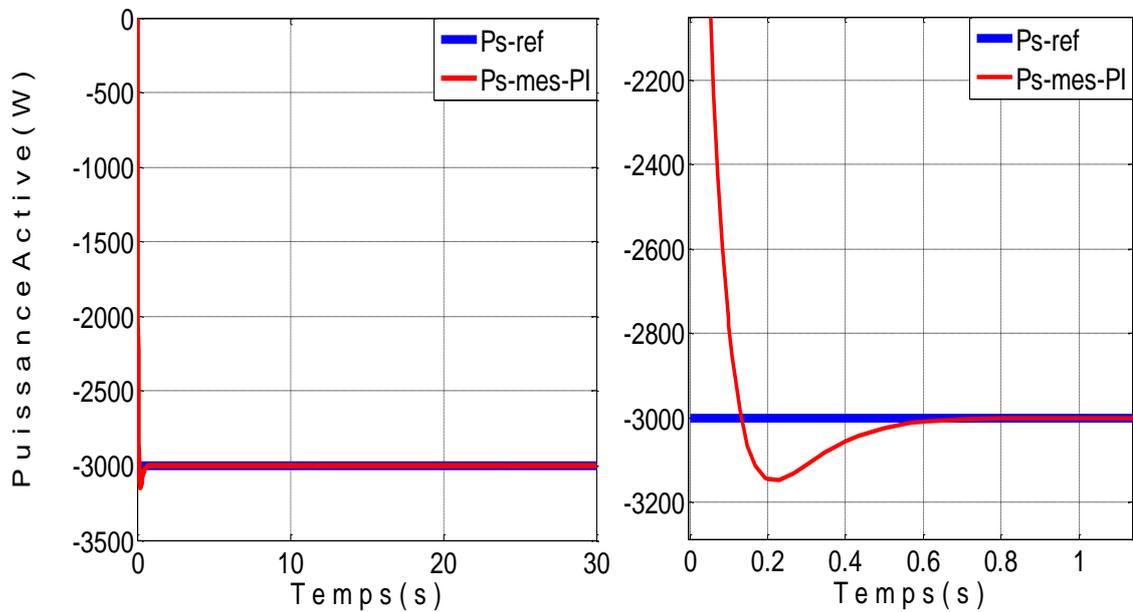


Figure IV.7 Adaptation de la puissance active statorique ( $P_s$ ) en fonction du temps par le contrôleur PI.

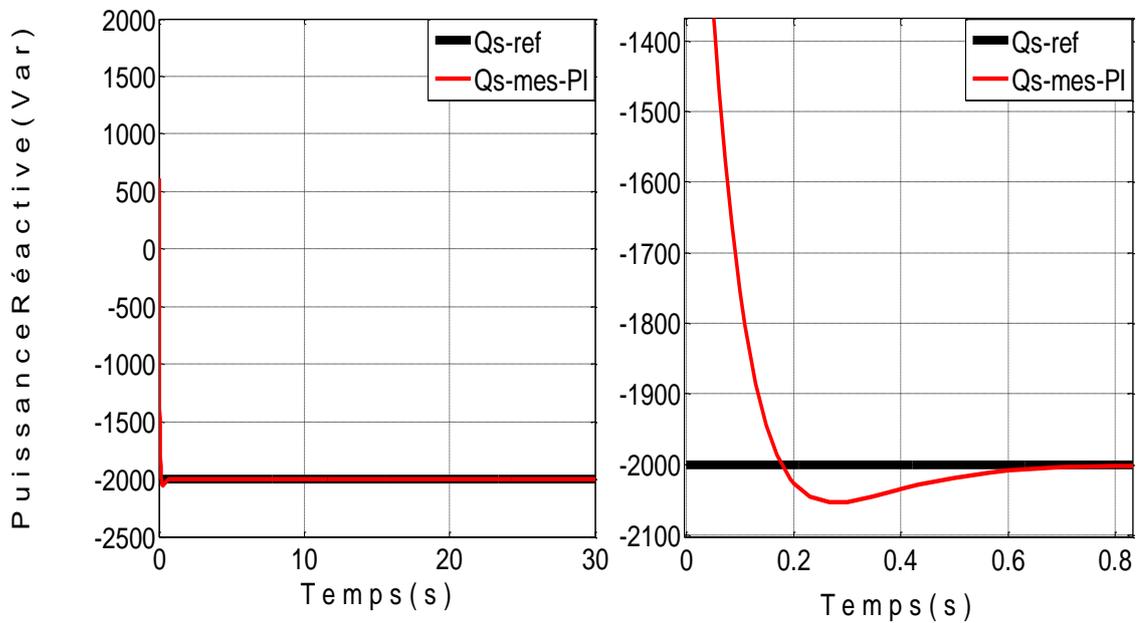


Figure IV.8 Adaptation de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) en fonction du temps par le contrôleur PI.

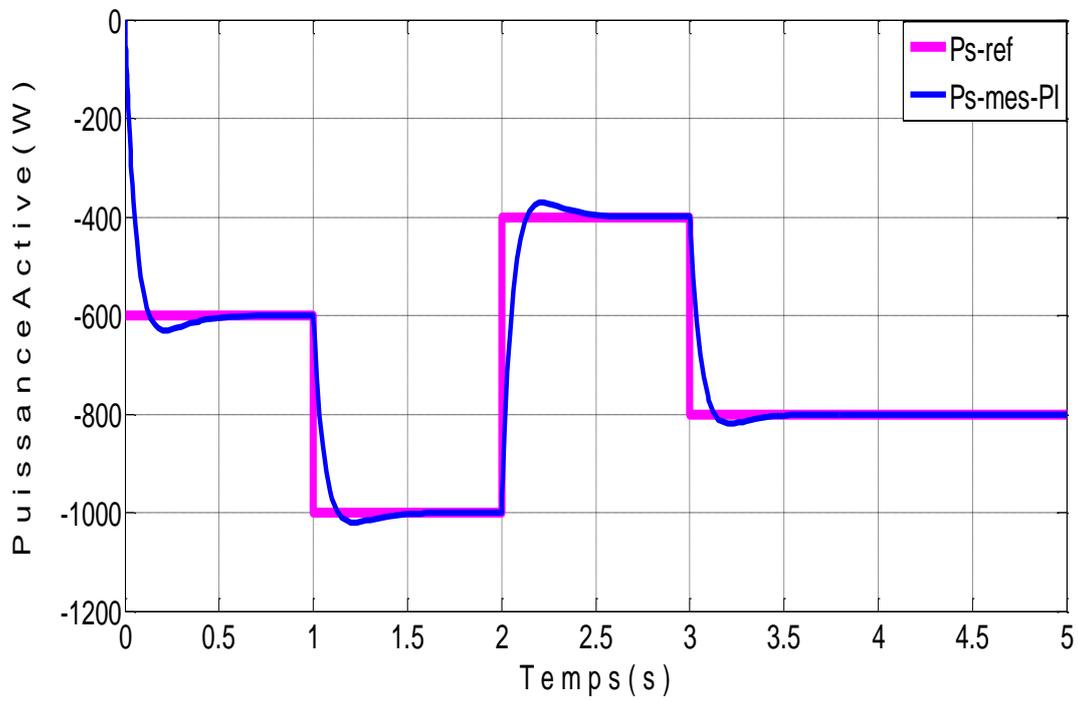


Figure IV.9 Contrôle de la puissance active statorique ( $P_s$ ) par le contrôleur PI.

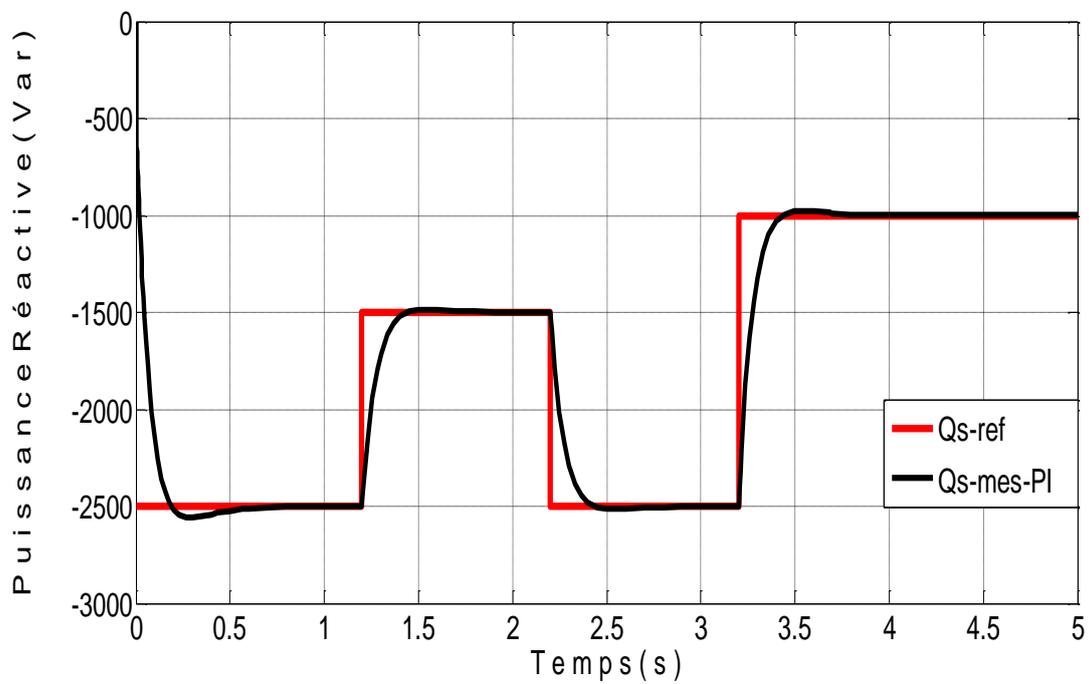


Figure IV.10 Contrôle de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) par le contrôleur PI.

### IV.5. Simulation par la logique floue

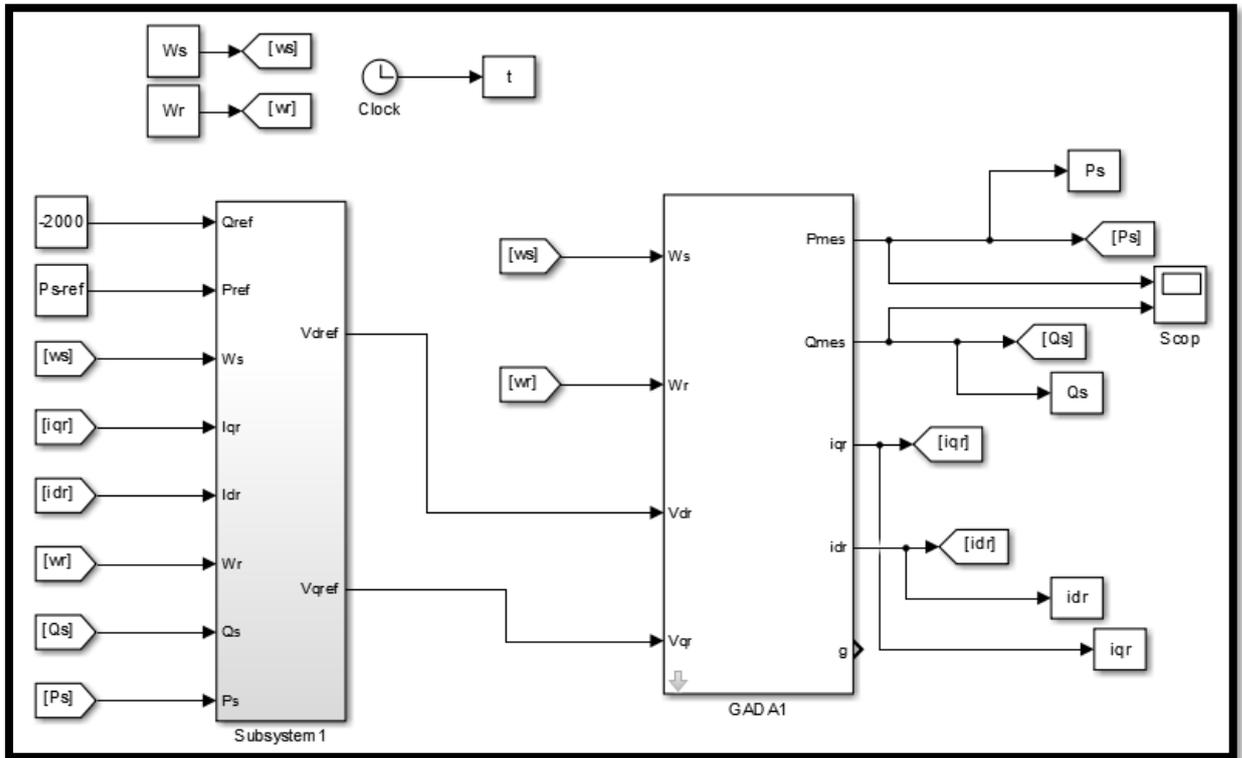


Figure IV.11 Schéma bloc avec contrôleur logique floue

✓ **Ps-ref= -3000w et Qs-ref= -2000var :**

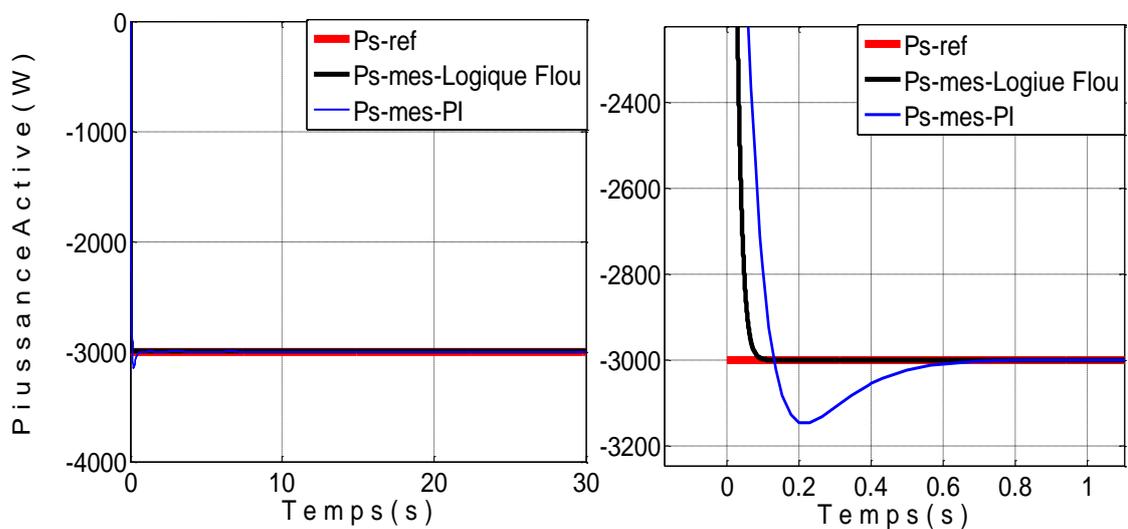


Figure IV.12 Adaptation de la puissance active statorique ( $P_s$ ) en fonction du temps par deux contrôleurs PI et logique floue.

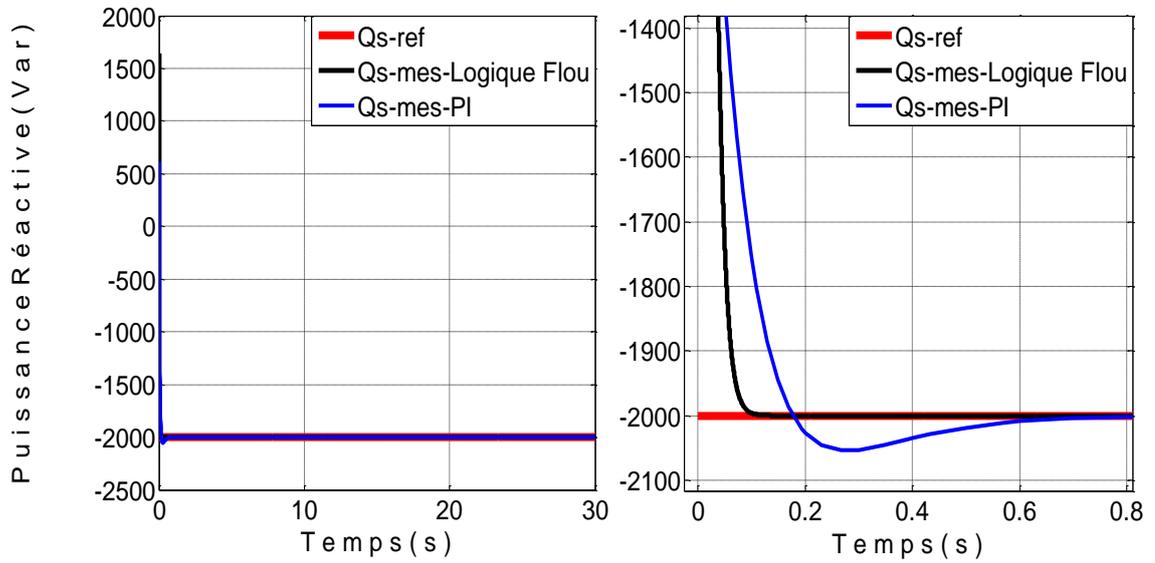


Figure IV.13 Adaptation de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) en fonction du temps par deux contrôleurs PI et logique floue.

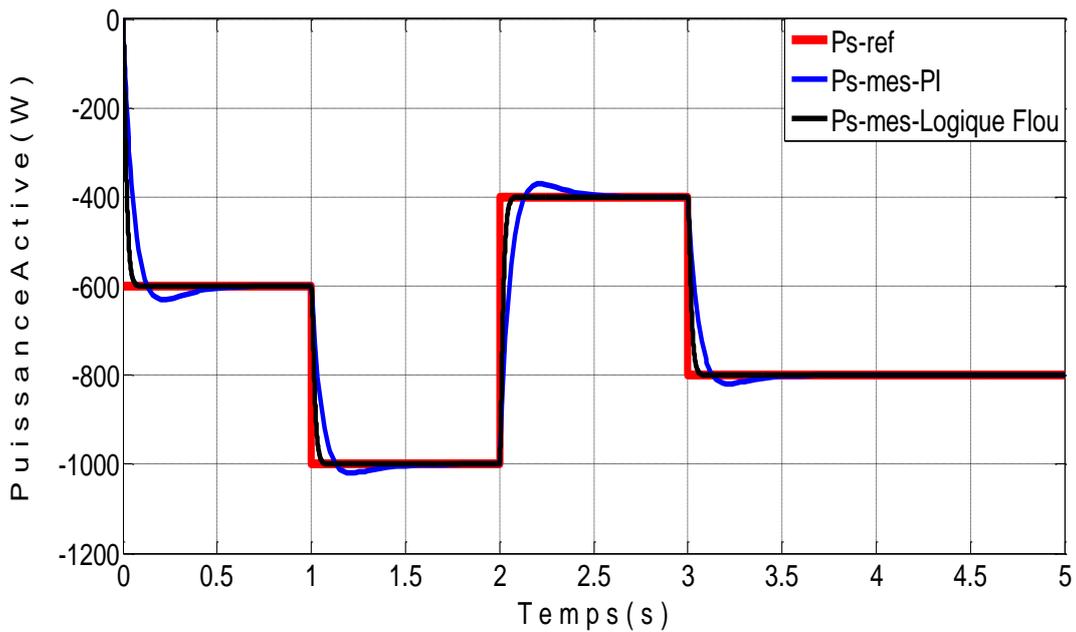


Figure IV.14 Contrôle de la puissance active statorique ( $P_s$ ) par deux contrôleurs PI et logique floue.

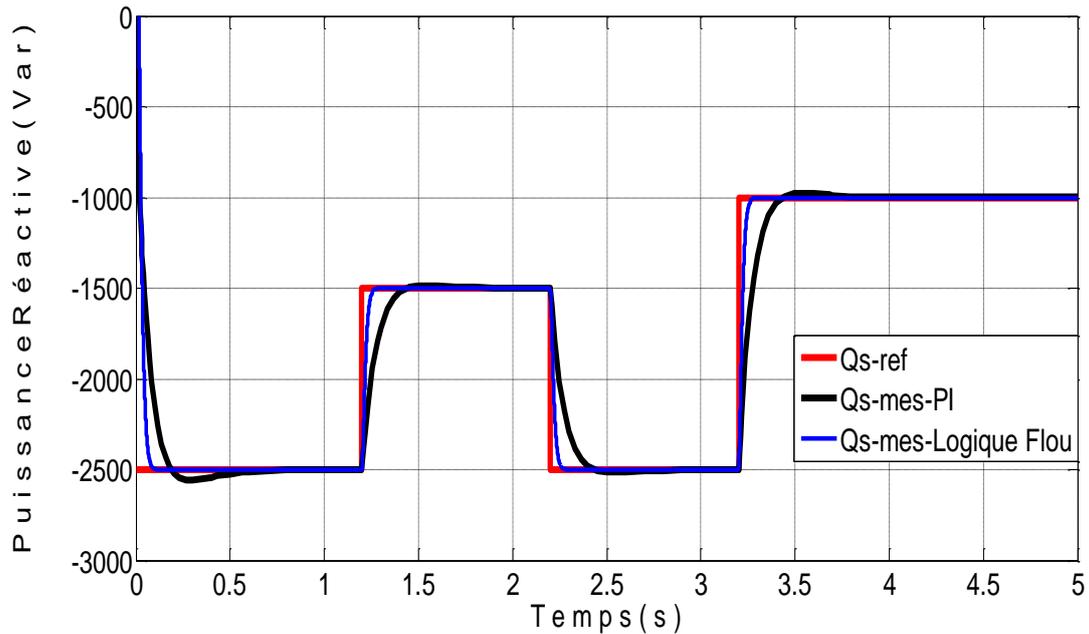


Figure IV.15 Contrôle de la puissance réactive statorique ( $Q_s$ ) par deux contrôleurs PI et logique floue.

## IV.6. Interprétation des résultats

Après la simulation de notre système, tous les résultats lors d'un cycle complet de fonctionnement pour les différents tests de simulation des puissances est représentés respectivement par leurs figures. Tous contiennent des zooms sur les moments de changement de contrainte.

Concernant la commande classique PI, et pour les figures IV.7, IV.8, on peut remarquer que les échelons de référence des puissances (échelons d'une valeur fixe :  $P_s\text{-ref}= 3000\text{w}$ ,  $Q_s\text{-ref}= 2000\text{Var}$ ) sont bien suivis par la génératrice (valeur mesuré). Les figures IV.9, IV.10 représente respectivement l'adaptation de la puissance active et réactive générer par la MADA. Au démarrage, et à l'instant  $t= [0 \ 1] \text{ s}$ , l'allure de la puissance active montré que l'évolution de cette puissance est vers la valeur de  $0.6\text{KW}$  et la puissance réactive vers la valeur de  $2.5\text{Kvar}$ . A  $t= [1.5 \ 2] \text{ s}$  : la puissance active  $P_s$  est adaptée à la valeur de  $1\text{KW}$  et la puissance réactive  $Q_s$  à la valeur de  $1.5\text{Kvar}$ . D'après ces résultats, nous notons que le régulateur PI règle la perturbation due à la variation des paramètres.

Dans les figures IV.12, IV.13, IV.14, IV.15 nous allons observer le comportement de contrôle du système par les régulateurs PI et RLF en poursuite et en régulation.

La robustesse de la commande par logique floue est testée après une comparaison avec le contrôleur PI. Dans les figures IV.13 et IV.14 on remarque que le contrôle des puissances présente des bonnes performances de la poursuite de la trajectoire avec une excellente adaptation pour le contrôleur RLF (temps réponse de la logique floue est plus rapide proportionnelle au PI par une valeur de logique floue  $T_r=0.1s$  et pour le contrôleur PI  $t_r=0.65s$ ).

Finalement, nous pouvons conclure que le contrôle par logique floue est plus robuste par rapport au contrôleur PI.

## IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une simulation comparative sur l'environnement MATLAB/SIMULINK des deux méthodes de commande pour le contrôle des puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Nous pouvons noter que la commande par la logique floue est montrée leur succès en apportant une nette amélioration des performances.

À la fin de ce chapitre, nous pouvons conclure en montrant que le réglage par la logique floue présente une amélioration par rapport à la commande par le régulateur PI classique. La commande par logique floue présente une meilleure robustesse que celle de la commande vectorielle par régulateur classique PI, cette robustesse garantit une bonne insensibilité aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.

## Conclusion générale

Pour conclure notre travail, nous tenons à faire rappeler quand même notre principal objectif de départ qui était la contribution à la commande de la machine asynchrone à double alimentation intégré dans un système éolien et l'impact de l'introduction de l'intelligence artificiel pour résoudre les problèmes de robustesse dans la commande proposée à savoir la robustesse à la variation des paramètres d'adaptation.

Dans le premier chapitre, nous avons d'abord fait un rappel sur les systèmes éoliens et les concepts fondamentaux de la conversion d'énergie éolienne en énergie électrique. Ensuite, nous avons rappelé les différents types d'aérogénérateurs avec les Principaux composants d'une éolienne Enfin, Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique avec les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

Afin de mieux maîtriser de notre système, le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différents composants de la chaine de conversion (la turbine, le multiplicateur, les convertisseur statique et la MADA). Pour la MADA en se basant sur le modèle équivalent de Park tout en tenant en compte des hypothèses simplificatrices.

Dans le troisième chapitre, nous avons commencé en premier lieu par la présentation de la commande vectorielle en appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle mathématique de la MADA dans un référentiel biphasé lié au champ tournant, ce qui nous permet d'avoir un modèle de commande des puissances active et réactive découplé. Deux méthodes ont été envisagées : la commande directe et indirecte à base des régulateurs PI dimensionnés par la méthode de compensation de pôle. Ensuite, nous avons présenté la théorie de la commande par logique floue pour le réglage des puissances active et réactive fournies au réseau électrique par la MADA.

Pour le dernier chapitre et dans la procédure d'amélioration de la commande, nous sommes passé ensuite aux récentes avancées en matière de technologie de traitement de signal qui sont basées sur les techniques de l'intelligence artificielle, telles que la logique floue, qui possède des caractéristiques essentielles pour l'amélioration des performances de la commande proposée.

En ce qui concerne la logique floue pour la commande de la MADA, les résultats de simulation montrent que cette technique de réglage apporte une excellente robustesse de contrôle par rapport au régulateur classique PI.

---

Enfin, nous pouvons conclure que les systèmes de contrôle des puissances générés par une MADA dans un système éolien utilisant la logique floue ont répondu aux objectifs visés et présentent des performances intéressantes, surtout en milieu industriel parce qu'ils sont bien adaptés lorsqu'on a des contraintes au niveau de la régulation.

## Références bibliographiques

- [1] B. BENYACHO, K. GUERAOU, B. BAHRAR, « Modélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) » ; 13<sup>ème</sup> congrès de mécanique, PP.11-14,2017.
- [2] P. Rault, « Modélisation dynamique et Commande des réseaux à courant continu multi-terminaux haute tension », thèse de doctorat en génie électrique, école centrale de Lille,2014.
- [3] F. KENDOULI, K. NABTI, K. ABED, H. BENALL, « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation » ; Revue des énergies renouvelables, Vol.14, PP.109-120,2011.
- [4] B.P GANTHIA, S.K BARIK, «Steady-state and dynamic comparative analysis of PI and fuzzy logic controller in stator voltage oriented controlled DFIG fed wind energy conversion System»; journal of the institution of engineers, PP.273-286,2020.
- [5] A. TAMAARAT, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » ; thèse de doctorat en électrotechnique, université de Biskra,2015.015.
- [6] R. BEHLOUL, S. MOKRANI, « Etude, modélisation et commande d'une éolienne à base d'une MADA » ; mémoire pour l'obtention de diplôme de l'ingénieur, école supérieure en science appliqué Tlemcen, 2020.
- [7] Y. DJERIRI, Z. BOUDJEMA, « Commande robuste par la logique floue et les réseaux de neurones artificiels de la GADA : étude comparative » ; revue des énergies renouvelables, Vol. 20 No.1, PP.147 – 160,2017.
- [8] S. BOUKAKA, « Réalisation d'une bibliothèque de lois de commande adaptative pour MSAP » ; mémoire maîtrise en génie électrique, université de Quebec,2015.
- [9] B. REGUIG, « Modélisation et commande floue d'une génératrice asynchrone à double alimentation application à l'énergie éolienne » ; mémoire fin d'étude master, université de M'sila,2016.
- [10] W. ARIRI, M. OURAHOU, A. HADDI, «Fuzzy logic rotor currents control of a DFIG-based wind turbine»; international conference on automation, control engineering and computer science, Vol.21, PP.3-8,2017

- [11] A. HARROUZ, N. KADOURI, K. KAYISLI, I. BULBUL, I. COLAK, «A Fuzzy Controller for Stabilization of Asynchronous Machine»; 7<sup>th</sup> international conference on renewable energy research and application, PP.14-17, 2018.
- [12] M, Y. ZIDANI, L. YOUB, S. BELKACEM, F. NACERI, « Design of robust control using fuzzy logic controller for doubly-fed induction motor drives. U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 81, Iss. 1, PP.159-170,2019.
- [13] A. HEMEYINE, A. ABBO, A. BAKOURI, M. LABADDI, «Power Control for Wind Turbine Driving a Doubly Fed Induction Generator using Type-2 Fuzzy Logic Controller»; Conference paper IEEE, P.7,2019.
- [14] M. NAGAIAH, K. SEKHAR, «Analysis of fuzzy logic controller based bi-directional DC-DC converter for battery energy management in hybrid solar/wind micro grid system»; international journal of electrical and computer engineering, Vol.10, No.3, PP.2271-2281,2020
- [15] A. MESAI, H. KAIS, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l’intelligence artificielle » ; mémoire fin d’étude master, université de SIDI-BEL-ABBES ,2017.
- [16] A. TOUAHRI, « Application de la DTC a un aérogénérateur asynchrone double alimenter » ; mémoire de magistère en électrotechnique, université de Batna, 2016.
- [17] I. OSMANI, O. MALTI, « Modélisation et commande indirect des puissances de la génératrice asynchrone à double alimentation dédié à un système éolienne » ; mémoire de fin d’étude master, Université de Tlemcen,2017.
- [18] O. SEROUR, I. AROUAK, « Modélisation et commande d’un système éolien basé sur une génératrice double alimentation » ; mémoire de fin d’étude master, université de Constantine, 2020.
- [19] M. LARABI, « Conception de la commande d’une machine asynchrone destinée à l’énergie renouvelable » ; mémoire de magistère en électrotechnique, université d’Oran, 2018.
- [20] A. TEBBAL, M. SEKHRI, « Commande Prédicative d’un Système éolien à base d’une Machine Synchronne à Aimant Permanent » ; mémoire de fin d’étude master, université Jijel ,2019.
- [21] O. DJAAFRI, I. HARIZI, « Modélisation, simulation et contrôle d’une turbine éolienne » mémoire de fin d’étude master, université de M’SILA ,2017.

- [22] I. BOULEGROUNE, « Etude et réalisation d'une turbine éolienne » ; mémoire de master, université de Biskra,2020.
- [23] K. HAMOUDA, « Modélisation et commande vectorielle d'un système éolien basé sur un générateur asynchrone a double alimentation(GADA) » ; mémoire fin d'étude master en physique énergétique, université d'Adrar,2013.
- [24] A. DAHBI, « Contribution à la commande et à l'amélioration des performances de l'énergie électrique d'une chaine de production éolienne » ; thèse de doctorat en électrotechnique, université de Batna-2-,2018.
- [25] L. KHELFIAT, L. MAATAOUI, « Etude et simulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone doublement alimentée » ; mémoire de fin d'étude master en électrotechnique, université de Annaba,2017.
- [26] S. DAHMANI, « Etude et commande d'une éolienne a base d'une machine asynchrone à double alimentation » ; mémoire de fin d'étude master en électrotechnique, université de Sidi-Bel-Abbès,2014.
- [27] M. SMAILLI, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération » ; mémoire de maîtrise de l'ingénierie, université du Québec en Abitibi-Temiscamingue,2013.
- [28] M.I. PARANCHIS, H. PRATAMA, « Wind turbine design and test »; International journal of teknomekanic, vol.5, No.1, PP13-27,2022.
- [29] 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 en génie électrique, université de Nancy ,2018.
- [30] O. NOURELDDEEN, I. HAMDAN, « A novel controllable crowbar based on fault type protection technique for DFIG wind energy conversion system using adaptive neuro-fuzzy inference system »; Protection and Control of Modern Power Systems, Vol.10, P.13,2018.
- [31] A. DJOUDI, H. CHEKIREB, D. KOUSSA, E.M. BERKOUK, « Exploitation robuste d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » ; revue des énergies renouvelables, vol.15, PP.629-637,2012.

- [32] B. KELKOUL, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation » ; mémoire de magister API, faculté de technologie, université de Tlemcen, 2013.
- [33] M.Y ZIDANI, « Contribution à la commande d'une MADA. Apport des techniques de l'intelligence artificielle » ; thèse de doctorat en électrotechnique, université de Batna, 2019.
- [34] A. RACHID, « Modélisation et simulation des machines électrique » ; Ellipses, Paris, 2011, P 138, ISBN : 978-2-7298-6495-8.
- [35] M. KHEROUF, Z. KHERICI, « Etude et modélisation d'une chaîne de conversion éolienne à base de MADA connectée au réseau » ; mémoire fin d'étude master en électrotechnique, université de Annaba, 2017.
- [36] A.S. SAIDI, « Behavior of a doubly fed induction machine »; international journal of advanced and applied sciences, Vol.10, PP.14-18, 2019.
- [37] Y. DJERIRI, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle » ; thèse de doctorat en électrotechnique, université de Sidi-Bel-Abbes, 2015.
- [38] N. EL OUANJLI, A. DEROUICH, A GHEZIZAL, « Contribution à l'optimisation des performances d'une machine asynchrone à double Alimentation (MADA) fonctionnant en mode moteur » ; journal international sur les technologies de l'Information et des Systèmes de production intégrée (TISPI) à l'EHEI, 2016.
- [39] N. AMOS, « étude comparative de la chaîne de puissance des véhicules électrique » ; mémoire de maîtrise en génie électrique, université du Québec a trois- rivières de canada, 2020.
- [40] S. RABAH, « Analyse et commande de la machine asynchrone à double alimentation » ; mémoire de maîtrise en génie électrique, université du Québec à trois- rivières de canada, 2017.
- [41] F. SENANI, « La machine asynchrone à double alimentation : Stratégies de Commande et Applications » ; thèse doctorat en électrotechnique, Université de Constantine, 2018.
- [42] K. BERBOUCHI, S. BOURAGAA, « Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation intégrer dans un système éolien » ; mémoire fin d'étude master en électrotechnique, Université Adrar, 2018

- 
- [43] M. KEDNZI, A. AISSAOUI, M. ABID, A. TAHOUR, «Control of the photoelectric generator for used in feeding of the independent wind turbine system» ; Journal international de l'électronique de puissance et du système d'entraînement, Vol.10, No.3, PP.1613-1627,2017.
- [44] D. CHEKIMA, « Commande d'une Machine Asynchrone par Logique Floue » ; Mémoire fin d'étude master, université d'EL-Oued, 2014.
- [45] S. OUDALI ; I. ZAOUAK, « Réglage et commande de puissance d'un aérogénérateur asynchrone » ; Mémoire de Master, Université de Adrar, 2020/2021.
- [46] A. DEBOUZE ; A. KELAIAIA, « Commande floue des machines électriques » ; mémoire fin d'étude master, Université de Guelma, 2019.
- [47] M. GHANI, F. DIHMANE, « Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone A Double Alimentation Par La Logique Floue » ; mémoire de Master, Université de ADRAR ,2017.

## ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة المولد اللاتزامني مزدوج التغذية المخصص لطاقة الرياح، كذلك التحكم في الطاقة المطبقة عليه.

ولقد اهتمنا بشكل خاص بالتحكم الموجه الغير مباشر مع تقنية توجيه التدفق المغناطيسي. تم تقديم هيكلين للتحكم هما منظم PI و منظم المنطق الضبابي. بعد ذلك سيتم عرض نتائج المحاكات بواسطة برنامج الماطلاب.

التي توضح دقة منظم المنطق الضبابي مقارنة بالتقنية الاخرى.

## Résumé :

Le présent mémoire traite l'étude de la machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système éolien, ainsi le contrôle des puissances appliqué à la MADA.

On s'intéresse particulièrement à l'application de la commande vectorielle par orientation du flux statorique à la MADA. Deux structures de commande ont été présenté qui sont le régulateur PI et le régulateur flou. Puis des résultats de simulation par Matlab /Simulink seront présentés, montrant la robustesse de régulateur flou par rapport au commande PI.

**Mots clés :** Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)-Commande vectorielle- Logique floue – PI

## Abstract:

This work deals with the study of the asynchronous machine with double power supply dedicated to a wind system, as well as the control of the powers applied to the DFIG

We are particularly interested in the application of indirect vector control by orientation of the stator flux to the DFIG. Two control structures have been presented which are the PI regulator and the fuzzy regulator. Then results of simulation by MATLAB will be presented, showing the precision of fuzzy control compared to PI control.

## Keywords:

Double fed induction machine, vector control, fuzzy logic, PI