

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université de Batna  
Faculté de Technologie  
Département d'Electrotechnique



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

En Electrotechnique

**Option** : Réseaux Electriques

Présenté par :

**Touati Mustapha Kamel**

Thème

---

---

## Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique

---

---

Soutenu le : 15/01/2015 devant le jury composé de :

Dr. R.Abdessemmed	Prof	U. BATNA	Président
Dr. S.Sellami	Prof	U. BATNA	Rapporteur
Dr. F.Nacéri	Prof	U. BATNA	Examineur
Dr. S.Benaggoune	M.C.A	U. BATNA	Examineur
Dr. A.Dib	M.C.A	U. OUM EL BOUAGHI	Examineur

Université de Batna 2015

## ***Remerciement***

*Tout d'abord je voulais dire que grâce à dieu que je suis arrivé à réaliser ce projet, qui est un résultat d'un long travail.*

*Mon profond remerciement à mon promoteur monsieur SELLAMI Said, pour son suivi et conseils durant l'évolution de ce travail.*

*Je remercie les membres de jury qui ont accepté de juger mon travail.*

*Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous les enseignants de l'université de Batna qui ont contribué à notre formation, à mes collègues pour leurs encouragements pendant les années des études.*

*Un merci particulier à monsieur BENAGOUNE Said.*

*A tous ce qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

*A ma mère*  
*A mon père*  
*A mes frères et mes sœurs*  
*A toute ma famille et mes amis*

*Mustapha Kamel*

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

## **Chapitre 01 : Etat de l'art sur les aérogénérateurs**

I.1. INTRODUCTION ..... 3

I.2. LES AEROGENERATEURS..... 3

I.2.1. HISTORIQUE ET CROISSANCE DE L'EXPLOITATION DE L'ENERGIE EOLIENNE .....3

I.2.2. DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE .....4

I.2.3 L'ENERGIE EOLIENNE EN QUELQUES CHIFFRES .....5

I.2.3.1 L'énergie éolienne pour quoi faire? .....5

I.2.3.2 L'éolienne en Algérie.....5

I.2.3.2.1 Projet à faire en l'Algérie .....6

I.2.3.3 Taille des aérogénérateurs .....6

I.2.3.4 Conversion vent → électricité.....6

I.2.4. DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES .....7

I.2.5 CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE .....8

I.2.5.1 Principe .....8

I.2.5.2 Constitution .....9

I.2.6. STRATEGIES DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE.....10

I.2.6.1 Bilan des forces sur une pale .....10

I.2.6.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne : .....10

I.2.6.3 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne .....11

I.2.6.3.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" .....11

I.2.6.3.2 Système d'orientation des pales "pitch" .....12

I.2.7. LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE .....13

I.2.7.1. Avantages .....13

I.2.7.2. Inconvénients .....14

I.3. LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION ..... 14

I.3.1. INTRODUCTION .....14

I.3.2. TOPOLOGIE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA .....14

I.3.2.1. Structure .....14

I.3.2.2. Principe de fonctionnement de la MADA .....15

I.3.3. MODES DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA .....16

I.3.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone .....16

I.3.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone .....16

I.3.3.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone .....16

I.3.3.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone .....17

I.3.3.5. La plage de variation de vitesse de la MADA.....17

I.3.4. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE LA MADA .....18

I.3.4.1. Les avantages de la MADA.....18

I.3.4.2. Les inconvénients de la MADA .....18

I.4. CONCLUSION..... 19

## **Chapitre 02 : Modélisation de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA)**

II.1 INTRODUCTION..... 20

II.2 MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN BASE SUR UNE GADA ..... 20

II.2.1 MODELE DE LA TURBINE EOLIENNE .....21

II.2.1.1 Modèle des pales.....21

II.2.1.2 modèle du multiplicateur : .....23

II.2.1.3 modèle de l'arbre .....24

II.2.2 MODELISATION DE LA GADA .....24

II.3 BLOC DE SIMULATION .....	26
II.3.1 RESULTAT DE SIMULATION .....	26
II.4 CONCLUSION .....	27

## **Chapitre 03 : Commande de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA)**

III.1. INTRODUCTION .....	28
III.2. GENERALITES SUR LA COMMANDE VECTORIELLE .....	28
III.2.1. PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE .....	28
III.2.2. COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE ET INDIRECTE.....	29
III.2.2.1. Commande vectorielle directe .....	29
III.2.2.2. Commande vectorielle indirecte .....	29
III.2.3. COMMANDE VECTORIELLE PAR ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE.....	30
III.3 STRATEGIE DE COMMANDE MPPT.....	32
III.3.1 CALCUL DU COUPLE DE REFERENCE .....	32
III.2.4. LA REGULATION .....	33
III.2.4.1. Calcul des régulateurs.....	34
III.2.4.1.1. Régulateur du courant $I_{rd}$ .....	34
III.2.4.1.2. Régulateur du couple $C_{em}$ .....	35
III.2.5. SCHEMA BLOQUE DE LA SIMULATION .....	36
III.3 RESULTAT DE SIMULATION .....	36
III.4 MODELE POUR LE CONTROLE INDEPENDANT DES PUISSANCES .....	37
III.4.1 COMMANDE DIRECTE .....	37
III.4.2 MISE EN PLACE DE LA REGULATION .....	38
III.4.3 CALCUL DE REGULATEUR PI .....	38
III.4.4 RESULTAT DE SIMULATION .....	39
III.5 COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE .....	40
III.5.1 INTRODUCTION .....	40
III.5.2 PRINPE DE LA LOGIQUE FLOUE.....	40
III.5.3 DIFFERENTES FORMES DES FONCTIONS D' APPARTENANCE .....	41
III.5.4 OPERATEURS DE LA LOGIQUE FLOUE .....	42
III.5.4.1 Opérateur ET (Intersection floue).....	42
III.5.4.2 Opérateur OU (Union floue).....	42
III.5.4.3 Opérateur NON (complémentation floue) .....	43
III.5.5 DOMAINE D'APPLICATION .....	43
III.5.6 STRUCTURE D'UNE COMMANDE A LOGIQUE FLOUE .....	44
III.5.6.1 Base de connaissance.....	44
III.5.6.2 Base de données.....	44
III.5.7 CONTROLEUR FLOU DE TYPE MAMDANI.....	45
III.6 RESULTAT DE SIMULATION POUR REGULATEUR PI-FLOUE.....	46
III.7 COMPARAISON ENTRE LES DEUX RESULTATS .....	46
III.8. CONCLUSION .....	47

## **Chapitre 04 : Connexion D'une Eolienne En Utilisant Un Convertisseur NPC A Trois Niveaux**

## Sommaire

---

IV.1 INTRODUCTION .....	48
IV.2 MODELISATION DE L'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX .....	48
IV.2.1 STRUCTURE DE L'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX .....	48
IV.3. MODELISATION DU FONCTIONNEMENT D'UN BRAS D'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX .....	49
IV.3.1. DIFFERENTES CONFIGURATIONS D'UN BRAS DE L'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX.....	50
IV.3.2. FONCTIONNEMENT D'UN BRAS D'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX.....	51
IV.3.3. MODELE DE CONNAISSANCE DE L'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX.....	52
IV.3.4. FONCTIONS DE CONNEXION DES INTERRUPTEURS.....	53
IV.3.5. FONCTIONS DE CONNEXION DES DEMI-BRAS .....	53
IV.3.6. FONCTION DE CONVERSION .....	54
IV.4. STRATEGIE DE COMMANDE DE L'ONDULEUR TRIPHASE A TROIS NIVEAUX.....	57
IV.4.1. COMMANDE TRIANGULO-SINUSOÏDALE COMMANDE DE L'ONDULEUR TRIPHASE A TROIS NIVEAUX A DEUX PORTEUSES.....	57
IV.4.1.1. Principe de la commande.....	57
IV.4.1.2. Algorithme de commande .....	57
IV.4.1.3. Caractéristique de tension de référence .....	59
IV.5. RESULTATS DE SIMULATION.....	60
IV.6. INTERPRETATION.....	60
IV.6 ETUDE DE LA LIAISON AU RESEAU ELECTRIQUE .....	61
IV.6.1 MODELISATION DE LA LIAISON .....	61
IV.6.1.1 Modélisation du filtre d'entrée .....	61
IV.6.1.2 Modélisation du bus continu .....	62
IV.7 RESULTATS DE SIMULATION.....	62
IV.8.CONCLUSION.....	63
CONCLUSION GENERALE.....	64

## Annexe A

## NOTATIONS

<b>MADA</b>	Machine asynchrone à double alimentation
<b>GADA</b>	génératrice asynchrone à double alimentation
<b>MPPT</b>	Point de fonctionnement à puissance maximale
<b>NPC</b>	Neutral Point Clamped
$P_{\text{vent}}$	la puissance du vent
$S_{\text{éolienne}}$	La surface balayée par l'éolienne
$v$	Vitesse de vent
$P_{\text{éolienne}}$	La puissance du vent
$C_p$	Le coefficient de puissance
$\rho$	La masse volumique de l'air
$\lambda$	Le rapport de vitesse
$R$	Le rayon des pales de l'éolienne
$\beta_i$	L'angle d'inclinaison des pales
$C_{\text{mec}}$	Couple mécanique sur l'axe du générateur
$C_{\text{turbine}}$	Couple total de l'éolienne
<b>G</b>	Rapport de multiplicateur
$R_s$	Résistance de l'enroulement statorique
$R_r$	Résistance de l'enroulement rotorique
$L_s$	Inductance cyclique propre statorique
$L_r$	Inductance cyclique propre rotorique
$M$	Inductance cyclique mutuelle.
$\phi_s$	Flux statorique
$\phi_r$	Flux rotorique
$I_s$	Courant statorique
$I_r$	Courant rotorique

## NOTATIONS

---

<b>g</b>	Glissement
$P_s$	Puissance active statorique
$Q_s$	Puissance réactive statorique
$P_r$	Puissance active rotorique
$Q_r$	Puissance réactive rotorique
<b>Cem</b>	couple électromagnétique de la machine
$\Omega$	Vitesse mécanique du rotor en [rd/s]
$\omega_s$	Pulsation de fréquence statorique
$\omega_r$	Pulsation de fréquence rotorique
<b>p</b>	Nombre de paires de pôles
$V_s$	Tension statorique
$V_r$	Tension rotorique
$I_{ds}, I_{qs}, I_{os}$	Courant statorique instantané selon l'axes (d, q)
$I_{dr}, I_{qr}, I_{or}$	Courant rotorique instantané selon l'axe (d,q)
$\phi_{ds}, \phi_{qs}, \phi_{os}$	Flux statorique instantané selon l'axe (d,q)
$\phi_{dr}, \phi_{qr}, \phi_{or}$	Flux rotorique instantané selon l'axe (d,q)
$V_{ds}, V_{qs}, V_{os}$	Tension statorique instantanée selon l'axe (d, q)
$V_{dr}, V_{qr}, V_{or}$	Tension rotorique instantanée selon l'axe (d, q)
<b><math>\sigma</math></b>	Coefficient de dispersion de Blondel ou coefficient de fuite total
<b>p(<math>\theta</math>)</b>	Matrice de transformation de Park
<b>J</b>	Inertie des masses tournantes
<b>f</b>	Coefficient de frottement visqueux
<b><math>K_p</math></b>	Coefficient de proportionnalité ;
<b><math>K_i</math></b>	Coefficient d'intégration.

## Introduction Générale

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

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

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

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

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

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

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

C'est donc dans ce cadre que nous allons développer notre étude à travers les chapitres suivants :

Le premier chapitre est consacré à l'élaboration analytique du modèle dynamique de l'aérogénérateur asynchrone double alimenté. En premier lieu, on présentera brièvement l'historique et la croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne, puis les différents types des éoliennes et des génératrices utilisées et les éléments principaux dans la chaîne de conversion électromécanique qui vont être modélisés pour donner au mieux une représentation permettant la simulation du système. Nous dressons une étude de l'art de la MADA à travers une présentation de la topologie et les domaines d'utilisation de la machine asynchrone doublement alimentées, ainsi qu'un bilan de ses avantages et de ses inconvénients, puis une description de son fonctionnement en génératrice à vitesse variable a été détaillée.

Le second chapitre présente une modélisation de la turbine éolienne (la partie mécanique), ainsi une modélisation dans un repère biphasé (le modèle adapté est basé sur la transformation de Park) lié au champ tournant en vue d'une alimentation et d'une commande par convertisseurs statiques de la machine asynchrone double alimentation.

Le troisième chapitre, met en œuvre la commande vectorielle de la génératrice asynchrone doublement alimentée basée sur un régulateur PI (Proportionnel Intégral), Cette commande permet d'assurer le découplage des axes d et q, dont le but est d'améliorer le comportement statique et dynamique du système ; on va aussi voir comment appliquer la stratégie du commande MPPT sur la turbine et d'extraire le maximum de puissance désirée. Enfin, on remplace la régulateur PI classique par une régulateur PI-Floue (régulateur de l'intelligence artificiel).

Ensuite, au quatrième chapitre nous présentons l'étude et la mise en œuvre de convertisseur NPC à trois niveaux associé à la machine asynchrone à double alimentation, pour cela nous élaborons deux parties :

La première partie présente l'étude et la commande de ce convertisseur NPC trois niveaux, la deuxième partie comporte l'étude de la liaison de la génératrice au réseau électrique.

# Chapitre 01

## Etat de l'art sur les aérogénérateurs

### 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 que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [1]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

### I.2. Les aérogénérateurs

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de cent ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale actuellement. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

#### I.2.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

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

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [2].

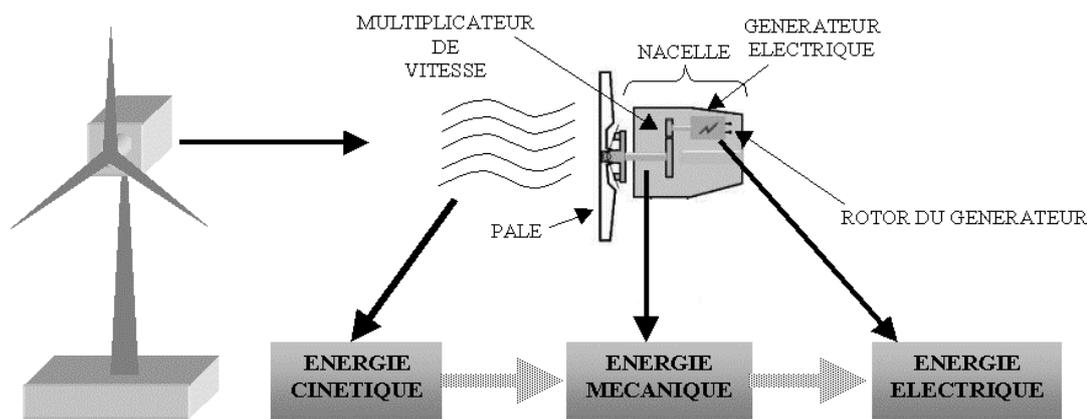
Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985.[54]

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW, [55]

## I.2.2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 1.1).



**Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent, [14]**

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [3].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière.

## I.2.3 L'énergie éolienne en quelques chiffres

### I.2.3.1 L'énergie éolienne pour quoi faire?

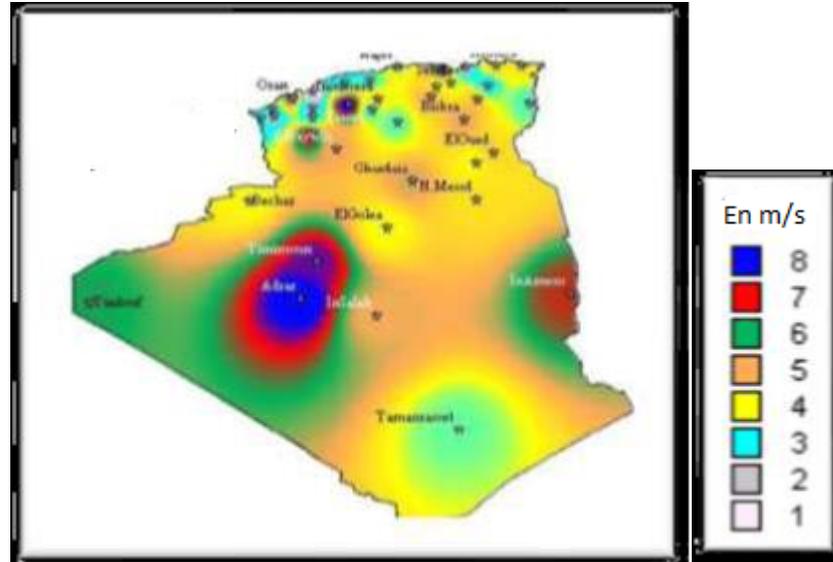
L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

Ainsi l'Homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait:

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.
- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes.
- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5MW [1].

### I.2.3.2 L'éolienne en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar.



**Figure I.2 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie, [70].**

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes : [71]

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- et quatre zones en sites sahariens.

### **I.2.3.2 .1 Projet à faire en l'Algérie**

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ.

Le potentiel éolien, technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007, [69].

Les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an.

La figure I.2 présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne.

### **I.2.3.3 Taille des aérogénérateurs**

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce que présente la figure 1.3. Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

### **I.2.3.4 Conversion vent → électricité**

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de bases, à savoir:

- Une hélice qui transforme le vent en énergie mécanique;
- Une transmission mécanique;
- Un générateur électromécanique;
- un système de liaison électrique;
- un régulateur.

Selon l'utilisation et la technologie d'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées. On distingue deux grandes familles d'éoliennes:

- Les éoliennes autonomes;
- Les éoliennes raccordées au réseau.

Ceci va beaucoup influencer le procédé de conversion, notamment l'un des objets de notre étude: y associer ou non une unité de stockage d'énergie. Ce stockage pourra être réalisé au moyen de batteries, d'accumulateurs cinétiques (volant d'inertie) ou autre ...

La conception mécanique peut aussi aboutir à des éoliennes totalement différentes:

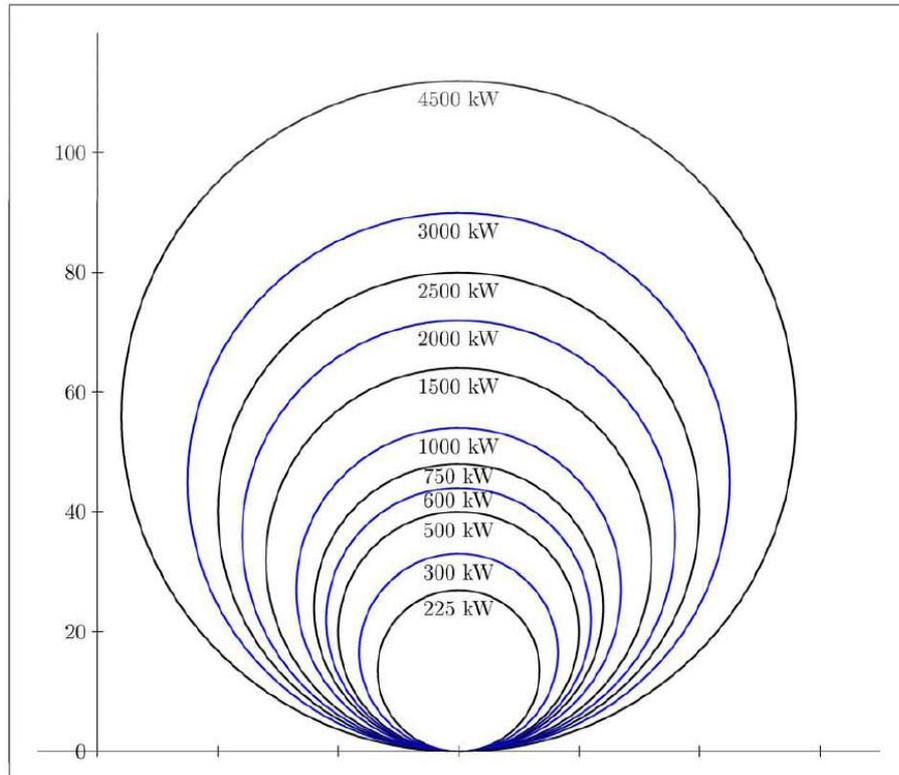
- Axe rotor vertical.
- Axe rotor horizontal.

Hélice face au vent.

Hélice sous le vent.

- Avec ou sans multiplicateur de vitesse.

Il y a donc une éolienne adaptée à chaque utilisation avec un certain niveau de technologie et donc une robustesse qui peut en dépendre. L'architecture générale des aérogénérateurs peut également dépendre de nombreux facteurs comme le site d'implantation, l'impact sur le paysage, la technologie employée...



**Figure 1.3 : Taille des hélices en m et puissance en kW, [4]**

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 mètres de diamètre. Cette hélice est perchée à plus de 100 mètres de hauteur pour produire jusqu'à 4.5MW [5].

#### **I.2.4. Différents types d'éoliennes**

A partir du vent, l'extraction de l'énergie électrique exige les éléments de base suivants :

- Une hélice ;
- Une transmission mécanique ;
- Une génératrice électromagnétique ;
- Un système de régulation et de liaison électrique.

Comme l'hélice est l'élément principal qui reçoit le vent et le transforme en énergie mécanique, elle connut plusieurs développements. Selon la position géométrique et le type d'arbre, les éoliennes se différencient principalement en (voir figure 1.4):

- Eoliennes à axe vertical ;
- Eoliennes à axe horizontal (plus utilisées) ;
- Eoliennes à hélice sous le vent ;

- Eoliennes à hélice face au vent (plus utilisées).



a) Eoliennes à axe horizontal



b) Eoliennes à axe vertical (Darrieus)

**Figure 1.4 : Technologies des éoliennes, [6]**

## I.2.5 Constitution d'une éolienne

### I.2.5.1 Principe

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [8] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Du fait de la non-maîtrise de l'énergie primaire, qui, de plus, est intermittente, il est difficile d'obtenir une conversion et une transmission de l'énergie régulières, puisque a priori la seule possibilité de stockage est inertielle, au prix d'une accélération de la turbine. Dans ces systèmes, la régularité de la transmission de l'énergie est donc tributaire d'un moyen de stockage en sus de l'inertie naturelle de la turbine.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure 1.5. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

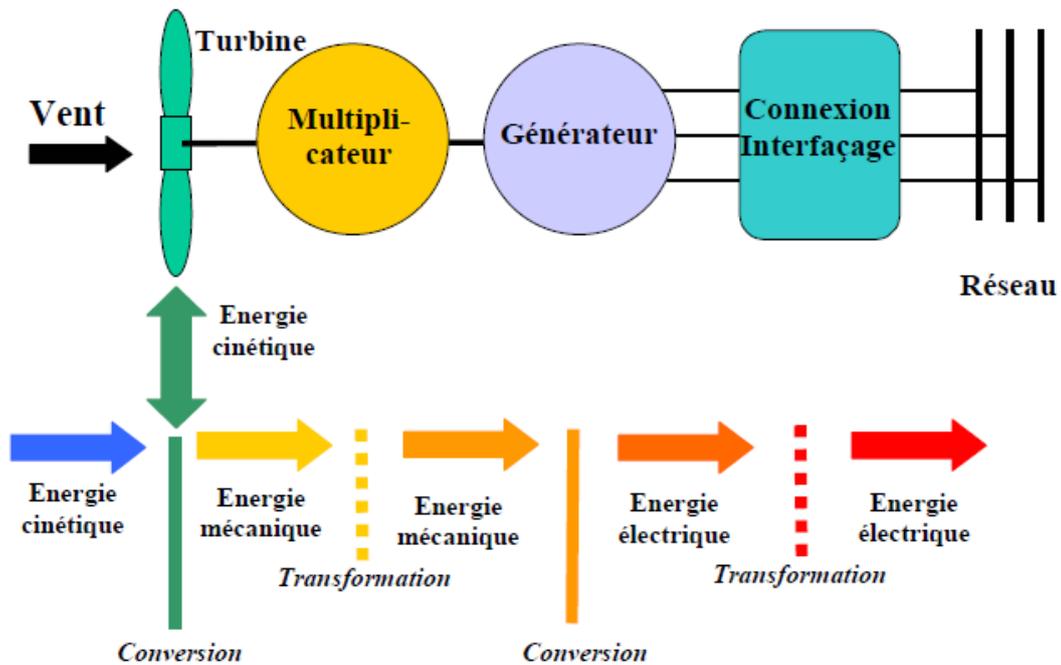


Figure 1.5 : Principe de la conversion d'énergie, [56]

### I.2.5.2 Constitution

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présentés sur la Figure 1.6 :

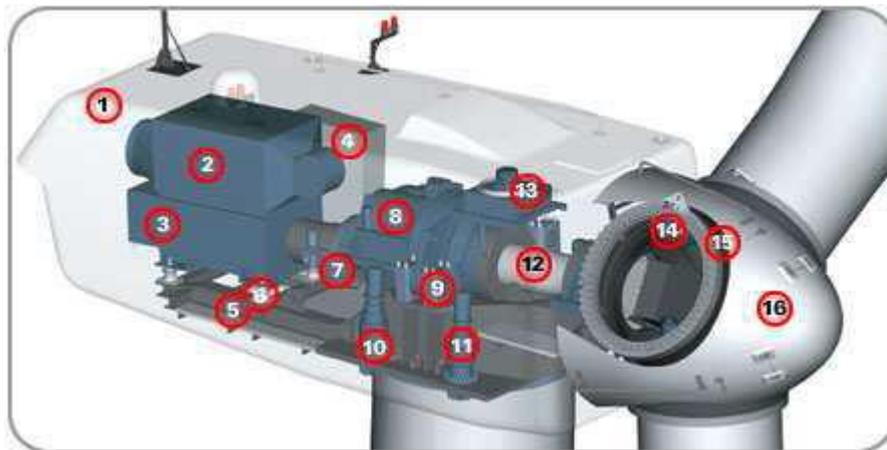


Figure 1.6 : Exemple de système éolien, [9]

Un mât, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (2). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorisée (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (12) supportant la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (13). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile.

La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.[9]

## I.2.6. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

### I.2.6.1 Bilan des forces sur une pale

La Figure 1.7 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représenté par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $V_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $\vec{F}_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\vec{F}_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement.

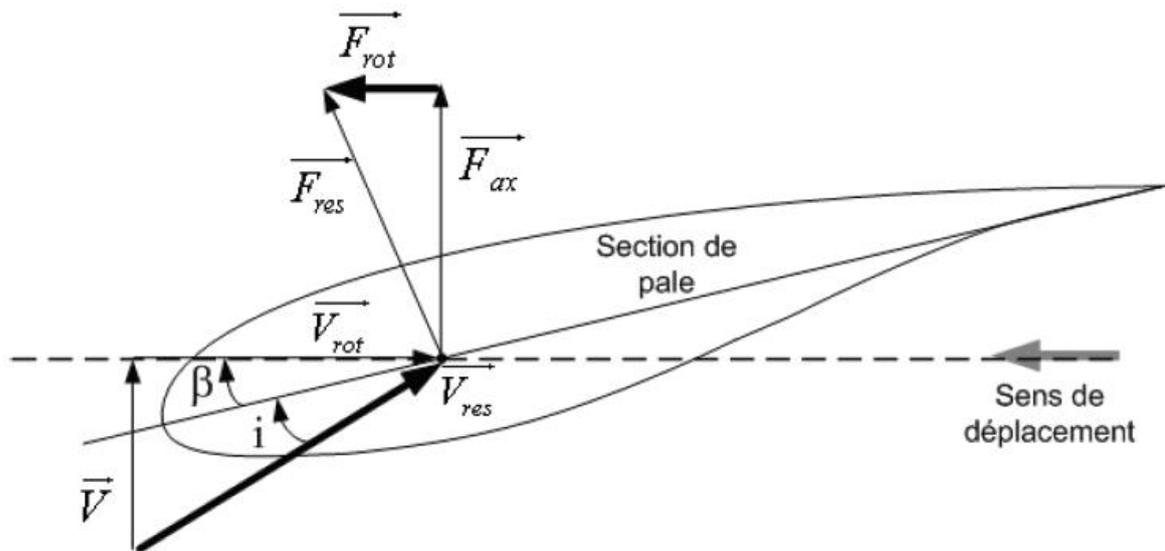


Figure 1.7 : Bilan des forces sur une pale, [10]

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

### I.2.6.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale  $P_n$  à une vitesse de vent nominale  $V_n$ , au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire

au-delà d'une vitesse maximale  $V_{max}$  qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement, figure 1.8:[68]

- La zone I: le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine
- La zone II: la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent
- La zone III: la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$
- La zone IV: la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ( $\beta=90^\circ$ )

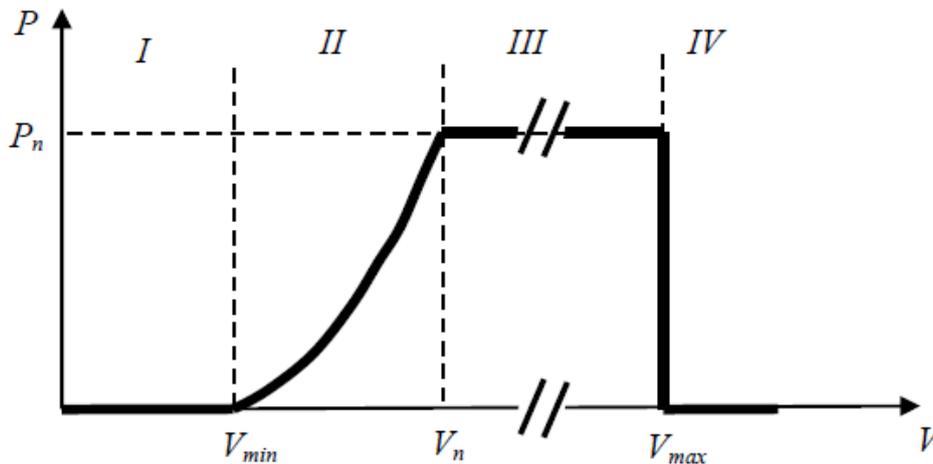
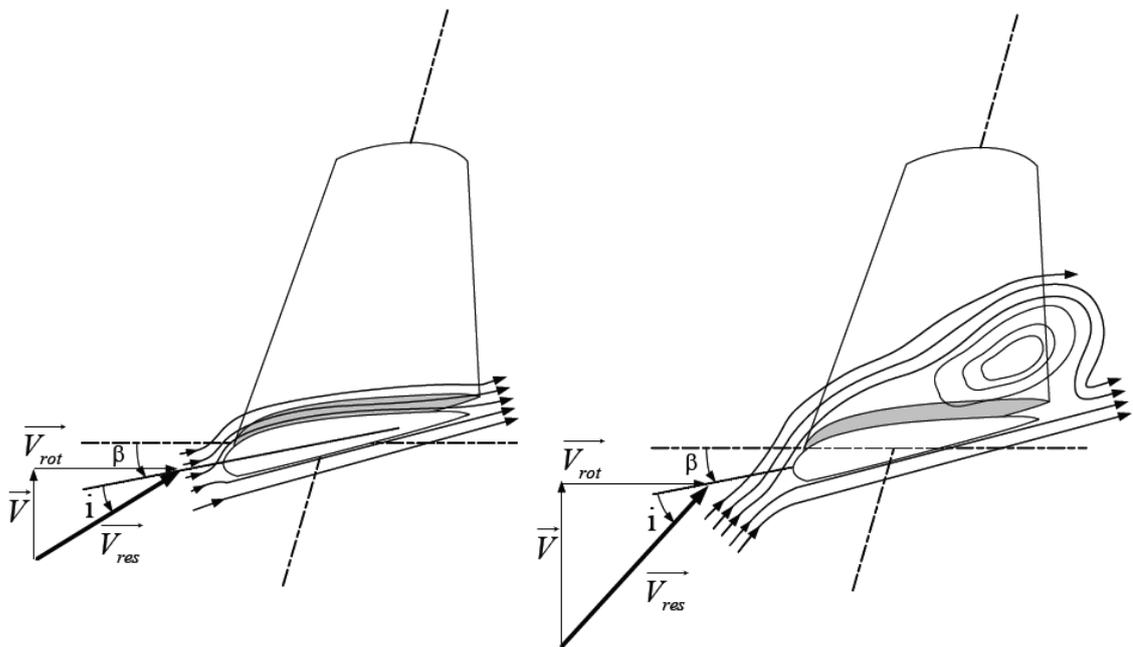


Figure 1.8 : Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne classique

### I.2.6.3 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

#### I.2.6.3.1 Système à décrochage aérodynamique "stall"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale  $V_n$ , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale Figure 1.9 et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.



**Figure 1.9 : Flux d'air sur un profil de pale "stall", [14]**

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage  $\beta$  et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [11].

### 1.2.6.3.2 Système d'orientation des pales "pitch"

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales (figure 1.10). En variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage. L'angle d'incidence optimal conduit à la puissance maximale disponible. En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet quatre actions distinctes :

- ✓ le démarrage à une vitesse du vent  $V_d$  plus faible ;
- ✓ l'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites  $[V_d, V_n]$  en complément de la vitesse variable dans une plage relativement réduite (1 à 2 voire 1 à 3 pour un rapport  $V_n/V_d$  de l'ordre de 4 à 5) ;
- ✓ la régulation par limitation de la puissance pour  $V > V_n$  ;

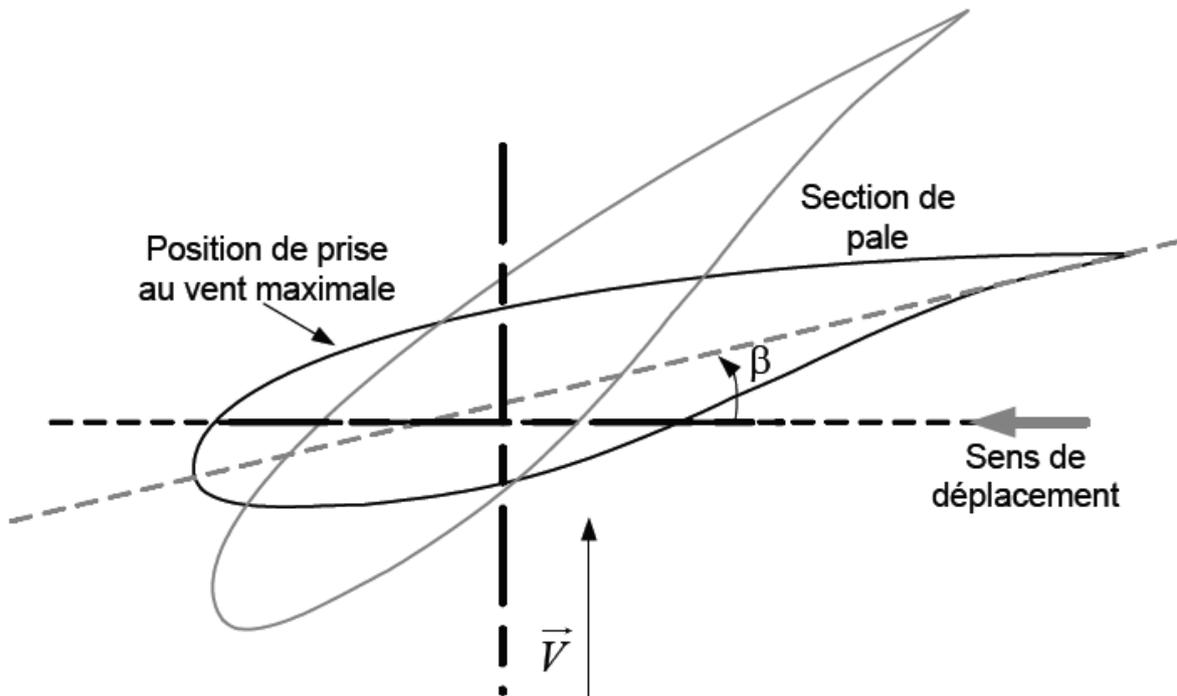


Figure 1.10 : Variation de l'angle de calage d'une pale, [57]

## I 2.7. Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

### I.2.7.1. Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets ;
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires ;
- ✓ C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches ;
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [12] ;
- ✓ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite ;
- ✓ Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace ;
- ✓ La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte ;
- ✓ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple ;
- ✓ Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

### 1.2.7.2. Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- ✓ Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;
- ✓ L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- ✓ La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;
- ✓ La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées [13] ;
- ✓ C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.

## I.3. LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

### I.3.1. Introduction

La machine asynchrone à cage d'écureuil, par ses qualités de robustesse, de coût et de simplicité, semble bien adaptée à l'utilisation dans un système éolien. Lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées. Une solution consiste à insérer un convertisseur entre la machine et le réseau. Le dispositif peut alors fonctionner à vitesse variable car quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension est redressée et un onduleur côté réseau est chargé d'assurer la cohérence entre la fréquence du réseau et celle délivrée par le dispositif. Toutefois ce convertisseur doit être dimensionné pour faire transiter la totalité de la puissance générée par la machine.

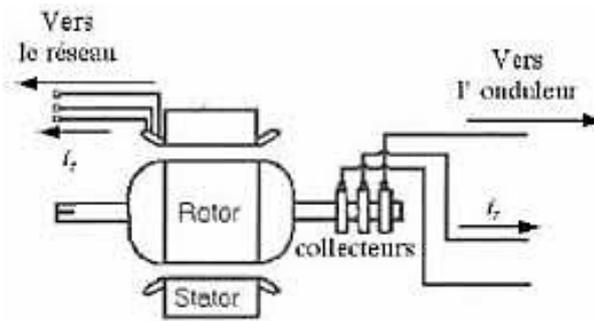
Partant de ce constat, nous avons décidé d'utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage. Connue depuis 1899, la MADA (en anglais, Doubly Fed Induction Machine ou DFIM), est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. [14]

Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes d'instabilités rencontrés dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Mais grâce au progrès technologiques, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles.

### I.3.2. Topologie et principe de fonctionnement de la MADA

#### I.3.2.1. Structure

La Machine Asynchrone à Double Alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoques dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne Figure (1.11).



**Figure 1.11 : Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA, [58]**

La MADA est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative.

L'intérêt principale de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré.

### **I.3.2.2. Principe de fonctionnement de la MADA**

Pour expliquer le principe de fonctionnement de la MADA, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance  $P$  est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie,  $(1-g)P$  est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste ( $gP$ ) sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence ( $g.f$ ). Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc  $(1+g)P$ . Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure 1.12).

Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

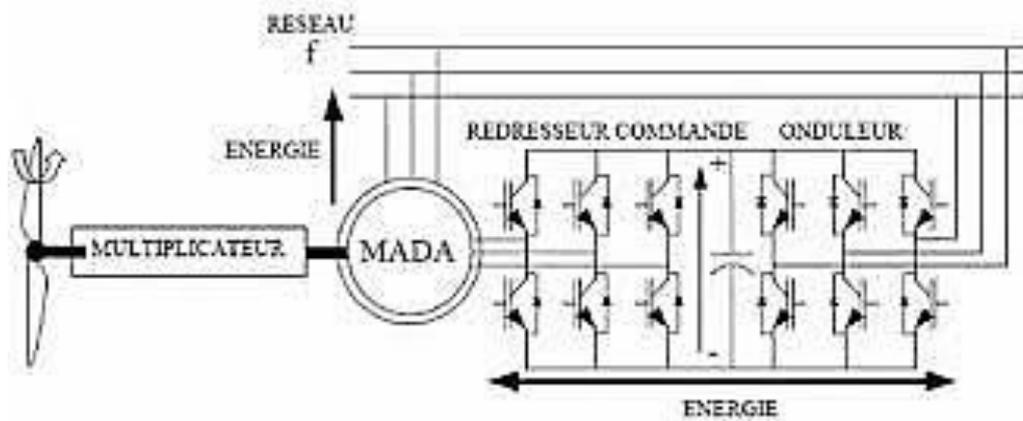


Figure 1.12 : Une MADA avec ses bagues collectrices, [58]

### I.3.3. Modes de fonctionnement de la MADA

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude.

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotorique qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement. [10]

#### I.3.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure 1.13 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

#### I.3.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure 1.13 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

#### I.3.3.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La figure 1.13 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

### I.3.3.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure 1.13 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

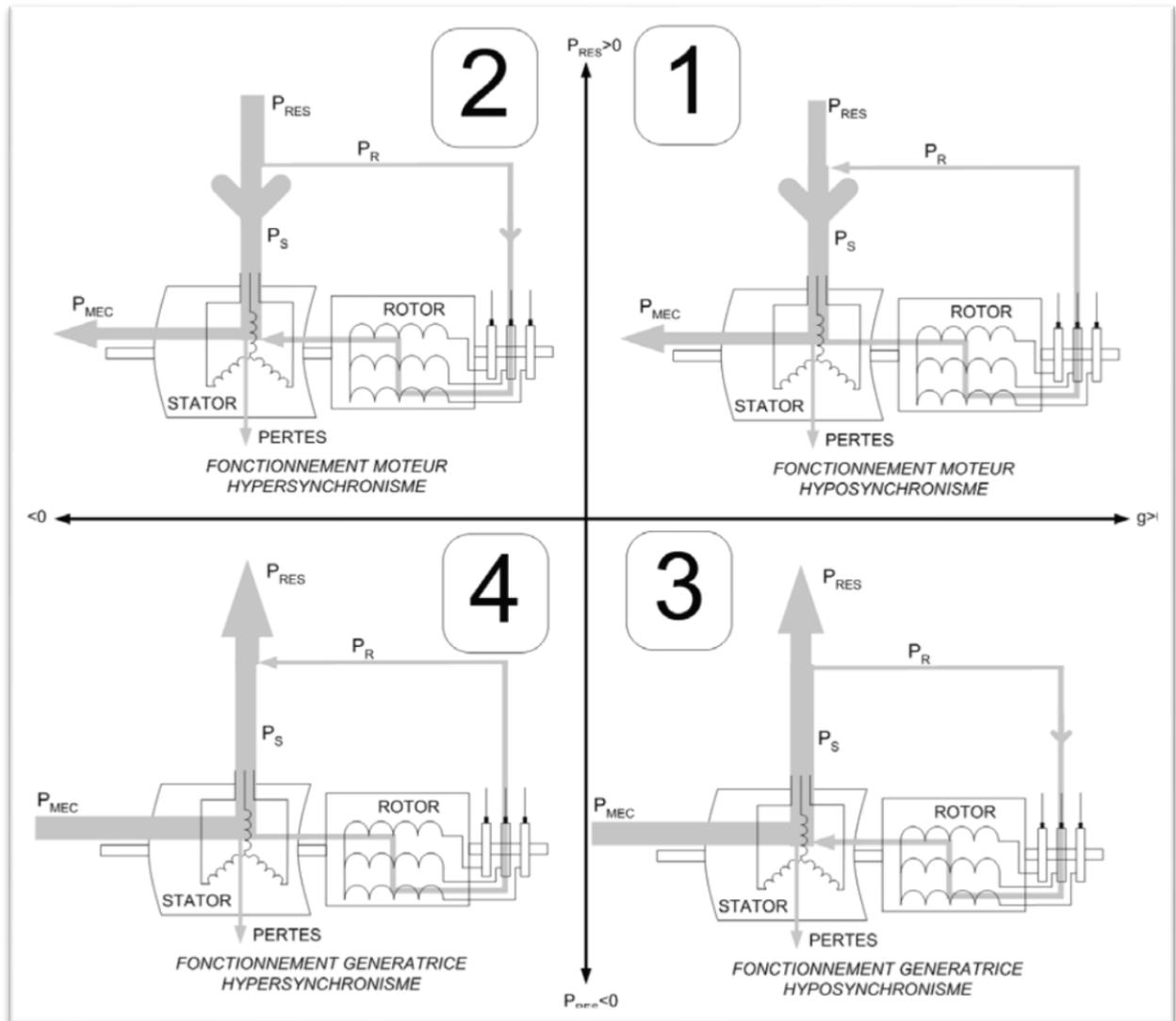


Figure.1.13 : Modes de fonctionnement de la MADA

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique: la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchrone) et la récupération de la puissance de glissement.

### I.3.3.5. La plage de variation de vitesse de la MADA

La plage de variation de vitesse de la MADA ne dépasse pas  $\pm 30\%$  en deçà ou au-delà de la vitesse de synchronisme (figure 1.14) (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire

transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux (réduit d'environ 70 %), moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

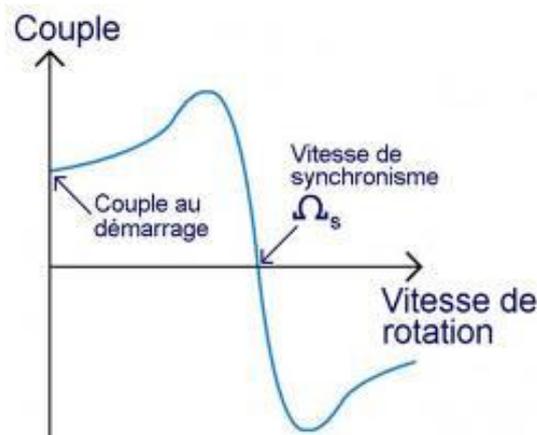


Figure 1.14 : plage de variation de vitesse d'une MADA

### I.3.4. Les avantages et les inconvénients de la MADA

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

#### I.3.4.1. Les avantages de la MADA

La MADA présente plusieurs avantages à savoir :

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la vitesse de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentent son rendement. De plus, l'alimentation de la machine par deux onduleurs permet de travailler à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine. [15] [16].
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).
- Un fonctionnement en régime dégradé plus souple que la machine à simple alimentation, quand un onduleur tombe en panne.

#### I.3.4.2. Les inconvénients de la MADA

Contrairement à ses avantages, la MADA présente aussi des inconvénients tels que :

- Un nombre important de convertisseurs est utilisé (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) que celui utilisé pour la machine à cage. Nous soulignons que des

études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA.

- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grande puissance [17].

## **I.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, son historique et son évolution, puis, un bref aperçu sur les différents types des éoliennes.

Les machines électriques utilisées dans la conversion aérodynamique sont aussi présentées avec quelques spécifications propres liées aux structures d'alimentation différentes. Puis on a cité quelques avantages liés à la croissance de l'énergie éolienne et quelques inconvénients liés à l'empêchement de son avancement.

Nous avons présenté aussi un état de l'art de la machine à double alimentation MADA son principe et leurs modes de fonctionnement et on a vu aussi les avantages et les inconvénients propres à cette machine.

# Chapitre 02

## Modélisation de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA)

### II.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudier. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale.

### II.2 Modélisation du système éolien basé sur une GADA

Le schéma de l'éolienne basée sur une MADA connectée au réseau, incluant les différentes grandeurs mécaniques et électriques servant à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique, est illustré à la Figure 2.1.

Dans un premier temps, nous présentons le modèle aérodynamique de la turbine, puis le modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous présentons la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le fonctionnement de la MADA sera alors succinctement décrit, puis la MADA sera modélisée dans le repère de Park.

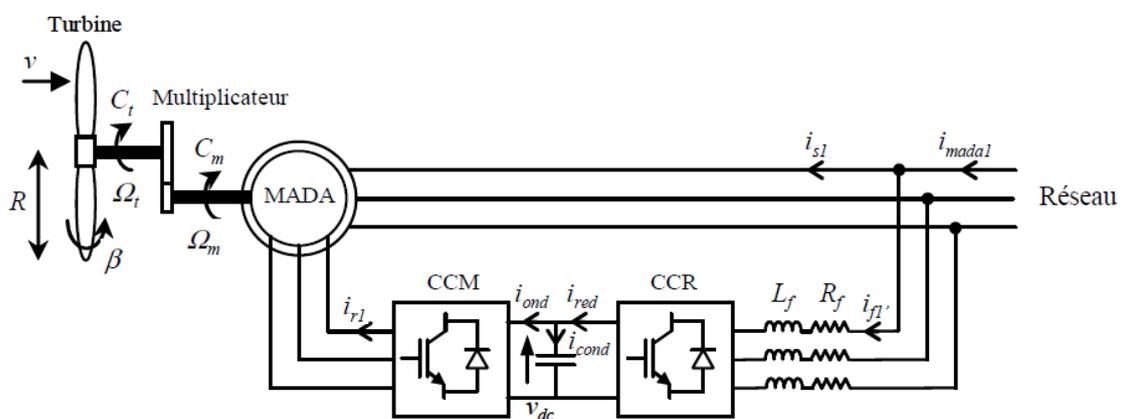


Figure 2.1 : Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau, [60]

## II.2.1 Modèle de la turbine éolienne

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (Figure 2.2).

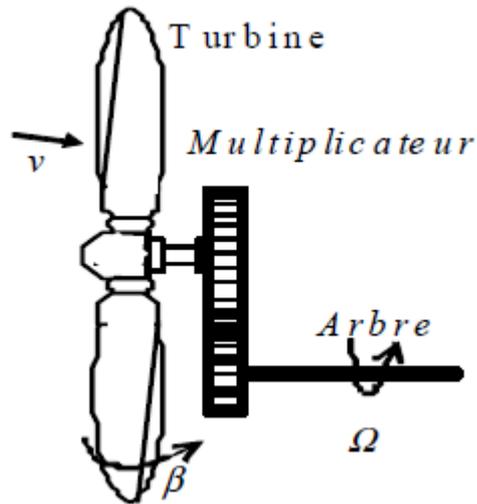


Figure 2.2 : Turbine éolienne, [60]

### II.2.1.1 Modèle des pales

Étudions l'éolienne présentée figure 2.2. D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est: [18]

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} S_{\text{éolienne}} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2.1)$$

Avec  $S_{\text{éolienne}}$  la surface balayée par l'éolienne,  $\rho$  la masse volumique de l'air ( $1.25 \text{ kg/m}^3$ ) et  $v$  la vitesse du vent.

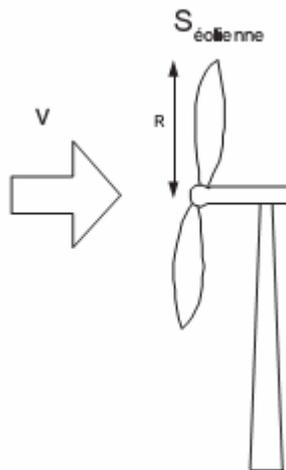


Figure 2.3 : Eolienne simplifiée.

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent ( $P_{\text{vent}}$ ).

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne  $P_{\text{éolienne}}$  peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance  $C_p$  : [19][20]

$$P_{\text{éolienne}} = C_p \cdot P_{\text{vent}} \quad (2.2)$$

D'après Betz, le coefficient de puissance  $C_p$  ne peut être supérieur à  $16/27$ .

Le coefficient  $C_p$ , diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales  $\beta_i$  et du rapport de vitesse  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (2.3)$$

Avec  $R$  le rayon des pales de l'éolienne,  $\Omega$  la vitesse de rotation de l'éolienne et  $v$  la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance  $C_p$  est souvent issu de mesures pratiques.

L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique : [21][22]

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta_i) \sin\left(\pi \frac{\lambda-3}{15-0.3\beta_i}\right) - 0.00184(\lambda-3)\beta_i \quad (2.4)$$

Avec  $\beta_i$  exprimé en degrés

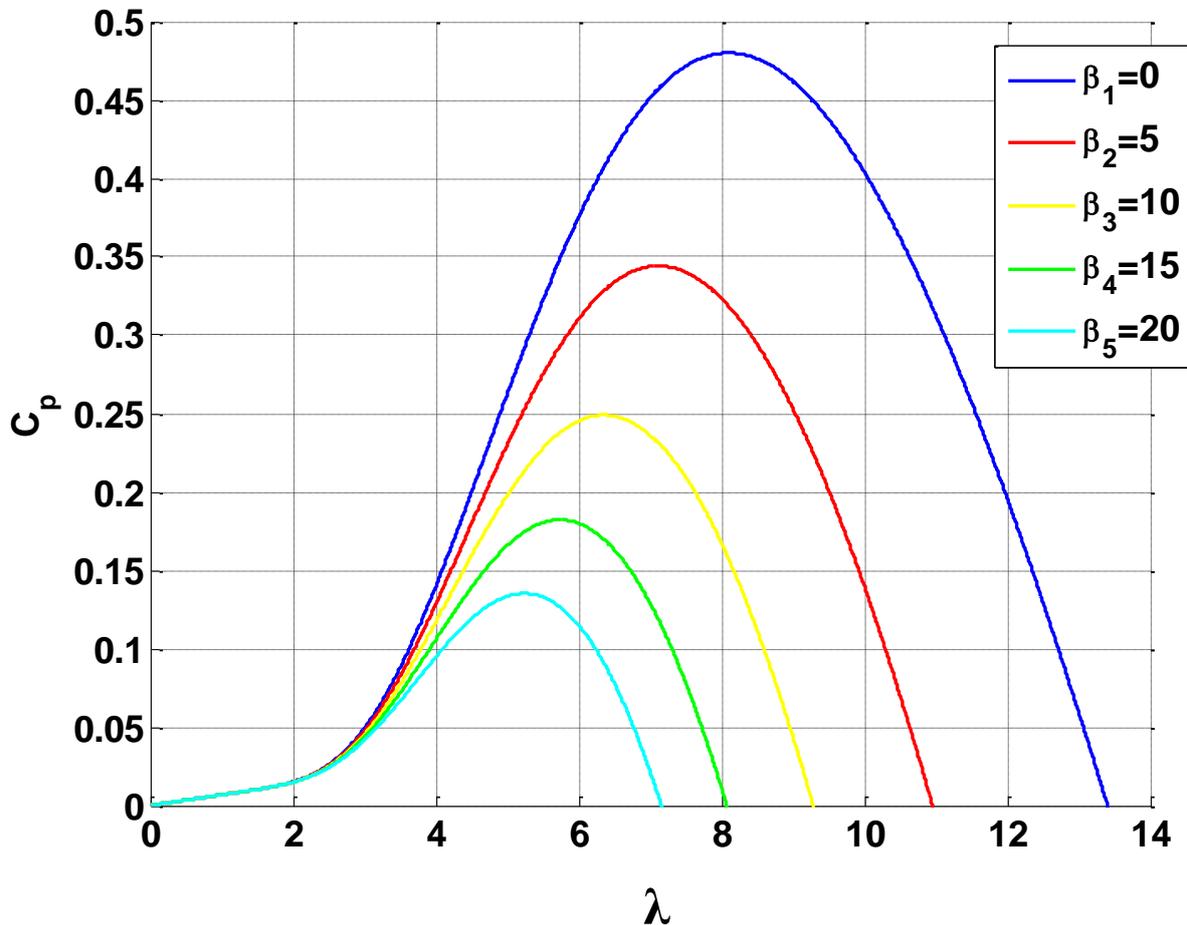


Figure 2.4: Coefficient de puissance  $C_p$

La figure 2.4 représente le coefficient de puissance  $C_p$  (calculé à partir de l'équation  $C_p(\lambda, \beta_i)$ ) en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour différents angles d'inclinaison des pales  $\beta_i$ . On remarque que si, pour un angle constant  $\beta_i$ , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse  $\lambda$  constant

et égal à  $\lambda_{\text{optimal}}$  à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure 2.4 montre le  $\lambda_{\text{optimal}}$  correspondant à un angle d'inclinaison des pales  $\beta_{i3}$ .

Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir  $\lambda = \lambda_{\text{optimal}}$ , il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent.

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient  $\lambda$  varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement).

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% [23].

Au vu de la caractéristique suivante (Figure 2.5), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités

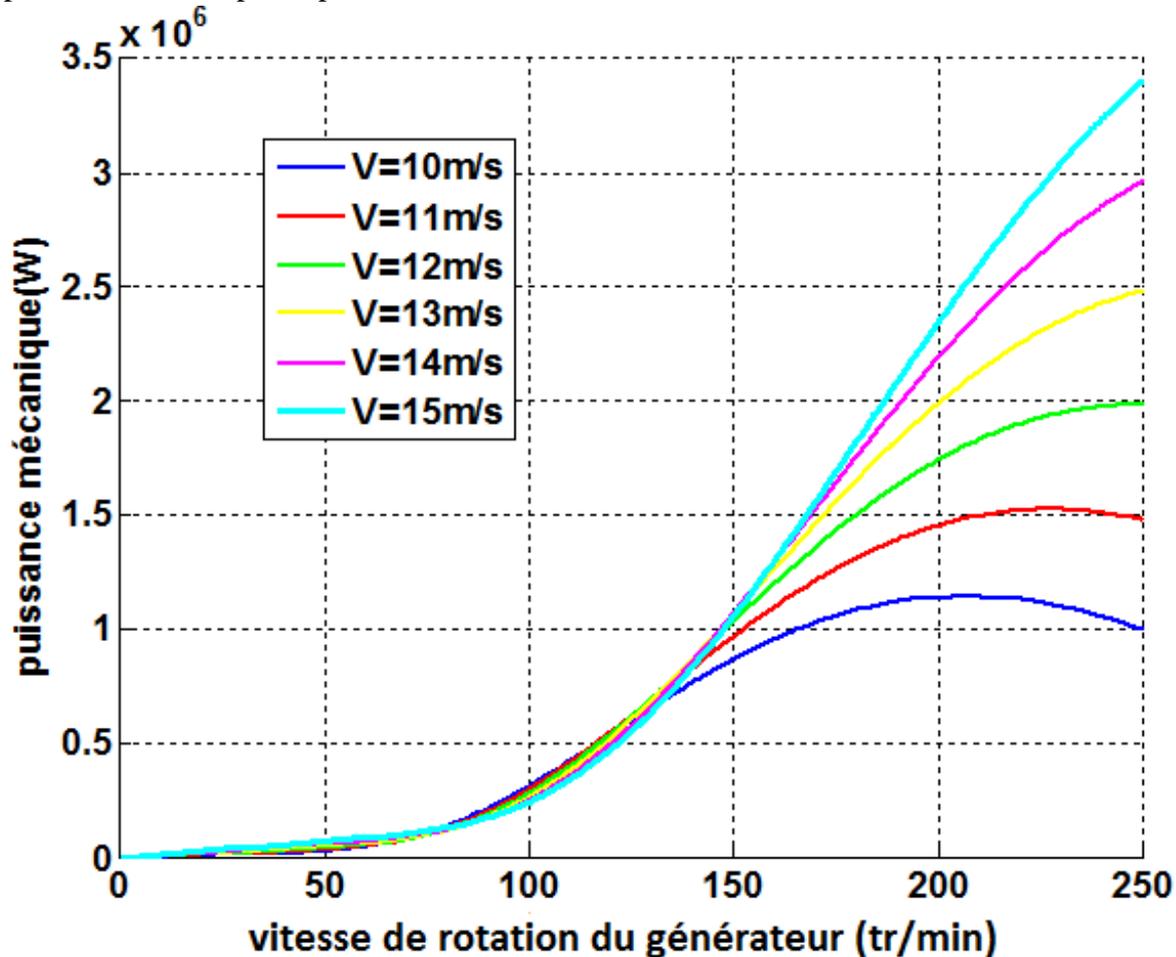


Figure 2.5 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

### II.2.1.2 modèle du multiplicateur :

$$C_{\text{mec}} = \frac{C_{\text{turbine}}}{G} \quad (2.5)$$

$C_{mec}$  : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

G: Rapport de multiplicateur.[23]

$$\Omega_{mec} = G\Omega_{turbine} \quad (2.6)$$

$\Omega_{mec}$ : Vitesse angulaire mécanique du générateur en (rad/s)

### II.2.1.3 modèle de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit :

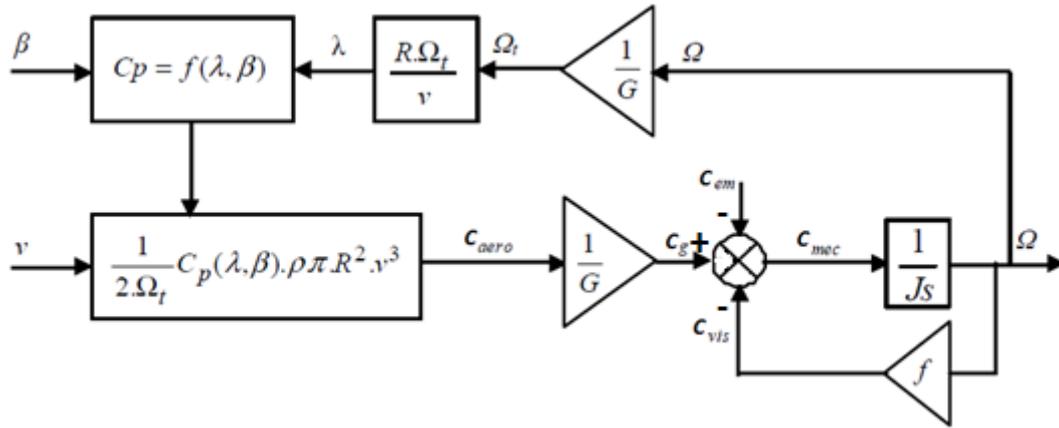
$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{turbine} - f\Omega_{mec} \quad (2.7)$$

$f$  : Coefficient de frottement visqueux N.m.s/rad.

$C_{turbine} = C_{mec} + C_{em}$  : couple total de l'éolienne

$C_{em}$  : Couple électromagnétique du générateur

$J$  : inertie en (kg.m<sup>2</sup>)



2

Figure 2.6 : schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne.

## II.2.2 Modélisation de la GADA

La modélisation de la GADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles [24], [25], [26], [27], [28], [29],[30].

Nous partons des équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné qui s'écrivent, dans un repère Triphasé, de la manière suivante [31],[32],[33]:

$$\begin{cases} [V_s]_{abc} = R_s \cdot [I_s]_{abc} + \frac{d[\varphi_s]_{abc}}{dt} \\ [V_r]_{abc} = R_r \cdot [I_r]_{abc} + \frac{d[\varphi_r]_{abc}}{dt} \end{cases} \quad (2.8)$$

Il est possible d'exprimer les flux en fonction des courants et des différentes inductances propres et mutuelles de la machine par:

$$\begin{cases} [\varphi_s]_{abc} = L_s[I_s]_{abc} + M[I_r]_{abc} \\ [\varphi_r]_{abc} = M[I_s]_{abc} + L_r[I_r]_{abc} \end{cases} \quad (2.9)$$

Nous allons maintenant décrire la modélisation dans un repère tournant diphasé (d, q) en utilisant les transformations de Park (Annexe A) et de Concordia permettant la conservation des puissances. Soit l'angle électrique entre l'axe d du repère diphasé et le repère fixe lié à la phase a du stator.

Si l'on applique ces transformations aux flux et tensions intervenant dans les équations de la GADA, nous obtenons le modèle diphasé de celle-ci qui s'écrit sous la forme:

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \dot{\theta}_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = -R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \dot{\theta}_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \dot{\theta}_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \dot{\theta}_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = -L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = -L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} - M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} - M I_{qs} \end{cases} \quad (2.11)$$

Le couple électromagnétique est exprimé par:

$$C_{em} = p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (2.12)$$

Les puissances active et réactive statorique et rotorique de la MADA sont respectivement données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \\ P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (2.13)$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotoriques est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega \quad (2.14)$$

$\omega_r$  et  $\omega_s$  représentent respectivement les pulsations des tensions rotoriques et statoriques en rad/s. les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  sont obtenus respectivement par intégration de  $\omega_s$  et  $\omega_r$ .

$$\begin{cases} \theta_s = \int_0^t \omega_s dt + \theta_{s0} \\ \theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_{r0} \end{cases} \quad (2.15)$$

## II.3 Bloc de simulation

La figure 2.7 représenté la modèlè utilisé pour obtenir les résultats de simulation, le rotor tournis par la turbine éolienne et le rotor alimenté par source alternative (onduleur de tension tris phase) et le stator alimenté une charge résistive.

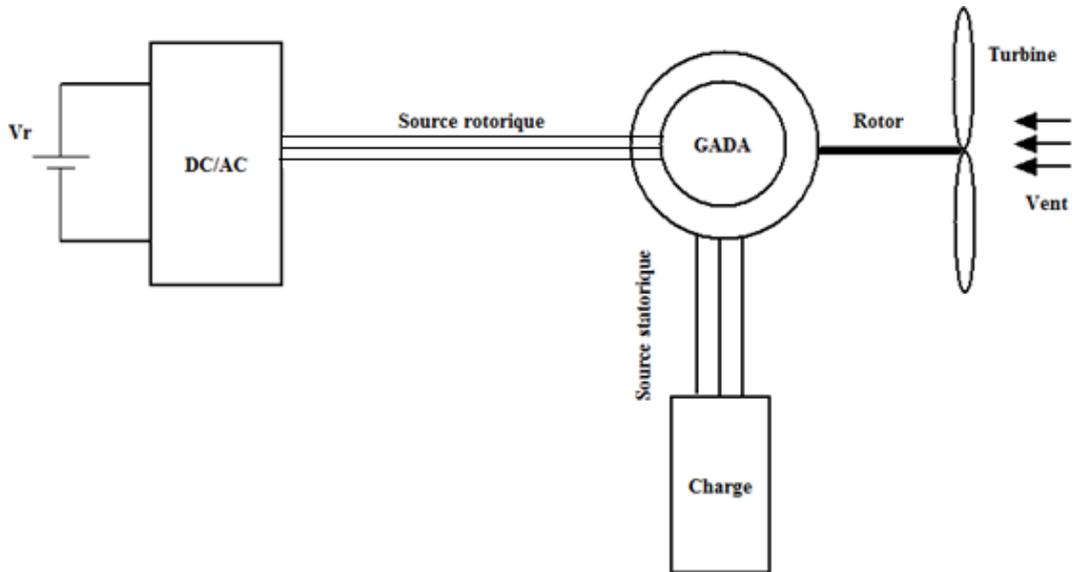


Figure 2.7 : Schéma block de GADA

### II.3.1 résultat de simulation

Un essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent montré sur la Figure 2.8

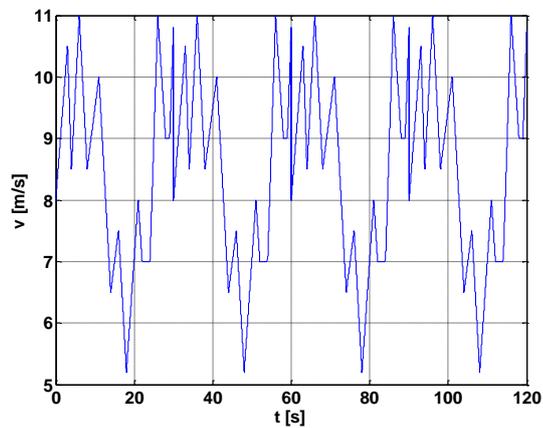
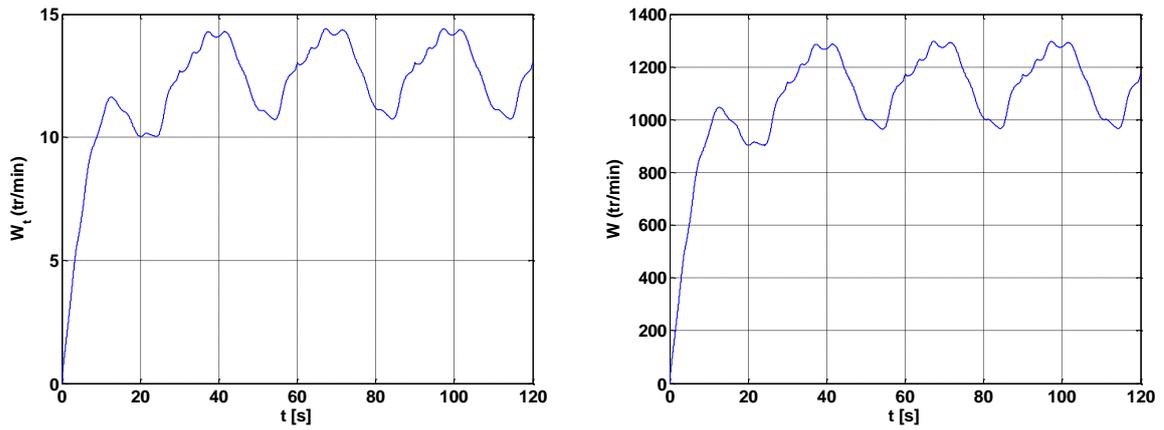


Figure 2.8 : Profil du vent appliqué à la turbine pendant 50 secondes.

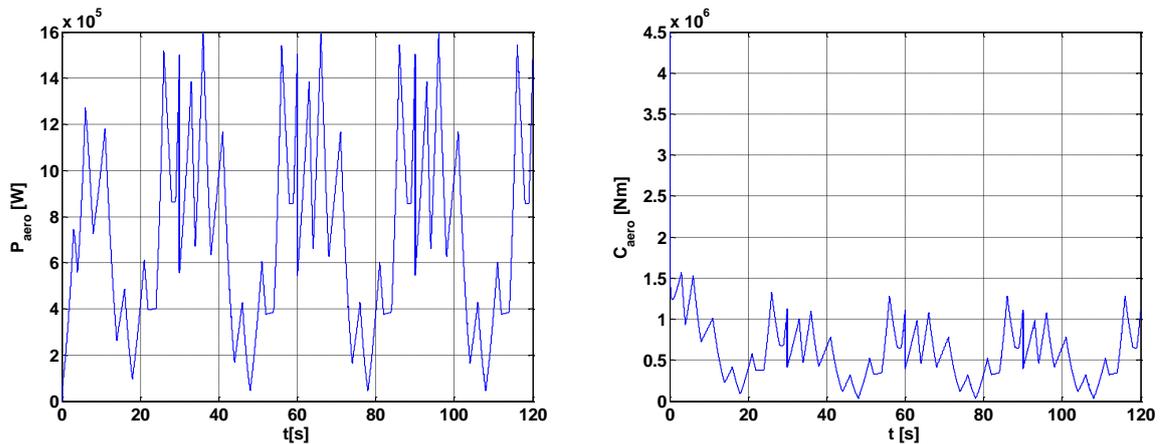


(a) Vitesse de la turbine.

(b) Vitesse mécanique de l'arbre.

**Figure 2.9 : Vitesse de la turbine et vitesse mécanique de l'arbre.**

Un essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent montré sur la figure 2.8. La vitesse de la turbine et la vitesse mécanique de l'arbre sont illustrées respectivement sur la Figure 2.9.



(a) Couple du multiplicateur.

(b) Couple électromagnétique de la MADA.

**Figure 2.10 : Résultats de simulation de la turbine éolienne.**

Les Figure 2.10.a et 2.10.b présentent la puissance  $P_{aero}$  et couple  $C_{aero}$  aérodynamique disponible au niveau de la turbine.

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, il est montré d'abord l'intérêt de modéliser la génératrice asynchrone double alimentation. Le modèle triphasé obtenu sous certaines hypothèses simplificatrices s'est réduit en un modèle biphasé à l'aide de la transformation de PARK. Les résultats de la simulation attestent favorablement la modélisation proposée.

Ces résultats réconfortants nous permettront d'aborder le problème de la commande de la GADA avec plus de précision et d'efficacité.

# Chapitre 03

## Commande de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA)

### III.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter la technique de la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone à double alimentation par utilisation régulateur PI classique et la stratégie de commande MPPT. Quelques résultats de simulation seront présentés aussi pour montrer l'amélioration des performances dynamiques de la génératrice.

Enfinement en comparé les résultats de la commande vectorielle par régulateur PI classique par les résultats obtenus avec le régulateur PI-floue.

### III.2. Généralités sur la commande vectorielle

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de Blondel sur la théorie de la réaction des deux axes. Toutefois, compte tenu de la technologie utilisée à cette époque, il n'était pas question de transposer cette théorie au contrôle des machines électriques. Ce n'est que vers les années cinquante, grâce à l'utilisation dans l'Europe de l'Est, et plus particulièrement en Allemagne et en Hongrie, de la méthode de phaseur temporel que germa l'idée de la commande vectorielle appelée également contrôle par flux orienté. En 1969, les principes de cette commande ont été définis par Hasse et la première publication internationale au sujet de ce type de commande appliquée aux machines à induction est certainement celle de Blaschke en 1971 [34].

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent [35, 36, 37,38].

#### III.2.1.Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle, notée FOC (Field Oriented Control) consiste à rendre le comportement du moteur asynchrone identique à celui de la machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux rotorique. Par conséquent, les dynamiques du flux rotorique sont linéaires d'où l'utilisation d'un simple PI pour réguler le flux. Quand les dynamiques du flux rotorique ont atteint

une consigne constante, la dynamique de la vitesse devient linéaire et peut-être réglée par un PI classique, [39].

La commande à flux orienté permet de piloter la machine suivant deux axes : un axe pour le flux et un autre pour le couple. De nombreuses variantes basées sur ce principe d'orientation.

Généralement ces techniques se diffèrent selon :

- ✓ la source d'énergie : commande en tension ou en courant,
- ✓ l'orientation du repère (d, q) : suivant le flux statorique ou rotorique ou d'entrefer, le contrôle du flux : direct par mesure ou indirect par observation.

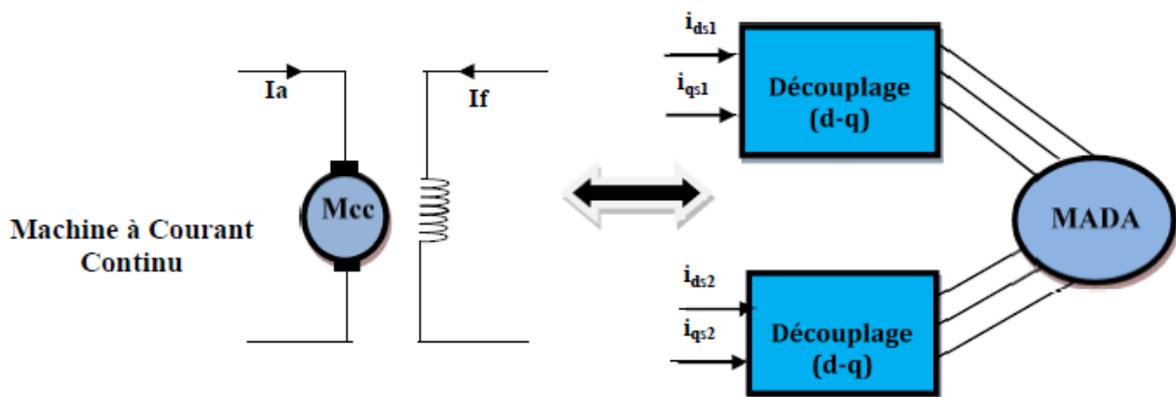


Figure 3.1: Principe de la commande vectorielle.

### III.2.2. Commande vectorielle directe et indirecte

#### III.2.2.1. Commande vectorielle directe

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module de flux et de sa phase et celle-ci doit être vérifiée quel que soit le régime transitoire effectué. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du système. Une première possibilité est de mettre des capteurs de flux dans l'entrefer et de mesurer directement les composantes  $\Phi_{sd}$  et  $\Phi_{sq}$  de manière à en déduire l'amplitude et la phase, les capteurs mécaniquement fragiles, sont soumis à des conditions sévères dues aux vibrations et aux échauffements; les signaux captés sont entachés d'harmoniques d'encoche et leur fréquence varie avec la vitesse ceci nécessite des filtres ajustables. La précision de la définition des flux dépend des paramètres inductifs affectés par la saturation du circuit magnétique [40].

La mesure directe permet de connaître exactement la position des flux. Ce mode de contrôle permet de garantir un découplage correct entre le flux et le couple quel que soit le point de fonctionnement. Dans la majorité des cas, on ne dispose pas de capteur de flux et on fait donc appel à des estimateurs et à des observateurs à partir des mesures effectuées sur le montage.

#### III.2.2.2. Commande vectorielle indirecte

Dans cette méthode, on ne régule pas le flux rotorique et on a donc besoin ni de capteur ni d'estimateur ou d'observateur de flux [34]. Si le flux rotorique réel n'est pas utilisé, sa position doit être connue pour effectuer les changements de coordonnées ; ceci exige la présence d'un capteur de

position du rotor, L'orientation de flux est réalisée par la position déduite par intégration de la position d'autopilote, il est déduit de la vitesse à partir du bloc de défluxage (Figure 3.2)

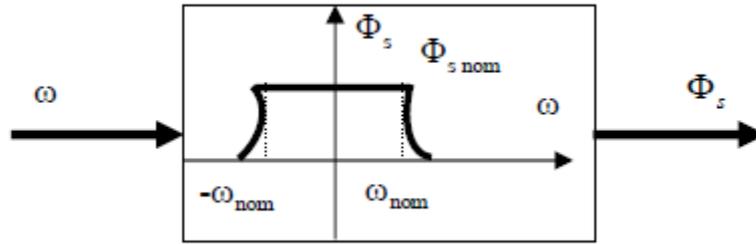


Figure 3.2: Bloc de défluxage.

Le bloc de défluxage permet l'exploitation optimale des capacités magnétiques de la machine, il permet un fonctionnement à couple constant si la vitesse est inférieure à la vitesse nominale. D'une part, ce bloc permet en outre d'affaiblir le flux inversement proportionnel à la vitesse, pour les fonctionnements à puissance constante lorsque la vitesse excède la vitesse nominale. Il est défini par la relation non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{sref} = \Phi_{snom} & \text{si } |\omega| \leq \omega_{nom} \\ \Phi_{sref} = \frac{\Phi_{snom}}{|\omega|} & \text{si } |\omega| > \omega_{nom} \end{cases} \quad (3.1)$$

### III.2.3. Commande vectorielle par orientation du flux statorique

En vue de la commande vectorielle de cette machine, il convient de choisir un référentiel lié au champ tournant, lequel serait relatif à la fréquence 50Hz. Le repère de Park serait, de ce fait, synchronisé avec le flux statorique (Fig. II.16).

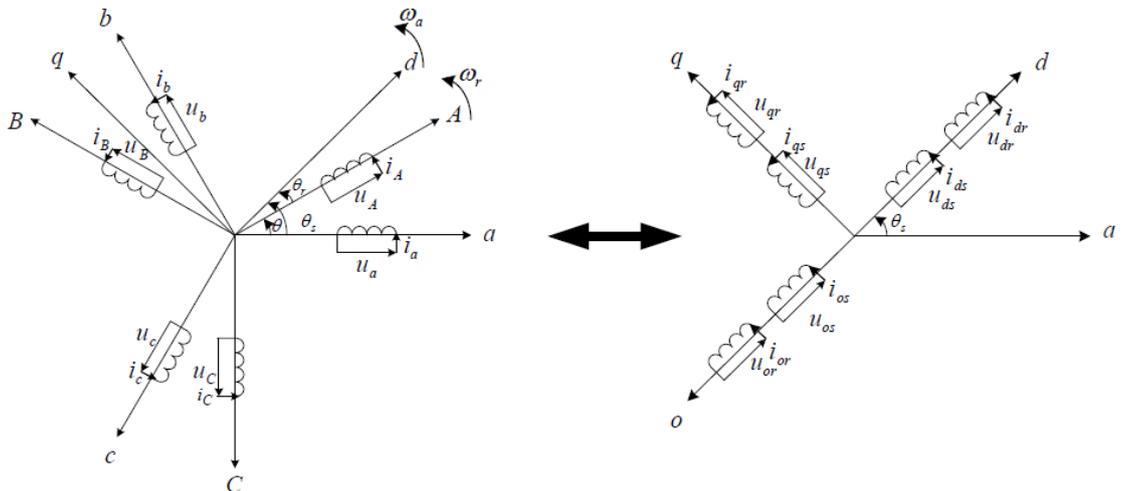


Figure 3.3: Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

En adoptant l'hypothèse d'une résistance statorique  $R_s$  négligeable et que le flux statorique est constant et orienté selon l'axe d, on déduit :

$$\varphi_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad (3.3)$$

$$\varphi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \quad (3.4)$$

$$0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \quad (3.5)$$

$$\varphi_{dr} = \sigma L_r I_{dr} + \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} \quad (3.6)$$

$$\varphi_{qr} = \sigma L_r I_{qr} \quad (3.7)$$

En posant  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  (coefficient de dispersion), les composantes directe et en quadrature des tensions de la GADA s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \approx 0 \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dot{\theta}_s \varphi_{ds} \approx \dot{\theta}_s \varphi_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \sigma L_r \frac{d i_{dr}}{dt} - e_q \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \sigma L_r \frac{d i_{qr}}{dt} + e_d + e_\phi \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_q = -\dot{\theta}_r \sigma L_r I_{qr} \\ e_d = \dot{\theta}_r \sigma L_r I_{dr} \\ e_\phi = \theta_r \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} \end{cases} \quad (3.9)$$

A partir des équations (3.4 et 3.5), les courants statoriques peuvent être exprimés en fonction des courants rotoriques comme suit :

$$i_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \quad (3.10)$$

$$i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (3.11)$$

En remplaçant (3.2), (3.3) et (3.11) dans (2.12), le couple de la GADA a pour expression :

$$C_{em} = -p \varphi_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (3.12)$$

Les expressions des puissances active et réactive peuvent être simplifiées en remplaçant les équations (3.8), (3.10) et (3.11) respectivement dans (2.13)

$$P_s = -v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (3.13)$$

$$Q_s = \frac{v_s \varphi_s}{L_s} - \frac{v_s M}{L_s} i_{dr} \quad (3.14)$$

Le schéma bloc représentant le modèle mathématique ainsi simplifié de la MADA est illustré dans la figure 3.4.

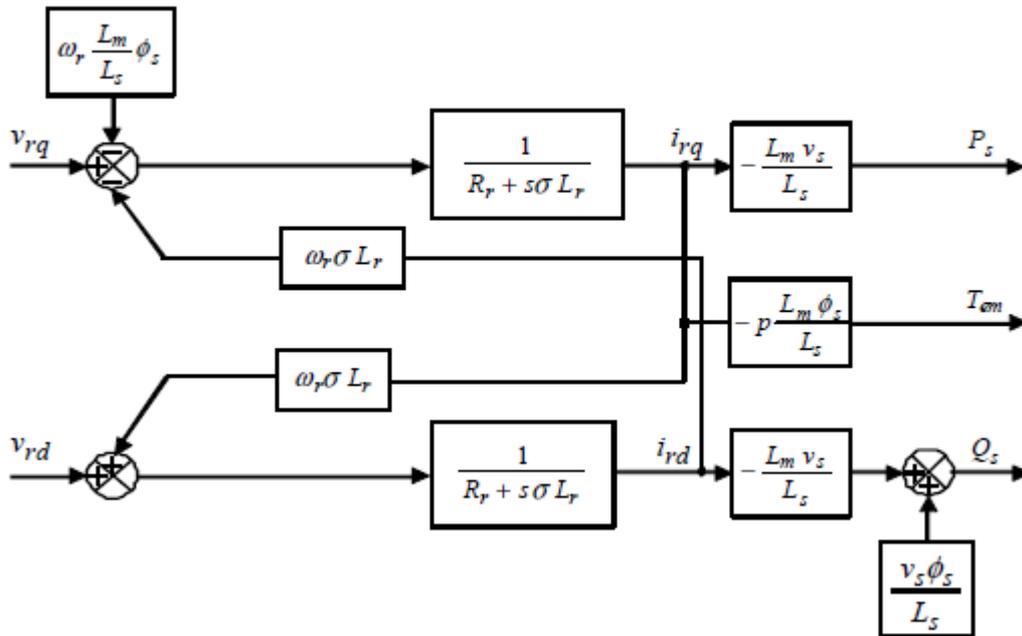


Figure 3.4 : Schéma bloc du modèle simplifié de la GADA.

### III.3 Stratégie de commande MPPT

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau électrique de distribution, est basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) [41], [42], [43], et ce sans supervision centralisée. Celles-ci doivent se déconnecter du réseau électrique lorsqu'un défaut survient sur ce dernier. Par conséquent, elles n'offrent aucune capacité de réglage quant à leur production et ne peuvent en aucun cas contribuer aux services système. Nous présenterons dans cette section la stratégie de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent.

#### III.3.1 Calcul du couple de référence

Le dispositif de commande dans ce cas doit imposer un couple de référence de manière à permettre à la MADA de tourner à une vitesse réglable afin d'assurer un point de fonctionnement optimal en terme d'extraction de puissance. Dans ce contexte, le ratio de la vitesse de l'éolienne  $\lambda$  doit être maintenu à sa valeur optimale ( $\lambda = \lambda_{opt}$ ) sur une certaine plage de vitesse de vent. Ainsi, le coefficient de puissance serait maintenu à sa valeur maximale ( $C_p = C_{p_{max}}$ ). Le couple aérodynamique aura dans ce cas comme expression:

$$C_{aero} = \frac{1}{2\Omega_t} C_{p_{max}} \rho v^3 \quad (3.15)$$

A la sortie du multiplicateur le couple de référence devient:

$$C_{g_{ref}} = \frac{1}{G} C_{aero} \quad (3.16)$$

Si on suppose que la vitesse de rotation de la génératrice est fixe pendant la durée d'étude, le couple électromagnétique de référence peut s'exprimer comme suit :

$$C_{em_{ref}} = C_g \quad (3.17)$$

Ce qui conduit à écrire :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2\Omega_t G} C_{p\_max} \rho v^3 \tag{3.18}$$

La vitesse de la génératrice permet l'estimation de la vitesse de rotation  $\tilde{\Omega}_t$  de la turbine à partir de la relation suivante:

$$\tilde{\Omega}_t = \frac{1}{G} \Omega \tag{3.19}$$

Où  $\Omega$  est la mesure de la vitesse.

En supposant que l'angle d'orientation des pales  $\beta$  est constant, la vitesse du vent peut être estimée comme suit

$$v = \frac{R\tilde{\Omega}_t}{\lambda_{opt}} \tag{3.20}$$

Le couple électromagnétique de référence aura alors pour expression:

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} C_{p\_max} \rho v^3 \tag{3.21}$$

La Figure 3.5 résume le schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse de vent.

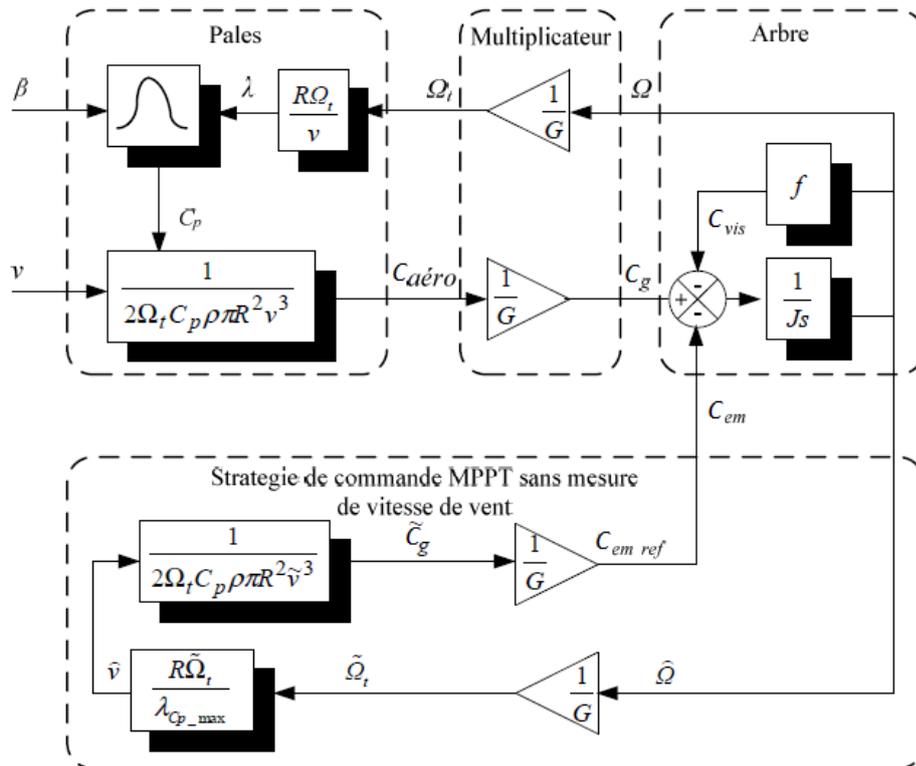


Figure 3.5 : Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent, [60]

### III.2.4. La Régulation

Pour régler les courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$ , on utilise deux régulateurs de type PI

En règle générale, un système bouclé doit répondre rapidement aux variations de sa consigne et compenser rapidement les perturbations.

Le temps de réaction est bien entendu en relation étroite avec l'inertie propre du processus.

Tous les régulateurs, qui seront utilisés dans notre travail, seront de type PI dont la forme est donnée par la relation :

$$G_{PI} = K_P + \frac{K_I}{S} \quad (3.22)$$

### III.2.4.1. Calcul des régulateurs

#### III.2.4.1.1. Régulateur du courant $I_{rd}$

Il prend en entrée le courant  $I_{rd}^*$  de référence et sa mesure. Il agit sur la tension de référence  $V_{rd}$ . Réguler ce courant à une valeur constante, c'est garantir un flux statorique constant.

Le schéma bloc de la régulation du courant  $I_{rd}$  est représenté par la figure (3.6).

La fonction de transfert est donnée par l'expression suivante :

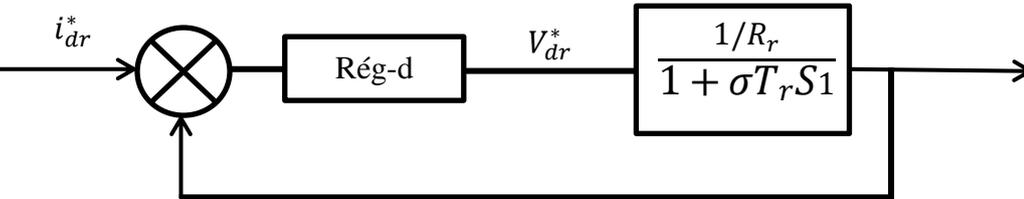
$$\frac{i_{dr}^*}{V_{dr}^*} = \frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \sigma T_r S} \quad (3.23)$$


Figure 3.6 : Schéma de régulation du courant  $I_{rd}$ .

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$F.T.B.O = \frac{K_d (1 + \sigma T_r S)}{R_r S (1 + \sigma T_r S)} = \frac{K_{dl}}{S} = T \quad (3.24)$$

Avec 
$$K_{dl} = \frac{K_d}{R_r}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$F.T.B.F = \frac{T}{T+1} = \frac{K_{dl}}{K_{dl} + S} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{dl}} S} = \frac{1}{1 + \tau S} \quad (3.25)$$

On choisie:

$$\tau = \sigma T_r = \frac{1}{K_{dl}} = \frac{R_r}{K_d} \Rightarrow K_d = \frac{R_r}{\sigma T_r} \quad (3.26)$$

$$\text{Reg}_d = \frac{R_r}{\sigma T_r} \frac{1 + \sigma T_r S}{S} \quad (3.27)$$

### III.2.4.1.2. Régulateur du couple $C_{em}$

La régulation du couple  $C_{em}$  est représentée par la figure (3.7).

La fonction de transfert est donnée par l'équation suivant :

$$\frac{I_{rq}^*}{V_{rq}^*} = \frac{1}{K_1 + \sigma L_r S} = \frac{\frac{1}{K_1}}{1 + K_2 S} \quad (3.28)$$

En remplaçant l'équation 3.26 dans 3.12

$$C_{em} = -p \varphi_s \frac{M}{L_s} \frac{\frac{1}{K_1}}{1 + K_2 S} V_{qr} \quad (3.29)$$

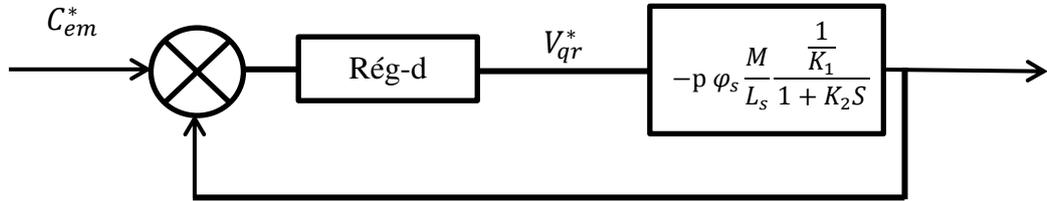


Figure 3.7 : Schéma de régulation du couple  $C_{em}$ .

Avec:

$$K_1 = R_r + \frac{L_m^2}{L_s T_s}, \quad K_2 = \frac{L_r L_s T_s}{R_r L_s T_s + L_m^2} \quad (3.30)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$\text{F.T.B.O} = \frac{K_q (1 + K_2 S)}{K_1 S (1 + K_2 S)} = \frac{K_{q1}}{S} = T \quad (3.31)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\text{F.T.B.F} = \frac{T}{T + 1} = \frac{K_{q1}}{K_{q1} + S} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{q1}} S} = \frac{1}{1 + \tau S} \quad (3.32)$$

$$\text{Reg}_q = \frac{K_1}{\sigma L_r} \frac{1 + K_2 S}{S} \quad (3.34)$$

### III.2.5. Schéma bloque de la simulation

La Figure 3.8 représente la structure sous MATLAB /SIMULINK de la commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA.

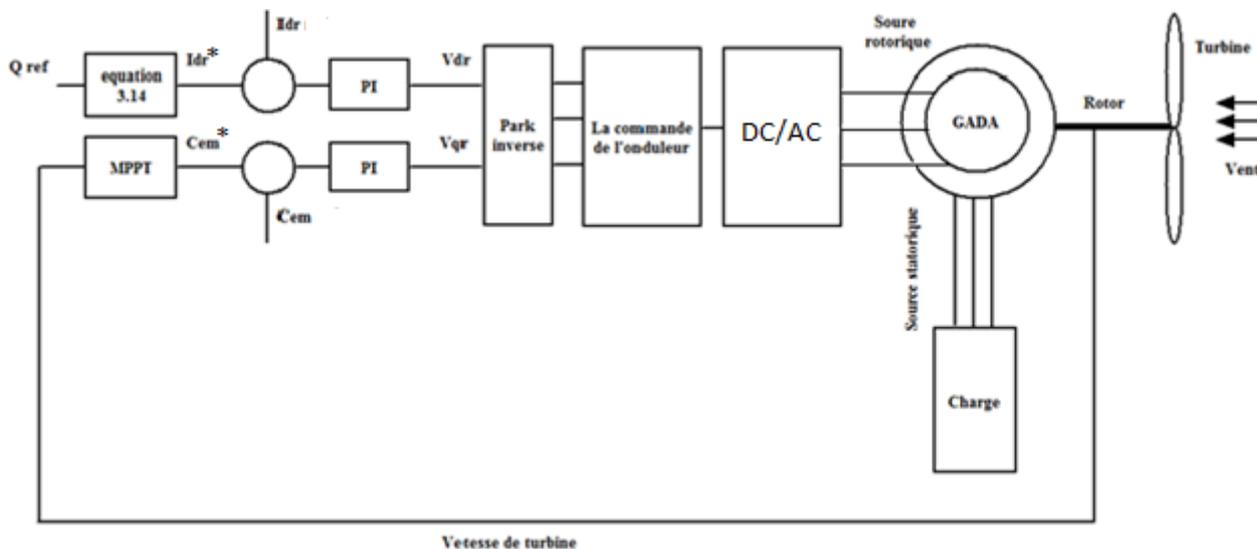
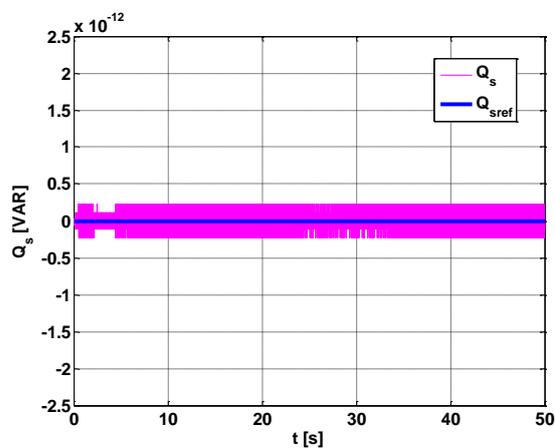
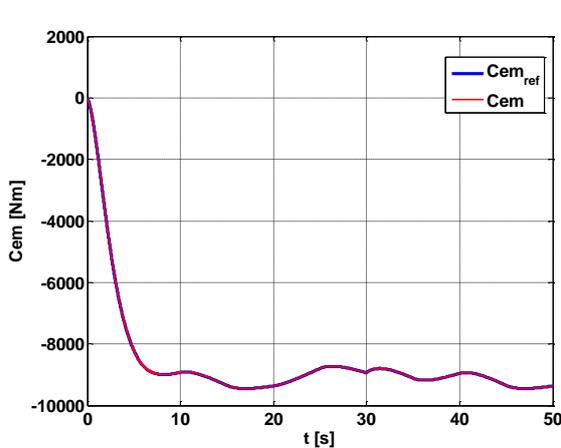


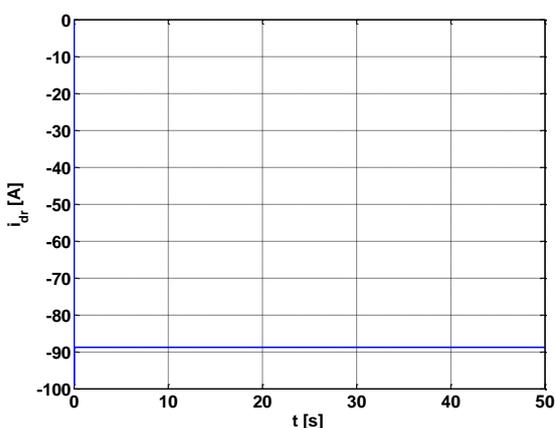
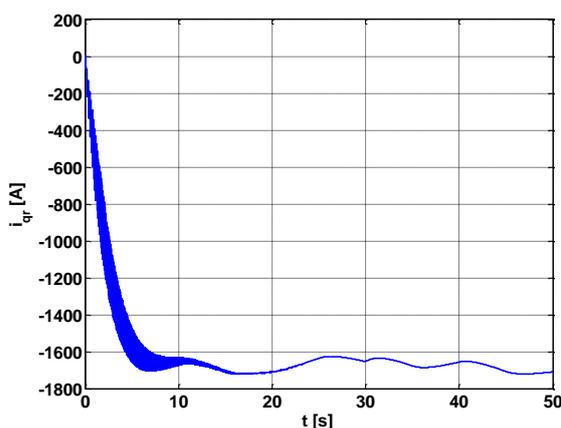
Figure 3.8 : Schéma bloc de la commande vectorielle de la GADA

### III.3 résultat de simulation

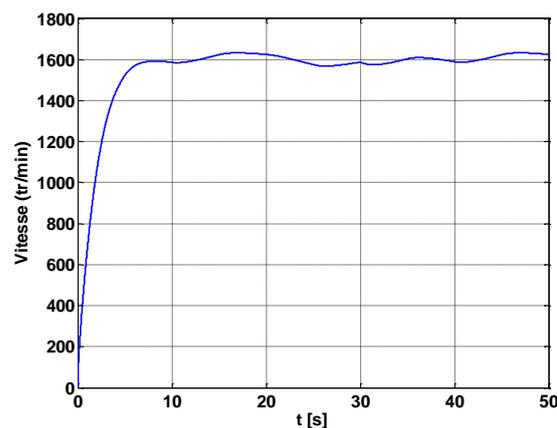
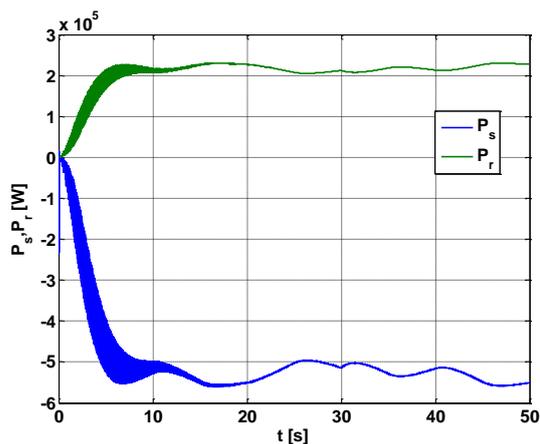


a) Couple électromagnétique (référence et simulé).

b) Puissance réactive (référence et simulée).

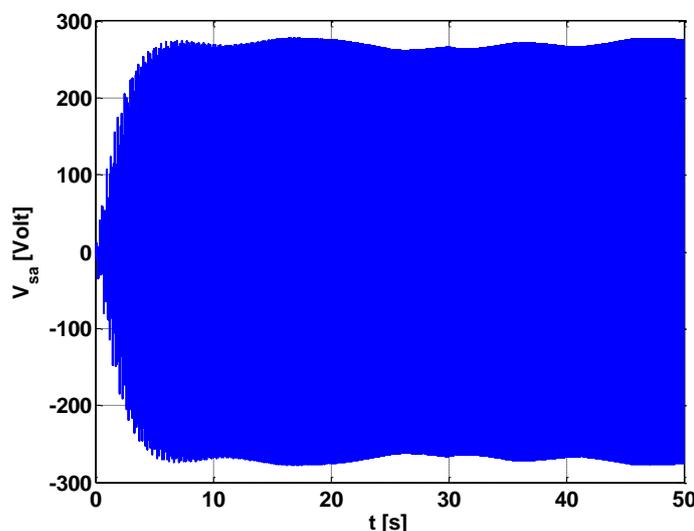


c) Composante en quadrature du courant rotorique.      d) Composante directe du courant rotorique.



e) Puissance active statorique et rotorique.

f) Vitesse mécanique.



g) Evolution du tension statorique de la GADA..

**Figure 3.9 : Résultats de simulation de la commande du système éolien par la stratégie MPPT.**

Les figures 3.9.a et 3.9.b montrent que le couple électromagnétique et la puissance réactive fournis par la GADA suivent leurs références. Ceci est dû au contrôle des composantes en quadrature et directe du courant de la GADA (Fig. 3.9.c et Fig. 3.9.d). Les figures 3.9.e et 3.9.f illustrent respectivement les puissances actives statoriques et rotoriques, et la vitesse mécanique de l'arbre. La figure 3.9.g présente la tension produise par le système éolien.

### III.4 Modèle pour le contrôle indépendant des puissances

Pour pouvoir 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 rotoriques, aux puissances actives et réactives statoriques.

#### III.4.1 Commande directe

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précédent. Il a été mis en

évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension  $V_{qr}$  et d'autre part la puissance réactive et la tension  $V_{dr}$

### III.4.2 Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure 3.4 afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $\frac{MV_s}{L_s}$ .

Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure 3.4 [44], [45], [46]

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure 3.10

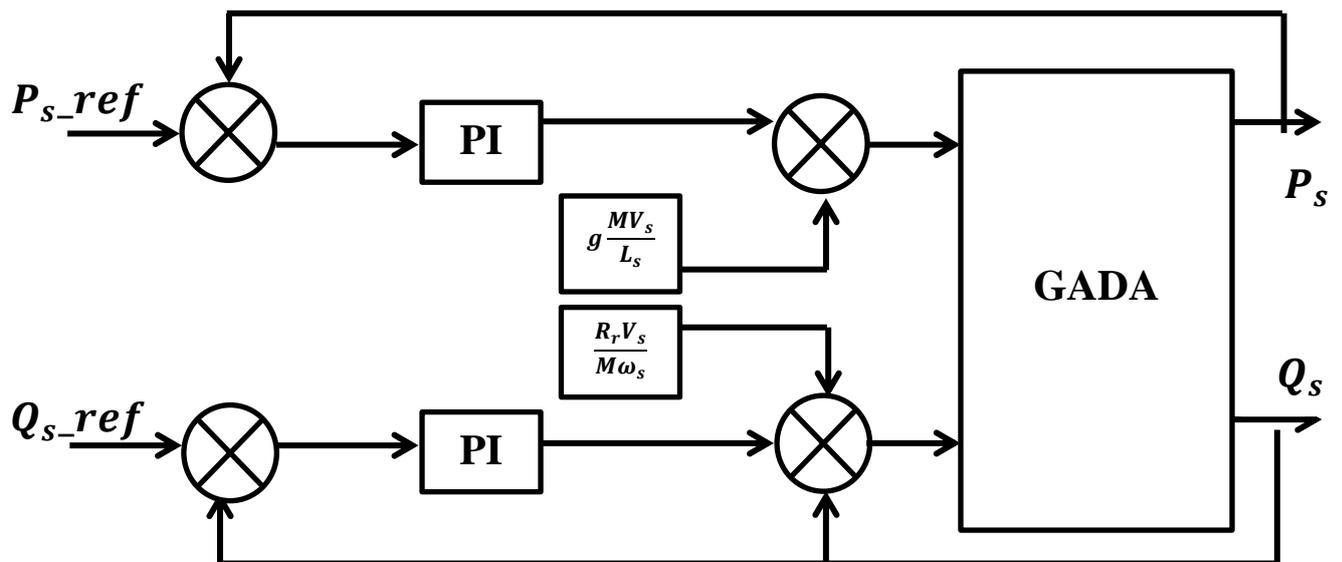


Figure 3.10 : Schéma bloc de la commande directe.

### III.4.3 Calcul de régulateur PI

La régulation est représentée par la figure (3.11).

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante:

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \frac{\frac{MV_s}{L_s(Lr - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s(Lr - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (3.32)$$

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:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (3.33)$$

On remplace l'équation (3.) dans l'équation (3.) :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (3.34)$$

cc qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad (3.35)$$

$$\text{Avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s}$$

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse:.

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s}, \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{MV_s} \quad (3.36)$$

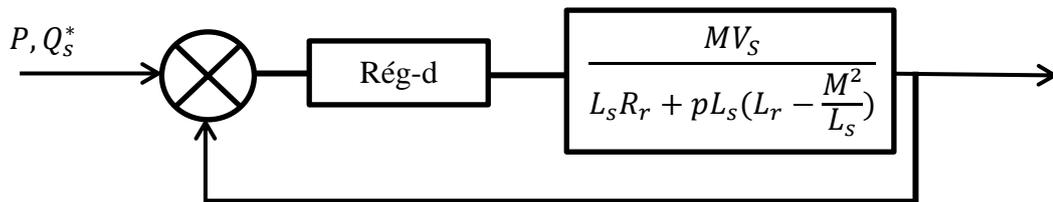
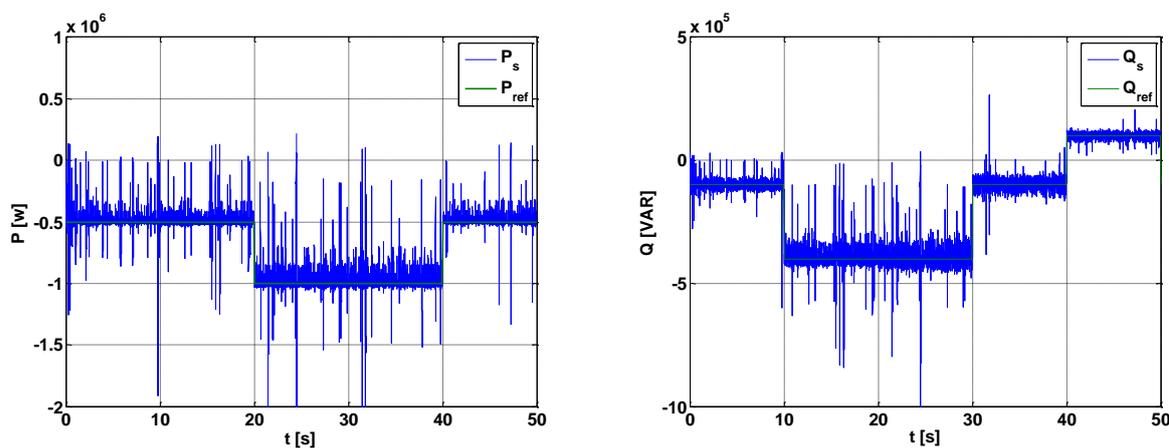


Figure 3.11 : Système régulé par Un PI

### III.4.4 résultat de simulation

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur la seconde.



a\ puissance active

b\ puissance réactive

**Figure 3.12 : Résultats de simulation de contrôle indépendant des puissances par régulateur****PI**

## III.5 Commande par la logique floue

### III.5.1 INTRODUCTION

La logique floue est une nouvelle méthode de réglage qui a été introduite à large échelle au Japon. Cependant, plus récemment elle est de plus en plus appliquée en Europe.

Les méthodes de réglage conventionnelles se basent sur une modélisation adéquate du système et un traitement analytique à l'aide de fonction de transfert ou d'équations d'état. Par contre le réglage par logique floue donne une approche plutôt programmatique, permettant d'inclure les expériences acquises par les opérateurs. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Californie de Berkeley.[61]

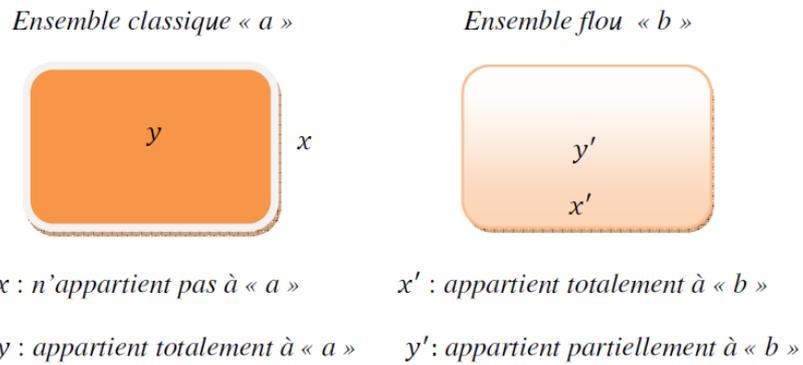
Dans le cadre de ce travail, on présentera dans ce quatrième chapitre un aperçu général sur l'historique, le domaine d'application et la théorie de la logique floue et ses principes de base. Ensuite, on montrera la description de la commande par logique floue avec ses différentes étapes de fuzzification, inférence et défuzzification, [62]

### III.5.2 PRINPE DE LA LOGIQUE FLOUE

La logique floue a été introduite en 1965 par le Professeur L. Zadeh. Elle permet de faire correspondre un degré de vérité (d'appartenance) à une variable qui peut être linguistique. Cette graduation dans l'appartenance d'un élément à une situation permet la modélisation de l'observation humaine exprimée sous forme linguistique. [63]

À partir des années 70 cette théorie a été appliquée à la commande des systèmes. Ces travaux permettaient de mettre en œuvre des commandes de façon heuristique. Dans les années 80 la communauté des automaticiens a commencé à bâtir une théorie de mise en œuvre de commande floue où l'étude de la stabilité a été introduite de façon systématique.

Ce qui différencie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous les contours sont graduels, ou encore flous comme l'illustre la figure (b.1) .[61]

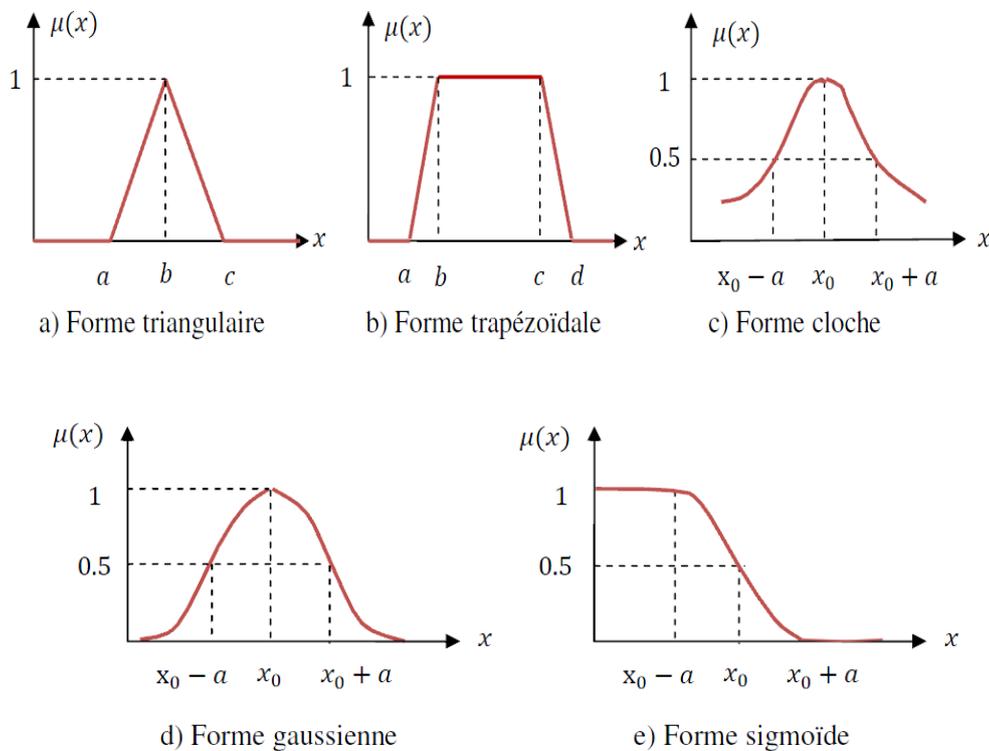


**Figure 3.13 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou**

### III.5.3 Différentes formes des fonctions d'appartenance

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles. Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes géométriques ou des fonctions, on cite les suivantes:[64]

Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites linéaires par morceaux. Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous.



**Figure 3.14 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance.**

Pour certaines situations, les fonctions d'appartenance sont égales à l'unité pour une seule valeur de la variable et égale à 0 pour les autres comme le montre la figure (3.15). Elles prennent

alors le nom de « fonction d'appartenance singleton ». Elle correspond dans le domaine flou à une valeur particulière de cette variable.

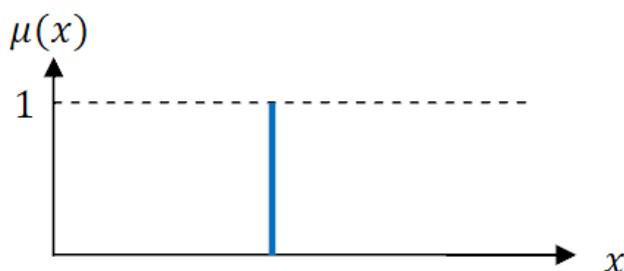


Figure 3.15 : Fonction d'appartenance singleton.

### III.5.4 Opérateurs de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classiques on définit les relations intersection, union et complémentarité qui sont traduites par les opérateurs ET, OU, NON. Ces opérateurs existent également en logique floue, mais sont adaptés aux spécificités de cette logique pour traiter les ensembles flous. Ainsi des opérateurs homologues à ceux de la logique booléenne sont créés en essayant de respecter un certain nombre de propriétés et afin de retrouver les opérations de base existant en logique classique.

Soient E et F, deux sous-ensembles flous d'une variable linguistique définis sur l'univers de discours UD par leurs fonctions d'appartenance respectives  $\mu_E$  et  $\mu_F$ .

#### III.5.4.1 Opérateur ET (Intersection floue)

Le sous-ensemble flou, correspondant à l'intersection des sous-ensembles E et F est défini par les éléments X de l'univers de discours UD qui appartiennent à E et à F

Dans la logique floue, l'opérateur ET peut être exprimé par :

$$\mu_{E \cap F}(x) = \min\{\mu_E(x), \mu_F(x)\} \quad (3.37)$$

Ou bien 
$$\mu_{E \cap F}(x) = \mu_E(x) \cdot \mu_F(x) \quad (3.38)$$

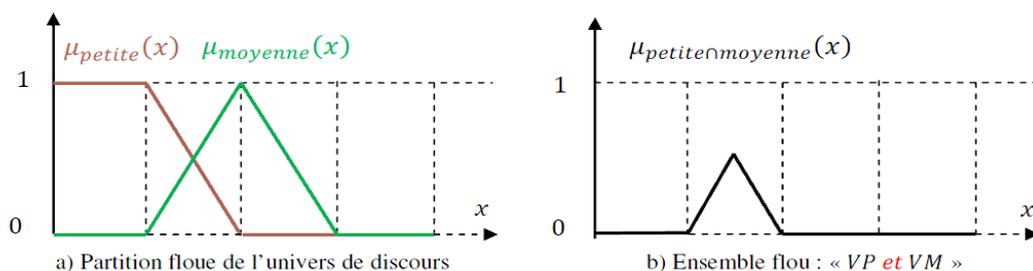


Figure 3.16 : Intersection des sous-ensembles flous «petite» et «moyenne» pour la variable linguistique (vitesse).

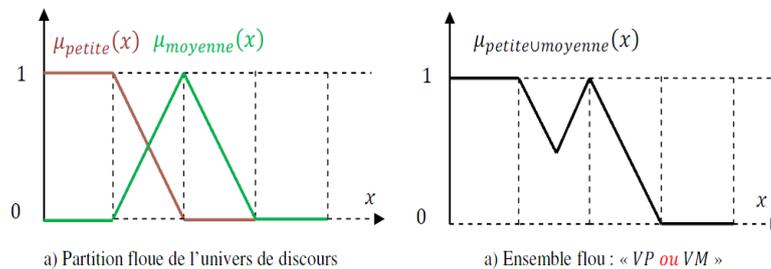
#### III.5.4.2 Opérateur OU (Union floue)

Le sous-ensemble flou correspondant à l'union des sous-ensembles E et F est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par tous les éléments X de UD qui appartiennent ou

bien à E ou bien à F, ce que l'on note  $E \cup F$ . l'opérateur OU est généralement réalisé par la formation du maximum, que l'on exprime comme suit :

$$\mu_{E \cup F}(x) = \max\{\mu_E(x), \mu_F(x)\} \tag{3.39}$$

Ou bien 
$$\mu_{E \cup F}(x) = \mu_E(x) + \mu_F(x) \tag{3.40}$$



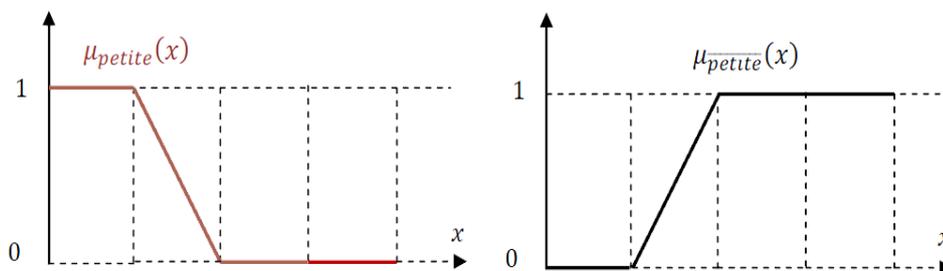
**Figure 3.17 : Union des sous-ensembles flous «petite» et «moyenne» pour la variable Linguistique.**

### III.5.4.3 Opérateur NON (complémentation floue)

Comme l'illustre la figure (3.18), le sous-ensemble flou complémentaire du sous-ensemble E est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par les éléments X de l'UD qui n'appartiennent pas au sous-ensemble flou E . On peut exprimer ça par :

$$\mu_{\bar{E}}(x) = 1 - \mu_E(x) \quad \forall x \in UD \tag{3.41}$$

Le complément flou représente l'opération NON de la logique classique au sens flou.



**Figure 3.18 : Complémentation du sous-ensemble flou «petite»**

### III.5.5 DOMAINE D'APPLICATION

L'approche de traitement des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, à priori dans une démarche scientifique.

Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants :

- Pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile voire impossible
- Pour les systèmes contrôlés par des experts humains ;
- Contrôle du système ;
- Pour les systèmes ayant de nombreuses entrées / sorties continues ou discontinues ;

Pour les systèmes ayant des réponses non linéaires.

### III.5.6 Structure d'une commande à logique floue

La structure d'une commande basée sur la logique floue est illustrée sur la figure suivante :

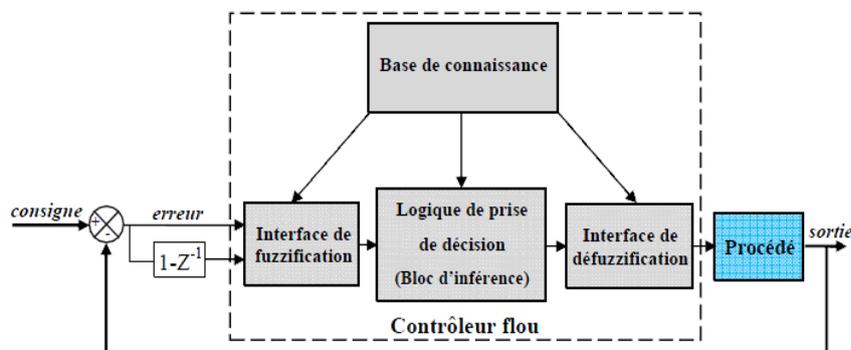


Figure 3.19 : Structure de base d'une commande à logique floue.

Elle est composée de quatre blocs: [65][66]

- une interface de fuzzification à l'entrée,
- une base de connaissance,
- une logique de prise de décision (ou bloc d'inférence),
- une interface de défuzzification en sortie.

Le système à commander ne recevant que des valeurs déterministes (non floues), un contrôleur à logique floue doit convertir des valeurs déterministes à son entrée en valeurs floues, les traiter avec les règles floues et convertir le signal de commande en valeurs déterministes pour les appliquer au procédé.[66]

#### III.5.6.1 Base de connaissance

Elle est divisée en deux parties, la base de données et la base de règles et contient les définitions des sous-ensembles flous d'entrée et de sortie, leurs fonctions d'appartenance, leurs univers de discours et l'ensemble des règles de commande floues, qui doivent tenir compte du comportement du système à régler et des buts du réglage envisagé. [67]

#### III.5.6.2 Base de données

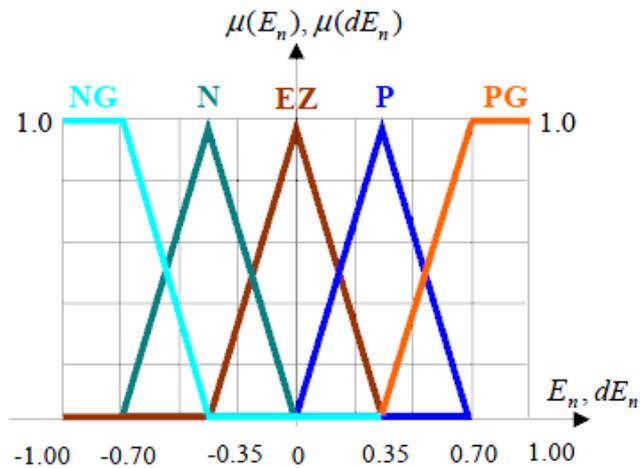
Elle fournit toutes les définitions nécessaires à l'élaboration des règles de commande linguistiques et à la manipulation des données floues dans le contrôleur (univers de discours, partitions floues, choix des opérateurs, ...). Elle est caractérisée par des concepts qui sont basés sur l'expérience et le jugement de l'expert. La conception d'une base de règles requiert la définition de sous-ensembles flous particuliers pour chaque univers de discours considéré, la définition de ces sous-ensembles flous fait l'objet de la partition floue consistant à définir  $n$  sous-ensembles flous de façon à recouvrir l'univers de discours  $U$ . Plus le nombre de sous-ensembles est grand et plus la sensibilité de la commande sera grande. On introduit habituellement pour chaque variable, trois, cinq ou sept sous-ensembles flous, et afin que ceux-ci soient centrés sur la valeur zéro on adopte en général un nombre impair. De plus un nombre plus élevé que sept est souvent inutile en terme de précision et le temps de calcul devient trop grand. [65]

Que :

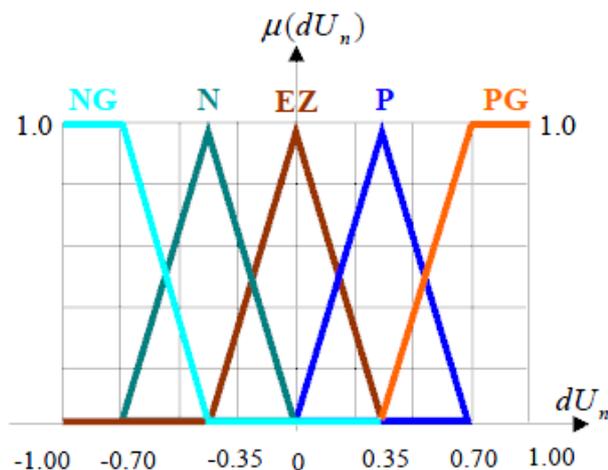
- **NG** : Négatif-Grand, - **NM** : Négatif-Moyen, - **NP** : Négatif-Petit,
- **EZ** : Environ-Zéro, - **PP** : Positif-Petit, - **PM** : Positif-Moyen,
- **PG** : Positif-Grand.

### III.5.7 Contrôleur flou de type MAMDANI

Après plusieurs essais de simulations nous avons choisis pour le contrôleur flou une partition de l'univers de discours à cinq sous-ensembles flous et privilégiés les formes triangulaires et trapézoïdale pour les fonctions d'appartenance. Ces choix sont illustrés sur les figures (3.20) et (3.21)



**Figure 3.20 : Fonctions d'appartenance des entrées normalisées**



**Figure 3.21 : Fonctions d'appartenance des variable de sortie**

Pour le traitement numérique des inférences relatif au contrôleur flou, nous avons adoptés pour la méthode « MAX-MIN » de Mamdani :

- opérateur ET : formation du minimum, - opérateur OU : formation du maximum,
- implication ALORS : formation du minimum, - agrégation : formation du maximum.

Les règles floues, permettant de déterminer la variable de sortie du régulateur en fonction des variables d'entrées sont regroupées dans la table (3.1).

		E				
		NG	NP	EZ	PP	PG
dE	NG	NG	NG	PN	NP	EZ
	NP	NG	NP	PN	EZ	PP
	EZ	NG	NP	EZ	PP	PG
	PP	NG	EZ	PP	PP	PG
	PG	EZ	PP	PP	PG	PG

**Tableau 3.1: Matrice d'inférence.**

Cette matrice doit être établie à partir d'une parfaite connaissance du comportement du système à régler, ainsi que la connaissance de l'objectif du contrôle à atteindre. On prend comme critère de défuzzification la méthode du centre de gravité.

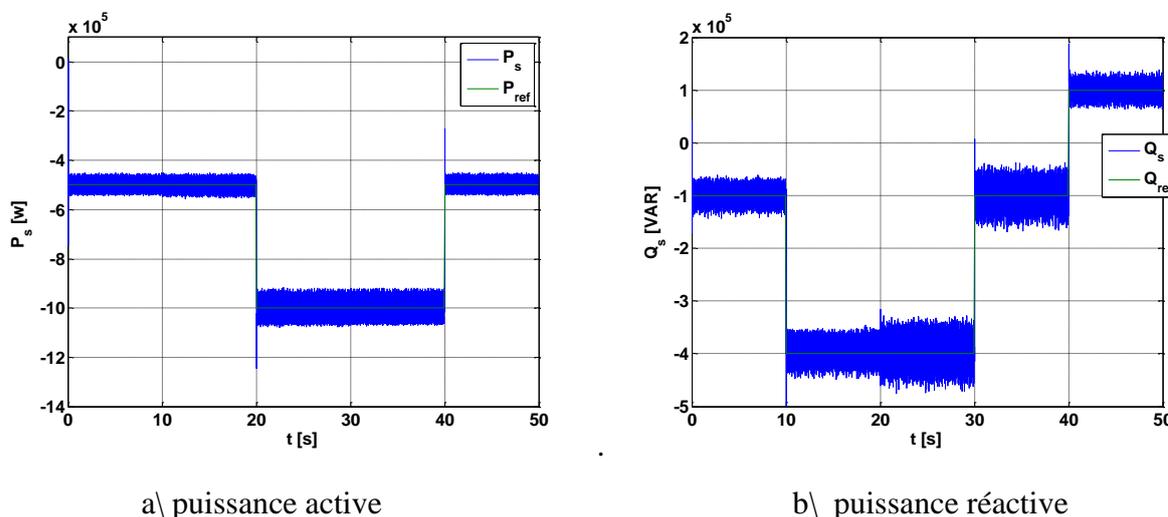
**Méthode du centre de gravité**

C'est la méthode de défuzzification la plus courante. L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultant de l'inférence correspond à la valeur de sortie du régulateur.

Cette méthode de défuzzification exige un temps de calcul assez important, surtout pour l'exécution en temps réel. Il apparaît que plus la fonction d'appartenance résultante n'est compliquée, plus le processus de défuzzification devient long et coûteux.

**III.6 Résultat de simulation pour régulateur PI-Floue**

Les résultats obtenus est bien suivi la référence, le temps de réponse rapide et l'erreur statique faible pour les deux puissances active et réactive.



**Figure 3.22 : Résultats de simulation de contrôle indépendant des puissances par régulateur PI-Floue**

**III.7 Comparaison entre les deux résultats**

- Le temps de réponse de régulateur PI-Flou très rapide Par rapport au résultat précédent
- L'erreur de régulateur PI-Flou est faible Par rapport l'autre résultat

À travers les deux points précédents le régulateur PI-Floue donne des résultats plus précis par rapport les résultats de régulateur PI classique.

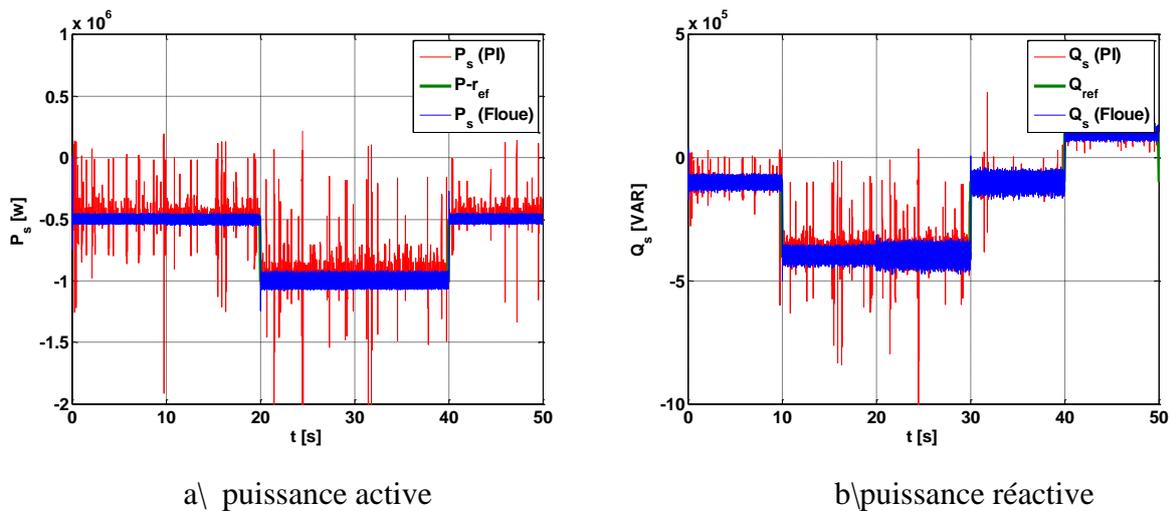


Figure 3.23 : Les deux résultats de simulation

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la commande vectorielle par orientation du flux statorique qui permet de traiter la génératrice asynchrone à double alimentation de façon semblable à celle de la machine à courant continu.

On a aussi vu comment extraire le maximum de puissance de la turbine par le réglage de tension statorique par l'utilisation de la commande MPPT, les résultats de simulation nous conduisent à dire quelles suivent bien les références désirées.

Les résultats du régulateur PI-Flou obtenus Avec une bonne performance et une rapidité de la réponse par rapport aux résultats obtenus l'aide d'un régulateur PI.

# Chapitre 04

## Connexion D'une Eolienne En Utilisant Un Convertisseur NPC A Trois Niveaux

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous considérons l'utilisation d'un convertisseur NPC à trois niveaux pour réaliser la connexion par un filtre RL d'un générateur éolien à vitesse variable. La présence d'un bus continu est nécessaire pour maintenir la tension d'entrée de l'onduleur constante.

### IV.2 Modélisation de l'onduleur a trois niveaux

#### IV.2.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux

Plusieurs structures sont possibles pour réaliser un onduleur triphasé à trois niveaux, nous avons choisi d'étudier la structure NPC (Neutral Point Clamping) c'est-à-dire une structure à point milieu. [47],[48]

L'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC étudié se compose de trois bras symétriques, chaque bras est constitué de quatre paires (Diode -Transistor) représentant chacune un interrupteur bidirectionnel en courant et deux diodes médianes permettant d'avoir les niveaux zéro de la tension de sortie de l'onduleur  $V_{KM}$  notées  $DD_{K0}$  et  $DD_{K1}$ . Cette structure impose l'utilisation des interrupteurs commandables à l'amorçage et au blocage.

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue de force électromotrice ( $U_{C1} + U_{C2}$ ). Ces deux générateurs ainsi que les diodes  $DD_{K0}$  et  $DD_{K1}$  se trouvent connectés entre eux en un point fictif noté « M ».

La représentation schématique de cet onduleur est donnée par la figure (IV-1), ou :

- ✓ Les tensions continues  $U_{C1}$ ,  $U_{C2}$  sont les tensions d'entrée ;
- ✓ Les tensions alternatives  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  sont les tensions de sortie ;
- ✓ Les courants  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  sont les courants de sortie.

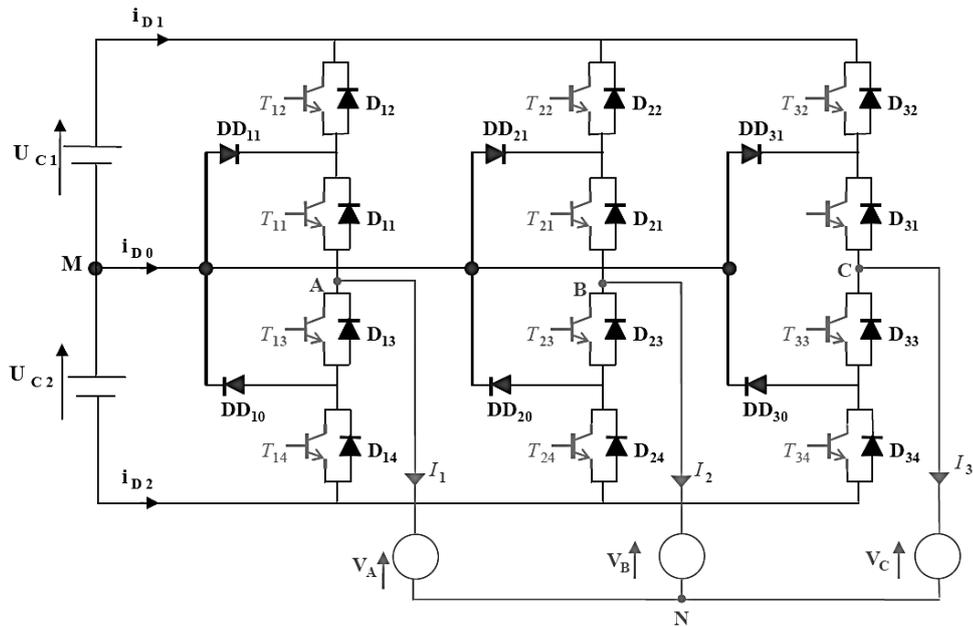


Figure 4.1 : Onduleur triphasé à trois niveaux.

### IV.3. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

La symétrie des onduleurs à trois niveaux permet leur modélisation par bras sans à priori sur la commande. On montra ensuite comment déduire celui d'un onduleur complet. Les courants  $i_{D0}$ ,  $i_{D1}$  et  $i_{D2}$  fixent le sens de transfert d'énergie de l'élément conducteur (Transistor-Diode).

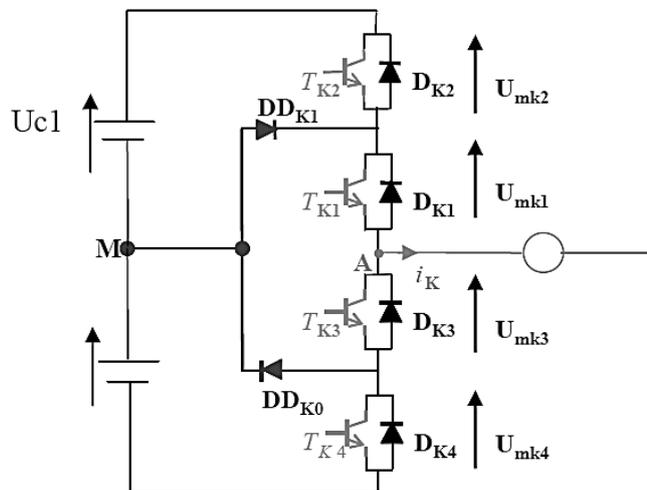
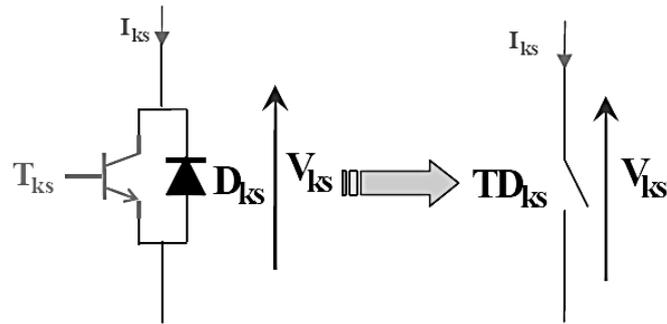


Figure 4.2 : Structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur multi-niveaux, on présente chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel  $TD_{KS}$  (figure 4.2), et vu la symétrie de sa structure, on fait le raisonnement sur un seul bras. [47]



**Figure 4.3 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode.**

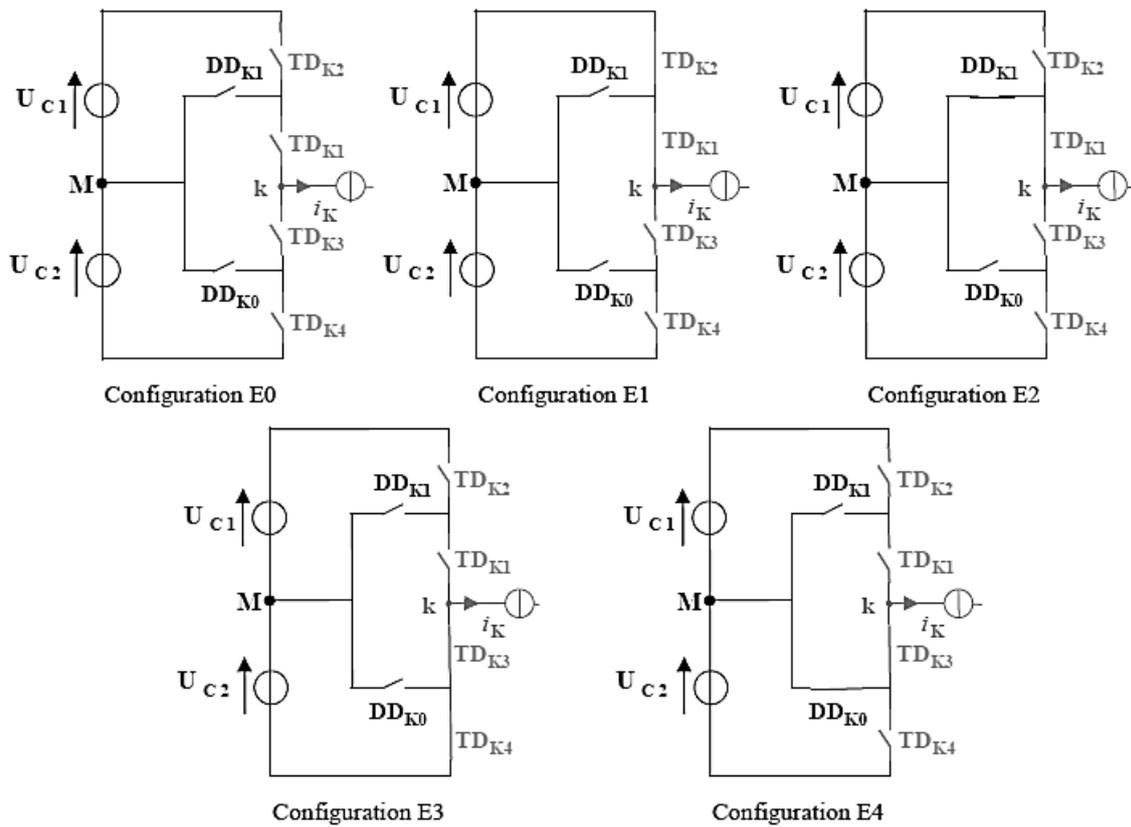
L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de :

- ✓ La commande externe  $B_{KS}$  (l'ordre d'amorçage ou de blocage des semi-conducteurs bicommandables  $T_{KS}$ ).
- ✓ Une commande interne définie par les signes des courants du bras et des tensions aux bornes des semi-conducteurs.

### **IV.3.1. Différentes configurations d'un bras de l'onduleur à trois niveaux**

Pour décrire les différentes séquences de fonctionnement du convertisseur regardons d'abord les valeurs que peut prendre une tension simple  $V_{AM}$ . Cette tension est totalement définie par l'état des quatre interrupteurs du bras.

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles. La figure (IV.4) représente ces différentes configurations.



**Figure 4.4 : Différentes configurations possibles du fonctionnement d'un bras.**

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau (4.1) (avec  $M$  origine des potentiels et  $V_k$  le potentiel du nœud  $k$  du bras  $k$ ).

Configuration	Grandeur caractéristique
E0	$i_k = 0$
E1	$V_k = + U_{C1}$
E2	$V_k = 0$
E3	$V_k = - U_{C2}$
E4	$V_k = 0$

**Tableau (4. 1) Grandeurs électriques caractérisant chacune des configurations.**

### IV.3.2. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Chaque bras est équivalent à un interrupteur à trois positions permettant d'obtenir en sortie trois niveaux de tension  $U_{C1}$ ,  $0$  et  $-U_{C2}$ . Les trois niveaux peuvent être générés comme suite :

**Etat : 01**

Quand  $TD_{K1}$  et  $TD_{K2}$  sont fermés, les diodes  $DD_{K1}$  et  $DD_{K0}$  ne conduisent pas et la phase est connectée au potentiel positif du circuit de bras, donc la tension sera  $U_{C1} + U_{C2} = 2U_C$

#### **Etat : 02**

Quand  $TD_{K1}$  et  $TD_{K3}$  sont fermés, et par conséquent  $TD_{K2}$  et  $TD_{K4}$  sont bloqués, la phase est connectée au point milieu M les diodes  $DD_{K1}$  et  $DD_{K0}$  indépendamment du signe du courant, Cela permet de générer le niveau Zéro (d'où le non Neutral-Point-Clamped)

#### **Etat : 03**

Quand  $TD_{K3}$  et  $TD_{K4}$  sont fermés, les diodes  $DD_{K1}$  et  $DD_{K0}$  ne conduisent pas et la phase est connecté au potentiel négative du bras .Ainsi, l'onduleur génère l'état minimum ( $2U_C$ )

#### **Etat : 04** (l'état interdit)

Quand  $TD_{K2}$  et  $TD_{K4}$  sont fermés, est par conséquent  $TD_{K1}$  et  $TD_{K3}$  sont Bloqués, cet état est indéfini est donc interdit dans le fonctionnement normal de l'onduleur.

### **IV.3.3. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux**

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur. [47]

Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et non plus des commandes internes (grandeurs électriques). Supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée. De ce fait, on peut définir les fonctions de connexion.

#### **Hypothèse :**

- La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est supposée faible (négligeable devant  $U_C$ ).
- La charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé, alors on a :

$$\begin{cases} V_A + V_B + V_C = 0 \\ i_0 + i_1 + i_2 = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou à une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases} \quad (4.2)$$

Avec  $B_{Ks}$  est le signal de la commande du transistor  $T_{Ks}$  du bras k.

Le tableau (4.2) résume les tensions possibles en sortie et les éléments conducteurs pour chaque état de commutation dans un bras. [35]

Etat de commutation				Tension sortie	Eléments conducteurs	
$B_{K1}$	$B_{K2}$	$B_{K3}$	$B_{K4}$		I>0	I<0
1	1	0	0	$\pm U_C$	$TD_{K1}, TD_{K2}$	$DD_{K0}, DD_{K1}$
1	0	1	0	$\pm \frac{U_C}{2}$	$DD_{K1}, DD_{K2}$	$DD_{K0}, DD_{K1}$
0	0	1	1	0	$DD_{K0}, DD_{K1}$	$TD_{K3}, TD_{K4}$
0	1	0	1		Etat indéfini	

Tableau 4. 2 Table d'excitation associée à la commande complémentaire proposée.

#### IV.3.4. Fonctions de connexion des interrupteurs

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur  $TD_{Ks}$  comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci : [47]

$$\begin{cases} F_{Ks}=1 & \text{si } TD_{Ks} \text{ est fermé} \\ F_{Ks}=0 & \text{si } TD_{Ks} \text{ est ouverte} \end{cases} \quad (4.3)$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k, on trouve :

$$\begin{cases} F_{K1}=1-F_{K4} \\ F_{K2}=1-F_{K3} \end{cases} \quad (4.4)$$

La commande complémentaire est exprimée pour les trois bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{11}=1-F_{14} \\ F_{12}=1-F_{13} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{21}=1-F_{24} \\ F_{22}=1-F_{23} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{31}=1-F_{34} \\ F_{32}=1-F_{33} \end{cases}$$

#### IV.3.5. Fonctions de connexion des demi-bras

On définit la fonction de connexion d'un demi-bras notée  $F_{Km}^b$

Où K : Numéro du bras (K=1; 2; 3)

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bas} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du haut} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} F_{K4} \end{cases} \quad (4.5)$$

Le système d'équation (III. 5) montre que la fonction de connexion du demi-bras  $F_{Km}^b$  vaut 1 dans le cas où les deux interrupteurs du demi-bras associés à  $F_{Km}^b$  sont tous fermés, et nulle dans tous les autres cas.

### IV.3.6. Fonction de conversion

*Notation :*

- ✓  $V_A, V_B, V_C$  : Tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge.
- ✓  $V_{AM}, V_{BM}, V_{CM}$  : Tensions de chaque phase de l'onduleur par rapport au point milieu «M» de l'alimentation continue de l'onduleur.

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M de la source de tension d'entrée, sont donnés par le système suivant :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11} F_{12} U_{C1} - F_{13} F_{14} U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21} F_{22} U_{C1} - F_{23} F_{24} U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31} F_{32} U_{C1} - F_{33} F_{34} U_{C2} \end{cases} \quad (4.6)$$

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras, on aura :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b U_{C1} - F_{10}^b U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21}^b U_{C1} - F_{20}^b U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31}^b U_{C1} - F_{30}^b U_{C2} \end{cases} \quad (4.7)$$

Les tensions composées sont données par :

$$\begin{cases} U_{AM} = V_{AM} - V_{BM} = (F_{11} F_{12} - F_{21} F_{22}) U_{C1} - (F_{13} F_{14} - F_{23} F_{24}) U_{C2} \\ U_{BM} = V_{BM} - V_{CM} = (F_{21} F_{22} - F_{31} F_{32}) U_{C1} - (F_{23} F_{24} - F_{33} F_{34}) U_{C2} \\ U_{CM} = V_{CM} - V_{AM} = (F_{31} F_{32} - F_{11} F_{12}) U_{C1} - (F_{33} F_{34} - F_{13} F_{14}) U_{C2} \end{cases} \quad (4.8)$$

Si on admet que les tensions simples du récepteur forment un système triphasé équilibré, on a :

$$\begin{cases} V_{AN} = V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_{BN} = V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_{CN} = V_C = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{cases} \quad (4.9)$$

D'où le système matriciel suivant exprimant ces tensions composées au moyen des fonctions de connexion des demi-bras :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left\{ F_{K1}^b \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} \right\} \quad (4.10)$$

Les tensions simples sont déduites comme suit :

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ F_{K1}^b \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} \right\} \quad (4.11)$$

Pour les courants, on peut écrire la relation donnant les courants d'entrée  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$  en fonction des courants  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  de la charge en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} F_{12} i_1 + F_{21} F_{22} i_2 + F_{31} F_{32} i_3 \\ i_{d2} = F_{13} F_{14} i_1 + F_{23} F_{24} i_2 + F_{33} F_{34} i_3 \end{cases} \quad (4.12)$$

En utilisant les fonctions de connexion des demi-bras, le système (IV. 12) s'écrit :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b i_1 + F_{21}^b i_2 + F_{31}^b i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3 \end{cases} \quad (4.13)$$

Cette relation montre, que pour l'onduleur à trois niveaux, tout se passe comme si le courant  $i_{d1}$  était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et  $i_{d2}$  le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du bas.

Le courant  $i_{d0}$  est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = F_{11} F_{13} i_1 + F_{21} F_{23} i_2 + F_{31} F_{33} i_3 \quad (4.14)$$

En introduisant les équations (IV.13) et (IV.12), le courant  $i_{d0}$  peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{i}_{d0} = \mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2 + \mathbf{i}_3 - \mathbf{i}_{d1} - \mathbf{i}_{d2}$$

D'où

$$\mathbf{i}_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) \mathbf{i}_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) \mathbf{i}_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \mathbf{i}_3 \quad (4.15)$$

Pour l'onduleur triphasé à trios-niveaux, le vecteur des grandeurs d'état est

$$\begin{bmatrix} U_{C1} & U_{C2} & i_1 & i_2 & i_3 \end{bmatrix}^T \text{ ses entrées internes sont } \begin{bmatrix} V_A & V_B & V_C & i_{d1} & i_{d2} & i_{d0} \end{bmatrix}^T \text{ et} \\ \begin{bmatrix} V_{AB} & V_{BC} & V_{CA} & i_{d1} & i_{d2} & i_{d0} \end{bmatrix}^T$$

On définit la matrice de conversion simple qui nous permet de déduire le vecteur des grandeurs internes en fonction du vecteur d'état : [47]

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Avec :

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b + 2F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{-F_{10}^b + 2F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b - F_{21}^b + 2F_{31}^b}{3} & \frac{-F_{10}^b - F_{20}^b + 2F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

De même, on définit la matrice de conversion composée comme suit

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [M(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Avec :

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{21}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{31}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b - F_{11}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

## IV.4. Stratégie de commande de l'onduleur triphasé a trois niveaux

### IV.4.1. Commande triangulo-sinusoïdale Commande de l'onduleur triphasé a trois niveaux a deux porteuses

#### IV.4.1.1. Principe de la commande

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale avec deux porteuses triangulaires bipolaires. [49], [50], [51]

*Deux paramètres caractérisent cette stratégie*

- ✓ L'indice de modulation " $m$ " qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  à la fréquence de la tension de référence  $f$ :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (4.20)$$

- ✓ Taux de modulation " $r$ " qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_m$ ) et celle de la porteuse ( $U_{pm}$ ):

$$r = \frac{V_m}{U_{pm}} \quad (4.21)$$

Les deux porteuses sont identiques et déphasé d'une demi période de hachage ( $\frac{1}{2f_p}$ ) l'une de l'autre afin d'améliorer le taux d'harmoniques de la tension de sortie.

La porteuse choisie est celle en dents de scie bipolaire, elle permet une réduction de taux d'harmoniques qui seront centré autour des fréquences multiple de  $2.m.f$ .

#### IV.4.1.2. Algorithme de commande

L'algorithme de la commande de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses pour l'onduleur à trois niveaux pour un bras K, peut être résumé en deux étapes: [47], [52]

**Etape 1** : la détermination des signaux intermédiaires  $V_{k1}$  et  $V_{k0}$

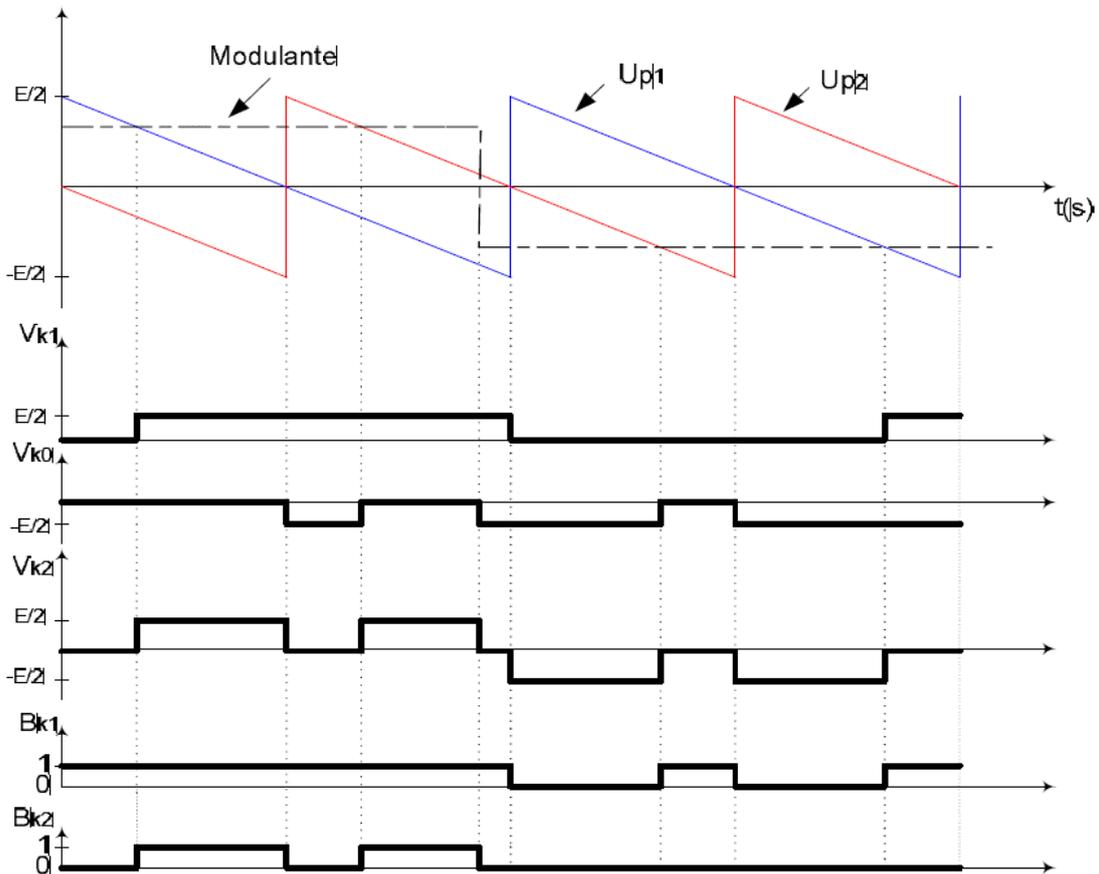
$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{refk}} \geq U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = \frac{E}{2} \\ V_{\text{refk}} < U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = 0 \end{array} \right. \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{refk}} \geq U_{p2} \Rightarrow V_{k1} = 0 \\ V_{\text{refk}} < U_{p2} \Rightarrow V_{k1} = -\frac{E}{2} \end{array} \right. \quad (4.22)$$

**Etape 2** : détermination du signal  $V_{k2}$  et des ordres de commande  $B_{kS}$  des interrupteurs :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{k2} = \frac{E}{2} \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 1 \\ V_{k2} = -\frac{E}{2} \Rightarrow B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \\ V_{k2} = 0 \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \end{array} \right. \quad (4.23)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{k2} = V_{k1} + V_{k0} \\ B_{k3} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k4} = \overline{B_{k1}} \end{array} \right. \quad (4.24)$$

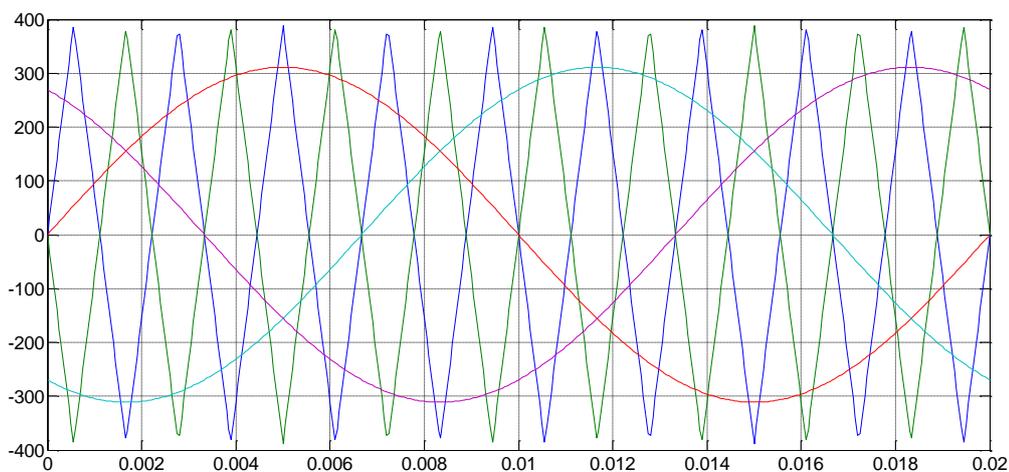
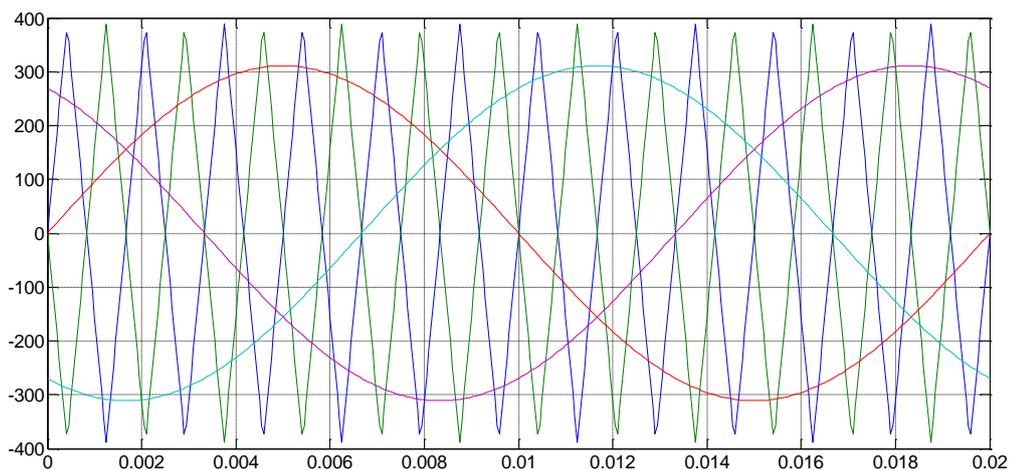


**Figure 4.5 : Principe de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses.****IV.4.1.3. Caractéristique de tension de référence**

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé utilisé, qui permettent d'avoir un système triphasé équilibré direct ou inverse sont données par le système d'équations suivant :

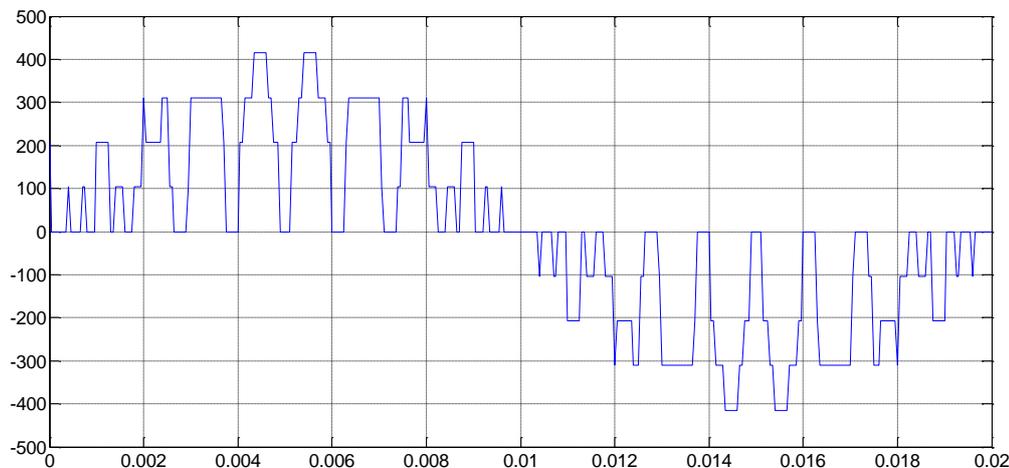
$$V_{ref1} = V_m \sin(\omega t) , V_{ref2} = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) , V_{ref3} = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad (4.25)$$

La figure (IV.8) montre la porteuse et les tensions de références pour respectivement  $m=9$ ,  $r=0.8$  et  $m=12$ ,  $r=0.8$ .

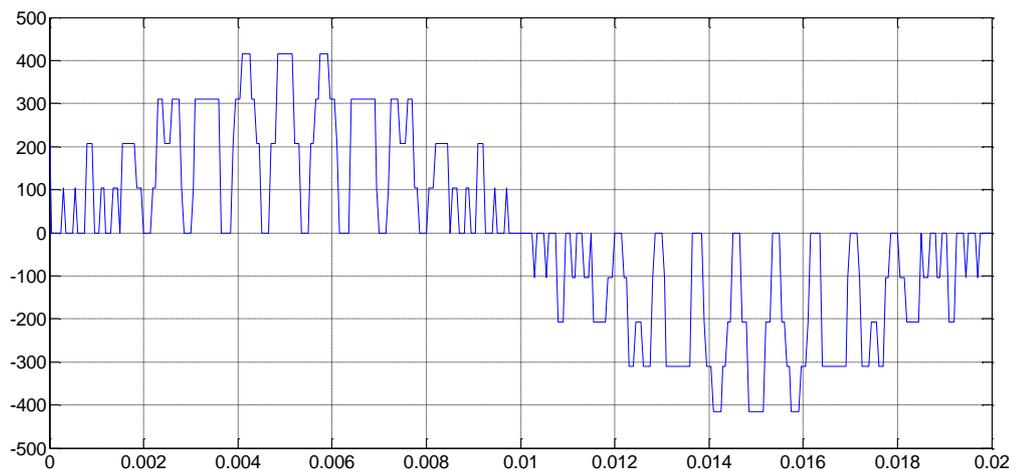
**(m=9, r=0.8)****(m=12, r=0.8)****Figure 4.6 : les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses de l'onduleur triphasé à trois niveaux pour des valeurs paire et impaire de m.**

## IV.5. Résultats de simulation

Nous avons représenté sur la figure (4.7), la tension d'une phase de l'onduleur triphasé :



**Figure 4.7.a : Tension de sortie de l'onduleur triphasée à trois niveaux commandée par stratégie Triangulo-sinusoidale à deux porteuses (m=9, r=0.8).**



**Figure 4.7.b : Tension de sortie de l'onduleur triphasée à trois niveaux commandée par stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses (m=12, r=0.8).**

## IV.6. Interprétation

- ✓ On constate que la tension simple  $V_a$  ne possède que des harmoniques impaires pour toutes les valeurs de "m".
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation "m" permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées, donc facilement filtrées par la machine.

## IV.6 Etude de la liaison au réseau électrique

### IV.6.1 Modélisation de la liaison

#### IV.6.1.1 Modélisation du filtre d'entrée

La liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre RL (Figure 4.8), ayant pour objectif d'éliminer les fréquences harmoniques issues du fonctionnement en commutation du convertisseur électronique.[53]

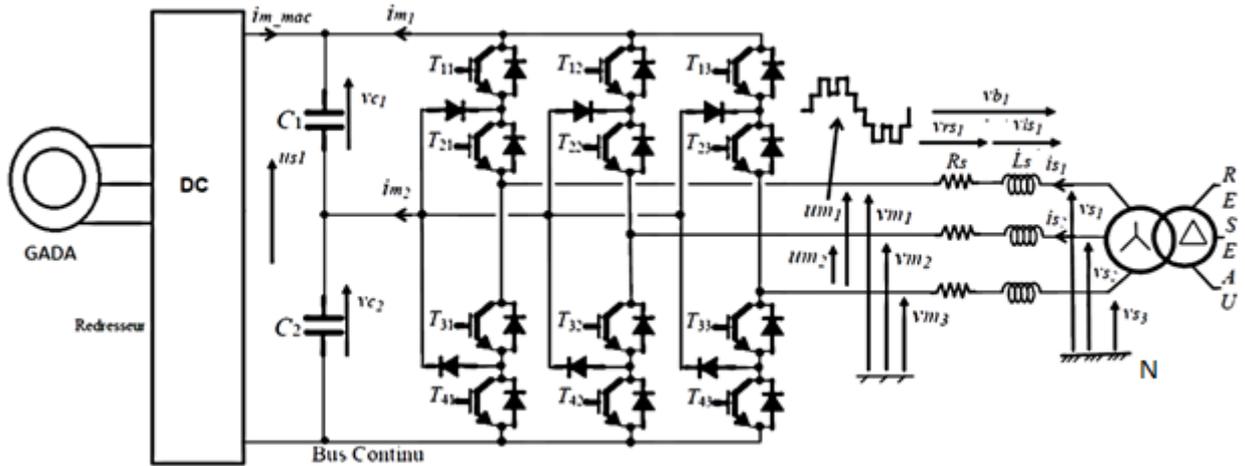


Figure 4.8 : Schéma électrique de la liaison au réseau électrique.

Les courants transités entre le convertisseur et le réseau sont imposés par les bobines et obtenus par intégration des tensions aux bornes de celles-ci :

$$i_{s1}(t) = \frac{1}{L_s} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} v_{ls1} dt + i_{s1}(t_0) \quad (R1) \quad (4.26)$$

$$i_{s2}(t) = \frac{1}{L_s} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} v_{ls2} dt + i_{s2}(t_0) \quad (R2) \quad (4.27)$$

Le troisième courant peut être obtenu, si nécessaire, à partir de la connaissance des deux autres :

$$i_{s3} = -(i_{s1} + i_{s2}) \quad (R3) \quad (4.28)$$

Les tensions aux bornes des résistances valent :

$$v_{rs1} = R_s i_{s1} \quad (R4) \quad (4.29)$$

$$v_{rs2} = R_s i_{s2} \quad (R5) \quad (4.30)$$

La tension aux bornes de la bobine dépend alors de la tension aux bornes de la résistance et du filtre RL selon :

$$v_{ls1} = v_{b1} - v_{rs1} \quad (R6) \quad (4.31)$$

$$v_{ls2} = v_{b2} - v_{rs2} \quad (R7) \quad (4.32)$$

L'application de la loi des mailles permet de déterminer les tensions apparaissant aux bornes du filtre RL :

$$vb_1 = vs_1 - vm_1 vrs_1 \quad (R8) \quad (4.33)$$

$$vb_2 = vs_2 - vm_2 vrs_1 \quad (R9) \quad (4.34)$$

#### IV.6.1.2 Modélisation du bus continu

Les tensions aux bornes des deux condensateurs sont obtenues à partir de l'intégration de leurs courants respectifs, selon :

$$vc_1 = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0+\Delta T} \frac{1}{C} ic_1(t) dt + vc_1(t_0) vrs_1 \quad (R1) \quad (4.35)$$

$$vc_2 = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0+\Delta T} \frac{1}{C} ic_2(t) dt + vc_2(t_0) vrs_1 \quad (R2) \quad (4.36)$$

Le courant du premier condensateur est issu du premier noeud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur (Fig. 1.3):

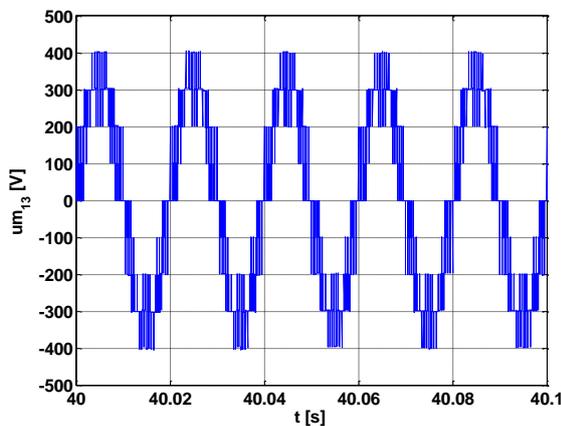
$$ic_1 = im\_mac + im_1 vrs_1 \quad (R3) \quad (4.37)$$

Le courant du deuxième condensateur est donné par :

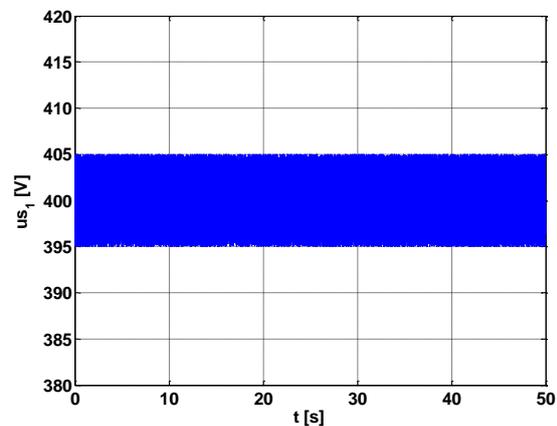
$$ic_2 = ic_1 + im_2 vrs_1 \quad (R4) \quad (4.38)$$

### IV.7 Résultats de simulation

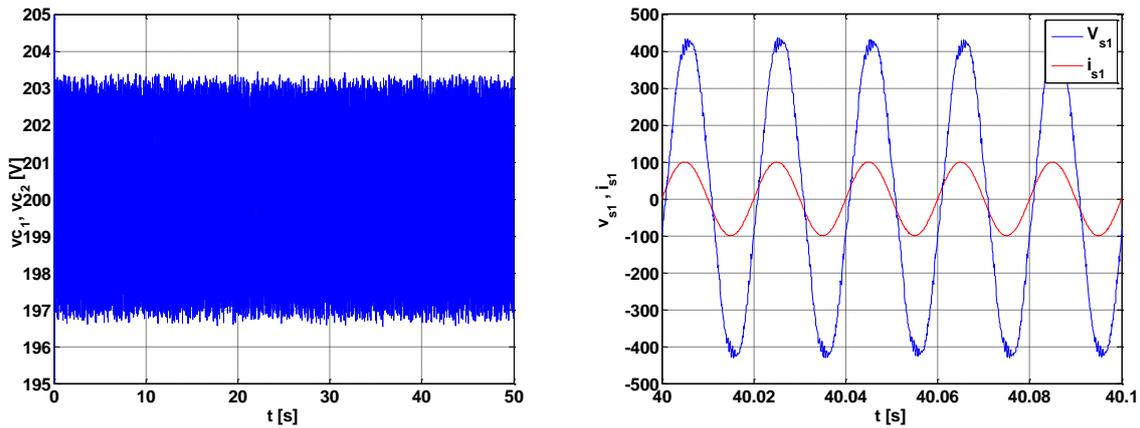
Les résultats obtenus pour une fréquence de 50 Htz et réglage de la tension de bus continu sur 400 V :



a. Tension modulée um13.



b : Tension du bus continu DC.



c : Tension aux bornes de chaque condensateur du bus continu DC.

d : Tension et courant de la première phase du réseau ( $v_{s1}$  et  $i_{s1/15}$ ).

**Figure 4.9 : les résultats de simulation de la liaison au réseau électrique**

Le courant et la tension de la première phase du réseau sont en opposition de phase sur la figure 4.9.d ,.

Le courant est bien lissé et presque sous la forme d'une fonction sinusoïdale. Les résultats acceptables et la qualité d'énergie bien et sur les normes.

## IV.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la réalisation de connexion d'une éolienne au réseau électrique, au premier lieu on a vu la structure d'un convertisseur NPC à trois niveaux, son modélisation et fonctionnement après on a choisi une stratégie de commande de ce dernier, et finalement on a étudié la liaison au réseau électrique on a aussi montré quelques résultats de simulation.

## CONCLUSION GENERALE

Les problématiques abordées dans ce mémoire nous ont permis d'étudier la génératrice asynchrone à double alimentations utilisée dans les systèmes éoliens, ainsi que la commande vectorielle par orientation du flux statorique et puis on a représenté la dynamique de la machine asynchrone alimenté par un convertisseur.

La machine asynchrone à double alimentation est un système non linéaire, multi variable, soumis à des variations paramétriques et à des perturbations inconnues. L'étude réalisée dans ce travail concerne la commande de la puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Premièrement on a fait un rappel sur les concepts fondamentaux des systèmes éoliens, nous nous sommes intéressés aux éoliennes à vitesse variable. Et nous avons décrit la machine asynchrone à double alimentation ainsi leurs différentes utilisations et avantages.

Ensuite nous avons développé la modélisation d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) en tenant compte des hypothèses simplificatrices. Nous avons pu établir un modèle mathématique simplifié de la GADA en vue d'une alimentation par convertisseurs statiques en utilisant la transformation de PARK.

Après on a fait une étude consacré la commande vectorielle de la GADA utilisant un réglage classique (régulateurs PI) qui nécessite une parfaite connaissance du modèle du système à régler.

Cette approche conduit à des lois de commande dont les performances sont fortement liées à la fidélité du modèle dynamique utilisé pour décrire le comportement du système. Des erreurs de modélisation ou de variations paramétriques du système peuvent détériorer les performances de réglage puisqu'elles contribuent directement au calcul de la commande.

Nous remarquons que le réglage classique ne contrôle pas d'une manière satisfaisante le régime transitoire de la MADA lors du changement de consigne.

Pour améliorer la commande on remplace la régulateur PI classique par la régulateur de la logique floue (l'intelligence artificielle), les résultats de cette commande est mieux par rapport l'autre résultat de régulateur classique.

Finalement on a étudié un convertisseur NPC à trois niveaux. Ce dernier permet En vue de la commande de ce convertisseur, on a élaboré son modèle de connaissance et de commande. On a montré qu'en utilisant les fonctions génératrices, on aboutit à un modèle homogène où toutes ses grandeurs sont continués.

On peut dire que l'association de la commande vectorielle de la MADA avec un convertisseur NPC à trois niveaux donne des résultats satisfaisants.

Ensuite on a étudié la liaison de notre chaine de conversion au réseau électrique, après la modélisation des différents éléments (bus continu, filtre...) on peut dire que les résultats de simulation sont acceptables.

Au terme de ce travail, nous pouvons affirmer qu'une grande partie de l'objectif fixé est atteint.

## CONCLUSION GENERALE

---

Nous avons abordé un sujet qui en plein de développement, donc des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif GADA – convertisseur sont envisageables :

- ✓ Nous pouvons dire que la commande vectorielle indirecte en tension par orientation du flux statorique permet de traiter la GADA de façon semblable à celle de la machine à courant continu ; ce qui permet d'obtenir une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable.
- ✓ Dans le cas d'alimentation en tension, l'algorithme de commande, prend en compte la dynamique du rotor. Ce qui a pour conséquence une plus grande sensibilité de la commande aux variations des paramètres de la MADA.
- ✓ On a pu montrer que la génératrice fournie de l'énergie au réseau avec une puissance active quel que soit le mode de fonctionnement. La génératrice éolienne ainsi modélisée a été testée avec un fonctionnement à vitesse variable. Les résultats de simulation montrent que le système éolien ainsi proposé est faisable et a de nombreux avantages.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] P.W. Carl\*in, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [2] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, "Etat de l'Art dans les Aérogénérateurs Electriques",2001.
- [3] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21,2002.
- [4] 12j [www.windpower.org](http://www.windpower.org)
- [5] <http://www.enercon.de/>; constructeur d'éolienne.
- [6] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Techniques de l'Ingénieur : Eoliennes", BM 4 640, Techniques de l'Ingénieur, 1989.
- [7] <http://www.enercon.de/>; constructeur d'éolienne.
- [8] N.laverdure, I. Valero, S. Bacha, L.Gerbaud, ' Optimiation de l'interfaçage de puisance dans les systèmes éoliens', GEVIQ'2002,merseille,2002
- [9] N. LAVERDURE, "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, , France, 2005.
- [10] P. Berlu, "Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.
- [11] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [12] C. Bourillon, "Wind Energy – Clean Power for Generations", Renewable Energy, Vol. 16, pp. 948-953, 1999.
- [13] L. Khettache, "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2007.
- [14] Frédéric Poitiers, «Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne», Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 19/12/2003.
- [15] GHOSN R. 'Contrôle Vectoriel de la Machine Asynchrone à Rotor Bobiné à Double Alimentation' thèse de Doctorat – ENSEEIHT- Institut National Polytechnique de Toulouse- Octobre 2001.
- [16] RAMUZ D. Machine Généralisée Alimentée par Deux Convertisseurs Thèse de Doctorat- UFR des Sience Techniques et Gestion de l'industrie- Université de Franche-Comté- Mai 2000.
- [17] Boumaraf Farid, «Commande Intelligente D'une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation», Thèse de Magister en Électrotechnique de l'Université de Batna, 29/01 / 2009.
- [18] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, 2004.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [19] S. Muller, M. Deicke, R. W. De Doncker, "Doubly-Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines", IEEE Industry Applications Magazine, May-June 2000.
- [20] A. Beugnies, T. Ghennam, B. François, E. M. Berkouk, B. Robyns, "Centralized supervision of reactive power generation for a wind farm", 12th European conference on power electronics and applications (EPE 2007), Aalborg, Denmark 02-05, September 2007.
- [21] S. El aimani, B. Francois, B. Robyns, F. Minne, "Modeling and simulation of doubly fed induction generators for variable speed wind turbines integrated in a distribution network", 10th European conference on power electronics and applications (EPE 2003), Toulouse, France, September 2003.
- [22] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [23] D. Beriber, 'Optimisation et gestion d'énergie de système de production photovoltaïque-Eolienne avec stockage', thèse de doctorat, USTHB, Alger, 2010.
- [24] JP. Caron, JP. Hautier, 'Modélisation et commande de la machine asynchrone', Ed Techniq, 1995
- [25] W. Hofmann, A. Thieme, 'Control of a double-fed induction generator for wind-power plants', PCIM98.
- [26] Tapia. G., Tapia. A, 'Wind generation optimisation algorithm for a doubly fed induction generator', IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Volume 152, Issue 2, 4 March 2005, pp. 253 - 263.
- [27] Lianwei Jiao, Banakar. H, Baïke Shen, Changling Luo, Joos. G, Boon-Teck Ooi, 'Fundamental and Applied Research on Doubly-Fed Induction Generator', Electrical Machines and Systems, 2005. ICEYIS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on, Volume 1, 27-29 Sept. 2005, pp. 32 - 37.
- [28] Joris Soens, J. Driesen, R. Belmans, 'A Comprehensive Model of a Doubly Fed Induction Generator for Dynamic Simulations and Power System Studies', ESAT/ELECTA. K.U Leuven. Belgium. ICREP'03, 2003.
- [29] Armand Boyette, Shahrokh Saadate, 'Eolienne avec génératrice asynchrone à double alimentation et unité de stockage d'énergie pour production continue d'électricité', EPF juillet 2006 Grenoble (CD rom S7-2).
- [30] Armand Boyette, Philippe Poure and Shahrokh Saadate, 'Direct and indirect control of a Doubly Fed Induction Generator wind turbine including a storage unit', IECO'06 novembre 2006 Paris (CD rom ISI3-1-4244-0136-4).
- [31] Frédéric Poitiers, 'Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne', école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.
- [32] Janaka B. Ekanayake, Lee Howsworth, Xueuang Wu, and Nicholas Jenkins, 'Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines', IEEE Transactions POWER SYSTEMS, VOL. 18, NO. 2, MAY 2003.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [33] J. Morrenl, S.W.H. de Haanl, P. Bauerl, J.I.G. Pierik<sup>2</sup>, J. Bozelie<sup>3</sup>), 'Comparison of complete and reduced models of a wind turbine with Doubly-Fed Induction Generator", EPE 2003- Toulouse, ISBN: 90-75815-07-7.
- [34] G. A. Capolino, H. Hénao et V. T. Nguyen Phuoc, "Méthode de Conception d'une Commande Vectorielle pour Machine à Induction", SEE, Journée d'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.
- [35] M. T. Cao, "Commande Numérique de Machines Asynchrones par Logique Floue", Thèse de Philosophiae Doctor (Ph.D.), Université de Laval, Québec, Canada, 1997.
- [36] B. Mokhtari, "Implantation de la DTFC par des Techniques de l'Intelligences Artificielles Neuronale et Floue : Application à la Machine Asynchrone Alimentée par des Onduleurs de Tension à Deux et à Trois Niveaux", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2004.
- [37] L. Baghli, "Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 1999.
- [38] I. Al-Rouh, "Contribution à la Commande sans Capteur de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2004.
- [39] S. belkacem, " Etude Comparative des Performances Statiques et Dynamiques d'un Contrôle de Découplage et d'un DTC d'un Moteur à Induction Alimenté par un Convertisseur Statique", Thèse de magister, Université de Batna, 2005.
- [40] Abdel Karim Thameur, «Etude et Implémentation de Différents Algorithmes Numériques de Modulation MLI d'un Onduleur Triphasé à Trois Niveaux », Mémoire Magister, Ecole Militaire Polytechnique EMP, Alger, 2004.
- [41] K. Eftichios, K. Kostas, "Design of a maximum power tracking system for windenergy-conversion applications", IEEE transaction on industrial electronics, vol. 53, no. 2, April 2006.
- [42] K. Tan and S. Islam, "Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors," IEEE Transaction on energy Conversion, vol. 19, no. 2, pp. 392-399, June 2004.
- [43] A. G. Abo-Khalil, D.C. Lee, "MPPT Control of wind generation Systems based on estimated wind speed using SVR", IEEE Transaction on industrial electronics, vol. 55, no. 3, Mars 2008.
- [44] Lie Xu and Phillip Cartwright, 'Direct Active and Heactive Power Control of DFIG for wind Energy Generation', IEEE TRAINSACTIOINS ON ENERGY CONJVERSION, VOL. 21, NO. 3, SEPTEMBER 2006.
- [45] Hans phiverscth Rphistphin, Tore M. Undeland, Terje Gjengedal, 'DOCBLY FED INDCCTION GENERATOR IN A WIND TCRBINE',2006.
- [46] Frédéric Poitiers, 'Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne', ôcole polytechnique de l'université de Nantes, 2003.
- [47] Abdel Karim Thameur, «Etude et Implémentation de Différents Algorithmes Numériques de Modulation MLI d'un Onduleur Triphasé à Trois Niveaux »,Mémoire Magister, Ecole Militaire Polytechnique EMP, Alger, 2004.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [48] Rachid Bouakaz, «Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux», Mémoire Magister, Université de Batna, 2005.
- [49] Guy Séguier, « Electronique de puissance : Cours et exercices résolus », Edition Dunod, 7eme édition, Paris, 1999.
- [50] T. Nguyen, N.P.Schibli, A.C. Rufer, «A Three Phase Multilevel Converter for High Power Induction Motors», IEEE Transaction on Power Electronics, Vol.13, N°5, September 1998.
- [51] Aouzellag. D, Ghedamsi. K, E.M. Berkouk, «Power Control Speed Wind Turbine Driving an DFIG», Conference sur le Génie Electrique CGE04, Ecole Militaire Polytechnique EMP, 2005.
- [52] Yakoub Khadidja, « Réduction des Effets de la Tension Homopolaire dans les Associations Onduleurs Multiniveaux Moteur à Induction », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [53] Omar BOUHALI, «Contribution Des Convertisseurs Multiniveaux Au Raccordement De La Production D'origine Eolienne Sur Un Reseau Electrique», thèse de doctorat, EMP, 2007.
- [54] LATRECHE Mohammed Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire Magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.
- [55] TOUAL BELKACEM, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister, Université de Batna, 2010.
- [56] Aggoun Ghania , «Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'une système de génération éolien-ou» mémoire de magister, Université tizi-ouzou, 2010.
- [57] MOUSSA SIDDO Abdoulaziz, «Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» mémoire de magister, ENP, 2007.
- [58] CHERFIA NAÏM, « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens» mémoire de magister, Université Mentouri ,Constantine , 2010.
- [59] Armand BOYETTE, «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne» ,thèse de doctorat, V.F.R sciences et technique S.T.M.LA, 2006.
- [60] Tarak GHENNAM, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [61] A. Chaiba, "Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée en Tension", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2004.
- [62] K. Kouzi, "Commande Vectorielle d'un Moteur à Induction sans Capteur de Vitesse par un Réglage PI-Flou à Gains-Flous Adaptés Associé à un Observateur d'Etat par Mode de Glissement", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [63] L. Baghli, "Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 1999.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [64] A.Dendouga, R.Abdessemmed, L.Bendaas et A.Chaiba : "Sliding mode control of active and reactive power generated by a doubly fed induction generator (DFIG)", Conférence sur le génie électrique CGE'04, EMP Alger, 2005.
- [65] L. Gacôgne, "Logique Floue et Applications", Institut d'Informatique d'Entreprise d'Evry, Conservatoire National des Arts et Métiers, Ministère de l'Education Nationale Française, France, Novembre 2003.
- [66] F. Chevré et F. Guély, "La Logique Floue", Cahier Technique N° 191, Groupe Schneider, CT Edition, Mars, 1998.
- [67] J. Godjevac, "Idées Nettes sur la Logique Floue", Collection Informatique, Première Edition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1999.
- [68] Vincent Courtecuisse, « supervision d'une centrale multi-sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », thèse de doctorat, université de Lille ; 2008.
- [69] SEMMAR Mohamed « L'énergie éolienne pour prévenir l'avenir sous un climat sain et propre » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Déc. 2008, p.8-9-10
- [70] L. HAMANE « les ressources éoliennes de l'Algérie » Bul. Ene. Ren, CDER, N°3, juin 2003. P 10-11.
- [71] N. Kasbadji Marzouk « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ?, » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7

Données de la machine asynchrone à double alimentation (2eme ,3eme et 4eme chapitres)

Valeurs nominales : 1.5 MW ;  $p=2$  [55]

**Paramètre de la machine:**

- ◆  $R_s = 0.012\Omega$  (Résistance du stator)
- ◆  $R_r = 0.021\Omega$  (Résistance du rotor)
- ◆  $L_s = 0.0137\text{ H}$  (Inductance d du stator)
- ◆  $L_r = 0.0136\text{ H}$  (Inductance de rotor)
- ◆  $M = 0.0135\text{ H}$  (Inductance mutuelle)
- ◆  $p=2$  (Paire de pole)

**Paramètre de la turbine :**

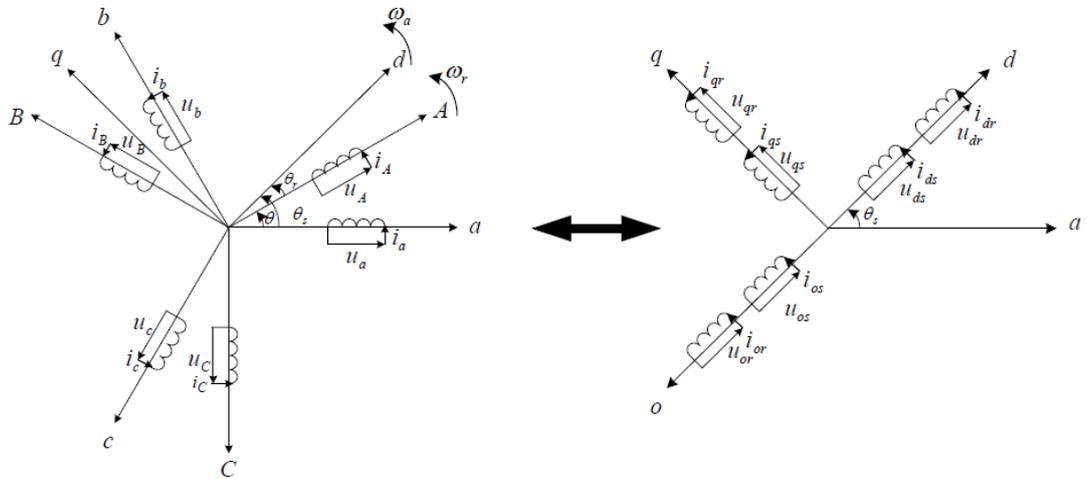
- ◆  $R=35.25$  (Rayon de l'éolienne)
- ◆  $S=\pi*(R)^2$  (Surface)
- ◆  $\rho=1.22$  (Densité volumique de l'air)
- ◆  $M=90$  (Gain de multiplicateur de vitesse)
- ◆  $J=0.1235$  (Inerté de l'arbre)
- ◆  $f=0.0024$  (Coefficient de frottement)

## Annexe A

### La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c, en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, c'est-à-dire, elle ne participe pas à la création de cette fmm de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d,q). La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles, et permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au

système transformé, qui reste invariable pour la machine réelle. Le schéma de la figure (a) montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation.



**Figure a: Principe de la transformation de Park.**

## ملخص:

يهدف العمل المقدم في هذه المذكرة إلى الدراسة والتحكم و الاتصال في مولد لاتزامني ثنائي التغذية. قمنا باستعمال تقنية التدفق الموجه بتوجيه تدفق الجزء الساكن للحصول على استقلالية التحكم بين الاستطاعة النشطة والتفاعلية قمنا باستعمال موج أن بي سي ثلاثي المستويات من أجل وصل المولد بالشبكة الكهربائية.

## كلمات مفتاحية:

مولد لاتزامني ثنائي التغذية- المموجات المصفوفية - تقنية التدفق الموجه – العنقات الهوائية- الشبكة الكهربائية

## Résumé :

Ce travail a pour but l'étude, la commande, et la connexion d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) fonctionnant en génératrice

Nous avons étudié la technique de la commande vectorielle par orientation du flux statorique à la GADA pour assurer un découplage naturel entre la grandeur commandant la puissance active et réactive

L'utilisation de l'onduleur NPC 3 niveaux pour la connexion de la GADA au réseau électrique

## Mots clés :

Machine Asynchrone à Double Alimentation-onduleur NPC -Commande vectorielle-éolienne- réseau électrique.

## Abstract :

The aim of this work is the study and control and connection of a doubly fed induction generator (DFIG) .

We studied the technique of vector control by stator flux orientation of the DFIG to ensure a natural decoupling between the magnitude controlling active and reactive power

The use of 3-level NPC inverter connecting the power grid to DFIG

## Key words:

Doubly Fed Induction Machine - NPC inverter - Control by Field Oriented - Wind turbine- electrical grid.