

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche*  
*Scientifique*

*Université Abderrahmane Mira de Bejaïa*



*جامعة بجاية*  
**Tasdawit n Bgayet**  
**Université de Béjaïa**

*Faculté de technologie*  
*Département de génie électrique*

***Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en***  
***électrotechnique***

*Option : commande électrique*

*Présenté par*

*MOUSSI Aissa*

*HARKOUK Kousseila*

***Encadré par: Pr ABDELLI.R***

***Thème***

***Commande d'une éolienne à vitesse***  
***variable (étude et comparaison)***



# *Remerciement*

*Tout d'abord merci au bon DIEU le tout puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la volonté pour réaliser ce travail dans des meilleurs circonstances et en bon état.*

*J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur madame abdelliet Mes remerciements aux enseignants du la faculté de science et technologie de l'Université Abderrahmane Mira « Bejaia ».*

*Mes remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail. Sans oublier mes camarades, je tiens à les remercier vivement. Enfin je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire.*

# *Dédicaces*

*Avant tout à mes chers parents qui m'ont soutenu pendant toute la durée de ces longues études, « que Dieu me le protègent »*

*À mes chers frères et sœur je cite (Hakim, Rafik, Idris, Feriel et Raouf)*

*À toute la famille MOUSSI.*

*À mes collègues de l'option commande électrique.*

*A tous mes amis et amies*

*À tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.*

*Aux gens que j'aime, et aux gens qui m'aiment et m'estiment.*

*À tous les enseignants et les éducateurs qui ont contribué à ma formation durant tout le parcours de mes études jusqu'à ce jour.*

*...je dédie ce modeste travail*

*Aissa MOUSSI*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*En premier lieu à ma mère et à mon père  
qui ont consenti beaucoup de sacrifices pour  
me permettre de réaliser mes objectifs et  
Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance  
et ma gratitude.*

*A mon grand frère*

*A ma grande sœur*

*A mes oncles et tantes*

*A mes cousins et cousines*

*A mon binôme moussiaissa*

*A tous mes amis(es) syphax, djamel, lyes,  
ghanou.*

*Tous ceux qui me sont chers*

*Kousseila harkouk*

# TABLE DES FIGURES

Figure 1: éoliennes à axe verticale	4
Figure 2: Turbines à axe Horizontal.	5
Figure 3: Turbines éoliennes en amont et en aval.	5
Figure 4: Principe de la conversion d'énergie	6
Figure 5: Exemple de système éolien	6
Figure 6: Éolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone à cage	8
Figure 7: Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.	9
Figure 8: théorie de Betz	10
Figure 9: Coefficient de puissance $C_p$	11
Figure 10: puissance théorique disponible pour un type d'éolienne	12
Figure 11: loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable	13
Figure 12: Eolienne à MAS pilotée au stator	14
Figure 13: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.	15
Figure 14: Machine synchrone connectée directement au réseau	16
Figure 15: Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance	16
Figure 16: Système mécanique de l'éolienne	19
Figure 17: Modèle mécanique simplifiée de la turbine	20
Figure 18: Schéma de la turbine éolienne	20
Figure 19: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine	21
Figure 20: Schéma bloc du modèle de la turbine	23
Figure 21: Entrées/sorties du modèle de la machine asynchrone	27
Figure 32: Caractéristique $C_p(\lambda)$	29
Figure 33: Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.	30
Figure 34: Exemple de fonctions d'appartenance	31
Figure 35: Support, hauteur et noyau d'un ensemble flou.	32
Figure 36: Schéma général d'un contrôleur flou.	33
Figure 37: entrée du changement d'omega	34
Figure 38: entrée du changement de puissance	34
Figure 39: sortie du FLC comme changement de rapport cyclique	34
Figure 40: MATLAB / Simulink Modèle du contrôleur de logique floue	36
Figure 41: Schéma Matlab/Simulink du système éolien	36
Figure 42: Schéma Matlab/Simulink du la turbine éolienne	37
Figure 43: Allure du coefficient de puissance ( $C_p$ ) pour la méthode MPPT classique en fonction de temps	37
Figure 44: Allure du coefficient de puissance ( $C_p$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps	38
Figure 45: allure du la vitesse ( $W_m$ ) pour la methode MPPT classique en fonction de temps	38
Figure 46: allure du la vitesse ( $W_m$ ) (methode MPPT P&O logique floue) en fonction de temps	39
Figure 47: allure des courants $I_{abc}$ (methode MPPT classique) en fonction de temps	39
Figure 48: allure des courants $I_{abc}$ (methode MPPT P&O logique floue) en fonction de temps	40
Figure 49: allure des tensions $V_{abc}$ (methode MPPT classique) en fonction de temps	40
Figure 50: allure des tensions $V_{abc}$ (methode MPPT P&O logique floue) en fonction de temps	41
Figure 51: Allure du coefficient de puissance ( $C_p$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour un échelant de vitesse de 7m/s a 9m/s	41
Figure 52: Allure du coefficient de puissance ( $C_p$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour une vitesse de 7m/s	42
Figure 53 : Allure du la puissance électrique ( $P$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour un échelant de vitesse de 7m/s a 9m/s	42
Figure 54: Allure du la puissance électrique ( $P$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour une vitesse de 7m/s	43

<i>Figure 55: Allure du la vitesse de référence (Vref) pour la méthode MPPT P&amp;O logique floue en fonction de temps pour une vitesse de 7m/s</i>	43
<i>Figure 56: Allure du la vitesse de référence (Vref) pour la méthode MPPT P&amp;O logique floue en fonction de temps pour un échelant de vitesse de 7m/s a 9m/s</i>	44

## INDEX DES NOTION

$C_p$  :Coefficient de puissance de l'éolienne

MADA :Machine asynchrone a doublé alimentation

MAS :Machine asynchrone

$\lambda_{opt}$  :Vitesse relative de l'éolienne optimale

$v$  :Vitesse du vent m/s

$P_m$  :Puissance extraite par le rotor éolien W

$P_{mt}$  :Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé W

$m$  :Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s Kg /s

$\rho$ : Densité de l'air 1,225 kg. m<sup>-3</sup>

$S$ :Surface balayée par le rotor de l'éolienne m<sup>2</sup>

$\lambda$  :Vitesse relative de l'éolienne

$\Omega$ : Vitesse de rotation de la génératrice rad/s

$R$ : Rayon d'aérogénérateur m

$P_{mg}$  : Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice W

$\Omega_{opt}$ : Vitesse de rotation de la génératrice optimale rad/s

$V_{s a,b,c} V_{r a,b,c}$ : Tensions triphasées statoriques et rotoriques de la machine asynchrone

$I_{s a,b,c} I_{r a,b,c}$ : Courants triphasées statoriques et rotoriques de la machine asynchrone

$\psi_{s a,b,c} \psi_{r a,b,c}$ : Flux triphasées statoriques et rotoriques de la machine asynchrone

$R_s R_r$ : Résistance d'une phase statorique et rotorique

$l_s, l_r$ : Inductances propres statorique et rotorique

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

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

$L_s L_r$  : Inductances cycliques statorique et rotorique

$M$  : Inductance magnétisante

$V_{s d,q} V_{r d,q}$  : Tensions statoriques et rotoriques diphasées dans un repère tournant

$I_{s d,q} I_{r d,q}$  : Courants statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant

$\psi_{s d,q} \psi_{r d,q}$  : Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant

$\theta_s$ : Angle relatif à la position statorique  $\omega_s$

$\theta_r$ : Angle de phase du rotor par rapport au stator

$\Omega$  : Vitesse de rotation de la machine

$\Gamma_{em} \Gamma_r$ : Couple électromagnétique de la machine asynchrone et couple résistant

$f$ : Coefficient de frottements visqueux de la machine

$J$  : Moment d'inertie de la machine

$V_{s a,\beta} V_{r a,\beta}$ : Tensions statoriques et rotoriques diphasées dans un repère fixe

$I_{s a,\beta} I_{r a,\beta}$ : Courants statoriques et rotoriques diphasés dans un repère fixe

$\psi_{sa,\beta}\psi_{ra,\beta}$ : Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère fixe

$\sigma$ : Coefficient de dispersion

$I_m$ : Courant magnétisant de la machine

$C$ : Capacité d'un condensateur

$R$ : Résistance électrique

$g$ : Glissement de la machine

$\omega_s$ : Pulsation des grandeurs statoriques

$L_f$ : Inductance de fuites totales

$V_c$ : Tension aux bornes d'une capacité

$\bar{Z}_i$ : Impédance complexe de la charge ( $i=a, b$  ou  $c$ )

$\bar{X}$ : Impédance globale complexe résultant de la mise en parallèle de la charge  $Z_i$  et de la capacité d'excitation  $C_i$

$U$ : Tension composée

$V$ : Tension simple

$I$ : Courants de ligne

$J$ : Courants de phase

$L$ : Valeur d'inductance

# TABLE DES MATIERE

## Introduction générale.....

## Chapitre I : État de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne

Introduction :	3
I.1. Définition de l'énergie éolienne :	3
I.2. Différent type des éoliennes :	4
I.2.1. Éolienne à axe vertical (VAWT) :	4
I.2.2. Éoliennes à axe horizontal (HAWT) :	4
I.2.2.1. Avantage :	5
a) I.2.2.2. Inconvénients :	5
I.3. principe Constitution d'une éolienne :	6
I.3.1. Principe :	6
I.3.2. Constitution :	6
I.4. Éoliennes à vitesse fixe :	7
I.5. Éoliennes à vitesse variable :	8
I.6. Intérêt de la vitesse variable :	9
I.7. Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :	9
I.7.1. La loi de Betz :	9
I.7.2. Production d'énergie mécanique :	12
I.7.3. Production optimale d'énergie :	13
I.8. Type de machine utilisée :	13
I.8.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil :	13
I.8.2. Machine asynchrone à double alimentation :	14
I.8.3. Machine synchrone :	15
I.9. Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne :	16
I.10. Conclusion :	17
Introduction :	18
II.1. Modélisation de la turbine éolienne :	18
II.1.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :	18
II.1.2. Modélisation de la turbine :	20
II.1.3. Modèle du multiplicateur :	22
II.1.4. Équation dynamique de l'arbre :	22

II.2. Modélisation du dispositif : .....	23
II.2.1 Modèle diphasé de la machine asynchrone : .....	23
II.3.Conclusion .....	27
Introduction : .....	28
III.1. Optimisation de la puissance de la turbine : .....	28
III.1.1 La méthode classique : .....	28
III.1.2. commande par logique floue : .....	29
III.1.2.1. Principe de la logique floue : .....	29
III.1.2.2. Élément de base de la logique floue : .....	29
III.1.2.2.1. Ensemble floue : .....	29
III.1.2.2.2. Univers du discours : .....	30
III.1.2.2.3. Variables linguistiques : .....	30
III.1.2.2.4. Fonctions d'appartenance : .....	31
III.1.2.2.4.1. Différentes formes pour les fonctions d'appartenance : .....	31
III.1.2.2.5. Propriétés des ensembles flous [47] [48] [49] : .....	31
III.1.2.2.5.1. Égalité : .....	31
III.1.2.2.5.2. Inclusion : .....	31
III.1.2.2.5.3. Support : .....	32
III.1.2.2.5.4. Hauteur : .....	32
III.1.2.2.5.5. Noyau : .....	32
III.1.2.3. Règle de commande par logique floue : .....	32
III.1.2.3.1. Configuration d'un contrôleur flou [44] : .....	32
III.1.2.3.1.1. Fuzzification : .....	33
III.1.2.3.1.2. Système d'inférence[50].....	35
III.1.2.3.1.3. Défuzzification [47].....	35
III.2 : Simulation des algorithmes de Contrôle MPPT .....	36
III.2 .1 Présentation globale de la chaine de conversion de l'éolienne basée sur la génératrice asynchrone à cage auto-excitée sous MATLAB: .....	36
III.2 .2. Résultats de simulation : .....	37
III.3. Conclusion.....	44
Conclusion générale : .....	45
Bibliographie : .....	47

## Introduction générale :

L'énergie électrique est devenue un élément fondamental pour l'humanité, son utilisation ne cesse d'augmenter de plus en plus au fur des années à cause de nos différentes exigences en plusieurs termes domestiques et industriels. Ce qui nous conduit à réfléchir toujours à de nouvelles techniques de production de cette énergie.

En effet quel appareil domestique ou industrielle ne demande pas l'utilisation de l'électricité, de plus cette énergie joue un rôle essentielle dans le développement économique et sociale partout dans le monde

Pour répondre à ces demandes énergétiques les pays du monde utilise en grande partie la production par les combustibles (comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Dont l'utilisation massive et croissante conduit forcément à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la Terre

Les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

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. plusieurs pays développés, ce sont mis à l'exploitation des énergies renouvelables non seulement pour mettre fin à leur dépendance vis à vis des pays producteurs d'énergies fossiles mais aussi pour lutter contre les problèmes de pollution dus à l'émission de gaz, et du réchauffement climatique dû à l'effet de serre.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne qui occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau où elle est injectée. [1]

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones. Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent.

C'est donc dans ce cadre que nous allons développer notre étude sur un système éolien à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à cage.

Dans le premier chapitre nous allons présenter des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types des génératrices utilisés et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le deuxième chapitre présente une modélisation de la turbine éolienne et la génératrice asynchrone à cage autonome.

Le dernier chapitre comprend les différentes méthodes de commande, comprises la MPPT classique et la MPPT P&O logique floue. À la fin de ce chapitre on a terminé par une interprétation des résultats de la simulation.

*Chapitre I :**État de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne****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, pour ce faire une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant [2].

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et des caractéristiques mécaniques et aussi les différents types de machines électrique associé aux éoliennes.

***1.1. Définition de l'énergie éolienne :***

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable", géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 mètre pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

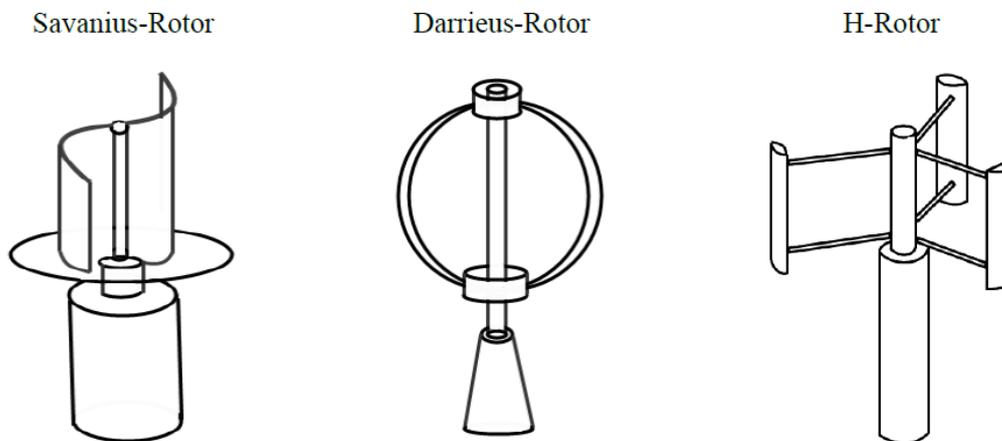
Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative 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. [1]  
De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

## ***1.2. Différent type des éoliennes :***

### ***1.2.1. Éolienne à axe vertical (VAWT) :***

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [2]: Le rotor de Savonius, et le rotor de Darrieus, la figure 1 montre trois conceptions de VAWT [3]. Malgré l'avantage qu'elles possèdent au niveau des organes de commande et du générateur qui sont au niveau du sol donc facilement accessibles, ces éoliennes sont peu utilisées et même abandonnées actuellement à cause des critères suivants :

- La présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent.
- Les éoliennes de grande taille occupent au sol une surface très importante



*Figure 1: éoliennes à axe verticale*

### ***1.2.2 Éoliennes à axe horizontal (HAWT) :***

Une turbine à axe horizontal figure 2 demeure face au vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. Selon son nombre de pales, une HAWT est dite mono-pale, bipale, tripale ou multi-pale. Le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [4].

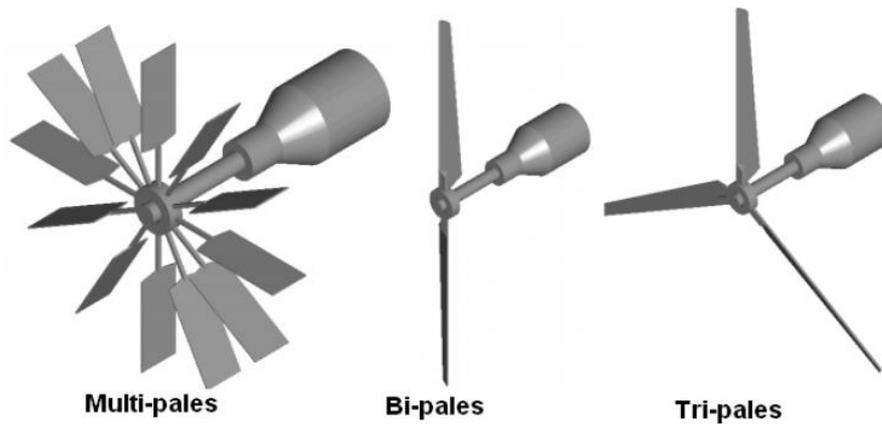


Figure 2: Turbines à axe Horizontal.

Suivant leur orientation en fonction du vent, les HAWT sont dites en amont « up-wind » ou en aval « down-wind ». La figure 3 montre les deux types mentionnés.



Figure 3: Turbines éoliennes en amont et en aval.

### 1.2.2.1 Avantage :

- Rotor face au vent ;
- Absence du problème de (towershadow)
- Mécanisme d'orientation est essentiel
- Largement prédominante.

### a) 1.2.2.2

#### Inconvénients :

- Problème de (Tower Shadow)
- Absence du mécanisme d'orientation

### 1.3. principe Constitution d'une éolienne :

#### 1.3.1.Principe :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [5]:

- 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 4. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique

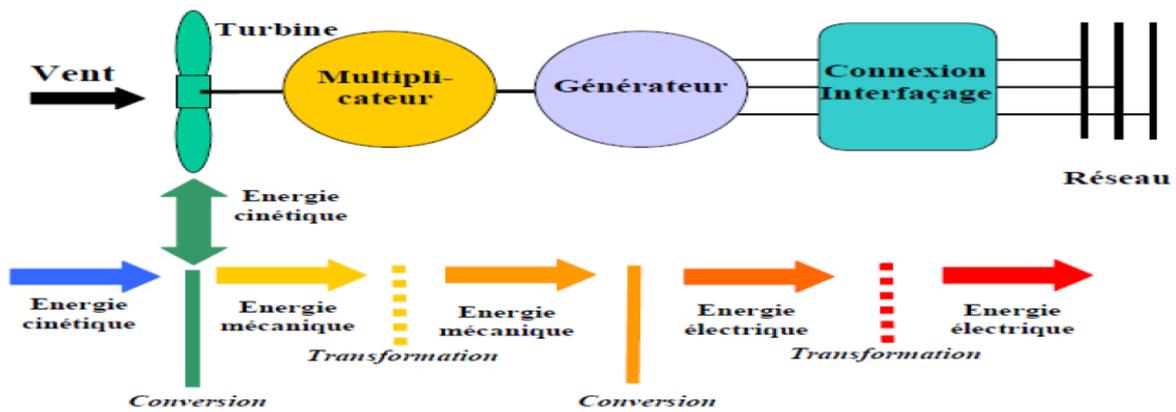


Figure 4: Principe de la conversion d'énergie

#### 1.3.2 Constitution :

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présentés sur la Figure 5 :

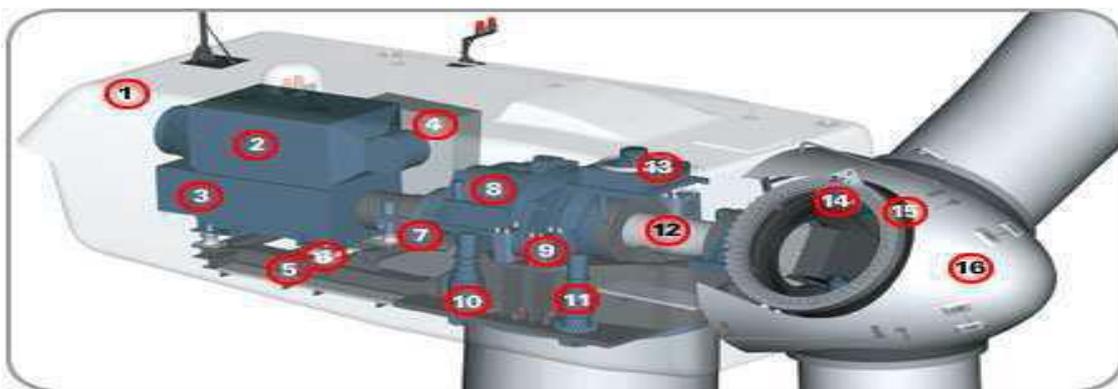


Figure 5: Exemple de système éolien

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. [6]

#### ***1.4. Éoliennes à vitesse fixe :***

Une éolienne à vitesse fixe désigne le fait que le rotor de celle-ci possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. Cette vitesse de fonctionnement dépend du design de la turbine elle-même et de la fréquence du réseau électrique.

Depuis le début des années 1970, soit lors de l'arrivée de la machine asynchrone dans le domaine de l'éolien, la presque totalité des turbines éoliennes à vitesse fixe utilise la machine asynchrone à cage [8]. Pour cette configuration, le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau via un transformateur (Figure 6). De plus, cette configuration couple le rotor de l'éolienne au rotor de la machine asynchrone via une boîte de vitesse. Cette dernière, jumelée à un nombre de paires de pôles de la génératrice électrique, permet de déterminer une vitesse fixe d'opération. Cette configuration est utilisée principalement chez Vestas Wind Systems, Siemens et Nordex [8]. Pour sa part, la machine synchrone présente de nombreux désavantages pour une telle configuration Elle est utilisée qu'occasionnellement [9]

L'éolienne à vitesse fixe, est indépendamment de la vitesse du vent, ce qui fait que l'efficacité de la turbine, représentée par le coefficient de puissance  $C_p$  est optimale uniquement pour une vitesse de vent unique. À cause de la variabilité de la vitesse du vent, cette configuration d'éolienne admet des fluctuations dans la puissance électrique produite et ceci peut créer des instabilités sur le réseau [7]. Les éoliennes à vitesse fixe possèdent tout de

même quelques avantages, soit la simplicité, l'utilisation d'une technologie peu coûteuse et le faible besoin de maintenance.

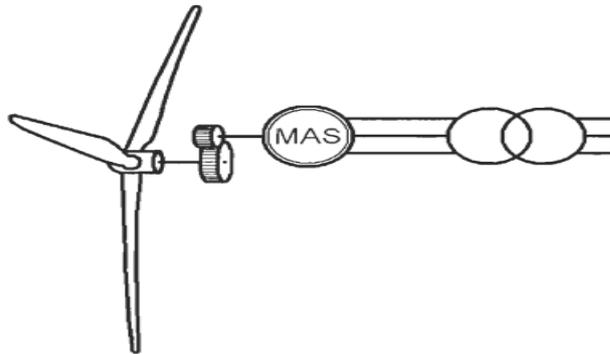


Figure 6: Éolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone à cage

**1.5. Éoliennes à vitesse variable :**

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence [10], une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe.

Les génératrices utilisées pour ce type de configuration sont la machine asynchrone à cage, la machine synchrone avec un nombre élevé de pôles et la machine synchrone à aimant permanent avec nombre élevé de pôles.

	AVANTAGES	INCOVENIENTS
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Est une technologie simple, robuste et éprouvée;</li> <li>• Est une solution économique;</li> <li>• Demande peu de maintenance (MAS à cage).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possède une efficacité aérodynamique peu élevée;</li> <li>• Consomme de la puissance réactive;</li> <li>• Génère du stress sur les composantes mécaniques;</li> <li>• Génère des fluctuations de puissance produite sur le réseau.</li> </ul>
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduit le stress sur les composantes mécaniques de l'éolienne;</li> <li>• Permet de maximiser l'efficacité aérodynamique pour une grande plage de vitesses de vent;</li> <li>• Permet le lissage de la puissance de sortie de la turbine;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite un contrôle complexe;</li> <li>• Les convertisseurs de puissance sont dispendieux et engendrent des pertes de puissance électrique.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permet le contrôle de la tension et de la fréquence sur le réseau (contrôle du flux de puissance);</li> <li>• Permet l'utilisation d'une boîte de vitesse réduite (ou absente) produisant moins de pertes par frottement (pleine vitesse variable seulement).</li> </ul>	
--	---	--

Tableau: Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable

### ***1.6. Intérêt de la vitesse variable :***

Si on considère les courbes du coefficient de puissance fonction de  $\lambda$ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée à une charge, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent ( $\lambda_{opt}$ ). Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique. La figure 7 montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques [11].

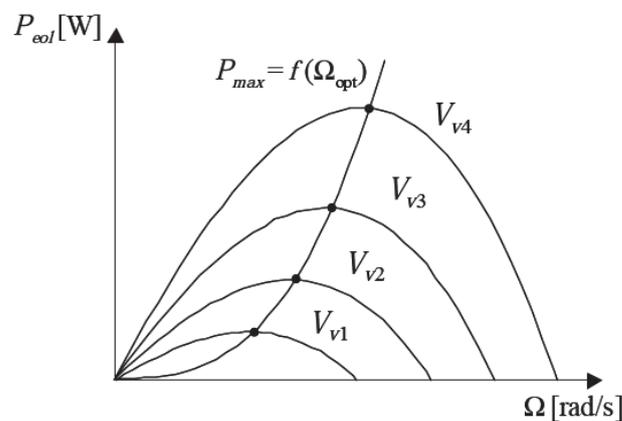


Figure 7: Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

### ***1.7. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :***

L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par les pales de la turbine, puis en énergie électrique via un générateur.

#### ***1.7.1. La loi de Betz :***

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté dans la Figure 8. Albert Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une

vitesse  $V_1$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $V_2$ . Selon la loi de Betz, il paraît évident que plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par les pales d'une éolienne est grande, plus petite sera la vitesse du vent sortant par le côté gauche de l'éolienne.

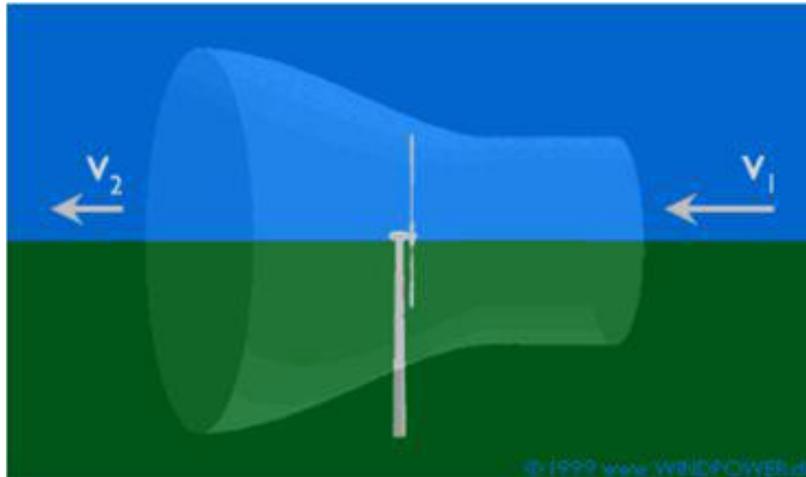


Figure 8: théorie de Betz

Nous pouvons donc penser qu'il doit y avoir une manière de freiner le vent qui se trouve entre ces deux extrémités et qui permette de façon bien plus efficace de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Donc on peut conclure que: une éolienne idéale freinerait le vent à 1/3 de sa vitesse réelle. Afin de bien comprendre pourquoi, nous devons utiliser la loi physique fondamentale de l'aérodynamique des éoliennes [12].

L'application des principes fondamentaux de la physique permet de déterminer la quantité maximale d'énergie du vent qui peut être convertie en énergie mécanique (rotation de l'arbre de la turbine). Ce rendement aérodynamique instantané, ou coefficient de performance  $C_p$ , ne peut dépasser 16/27 soit approximativement 59 %. Par conséquent, le rendement instantané qui tient aussi compte d'autres pertes (aérodynamiques, accouplement, conversion électrique, auxiliaires) doit être inférieur à cette valeur :

### **Rendement global instantané < rendement aérodynamique < 16/27**

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor soit égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbée à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$ , la masse d'air en mouvement traversant la surface des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2}$$

En utilisant la seconde loi de Newton, on pourra exprimer la puissance par :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 + V_2^2)}{2}$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression :

$$P_{mt} = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 + V_2^2)}{4}$$

Un vent théoriquement non perturbé traversant cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse donnerait :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

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

En traçant le ratio des puissances  $\frac{P_m}{P_{mt}}$  en fonction du ratio des vitesses  $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$  nous obtenons la courbe illustrée par la Figure 9. Ce ratio présente un maximum, c'est la limite de Betz. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance  $C_p$  exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent :

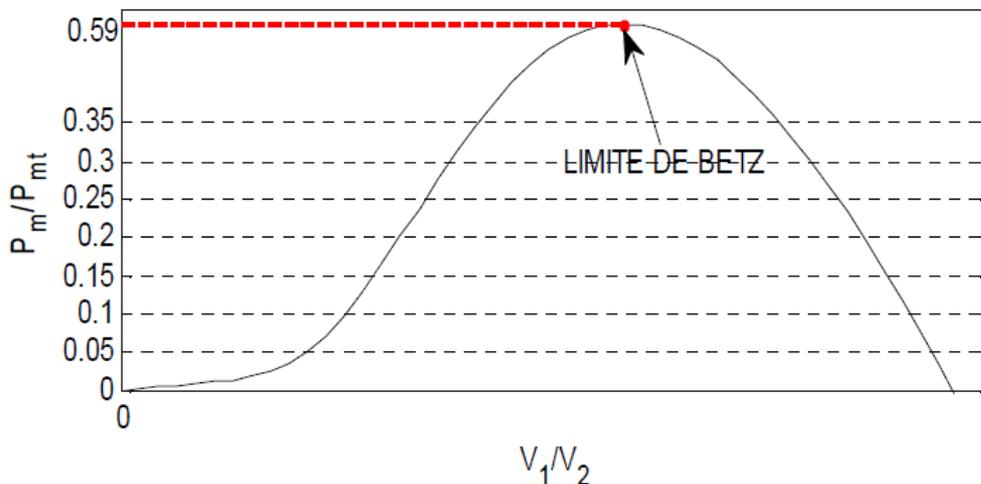


Figure 9: Coefficient de puissance  $C_p$

### 1.7.2. Production d'énergie mécanique :

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi V_1^3$$

$$\text{Avec } \lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$$

$\Omega_1$  : vitesse de rotation avant multiplicateur et R : rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique  $P_{mg}$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{KV} \right) \rho \pi R^2 V_1^3$$

Avec  $\Omega_2$  vitesse de rotation après multiplicateur

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent figure 10. la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple. [13]

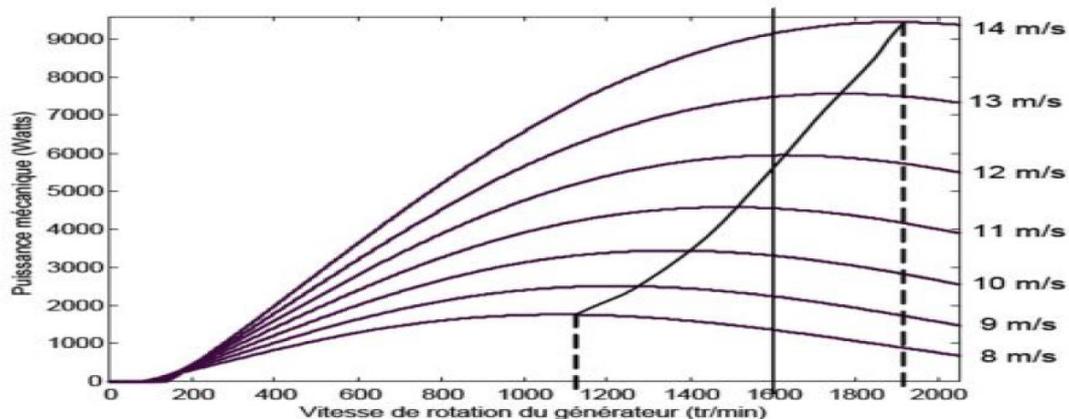


Figure 10: puissance théorique disponible pour un type d'éolienne

### 1.7.3 Production optimale d'énergie :

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de  $\lambda$  donnée appelée  $\lambda_{opt}$ . La vitesse de rotation optimale  $\Omega_{opt}$

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} V$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la **Figure 11**. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts. [13]

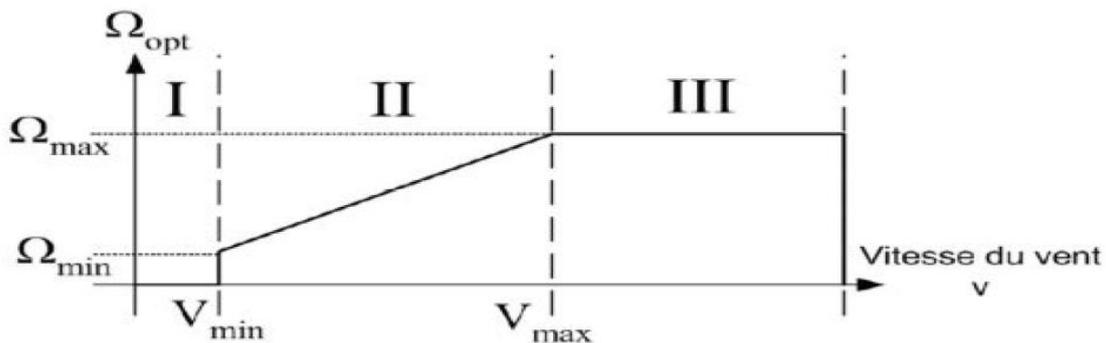


Figure 11: loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau

## 1.8. Type de machine utilise :

### 1.8.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil :

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de

concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct, il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. [14].

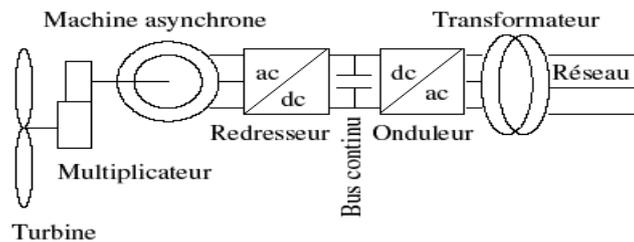


Figure 12: Eolienne à MAS pilotée au stator

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique, voir la figure (12).

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur ce qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu (représenté par une capacité sur la figure (I.12)). Les pales de la turbine éolienne sont orientables (commandable) pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes [15].

### ***1.8.2. Machine asynchrone à double alimentation :***

C'est une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur, un deuxième circuit au rotor est également connecté au réseau par l'intermédiaire de convertisseur de puissance, qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation figure 13. fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur rattrape la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant au rotor à fréquence variable [16].

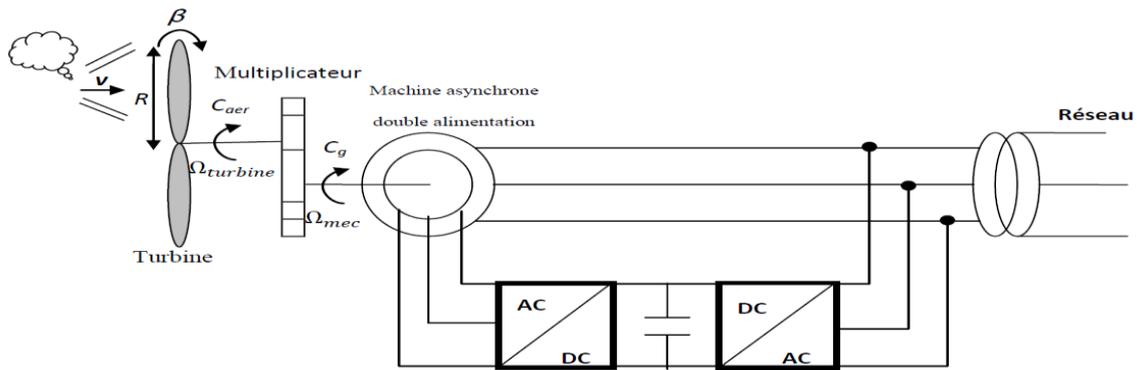


Figure 13: Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

Ces dernières années la majorité des projets éoliens se concentrent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance [17].

### 1.8.3. Machine synchrone :

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure 14), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure 15).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demande un important travail de maintenance [18].

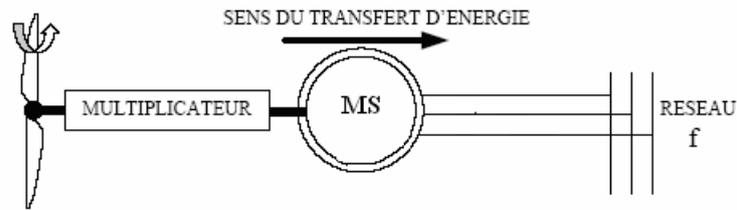


Figure 14: Machine synchrone connectée directement au réseau

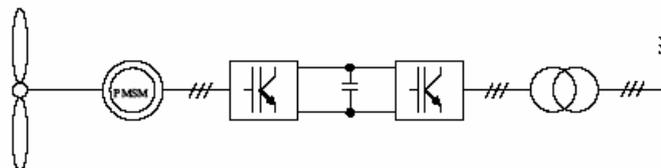


Figure 15: Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance

### I.9. Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne :

Une caractéristique essentielle du vent étant la discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet d'étudier ou de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée directement pendant les périodes de production afin d'en restituer une partie, aussi grande que possible, pendant les périodes de calme. [19]

Il existe différentes possibilités de stockage.

- ❖ Pour la production d'électricité, le système de loin le plus utilisé est celui par Batterie d'accumulateurs. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accoutument bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus.
- ❖ Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre deux réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé. Le simple pompage de l'eau dans un réservoir est aussi la solution pour stocker de l'eau dans le cas, par exemple, de distribution d'eau alimentaire. Principe : l'énergie éolienne sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie.
- ❖ Le stockage thermique commence aussi à se développer, essentiellement pour le chauffage.

Les différents types de stockage thermique existant sont utilisés : réservoir de fluides, chauffage de produits à haute capacité thermique, etc. Principe : l'énergie produite est utilisée pour chauffer le fluide d'un réservoir qui restituera pendant les périodes sans vent l'énergie stockée.

***1.10. Conclusion :***

Dans ce chapitre une brève description des systèmes éoliens a été présentée, en premier parti nous avons décrit les différents systèmes éoliens ainsi que son fonctionnement, puis en deuxième parti nous avons rappelé les notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on a conclu ce chapitre avec la présentation des différents types de machines utilisées (synchrone asynchrone à cage, MADA), et de mettre en avant ces avantages et inconvénients.

Dans le prochain chapitre nous allons procéder à la modélisation de la machine asynchrone à cage dans un système éolien à vitesse variable.

## CHAPITRE II :

### *Modalisation du système de conversion d'énergie éolienne*

#### ***Introduction :***

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. La place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.

L'étude des comportements dynamiques et statiques de la machine asynchrone exige une bonne modélisation mathématique, d'écrivant au mieux son comportement et ceci dans le but d'élaborer des lois de commande adéquates pour un tel système physique. Dans un souci de commande, nous présentons le modèle mathématique utilisé pour la machine asynchrone en vue de la synthèse d'observateurs et de lois de commande développées tout au long de ce chapitre.

Ce chapitre est donc consacré à la modélisation analytique de la machine asynchrone à cage d'écurie. Le modèle sera établi en utilisant la transformation de Park en régime linéaire puis en régime saturé. L'effet de la saturation et l'effet croisé seront pris en compte par les baies d'inductance variable fonction des amplitudes de courant.

#### ***II.1. Modélisation de la turbine éolienne :***

##### ***II.1.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :***

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée, comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{\text{turbine}}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure (16)).

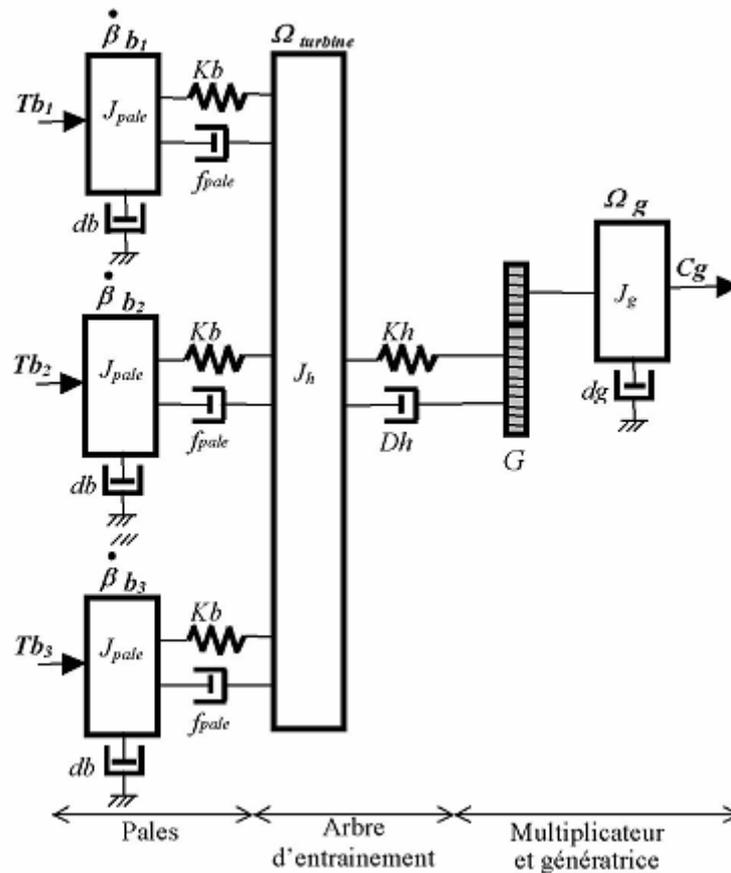


Figure 16: Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie  $J_{pale}$
- la même élasticité  $K_b$
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$

Ces pales sont orientables et possèdent un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Les vitesses d'orientations de chaque pale sont notées

$\dot{\beta} b_1, \dot{\beta} b_2, \dot{\beta} b_3$ .

Chaque pale reçoit une force  $Tb_1, Tb_2, Tb_3$  qui dépend de la vitesse du vent, qui lui est appliquée [21].

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie  $J_h$
- son élasticité  $K_h$
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $D_h$

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie

- un coefficient de frottement  $d_g$

Ce rotor transmet un couple ( $C_g$ ) entraînant la génératrice électrique qui tourne à une vitesse  $\Omega_{mec}$

Si on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, on aura une égalité des forces de poussées ( $Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$ ).

On peut simplifier l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. La conception aérodynamique des pales et leurs coefficients de frottement par rapport à l'air ( $d_b$ ) est très faible, donc on peut l'ignorer.

De même, la vitesse de la turbine est très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure (17)) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [22].

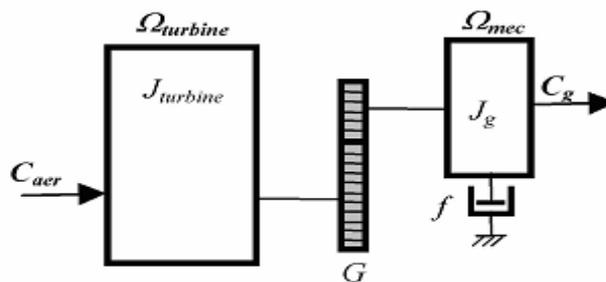


Figure 17: Modèle mécanique simplifiée de la turbine

### II.1.2. Modélisation de la turbine :

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (figure (18)).

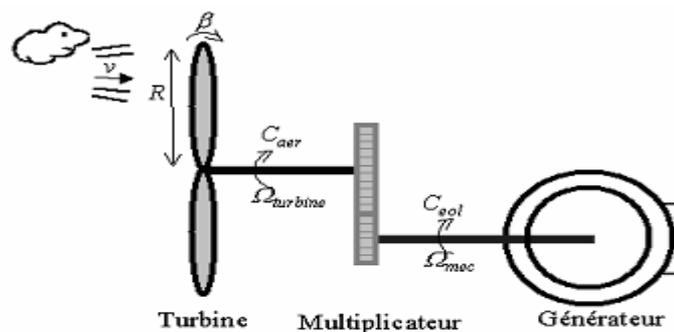


Figure 18: Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [23] :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}$$

Avec :

- $\rho$  : densité de l'air (approxim.  $1,22 \text{ kg} / \text{m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ )
- $S$  : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).
- $v$  : vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

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

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [23], [24].

La figure (19) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation des pales  $\beta$ .

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V}$$

$\Omega_{turbine}$  est la vitesse de la turbine.

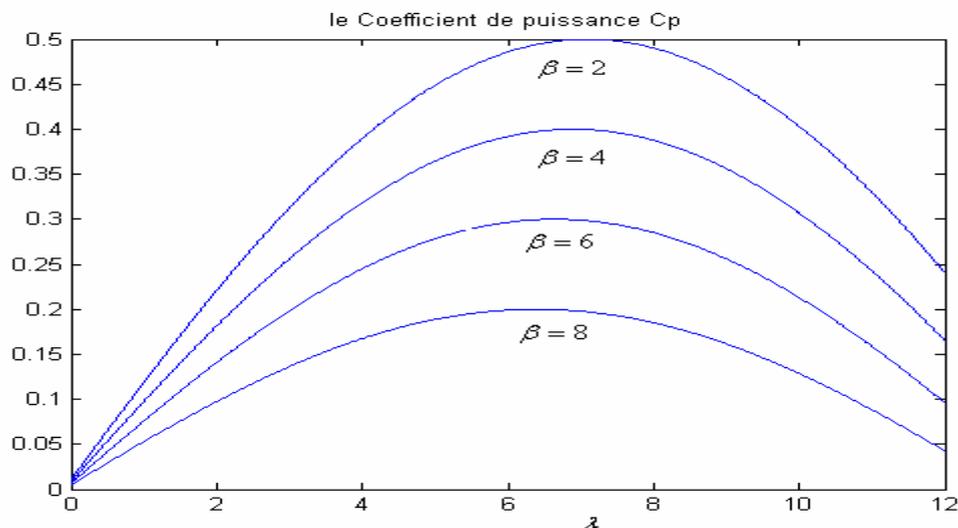


Figure 19: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

À partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW [25], l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [26] :

$$C_p = (05 - 0.167)(\beta - 2) \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 0.2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2)$$

$\beta$  : L'angle de l'orientation des pales.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}}$$

### II.1.3. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure (18)). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G}$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G}$$

### II.1.4. Équation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

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

Il est noté que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne « Vestas » de 2 MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [27].

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec}$$

Où  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique  $C_{mec}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$  et le couple issu du multiplicateur  $C_g$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis}$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec}$$

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine basé sur ces équations, est donné par la figure (20) suivante :

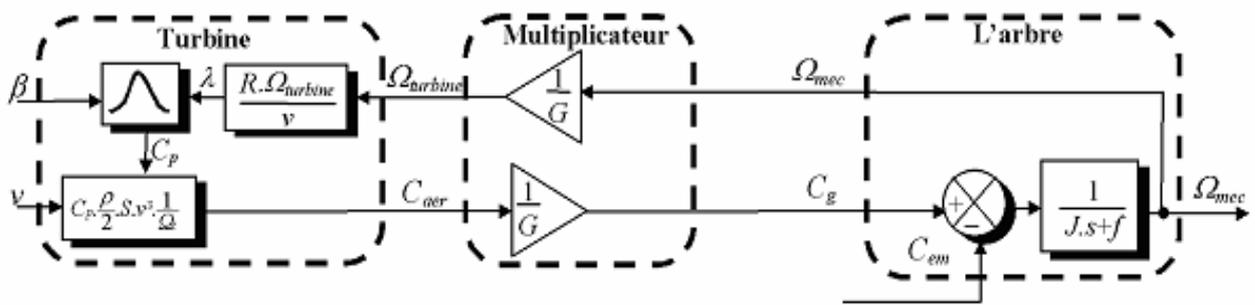


Figure 20: Schéma bloc du modèle de la turbine

L'entraînement d'une machine électrique par un système éolien constitue une chaîne de conversion complexe dans laquelle le couple mécanique présent sur l'arbre de transmission, dépend uniquement de la vitesse du vent et de l'éventuelle présence d'un dispositif d'orientation des pales. Le vent étant par nature imprévisible et présentant des variations importantes, le couple résultant présente des ondulations dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude de la génération d'électricité par éolienne.

Partant de ce constat, la machine à courant continu est destinée à reproduire le comportement d'une éolienne à vitesse variable [28].

Par cette corrélation on remplace dans notre étude le modèle de la turbine par le modèle de la MCC.

## II.2. Modélisation du dispositif :

### II.2.1 Modèle diphasé de la machine asynchrone :

De façon à représenter au mieux le comportement d'une machine asynchrone en simulation, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis mais suffisamment simple pour que les temps de calcul du simulateur ne soient pas prohibitifs. Le modèle diphasé de la machine asynchrone

présente un bon compromis entre ces contraintes. Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écurueil dans un repère triphasé s'écrivent :

$$\begin{aligned} [V_s]_3 &= R_s[I_s]_3 + \frac{d}{dt}[\psi_s]_3 \\ [V_r]_3 &= 0 = R_r[I_r]_3 + \frac{d}{dt}[\psi_r]_3 \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

Et  $[X_j]_3 = (X_a X_b X_c)^t X = V, I$  ou  $\psi$  et  $j = s$  ou  $r$

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

$l_s, l_r$  : Inductances propres statorique et rotorique

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

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

L'expression des flux est alors donnée par :

$$\begin{aligned} [\psi_s]_3 &= L_s[I_s]_3 + M[I_r]_3 \\ [\psi_r]_3 &= M[I_s]_3 + L_r[I_r]_3 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} L_s &= l_s - M_s \\ \text{Avec : } L_r &= l_r - M_r \\ M &= \frac{3}{2}M_{sr} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Où  $L_s, L_r$  et  $M$  représentent respectivement les inductances cycliques statorique, rotorique et magnétisante exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles

L'écriture du modèle de la machine asynchrone dans un repère diphasé tournant est obtenue en utilisant les transformations normées de Park et Concordia permettant la conservation de la puissance. Si l'on appelle  $\theta$  l'angle de rotation électrique entre l'axe d du repère diphasé et le repère fixe lié à la phase a du stator, nous avons alors :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = P(-\theta)T_{32}^t \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\text{Avec } P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\text{Et } T_{32} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

En appliquant ces transformations aux tensions ainsi qu'aux flux statoriques et rotoriques, nous obtenons le modèle électrique diphasé d'une machine asynchrone [29]:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \dot{\theta}_s \psi_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \dot{\theta}_s \psi_{ds} \quad (2.7)$$

$$V_{dr} = 0 = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} + \dot{\theta}_r \psi_{qr}$$

$$V_{qr} = 0 = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \dot{\theta}_r \psi_{dr}$$

$$\psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr}$$

$$\psi_{qs} = M_s I_{qs} + M I_{qr} \quad (2.8)$$

$$\psi_{dr} = L_s I_{dr} + M I_{ds}$$

$$\psi_{qr} = L_s I_{qr} + M I_{qs}$$

Avec :

$\theta_s, \theta_r$  : angles du champ tournant statorique et de position du rotor par rapport au stator  
L'équation mécanique est donnée par :

$$\Gamma_{em} = \Gamma_r + f \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.9)$$

Avec :

$\Gamma_{em}$  : Couple électromagnétique

$\Gamma_r$  : Couple résistant

$f$ : coefficient de frottements visqueux

$\Omega$  : Vitesse de rotation de la machine

J : Inertie de la machine

Le couple électromagnétique s'exprime en fonction des inductances cycliques, des flux et du nombre de pair de pôles p de la machine par la relation :

$$\Gamma_{em} = \frac{pM}{L_L - M} \psi_{dr} \psi_{qs} - \psi_{qr} \psi_{ds} \quad (2.10)$$

En combinant les équations (2.7), (2.8) et (2.9), nous obtenons le modèle d'état d'ordre cinq de la machine asynchrone dans un repère diphasé fixe  $\alpha\beta$  lié au stator:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -AR_s & 0 & CR_s & 0 \\ 0 & -AR_s & 0 & CR_s \\ CR_r & 0 & -BR_r & -p\Omega \\ 0 & CR_r & p\Omega & -BR_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} \frac{pM}{L_s L_r - M^2} (\psi_{ra} \psi_{s\beta} - \psi_{r\beta} \psi_{sa}) - \frac{\Gamma_r}{J} - \frac{f}{J} \Omega \quad (2.11)$$

Avec :

$$\begin{aligned} I_{sa} &= A\psi_{sa} - C\psi_{ra} \\ I_{s\beta} &= A\psi_{s\beta} - C\psi_{r\beta} \\ I_{ra} &= B\psi_{ra} - C\psi_{sa} \\ I_{r\beta} &= B\psi_{r\beta} - C\psi_{s\beta} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$A = \frac{1}{\sigma L_s} ; B = \frac{1}{\sigma L_r} ; C = \frac{1 - \sigma}{\sigma M} ; \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} : \text{coefficient de dispersion.}$$

Le modèle ainsi que ses différents entrées-sorties est représenté sur la Figure 21. Les entrées du système sont les trois tensions statoriques et le couple résistant (notons que dans le cas d'un fonctionnement en génératrice, celui-ci possède une valeur négative) et les sorties sont les trois courants statoriques ainsi que la vitesse de rotation.

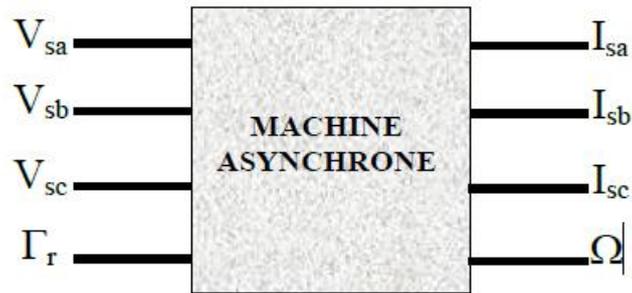


Figure 21: Entrées/sorties du modèle de la machine asynchrone

### II.3. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation des différents composants de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, puis on a présenté la structure de la machine asynchrone à cage et de son phénomène de saturation que nous avons choisi grâce à ces avantages pour être utilisée dans un système éolien.

Après la validation et la modélisation de ce modèle, il est possible maintenant d'élaborer et réaliser la commande de système. C'est le but du prochain chapitre.

## **Chapitre III :**

### **Commande mppt et simulation des systèmes de conversion d'énergie éolienne**

#### **Introduction :**

L'objectif principal de la commande des éoliennes à vitesse variable est d'assurer une bonne qualité de la puissance mécanique et électrique générée par la turbine et la génératrice et c'est à partir d'une source primaire variable qui est le vent, cet objectif est très important surtout avec le nouveau code de réseau universel pour l'énergie éolienne. Pour cette raison la commande des éoliennes dans les dernières décennies, fait l'objet de plusieurs travaux de recherche qui visent à améliorer les performances de ces éoliennes.

On se concentrera dans ce chapitre sur analyse et contrôle des différentes méthodes de commande de la turbine éolienne (commande mppt) à vitesse variable, trois techniques sont étudiées et comparées dans ce chapitre, ces techniques sont expérimentées par un test de robustesse pour choisir la méthode la plus robuste.

En fin les résultats de la simulation seront présentés pour valider les algorithmes de contrôle proposés.

#### **III.1. Optimisation de la puissance de la turbine :**

Pour l'optimisation de la puissance, il existe plusieurs techniques MPPT, à savoir :

Classique, perturbation et observation (P&O) et méthode de la logique floue.

##### **III.1.1 La méthode classique :**

MPPT classique consiste en une recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voilure éolienne à piloter (figure 32).

Dans l'objectif de vérifier la validité du modèle de la turbine en tenant compte d'un algorithme MPPT, nous simulons le fonctionnement de la turbine avec un profil de 7m/s.

Une commande en couple est appliquée pour garantir un fonctionnement à puissance maximale de l'éolienne. La figure (III.4) montre le schéma du bloc de simulation réalisé sous Matlab/Simulink, Ce schéma nous permet de visualiser les différentes caractéristiques de la turbine.

L'algorithme MPPT de la commande en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée, détermine le couple de référence [40]. on peut écrire :

$$T_{em-opt} = K_{opt} \Omega^2$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3}$$

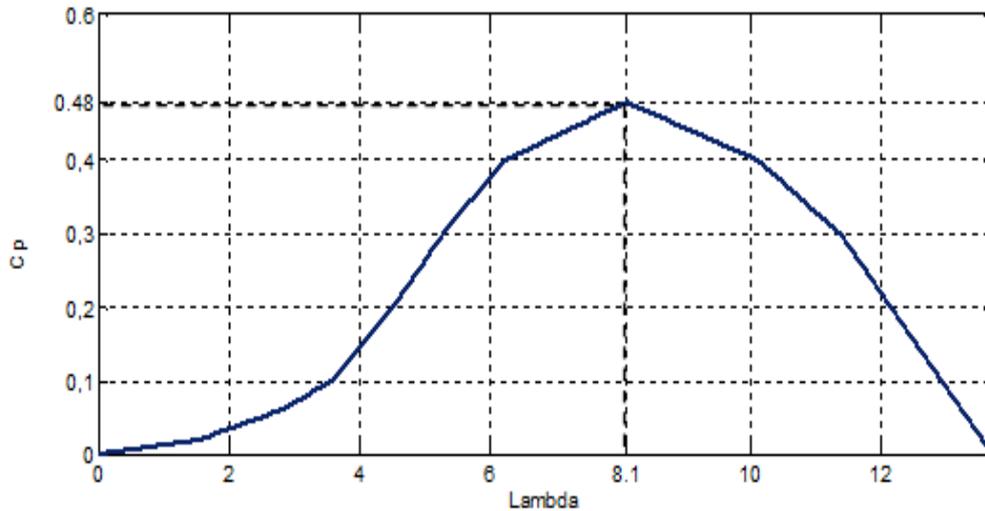


Figure 22: Caractéristique  $C_p(\lambda)$

### **III.1.2. commande par logique floue :**

#### **III.1.2.1. Principe de la logique floue :**

La commande floue a pour but de traiter des problèmes de commande de processus à partir uniquement de connaissances de comportement que les spécialistes du procédé doivent formuler sous forme linguistique (floue) [42].

#### **III.1.2.2. Élément de base de la logique floue :**

##### **III.1.2.2.1. Ensemble floue :**

La théorie des ensembles flous est une théorie mathématique dont l'objectif principal est la modélisation des notions vagues et incertaines du langage naturel. Elle évite les inadéquations de la théorie des ensembles classiques quant au traitement de ce genre de connaissances. La fonction d'appartenance d'un ensemble classique  $A$  est définie par [43] :

$$u_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle  $[0,1]$ .

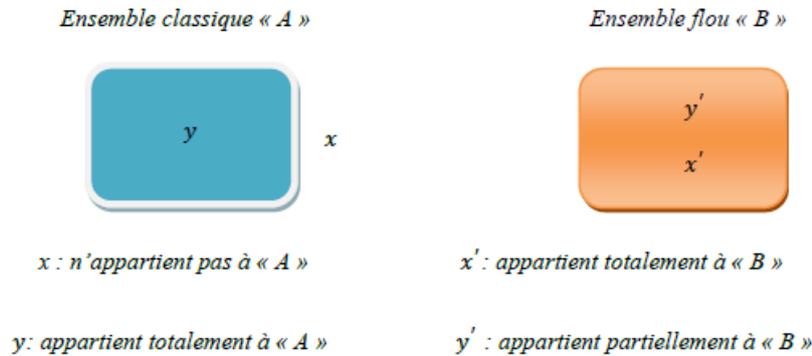


Figure 23: Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

Ce qui différencie les deux théories figure 33. Proviennent 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

#### **III.1.2.2.2. Univers du discours :**

Un des premiers pas dans la conception d'une application floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'univers de discours est l'ensemble de référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le contexte donné la notion d'univers de discours se conçoit aisément: reprenons le concept de température: l'utilisateur pourra décrire la variable "température" par un certain nombre de mots: par exemple "chaud", "froid", "tiède", ou "très chaud", "assez chaud", "tiède", "assez froid", "très froid". Pour chacun de ces prédicats, on pourra donner une fonction d'appartenance. L'univers de discours d'une variable couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable [43].

#### **III.1.2.2.3. Variables linguistiques :**

Le concept des variables linguistiques joue un rôle important dans le domaine de la logique floue. Une variable linguistique comme son nom le suggère, est une variable définie à base de mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet [44], La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues [44][45][46]. Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenance. Dans ce contexte, on attribue à chaque valeur de variable linguistique des fonctions d'appartenance, dont la valeur varie entre 0 et 1. Le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance des formes trapézoïdales ou triangulaires. Cependant parfois, on fait appel à d'autres formes telles que les formes de cloche et les formes obtenues à partir de fonctions trigonométriques [46].

#### **III.1.2.2.4. Fonctions d'appartenance :**

La variable  $x$  varie dans un domaine appelé univers de discours, ce dernier est partagé en sous-ensembles flous de façon que dans chaque zone il y ait une situation dominante. Ces zones sont décrites par des fonctions convexes, généralement sous forme triangulaire ou trapézoïdale, elles admettent comme argument la position de la variable  $x$  dans l'univers de discours, et comme sortie le degré d'appartenance de  $x$  à la situation décrite par la fonction; notée  $(\mu)$ : degré d'appartenance de  $x$  au sous ensemble  $E$ . Le choix de la répartition des fonctions, leurs chevauchements ainsi que leurs formes doit être judicieux comme indiqué dans .La figure (34) donne quelques fonctions d'appartenance [45].

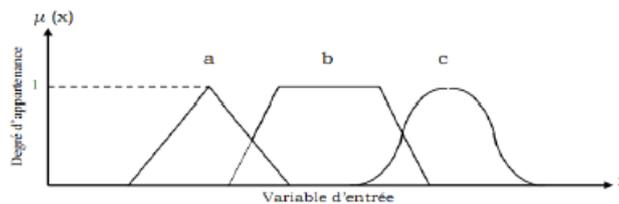


Figure 24: Exemple de fonctions d'appartenance

a. Fonction triangulaire b. Fonction trapézoïdale c. Fonction gaussienne.

#### **III.1.2.2.4.1. Différentes formes pour les fonctions d'appartenance :**

Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes .Il faut éviter les chevauchements et les lacunes entre les fonctions d'appartenance de deux ensembles. En effet, cela provoque des zones de non intervention du régulateur (zones mortes), ce qui conduit le plus souvent à une instabilité de réglage.

En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous représentés par des fonctions d'appartenance. Le choix du nombre d'ensembles dépend de la résolution et de l'intervention du réglage désirée [46].

#### **III.1.2.2.5. Propriétés des ensembles flous [47] [48] [49] :**

##### **III.1.2.2.5.1. Égalité :**

Deux ensembles flous  $A$  et  $B$  de  $u$  sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de  $u$ :

##### **III.1.2.2.5.2. Inclusion :**

Un ensemble flou A est inclus dans un ensemble flou B si toutes ses valeurs de fonction d'appartenance sont inférieures à celles de B sur tout le domaine  $u$ .

### III.1.2.2.5.3. Support :

Le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine  $u$  pour lesquelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle.

$$S(A) = \{u \in U / \mu_A(u) > 0\}$$

### III.1.2.2.5.4. Hauteur :

La hauteur d'un ensemble flou A est la valeur max de la fonction d'appartenance sur le domaine  $u$ . Elle est notée par :

$$h(A) = \max_{u \in U} \mu_A(u) = 1$$

### III.1.2.2.5.5. Noyau :

Le noyau d'un ensemble flou A est l'ensemble qui contient tous les éléments qui appartiennent sûr et certain à A (leurs degrés d'appartenance sont égaux à 1).

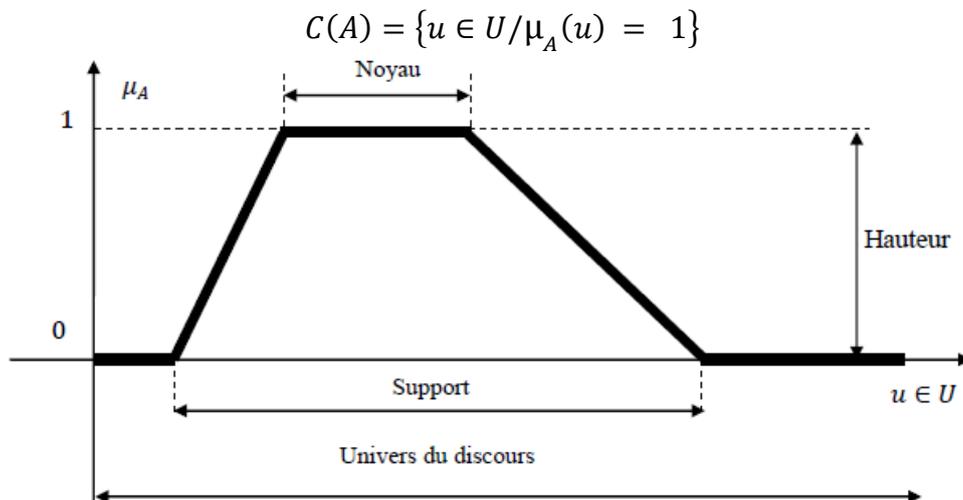


Figure 25: Support, hauteur et noyau d'un ensemble flou.

### III.1.2.3. Règle de commande par logique floue :

#### III.1.2.3.1. Configuration d'un contrôleur flou [44] :

Généralement le traitement d'un problème par la logique floue se fait en trois étapes :

- La quantification floue des entrées, appelée aussi la **Fuzzification**. Elle permet la conversion des variables des entrées qui sont des grandeurs physiques, en grandeurs floues, ou variables linguistiques ;

- L'établissement des règles liant les sorties aux entrées, appelé **l'Inférence floue** ;
- La **Défuzzification** qui est l'opération inverse de la fuzzification. Elle consiste à transformer les variables linguistiques en variables réelles ou numériques.

Le schéma bloc d'un contrôleur flou est illustré par la figure (36).

$R(t)$  : est le signal de référence.

$u(t)$  : est le signal de commande.

$y(t)$  : est la sortie du système à commander

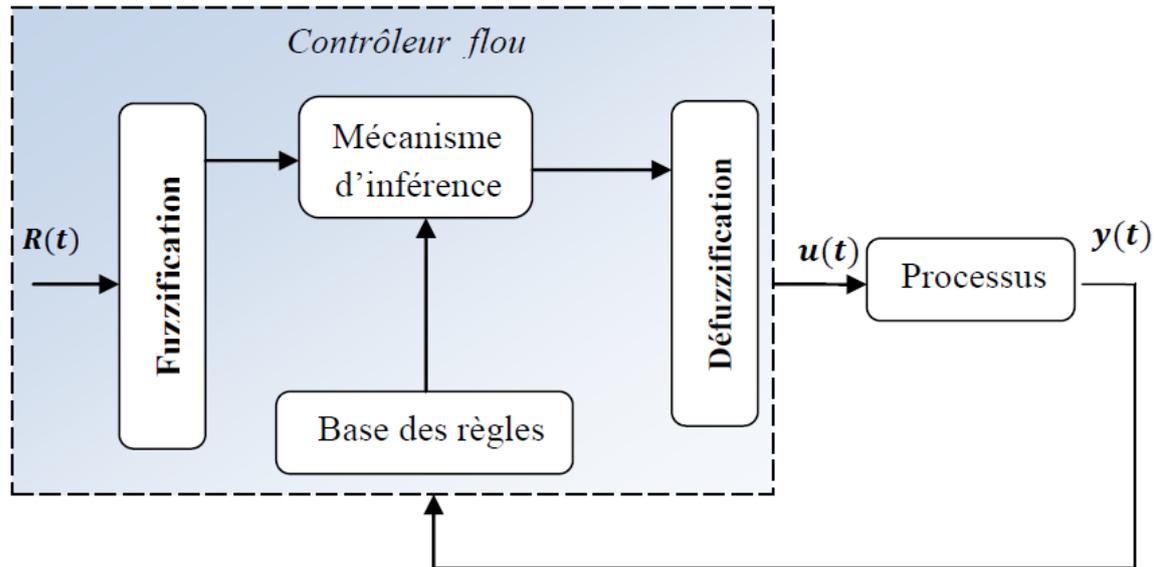


Figure 26: Schéma général d'un contrôleur flou.

### III.1.2.3.1.1. Fuzzification :

La fuzzification est l'opération qui consiste à affecter pour chaque entrée physique, un degré d'appartenance à chaque sous-ensemble flou. En d'autres termes c'est l'opération qui permet le passage du numérique (grandeurs physiques) au symbolique (variables floues) [45].

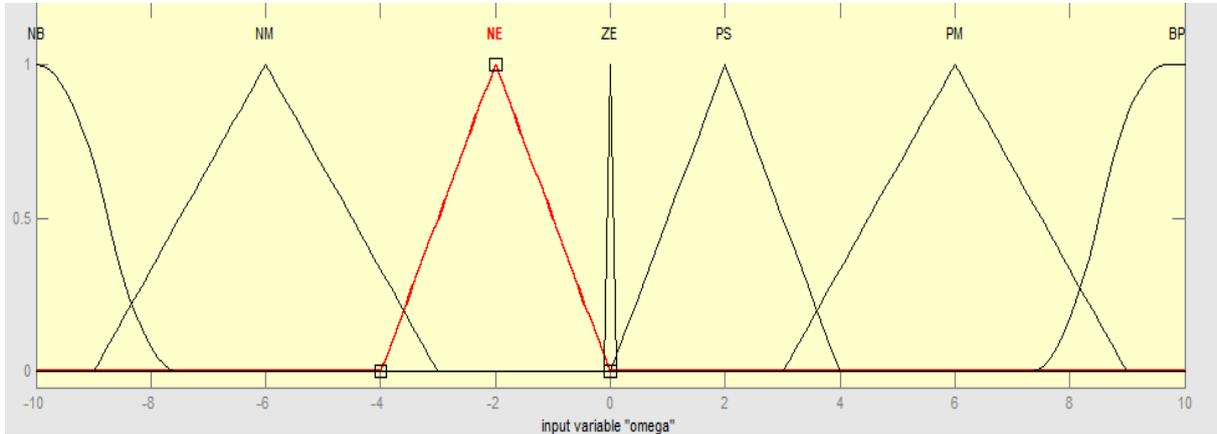
La définition des fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrée se fait après le passage des grandeurs physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques (grandeurs ou variables floues) qui peuvent être traitées par les inférences.

En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous représentés par des fonctions d'appartenance. Le choix du nombre d'ensembles dépend de la résolution et de l'intervention du réglage désirée [46].

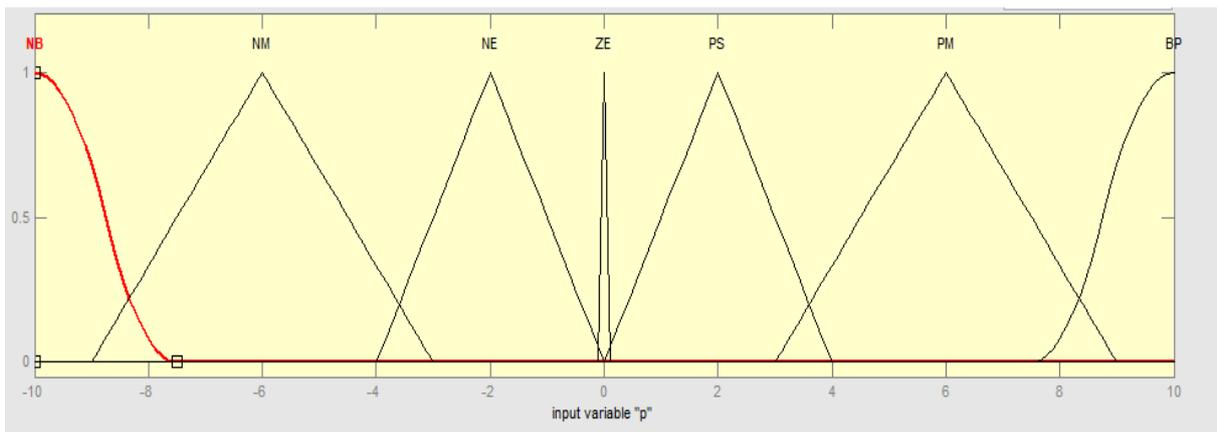
Dans notre étude, l'entrée floué «changer de puissance» et «changer de omega» est utilisé avec sept variables floues appelées PB (positif Grand), PM (moyen positif), NS(Petit négatif), PS(petit positif), ZE(zéro), NM(moyen négatif), NB (grand négatif)

Le changer de tension et le changer de puissance sont les variables d'entrée dans le système proposer et la sortie du contrôleur de logique floué est le changer du rapport cyclique .La

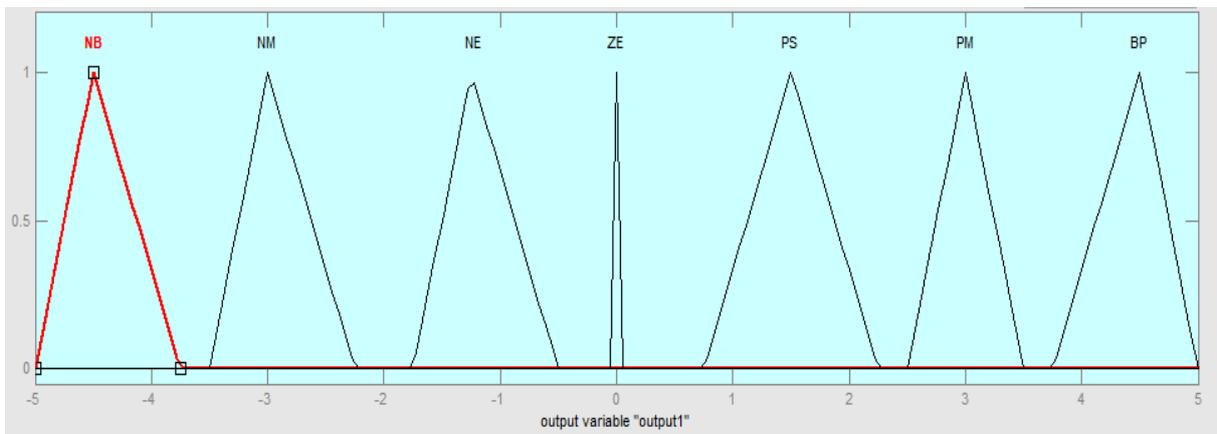
fonction d'appartenance de chaque variation variable de tension et de changer de puissance et de changer de rapport cyclique est représenté sur la figure [8-12]. Les limites de la fonction d'appartenance d'entrée et de sortie appliquée dans les systèmes sont par les condurances antérieurs du système concerné. Variation des paramètres.



*Figure 27: entrée du changement d'omega*



*Figure 28: entrée du changement de puissance*



*Figure 29: sortie du FLC comme changement de rapport cyclique*

### **III.1.2.3.1.2. Système d'inférence[50]**

L'algorithme de règles floues recueille un ensemble de règles de contrôle floues dans un ordre spécifique. Ces règles sont utilisées pour contrôler le système afin de répondre aux exigences de performances et elles sont développées à partir de la connaissance experte du système sous contrôle. L'inférence floue du FLC est basée sur la méthode de Mamdani qui est associée à la composition max-min.

Le système d'inférence dans un contrôleur à logique floue peut être subdivisé en trois parties :

1) Base de règles : - Il se compose d'un certain nombre de règles. Le bon fonctionnement du contrôleur. Le côté Si de la règle est appelé l'antécédent et le côté Alors est appelé la conséquence. Ces règles peuvent être conçues comme des réponses similaires médiocres par le processus des pensées humaines et le contrôleur utilise les variables d'entrée linguistiques, obtient après fuzzification et applique les règles.

2) Base de données : - Elle comprend toutes les fonctions d'appartenance définies par l'utilisateur qui doivent être utilisées dans les règles.

3) Mécanisme de raisonnement : - Il traite essentiellement les règles et les données et selon des règles particulières et une condition donnée nous fournit le résultat requis.

La base de règles définit les règles et la relation devant entrer les variables d'entrée et de sortie.

### **III.1.2.3.1.3. Défuzzification [47]**

Elle consiste à :

- Transformer les valeurs de la sortie comprises dans l'univers du discours en valeurs réelles comprises dans le domaine de variation.
  - Extraire de la sortie de vérité la valeur numérique de la sortie.
- On distingue trois méthodes différentes : celle de maximum, celle de la moyenne de maximum et celle du centre de gravité (ou centriode).

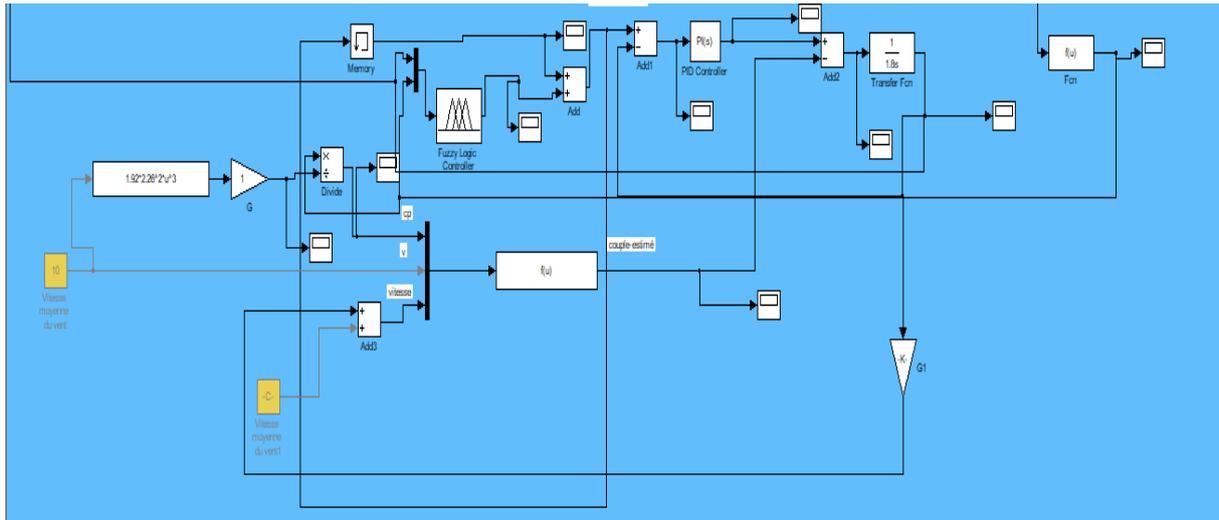


Figure 30: MATLAB / Simulink Modèle du contrôleur de logique floue

### III.2 : Simulation des algorithmes de Contrôle MPPT

Après ce long chemin pour atteindre une chaîne de conversion sous bloc au MATLAB/SIMULINK il suffit maintenant de faire une simulation de cette conversion avec ces données et de trouver les résultats avec leur interprétation.

#### III.2.1 Présentation globale de la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur la génératrice asynchrone à cage auto-excitée sous MATLAB:

Sur la figure (41), nous présentons le schéma bloc de simulation du système global :

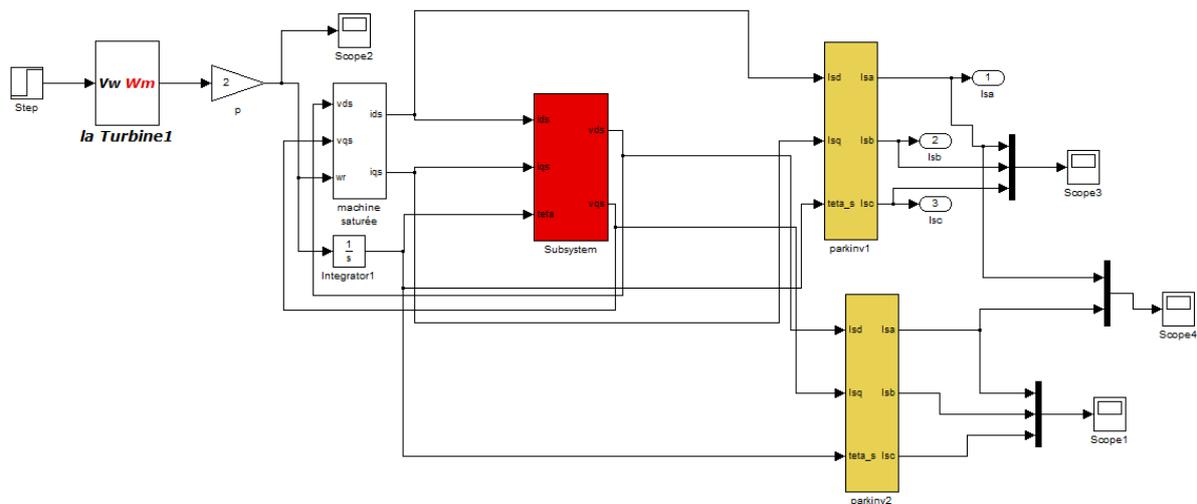


Figure 31: Schéma Matlab/Simulink du système éolien

Sur la figure (42), nous présentons le schéma bloc de simulation du système global de la turbine :

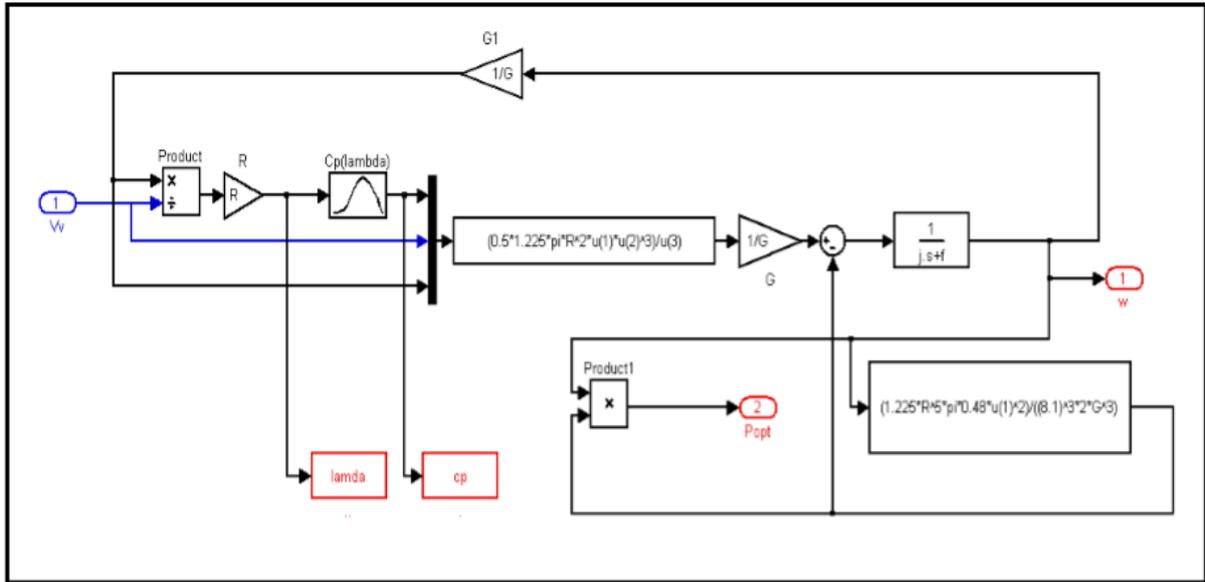


Figure 32: Schéma Matlab/Simulink du la turbine éolienne

### III.2 .2. Résultats de simulation :

Pour  $V_v=7\text{m/s}$

Nous avons simulé le système éolien pour une vitesse du vent de 7m/s

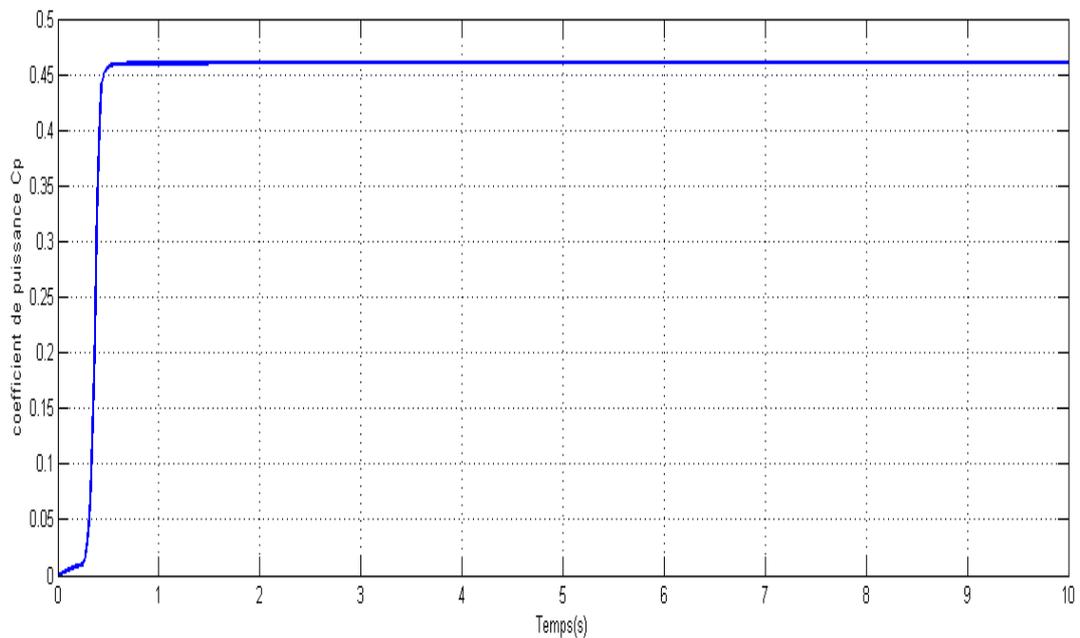


Figure 33: Allure du coefficient de puissance (Cp) pour la méthode MPPT classique en fonction de temps

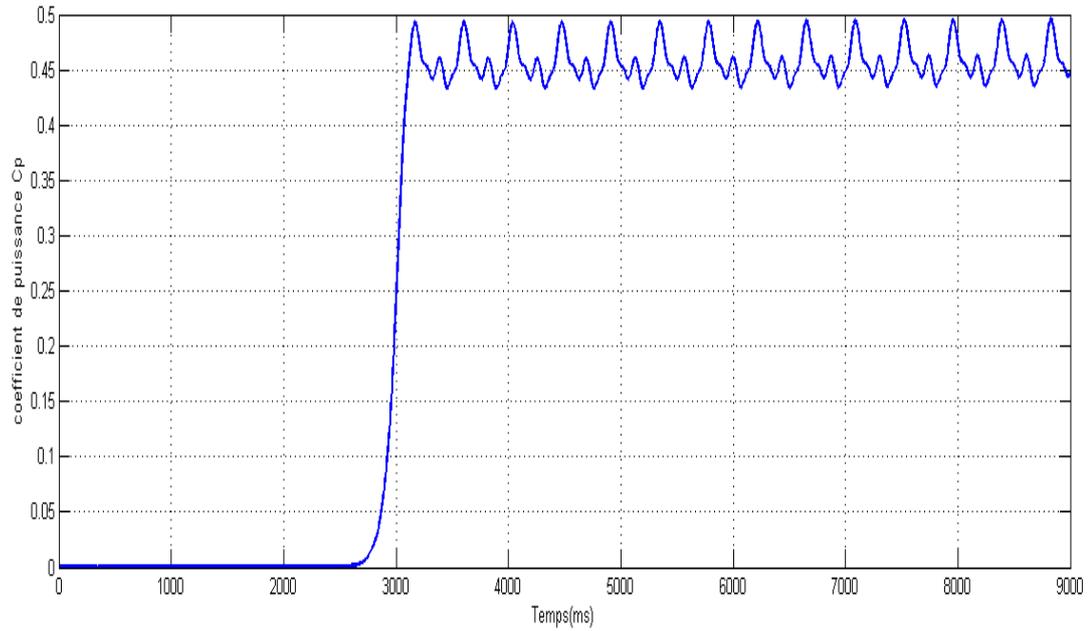


Figure 34: Allure du coefficient de puissance ( $C_p$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps

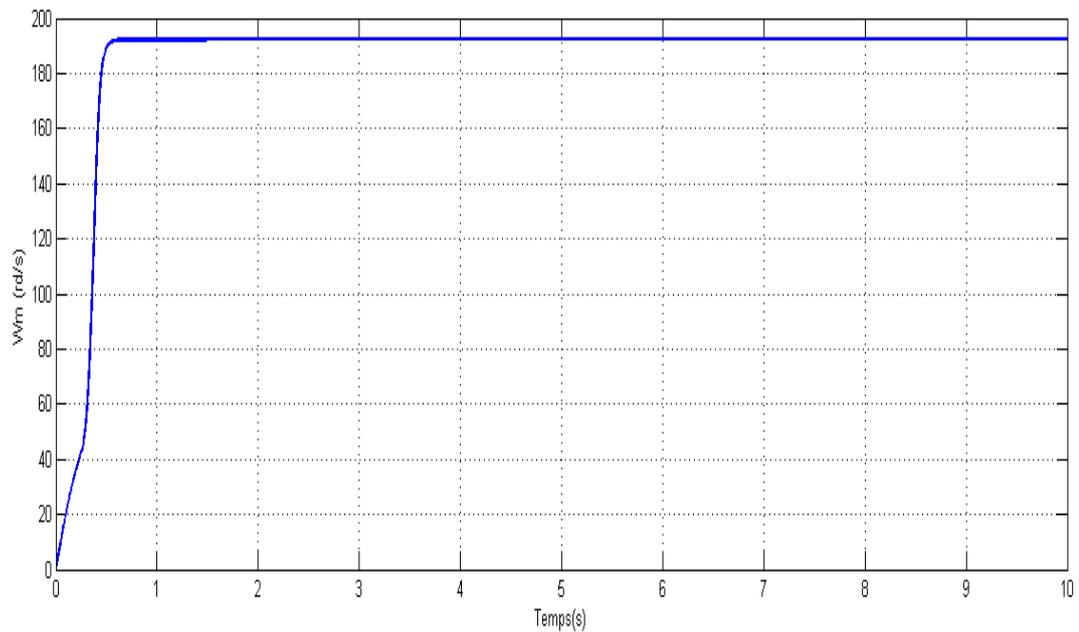


Figure 35: allure du la vitesse ( $W_m$ ) pour la methode MPPT classique en fonction de temps

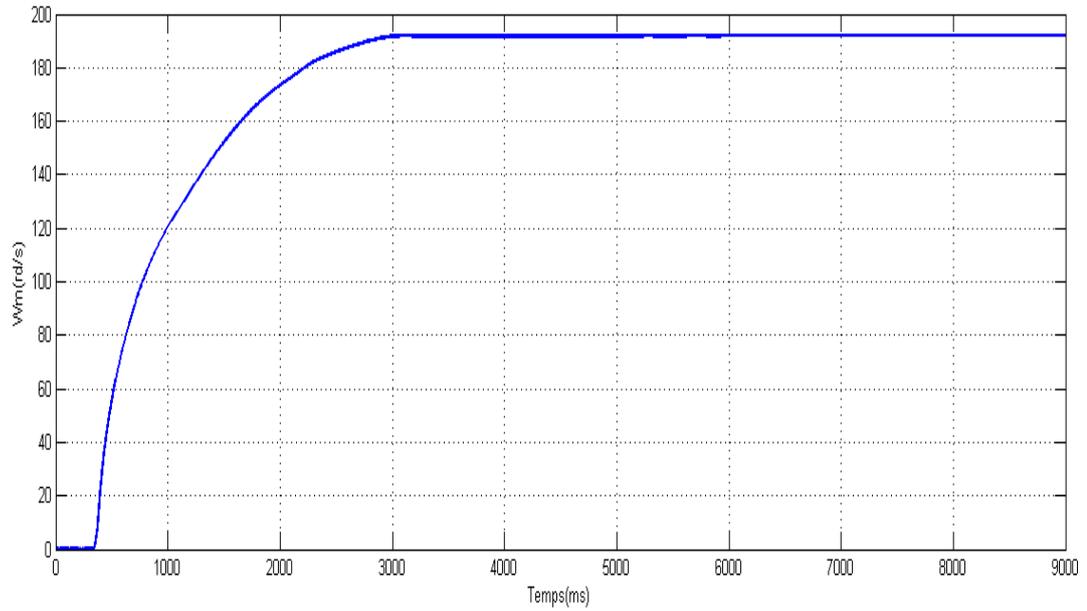


Figure 36: allure du la vitesse ( $W_m$ ) (méthode MPPT P&O logique floue) en fonction de temps

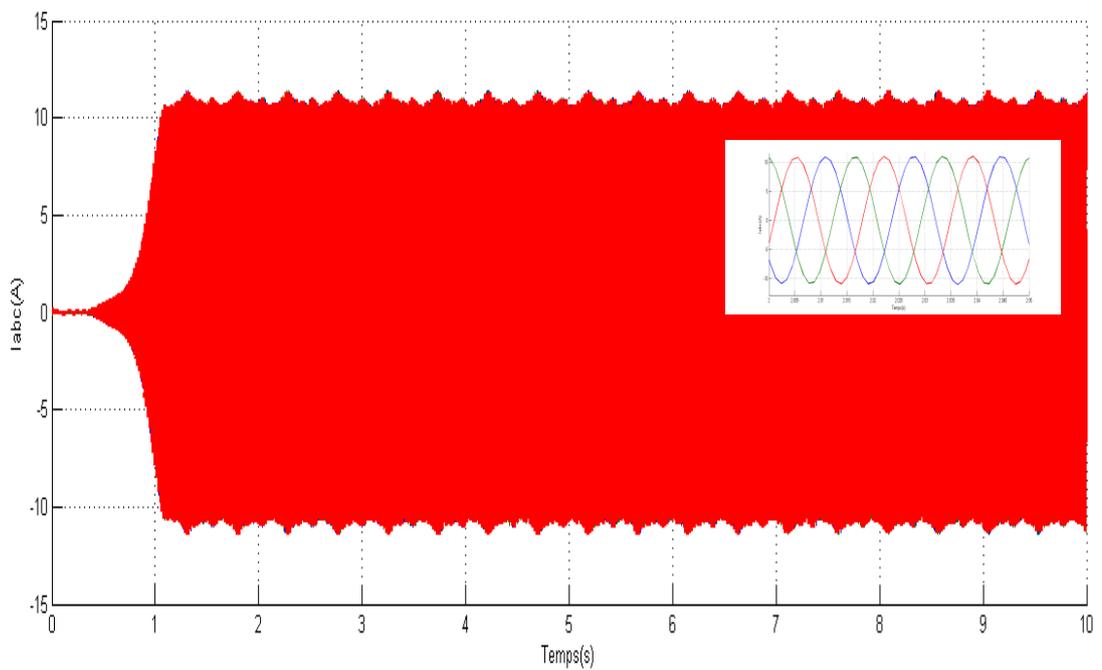
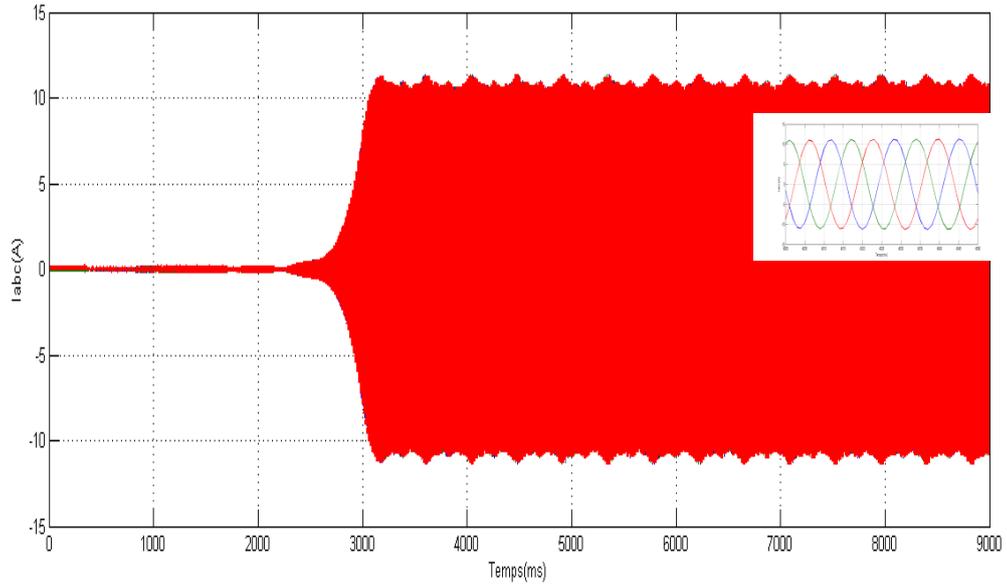
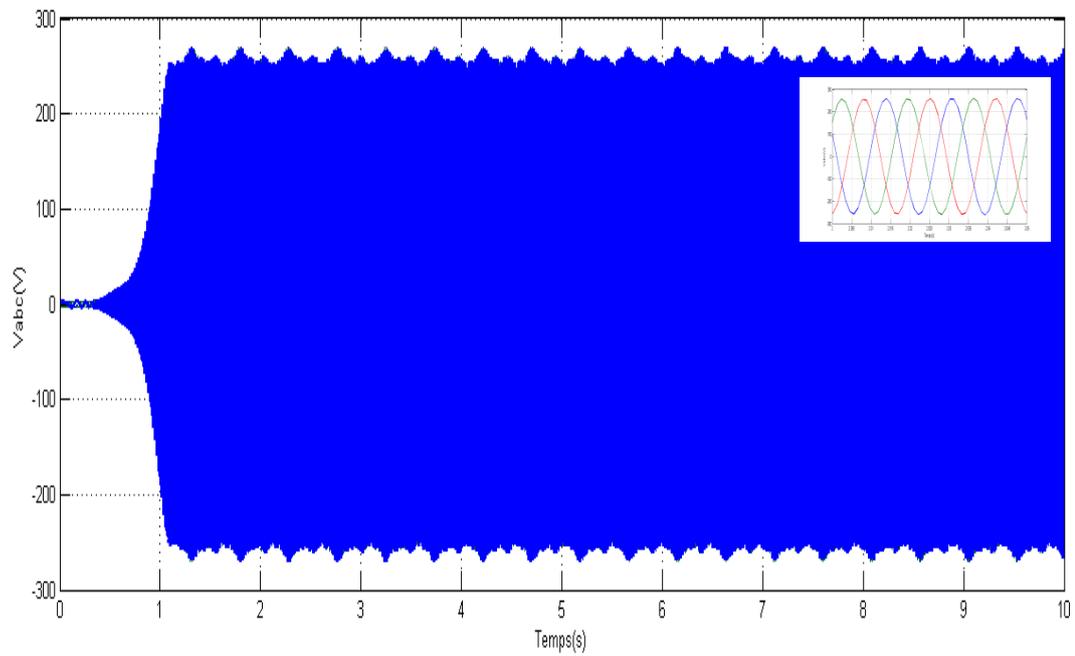


Figure 37: allure des courants  $I_{abc}$  (methode MPPT classique) en fonction de temps



*Figure 38: allure des courants  $I_{abc}$  (méthode MPPT P&O logique floue) en fonction de temps*



*Figure 39: allure des tensions  $V_{abc}$  (methode MPPT classique) en fonction de temps*

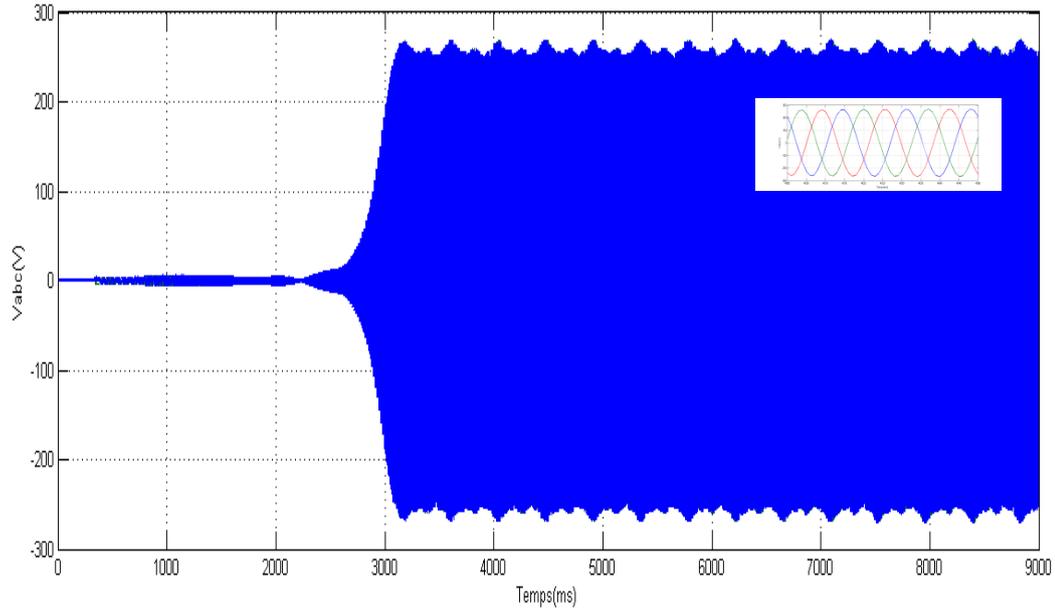


Figure 40: allure des tensions  $V_{abc}$  (methode MPPT P&O logique floue) en fonction de temps

### Interprétation :

D'après la figure (43) (44), (45) (46),(47) (48),(49) (50), on voit que :

Les valeurs de coefficient de puissance  $C_p$ , la vitesse ( $W_m$ ), des courants ( $I_{abc}$ ) et les tensions ( $V_{abc}$ ) pour les deux méthodes, méthode MPPT P&O floue et méthode MPPT classique sont les mêmes et elles se stabilisent à la valeur 0.46, 192 rd/s, 11A et 250V respectivement mais on remarque un temps de réponse plus grand dans la méthode P&O floue par rapport à la méthode MPPT classique et ça due à la recherche de la valeur de  $C_p$ , et des oscillations qui est l'inconvenant de la méthode P&O logique floue.

### Pour un échelant de 7m/sa 9m/s

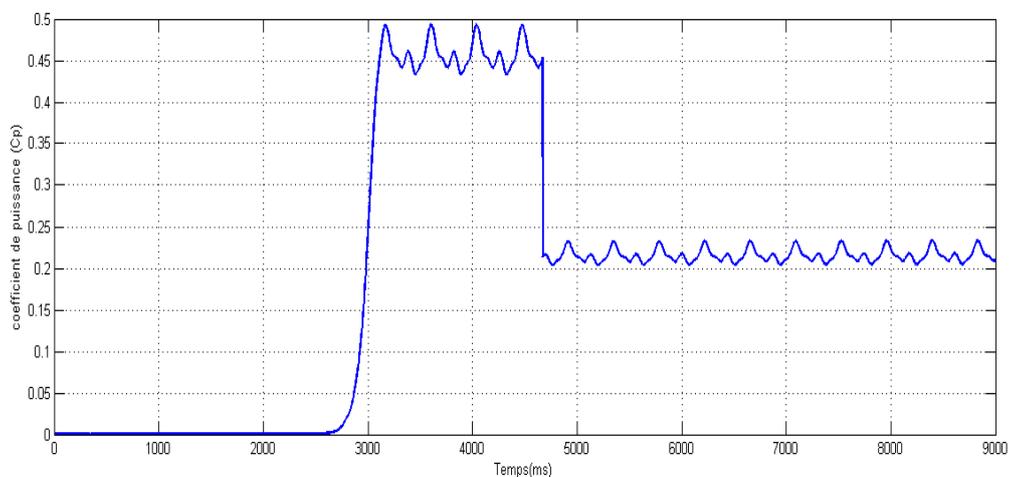


Figure 41: Allure du coefficient de puissance ( $C_p$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour un échelant de vitesse de 7m/s a 9m/s

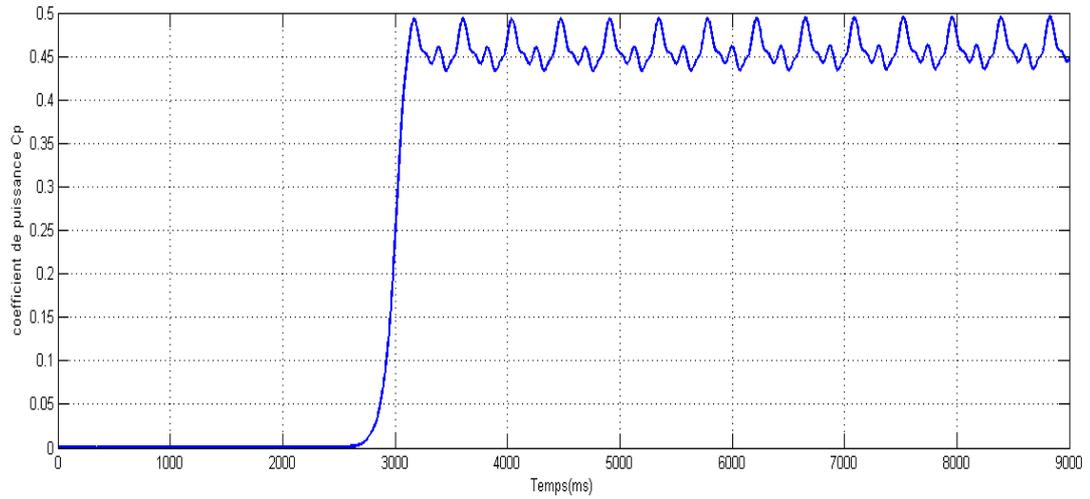


Figure 42: Allure du coefficient de puissance ( $C_p$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour une vitesse de 7m/s

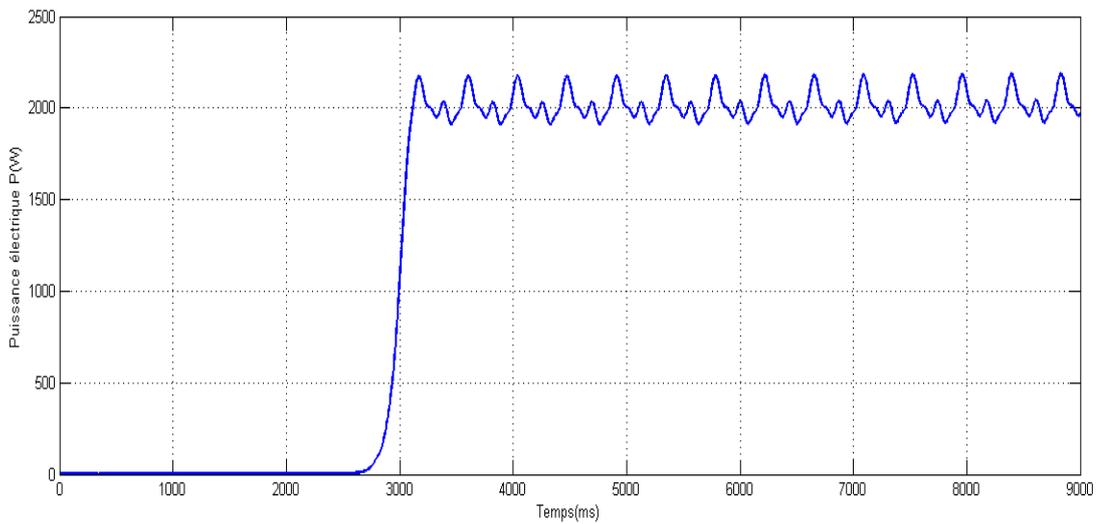


Figure 43 : Allure de la puissance électrique ( $P$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour un échelant de vitesse de 7m/s à 9m/s

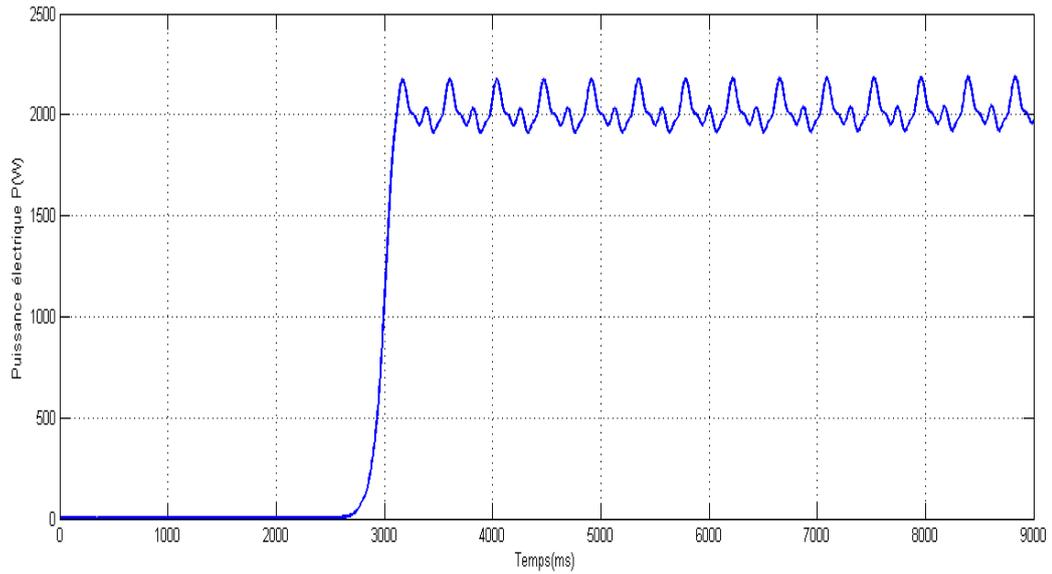


Figure 44: Allure de la puissance électrique ( $P$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour une vitesse de 7m/s

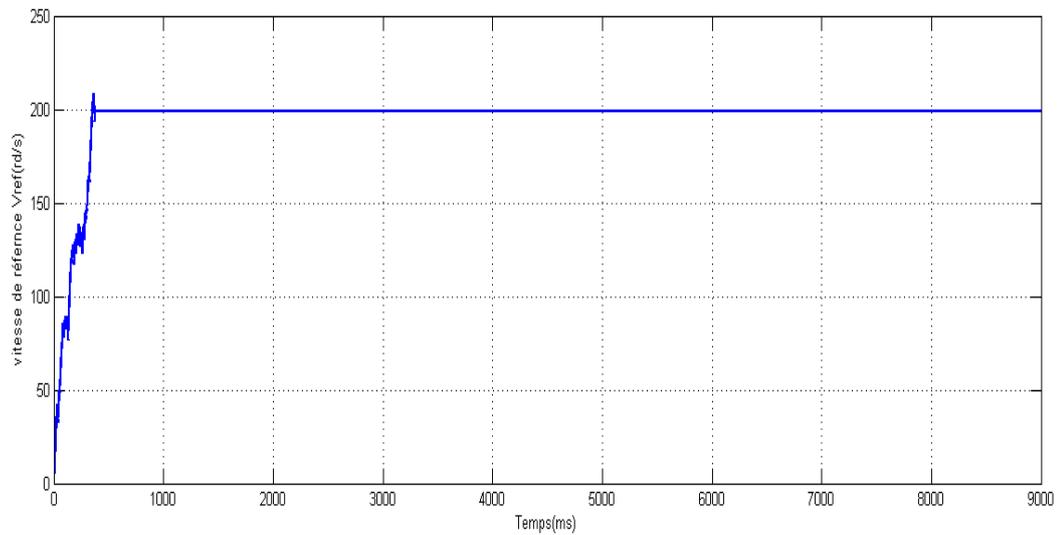
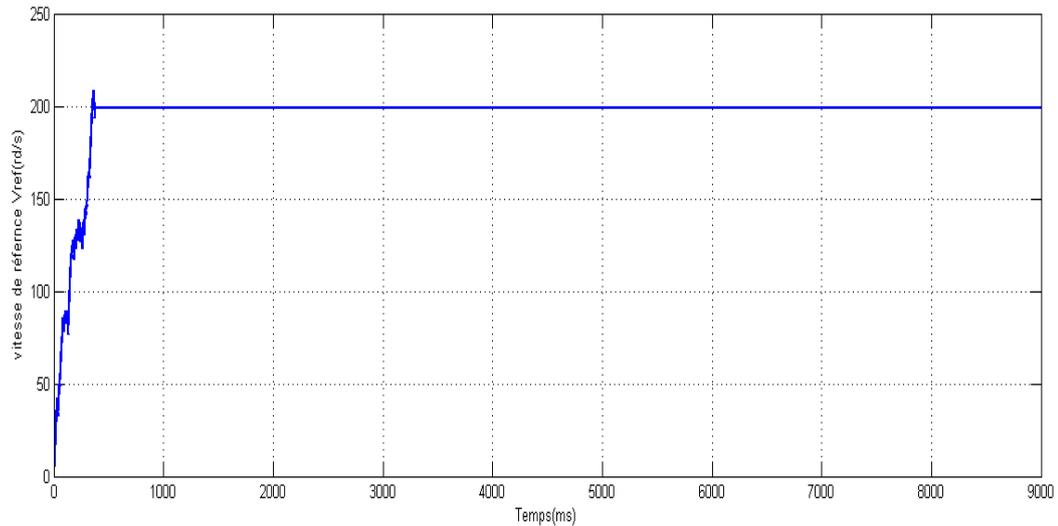


Figure 45: Allure de la vitesse de référence ( $V_{ref}$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour une vitesse de 7m/s



*Figure 46: Allure de la vitesse de référence ( $V_{ref}$ ) pour la méthode MPPT P&O logique floue en fonction de temps pour un échelant de vitesse de 7m/s à 9m/s*

### **Interprétation :**

D'après la figure (51) (52), (53) (54),(55) (56), on voit que :

La valeur de  $C_p$  change pour une vitesse de vent variable (échelant de vitesse 7m/s à 9m/s) et ça pour garder la valeur de vitesse de référence et la puissance maximale stable et constante

### **III.3. Conclusion**

Dans Nous avons appliqué deux techniques de commande MPPT à un système éolien. Le principe de chaque commande appliquée a été utilisé pour suivre la puissance maximale génère à partir d'une éolien a vitesse variable. La simulation réaliser dans ce chapitre sous Matlab Simulink nous a permis d'obtenir des résultats qui sont par la suite comparés, afin de mettre en évidence l'efficacité de chacune d'elle.

## Conclusion générale :

Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif d'identifier les meilleures stratégies de commande d'une turbine éolienne, qui permettront de répondre au mieux à des exigences spécifiques, où la turbine éolienne sollicite des algorithmes de commande sophistiqués pour un fonctionnement optimal, d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à cage suivant la modélisation complète de la conversion éolienne.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un état de l'art sur les différentes structures éoliennes (des différentes configurations électriques utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne) et proposant en conséquence des solutions aux nouvelles contraintes imposées aux générateurs éoliens. Ensuite, une étude aérodynamique de l'éolienne a été faite (les pales et leurs impacts sur le coefficient de puissance), Parmi les topologies identifiées, le choix a été porté sur une turbine éolienne basée sur un générateur asynchrone à cage saturée à vitesse variable

Dans le deuxième chapitre, une modélisation des différents composants d'une éolienne à vitesse variable a été accomplie, Cette modélisation permettant d'expliquer la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ensuite, une modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans les repères (naturel et Park) a été réalisée, en tenant compte du phénomène de la saturation (machine auto excite). Une modélisation originale nous a permis de d'étudier son comportement en régime équilibré et déséquilibré et de confronter les résultats à des validations expérimentales. Cette confrontation nous a permis de mettre l'accent sur l'importance de la saturation magnétique de la machine. En effet, le phénomène d'auto-excitation nécessite la prise en compte de cette saturation par une inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant. La précision de cette variation implique une méthode d'identification rigoureuse de la courbe de magnétisation. Des travaux sont en cours au laboratoire sur la prise en compte du phénomène de saturation dans la modélisation des machines asynchrones. L'intégration éventuelle d'un système de stockage de l'énergie paraît également intéressante dans le cas des dispositifs autonomes.

Dans le troisième chapitre les différentes méthodes de la commande mppt présentées ont été étudiées dans ce travail (où la maximisation de l'énergie extraite du vent est l'objectif principal). La puissance de sortie d'un système de conversion éolienne est maximisée si la turbine est entraînée à une vitesse de rotation optimale pour chaque vitesse de vent. Pour cela, nous avons abordé deux méthodes de commande : une première dédiée à la commande de la turbine avec la connaissance de la caractéristique (classique) et une seconde consacrée à la commande de la turbine par logique floue.

Dans ce contexte, une étude approfondie de ces deux algorithmes de contrôle MPPT a été détaillée pour déduire la méthode la plus adaptée, Ces techniques peuvent être classées en différentes catégories selon : le coût, la complexité, la mémoire, la robustesse et l'efficacité. Ensuite, une comparaison a été appliquée pour prouver notre choix.

En fin Les résultats obtenus de la simulation réalisée dans ce chapitre sous Matlab Simulink, et les performances résumés après la comparaison des deux méthodes montrent clairement la supériorité de la technique de contrôle MPPT basée sur logique floue (FLC).

## BIBLIOPGRAPHI

- [0] F.Kendouli, K.Nabti, K.Abed et H.Benalla« Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone a doublé alimentation » ; revue des énergies renouvelable vol.14 N°1 (2011) 109-120
- [0.1] F.Akel , "Etude et Realisation d'un Emulateur de Turbine Eolienne " , Mémoire demagister Ecole Nationale polytechnique, 2009.
- [1] F. POITIERS « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [2] P. Leconte, M. Rapin and E. Szechenyi, « Eoliennes », Techniques del'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. 1-21, 2009.
- [3] E. Hau, « Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics », Springer, Germany, 2006.
- [4] O. D. Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Annual Review of Fluid Mechanics, 15(1), pp. 77-96, 1983.
- [5] N.laverdure, I. Valero, S. Bacha, L.Gerbaud, ' Optimiation de l'interfaçage de puisance dans les systèmes éoliens', GEVIQ'2002, merseille, 2002
- [6] N. LAVERDURE, "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, France, 2005.
- [7] Y. Lang, B. Wu, et N. Zargari, Wind Power Technology: State of the art, IEEE Canadian Review, nO.56, pp. 10-17, Décembre 2007
- [8] V. Akhmatov, Induction Generators for Wind Power, Multi-Science Publishing Co. Ltd., 2005.
- [9] F. Blaabjerget Z. Chen, Power Electronicsfor Modern Wind Turbines, Morgan & Claypool, 2006.
- [10] S. Kelouwani et K. Agbossou, *Nonlinear model identification ofwind turbine with a neural network*, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 19, nO3, pp. 607-612,2004.
- [12] Betz, Wind Energy and its Use by Windmills. 1926
- [11] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007

[13] F. POITIERS « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.

[14] Naouel Hamdi « modélisation et commande des génératrices éoliennes »  
Thèse de magister en électrotechnique université Mentouri de Constantine (24 janvier 2001)

[15] : N. Abu-Tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : Modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de doctorat de l'école doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, 2008

[16] A.S. Belfedhal, "Modélisation et Commande d'une Chaîne Eolienne Avec Intégration du Stockage Inertiel ", Mémoire de Magister, École Militaire Polytechnique

[17] F. Merrahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ", Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007

[18] Haritzacamblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, soutenue le 18 /12/2003.

[19] A. DAVIGNY « Participations aux services systèmes de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » ; Mémoire de doctorat en génie électrique, Université de Lille 1, 2007.

[20] L. KHETTACHE « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2007.

[21] J. Wilkie, W .E. Leithead, C Anderson, « modelling of wind turbines by simple models wind engineering » vol 14, N° 4, 1990, pp 247-274.

[22] C. saget, « la variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne ». REE, n° 7, juillet 1998, pp. 42-48.

[23] L. Xu & W. Cheng “ Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme “, IEEE trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636-642, mai/juin 1995.

[24] R. Mukandpatel, « wind and solar power systems » CRC .press, 1999.

[25] Salama et Aïmani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL),

- [26] E.S Abdin ,w.xu « control design and dynamic performance analysis of a wind turbine – induction generator unit» IEEE Trans, on energy conversion, vol 15, N° 1, March 2000.
- [27] E, DE Vries, « wind turbines technology trends» vol6, N°4, jarnes et janes (sciencepublishers), renewableenergy world, July.august 2003.
- [28] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003,
- [29] J. Lesenne, F. Notelet, G. Segulier, " Introduction à l'électrotechnique approfondie", éditions Lavoisier, ISBN : 2-8520-6089-2.
- [30] J. Chatelain, "Machines électriques", Tome 1, Dunod, ISBN 2-04-015620-8, 1983.
- [31] F. Poitiers, M. Machmoum, M.E. Zaim and R. Le Doeuff, «Performances and Limits of an autonomous Self-Excited Induction Generator", Universities Power EngineeringConference, September 2001, CD-ROM proceedings.
- [32] F. Poitiers, "Performances et Limites d'une Génératrice Asynchrone Autonome Auto-Excitée. Application à l'Energie Eolienne.", Actes de JCGE'01, Nancy, 14 et 15 novembre2001, pp. 113-117.
- [33] S. Mekhtoub, T. Khaldi, M. Ivanes, "Amplitude des Courants et du Couple deReconnexion d'une Machine Asynchrone Auto-Amorcée", RIGE – 4/2001, Numélec' 2000, pp149-172.
- [34] A.H. Al-Bahrani, "Analysis of Self-Excited Induction Generators Under UnbalancedConditions", Electric Machines and Power Systems, 24, 1996, pp. 117-129.
- [35] G. Segulier, F. Notelet, "ElectrotechniqueIndustrielle", Editions Tec & Doc, ISBN : 2-85206-979-2.
- [36] L. Wang, R-Y Deng, "Transient Performance of an Isolated Induction Generator underUnbalanced Excitation Capacitors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, N° 4,December 1999, pp 887-893.
- [37] F. Poitiers, M. Machmoum, M.E. Zaim, and T. Branchet, " Transient Performances of a-Excited Induction Generator Under Unbalanced Conditions", International Conference on Electrical Machines, CD-ROM proceedings, Brugge, August 2002.
- [40] R. Kot, M. Rolak, M. Malinowski « Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine », Mathematics and Computers in Simulation 91 (2013) 29–40.
- [41] D. Rekioua, E. Matagne « Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control », Edition Springer, 2012.

- [42] "Application à la commande floue" Document d'Internet, Disponible à [auto.polytech.univ-tours.fr/.../Application\\_commande\\_floue.ppt](http://auto.polytech.univ-tours.fr/.../Application_commande_floue.ppt) - Pages similaires"
- [43] F .Boumaraf , " Commande Intelligente D'une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation ", Mémoire de Magister Université de Batna ,2009.
- [44] Y.Elbia ," Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté ", Mémoire de Magister en Génie Electrique Université de Batna, 2009.
- [45] A.Chaiba , "commande de la machine asynchrone a double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle", Mémoire de Magister Université de Batna 2010.
- [46] S.Hamdouche," Contribution a L'amélioration des Structures de Régulation des Courants des Machine a Courant Alternative ", Mémoire de Magister Université de Batna ,2007 .
- [47] A. Belhani, " Conception des Contrôleurs Flous Multi Variables ", Thèse de Doctorat Université Mentouri-Constantine, 2007.
- [48] " Introduction à la logique floue " Document d'Internet, Disponible à : [R.O.G.P.ogiqiad.org/upload/Cours%20Logique%20Floue.pdf](http://R.O.G.P.ogiqiad.org/upload/Cours%20Logique%20Floue.pdf).
- [49] Y.Bakakra , "Etude et Commande du Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA) Par Différente Technique Avancée " Mémoire de magister Université de Eloued, 2010.
- [50] Djaafar Toumi, « Comparaison de P&O et du contrôleur de logique floue dans MPPT pour Applications photovoltaïques (PV) à l'aide de MATLAB Simulink», Edition, February 23-26,2020