

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Électrotechnique

Spécialité : Commande électriques

Par : BOUDJELIDA Cherif

DERRADJ Ziyad

Sujet

**Commande MPPT pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne**

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M. Bouchama Ziyad	Pr	Univ-BBA	Président
Mme. Benabbas Sabrina	MCB	Univ-BBA	Examinateur
M. Khatir Abdelfatah	MCB	Univ-BBA	Encadrant

## Résumé

Ce mémoire aborde l'extraction maximale de puissance (MPPT) dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable. Après la modélisation du système, les stratégies MPPT conventionnelles sont présentées. Trois algorithmes MPPT sont conçus et comparés : la première étant le MPPT appelé TSR, ainsi que le P&O standard et la logique floue. Les simulations sous Matlab/Simulink ont montré que la commande floue offre des meilleures performances en termes de stabilité, adaptabilité et efficacité, surpassant les deux autres méthodes.

**Mots-clés** : *Système éolien, commande MPPT, TSR, P&O, logique floue.*

## ملخص

تتناول هذه الأطروحة توليد الطاقة القصوى (MPPT) في أنظمة تحويل طاقة الرياح متغيرة السرعة. باتباع نمذجة النظام، تم عرض استراتيجيات MPPT التقليدية. صُممت ثلاث خوارزميات MPPT وتمت مقارنتها ببعض: الأولى هي MPPT وتسمى TSR، بالإضافة إلى خوارزمية P&O القياسية والمنطق الضبابي. أظهرت عمليات المحاكاة باستخدام Matlab/Simulink أن التحكم الضبابي يُوفر أداءً أفضل من حيث الاستقرار والتكيف والكفاءة، متفوقاً على الطريقتين الأخرين.

**الكلمات المفتاحية** : *نظام رياح، تحكم MPPT، TSR، P&O، المنطق الضبابي.*

## Abstract

This thesis deals with maximum power extraction (MPPT) (MPPT) in variable-speed wind energy conversion systems. Following system modeling, conventional MPPT strategies are presented. Three MPPT algorithms were designed and compared: the first MPPT, called TSR, the standard P&O algorithm, and fuzzy logic. Simulations using Matlab/Simulink showed that fuzzy control offers better performance in terms of stability, adaptability, and efficiency, outperforming the other two methods.

**Keywords**: *Wind system, MPPT control, TSR, P&O, fuzzy logic.*

## **DÉDICACE**

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui ont sacrifié pour mon bonheur et ma réussite.

**À mon père**, l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Tu as été mon premier guide et ma plus grande inspiration.

Tes sacrifices, ton courage et ta sagesse ont éclairé mon chemin.

**À ma mère**, merci beaucoup pour tout ce que vous avez fait pour moi, vous êtes le soutien, le dos et la force dont je me vante partout.

À ma sœur bien-aimée, **Dr Bochra**, pour tes précieux conseils, ton encouragement constant et ta lumière qui ont guidé mes pas.

À mes frères, **Abderrahim** et **Abdachakour**, pour votre présence réconfortante et votre motivation sans faille.

À toute ma famille, pour votre affection et votre soutien tout au long de ce parcours.

À mes amis, pour les moments de partage, les rires et les encouragements qui ont rendu ce chemin plus léger.

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

***BOUDJELIDA Cherif***

## **DÉDICACE**

Je dédie ce travail à mes chers parents, véritables piliers de ma vie. Votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux, et votre confiance constante ont été la force qui m'a porté durant chaque étape de ce parcours. Vous êtes la source de mon courage, de ma patience et de ma détermination.

À mes frères et sœurs, compagnons de route et de cœur,  
Merci pour votre présence discrète mais précieuse, pour vos encouragements, vos sourires sincères et votre soutien indéfectible, même dans les moments où les mots manquaient.

À mes amis,  
Votre bienveillance, vos conseils, vos blagues au bon moment et votre capacité à me rappeler que chaque effort a un sens m'ont été d'un grand réconfort. Vous avez su me soutenir quand l'épuisement prenait le dessus et me rappeler de ne jamais baisser les bras.

Sans vous tous, ce travail n'aurait pas vu le jour.  
Ce mémoire est le reflet d'un effort personnel, mais il porte en lui la trace de chaque regard, de chaque mot, de chaque geste que vous m'avez offert.

Merci du fond du cœur.

*DERRADJ Ziyad*

## **REMERCIEMENTS**

*Je tiens avant tout à adresser mes remerciements les plus sincères et les plus profonds à **Monsieur Khatir Abd Elfatah**, mon honorable encadreur, pour son accompagnement exceptionnel tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Sa grande expertise, sa patience inébranlable, ses conseils éclairés et sa disponibilité constante ont été les piliers fondamentaux qui m'ont permis de mener à bien ce travail de recherche. Son engagement sans faille et sa rigueur scientifique ont grandement contribué à enrichir la qualité de ce mémoire.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude aux **distingués membres du jury** qui ont accepté de consacrer leur temps précieux à l'évaluation de ce travail. Leurs commentaires pertinents, leurs critiques constructives et leurs précieuses suggestions ont permis d'améliorer considérablement la qualité de cette recherche et d'élargir mes perspectives scientifiques.*

*Un remerciement tout particulier va à l'ensemble des enseignants du département d'**Électromécanique Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj** pour leurs enseignements de qualité et leur transmission de savoir qui ont constitué le socle de ma formation.*

*Je n'oublie pas non plus mes collègues et amis qui m'ont soutenu moralement et intellectuellement durant cette aventure académique, partageant avec moi les moments de doute comme les instants de réussite.*

*Enfin, une pensée spéciale à ma famille pour leur amour, leur encouragement constant et leurs sacrifices qui ont rendu possible l'aboutissement de ce travail et de tout mon parcours universitaire.*

<b>Symbole</b>	<b>Signification</b>	<b>Unité</b>
$\rho$	Masse volumique de l'air	kg/m <sup>3</sup>
<b>R</b>	Rayon du rotor	m
<b>A</b>	Surface balayée par les pales	m <sup>2</sup>
<b>V<sub>w</sub></b>	Vitesse du vent	m/s
$\lambda$	Tip Speed Ratio (rapport de vitesse)	–
$\beta$	Angle de calage des pales	°
<b>C<sub>p</sub></b>	Coefficient de puissance	–
<b>P<sub>m</sub></b>	Puissance mécanique	W
<b>P<sub>s</sub></b>	Puissance statorique	W
<b>P<sub>r</sub></b>	Puissance rotorique	W
$\omega_t$	Vitesse angulaire de la turbine	rad/s
$\omega_m$	Vitesse angulaire de la génératrice	rad/s
<b>N<sub>g/G</sub></b>	Rapport de transmission (ou réduction)	–
<b>s</b>	Glissement	–
<b>C</b>	Couple électromagnétique	Nm
<b>V<sub>v</sub>(t)</b>	Vitesse instantanée du vent	m/s
$\sigma$	Écart-type de la turbulence du vent	m/s
$\tau$	Constante de temps (filtre ARMA)	s
$\xi(t)$	Bruit blanc gaussien (modèle ARMA)	–
<b>a, b, c</b>	Paramètres autorégressifs (modèle ARMA)	–
<b>d, e</b>	Paramètres de moyenne mobile (modèle ARMA)	–

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<b>TSR</b>	Tip Speed Ratio (algorithme basé sur $\lambda$ )
<b>P&amp;O</b>	Perturbation & Observation
<b>FLC</b>	Fuzzy Logic Controller (commande par logique floue)
<b>MF</b>	Membership Function (fonction d'appartenance)
<b>MPP</b>	Maximum Power Point
<b>WECS</b>	Wind Energy Conversion System (système de conversion éolienne)
<b>MADA / DFIG</b>	Machine Asynchrone à Double Alimentation / Doubly Fed Induction Generator
<b>OT</b>	Optimal Torque (couple optimal)
<b>NN</b>	Neural Network (réseaux de neurones)
<b>ARMA</b>	AutoRegressive Moving Average (modèle de vent)

**Chapitre 1 : Etat de l'art des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne**

Figure (I.1) : Photographie de deux moulins à vent	4
Figure (I.2) : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne	4
Figure (I.3) : Capacité et ajouts d'énergie éolienne des 10 premiers pays, 2015	5
Figure (I.4) : Carte du gisement éolien en Algérie (CDER)	6
Figure (I.5) : Eolienne à axe vertical	8
Figure (I.6) : Eolienne à axe horizontal	9
Figure (I.7) : Types d'éoliennes à axe horizontal	9
Figure (I.8) : Composants d'une éolienne à axe horizontal	10
Figure (I.9) : Constitution d'une nacelle	11
Figure (I.10) : Eolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone	14
Figure (I.11) : Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone	15
Figure (I.12) : Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone	16
Figure (I.13) : Eolienne à vitesse variable utilisant une MADA	16

**Chapitre II :**

Figure (II.1) : Configuration générale d'un système d'énergie renouvelable raccordé au réseau	18
Figure (II.2) : Caractéristique de la puissance de WTS sous les valeurs optimales ( $\lambda_{opt}$ , $C_p$ -opt)	19
Figure (II.3) : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.	20
Figure (II.4) : Ligne de puissance optimale et points 'MPP' pour diverses vitesses de vent.	21
Figure (II.5) : Principe de la MPPT dans le plan ( $\Omega$ -P).	22
Figure (II.6) : Classification des algorithmes MPPT pour les WECS.	23
Figure (II.7) : Algorithme MPPT basé sur la logique floue.	25
Figure (II.8) : Algorithme OT MPPT.	25
Figure (II.9) : Algorithme TSR MPPT.	26

**Chapitre III :**

Figure (III.1) : Régime de vitesse du vent.	30
Figure (III.2) : Caractéristique de la puissance de WTS sous les valeurs optimales ( $\lambda_{opt}$ , $C_p$ -opt).	31
Figure (III.3) : Schéma fonctionnel de l'algorithme MPPT basé sur TSR.	31
Figure (III.4) : Schéma bloc de la simulation de la commande MPPT_TSR d'une éolienne.	32

## *Liste des figures*

---

Figure (III.5) : Résultats du système éolien basées sur la commande (TSR).	33
Figure (III.6) : Organigramme de la méthode P&O conventionnelle.	34
Figure (III.7) : Schéma bloc de la simulation de la commande MPPT_P&O d'une éolienne.	35
Figure (III.8) : Résultats du système éolien basées sur la commande (P&O).	36
Figure (III.9) : Entrées et sorties MF généralement utilisées dans les applications de contrôle.	38
Figure (III.10) : Surface des règles d'inférence.	39
Figure (III.11) : Schéma bloc de simulation de la commande MPPT_FLC d'un système de conversion l'énergie éolienne.	39
Figure (III.12) : Résultats du système éolien basées sur FLC.	40
Figure (III.13) : Comparaison des résultats des commandes TSR, P&O et FLC sur système de conversion l'énergie éolienne.	44

## Sommaire

---

Résumé	
Dédicace	
Remercîment	
Nomenclature	
Liste des figures	
Sommaire	
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : <i>Etat de l'art des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne</i></b>	
I.1 Introduction	3
I.2 L'énergie éolienne	3
I.2.1 Historique de L'énergie éolienne	3
I.2.2 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne	4
I.2.3 Potentiel éolien en Algérie	5
I.2.4 Classification des Éoliennes:	7
I.2.4.1 Éoliennes à axe vertical	7
I.2.4.2 Éoliennes à axe horizontal	8
I.2.5 Composants d'une éolienne à axe horizontal	10
I.2.5.1 La tour	10
I.2.5.2 Le rotor	11
I.2.5.3 Les pales	11
I.2.5.4 Le moyeu	11
I.2.5.5 La nacelle	11
I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	12
I.3.1 Avantages de l'énergie éolienne	12
I.3.2 Inconvénients de l'énergie éolienne	13
I.4 Configurations des chaînes de conversion éolienne	13
I.4.1 Eolienne à vitesse fixe	14
I.4.2 Eolienne à vitesse variable	14
I.4.2.1 Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone (GS)	15
I.4.2.2 Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage	16
I.4.2.3 Eolienne à vitesse variable utilisant une MAD	16
I.5 Conclusion	16

### **Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne et techniques de commande MPPT**

II.1	Introduction	18
II.2	Modélisation de l'éolienne	18
II.2.1	Modèle d'éolienne	18
II.3	Technique d'extraction du maximum de puissance	20
II.3.1	Recherche du point de puissance maximale « MPPT »	21
II.3.2	Algorithmes MPPT pour les systèmes de conversion de l'énergie éolienne	22
II.3.2.1	Algorithme de perturbation et observation « P&O »	24
II.3.2.2	Algorithme MPPT basé sur la logique floue « FLC »	24
II.3.2.3	Algorithme OT MPPT	25
II.3.2.4	Algorithme TSR MPPT	25
II.3.2.5	Algorithme NN MPPT basé sur les réseaux de neurones	26
II.4	Conclusion	27

### **Chapitre III : Commande par MPPT d'un Système de Conversion d'Energie Eolienne**

III.1	Introduction	28
III.2	Modèle de vitesse du vent	28
III.3	Algorithme TSR MPPT	30
III.3.1.	Simulation de la commande	31
III.3.2	Résultats de la simulation par la commande TSR	32
III.4	Commande par algorithme Perturbation et Observation (P&O)	33
III.4.1.	Simulation de la commande P&O	35
III.4.2	Résultats de la simulation et discussion	35
III.5	Commande Logique Floue – FLC	37
III.5.1	Simulation de la commande	39
III.5.2	Résultats de la simulation et discussion	39
III.6	Comparaison des Méthodes de Commande d'une Turbine Éolienne : Régulation par TSR, Algorithme P&O et Logique Floue.	41
III.6.1	Discussion	44
III.7	Validation des Performances des Algorithmes MPPT par Simulation	45
III.8	Conclusion	46
	Conclusion Générale	48

*Introduction  
générale*

---

## Introduction Générale

Ces dernières années, l'intérêt pour les énergies renouvelables s'est accru, face à une préoccupation croissante des citoyens pour surmonter les problèmes associés aux combustibles fossiles tels que le coût élevé, l'épuisement rapide et l'effet de serre.

Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne, cette force silencieuse et pourtant puissante, repose sur des principes physiques relativement simples pour être transformée en électricité. La sophistication réside dans l'ingénierie et la conception des éoliennes, ainsi que dans leur adaptation à divers environnements.

Le développement de la technologie éolienne lui a permis de devenir une alternative aux sources traditionnelles. L'énergie éolienne est transmise par le vent, indirectement produit par l'énergie solaire, qui crée du vent en créant des différences de température entre les régions chaudes et froides.

Un aérogénérateur (communément appelée éolienne) est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'électricité. Le vent est une ressource propre et inépuisable, capable de produire de l'électricité pratiquement sans émettre de gaz polluants [1].

Pour faire face à la nature stochastique du vent, il est essentiel de capter la puissance maximale par le système de conversion d'énergie éolienne (**WECS** Wind Energy Conversion System).

Dans ce contexte général, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels [2] :

- la nature motivante de cette énergie,
- le développement de l'industrie des éoliennes,
- l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables.

Néanmoins, plusieurs problèmes rencontrés liés, d'une part, à la complexité des systèmes de conversion éolienne telle que la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice et, d'une autre part, l'instabilité de la vitesse du vent [3].

Le but de notre travail est de concevoir un modèle pour la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, et différentes stratégies permettant de contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance mécanique générée.

Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T), nous proposons ici d'utiliser trois commandes MPPT basés sur trois techniques différentes : Tip speed ratio TSR, Perturbations et Observation P&O et finalement la logique floue FLC.

Nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

---

Le premier chapitre présente un aperçu sur l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, on montre l'importance et l'évolution dans le temps de la production éolienne mondiale. Dans ce cadre, la technologie éolienne est alors abordée et développée, quelques exemples, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, d'architectures de chaînes de conversion d'énergie sont donnés en association avec différents types de génératrices.

Le deuxième chapitre présente la modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne et les techniques d'extraction du maximum de puissance (MPPT) couramment utilisées. Trois zones de fonctionnement sont définies en fonction de la vitesse du vent, avec un focus sur la Zone 2 où l'angle de calage des pales reste constant.

Plusieurs algorithmes MPPT sont comparés (P&O, FLC, OT, TSR, NN), mettant en évidence leurs avantages et limites en termes d'efficacité, complexité et adaptabilité aux conditions variables.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une comparaison entre trois stratégies de commande ( TSR, P&O, FLC ) appliquées à une turbine éolienne pour l'extraction maximale de puissance, les résultats serviront de base aux simulations sous Matlab/Simulink, et on terminera ce travail par une conclusion générale.

# *Chapitre I :*

*Etat de l'art des  
Systèmes de Conversion  
d'Energie Eolienne*

## I.1 Introduction :

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles ; l'énergie éolienne est véhiculée par les vents. Ce phénomène est indirectement dû à l'énergie solaire, qui provoque des vents à travers les différences de température entre les régions chaudes et froides. Un aérogénérateur (couramment appelé éolienne) est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants [1].

Dans ce chapitre, nous aborderons divers aspects liés à la structure générale d'un système de conversion d'énergie éolienne, aux différents types d'éoliennes et à leur fonctionnement. Ce chapitre passera également en revue le programme algérien de développement des énergies renouvelables.

## I.2 L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour produire de l'électricité. C'est l'une des sources d'énergie propre qui connaît la croissance la plus rapide dans le monde, jouant un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale.

### I.2.1 Historique de L'énergie éolienne :

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moudre du grain (**Figure (I.1)**). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « Poul La Cour » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisé (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes.



Figure (I.1): Photographie de deux moulins à vent [4].

### I.2.2 Capacité mondiale installée de l'énergie éolienne :

La première application pour la génération de l'électricité de source éolienne a eu lieu en 1890 dans une zone rurale aux Etats Unis. Jusqu'au 1990 la production moyenne d'une éolienne était de 300 KW [5], actuellement on retrouve diverses machines permettant une production allant de 1KWh voire moins pour les applications domestique et en sites isolés, et jusqu'à 10 MW pour la production de masse dans les fermes éoliennes. Le record de puissance est actuellement atteint avec la turbine ST10 de 10 MW récemment réalisé par SWAY TURBINE. [6]

L'énergie éolienne a été la première source de nouvelle capacité de production électrique en Chine et aux États-Unis en 2015, et la deuxième en Europe. L'augmentation mondiale de la capacité éolienne de 63 GW constitue un record, le montant total étant d'environ 433 GW voir la figure (I.2). La Chine occupant la première place.

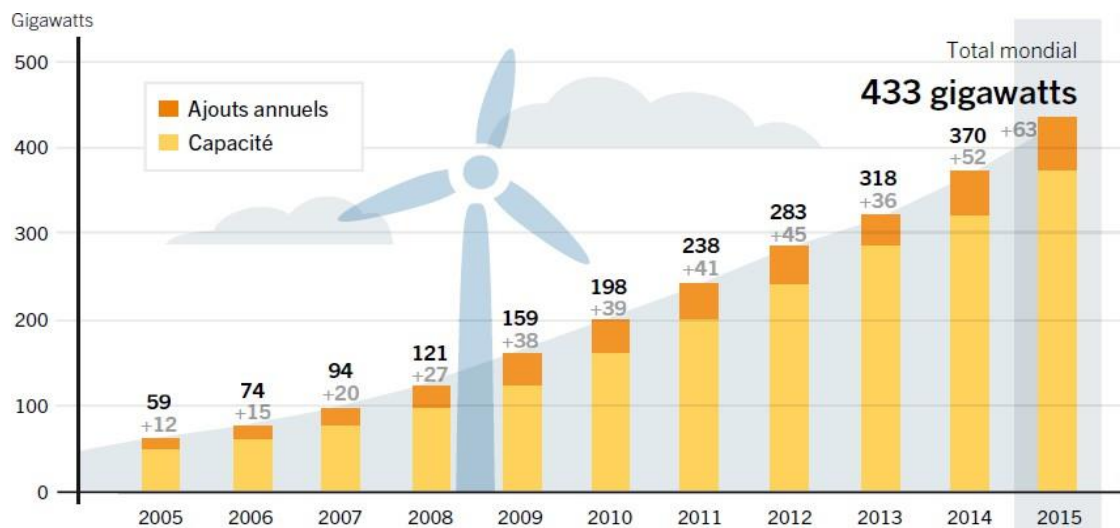


Figure (I.2) : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2005-2015 [7].

La Figure (I.3) montre la répartition de cette capacité installée dans le monde. La Chine devance le classement mondial avec une capacité énergétique de source éolienne de 30.8 GW,

suivi des Etats Unis de l'Amérique avec 8.6 GW de puissance installée.

En troisième et quatrième place on trouve respectivement l'Allemagne et l'Inde avec 5.7 GW et 2.6 GW de puissance installée [8].

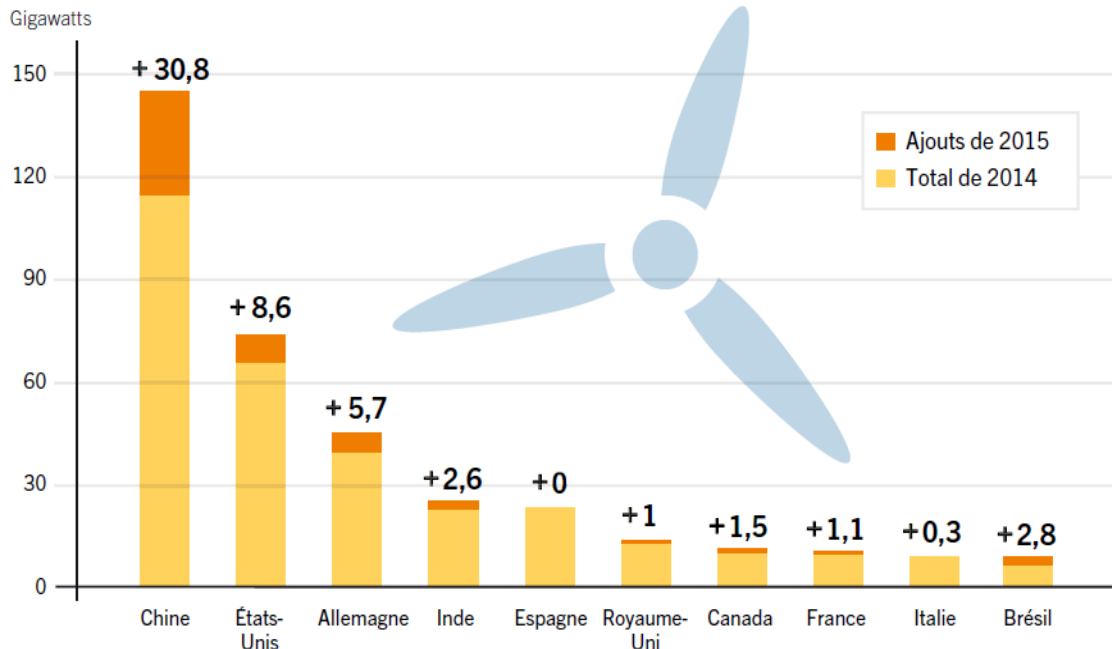


Figure (I.3) : Capacité et ajouts d'énergie éolienne des 10 premiers pays, 2015 [7].

### I.2.3 Potentiel éolien en Algérie :

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie [9].

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Electricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [10].

Des nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été

consacrés à la recherche et au développement des éoliennes.

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performantes et, de plus en plus grandes. Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 KW avec un diamètre de 15 m en 1989 est aujourd'hui de 7.5 MW, avec un diamètre de 127 m environ (ENERCON). La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 135 mètres.

La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6 GW en 1996, est passée à 215 GW en juin 2011 [11].

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance sera implantée à Adrar. Cette ferme devrait être fonctionnelle en 2012. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Energies Renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme [12], pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030 [13]. Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales.

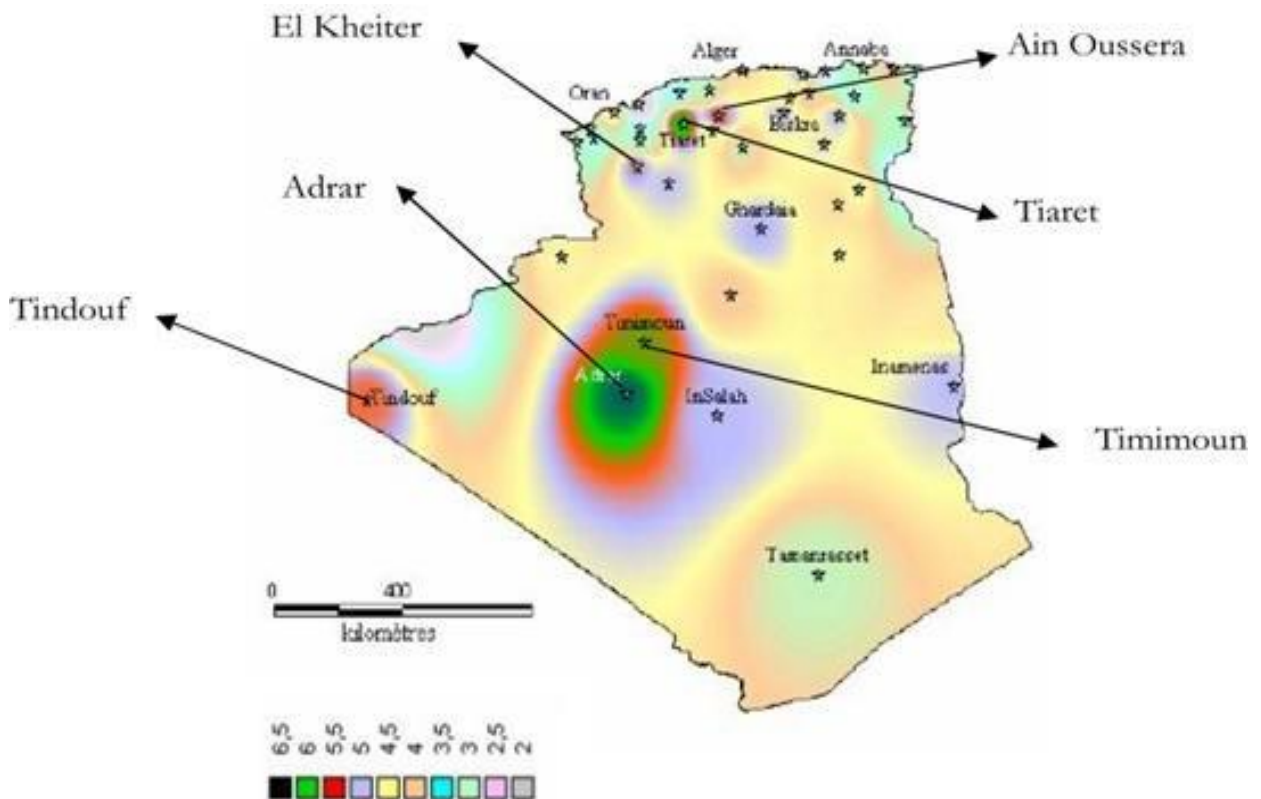


Figure (I.4) : Carte du gisement éolien en Algérie (CDER) [9].

### I.2.4 Classification des Éoliennes:

Les éoliennes peuvent être classées selon plusieurs critères :

#### A. Selon l'emplacement :

- Éoliennes *Onshore* (terrestres) : Installées sur la terre ferme. C'est le type le plus répandu historiquement.
- Éoliennes *Offshore* (en mer) : Installées en mer. On distingue deux sous-catégories :
  - Posées (*Fixed-bottom*) : Les éoliennes sont fixées directement au fond marin par des fondations (monopieux, jackets, gravitaires). Utilisées pour des profondeurs d'eau allant jusqu'à environ 60 mètres.
  - Flottantes (*Floating*) : Les éoliennes sont montées sur des plateformes flottantes qui sont ancrées au fond marin. Cette technologie permet d'installer des éoliennes dans des eaux beaucoup plus profondes (plus de 60 mètres), ouvrant ainsi l'accès à de vastes zones maritimes avec des vents très favorables. C'est une technologie en plein développement.

**B. Selon la taille et la puissance :** La classification est indicative et les frontières peuvent varier, mais elle permet de distinguer les usages :

**Tab1.1** Classification des éoliennes selon leurs puissance

Type	Diamètre	Puissance	Utilisation
Micro-éolienne	< 2 m	< 1 kW	Particuliers, bateaux,
Petite éolienne	2 m – 12 m	1 kW - 50 kW	Fermes, sites isolés
Éolienne industrielle	12 m – 125 m	50 kW - 3 MW	Parcs éoliens terrestres
Éolienne géantes	>125 m	3 MW - 15 MW+	Grands parcs en mer

**C. Selon l'orientation de l'axe de rotation :** C'est la classification la plus fondamentale :

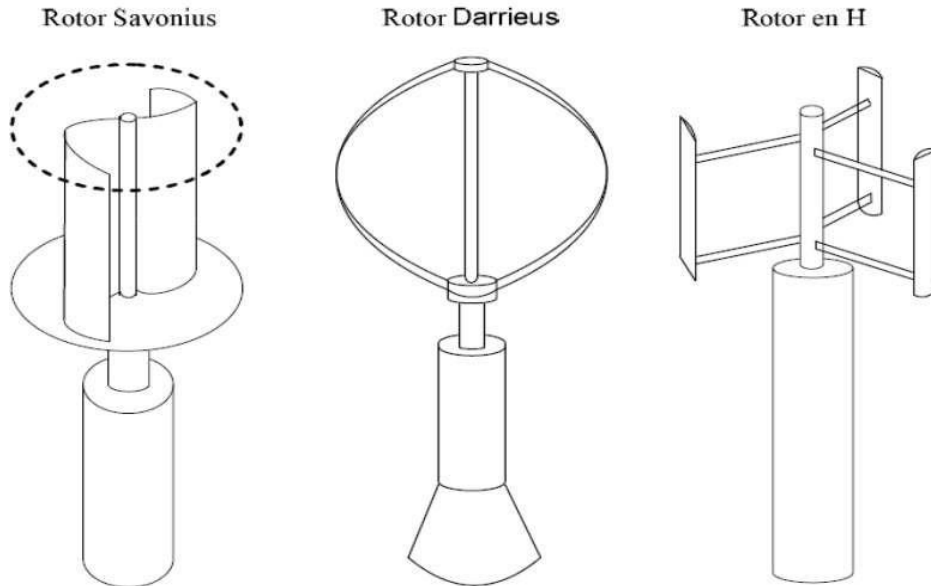
Il existe deux types fondamentaux d'éoliennes, selon la géométrie de l'arbre sur lequel est fixée l'hélice [17]:

- Les éoliennes à axe horizontal (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbine).
- Les éoliennes à axe vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbine).

#### I.2.4.1 Éoliennes à axe vertical :

Les recherches sur ce type d'éolien sont nombreuses, car il présente l'avantage de ne pas

nécessiter de système d'orientation des pales et sa chaîne de conversion (multiplicateur mécanique et générateur) se trouve au niveau du sol, ce qui facilite les interventions de maintenance. Trois structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, à savoir : le rotor Savonius, le rotor Darrieus et le rotor en H (ou rotor de Musgrove), Figure I.5, [18], [19].



**Figure (I.5) :** Eolienne à axe vertical

En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être tirées pour démarrer et le mât, fréquemment très lourd, est soumis à de fortes contraintes mécaniques, en plus le rendement de ces éoliennes est plus faible par rapport à celui des aérogénérateurs à axe horizontal.

Ces inconvénients ont contraint les fabricants à abandonner cette technologie pour les parcs éoliens terrestres (onshore) de moyenne et grande puissance. Cependant, elle est utilisée pour la très faible puissance et les éoliennes offshore flottantes de grande puissance, [20], [21].

#### **I.2.4.2 Éoliennes à axe horizontal :**

Les éoliennes à axe horizontal sont beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales et une nacelle regroupant toute la chaîne de conversion.

Le gros avantage de cette structure est son rendement aérodynamique plus élevé que celui de l'éolien à axe vertical. En plus, elle peut démarrer de façon autonome et présente un faible encombrement au niveau du sol. Les différentes constructions des aérogénérateurs à axe horizontal utilisent des voilures à deux pales, trois pales (les plus courantes, Figure I.6) ou multi-pales [22], [23], [24].



Figure (I.6) : Eolienne à axe horizontal,

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal, Figure I.7 [23]:

- *Amont (Upwind)* : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif, (gouvernail pour les très petites puissances et système actif pour les grandes puissances).
- *Aval (Downwind)* : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Bien que le rotor de cette structure soit auto-orientable, la disposition en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs rendements et une bonne stabilité pour les fortes puissances. En effet, pour la position aval, le vent passe par la nacelle et le pylône avant d'attaquer les pales ce qui provoque une perturbation du vent, [23].

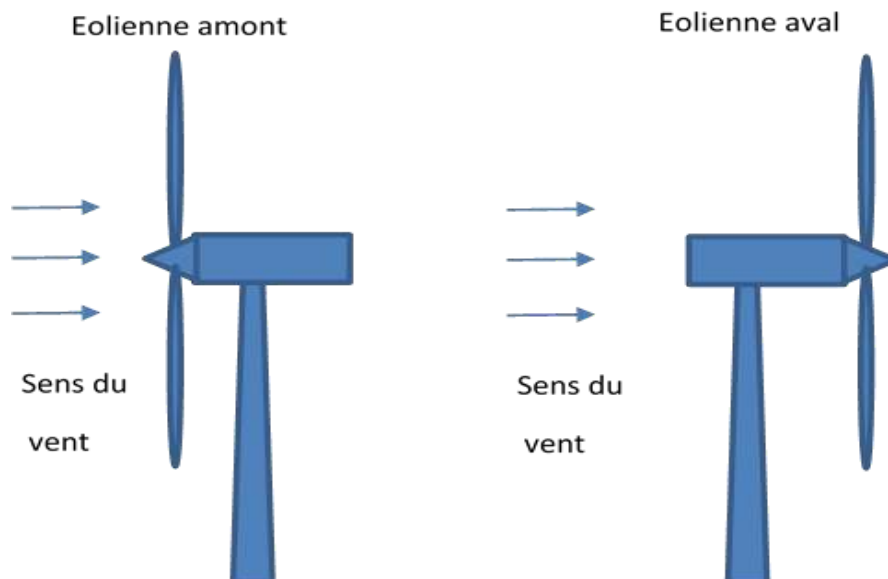


Figure (I.7) : Types d'éoliennes à axe horizontal

### I.2.5 Composants d'une éolienne à axe horizontal :

La Figure I.8 illustre les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal. Nous décrivons certains de ses composants dans les paragraphes ci-dessous, [23], [24], [25], [26].

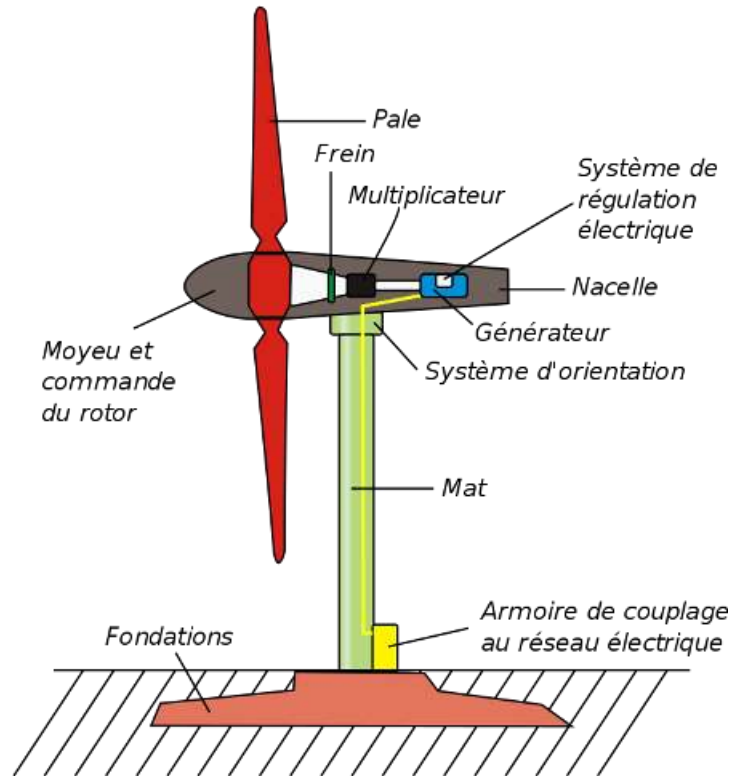


Figure (I.8) : Composants d'une éolienne à axe horizontal

#### I.2.5.1 La tour:

La tour est un élément de support, appelé aussi pylône ou mât, sa hauteur dépend de la puissance nominale des éoliennes, elle doit être suffisamment grande pour éviter les perturbations près du sol et pour faire de la place aux pales. Le mât est généralement en métal (acier, aluminium, ...) ou en béton de forme cylindrique ou conique pour les grandes puissances [23].

Un pylône en treillis métallique à faible coût peut être utilisé pour les faibles puissances. En plus de porter la nacelle et le rotor, le mât abrite à son intérieur l'échelle d'accès à la nacelle, l'équipement de connexion au réseau, les composants de commande et les câbles électriques.

#### I.2.5.2 Le rotor :

En général, le rotor est constitué de deux, trois ou plusieurs pales fixées sur un moyeu. Il est entraîné par la force du vent captée par les pales et relié à un générateur électrique, directement ou indirectement via un multiplicateur mécanique de vitesse [23], [24].

### I.2.5.3 Les pales :

Elles captent l'énergie du vent et la transmettent au rotor. La majorité des éoliennes ont trois pales car ce nombre permet d'atteindre un équilibre entre la stabilité, les performances de la turbine et le coût de fabrication, [23], [24].

### I.2.5.4 Le moyeu:

Le composant qui maintient les pales et son système d'orientation s'appelle le moyeu. Il doit être capable de supporter des vibrations et secousses fortes, notamment lors du démarrage de l'éolienne ou lorsque la vitesse du vent change soudainement.

### I.2.5.5 La nacelle:

Les composants mécaniques, pneumatiques, le générateur et certains composants de contrôle électronique sont placés dans la nacelle, qui est fixée au sommet du mât d'une manière à être orientée tout le temps en direction du vent. L'énergie électrique produite par le générateur passe par des fils électriques qui descendent à l'intérieur du mât de l'éolienne [27].

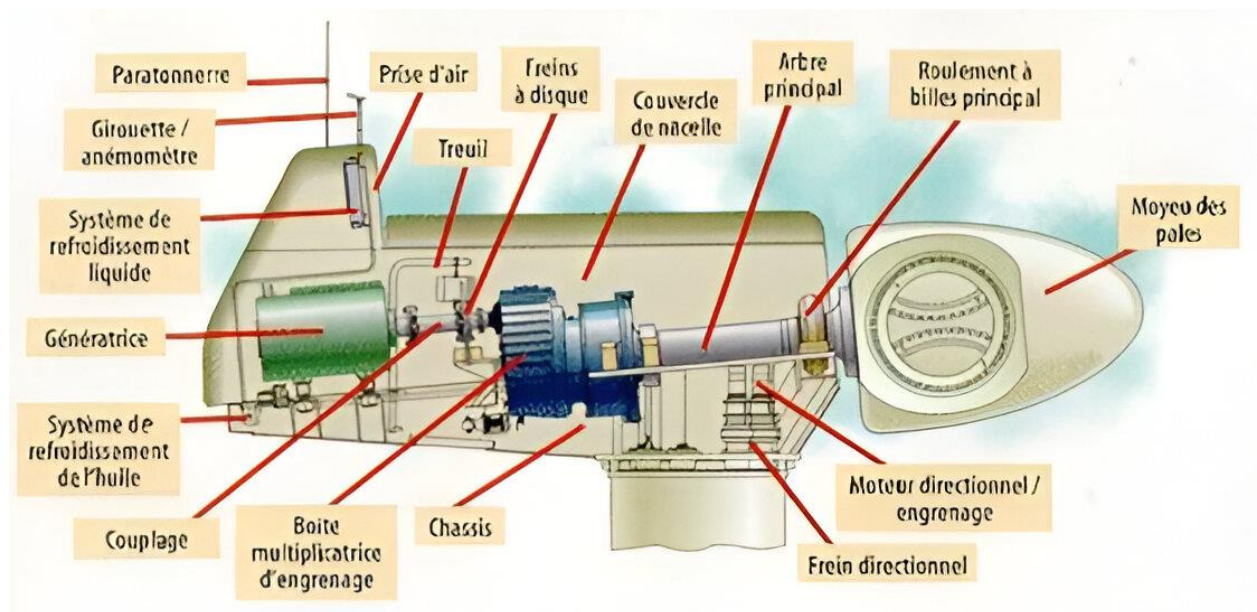


Figure (I.9) : Constitution d'une nacelle

Les principaux éléments de la chaîne de conversion que l'on peut trouver dans une nacelle classique, Figure I.9, sont généralement le multiplicateur de vitesse et la génératrice électrique (appelée aussi alternateur).

#### ➤ Le multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est utilisé pour accélérer la vitesse de rotation entre l'arbre du rotor (arbre lent) et l'arbre de la génératrice (arbre rapide). Ce multiplicateur peut avoir un rapport

fixe ou un rapport variable mécaniquement pour assurer un fonctionnement à vitesse fixe de la génératrice.

### ➤ La génératrice

Dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, qu'ils soient à vitesse fixe ou variable, trois types de générateurs électriques sont le plus souvent utilisés. Ces machines sont les suivantes, [28], [29], [30] :

- Générateurs asynchrone à cage.
- Générateurs asynchrone à double alimentation (GADA ).
- Générateurs synchrones.

Les premières éoliennes mise en service utilisaient la machine asynchrone à cage et un multiplicateur à rapport fixe ou variable. Cependant, le besoin d'augmenter la puissance et la taille des éoliennes pour réduire le coût de l'électricité produite, nécessite l'utilisation des convertisseurs d'électronique de puissances adaptés dont le coût dépasse largement celui de la génératrice elle-même. Ces contraintes ont poussé les industriels à opter pour la génératrice asynchrone à double alimentation qui utilise un convertisseur de faible puissance (30% de la puissance nominale) connecté entre le réseau et le rotor de la génératrice. La GADA est la solution la plus utilisée actuellement dans les éoliennes onshores (terrestres).

Concernant la génératrice synchrone, elle est recommandée pour les éoliennes offshore puisque sa version à aimants permanents permet de se passer du multiplicateur de vitesse, ce qui réduit le coût de la maintenance et le poids et la taille de la nacelle.

## I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

### I.3.1 Avantages de l'énergie éolienne :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [31].
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO<sub>2</sub>.

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [32].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [33].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant.

### **I.3.2 Inconvénients de l'énergie éolienne**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [32].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [33].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [32].
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien.

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses [34].

## **I.4 Configurations des chaînes de conversion éolienne :**

Les configurations des chaînes de conversion de l'énergie éolienne dépendent globalement du type de la génératrice utilisée et de la structure du convertisseur de puissance qui permet le contrôle de l'énergie produite par la génératrice. Il existe deux grandes familles de configurations, [26], [30]:

- La configuration à vitesse fixe de la génératrice (et non pas de la turbine).
- La configuration à vitesse variable de la génératrice.

#### I.4.1 Eolienne à vitesse fixe

Dans cette configuration, le générateur utilisé est souvent une machine asynchrone à cage qui fonctionne à une vitesse fixe ou qui varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine. L'élément le plus complexe et le plus coûteux de cette chaîne de conversion est le multiplicateur de vitesse à rapport variable qui garantit une vitesse du générateur presque constante.

Les premières éoliennes exploitées par les industriels à grande échelle se basaient sur cette configuration dont la génératrice asynchrone est directement connectée au réseau électrique, Figure I.10, puisque sa vitesse est approximativement gardée fixe par le multiplicateur et la commande de l'orientation des pales (Pitch contrôle).

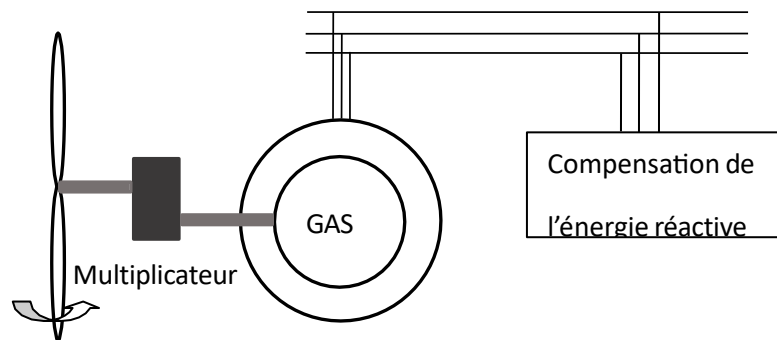


Figure (I.10) : Eolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone

La complexité du multiplicateur mécanique de vitesse, qui augmente le poids de l'éolienne et le coût de la maintenance, est le principal problème de cette configuration.

#### I.4.2 Eolienne à vitesse variable

Dans le monde industriel, les éoliennes à vitesse variable sont aujourd'hui les plus populaires. L'expression "vitesse variable" décrit une turbine dont la vitesse n'est pas liée à la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal de faire fonctionner l'éolienne à vitesse variable est de maximiser la quantité d'énergie éolienne captée.

Les générateurs synchrones, asynchrones et asynchrones à double alimentation sont les trois types de générateurs qui peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable.

##### I.4.2.1 Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone (GS)

Le champ généré par le rotor doit tourner à la même vitesse que le champ généré par le stator. En d'autres termes, la vitesse de rotation du générateur doit être un multiple de la pulsation des

courants du stator. Cependant, la variation de la vitesse du vent provoque une variation de la vitesse de la génératrice et, par conséquent, une variation de la fréquence et de l'amplitude des tensions du stator. Pour synchroniser la machine avec le réseau électrique sans l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse très coûteux, une interface d'électronique de puissance entre le stator de la génératrice et le réseau électrique est très utilisée actuellement puisqu'elle permet un fonctionnement à vitesse variable sur une large plage de variation du vent, Figure 1.8. Cependant, toute l'énergie électrique produite traverse le convertisseur de puissance, ce qui provoque une augmentation des pertes par commutation et, de facto, une dégradation du rendement global de l'éolienne [30]. Les génératrices synchrones à rotor bobiné sont rarement utilisées dans les éoliennes. En revanche, les générateurs synchrones à aimants permanents n'ont été utilisés que récemment dans les éoliennes offshore de grande puissance et les éoliennes de petites puissances en raison des facteurs suivants :

- Les prix des aimants sont plutôt élevés (fabriqués à partir de terres rares).
- Démagnétisation progressive des aimants à cause des fortes températures et des champs magnétiques puissants du générateur.

La Figure I.11 montre une chaîne de conversion utilisant une génératrice synchrone et un convertisseur de puissance composé d'un redresseur, coté stator, et d'un onduleur, coté réseau. L'utilisation des génératrices synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles permet un fonctionnement sans multiplicateur mécanique de vitesse, [30].

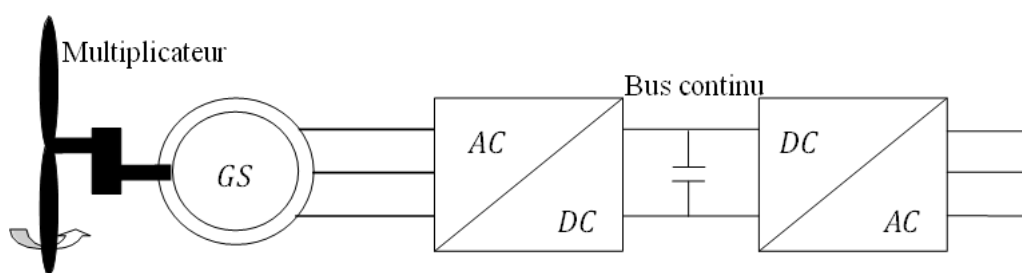


Figure (I.11) : Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone

#### I.4.2.2 Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage

Dans cette configuration, l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone, généralement à cage, reliée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit du stator, Figure I.12. Cette structure ressemble à celle équipée par une génératrice synchrone, Figure 1.8. Le choix entre les deux machines dépend de l'utilisation ou non du multiplicateur et du coût global de l'éolienne, [28], [29], [35].

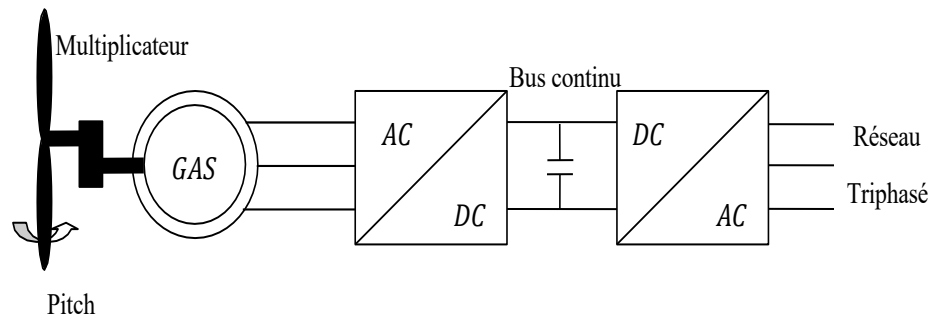


Figure (I.12) : Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone

### I.4.2.3 Eolienne à vitesse variable utilisant une MADA

Dans cette configuration le stator de la MADA est connecté directement au réseau électrique et le convertisseur de puissance se trouve entre le rotor et le réseau électrique, Figure I.13. La commande du convertisseur coté génératrice permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. En revanche, la commande du convertisseur coté réseau permet de maintenir constante la tension du bus continu [28], [29], [35].

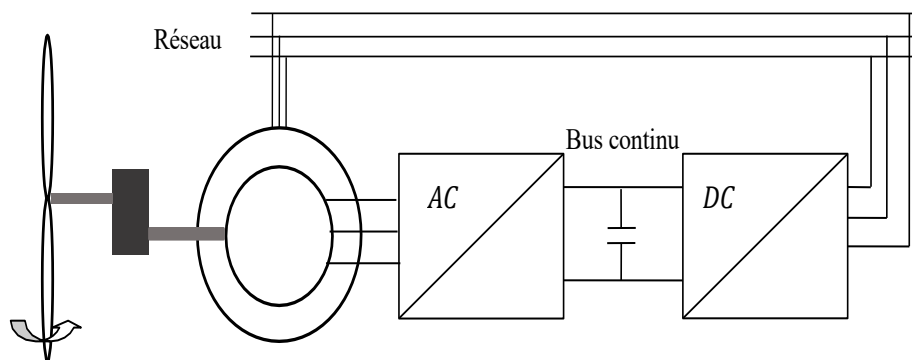


Figure (I.13) : Eolienne à vitesse variable utilisant une MADA

## I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une description de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Dans ce contexte, quelques concepts fondamentaux liés à la technologie éolienne sont introduits, tels que : le principe de fonctionnement des éoliennes (fonctionnement à vitesse constante ou variable), des exemples de différents types de structures (axe horizontal ou axe vertical), les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement (système d'orientation des pales ou système à décrochage aérodynamique), le rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

La seconde partie du chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien. Trois grandes familles de machines sont présentées : Machine asynchrone à cage, Machine asynchrone double alimentation, Génératrices synchrones.

# *Chapitre II :*

*Modélisation de la  
chaîne de conversion  
énergie éolienne et  
techniques de  
commande MPPT*

## II.1 Introduction

Le rôle des éoliennes est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Leurs différents composants sont conçus pour maximiser cette conversion d'énergie, et une bonne adéquation entre les caractéristiques couples/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable [36].

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les différents éléments de la chaîne de conversion éolienne et nous avons donné un aperçu sur quelques commandes appliquées sur cette chaîne de conversion éolienne.

## II.2 Modélisation de système de conversion éolienne

Le schéma global d'une éolienne GADA (DFIG en anglais) connectée au réseau est donné dans la Figure.II.1.

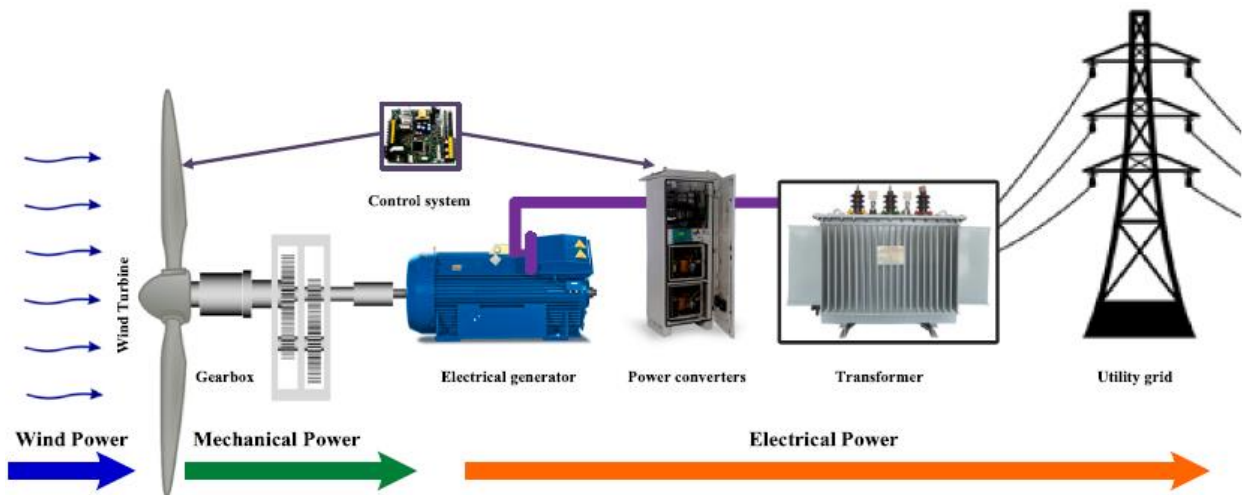


Figure (II.1) : Configuration générale d'un système de conversion éolienne connectée au réseau.

### II.2.1 Modèle d'éolienne

L'éolienne est le moteur principal du système de conversion de l'énergie éolienne (WTS Wind Turbine System) et permet la conversion de l'énergie cinétique du vent ( $E_w$ ) en énergie mécanique ( $P_m$ ) et enfin en énergie électrique ( $P_s + P_r$ ).

$$P_m = \frac{\partial E_w}{\partial t} C_P = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_P(\lambda, \beta) \quad (\text{II.1})$$

Où  $V_w$  est la vitesse de l'air au centre du rotor (m/s),  $\rho$  est la masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ),

$A = \pi R^2$  est la surface frontale de la pale ( $\text{m}^2$ ) et  $R$  est le rayon du rotor (m).  $\lambda$  (TSR Tip Speed Ratio) est le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité de la pale et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{V_w} \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient d'efficacité  $C_p$  est une fonction de l'angle de pale, appelé angle de pas, noté  $\beta$ , et du TSR. Cette triple relation est présentée à la Figure (II.2) et elle est approximée à l'aide d'une fonction non linéaire donnée par l'équation (II.3) [37].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{\lambda_i} = \left[ \left( \frac{1}{\lambda_{TSR} + 0.08 \beta} \right) - \left( \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right] \quad (\text{II.3})$$

On peut extraire la puissance maximale en faisant tourner le WTS à une vitesse spécifique correspondant à la vitesse du vent, de manière à ce que le TSR reste constant (pour  $\lambda \approx 9,95$  et  $\beta=0^\circ$ , on obtient :  $C_{p\max} = 0,5$ ). La vitesse de rotation optimale de la machine à induction, à prendre comme référence de commande, est donnée par l'équation (II.4) :

$$\omega_{m\_opt} = N_g \omega_{t\_opt} = N_g \frac{\lambda_{opt} V_W}{R} \quad (\text{II.4})$$

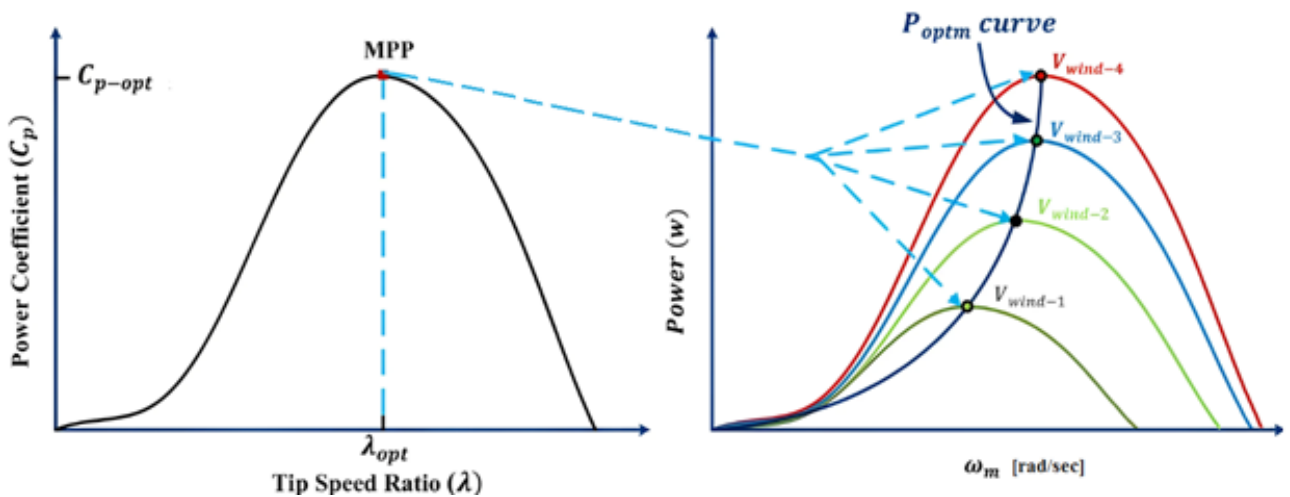
Où :  $\omega_t$  : vitesse de la turbine,  $\omega_m$  : vitesse de la génératrice,  $N_g$  : rapport de transmission,  $\lambda_{opt}$  : TSR optimal.

La méthode MPPT basée sur le TSR vise à maintenir le WTS à son point optimal en comparant les vitesses optimale et réelle du rotor et en transmettant cette différence à un contrôleur.

Le TSR optimal est déterminé expérimentalement ou théoriquement, tandis que la vitesse du vent est mesurée en continu.

Lorsque la vitesse du vent devient élevée, le système de contrôle du pas est activé et la vitesse mécanique ( $\omega_m$ ) et la puissance ( $P_m$ ) sont contrôlées pour rester autour de leurs valeurs nominales (1,2 pu et 1 pu respectivement), où la puissance mécanique est donnée par :

$P_m \approx P_s + P_r = (1 - s) \cdot P_s$  où  $s$  est le glissement,  $P_s$  et  $P_r$  sont respectivement les puissances actives du stator et du rotor.



### II.3 Technique d'extraction du maximum de puissance

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme l'illustre la Figure (II.3) [38],[39] :

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

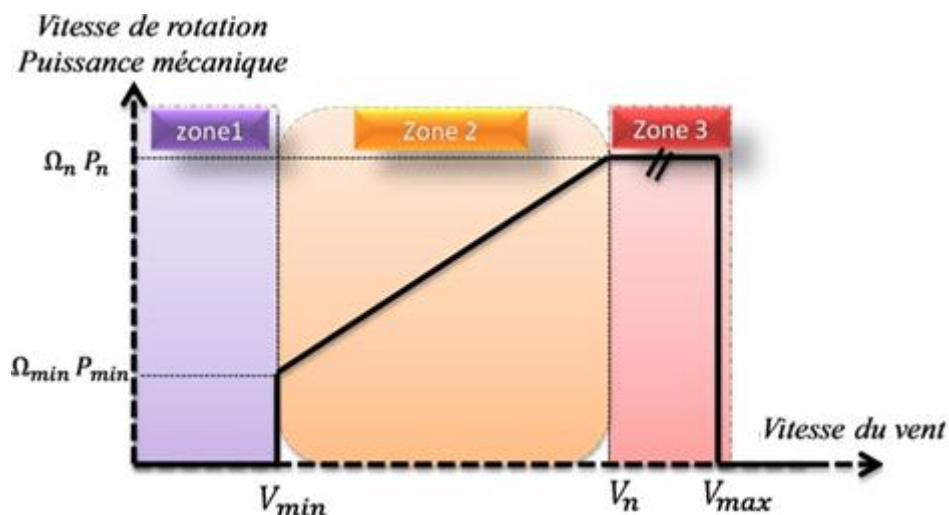


Figure (II.3) : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [39].

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement aux points de fonctionnement de l'éolienne situés dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales  $\beta$  reste constant.

### II.3.1 Recherche du point de puissance maximale « MPPT »

Un algorithme « MPPT », de l'anglais « Maximum Power Point Tracker » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [40].

Comme il a été constaté dans le premier chapitre, la puissance exploitée varie en fonction de la vitesse du convertisseur électromécanique, pour une vitesse de vent fixe en admettant un point maximal appelé : « MPP maximum power point ».

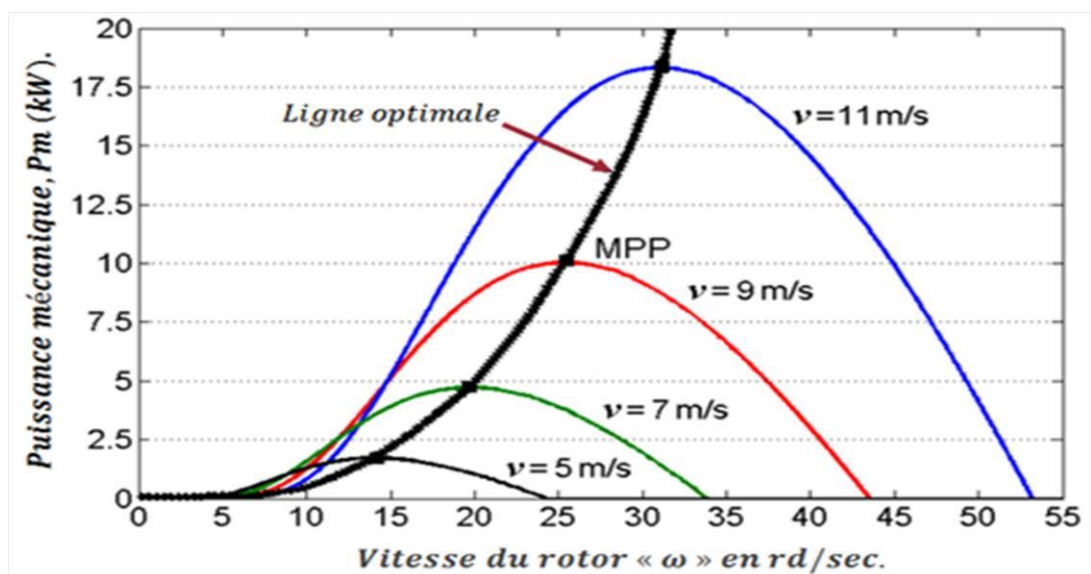


Figure (II.4) : Ligne de puissance optimale et points 'MPP' pour diverses vitesses de vent.

Étant donné que, les paramètres d'une éolienne (i.e., la vitesse réduite «  $\lambda$  » optimale de l'efficacité aérodynamique) sont inconnus, les algorithmes « MPPT » visent généralement à maintenir le point de fonctionnement optimal en mettant à zéro la valeur du gradient :

$$\frac{d(P_{\acute{e}ol})}{d\Omega} = \frac{d(P_{\acute{e}ol})}{dt} \frac{dt}{d\Omega} \quad (\text{II.11})$$

Où «  $P_{\acute{e}ol}$  » est la puissance éolienne totale et «  $\Omega$  » présente la vitesse du convertisseur électromécanique. Par conséquent, l'entrée de commande, ce qui représente la référence de vitesse éolienne, dépend de la position du point de fonctionnement et sa tendance à bouger, exprimée par le signe du gradient, présenté par l'équation ci-dessus (voir le tableau « 2.1 » et la figure II.5) [40].

Tableau 2.1 - Principe de controle de l'MPPT [40].

$\frac{dy}{dt} \backslash \frac{d(P_{\acute{e}ol})}{dt}$	$< 0$	$> 0$
$< 0$	$\Omega \nearrow$ cas « I »	$\Omega \searrow$ cas « II »
$> 0$	$\Omega \searrow$ cas « III »	$\Omega \nearrow$ cas « IV »

Comme la puissance de la turbine (puissance éolienne) n'est pas disponible pour la mesure, une estimation de sa valeur est obtenue à partir de la puissance active mesurée, cette dernière est utilisée pour la localisation du point de fonctionnement optimal « MPP », conduisant à une approche quelque peu statique.

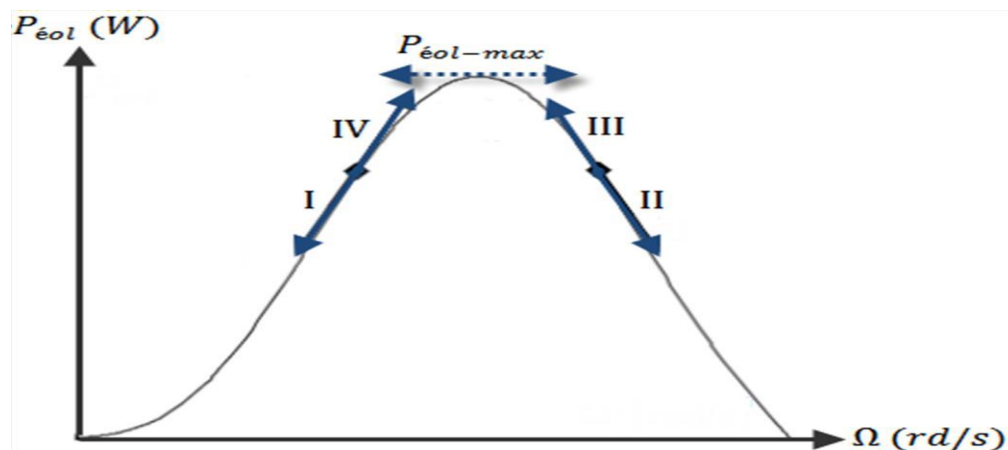


Figure (II.5) : Principe de la MPPT dans le plan ( $\Omega$ - $P$ ) [40].

### II.3.2 Algorithmes MPPT pour les systèmes de conversion de l'énergie éolienne

L'objectif principal de l'algorithme MPPT est de suivre et de capturer la puissance maximale du système de conversion de l'énergie éolienne en anglais WECS (Wind Energy Conversion Systems). Les différentes zones de fonctionnement du système WECS et la zone MPPT sont présentées à la figure 3. Le concept de MPPT est bien compris à partir de la figure 4. Le MPP à chaque vitesse de vent constitue la courbe  $P_{opt}$ . Il n'y a pas de production pour toutes les vitesses inférieures à la valeur de démarrage, car il s'agit de la vitesse minimale requise pour commencer à produire de la puissance utilisable. La vitesse à laquelle la puissance nominale utilisable est générée est la vitesse nominale. La puissance maximale est extraite dans la zone deux, située entre  $V_{min}$  et  $V_n$ . Plusieurs variables importantes, telles que la tension, la puissance optimale et le rapport cyclique, doivent être estimées, ce qui peut s'avérer complexe, comme indiqué dans [41, 42, 43].

Pour sélectionner l'algorithme MPPT approprié, il faut tenir compte de plusieurs paramètres, notamment le rendement, la vitesse, le besoin de capteurs de vitesse du vent et la complexité de mise en œuvre.

Les algorithmes MPPT conçus dans les travaux antérieurs utilisent des paramètres tels que le TSR ( $\lambda$ ), la relation entre la vitesse de rotation de la turbine et la puissance, ainsi que de nombreux autres paramètres mentionnés précédemment dans la revue des travaux antérieurs. Ils contribuent essentiellement au suivi et à l'extraction de la puissance maximale du système d'énergie éolienne. [44,45] présente la classification des algorithmes MPPT. Ils peuvent être classés en fonction de l'utilisation de capteurs de vitesse. Comme illustré à la figure (II.6), ils sont classés en deux principaux types : le contrôle direct de puissance (DPC) et le contrôle indirect de puissance (IPC) [42,46], ainsi que d'autres méthodes avancées utilisant les réseaux de neurones (NN) et le contrôleur logique flou (FLC) [47,48]. Il existe des techniques MPPT telles que le rapport de vitesse de pointe (TSR), la rétroaction du signal de puissance (PSF) et le couple optimal (OT) [49,50] dans le cadre du schéma de contrôle IPC. Dans la technique IPC, la puissance est précalculée à l'aide des courbes de vitesse du vent, ce qui maximise la puissance mécanique  $P_{wind}$ , tandis que dans le schéma DPC, la puissance électrique ( $P_{ele}$ ) est directement examinée pour faire fonctionner l'éolienne à la puissance maximale. Le schéma de contrôle DPC inclut des algorithmes MPPT tels que Perturbation et Observation (P&O) [51], Conductance incrémentale (INC) [52] et Optimal Relation-Based (ORB) [43,53]. Cette section présente un aperçu de plusieurs algorithmes MPPT.

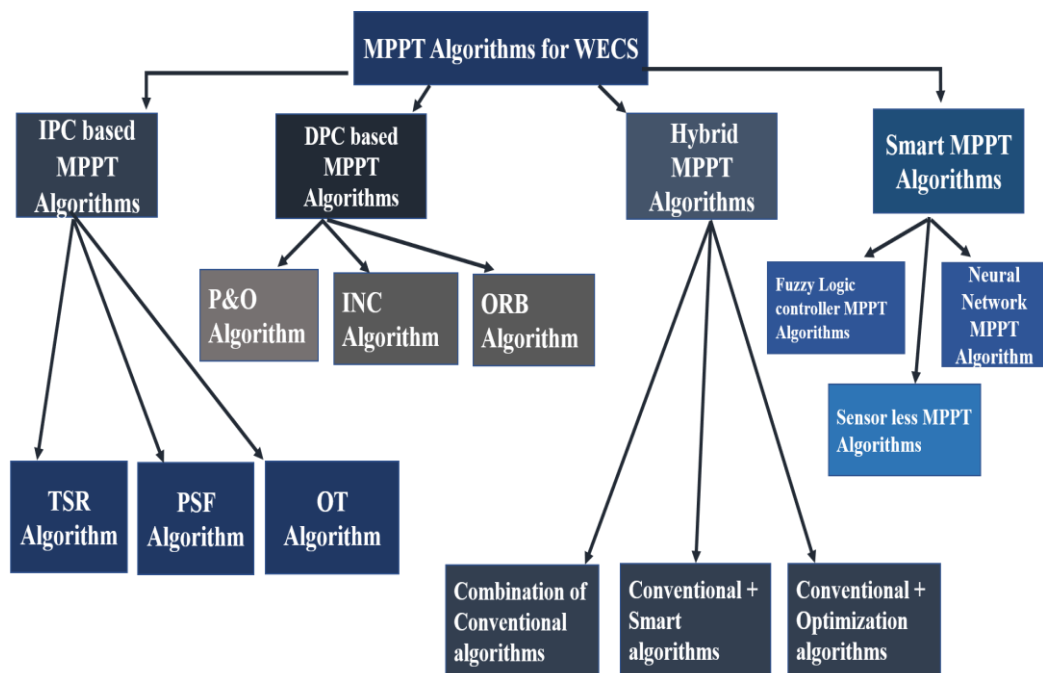


Figure (II.6) : Classification des algorithmes MPPT pour les WECS.

### **II.3 .2.1 Algorithme de perturbation et observation « P&O »**

L'approche de l'algorithme P&O consiste à localiser le point de puissance maximal (MPP) par optimisation mathématique. Cette méthode perturbe les variables de contrôle, telles que la tension du circuit intermédiaire ou la vitesse du rotor, et observe leur effet sur les performances du système électromécanique.

Dans l'algorithme P&O conventionnel (CPO), la puissance obtenue est modifiée en fonction de la vitesse du générateur afin d'obtenir une pente nulle pour le P- $\omega$  Courbe. Les caractéristiques et avantages les plus importants de cet algorithme sont qu'il ne nécessite pas de capteurs tels qu'un anémomètre, et qu'il n'exige pas non plus la connaissance des paramètres WT [43,54].

Dans l'algorithme CPO, si le point de fonctionnement se situe vers la gauche du MPP, alors le contrôleur le déplace vers la droite, et s'il est à gauche, alors vice versa [46,55].

Le point de fonctionnement optimal est recherché et la puissance maximale est suivie dans cette méthode [56,57]. Sa simplicité et sa facilité d'utilisation en font une technique très populaire. Son principal inconvénient réside dans la difficulté de déterminer un pas de perturbation approprié, car cela affecte les performances de l'éolienne.

Des pas plus grands entraînent une oscillation proche du point de puissance maximale (MPP). À l'inverse, des pas plus petits entraînent un temps de convergence plus long et une réponse plus lente. Un autre problème est la perte de la trace du MPP sous l'effet de variations de vitesse du vent.

### **II.3 .2.2 Algorithme MPPT basé sur la logique floue FLC (Fuzzy logic controller)**

La problématique des oscillations autour du point de puissance maximal (MPP) est abordée par l'utilisation de FLC pour l'algorithme MPPT. Cette méthode se caractérise par la rapidité de modification des variables du contrôleur, en fonction des variations de la dynamique du système.

Par conséquent, la modélisation mathématique du système de conversion de l'énergie éolienne (WECS) n'est pas nécessaire. Les performances globales de ce type de méthode sont bonnes, même dans des conditions climatiques variables.

Bien que cela ne soit possible que si l'utilisateur conçoit des règles appropriées, disposant d'une connaissance suffisante du système pour sélectionner la base de règles appropriée, les fonctions d'appartenance et les besoins importants en mémoire constituent également un problème majeur. [42,58,59].

Différents algorithmes MPPT basés sur FLC sont présentés dans [60,61,62,63,64]. figure II.7 décrit le schéma FLC pour WECS.

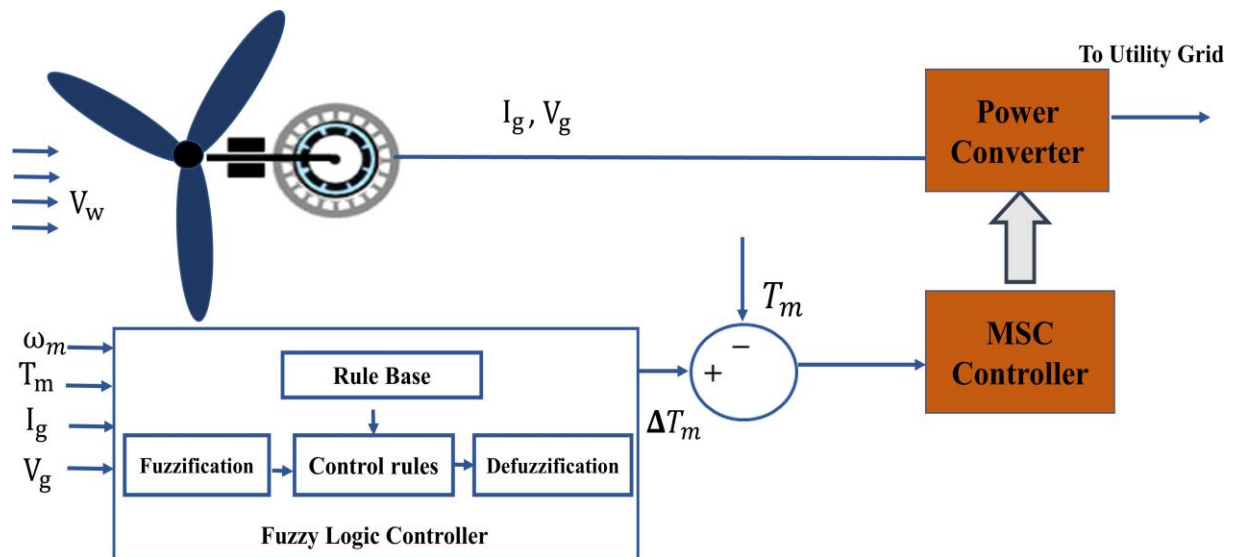


Figure (II.7) : Principe de la commande MPPT basé sur la logique floue.

### II.3.2.3 Algorithme OT MPPT

L'approche de l'algorithme OT MPPT implique la régulation du couple du générateur en utilisant la courbe de couple optimale pour plusieurs vitesses de vent [65,66]. Le schéma de cet algorithme est celui illustré dans la figure II.8. L'efficacité de l'éolienne dépend et est définie par la valeur optimale des constantes de la turbine, ce qui souligne la nécessité d'une validation expérimentale [67,68].

Les avantages de cette technique sont une plus grande efficacité, une plus grande simplicité et une vitesse de suivi élevée, mais elle souffre des problèmes de dépendance aux conditions climatiques et de l'exigence de connaissance des caractéristiques du WT [69,70].

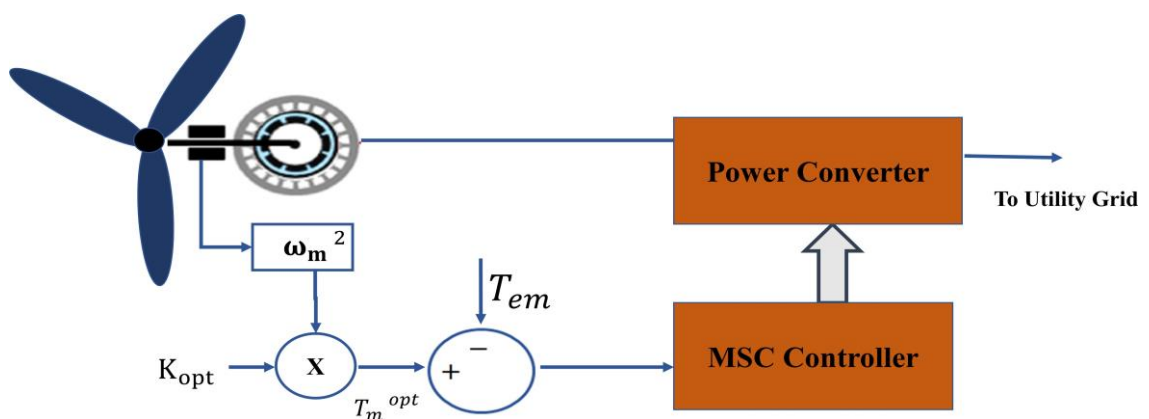


Figure (II.8) : Principe de la commande OT MPPT.

### II.3 .2.4 Algorithme TSR MPPT

Dans cette méthode, on obtient un TSR optimal pour que la turbine puisse extraire une puissance maximale [71]. La figure .I.9 illustre ce schéma. En estimant la vitesse du rotor et le vent,

on obtient une vitesse de référence optimale du rotor ( $\omega_{ref}$ ) est générée. En considérant les paramètres du système, l'extraction optimale de puissance est estimée par la méthode TSR [72,73]. L'algorithme TSR présente des avantages tels qu'une réponse rapide et une simplicité ; par conséquent, il est utilisé pour la régulation de la vitesse optimale du rotor dans des conditions environnementales changeantes [74,75]. En fonction de la vitesse du vent acquise, deux approches sont possibles.

La première repose sur le capteur mécanique utilisé, et la seconde sur l'estimation de la vitesse du vent [39]. Dans la première approche, l'algorithme TSR basé sur les capteurs mécaniques utilise plusieurs anémomètres qui entourent la zone balayée par le WT avec une précision de  $\pm 10\%$  pour mesurer la vitesse du vent [76]. Le principal inconvénient réside dans des coûts d'installation et de maintenance plus élevés, ainsi que dans une efficacité et une fiabilité moindre. Dans la seconde approche, les chercheurs ont utilisé des algorithmes TSR basés sur l'estimation de la vitesse du vent pour pallier les inconvénients liés à l'utilisation d'anémomètres [77]. Les algorithmes d'estimation de la vitesse du vent (WSE) offrent une plus grande précision dans le calcul de la vitesse du vent, bien que cette précision détermine l'efficacité du suivi et de la récupération de l'énergie. Les algorithmes WSE efficaces, basés sur les méthodes polynomiales, offrent une précision, une rapidité et une simplicité élevées. Ces algorithmes WSE sont utilisés soit en considérant la modélisation mathématique du WECS, soit en considérant les contrôleurs intelligents adaptatifs [76,78,79].

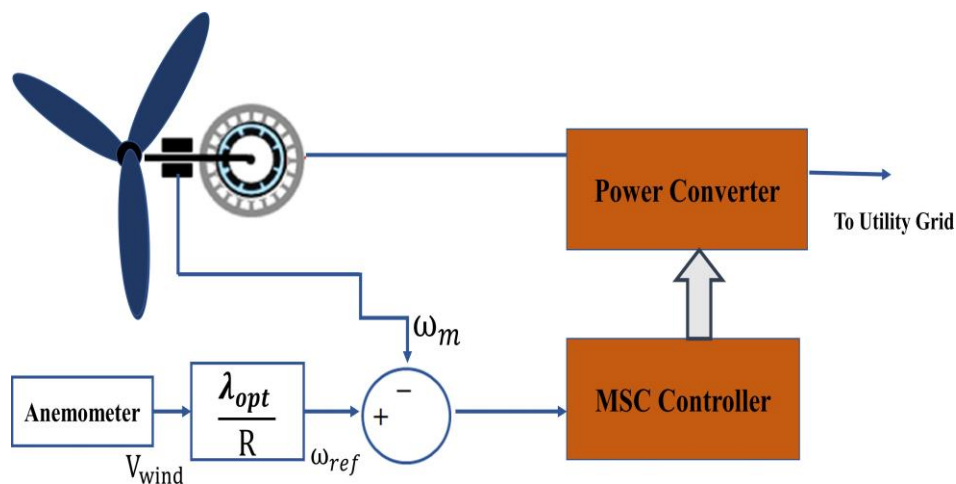


Figure (II.9) : Principe de la commande TSR MPPT.

### II.3 .2.5 Algorithme NN MPPT basé sur les réseaux de neurones

L'architecture d'un réseau neuronal comporte trois couches : entrée, couche cachée et couche de sortie. L'utilisateur décide du nombre de nœuds qu'il utilisera, ce nombre pouvant varier d'un utilisateur à l'autre. [80,81]. Plusieurs variables sont utilisées comme variables d'entrée, telles que la tension aux bornes, la vitesse du vent, le couple de sortie, etc. La sortie fournie sert de variable de

référence, telle que la puissance de référence ou la vitesse du rotor, pour piloter le circuit électronique de puissance.

Les pondérations attribuées aux couches déterminent la coïncidence du point de fonctionnement avec le point de crête. Le système est entraîné pour le modèle d'entrée-sortie spécifique [82]. L'entraînement permet de réduire le temps de réponse, ce qui facilite l'atteinte rapide de l'état stationnaire, même avec des vitesses de vent variables. Cette méthode améliore le compromis entre le temps de réponse et la puissance de sortie.

**Tableau 2.2** - Comparaison des algorithmes MPPT intelligents pour WECS.

Caractéristiques de l'algorithme MPPT	<b>P&amp;O</b>	<b>FLC</b>	<b>OT</b>	<b>TSR</b>	<b>NN</b>
Efficacité	Faible	Plus haut	Haute efficacité	Haute efficacité	Plus haut
Complexité	Simple	Plus haut	Moins	Moins	Plus haut
Vitesse de convergence	Lent	Moyen	Plus haut	Plus haut	Moyen
Oscillations au MPP	Oui	Non	Non	Non	Non
Connaissances préalables	Pas nécessaire	Nécessaire	Nécessaire	Pas nécessaire	Nécessaire
Besoin en mémoire	Non	Requis	Non	Non	Requis
Besoin de capteurs pour mesurer la vitesse du vent	Pas nécessaire	Cela dépend	Non	Oui	Cela dépend
Sensibilité des paramètres	Non	Cela dépend	Oui	Oui	Cela dépend
Coût	Modéré	Plus haut	Modéré	Très élevé	Plus haut
Mise à jour en ligne	Oui	Requis	Non	Non	Requis
Performances sous une vitesse de vent fluctuante	Modérément équitable	Plus haut	Modérément passable	Modérément passable	Plus haut

## II.4 Conclusion

Après avoir modélisé dans cette section les différents éléments de la chaîne de conversion éolienne et cité quelques commandes applicables à cette chaîne de conversion éolienne, on passe au prochain chapitre qui est consacré à la simulation sous environnement Matlab/Simulink.

On s'est basé sur l'extraction du maximum de puissance (MPPT). Pour cela, trois techniques MPPT ont été étudiées, la première méthode TSR et la deuxième méthode perturbation et observation (P&O) et la dernière technique utilise la logique floue ce qui sera détaillé plus tard.

# *Chapitre III :*

*Commande par MPPT  
d'un Système de  
Conversion d'Énergie  
Éolienne*

### III.1 Introduction

Nous allons entamer ce chapitre par la simulation du vent, puis on passe à la partie de conception des différentes commandes MPPT ( TSR, P&O, FLC ) appliquées à une turbine éolienne pour l'extraction maximale de puissance. Chaque commande est implémentée sur le même système éolien afin d'évaluer ses performances. Les caractéristiques nominales et les paramètres du système sont indiqués dans le tableau III.1 [83]. L'objectif est d'analyser leur efficacité en termes de suivi du point de puissance maximale.

**Tableau III.1:** Caractéristiques nominales et paramètres du système WTS [83].

Paramètre	Symbole	Valeur
Puissance nominale de l'éolienne	$P_{wt}$	5 kW
Vitesse nominale du vent	$V_w$	12 m/s
Densité de l'air	$\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Nombre de pales		3
Rayon des pales	R	3 m
Gain du réducteur	G	5,4
Coefficient de puissance maximale	$C_{p-max}$	0,5
TSR optimal	$\lambda_{opt}$	9,15
Puissance nominale de la machine	$P_{out}$	4 kW
Tension nominale de la machine	$V_s$	220/380 V
Courant nominal de la machine	$I_s$	15/8.6 A
Tension nominale du circuit intermédiaire	$V_{dc}$	400V
Fréquence nominale du réseau	f	50 Hz
Nombre de paires de pôles	p	2
Résistance du stator	$R_s$	1,2 $\Omega$
Résistance du rotor	$R_r$	1,8 $\Omega$
Inductance de fuite du stator	$L_s$	0,1554 H
Inductance de fuite du rotor	$L_r$	0,1568 H
Inductance mutuelle	$L_m$	0,15 H
Coefficient d'inertie global	J	0,31 kg.m <sup>2</sup>
Frottement visqueux global	F	0,0042 N.m.s/rd
Pas de mesure fixe	$T_s$	5e-5 s
Gains du régulateur PI de vitesse du rotor	$[K_p, K_i]$	[7.5      170]

### III.2 Modèle de vitesse du vent

La simulation du vent joue un rôle important dans la modélisation des éoliennes, notamment pour l'analyse de la qualité de l'énergie des parcs éoliens et de leurs interactions avec le réseau électrique auquel ils sont connectés. Les modèles éoliens décrivent les fluctuations de la vitesse du vent, responsables des fluctuations de la production d'énergie des éoliennes. La vitesse du vent varie d'un endroit à l'autre et fluctue également de manière stochastique au fil du temps [84]. Une approche possible pour générer le signal de vitesse du vent lors des simulations pourrait consister à utiliser des enregistrements de mesures réelles de la vitesse à l'emplacement réel du système éolien. Cette approche présente des limites évidentes, car elle nécessite une mesure à chaque endroit à simuler. Une autre option, proposée dans [85], consiste à utiliser un modèle mathématique qui prend en compte certains paramètres du paysage pour générer une séquence de vitesse du vent pour n'importe quel endroit. Dans notre cas de simulation, un signal de vitesse du vent a été généré par un modèle à moyenne mobile autorégressive (ARMA) décrit dans [84]. La vitesse du vent  $V_v(t)$  est composée de deux éléments :

$$V_v(t) = V_m(t) + V_t(t) \quad (\text{III.1})$$

Où  $V_m(t)$  est la vitesse moyenne du vent à hauteur du moyeu et  $V_t(t)$  est la partie turbulente instantanée, dont le modèle linéaire est composé d'un filtre du premier ordre excité par un bruit gaussien.

$$\dot{V}_t(t) = -\frac{1}{T_v} V_t(t) + \beta_t(t) \quad (\text{III.2})$$

Où  $T_v$  est la constante de temps et  $\beta_t$  est le processus de bruit blanc avec une moyenne nulle.

La composante de turbulence instantanée de la vitesse du vent est exprimée comme :

$$V_t(t) = \sigma_t(t) V_t(t) \quad (\text{III.3})$$

Où  $\sigma_t$  est l'écart type et est le modèle de série chronologique ARMA, qui est exprimé comme :

$$V_t(t) = aV_{t-1} - bV_{t-2} + cV_{t-3} + \beta_t - d\beta_{t-1} + e\beta_{t-2} \quad (\text{III.4})$$

Où a, b et c sont les paramètres autorégressifs et d et e sont les paramètres de moyenne mobile dont les valeurs sont : a = 1,7901, b = 0,9087, c = 0,0948, d = 1,0929 et e = 0,2892. Le profil de vitesse du vent de l'éolienne est illustré à la figure 1.

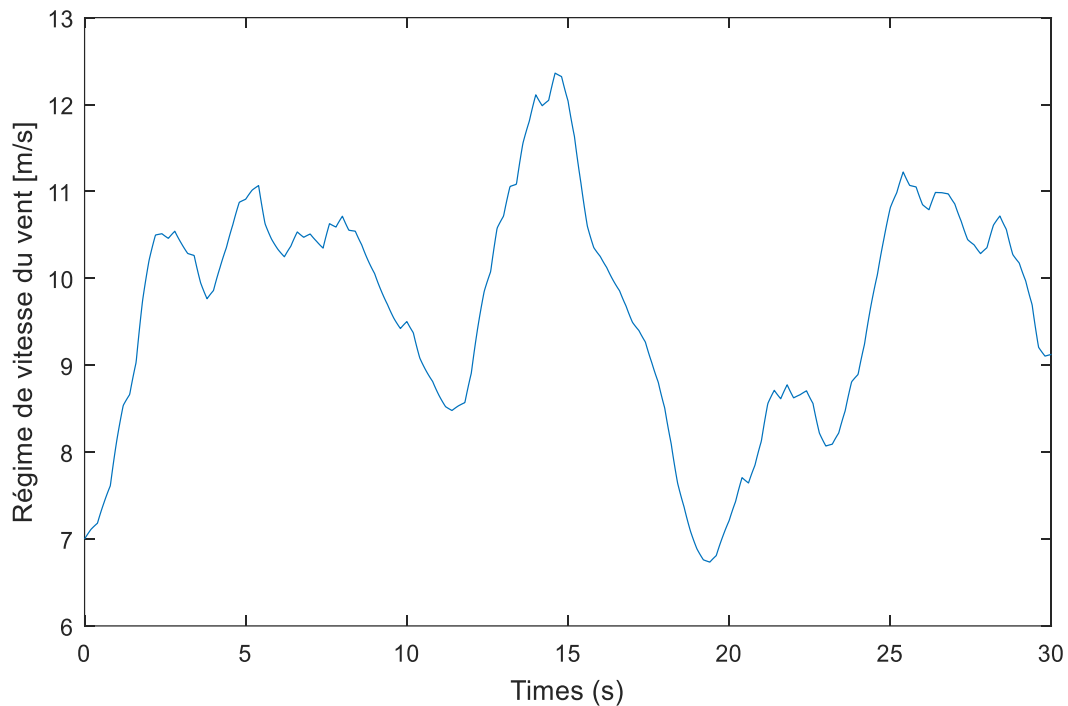


Figure (III.1) : Régime de vitesse du vent

### III.3 Algorithme MPPT\_TSR

Les systèmes MPPT sont généralement classés en deux catégories : contrôle indirect de puissance (CIP) et contrôle direct de puissance (CDP).

Le CIP maximise la puissance mécanique captée par l'éolienne ( $P_m$ ), tandis que le CDP maximise la puissance électrique produite par le générateur ( $P_{out}$ ). La méthode CIP la plus connue est la méthode TSR.

Dans l'algorithme MPPT basé sur le TSR, la puissance mécanique est maximisée en contrôlant la vitesse du rotor du générateur à un TSR optimal préalablement défini. De plus, la différence entre la vitesse réelle et la vitesse optimale est utilisée pour suivre la puissance maximale.

L'utilisation d'un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent confère à cette technique une grande précision et une grande efficacité, avec une réponse rapide. Cependant, cette excellente performance nécessite un coût supplémentaire [86]. La figure III.2 illustre la courbe de puissance optimale 2D définie par  $\lambda_{opt}$  et  $C_p\text{-max}$ .

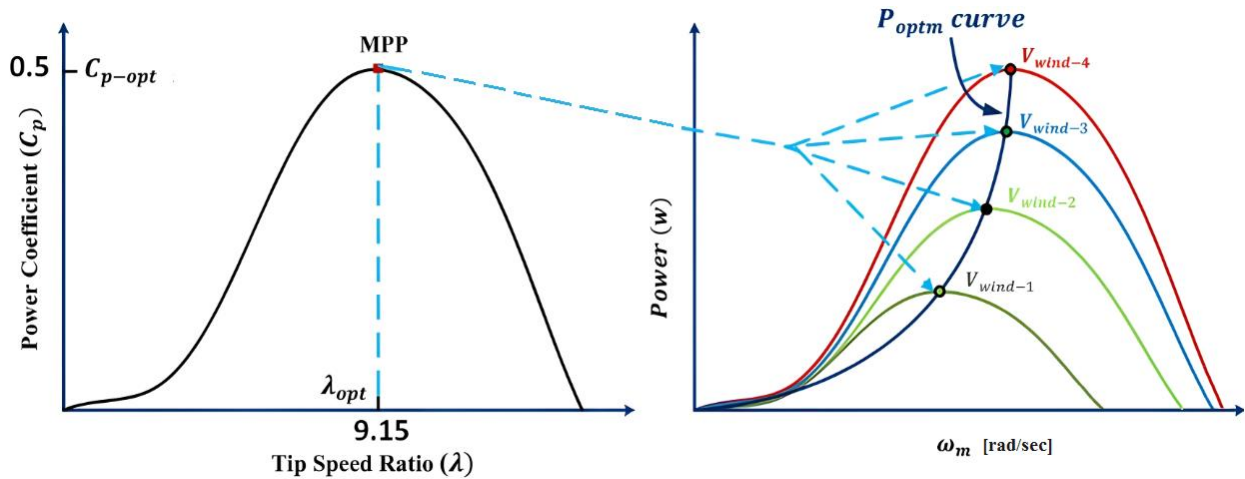


Figure (III.2) : Caractéristique de la puissance de WTS sous les valeurs optimales ( $\lambda_{opt}, C_{p-opt}$ ) [35].

La vitesse optimale du rotor de la machine à induction est donnée par l'équation III.5 et calculée dans Simulink comme illustré à la figure 3.

La vitesse optimale du rotor utilisée dans la méthode TSR est considérée comme la vitesse optimale exacte du WTS, car le profil de vitesse du vent de la bobine est utilisé. La méthode TSR est le seul MPPT dont la sortie est indépendante de l'inertie mécanique du WTS et dépend uniquement de l'intensité du vent actuel, ce qui en fait le plus rapide de tous les algorithmes MPPT.

$$\omega_{m\_opt} = G \omega_{t\_opt} = G \frac{\lambda_{opt} V_w}{R} \tag{III.5}$$

Où :  $\omega_t$  : vitesse de la turbine,  $\omega_m$  : vitesse du générateur, G : rapport de réduction,  $\lambda_{opt}$  : TSR optimal.

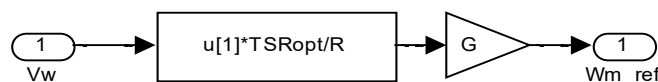


Figure (III.3) : Schéma fonctionnel de l'algorithme MPPT\_TSR.

### III.3.1. Simulation de la commande MPPT\_TSR

La figure III.4 montre le schéma bloc de la simulation de la commande MPPT\_TSR d'une éolienne.

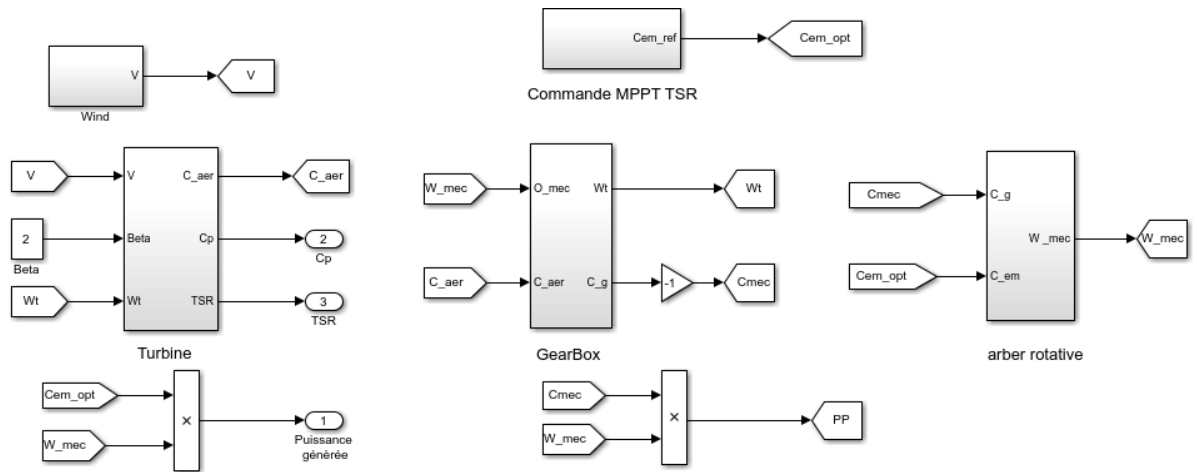
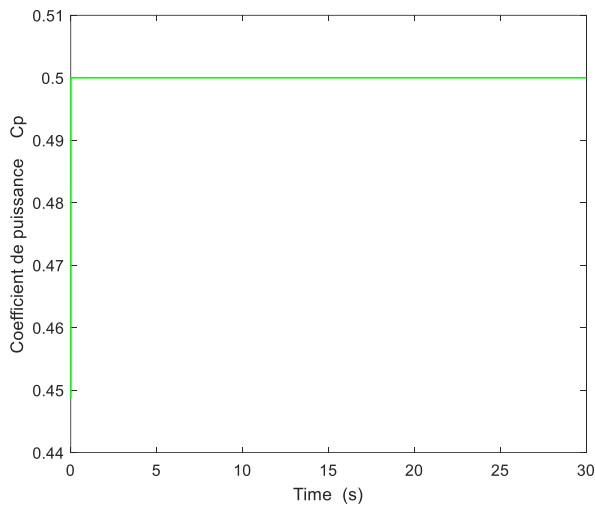
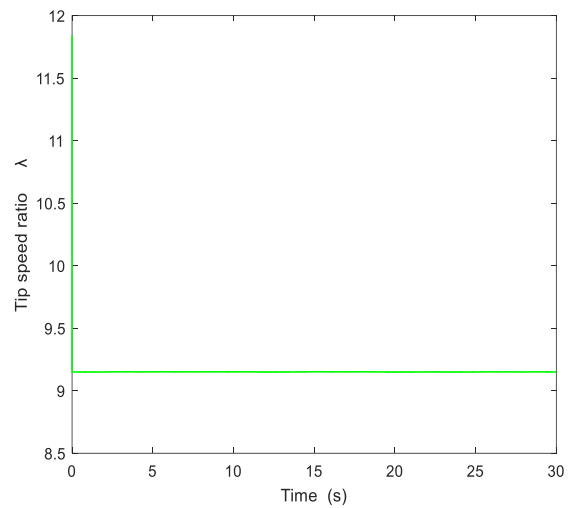


Figure (III.4) : Schéma bloc de la simulation de la commande MPPT\_TSR d'une éolienne.

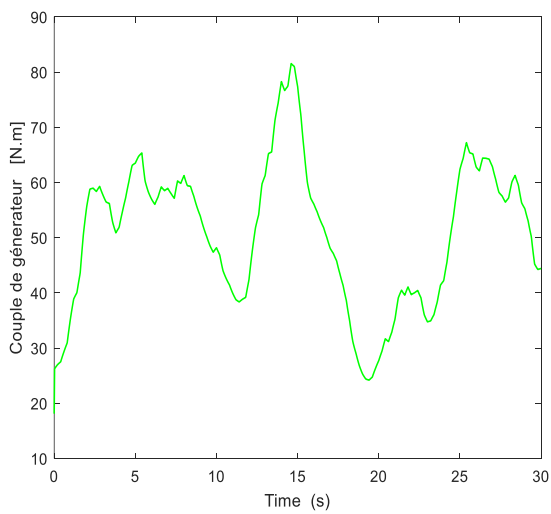
### III.3.2 Résultats de la simulation par la commande MPPT\_TSR



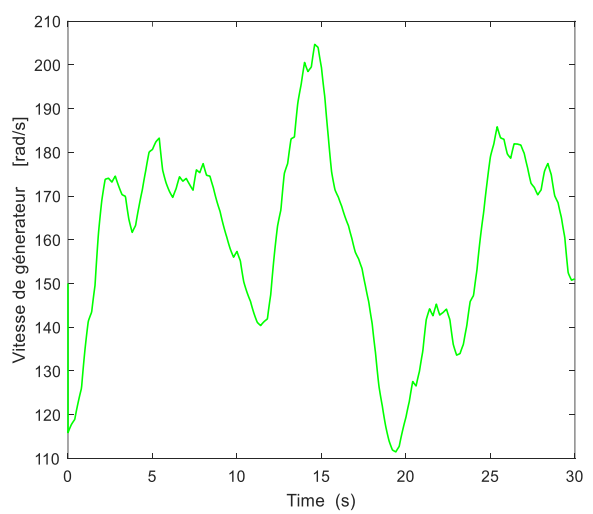
(a)



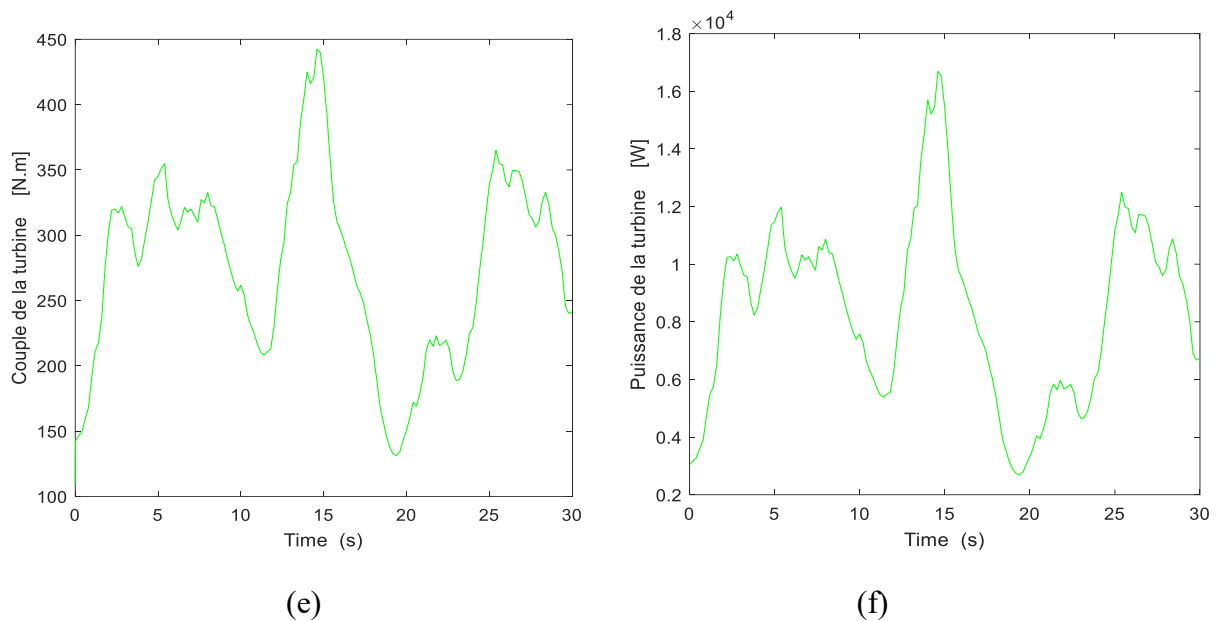
(b)



(c)



(d)



**Figure (III.5) :** Résultats du système éolien basés sur la commande MPPT\_TSR

La méthode TSR montre une précision remarquable dans le suivi du point de puissance maximale (MPP). À  $t=0$ ,  $C_p=0,44$ , il converge alors très rapidement et le facteur de puissance ( $C_p$ ) se stabilise alors à  $0,5$  malgré les variations du vent, indiquant une efficacité aérodynamique stable. (Figure III.5a), confirmant l'efficacité aérodynamique quasi maximale. A  $t=0$  la valeur de  $\lambda=12$  converge très rapidement puis le rapport de vitesse  $\lambda$  (Figure III.5b) se stabilise à  $\lambda_{opt}=9,15$ , soulignant la réactivité de l'algorithme. Le couple électromagnétique (Fig. III.5c) et la vitesse du rotor (Fig. III.5d) suivent précisément leurs références : le couple varie dynamiquement entre  $20$  et  $80 Nm$  en réponse aux rafales, tandis que la vitesse évolue linéairement de  $120$  à  $210 rad/s$  avec un retard inférieur à  $0,5 s$ . La puissance de la turbine (Fig. III.5f) reflète la sensibilité cubique au vent : elle fluctue entre  $0,3 \times 10^4 W$  (vent faible) et  $1,7 \times 10^4 W$  (rafales de vent à  $t=15 s$ ). Le couple mécanique (Fig. III.5e) atteint  $450 Nm$  en pointe et suit la configuration du vent.

### III.4 Commande par algorithme Perturbation et Observation (P&O)

Parmi les algorithmes les plus utilisés pour la recherche du point de puissance maximale, nous citons : l'algorithme de perturbation et observation. L'algorithme « P&O » de MPPT est surtout utilisé, en raison de sa facilité de mise en œuvre.

La seule difficulté qui peut nous faire face, est le choix de la valeur de que nous devons soustraire ou ajouter à la référence, afin d'atteindre le point de puissance maximale [87]:

Si «  $\Delta\Omega$  » est grande par rapport à celle optimale : l'algorithme de MPPT sera rapide, mais caractérisé par une ondulation assez importante (la vitesse du point de puissance maximale oscillera autour de «  $\Omega_{ref} + \Delta\Omega$  » et «  $\Omega_{ref} - \Delta\Omega$  »)

Si «  $\Delta\Omega$  » est petite par rapport à celle optimale : l'algorithme de MPPT sera très long et la vitesse

finale de référence sera atteinte qu'après un temps très important (exploitation minimale de la puissance pendant longtemps).

Pour cela, nous devons choisir la valeur d'une façon relative et non pas absolue, relative en fonction de la dérivée de la puissance par rapport à la vitesse de la machine :

$$\Delta\Omega = \left(\frac{d\rho}{d\lambda}\right) / C = \frac{P_k - P_{k-1}}{C(\Omega_k - \Omega_{k-1})} \quad (\text{III.6})$$

$C$  : Coefficient d'ajustement du système avec l'algorithme de MPPT, de sorte que :

$$\frac{P_k - P_{k-1}}{C \cdot (\Omega_k - \Omega_{k-1})} < \Delta\Omega_{max} = 3 \frac{rd}{s} \quad (\text{III.7})$$

Il reste le temps d'échantillonnage «  $T_E$  » de l'algorithme MPPT (la durée de l'application d'une référence de vitesse «  $\Omega_{ref} + \Delta\Omega$  »), il dépend de la rapidité du système.[87].

L'organigramme assurant le déroulement de l'algorithme « P&O » est illustré comme suite :

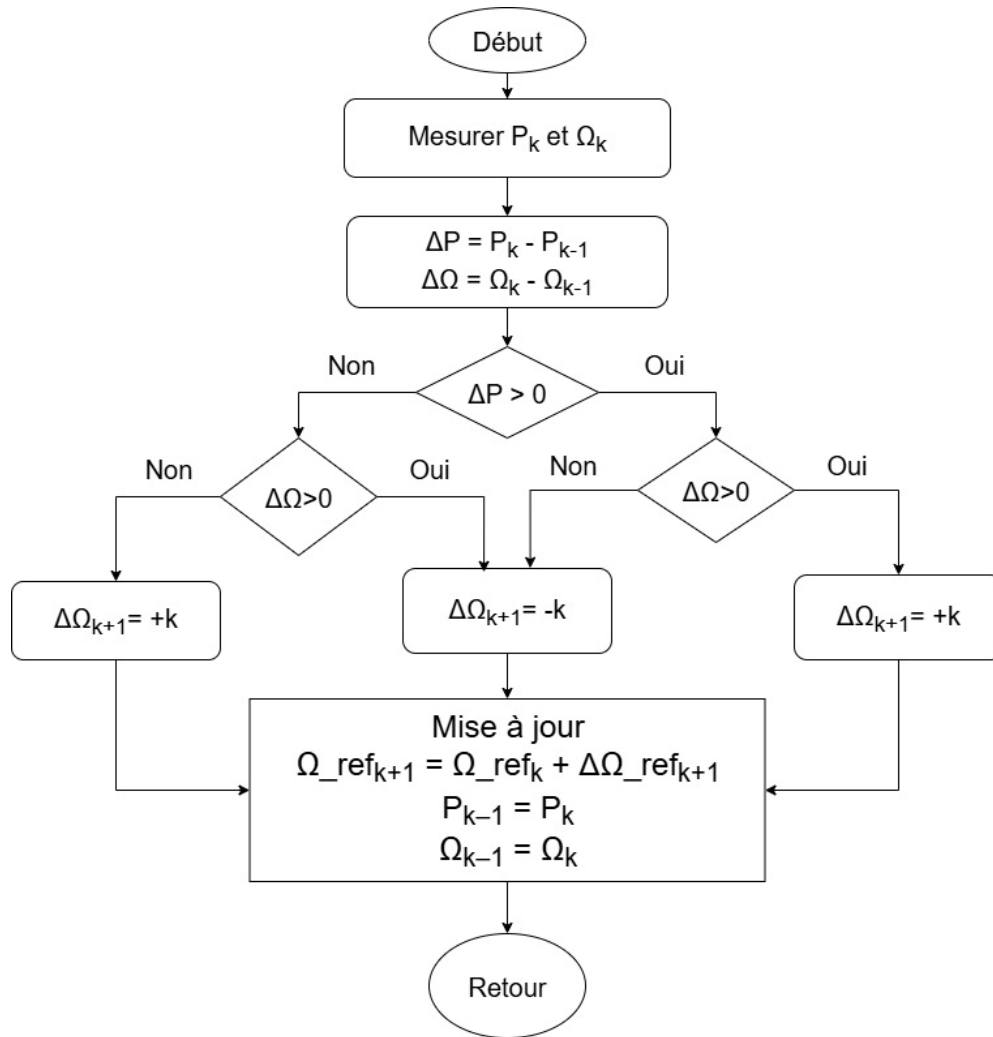


Figure (III.6) : Organigramme de la méthode P&O conventionnelle [88].

### III.4.1. Simulation de la commande MPPT\_P&O

La figure III.6 montre le schéma bloc de la simulation de la commande MPPT Perturbation et Observation (P&O) d'une éolienne.

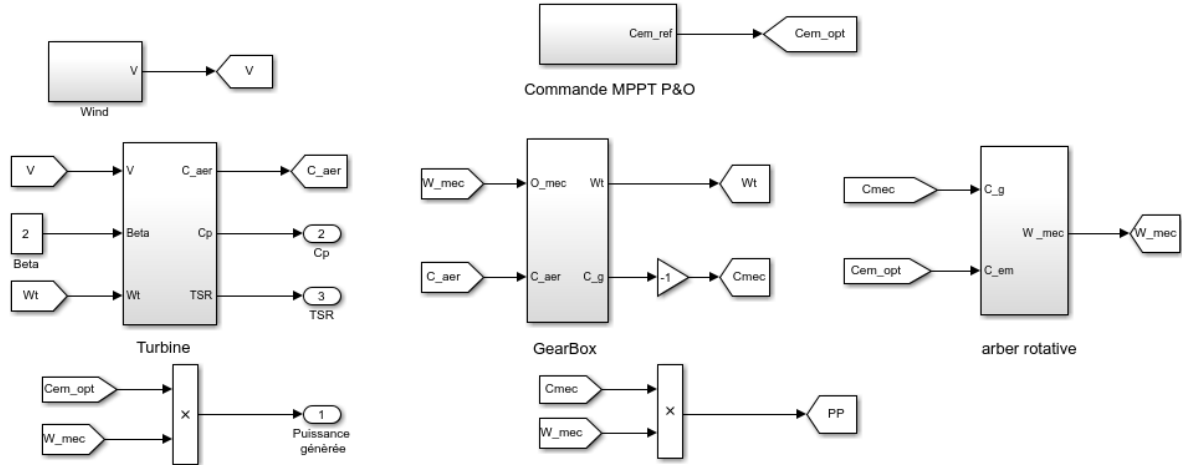
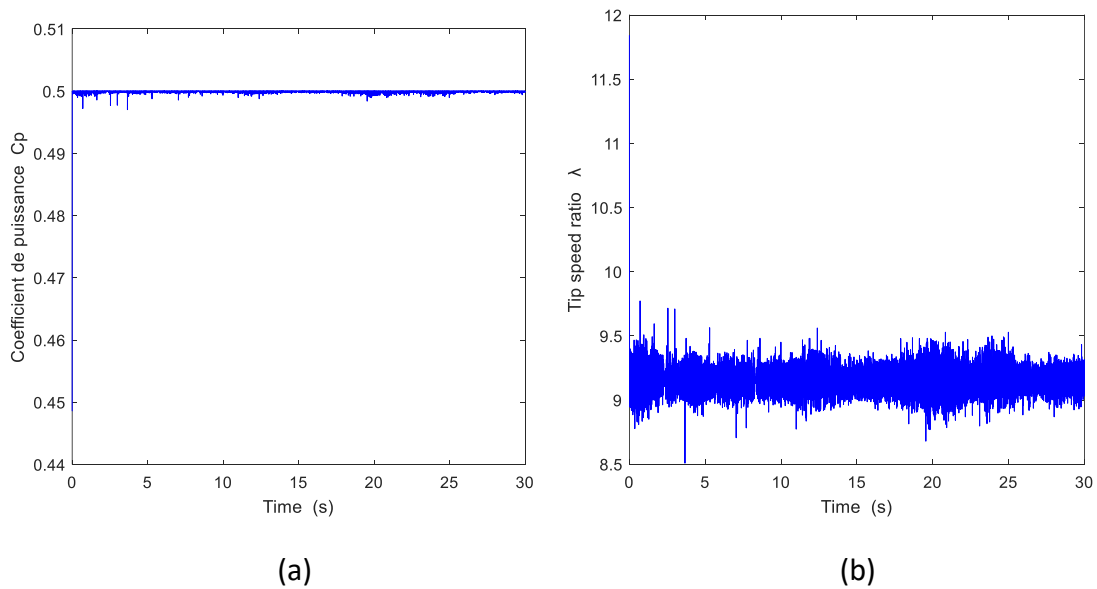
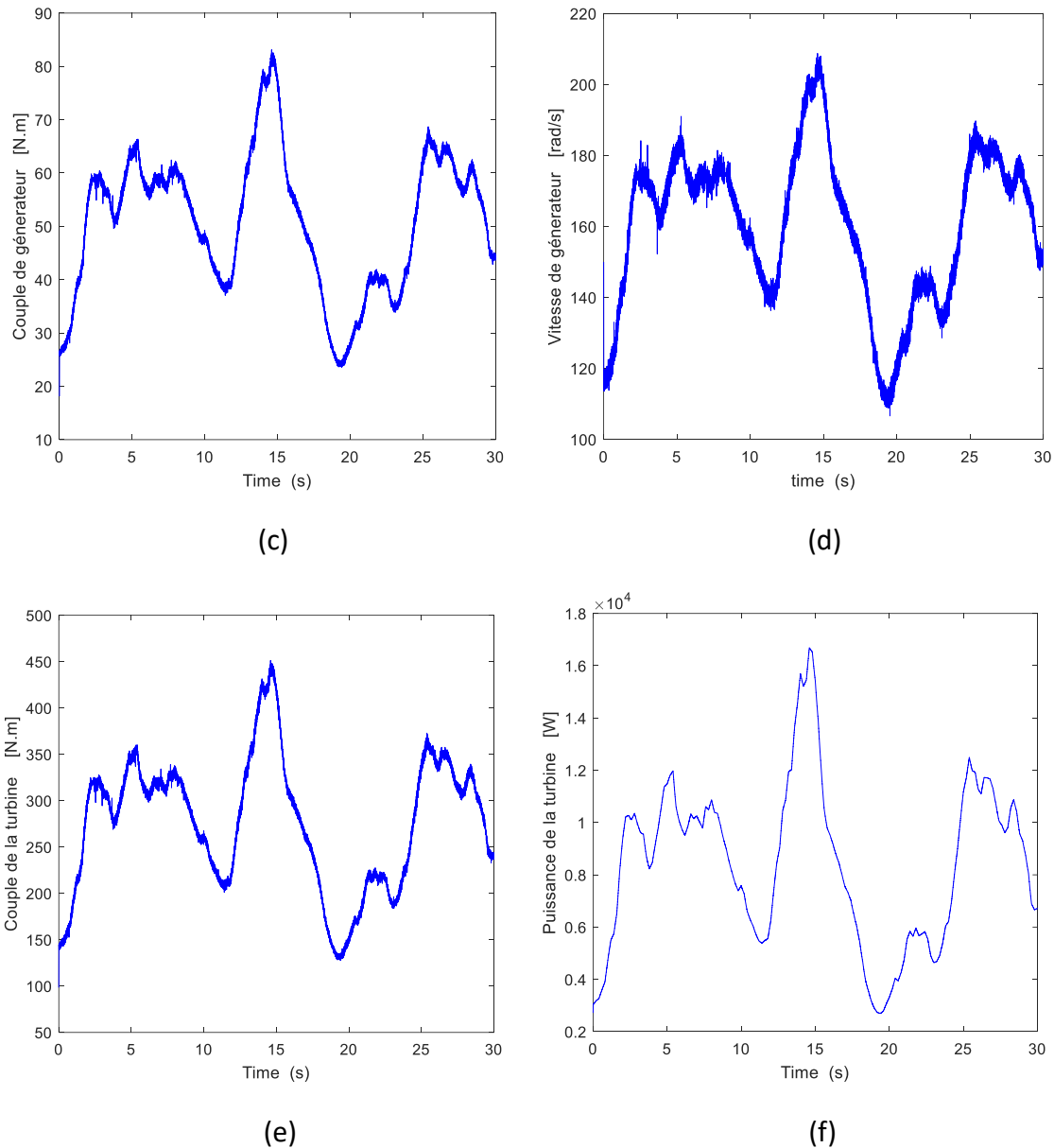


Figure (III.7) : Schéma bloc de la simulation de la commande MPPT\_P&O d'une éolienne.

### III.4.2 Résultats de simulation et discussion





**Figure (III.8) :** Résultats du système éolien basées sur la commande MPPT\_P&O

L'algorithme P&O présente des oscillations caractéristiques dues au pas de perturbation  $\Delta\Omega$ . Le coefficient  $C_p$  (Fig. III.8a) fluctue entre  $0.448$  et  $0.5$ , induisant une perte d'efficacité de  $\sim 5\%$ . Le rapport  $\lambda$  (Fig. III.8b) dévie périodiquement de  $\lambda_{opt}$  avec des écarts atteignant  $15\%$ , particulièrement sous vents turbulents. Le couple générateur (Fig. III.8c) et la vitesse rotorique (Fig. III.8d) affichent des ondulations prononcées : le couple varie entre  $20$  et  $85 \text{ N.m}$  avec un retard d'ajustement ( $< 1 \text{ s}$ ), tandis que la vitesse oscille progressivement ( $110\text{--}205 \text{ rad/s}$ ), culminant à  $t \approx 15 \text{ s}$  lors des incréments de puissance. La puissance turbine (Fig. III.8f) subit des sauts brutaux ( $1.7 \times 10^4 \text{ W}$  entre  $t = 15\text{--}18 \text{ s}$ ), et le couple mécanique (Fig. III.8e) atteint  $450 \text{ N.m}$  lors des rafales, soulignant la sensibilité aux variations de vent. La présence de grosses ondulations augmente les contraintes mécaniques.

### III.5 Commande par Logique Floue MPPT\_LFC

La logique floue est plus proche du raisonnement humain et du langage naturel que les systèmes logiques traditionnels. Elle permet de traduire une méthode de contrôle linguistique basée sur les connaissances humaines en un schéma de contrôle automatique [89]. Sa capacité à traiter des informations réelles incohérentes et imprécises la rend adaptée à une grande diversité d'applications. En particulier, la méthodologie de la FLC semble très efficace lorsque les processus sont très complexes à analyser par des techniques conventionnelles ou lorsque les sources de données accessibles sont interprétées de manière imprécise ou avec des incertitudes [90]. La FLC peut donc être considérée comme une étape vers un compromis entre le contrôle mathématique précis traditionnel et les procédures modernes de prise de décision de type humain.

Diverses études [91,92] ont été présentées dans la littérature, utilisant la FLC pour concevoir des approches MPPT, seules ou combinées à d'autres techniques. Le principal atout de ces contrôleurs intelligents réside dans la possibilité de modifier automatiquement leurs paramètres en fonction de toute modification des paramètres du système ou de la vitesse du vent, sans connaissance préalable, ni capteur ni estimateur. Les performances du FLC sont excellentes : cependant, elles dépendent essentiellement des connaissances de l'opérateur pour choisir les entrées et sorties appropriées, le nombre et le niveau de fréquences pulsées (MF) et définir la base de règles. Cependant, l'encombrement mémoire limite son application.

En termes simples, le MPPT tente de rapprocher le point de fonctionnement d'une éolienne du point de puissance maximale (MPP). Mathématiquement, cela revient à trouver le point où la dérivée  $dP_{out}/d\omega_m$  est nulle. En pratique, un système numérique où la puissance de sortie et la vitesse sont échantillonnées à des intervalles de temps consécutifs  $k-1$  et  $k$  est utilisé pour suivre le MPP du système éolien. Nous définissons d'abord la fonction d'erreur comme suit : [92]

$$e(k) = \frac{\Delta P_{out}(k)}{\Delta \omega_m(k)} = \frac{P_{out}(k) - P_{out}(k-1)}{\omega_m(k) - \omega_m(k-1)} \quad (III.8)$$

Un FLC conventionnel de type PI (FLC-PI) suffit parfaitement à remplir ce rôle, où la sortie correspond à la variation de la commande. De plus,  $K_e$  et  $K_{\Delta e}$  sont respectivement les facteurs d'échelle de l'erreur et de sa variation. Ainsi, en utilisant ces facteurs, les signaux d'entrée sont transférés de l'univers réel du discours vers l'intervalle  $[-1,1]$ . En fait, une attention particulière est portée au réglage du facteur d'échelle de sortie, appelé  $K_C$ , car il a un effet prépondérant sur les performances du système.

Un tableau de règles est utilisé avec sept MF pour chaque entrée et sortie ; quarante-neuf règles sont également présentées dans le tableau 3.2 [93]. Cette table de règles contient zéro MF

dans chaque carré de la droite antidiagonale, ce qui équivaut à la droite de convergence naturelle qualitative [94]. La méthode d'inférence de type Mamdani, associée à la méthode de défuzzification du centre de l'aire, est utilisée pour générer la sortie du contrôleur.

Le choix de la forme, du nombre et de la plage des facteurs de modulation et des facteurs d'échelle est une simple question d'expérience. Les acronymes NB, NM et NS signifient : Négatif Grand, Négatif Moyen, Négatif Petit ; PB, PM et PS signifient également : Positif Grand, Positif Moyen et Positif Petit.

Tableau 3.2: Rule base table for FLC-PI algorithm

$\Delta u$		$e$						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$\Delta e$	PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB
	PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
	PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
	Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z

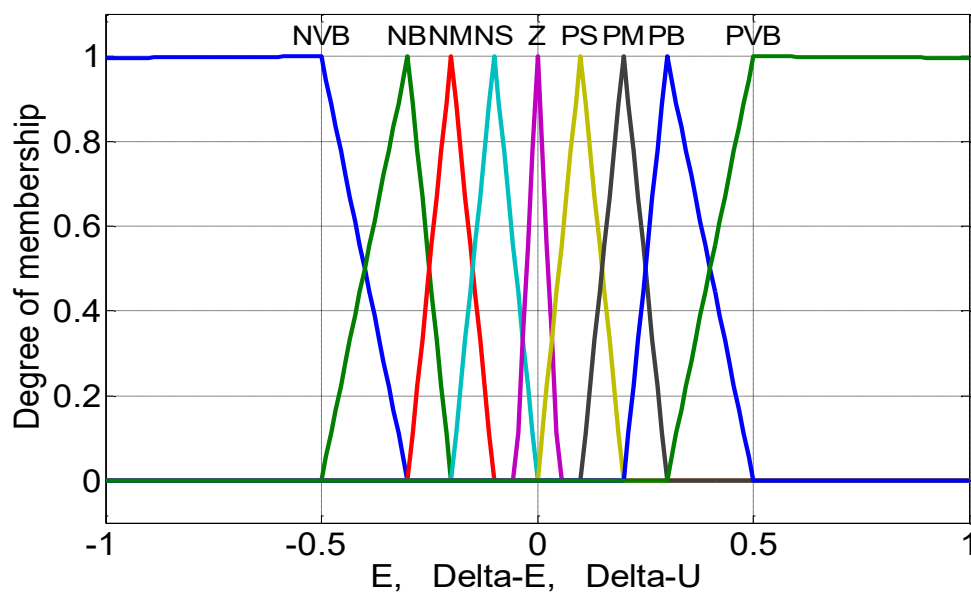


Figure (III.9) : Entrées et sorties MF généralement utilisées dans les applications de contrôle.

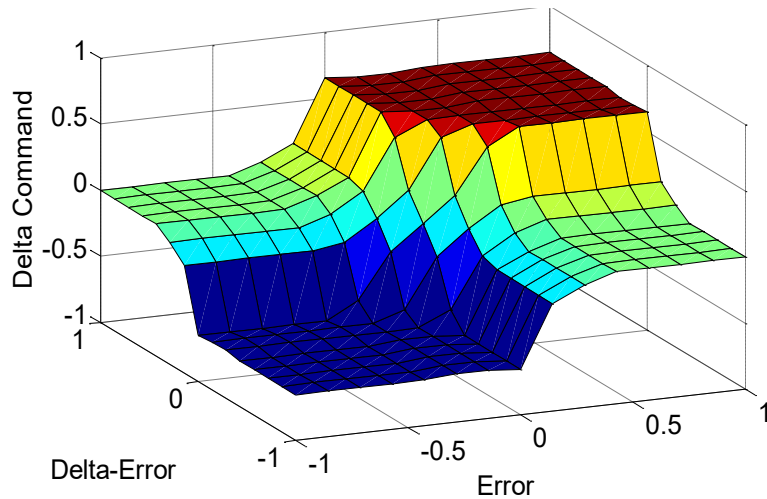


Figure (III.10) : Surface des règles d'inférence.

### III.5.1 Simulation de la commande MPPT\_FLC

La figure (III.11) montre le schéma bloc de la simulation de la commande MPPT\_FLC d'une éolienne.

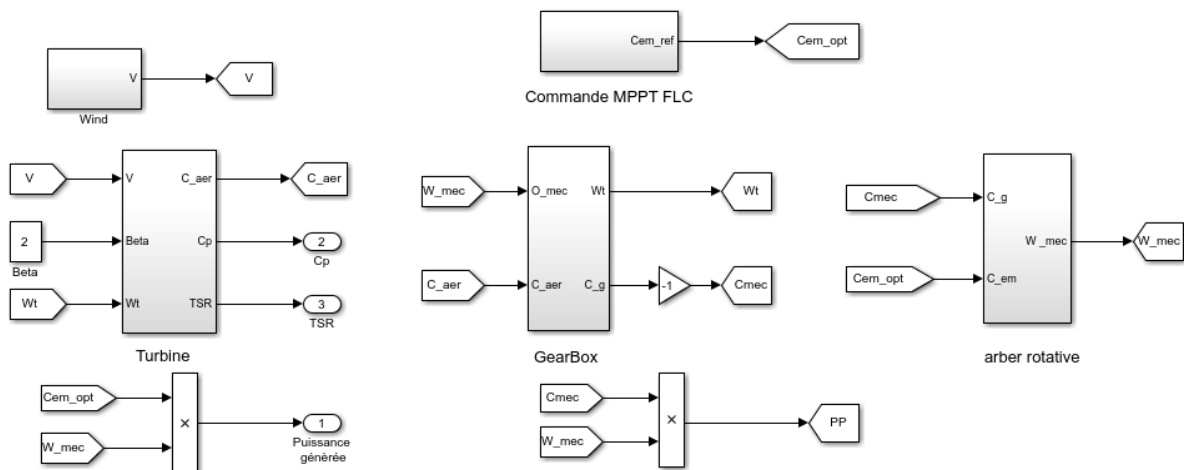


Figure (III.11) : Schéma bloc de simulation de la commande MPPT\_FLC d'un système de conversion l'énergie éolienne.

### III.5.2 Résultats de la simulation et discussion

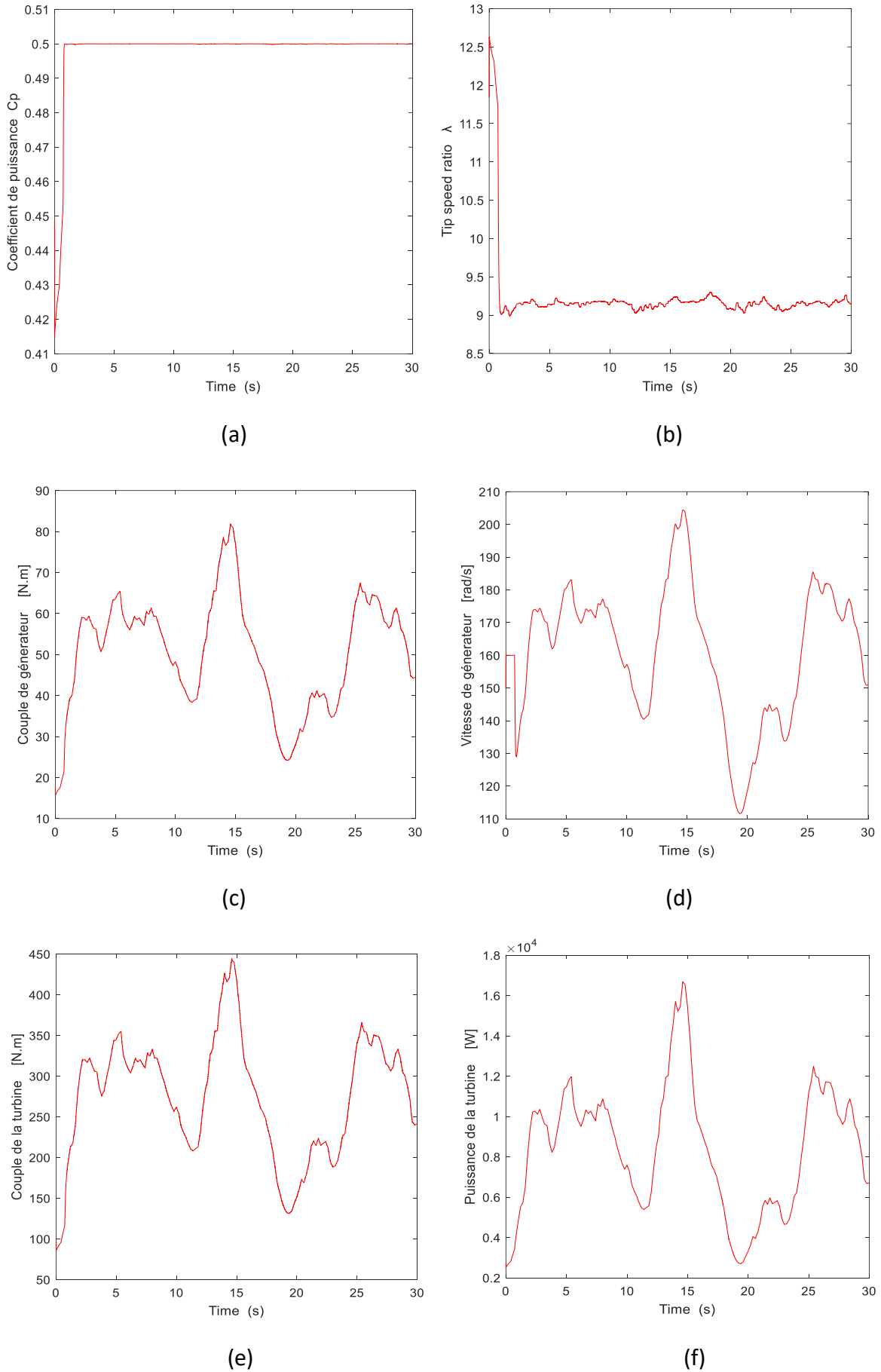
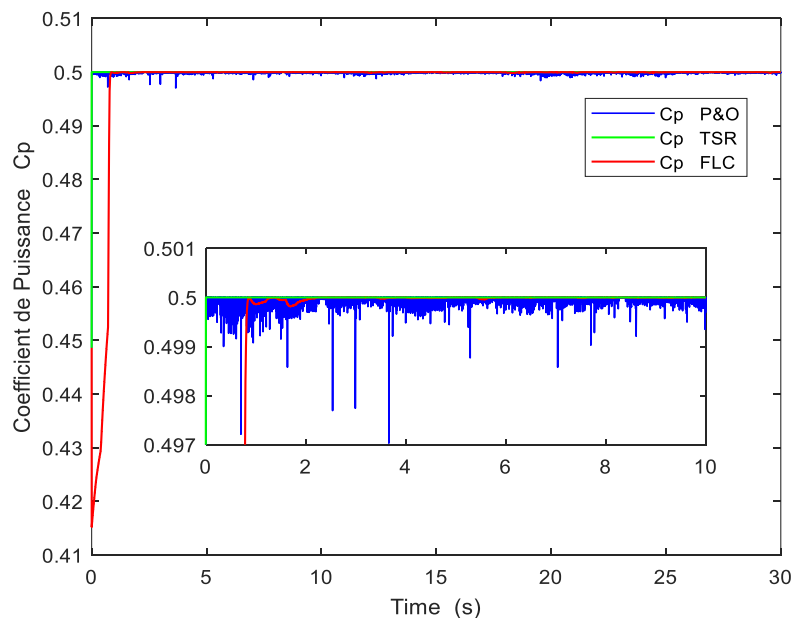


Figure (III.12) : Résultats du système éolien basées sur MPPT\_FLC

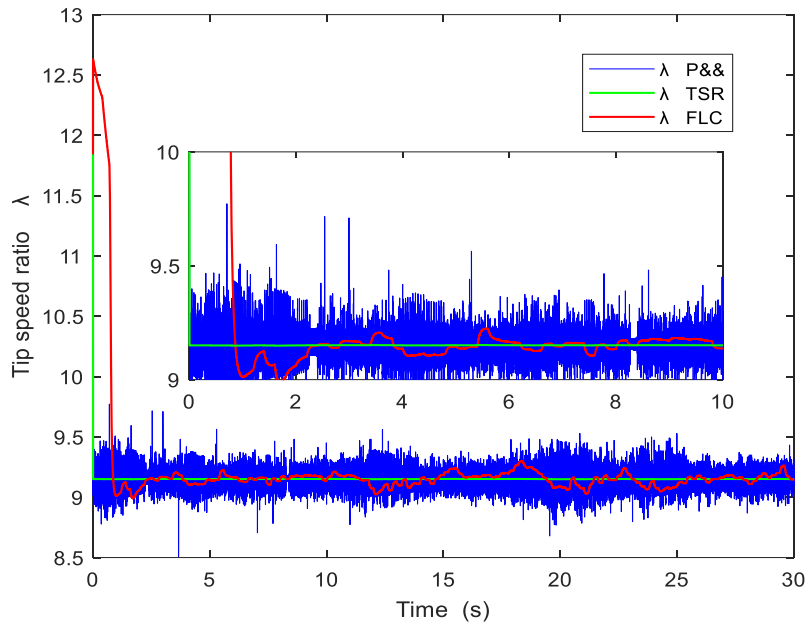
La logique floue excelle par sa robustesse adaptative sous vents variables. Le coefficient  $C_p$  démarre à  $0.415$  à  $t=0$  s (Fig. III.12a) puis converge rapidement vers maintient une valeur stable  $0.5$  avec des déviations  $< 0.5\%$ , malgré les variations de vent. Le rapport  $\lambda$  (Fig. III.12b) démarre à  $12.5$  à  $t=0$  s, puis converge rapidement vers  $\lambda_{opt}$  avec une déviation inférieure à  $3\%$  et aucune oscillation résiduelle, grâce à l'ajustement dynamique des règles floues. Le couple générateur (Fig. III.12c) et la vitesse rotorique (Fig. III.12d) éliminent quasi totalement les dépassements : le couple suit précisément les consignes avec une réponse rapide ( $\sim 1$  s), tandis que la vitesse s'adapte sans à-coups ( $110\text{--}205$  rad/s), notamment lors du pic à  $t\approx 15$  s. La puissance turbine (Fig. III.12f) est maximisée avec ondulation minimal, atteignant  $>16\ 000$  W a suivant fidèlement les variations du vent ( $t\approx 14$  s) et chutant à  $<4\ 000$  W lors des creux ( $t\approx 19$  s). Le couple de la turbine varie ( $100$  à  $450$  N.m) proportionnellement avec la vitesse du vent sur une durée de  $30$  s, Le couple turbine atteint  $450$  N.m à  $t=15$  s lors d'une rafale, démontrant sa sensibilité aux variations soudaines de vent . (Fig. III.12e), validant l'efficacité de l'inférence Mamdani.

### III.6 Comparaison entre les Trois Méthodes de Commande MPPT

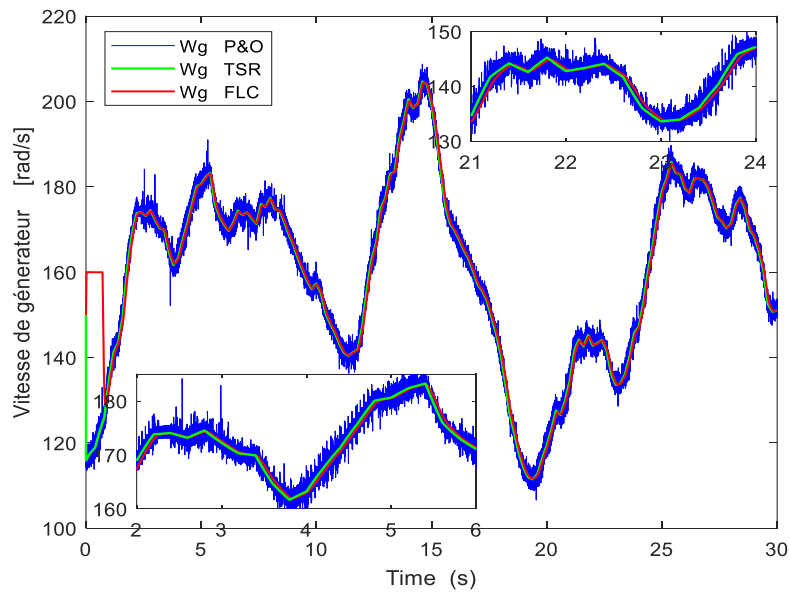
Nous allons tracer toutes les courbes des trois techniques pour faire une comparaison entre ces techniques.



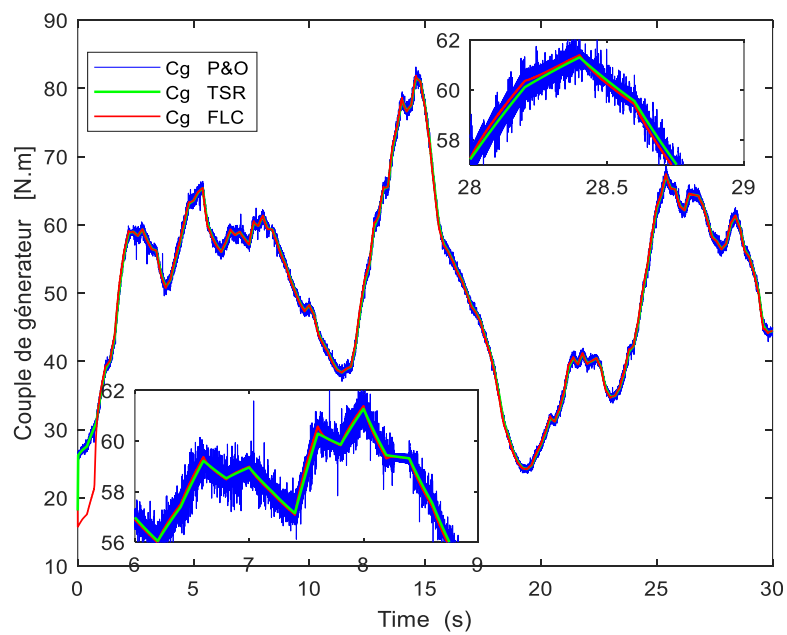
(a)



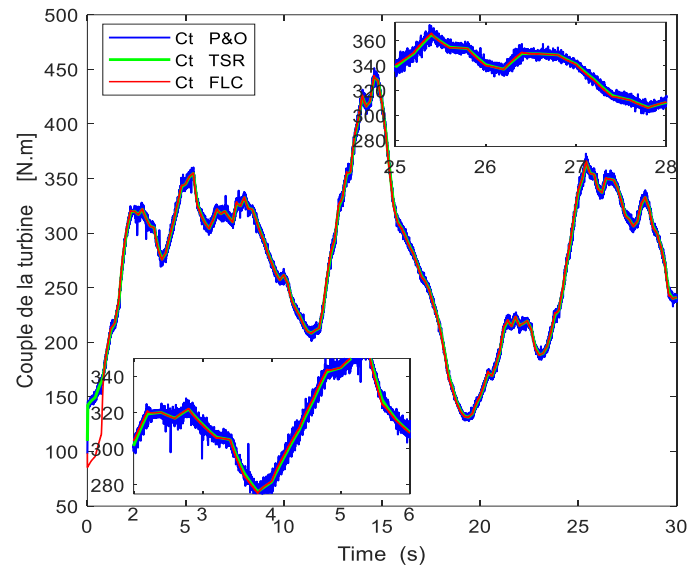
(b)



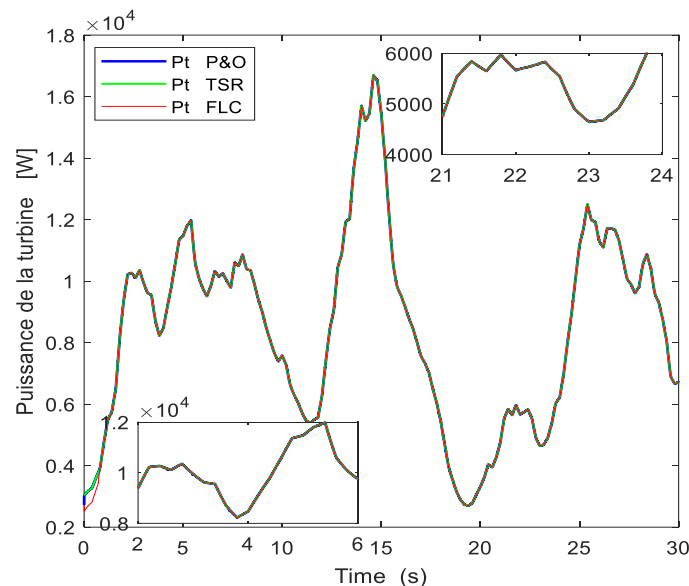
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure (III.13) : Comparaison entre les trois commandes MPPT (TSR, P&amp;O et FLC)

### III.6.1 Discussion

#### Figure (a) : Facteur de puissance ( $C_p$ )

La commande MPPT\_TSR présente une convergence immédiate et stable vers la valeur optimale de  $C_p = 0,5$ , sans aucune fluctuation, même en cas de variations de vent. En revanche, la méthode P&O présente d'importantes fluctuations entre  $0,448$  et  $0,5$  (soit une perte d'efficacité d'environ  $5\%$ ), notamment lors de rafales à  $t = 15$  secondes. La commande MPPT\_FLC, après un léger retard initial ( $C_p = 0,415$  à  $t = 0$  seconde), atteint précisément  $C_p = 0,5$  et le maintient avec un écart inférieur à  $0,5\%$ . Ainsi, le TSR et le FLC garantissent tous deux une efficacité

aérodynamique optimale, tandis que la commande MPPT \_P&O subit une perte de puissance.

#### **Figure (b) : Rapport de vitesse ( $\lambda$ )**

La commande MPPT \_TSR se stabilise immédiatement à  $\lambda_{opt} = 9,15$  sans aucun écart. À l'inverse, la commande MPPT \_P&O présente des écarts allant jusqu'à  $\pm 15\%$  autour de  $\lambda_{opt}$ , notamment en cas de vents turbulents, révélant une instabilité critique.

La commande MPPT \_FLC converge rapidement vers  $\lambda_{opt}$  avec une erreur inférieure à  $3\%$  et élimine complètement les oscillations résiduelles. Le couple TSR reste le plus précis, suivi de près par la commande MPPT \_FLC, tandis que la commande MPPT \_P&O est inadapté aux environnements dynamiques.

#### **Figure (c) : Couple électromagnétique**

La commande MPPT \_TSR, le couple suit de près la référence ( $20-80 Nm$ ) avec un retard minimal ( $< 0,5 s$ ). La commande MPPT \_P&O génère d'importantes ondulations ( $20-90 Nm$ ), accompagnées de pics soudains et d'un retard de réglage d'environ  $1 s$ , ce qui entraîne des contraintes mécaniques. La commande MPPT \_FLC offre une réponse fluide et rapide (environ  $1 s$ ) sans dépassement ni oscillation. Par conséquent, la commande MPPT \_TSR et la commande MPPT \_FLC assurent un contrôle précis, tandis que la commande MPPT \_P&O réduit la robustesse du système.

#### **Figure (d) : Vitesse du rotor**

La commande MPPT \_TSR permet des variations de vitesse linéaires et rapides (de  $120$  à  $210 rad/s$ ) avec un délai minimal. La commande MPPT \_P&O présente des oscillations progressives ( $110-205 rad/s$ ), atteignant un pic lors des rafales de vent ( $t \approx 15 s$ ).

La commande MPPT \_FLC allie fluidité et stabilité ( $110-205 rad/s$ ), même lors de variations brusques.

La commande MPPT \_TSR est le plus rapide, la commande MPPT \_FLC le plus stable, tandis que la commande MPPT \_P&O présente une réponse lente et irrégulière.

#### **Figure (e) : Couple mécanique de la turbine**

La commande MPPT \_TSR atteint  $450 Nm$  en permanence lors des vents de pointe. Bien que la commande MPPT \_P&O atteigne  $450 Nm$ , il amplifie les contraintes par des oscillations parasites. La commande MPPT \_FLC suit le cube de la vitesse du vent ( $100-450 Nm$ ) de manière régulière et proportionnelle, améliorant ainsi la réponse dynamique. Ainsi, la commande MPPT \_FLC réduit les contraintes mécaniques, contrairement au P&O qui les aggrave.

#### **Figure (f) : Puissance de la turbine**

La commande MPPT \_TSR reflète fidèlement la loi cubique ( $0,3 \times 10^4 \rightarrow 1,7 \times 10^4 W$ ) avec des transitions rapides. La commande MPPT \_P&O subit des sauts soudains (par exemple,  $1,7 \times 10^4$

W à l'instant  $t = 15-18$  secondes), mais gaspille de l'énergie lors des ralentissements. La commande MPPT \_FLC maximise la puissance avec une ondulation minimale ( $> 16\,000\text{ W}$  en rafales,  $< 4\,000\text{ W}$  en ralentissements). Ainsi, La commande MPPT \_FLC extrait le plus de puissance, la puissance de la turbine (TSR) reste précise et le P&O subit des pertes dues à ses oscillations.

### III.7 Performances des Algorithmes MPPT par Simulation

Après avoir obtenu ces résultats, nous vérifierons si ces résultats atteignent ce qui est indiqué dans le tableau 2.2 du chapitre 2 :

Les résultats de simulation des trois algorithmes MPPT (TSR, P&O, FLC) corroborent rigoureusement les caractéristiques comparatives du Tableau 2.2 (Chapitre 2).

En termes d'efficacité, le TSR et la FLC atteignent un coefficient de puissance quasi optimal ( $C_p=0,5$ ) avec des écarts inférieurs à  $0,5\%$ , validant leur classement en "haute efficacité", tandis que les oscillations du  $C_p$  ( $0,448-0,5$ ) du P&O confirment son "efficacité faible" avec  $\sim 5\%$  de perte énergétique. Concernant les oscillations au MPP, le TSR et la FLC n'affichent aucune fluctuation résiduelle sur  $\lambda$  ou le couple ("Non" dans le tableau), contrairement au P&O dont les écarts atteignent  $\pm 15\%$  autour de  $\lambda_{opt}$  ("Oui").

Pour la vitesse de convergence, la stabilisation immédiate du TSR ( $< 0,5\text{ s}$ ) correspond au "Plus haut", la convergence rapide (après léger retard initial) de la FLC s'aligne sur "Moyen", et la réponse lente du P&O justifie "Lent". Sous vent fluctuant, la robustesse adaptative de la FLC (déviations de  $\lambda < 3\%$ , puissance maximisée) valide ses "Plus hautes" performances, la précision du TSR (malgré sa dépendance à l'anémomètre) correspond à "Modérément passable", et l'instabilité du P&O en turbulence reflète "Modérément équitable".

Les observations sur la complexité concordent également : implémentation simple mais réglage manuel du P&O ("Simple"), nécessité d'expertise pour les règles de la FLC ("Plus haut"), et simplicité structurelle du TSR compensée par son capteur ("Moins"). Le besoin en anémomètre est explicite pour le TSR ("Oui") mais absent pour le P&O et la FLC ("Non"/"Cela dépend"). Les coûts suivent aussi le tableau : l'anémomètre rend le TSR "Très élevé", le P&O reste "Modéré", et la FLC justifie "Plus haut" par son surcoût de développement.

Enfin, la FLC supprime les contraintes mécaniques via des transitions fluides, tandis que les oscillations du P&O les amplifient, et la précision du TSR dépend de conditions idéales. Ces résultats valident intégralement le Tableau 2.2 : la FLC excelle en robustesse malgré sa complexité, le TSR offre la précision à coût élevé, et le P&O, bien que simple, présente des inefficacités dynamiques le rendant inadapté aux environnements turbulents.

### **III.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude comparative entre trois stratégies de commande MPPT appliquées à un système de conversion de l'énergie éolienne : la commande MPPT \_TSR, la commande MPPT \_P&O et la commande MPPT \_FLC. Chaque commande a été implémentée sur un même modèle d'éolienne sous l'environnement Matlab/Simulink, avec un profil de vent variable, afin d'en évaluer les performances dynamiques.

Les résultats obtenus ont mis en évidence les points forts et les limites de chaque méthode. La commande **TSR** s'est distinguée par sa rapidité et sa précision, mais nécessite une mesure exacte de la vitesse du vent. L'algorithme **P&O** a montré des performances acceptables, bien qu'entravées par des oscillations autour du point de puissance maximale. La commande **FLC**, quant à elle, a démontré une grande robustesse, une excellente stabilité et une efficacité énergétique supérieure, même en présence de variations rapides du vent.

Ainsi, cette étude confirme l'intérêt croissant pour les techniques de commande intelligentes, telles que la logique floue, dans l'optimisation de suivi du point de puissance maximale des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

*Conclusion  
générale*

---

## Conclusion Générale

Ce mémoire a porté sur une étude approfondie des systèmes de conversion d'énergie éolienne, avec un accent particulier sur les stratégies de contrôle visant à optimiser l'extraction de l'énergie éolienne disponible, notamment grâce au suivi du point de puissance maximale (MPPT). Face à la variabilité énergétique, l'exploitation efficace de l'énergie éolienne représente une alternative durable aux sources conventionnelles, ce qui justifie l'intérêt porté à la commande intelligente de ces systèmes.

Dans un premier temps, un état de l'art a été mené pour présenter les principales architectures des chaînes de conversion éolienne, les types d'éoliennes couramment utilisées (notamment à axe horizontal) ainsi que les génératrices adaptées aux régimes de fonctionnement à vitesse fixe et variable. Cette revue a également permis de mettre en évidence les enjeux techniques liés à la nature intermittente et imprévisible de la ressource éolienne.

La deuxième phase de ce travail s'est concentrée sur la modélisation détaillée des systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable et les techniques d'extraction du maximum de puissance (MPPT) couramment utilisées. Cette modélisation a fourni une base solide pour l'intégration et l'évaluation des techniques MPPT, en reproduisant fidèlement le comportement dynamique du système soumis à des conditions de vent réalistes.

La dernière partie du mémoire a été consacrée à la simulation comparative de trois algorithmes de commande MPPT, à savoir : la command MPPT\_TSR, la command MPPT\_P&O, et la command MPPT\_FLC). Ces algorithmes ont été testés dans un environnement de simulation Matlab/Simulink en utilisant un même profil de vent afin de garantir l'équité de comparaison.

Les résultats obtenus montrent que :

La command MPPT\_TSR se distingue par sa précision et sa rapidité de suivi, mais son efficacité dépend largement de la qualité de la mesure de la vitesse du vent, ce qui peut poser problème dans des environnements turbulents.

La command MPPT\_P&O, connu pour sa simplicité de mise en œuvre, présente toutefois des oscillations autour du point de puissance maximale, ce qui engendre des pertes énergétiques et peut affecter la durabilité du système.

La command MPPT\_FLC, quant à elle, s'impose comme la solution la plus performante. Elle se distingue par son adaptabilité aux changements de conditions, sa robustesse face aux variations rapides du vent, et sa stabilité dans le suivi du MPP, sans recourir à des capteurs supplémentaires.

---

En définitive, les travaux menés dans ce mémoire démontrent que l'utilisation de techniques de commande intelligentes, telles que la logique floue, constitue une avancée significative pour améliorer le rendement et la fiabilité des systèmes éoliens. Cette conclusion ouvre des perspectives intéressantes pour l'intégration de l'intelligence artificielle, de l'apprentissage automatique ou encore des approches hybrides dans les futures générations de systèmes de conversion éolienne.

## Références Bibliographiques

---

- [1] K. Thakre, « dynamic performance of dfig wind turbine under unbalance grid fault condition» Rourkela 2009
- [2] Guy Cunty, « Eolienne et aérogénérateur, guide de l'énergie éolienne », © Edissud, Aixen-provence, 2011, [www.edisud.com](http://www.edisud.com).
- [3] Mayouf M, « Contribution à la réalisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent ».Mémoire de magister de l'université de Batna, département d'électrotechnique 2008.
- [4] Historique des éoliennes.  
<http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>
- [5] M. R.Patel «Wind and solar power systems, design analisys and Operation » Taylor and Francis, 2006.
- [6] S. TURBINE, «Sway Turbine | SWAY TURBINE UNVEILS ST10 DETAILS, » October 2012. [En ligne]. Available : <http://www.swayturbine.no/?page=219.V>
- [7] rapport sur le statut mondial des énergies Renouvelables 2016.  
[www.ren21.net/gsr](http://www.ren21.net/gsr)
- [8] The World Wind Energy Association WWAE, «Half year 2012 report, » October 2012.
- [9] N. Kasbadji Merzouk, « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie? », Bulletin des Energies Renouvelables, Publication du Centre de développement des Energies Renouvelables, N°14, pp. 6 – 7, Décembre 2008.
- [10] E. Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd ed. Springer, 2005.
- [11] The World Wind Energy Association, Half-year Report 2011.
- [12] Equilibres, La lettre de la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz, N 12, Mars 2011.
- [13] Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, mars 2011.
- [14] O. De Vries, « On the theory of the horizontal axis wind turbine », Ann. Rev. Fluid. Mech.1983, 15, pp. 77-96.
- [15] J. Martin, « Energies éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [16] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne,  
« <http://www.windpower.org/fr/core.htm> ».
- [17] Djeriri, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle »; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel- Abbès, Algérie, 2015.
- [18] E. BOUNADJA, « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en régime sature », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algerie, Décembre 2017.
- [19] M. Loucif, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd,

## Références Bibliographiques

---

Tlemcen, 2016.

[20] L.Brandon,E.Giorgio Bacelli, « Floating Offshore Vertical-Axis Wind Turbine System Design Studies and Opportunities», Sandia National Laboratories, SAND2018-8138 C.

[21] U. Schmidt Paulsen, H. Aagård Madsen, J. Henri Hattel, I. Baran, P. Horlyck Nielsen, « Design Optimization of a 5 MW Floating Offshore Vertical-axis Wind Turbine», Energy Procedia, Volume 35, 2013, Pages 22-32, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.155>.

[22] K. Adeseye Adeyeye, N. Ijumba, and J. Colton, « The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine », IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 801, 2021 11th International Conference on Future Environment and Energy 28-30 January 2021, Tokyo, Japan.

[23] E. Hau et H. von Renouard, Wind Turbines. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. doi: 10.1007/3-540-29284-5.

[24] J. Tekobon, M. El Mokadem, « Système multi physique de simulation pour l'étude de la production de l'énergie basée sur le couplage éolien offshore-hydrolien », Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2006, p. 187.

[25] A. Chemidi, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, Algérie, 2015. », 2015, doi: 10.13140/RG.2.2.20191.20641.

[26] B. Beltran, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, Juillet 2010.

[27] R. Philippe, L'énergie du Vent. Les éoliennes au service des hommes et de leur planète.Philippe Rocher. 160 pages, parution le 23/01/2008.

[28] M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas, et J. Rodriguez, « Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, n° 4, p. 108111095, avr. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2103910.

[29] Z. Chen, J. M. Guerrero, et F. Blaabjerg, « A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, n° 8, p. 185911875, août 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2017082.

[30] G. Abad, L. Jesus, R. Miguel, M. Luis Marroyo, et I. Grzegorz, « Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation | Wiley », New Jersey, United States (2011), *Wiley.com*.

[31] R. Ramakumar, A. Naeter, « Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas », Power Engineering Society General Meeting IEEE, 6-12 June 2004, Vol.2, PP. 2103 – 2105.

[32] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.

[33] L. Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review,Summer /Eté 2002, PP. 1-5.

## Références Bibliographiques

---

- [34] B. Multon, G. robin, M. Ruellan et H. Ben Ahmed, « Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire : Perspectives offertes par les ressources renouvelables », Revue 3EI, no36 Mars 2004, pp. 1-14.
- [35] S. Scott, M. Polikarpova, R. Pekka, J. Alexandrova, J. Pyrhönen, N. Janne, M. Aki et B. Jari, « Direct-drive permanent magnet generators for high-power wind turbines: Benefits and limiting factors. Renewable Power Generation », (2012), IET. 6. 1-8. 10.1049/iet-rpg.2010.0191.
- [36] Heier, S. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems, 3rd ed., Wiley, 2014.
- [37] Dida A, Ben Attous D. Doubly-fed induction generator drive based WECS using fuzzy logic controller. Front Energy 2015;9(3):272–81 .
- [38] F. PITIERS »Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
- [39] A.GAILLARD. «Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service ». Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I ,2010
- [40] GASSAB Samir «Modélisation d'une centrale a énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Sétif, 2011.
- [41] Mousa, HH; Youssef, AR; Mohamed, EE Algorithme MPPT P&O à pas variable pour l'extraction optimale de puissance d'un système de production éolienne multiphasé basé sur PMSG.Int. J. Electr. Power Energy Syst.2019,108, 218–231.
- [42] Kumar, D.; Chatterjee, K. Un examen des algorithmes MPPT conventionnels et avancés pour les systèmes d'énergie éolienne.Renouveler. Soutenir. Révision énergétique.2016,55, 957–970.
- [43] Abdullah, MA ; Yatim, AH ; Tan, CW ; Saidur, R. Un examen des algorithmes de suivi du point de puissance maximale pour les systèmes d'énergie éolienne. Renouveler. Soutenir. Révision énergétique.2012,16, 3220–3227.
- [44] Ali, MM; Youssef, AR; Ali, AS; Abdel-Jaber, GT Algorithme MPPT PO à pas variable utilisant un contrôle adaptatif de référence de modèle pour une extraction de puissance optimale.Systèmes d'énergie électriques trans. int.2020,30, 1–21.
- [45] Heydari, M. ; Smedley, K. Comparaison des méthodes de suivi du point de puissance maximale pour les systèmes éoliens de moyenne à forte puissance. Dans les actes de la 20e Conférence sur la distribution d'énergie électrique (EPDC), Zahedan, Iran, 28-29 avril 2015 ; p. 184-189. CrossRef]
- [46] Kazmi, SMR ; Goto, H. ; Guo, HJ ; Ichinokura, O. Un nouvel algorithme pour un suivi rapide et efficace du point de puissance maximale sans capteur de vitesse dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne.IEEE Trans. Ind. Électron.2011,58, 29–36.
- [47] Tan, K.; Islam, S. Stratégies de contrôle optimales dans la conversion d'énergie du système d'éolienne PMSG sans capteurs mécaniques. IEEE Trans. Convers. d'énergie2004,19, 392–399.
- [48] Zhu, Y.; Cheng, M.; Hua, W.; Wang, W. Un nouveau contrôle de suivi du point de puissance maximale pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne à entraînement direct à aimant permanent.Énergies2012,5, 1398–1412.
- [49] Castelló, J.; Espí, JM; García-Gil, R. Détails de développement et évaluation des performances d'un émulateur d'éolienne.Renouveler l'énergie2016,86, 848–857.
- [50] Taveiros, FE; Barros, LS; Costa, FB Contrôle par rétroaction d'état de convertisseur dos à dos des éoliennes à base de DFIG (générateur à induction à double alimentation).Énergie2015,89, 896–906.
- [51] Lahfaoui, B.; Zouggar, S.; Mohammed, B.; Elhafyani, ML Étude en temps réel du contrôle P&O MPPT pour les petits systèmes de turbines éoliennes PMSG à l'aide du microcontrôleur Arduino.Procédure

## Références Bibliographiques

---

énergétique 2017, 111, 1000–1009.

- [52] Mei, Q.; Shan, M.; Liu, L.; Guerrero, JM Une nouvelle méthode améliorée de résistance incrémentale MPPT à pas variable pour les systèmes PV. *IEEE Trans. Ind. Électron.* 2011, 58, 2427–2434.
- [53] Youssef, AR; Mousa, HH; Mohamed, EE Développement d'un algorithme MPPT P&O auto-adaptatif pour les systèmes de production éolienne avec zone de recherche concentrée. *Renouveler l'énergie* 2020, 154, 875–893.
- [54] Xia, Y.; Ahmed, KH; Williams, BW Une nouvelle technique de suivi du point de puissance maximale pour un système de conversion d'énergie éolienne basé sur un générateur synchrone à aimant permanent. *IEEE Trans. Électron de puissance.* 2011, 26, 3609–3620.
- [55] Tanaka, T.; Toumiya, T.; Suzuki, T. Contrôle de sortie par méthode de montée pour un système de production d'énergie éolienne à petite échelle. *Renouveler l'énergie* 1997, 12, 387–400.
- [56] Datta, R.; Ranganathan, VT Une méthode de suivi des points de puissance de crête pour un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable. *IEEE Trans. Convers. d'énergie* 2003, 18, 163–168.
- [57] Sachan, A.; Gupta, AK; Samuel, P. Un examen des algorithmes MPPT utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. *J. Green Eng.* 2017, 6, 385–402.
- [58] Wei, C. ; Zhang, Z. ; Qiao, W. ; Qu, L. Contrôle intelligent de l'extraction de puissance maximale pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne, basé sur l'apprentissage Q en ligne avec approximation de fonction. Dans les actes du Congrès et exposition IEEE sur la conversion d'énergie (ECCE) 2014, Pittsburgh, PA, États-Unis, 14-18 septembre 2014 ; pp. 4911-4916. [CrossRef]
- [59] Galdi, V.; Piccolo, A.; Siano, P. Conception d'un contrôleur flou adaptatif pour une extraction maximale de l'énergie éolienne. *IEEE Trans. Convers. d'énergie* 2008, 23, 559–569.
- [60] Elnaggar, M.; Abdel Fattah, HA; Elshafei, AL Suivi de la puissance maximale dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne (WECS) via des approches numériques et stochastiques. *Énergie* 2014, 74, 651–661.
- [61] Nagarajan, K. Un algorithme prédictif d'escalade pour un problème d'optimisation multivariable à valeur réelle comme le réglage PID. *Int. J. Mach. Apprendre. Comput.* 2018, 8, 14–19.
- [62] Masood, NA; Yan, R.; Saha, TK Un nouvel outil pour estimer le niveau maximal de pénétration de l'énergie éolienne : dans la perspective de l'adéquation de la réponse en fréquence. *Appl. Énergie* 2015, 154, 209–220.
- [63] Yurdusev, MA ; Ata, R. Évaluation du rapport optimal de vitesse de pointe dans les éoliennes à l'aide de réseaux neuronaux artificiels. *Énergie* 2006, 31, 2153–2161.
- [64] Liu, P.; Yang, WT; Yang, CE; Hsu, CL Système de conversion d'énergie éolienne sans capteur, suivi du point de puissance maximale à l'aide du contrôle d'articulation du modèle cérébelleux flou Takagi-Sugeno. *Appl. Soft Comput.* 2015, 29, 450–460.
- [65] Nasiri, M.; Milimonfared, J.; Fathi, SH Modélisation, analyse et comparaison des méthodes TSR et OTC pour le MPPT et le lissage de puissance dans les éoliennes à générateur synchrone à aimant permanent. *Gestion de la conversion énergétique* 2014, 86, 892–900.
- [66] Ganjefar, S.; Ghassemi, AA; Ahmadi, MM Amélioration de l'efficacité des méthodes de suivi du point de puissance maximale à deux types de rapport vitesse de pointe et couple optimal dans un système d'éolienne à l'aide d'un réseau neuronal quantique. *Énergie* 2014, 67, 444–453.
- [67] Yin, M.; Li, W.; Chung, CY; Zhou, L.; Chen, Z.; Zou, Y. Contrôle optimal du couple basé sur la plage de suivi efficace pour le suivi du point de puissance maximale des éoliennes dans des conditions de vent variables. *IET Renew. Générateur d'énergie.* 2017, 11, 501–510.
- [68] Mishra, S. ; Shukla, S. ; Verma, N. ; Ritu, R. Revue complète des techniques de suivi du point de puissance maximale : énergie éolienne. Dans Conférence internationale sur la communication, le contrôle et

## Références Bibliographiques

---

les systèmes intelligents; CCIS : Mathura, Uttar Pradesh, Inde, 2016 ; pp. 464-469.

[69] Oh, KY; Park, JY; Lee, JS; Lee, JK Mise en œuvre d'un couple et d'un contrôleur de pas collectif dans un simulateur d'éolienne pour caractériser la dynamique dans trois régions de contrôle. *Renouveler l'énergie* 2015, 79, 150–160.

[70] Liu, J.; Meng, H.; Hu, Y.; Lin, Z.; Wang, W. Une nouvelle méthode MPPT pour améliorer l'efficacité de la conversion d'énergie en tenant compte du lissage de puissance. *Gestion de la conversion énergétique* 2015, 101, 738–748.

[71] Balasundar, C. ; Sudharshanan, S. ; Elakkiyavendan, R. Conception d'un algorithme MPPT de contrôle optimal du rapport de vitesse de pointe pour WECS autonome. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2015, 3, 5.

[72] Koutroulis, E.; Kalaitzakis, K. Conception d'un système de suivi de puissance maximale pour les applications de conversion d'énergie éolienne. *IEEE Trans. Ind. Électron.* 2006, 53, 486–494.

[73] Errami, Y.; Ouassaid, M.; Maaroufi, M. Stratégie optimale de contrôle de puissance pour maximiser le suivi de l'énergie éolienne et différentes conditions de fonctionnement pour un parc éolien à générateur synchrone à aimant permanent. *Procédure énergétique* 2015, 74, 477–490.

[74] Singh, J.; Ouhrouche, M. Méthodes de contrôle MPPT dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. *Fondamental. Avancé. Top. Énergie éolienne* 2011.

[75] Camblong, H.; de Alegria, IM; Rodriguez, M.; Abad, G. Évaluation expérimentale des contrôleurs de suivi du point de puissance maximale des éoliennes. *Gestion de la conversion énergétique* 2006, 47, 2846–2858.

[76] Jena, D.; Rajendran, S. Une revue de l'estimation de la vitesse effective du vent basée sur le contrôle des éoliennes. *Renouveler. Soutenir. Révision énergétique.* 2015, 43, 1046–1062.

[77] De Kooning, JD; Gevaert, L. ; Van De Vyver, J. ; Vandoorn, TL; Vandeveld, L. Estimation en ligne du coefficient de puissance en fonction de la courbe du rapport vitesse de pointe des éoliennes. *IECON Proc. Ind. Electron. Conf.* 2013, 1792–1797.

[78] Song, D.; Yang, J.; Cai, Z.; Dong, M.; Su, M.; Wang, Y. Estimation du vent avec un filtre de Kalman étendu non standard et son application à l'extraction de puissance maximale pour les éoliennes à vitesse variable. *Appl. Énergie* 2017, 190, 670–685

[79] Sitharthan, R.; Karthikeyan, M.; Sundar, DS; Rajasekaran, S. Contrôleur MPPT intelligent hybride adaptatif pour approximer la vitesse effective du vent et la vitesse optimale du rotor d'une éolienne à vitesse variable. *Transaction ISA* 2020, 96, 479–489

[80] Jaramillo-lopez, F.; Kenne, G.; Lamnabhi-lagarrigue, F. Un nouvel algorithme de formation en ligne basé sur un réseau neuronal pour l'estimation de la vitesse du vent et le contrôle adaptatif du système d'éoliennes PMSG pour une extraction de puissance maximale. *Renouveler l'énergie* 2016, 86, 38–48.

[81] Assareh, E.; Biglari, M. Une nouvelle approche pour capturer la puissance maximale des éoliennes à vitesse variable en utilisant un contrôleur PI, un réseau neuronal RBF et un algorithme évolutionnaire GSA. *Renouveler. Soutenir. Révision énergétique.* 2015, 51, 1023–1037.

[82] Nabipour, M.; Razaz, M.; Seifossadat, SG; Mortazavi, SS Un nouveau schéma MPPT basé sur une nouvelle approche floue. *Renouveler. Soutenir. Révision énergétique.* 2017, 74, 1147–1169.

[83] Y. Bekakra, D. Ben Attous, Optimal tuning of PI controller using PSO optimization for indirect power control for DFIG based wind turbine with MPPT, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 5, no. 3 pp. 219-229, Sep 2013

[84] Endusa, B. M., Tomonobu, S., Aki, U., Toshihisa, F., & Chul-Hwan, K. (2009). LQG Design for Mega

watt-Class WECS With DFIG Based on Functional Models' Fidelity Prerequisites. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(4), 893–904. doi:10.1109/TEC.2009.2025338

## Références Bibliographiques

---

- [85] Slootweg, J. G. (2005). Reduced-order modelling of wind turbines. In *Wind Power in Power Systems*. New York: Wiley. doi:10.1002/0470012684.ch25
- [86] J. P. Rama, N. Rajasekara and M. Miyatakeb, Design and overview of maximum power point tracking techniques in wind and solar photovoltaic systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1138–1159, Jun 2017.
- [87] GASSAB Samir «Modélisation d'une centrale a énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Sétif, 2011.
- [88] A. K. Podder, N. Kumar Roy and H. R. Pota, MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature, *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 10, pp. 1615-1632, May 2019.
- [89] Zadeh.L.A. Fuzzy Sets, *Information and Control*, Vol.8. 1965, pp 338-353
- [90] Takagi.T. sugeno.M: Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, *IEEE*
- [91] A. Mirecki, X. Roboam, and F. Richardeau, Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines, *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 54, No. 1, Feb. 2007.
- [92] M. Fannakh, M. L. Elhafyani and S. Zouggar, Hardware implementation of the fuzzy logic MPPT in an Arduino card using a Simulink support package for PV application, *IET Renew. Power Gener.*, vol. 13, no. 3, pp. 510-518, 2019.
- [93] S-C Wang and Y-H Liu, A modified PI-like fuzzy logic controller for switched reluctance motor drives. *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1812–1825, 2011.
- [94] I. H. Altas and A. M. Sharaf, A generalized direct approach for designing fuzzy logic controllers in matlab/simulink GUI environment. *Int. Journal of Information Technology and Intelligent Computing*, vol. 1, no. 4, Jan 2007.