الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية


MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique


# Mémoire de Fin d'Études

**Présenté pour l'obtention du Diplôme de**
**Master en Génie Électrique**

***Options* : commandes électriques**

## THEME

# Réalisation d'un émulateur de vent à base d'une machine à courant continu


**Proposé et dirigé par :**

Dr. BOULKHRACHEF Salah

Dr. MOUALDIA Abdelhafidh

**Préparés et présentés par :**

Melle :LARBI Chaimaâ


**Année universitaire**

2020/2021

# Remerciement

Je tiens d'abord à remercie dieu tout- puissant , pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a accordé durant toutes ces langues année d'études qui m'ont permis d'arriver là ou je suis .

Je remercie vivement ***Dr. BOULEKHRACHEF Salah*** l'Encadreur de ce mémoire qui m'a accordé sa confiance, son aide et sa compréhension.

Je remercie également ***Dr. MOUALDIA Abdelhafidh*** qui ma beaucoup aidé a ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du

jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin, je souhaite à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu durant cette Tout mon parcours trouve son expression ici Sincères remerciements

# Dédicace

Au nom d'***Allah***, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux,

Tout d'abord je tiens à remercier le tout puissant de m'avoir donné l e courage et la patience pour arriver à ce stade afin de réaliser ce travail que je dédie :

A ma très chère mère ***NACIRA***, qui n'a jamais cessé de prier pour moi A mon très cher père ***RABEH***, pour ses encouragements son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement demes études.

A mon cher mari ***Mohammed*** .

À mon cher frère ***ABDELHAFIDH***.

Mes chers frères, présents à chaque instant, je teste avec leur soutien moral et leurs surprises agréables. Je voussouhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et desérénité.

Mes soeurs: ***Mereim,nourelhouda,maroua*** et ***maram***

Et à tous les membres de ma famille, jeunes et vieux.

A tous ceux que j'ai connus, et qui reconnaitrons. A tous ceux que

Chaimaa

**ملخص**

الهدف من هذه المذكرة تقديم إدراكًا لمحاكي توربينات الرياح من خلال نموذج لتوربينات الرياح وآلة تيار مباشر يتحكم فيها منطق التدفق تهدف هذه الدراسة إلى تدريب آلة تعمل بالتيار المباشر بهدف إعادة إنتاج تغيرات سرعة توربينات الرياح. ويتيح التحكم في سرعة مركز التحكم في المحرك هذه وجعلها مساوية لسرعة الرياح (سرعة توربينات الرياح). للباحثين إمكانية التحقق من صحة تقنيات التحكم في مولدات طاقة الرياح في هذه البطاقة نبدأ بنمذجة مركز التحكم في المحرك ,

ثم يتم التحكم في سرعة هذه الآلة بمنطق ضبابي منخفض في ضوء التحكم القوي.

**الكلمات المفتاحية**

نموذج توربينات الرياح ، توربينات الرياح ، تقنية التحكم ، السرعة ، المنطق الضبابي ، التحكم في المحرك ، آلة التيار المباشر ، النمذجة ، المحاكاة .

## Résume

L'objectif de cette mémoire est de fournir une réalisation d'une simulation d'éolienne à travers un modèle d'éolienne et une machine à courant continu commandée par logique de floue. Cette étude vise à entraîner une machine à courant continu afin de reproduire les changements de vitesse d'une éolienne. Il permet de contrôler cette vitesse depuis le centre de contrôle moteur et de la rendre égale à la vitesse du vent (vitesse de l'éolienne). Les chercheurs ont la possibilité de valider les techniques de contrôle des éoliennes sur cette carte. Nous commençons par modéliser le centre de contrôle du moteur, puis la vitesse de cette machine est contrôlée par une logique floue faible dans une lumière de contrôle forte.

***les mots clés :***

Modelé d'éolienne ,Turbine à vent , ,technique de contrôle, vitesse, logique floue , contrôle moteur, machine à courant continu , modélisation ,simulation.

## Abstract

The objective of this memory is to provide a realization of a wind turbine simulation through a wind turbine model and a DC machine controlled by flow logic. This study aims to train a DC machine in order to reproduce the speed changes of a wind turbine. It allows this speed to be controlled from the engine control center and to make it equal to the wind speed (wind turbine speed). Researchers have the opportunity to validate wind turbine control techniques on this map. We start by modeling the motor control center and then the speed of this machine is controlled by weak fuzzy logic in a strong control light.

**Keywords :**

Wind turbine model, Wind turbine, control technique, speed, fuzzy logic, motor control direct curent machine, Mödling, simulation.

Introduction Générale ..... 1

## Chapitre I : Etat de l'art des systèmes éoliennes

I.Introduction ..... 4
I.1. L'utilité de l'énergie éolienne ..... 4
I.2. Actualités sur l'énergie éolienne ..... .....5
I.3. Descriptifs et qualités d'énergie d'une éolienne .....7
I.3.1. Définitions .....7
I.3.2. Principaux composants d'une éolienne .....8
I.4. Types d'éoliennes .....9
I.4.1. Eolienne à axe vertical ..... 9
I.4.2. Eolienne à axe horizontal ..... ……11
I.5. Energie cinétique du vent ..... ..12
I.5.1. Loi de BETZ .....12
I.5.2. Production de l'énergie mécanique ..... .14
I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne ..... .16
I.6.1. Phases de fonctionnement d'une éolienne .....16
I.6.1.1. Fonctionnement à vitesse fixe .....17
I.6.1.2. Fonctionnement à vitesse variable ..... ……..18
I.6.1.2.1 Eolienne isolée(autonome) ..... ……..19
I.6.1.2.2 Eolienne connectée au réseau ..... ……19
I.6.2. Bilan des forces sur une pale .....20
I.6.3. Production optimale de l'énergie .....20
I.7. Etat de l'art sur les génératrices éoliennes à vitesse variable .....22
I.7.1. Système à génératrice synchrone .....22
I.7.2. Système à génératrice asynchrone ..... ..23
I.7.3. Système utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation.....23
I.7.3.1. MADA à énergie rotorique dissipée .....24
I.7.3.2. MADA : Structure de KRAMER .....24
I.7.3.3. Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur .....25
I.7.3.4. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI .....25
I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne ..... ……26
I.9. Connexion des fermes éoliennes vers les réseaux et les contraintes à respecter……...28
I.9.1. Raccordement au réseau de distribution .....28

I.9.2. Tension de raccordement ..... 30
I.9.3. Contraintes de raccordement de l'éolienne au réseau de distribution .....30
I.10. Conclusion .....31

## Chapitre II : Etude d'un émulateur à base d'une MCC

II.1. Introduction ..... …34
II.2. Construction de l'émulateur ……..35
II.3. Modélisation de la turbine éolienne……36
I.3.1 Modélisation de la turbine ……...36
II.3.2 Modèle du multiplicateur……39
II.3.3 Equation dynamique de l'arbre……..39
II.3.4 Schéma bloc du modèle de la turbine ……40
II.4. Modélisation de la MCC……..42
II.4.1 Partie électrique de la machine ……42
II.4.2.Partie mécanique ……...43
II.4.3.Stratégie de commande de la machine à courant continu ……..44
II.5.Principe du variateur de vitesse pour un moteur à courant continu ……45
II.5.1. Hacheur réversible en tension et en courant ……..45
II.5.2. Technique de commande à MLI ……46
II.5.3. régulation de vitesse des moteurs à courant continu ……..46
II.5.4. Simulation de l'émulateur ……...47
II.5.5. Résultats de simulation ……48
II.6 Modélisation et reproduction des variations du vent ……51
II.6.1 Définition du vent ……...51
II.6.2/Modélisation de la vitesse du vent ..... …51
II.6.. Résultats de simulation des modèles de la turbine et de la machine à courant continu
……52
II.7Conclusion ……55

## Chapitre III :La logique floue

III.1.Introduction ……57
III.2.Principe fondamentale de la logique floue ……...57
III.3.Système d'inférence flou ……58
III.3.1. Fuzzification ……59
III.3.2. Processus d'inférence floue ……59
III.3.3. Defuzzification ……59
III.4.Fuzzification ……59
III.5.Processus d'inférence floue ……60
III.6.Deffuzification ……60
III.7.Méthodes de defuzzification ……..61
III.8.Méthode Centre de gravité (COG) ……..61
III.9.Méthode Moyenne de maximum(MOM) ……62
III.10.Méthode moyenne pondérée (WAM) ……...62
III.11.Résultat de simulation……62
III.12.Conclusion ……64

## Chapitre IV :Réalisation du banc d'essai

IV.1. Introduction ……66
IV.2. Description générale ……66
IV.3 : Résultats obtenus et interprétation ……70
IV.4.Conclusion ……..74
Conclusion Générale ……...76
Références bibliographiques……....79

# Liste des Symboles et Notations

## Symboles

Ai : Amplitude des composantes spectrales du vent (m/s)

Cp : coefficient de puissance sans unité

Cpmax : coefficient de puissance maximal sans unité

C :Capacité du bus cc (F)

Cc: Couple de compensation

Ct: Couple mécanique de la turbine

Cem: Couple électromagnétique de la turbine

Cemcc: Couple moteur de la MCC

Cq :coefficient du couple sans unité

Cg: Couple mécanique sur l'arbre de la MADA

Crmcc: Couple résistant de la MCC

Dm : Débit massique d'air (Kg/s)

e :Force électromotrice de la MCC (V)

F :Force exercée par l'air sur le capteur éolien (N)

.Fmee : Coefficient de frottement de la MCC (N.m/s)

fp :Coefficient de frottement des pales (N.m/s)

fe :Fréquence de coupure du FMV (Hz)

fr :Fréquence du rotor (Hz)

fs :Fréquence du stator (Hz)

fm : fréquence de rotation du rotor (Hz)

g : Glissement de la MADA sans unité

la :courant induit de la MCC

ie :courant inducteur de la MCC

Ids : Courant statorique suivant l'axe direct

Iqs :Courant statorique suivant l'axe quadratique

Isa :Courant d'entrée du

Jmcc :Inertie de la MCC

Jp :Inertie des pales

Jtr :Inertie totale déplacée sur l'axe rapide de la génératrice

Jpz :Inertie de la pale sur l'axe longitudinal Z

Ki :Gain intégrateur

Kp :Gain proportionnel

La :Inductance de l'enroulement d'induit de la MCC

Le :Inductance de l'enroulement d'excitation de la MCC

Lm :Inductance mutuelle de MCC

Ir :Inductance propre rotorique

Is ;Inductance propre statorique

M :Rapport de transmission du multiplicateur de la turbine

M : Inductance mutuelle (H)

Mr : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques (H)

Ms : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (H)

Mrs :Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique

P : Nombre de paire de pôles sans unité

Po : Puissance incidente du vent (W)

Pr :Puissance développée par une force Newtonienne (W)

P :Variable de Laplace sans unité

PT : Puissance mécanique de la turbine éolienne (W)

Pmes : Puissance active statorique mesurée (W)

Prér :Puissance active statorique de référence (W)

Qmes : Puissance réactive statorique mesurée (VAR)

Qrér : Puissance réactive statorique de référence (VAR)

Rp : Rayon de pale de l'éolienne (m)

Ra :Résistance de l'enroulement d'induit de la Mee

Re : Résistance de l'enroulement d'excitation de la Mee

Rr : Résistance rotorique par phase

Rs : Résistance statorique par phase (n)

S : surface balayée par les pales de la turbine éolienne (m)

Tem : Couple électromagnétique de la turbine (N'm)

Temréf : Couple électromagnétique de référence de la turbine (N'm)

Temestimé : Couple électromagnétique estimé de la turbine (N'm)

Tg : Couple électromagnétique de la génératrice (N'm)

TT : Couple aérodynamique de la turbine (N'm)

TTI : Couple aérodynamique de la turbine sur l'axe lent (N·m)

TTr : Couple aérodynamique de la turbine sur l'axe rapide (N'm)

Ua : Tension d'induit de la MCC (V)

V : Vitesse de vent (mis)

VI : Vitesse de vent en amont de l'éolienne (mis)

V2 : Vitesse de vent en aval de l'éolienne (mis)

Vabcr : Tensions de trois phases rotoriques de la MADA (V)

Vabcs :Tensions de trois phases statoriques de la MADA (V)

Ve : Tension d'excitation de la machine MCC (V)

Vdc : Tension du bus courant continu (V)

Vds : Tension statorique suivant l'axe direct (V)

Vqs :Tension statorique suivant l'axe quadratique (V)

Vdr : Tension rotorique suivant l'axe direct (V)

Vqr :Tension rotorique suivant l'axe quadratique (V)

ß :Angle de calage des pales

$\lambda$ :Vitesse spécifique (rapport de vitesse) de la turbine

$\lambda$ opt :Vitesse spécifique optimale

$\tau i$: Constante de temps de la boucle de courant de la MCC

$\tau v$: Constante de temps de la boucle de vitesse de la MCC

Ωtl :Vitesse de rotation de la turbine sur l'axe lent

Ωtr :Vitesse de rotation de la turbine sur l'axe rapide

Ωm :Vitesse de rotation de la MADA

Ωmcc :vitesse de rotation de la MCC

Ωtréf :Vitesse de rotation de référence de la turbine

$\varphi abcr$:Flux rotoriques de la MADA

$\varphi abcs$:Flux statoriques de la MADA

$\varphi e$:Flux inducteur

$\varphi i$:Phase initiale des composantes spectrales du vent

$\varphi ds$:Flux statorique suivant l'axe direct

$\varphi qs$:Flux statorique suivant l'axe quadratique

$\varphi dr$:Flux rotorique suivant l'axe direct

$\varphi qr$:Flux rotorique suivant l'axe quadratique

$\omega c$:Pulsation de coupure du filtre FMV

$\omega i$:Pulsation des composantes spectrales du vent

$\omega r$:Pulsation rotorique

$\omega s$:Pulsation statorique

$\omega m$:vitesse angulaire de rotation du rotor (rad/s)

$\theta$:Angle électrique entre le stator et le rotor (0)

$\theta r$:Angle de transformation de Park des grandeurs (rotoriques )

$\theta s$:Angle de transformation de Park des grandeurs (statoriques )

p :Masse volumique de l'air (Kg/m)

Jt,Jmcc,Jg: Inerties de la : Turbine, MCC, MADA

Ft,fmcc,fg: Frottements de la : Turbine, MCC, MADA

## Notation

MADA : Machine à double alimentation

MCC : Machine à courant continu

# Liste des Figures

## Chapitre I

Figure1.1 :Evaluation de la capacité installée dans le monde depuis 2000 .....5

Figure I-2 : Capacité éolienne installée dans le monde en 2015 ……6

Figure I-3 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol… ……..7

Figure I-4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique…...……..8

Figure I-5 : Eléments constituants une éolienne……...……..9

FigureI-6 : Eolienne à axe vertical (structure de SAVONIU) ……..……10

Figure 1-7 : Eolienne à axe vertical (structure de DARRIEUS)……. ……..…..11

Figure 1-8 : Eolienne à axe horizontal…….....12

Figure I-9 : Tube du courant autour d'une éolienne……..12

Figure I-10 : Exemple d'interpolation du facteur de puissance……..…13

Figure I-11: Coefficient de puissances pour différents types d'éoliennes ……...14

Figure I-12 : Puissance théorique disponible pour une éolienne donnée en fonction de la vitesse de rotation de la machine (rd/s)…….15

Figure I-13 : Zones de fonctionnement d'une éolienne ……16

Figure I-14 : Eolienne à vitesse fixe (GAS) ……17

Figure I-15 : Caractéristique d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles …….……18

Figure I-16 : Représentation vectorielle des forces exercées sur une pale ……..…..20

Figure I-18 : Loi de commande d'une éolienne à vitesse variable……..….21

Figure I-19 : Interface électronique de puissance ……..…..22

Figure I-20: Eolienne utilisant la MADA…….24

Figure I-21 : MADA à énergie rotorique dissipée……24

Figure I-22 : structure de KRAMER……25

Figure I-23 : structure de Scherbius avec cycloconvertisseur ……..25

Figure I-24 : structure de Scherbius avec convertisseur MLI……..….25

Figure I-25 : Architecture d'une ferme d'éoliennes vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives…….29

Figure I-26 : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues……26

## Chapitre II

FigureII.1 : système d'une turbine éolienne ……....35

Figure II.2 : schéma du système d'un émulateur éolien à base d'une MCC ……...35

Figure .II.3: Schéma d'une turbine éolienne…….36

Figure II.4 : Courbe de coefficient Cp(λ, β)…….38

Figure II.5 : Caractéristique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation pour différentes ……...39

Figure II.6: Schéma bloc du modèle de la turbine…..…….40

Fig.II.7: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse…….……..41

Figure II.8. Modèle électrique de la MCC à excitation séparée……42

Figure II.9 Schéma bloc du modèle de MCC …….……44

Figure II.10 : Schéma bloc du régulateur…….……45

Figure II-11 :Schéma de principe du hacheur révisible en tension et en courant ….……46

Fig.II.12 : Principe de régulation de la vitesse d'un moteur à courant continu. ….……..47

Figure II.13 : schéma bloc de l'émulateur…….48

Figure II.:14Schéma Matlab –Simulink du système étudié…….……48

Figure II.15: vitesses de rotation en fonction du temps …….……..49

Figure II.16: Courant d'induit …….……50

Figure II.17: couples en fonction du temps…….……..50

Figure II.18 :schéma du modelé de la turbine éolienne Matlab-Simulink…….52

Figure II.19 : Profil de vitesse du vent……..53

Figure II.20:Vitesse de référence et vitesse mesurée de la MCC……53

Figure II.21.: zoom Vitesse de l'émulateur……..…54

Figure II.22 : le couple de l'émulateur sa référence ……54

Figure II.23: Le courant de la MCC et sa référence ……..55

## Chapitre III

Figure. III.1:Classification classique ……...……58

Figure. III.2:Representation par la logique floue……..58

Figure. III. 3 : Moteur d'inférence flou……...…59

Figure III.4 : la vitesse de l'émulateur par réglage flou……...62

Figure III.5 : Le couple de l'émulateur…….63

Figure.III.6 : Le courant d'induit……..63

## Chapitre IV

Figure.IV.1: Photo du banc d'essai…….……66

Figure.IV.2 : Photo du Hacheur série utilisé……68

Figure IV .3.a :capteur de courant ……..68

Figure IV.3.b :Capteur dr position……69

Figure.IV.4 : Procédure de l'implantation temps réel……..69

Figure.IV.5: La fenêtre du logiciel ControlDesk…….……70

figureIV6. :vitesse simulé et réel…….……71

FigureIV.7 :courant réel et sa référence……..……..72

Figure.IV.8 : Couple réel et sa référence……..72

. FigureIV.9.Vitesse mesurée de l'émulateur et sa référence……73

Figure .IV.10 :.Le courant de l'émulateur et sa référence……..……73

Figure.IV.11 :Le couple de l'émulateur et sa référence…….....73

# Liste des tableaux

## Chapitre I

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des génératrices synchrones……....23

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients de la machine synchrone……23

Tableau I-3 : avantages et inconvénients d'une MADA……..……26

Tableau I-4 : Niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur Puissance…….30

## Chapitre IV

Tableau IV.1 :Les parametres de la MCC……...70

# Introduction générale

## Introduction générale :

L'augmentation aujourd'hui de l'utilisation des appareils électroménagers et la consommation industrielle favorisent une demande importante d'électricité. Dans les pays industrialisés cette demande est trop élevée, ce qui entraine un recours systématique aux combustibles fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Il est à savoir que les sources de ces combustibles restent non renouvelables et limitées à long terme, ce qui engendre un coût prépondérant de ceux-ci.

L'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place parmi les énergies renouvelables, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire aux autres sources telles l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité, l'énergie thermique, etc. En plus, elle n'émet pas de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui, beaucoup de travaux de recherche portent sur l'intégration et les impacts de l'énergie éolienne sur les réseaux de distribution. Ainsi, plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché.

L'augmentation de la puissance éolienne installée dans le monde a un impact croissant sur le réseau électrique du fait de la difficulté à prévoir la production, de la capacité d'accueil limitée du réseau, du risque de déconnexions intempestives des fermes éoliennes et d'une dégradation de la qualité de l'électricité.

Notre projet vise à étudier les caractéristiques de connexion d'un aérogénérateur à partir d'un émulateur éolien à base d'une machine à courant continu. L'objectif principal est de développer une méthode de commande MPPT dans le but d'adapter la vitesse de la turbine à la vitesse du vent, afin de maximiser la puissance convertie, ceci permettra d'améliorer leur intégration aux réseaux électriques. Pour réussir nos objectifs nous avons suivi la méthodologie suivante :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude des généralités sur l'énergie renouvelable plus précisément sur les systèmes d'énergie éoliens dans le monde. Nous allons décrire les principales constitutions d'un aérogénérateur en passant en revue les différents types d'éoliennes existantes. Nous présenterons ensuite les convertisseurs de l'énergie éolienne à travers les différents types de génératrice utilisée.

Le deuxième chapitre on s'intéressera à l'étude d'un émulateur de la turbine éolienne à base d'une machine à courant continu commandée de façon à reproduire le comportement mécanique de la turbine éolienne.

Le troisième e chapitre nous présentons la commande floue d'un moteur à courant continu à excitation séparé.

La dernière Dans le chapitre, nous présentons le dispositif expérimental réalisé au sein de notre laboratoire. Il s'agit d'un hacheur série commandé en modulation de largeur d'impulsions par la Dspace 1103, un convertisseur,et un moteur à courant continu .

Pour conclure, nous allons terminer notre travail par une conclusion général

# *Chapitre I :*

# *L'état de l'art de l'énergie éolienne*

# I. Introduction

L'énergie éolienne est utilisée depuis très longtemps déjà, elle a remplacé les rames pour faire avancer les navires. Elle a été utilisée pour actionner les meules des moulins pour moudre du grain, elle permet encore le pompage d'eau dans les champs ; à cette époque l'énergie cinétique du vent était uniquement transformé en énergie mécanique.

La demande croissante en énergie électrique dans le monde fait appel à plusieurs sources d'énergie (renouvelables et non renouvelables). L'énergie éolienne étant une énergie renouvelable qui produit une énergie propre est devenue un moyen très important dans la production de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent.

## I.1 L'utilité de l'énergie éolienne :

Depuis plus de 100 ans, l'énergie éolienne est utilisée pour produire de l'électricité, une source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait:

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.

- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des sites isolés exposés au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont des choses courantes.

- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5MW. [1]

## I.2 Actualités sur l'énergie éolienne :

La demande croissante en énergie électrique dans le monde, le problème de réchauffement climatique et les émissions de gaz à effet de serre sont les facteurs qui ont fait de l'énergie éolienne une source alternative et durable, en le comparant avec d'autres sources d'énergie, cette dernière est renouvelable et produit une énergie propre. Elle est devenue un moyen très important de production de l'énergie électrique dans plusieurs pays. [2]

Le parc mondial s'élève à 432 419MW à la fin de 2015 contre 369 595 MW en 2014, enregistrant une croissante de 17%. Pour rappel, il y a 11ans, en 2005 la puissance de parc était de 59 048 MW. Les investissements mondiaux dans le secteur s'élèvent à 109 milliards de dollars contre 99 milliards de dollars en 2014. [3]

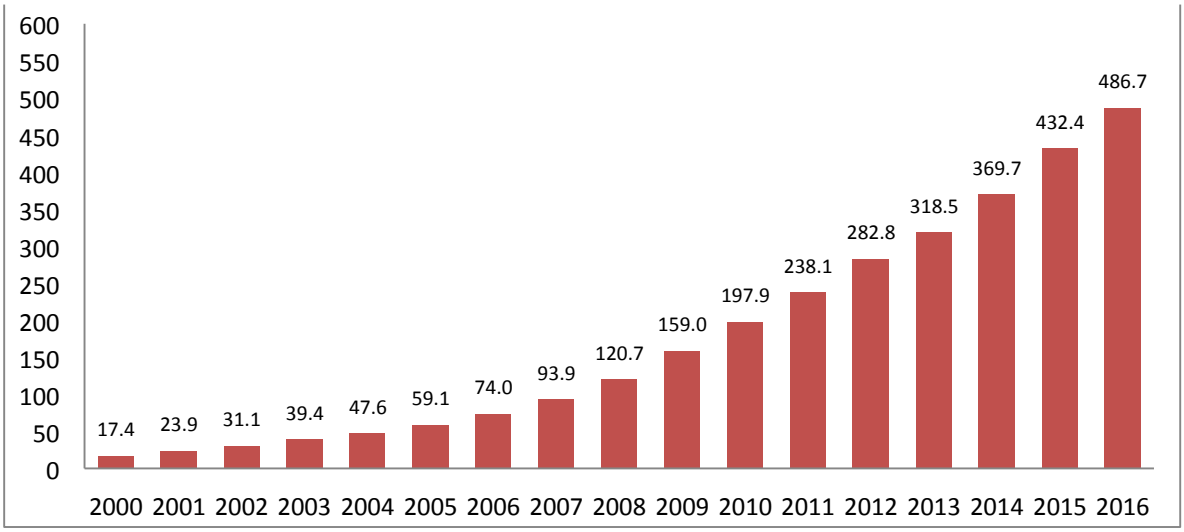



***Figure 1.1 :*** *Evaluation de la capacité installée dans le monde depuis 2000* [1]

Le marché mondial est attiré par l'ASIE : la Chine a installé 30 500MW en 2015, soit la moitié de la progression mondiale. Son parc, qui a progressé de plus de 22% en un an, celui de l'Inde a 25 088MW, avec 2 623MW installé en 2015.

Aux Etats-Unis, 8 598MW ont été raccordés en 2015, le parc compte désormais 74 500MW. En Amérique de sud, le dynamique du marché repose sur le Brésil qui a vu son parc augmenter de 2 754MW en un an et représente aujourd'hui un total de 8 715MW, contre 5 926MW fin 2014.

En Europe l'Allemagne a enregistré une année record, avec 6 013MW de nouvelles installations, dont 2 300MW d'éolien en mer. Son parc s'élève à 45 000MW. La Pologne se situe à la deuxième position pour les nouvelles installations avec 1 266MW raccordés. Fin 2015, le parc Polonais affiche une puissance de 5 100MW. [3]

La troisième nation européenne et la France, avec 1 073MW raccordés l'année dernière, elle dispose, au 31 décembre 2014 d'un parc de 10 312MW. La grande Bretagne a de son coté, installé 975MW et la puissance de son parc et de 13 600MW. Le total des nouvelles capacités d'Europe atteint 12 800MW. Les investissements dans le secteur se sont élevés à 26.4 milliards d'euros, avec une puissance de plus 10 300MW. La France dispose du 4$^{eme}$ parc européen derrière l'Allemagne, l'Espagne et la Grande-Bretagne.

En Afrique la puissance installée a progressé de 30% en 2015, passant de 1 612MW fin 2013 à 2 536MW en 2014 et 3 829MW en fin 2015. L'Afrique du sud a contribué pour 64% à la production du parc africain avec plus de 483MW, de ce fait, elle est le leader africain avec 1 053MW installés fin 2015 contre 750MW fin 2014. Après avoir fait une décennie pour installer ces premières éoliennes, le plan directeur énergétique prévoit 9 000MW éoliens d'ici 2030.

Le Maroc n'était qu'au deuxième rang en Afrique avec 787MW fin 2015, sans nouvelle mise en service en 2015.il prévoit en 2020 des parcs éoliens fournissant 12% de sa consommation d'électricité, soit environ 2 000MW. Après le Maroc se trouve l'Egypte 610MW en fin 2015 ; au 4$^{eme}$ rang arrive l'Ethiopie avec 324MW, suivie de la Tunisie de

245MW.

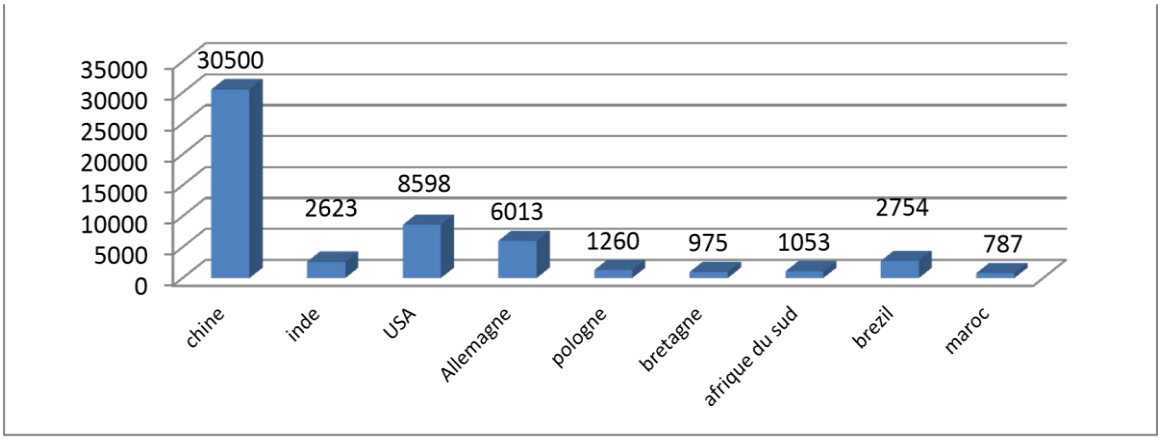



**Figure I.2** :capacité éolienne installée dans le monde en 2015[1]

L'Algérie avait réceptionné sa première ferme éolienne pilote d'Adrar le 4 juillet 2014, pour un coût total de 2.8 milliards de dinars. Elle se déploie sur 30 hectares et a une capacité de 10MW.

Le potentiel qu'a l'Algérie est très important si l'on s'intéresse au solaire et à l'éolien. Le gouvernement a estimé que le potentiel solaire était le plus représentatif, et le programme

national est donc axé essentiellement sur l'énergie solaire. L'éolien la biomasse et la géothermie représente une partie plus marginale de projet de développement des énergies renouvelable. Dans l'ensemble, le programme table sur la production de 40% des besoins d'électricité de pays à partir des énergies renouvelables d'ici 2030(37% pour le solaire et 3%pour l'éolien). [3]

Le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre selon la cartographie et le climat de cette dernière. La carte représenté à la figure (1.3) monte que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieure à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, il est à noter que la vitesse moyenne est globalement peu élevée, cependant, les cites côtière d'Oran, Bejaïa et Annaba, et les hauts plateaux de Tiaret et El KHEITER ainsi que la région délimité par Bejaïa par le Nord et Biskra au Sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur de l'éolienne choisit est élevée. [3]

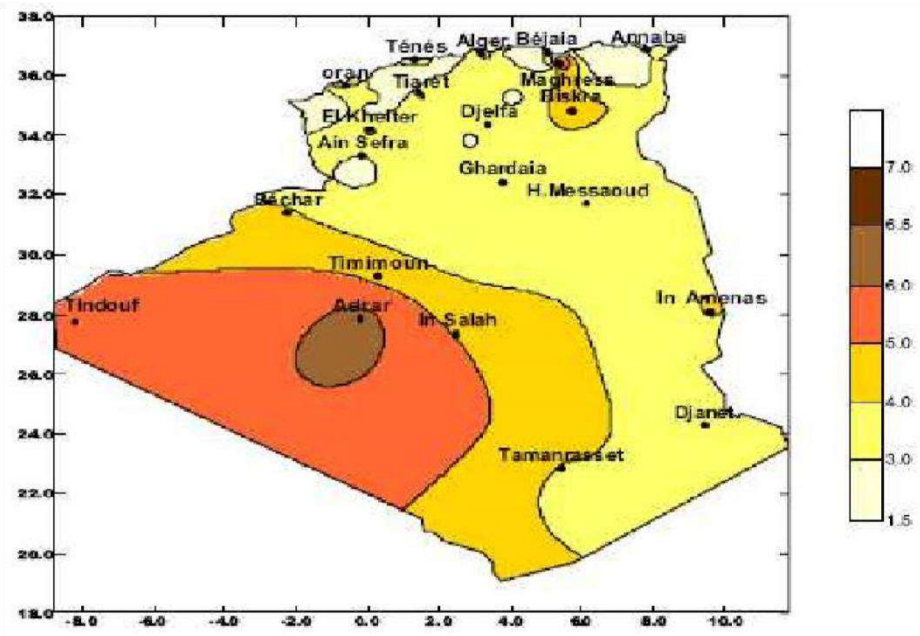



**Figure I-3 :** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol.[3]

## I.3. Descriptifs et qualités d'énergie d'une éolienne :

### I.3.1 Définition :

Une éolienne appelé aussi aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [4] comme le montre la figure I-4 :

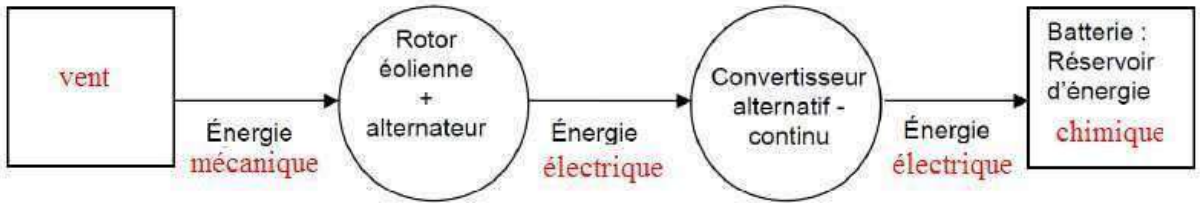



**Figure I-4** *: Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique*

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusées et surtout en corrélation saisonnière (en hiver, l'énergie électrique est plus demandé car en cette saison, la moyenne des vitesses du vent est plus élevé). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchets radioactifs [5].

## I.3.2 .Principaux composants d'une éolienne :

Pour décrire une éolienne, le vocabulaire le plus souvent utilisé retient principalement trois sous-ensembles :

- **Le mât** : un tube d'acier ( un treillis métallique) qui doit être le plus haut possible afin de bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et aussi pour éviter les perturbations près du sol [6]

- **la nacelle** : structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques, permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique ; elle comprend les éléments suivants :

  - l'arbre.
  - Multiplicateur
  - Roulements
  - Générateurs

- **Le rotor :** Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent reliées par un moyeu.

La figure suivante représente les différentes composantes d'une éolienne :

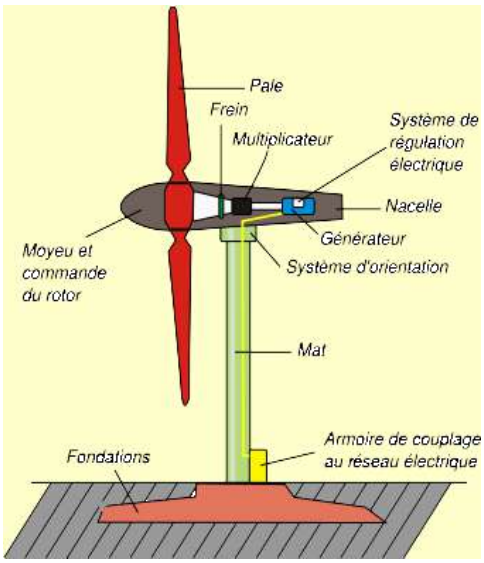



**Figure I-5 :** *Eléments constituants une éolienne.*

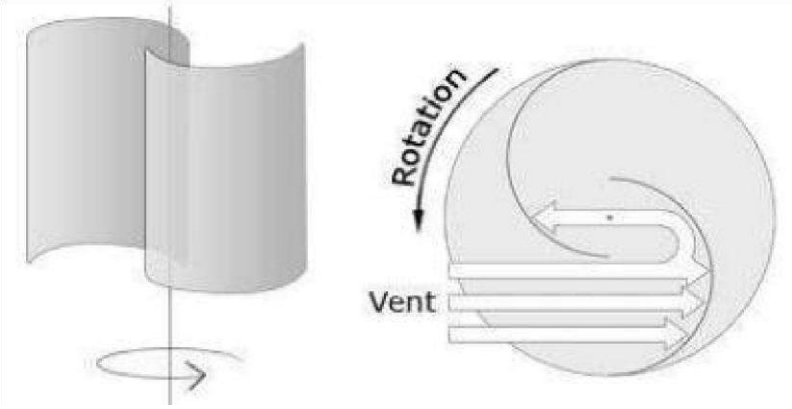
## I.4. Types d'éoliennes :

De nos jours, il existe plusieurs sortes d'éoliennes dont on distingue deux grandes catégories qui sont comme suit:

### I.4.1 Eoliennes à axe vertical :

Les premières structures développées afin de produire de l'énergie électrique sont les éoliennes à axe vertical. Plusieurs prototypes ont été vu dont deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation : le rotor de SAVONIUS et le rotor de DARRIEUS.

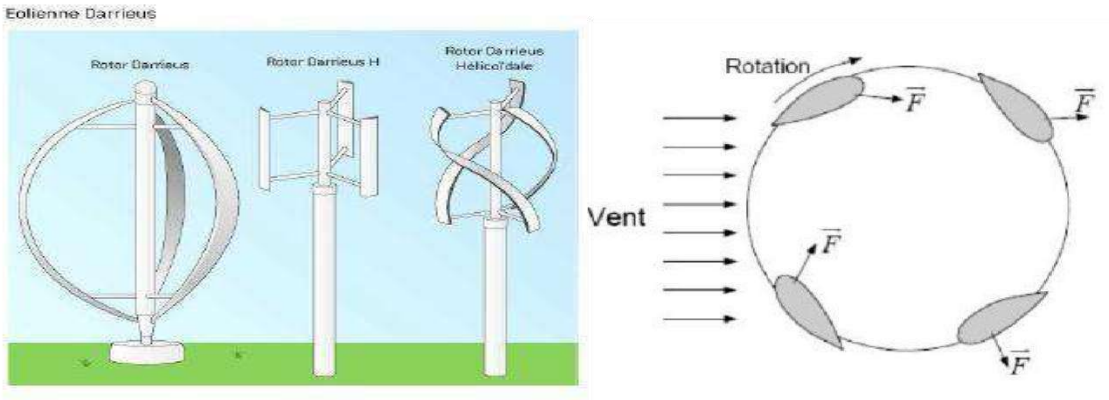
✓ **Le rotor de SAVONIUS** (étant le nom de son inventeur, en 1925) : son fonctionnement est basé sur le principe de « traînée différentielle » utilisée dans les anémomètres. Le vent exerce sur chacune des faces d'un corps creux des efforts d'intensités différentes ; il en résulte ainsi un couple moteur qui entraîne la rotation de l'ensemble. L'effet ici est renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [7].




**FigureI-6 :** *Eolienne à axe vertical (structure de SAVONIUS)*

✓ **Rotor de DARRIEUS** (ingénieur français) : la structure la plus répandue pour les éoliennes à variation cyclique d'incidence est celle de DARRIEUS. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'ellemême. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne SAVONIUS sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peut utiliser voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin, la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées. [4]




**figureI.7** : Eolienne à axe vertical (structure de DARRIEUS)[1].

### I.4.2. Eolienne à axe horizontal :

Ces éoliennes sont basées sur la technologie des moulins à vent, constituées de plusieurs pâles profilées à la manière des ailes d'avions afin de générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pâles utilisées varie de 1 à 3 ; le rotor tripale étant le plus utilisé parce qu'il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [4]

### Avantages des éoliennes à axe horizontal :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Elle capte le vent en hauteur donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateurs et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour donc il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage

### Inconvénients des éoliennes à axe horizontal :

- - Coût de construction élevé
- L'appareillage au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incidents. Malgré ces inconvénients, cette structure reste la plus utilisée pour la production d'énergie électrique ; ainsi les éoliennes à axe verticale sont utilisées dans les zones isolées parce qu'elles sont de faibles puissances destinées à des utilisations permanentes[8] .



**Figure 1-8 :** *Eolienne à axe horizontal*

## I.5. Energie cinétique du vent :

Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'applique sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor ce qui produit une énergie éolienne.

### I.5.1 Loi de BETZ :

Le savant Allemand à établie la théorie globale du moteur éolien à axe horizontal dans les années 1920. BETZ suppose que le moteur éolien soit placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse $V_1$ et à l'infini en aval d'une vitesse $V_2$ comme le montre la figure suivante [9].

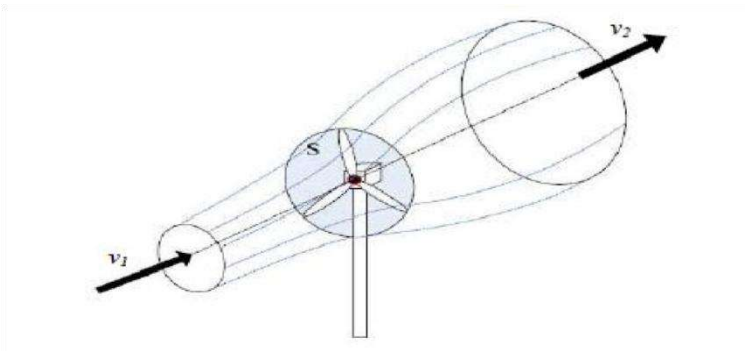



**Figure I-9 :** *Tube du courant autour d'une éolienne*

On suppose que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne$V_1$ et la vitesse du vent après passage à

travers le rotor$V_2$ ; soit :

$$\frac{V1+V2}{2}$$

La masse d'air de la densité $\rho$ traversant la surface S des pales en une seconde est donnée par :

$$M = \frac{1}{2}\rho S(V1+V2)^3 \qquad \text{(I.1)}$$

La puissance $P_t$ alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton)

$$Pt = \frac{1}{2}m(V1^2 - V2^2) \quad \text{(I.2)}$$

En remplaçant l'équation (1.1) dans (1.2) on aura :

$$Pt = \frac{1}{4}\rho S(V1 + V2)(V1^2\text{-}V2^2) \quad \text{(I. 3)}$$

Un vent théoriquement non perturbé traversait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse$v_1$, la puissance $p_v$ correspondante serait donc :

$$Pv = \frac{1}{2}\rho SV1^3 \quad \text{(I.4)}$$

Le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est donné par la formule suivante :

$$\frac{Pt}{Pv} = \frac{1}{2}(1 + \left(\frac{V1}{V2}\right))(1 - (\frac{V1}{V2})^2) \quad \text{(I.5)}$$

La caractéristique correspondante à l'équation (I.5) est représentée par la figure suivante :

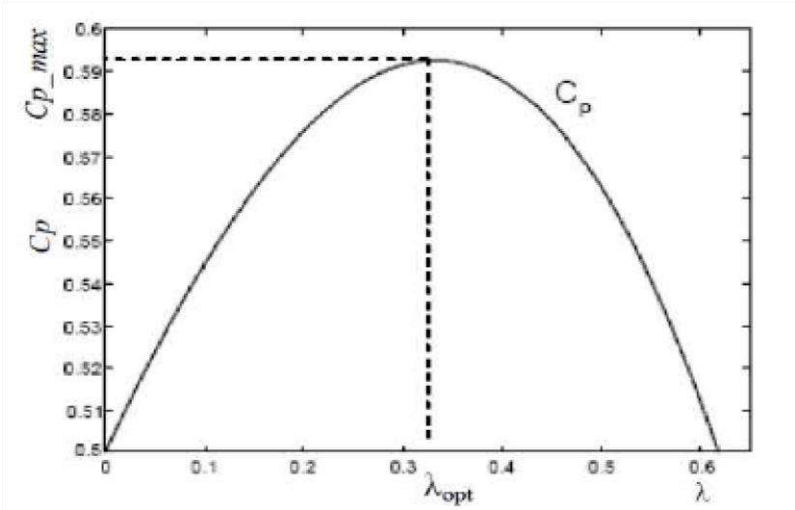



**Figure I-10 :** *Exemple d'interpolation du facteur de puissance*

Le rapport Pt/Pv est appelé aussi coefficient de puissance $C_p$ qui a une allure d'une parabole qui représente un maximum de 0.593 (16/27) ; cette limite théorique se nomme limite de BETZ. Elle fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est jamais atteinte en réalité et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de l'angle de calage des pâles $\beta$

Et la vitesse relative $\lambda$représentant le rapport de la vitesse tangentielle de l'extrémité des pales de l'éolienne($\Omega_t R$) sur la vitesse instantanée du vent ainsi :

$$Cp = Cp(\lambda, \beta) \tag{1.6}$$

La figure suivante (I-11) représente un aperçu sur les coefficients de puissance $C_p$ habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

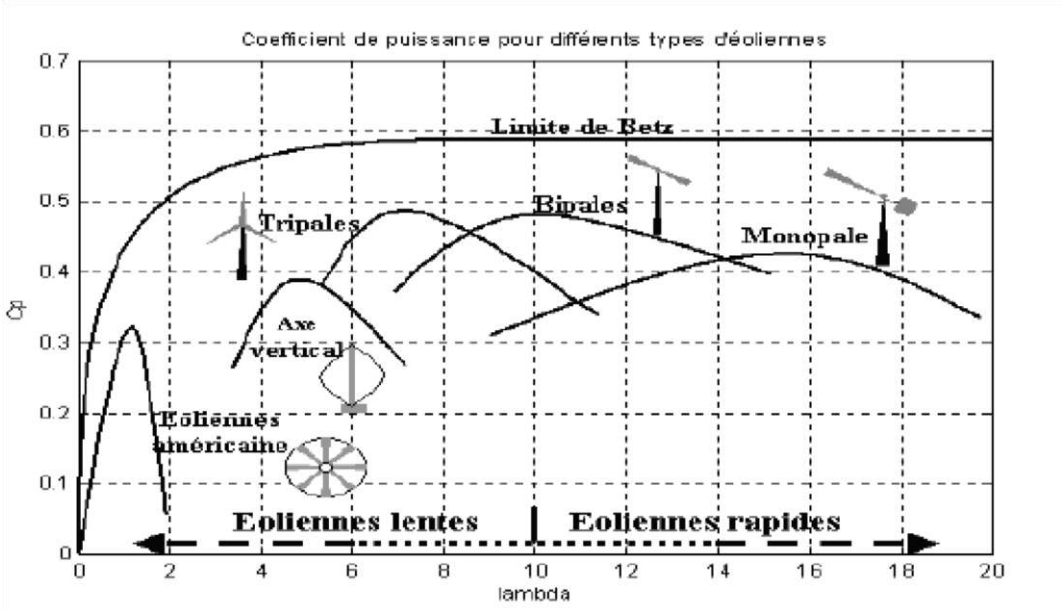



**Figure I-11**: Coefficient de puissances pour différents types d'éoliennes [4]

## I.5.2 Production de l'énergie mécanique :

L'énergie mécanique dans une éolienne est entraîné en rotation des pâles par la force du vent. La puissance mécanique est déterminée donc par la quantité de travail effectué par les pâles dans un intervalle de temps.

La combinaison des équations (1.1) (1.4) et (1.5) donnera la puissance mécanique $p_m$ disponible sur l'arbre d'une éolienne, cette dernière est représentée par la formule suivante :

$$Pm = \frac{Pt}{Pv} Pv = Cp.Pv = \frac{1}{2} Cp(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 {V_1}^3 \tag{I.7}$$

Avec :

$$\lambda = (\frac{\Omega_1 R}{KV1})$$

$\Omega_1$ : est la vitesse de rotation avant la multiplication.

R : le rayon de l'aérogénérateur.

On tenant compte du multiplicateur K, la puissance mécanique $p_m$ disponible sera comme suite :

$$\lambda=\frac{\Omega_2 R}{KV1}$$

$$Pm = \frac{1}{2} Cp \left(\frac{\Omega 2R}{KV1}\right) \rho\pi R^2 V1^3 \quad \text{(I.8)}$$

La relation (1.8), nous permet d'obtenir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour une variation de vitesse du vent, comme l'indique suivant :

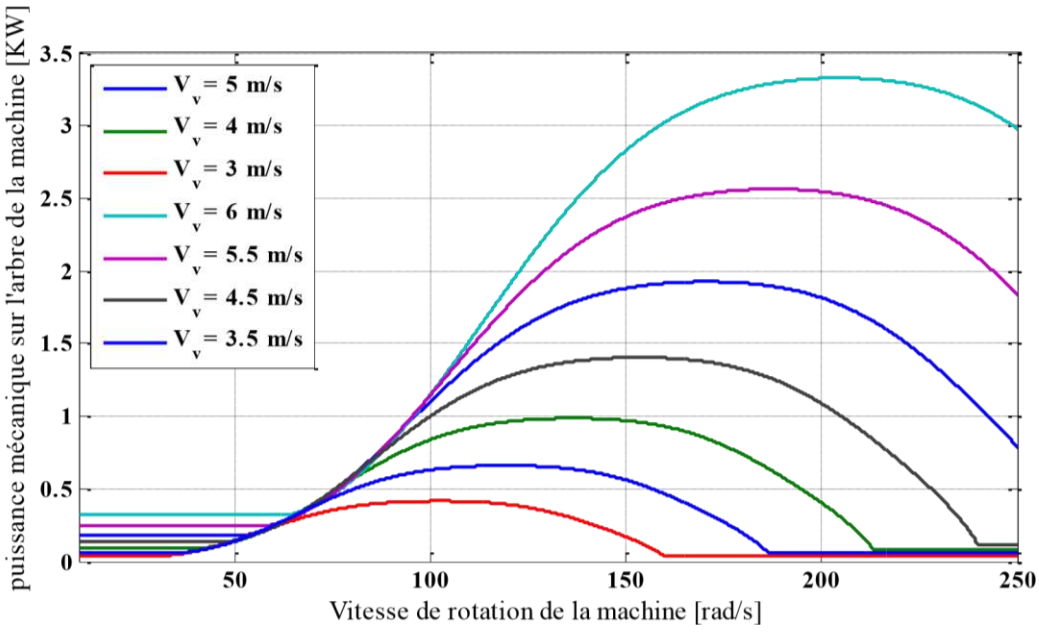



**Figure I-12** : *Puissance théorique disponible pour une éolienne donnée en fonction de la vitesse de rotation de la machine (rd/s)*

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne fonctionne à une vitesse fixe de 1500 tr/mn sur la figure (I-12), la puissance maximum théorique des courbes n'est pas totalement exploitée. Elle est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (v=6 m/s).

Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque courbe, la génératrice doit fonctionnée à une vitesse variable (entre 1100 m/s et 1900 m/s pour l'exemple donnée sur la figure 1.8.

## I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Lorsque le vent souffle à la hauteur de la nacelle avec une vitesse au-dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeaux (leur surface est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse de seuil détecté un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement ; le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent et les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage de l'éolienne et tourne.

Ainsi la puissance captée (*P vent* ) est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice mais à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va être transformée en puissance électrique débité par la machine ; on distingue ainsi deux cas : soit l'éolienne est relié directement au réseau soit elle alimente en autonome une charge isolée. [10]

### I.6.1 Phases de fonctionnement d'une éolienne :

Les zones de fonctionnement d'une éolienne sont définies en fonction de la vitesse du vent [11], les caractéristiques des zones de fonctionnement d'une éolienne sont représentées dans la figure suivante :

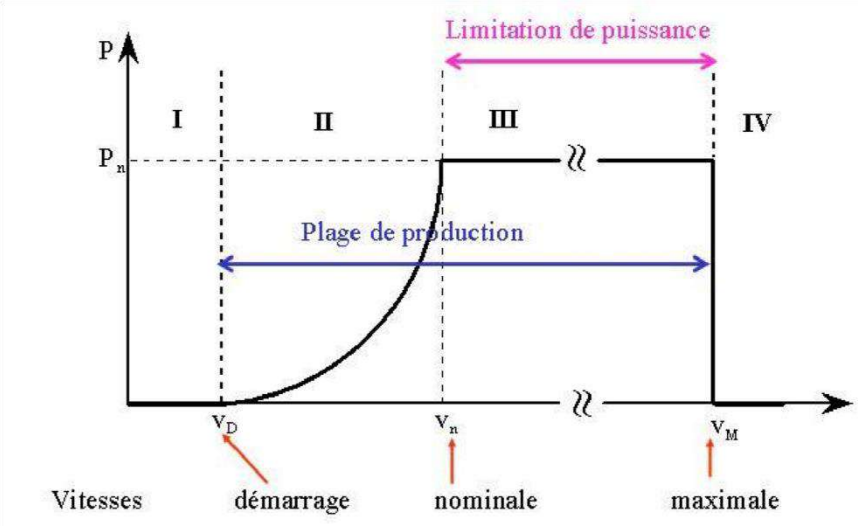



**Figure I-13 :** *Zones de fonctionnement d'une éolienne*

✓ **Zone 1 ($V < V_1$) :** c'est la zone de démarrage de la machine, la vitesse du vent est trop faible ; la turbine peut tourner mais l'énergie à capter reste faible. $V_1$ étant la vitesse du vent correspondante au démarrage de la turbine.

✓ **Zone 2 ($V_1$<V < $V_2$) :** c'est la zone d'extraction de la puissance maximale, elle correspond au fonctionnement à charge partielle ($C_p$). l'angle des calages β reste constant dans cette zone afin d'obtenir un $C_p$ maximal pour cela la puissance captée reste maximale.

$V_2$ étant la vitesse du vent qui correspond à la puissance nominale de la génératrice.

✓ **Zone 3 ($V_2$ < V < $V_3$) :** elle correspond à une vitesse mécanique quasiment constante et $\beta$ varie. La puissance captée augmente rapidement jusqu'à sa valeur nominale ; c'est la zone de fonctionnement en pleine charge. $V_3$ étant la vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne.

✓ **Zone 4 (V >$V_3$) :** la vitesse du vent devient trop forte, les pales sont en position d'arrêt ainsi la puissance extraite reste nulle

### I.6.1.1. Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes mises en œuvre utilisent une génératrice à cage d'écureuil directement couplé au réseau (GAS), cette machine est entraînée par un multiplicateur dont la vitesse est maintenue constante par un système mécanique d'orientation des pales. Ainsi la machine fonctionne en hyper synchronisme, à une vitesse $\Omega_s\,(1 - g)$, $\Omega_s$ étant la vitesse du synchronisme et $g$ le glissement ($g < 0$); pour un fonctionnement en génératrice.

La rotation des pales par des actionneurs permet l'augmentation de l'angle de calage β, ainsi la puissance peut être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lorsque ya un fort vent cette technique met les pales en drapeau ($\beta = 90°$) [9] (fig I-14)

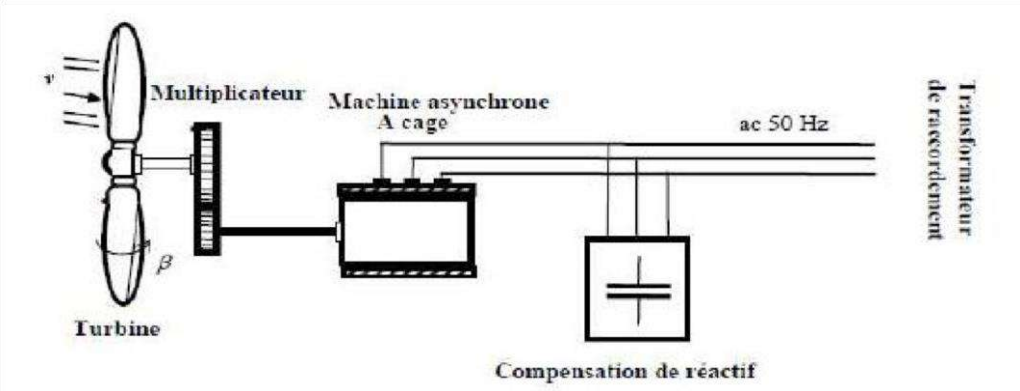



**Figure I-14 :** *Eolienne à vitesse fixe (GAS) [9]*

Cette structure présente les avantages suivants :

- Elles possèdent un système électrique plus simple
- Elles ont une très grande fiabilité

- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonnance des éléments de l'éolienne
- Moins chère

Cette machine à un nombre de paires de pôles fixe donc doit fonctionner sur une plage de vitesse très limitée ; la fréquence étant imposée sur le réseau si le glissement augmente les courants statorique de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La figure I-15 représente la caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles :

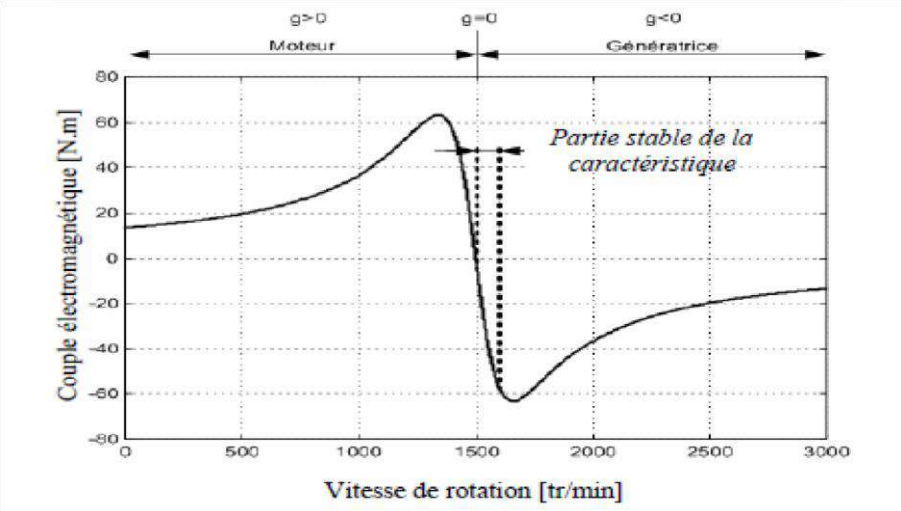



**Figure I-15 :** Caractéristique d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles [12]

Les éoliennes à vitesse fixe sont utilisées pour des faibles puissances (à l'ordre de 1 MW). Elles sont robustes et leur simplicité mécanique facilite la maintenance. Par contre, la puissance extraite n'est pas optimisée, le coût de maintenance imputé au multiplicateur est élevé et la puissance réactive n'est pas contrôlée (mais compensée).

La connexion directe de la génératrice au réseau entraine une très forte sensibilité lors de la présence d'un défaut [12]

### I.6.1.2 Fonctionnement à vitesse variable :

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. . Le terme vitesse variable signifie le faite que la vitesse de la turbine ne dépend pas de la fréquence du réseau électrique. [1]

Elle est constituée d'une turbine, d'un multiplicateur et d'un convertisseur de puissance. La partie électrique, est constituée en générale d'un générateur électrique synchrone ou asynchrone.

- **Les machines synchrones** : Elles sont utilisées dans plusieurs procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans les centrales à grande puissance (centrales hydrauliques, thermiques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien sont plus chers que les générateurs à inductions.

- **Les machines asynchrones** : Elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Ces machines tournent à une vitesse plus grande que celle des turbines éoliennes d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse.

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparés aux éoliennes à vitesses fixes sont comme suit : [13]

- Elles génèrent une meilleure qualité de puissance électrique.
- Elles augmentent la plage de fonctionnement pour les faibles vitesses du vent (augmentation du rendement énergétique).
- Elles nécessitent un système d'orientation de pale simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevées. En conséquence, pour de faible vitesse de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles réduisent le bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.

### I.6.1.2 .1 Eolienne isolée (autonome) :

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans les gammes de puissance de quelques dizaines de kilowatts. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux ou les stations météo ou de watts à quelques dizaines de kilowatts pour des appareils électriques et d'instrumentation ou camping. Les éoliennes de plus grandes puissances sont utilisées pour la production pour l'alimentation en énergie électrique des villages isolés. [14]

### I.6.1.2.2 Eolienne connectée au réseau :

Le éoliennes connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré appartenant à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local.

Ce type de production décentralisée est rencontré de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre. Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou industriel, de 50kW à 7.5MW pour les plus récentes éoliennes du marché. Vu que la mer est caractérisée par un vent très fort, on estime que cette puissance augmentera à l'avenir.

Ces éoliennes ont besoin d'être raccordées au réseau afin, de minimiser l'impact des fluctuations de la puissance générée par ces dernières.

### I.6.2 Bilan des forces sur une pale :

On représente la vitesse du vent qui arrive à la pale par le vecteur$\vec{V}$, et la composante du vent due à la rotation de l'éolienne est représentée par $\overrightarrow{V_{rot}}$ ainsi leur résultante est$\overrightarrow{V_{rés}}$. L'action du vent sur une pale se décompose en deux forces ; l'une est une poussée axiale représentée par $\overrightarrow{F_{ax}}$ qui est directement compensée par la résistance mécanique du mat, et la seconde force est une poussée en direction de la rotation $\overrightarrow{F_{rot}}$ qui produit le déplacement. La résultante de ces deux forces est nommée$\overrightarrow{F_{rés}}$. (Figure I-16)

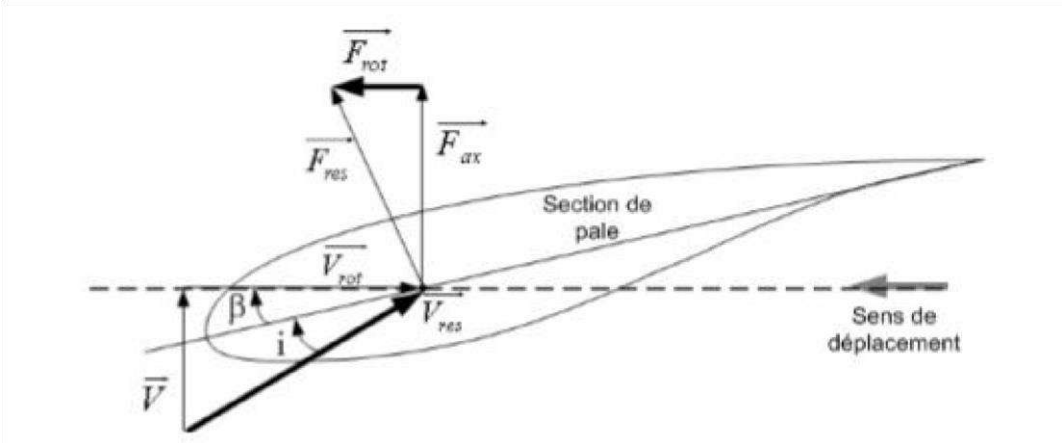



**Figure I-16 :** *Représentation vectorielle des forces exercées sur une pale [8]* .

Pour une vitesse nominale du vent donnée, chaque turbine doit être dimensionnée de manière à ce que la force résultante atteigne sa valeur nominale. Si la vitesse du vent est très grande, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. [15]

### I.6.3 Production optimale de l'énergie :

Pour pouvoir obtenir le maximum théorique de chaque vitesse du vent, on doit optimiser le transfert de puissance et ainsi, la machine doit aussi fonctionner à une vitesse variable (régulation de $\lambda$ optimal pour avoir un $C_p$ maximal) et pour se faire une stratégie de gestion

(MPPT) nous permet de suivre le point de puissance maximale afin de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent. Figure I-12

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure I-18. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance fournie soit maximale, ce qui correspond à une valeur de $\lambda$ donnée appelée $\lambda_{opt}$ . La vitesse de rotation optimale $\Omega_{opt}$ résultante est alors donnée par [4]:

$$\Omega\text{opt} = \frac{\lambda\, optV}{R} \qquad (1.9)$$

La zone II de la figure I-18 suivante, représente la caractéristique de la relation (1.9), et la zone I correspond à la vitesse du vent faible qui est insuffisante pour entraîner la rotation de l'éolienne, enfin la zone III correspond à une vitesse du vent très élevée pour laquelle la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter le moindre dégât.

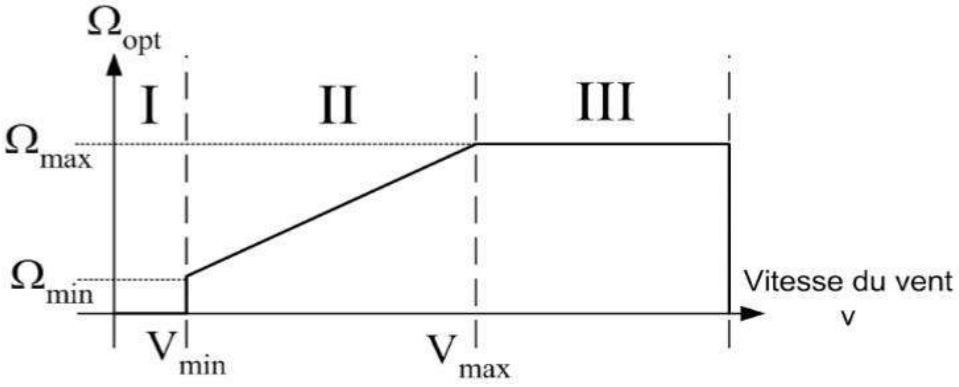



**Figure I-18 :** *Loi de commande d'une éolienne à vitesse variable.*

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

Ces dispositifs sont conçu et commander de façon à limité les perturbations qui sont susceptibles d'être générer sur le réseau, et de faire transité la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, comme le résume la figure I-19 :

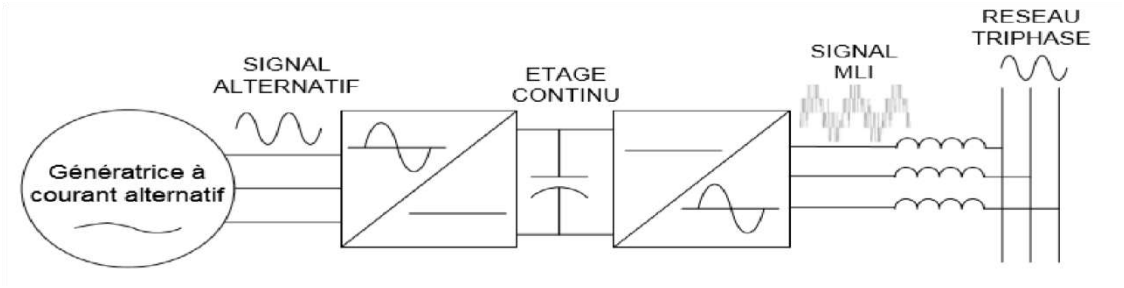



**Figure I-19 :** *Interface électronique de puissance.*

## I.7 Etat de l'art sur les génératrices éoliennes à vitesse variable :

### I.7.1 Système à génératrice synchrone :

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation. [16] [17]

L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents. Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées principalement pour les raisons suivantes :

- Prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares) ;
- Démagnétisation progressive découlant de l'utilisation de ces aimants en présence de champs magnétiques intenses régnant dans le générateur.

Pour une puissance désirée, on a le choix entre une petite génératrice (à faible nombre de pôles) tournant à grande vitesse, ou une génératrice de grande dimension (présentant un grand nombre de pôles) mais tournant plus lentement.

#### ❖ Avantages et inconvénients :

Les systèmes utilisant une génératrice synchrone présente des avantages et des inconvénients qui se résument dans le tableau I-1 :

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.<br>- Absence de boîte de vitesse.<br>- Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse | - Machine spécifique.<br>- Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.<br>- Grand diamètre de la machine |

**Tableau I-1 *:*** *Avantages et inconvénients des génératrices synchrones*

## I.7.2 Système utilisant une génératrice asynchrone :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu.

### ❖ Avantages et inconvénients :

Le tableau I-2 suivant représente les principaux avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens. | - Electronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale |

**Tableau I-2 *:*** Avantages et inconvénients de la machine synchrone**.**

## I.7.3 Système utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation :

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotorique La commande du redresseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. La commande de l'onduleur permet de maintenir la tension du bus constante. (Figure I-20)

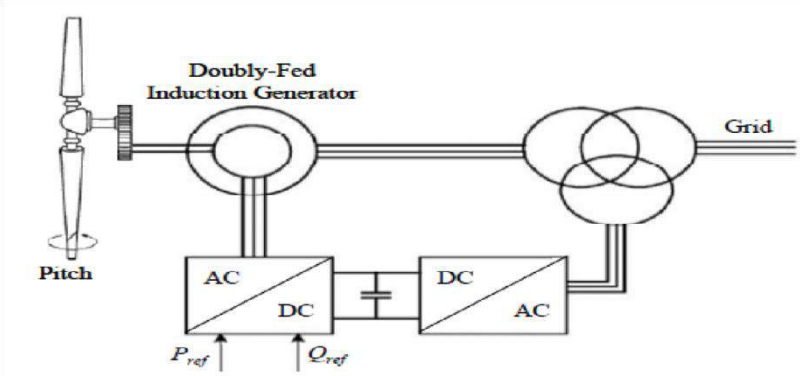



**Figure I-20***: Eolienne utilisant la MADA*

Il existe d'autres configurations de la MADA qu'on peut citer : [18]

### I .7.3.1 MADA à énergie rotorique dissipée :

Le stator est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à un redresseur et une charge résistive est placée en sortie du redresseur. L'ajout d'un hacheur permet de varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur .Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. Figure I-21

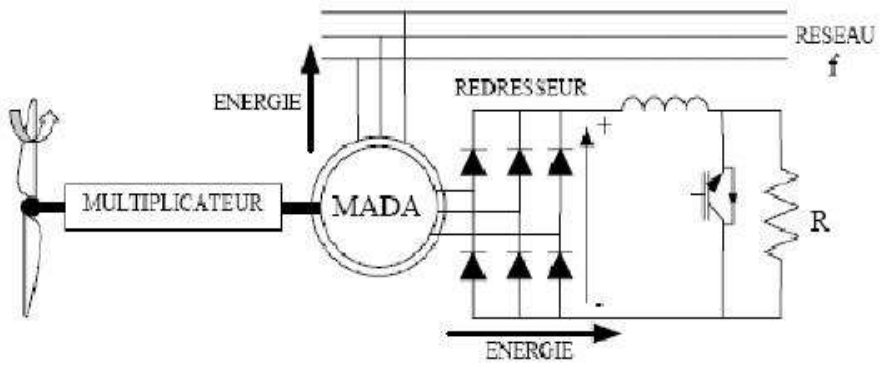



**Figure I-21** *: MADA à énergie rotorique dissipée*

### I.7.3.2 MADA : structure de KRAMER :

Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau. Ce système permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper-synchrone). Figure (I-22)

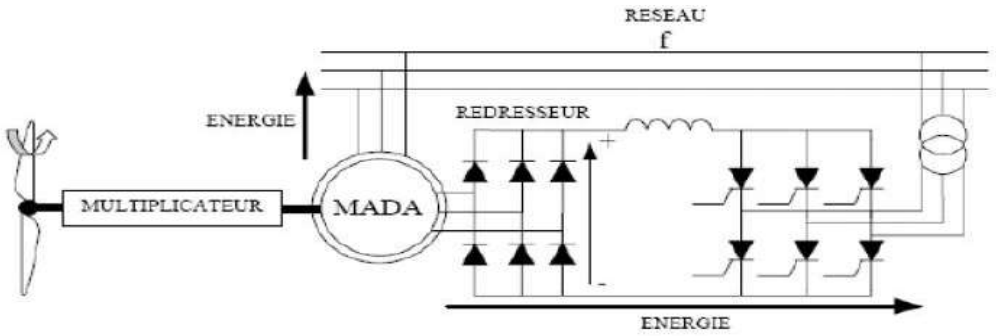



**Figure I-22** *: structure de KRAMER*

### I.7.3.3 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseurs :

Afin de rendre la structure précédente réversible, en échange d'énergie entre le rotor et le réseau, on remplace le redresseur et l'onduleur par un cycloconvertisseur. L'inconvénient de cette structure est la génération des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif. (Figure I-23)

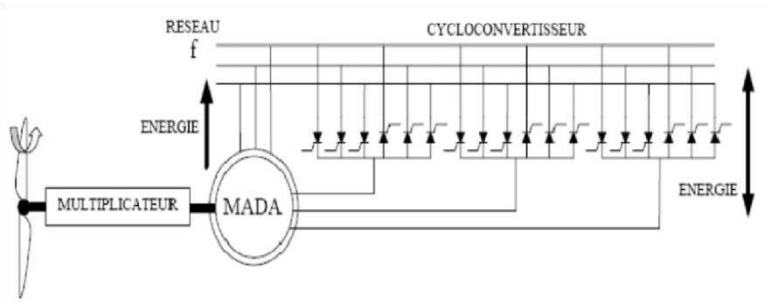



**Figure I-23** *:* structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

### I.7.3.4 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

L'utilisation des convertisseurs à base d'interrupteurs IGBT, permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. (Figure : I-24)

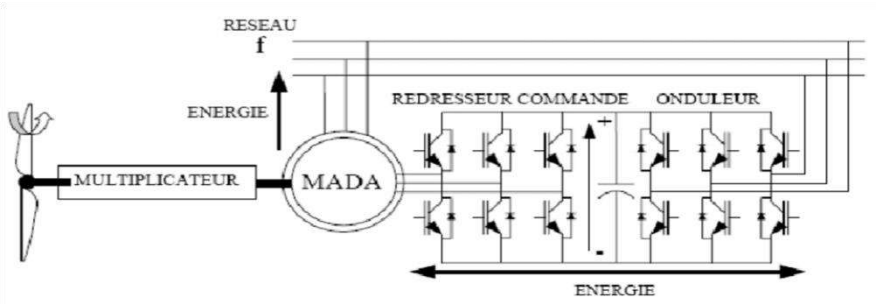



**Figure I-24** *:* structure de Scherbius avec convertiseur MLI

### ❖ Avantages et inconvénients :

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique. Le Tableau I-3 résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de cette génératrice.

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens<br>- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale<br>- Fonctionnement à vitesse variable (±30% de la vitesse nominale). | - Maintenance du multiplicateur<br>- Commande complexe<br>- Oscillations mécaniques. |

**Tableau I-3** *: avantages et inconvénients d'une MADA*

## I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

Comme toute énergie renouvelable, l'énergie éolienne a ses propres avantages et inconvénients qu'il faut étudier pour un meilleur développement de cette dernière.

### a) Avantage:

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [19], [20] :

- La concentration du C02 est augmentée de 25% depuis l'ère préindustrielle.

Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0, 6°C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement à l'énergie fossile, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- L'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de C02 et 21 millions de tonnes de S02 et 17500 tonnes de N02, qui sont les principaux responsables des pluies acides.

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est 1' énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.

- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie dans ces pays pour se développer.

L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales aux énergies plus traditionnelles sur les sites plus venteux. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année ou la demande est plus forte.

### b) Inconvénients :

Comme toute source, l'éolienne présente des inconvénients mêmes s'ils ne sont pas nombreux :

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif

- Le bruit : Notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.

- L'impact sur les oiseaux : Certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études montrent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.

- La qualité de la puissance électrique : 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. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée.

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique bien qu'en terme du coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

## I.9 Connexion des fermes éoliennes vers les réseaux et les contraintes à respecter :

Les éoliennes sont regroupées en ferme. Les éoliennes à vitesse variable et celles basées sur une machine asynchrone à double alimentation sont reliées au réseau au moyen d'une liaison à courant alternatif. Les éoliennes basées sur une machine synchrone peuvent être reliées de la même façon; la présence d'un bus continu dimensionné pour la tension nominale de la génératrice permet également d'envisager une connexion des éoliennes entre – elles via une liaison à courant continu. Cette architecture, imaginée pour les fermes éoliennes off-shore interfacées avec le réseau via un seul convertisseur continu - alternatif, permet d'envisager, par exemple, une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de connexion [21].

### I.9.1 Raccordement au réseau de distribution :

Une fois l'énergie électrique est produite par l'éolienne, il s'agit ensuite de la transmettre au réseau de distribution. Typiquement, pour les machines d'une puissance supérieure à 100 kW, la tension en sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de

Volts. Il est donc souvent nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur élévateur de tension qui permet de se raccorder à un réseau de distribution (10000V ou 15000V).

Cependant, le raccordement au réseau doit prendre en compte certaines particularités de l'éolienne .Il s'agit notamment de toutes les phases transitoires du fonctionnement (démarrage arrêt, absorption des rafales) qui du fait de la nature fluctuante du vent, peuvent occasionner des variations de puissance. Il existe des conditions de raccordement et des réglementations à prendre en considération. Il s'agit notamment de l'arrêté de 17 mars 2003 (4 juillet2003) relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement d'une installation de production d'énergie électrique à un réseau public de distribution. Le

regroupement des éoliennes à vitesse fixes ou à vitesse variable constitue une ferme éolienne on shore ou offshore. On peut distinguer deux architectures de connexion des fermes éoliennes au réseau de distribution :

- La première consiste à connecter ces fermes au réseau au moyen des liaisons en tension alternatives à travers un transformateur comme le montre la figure I-25 :

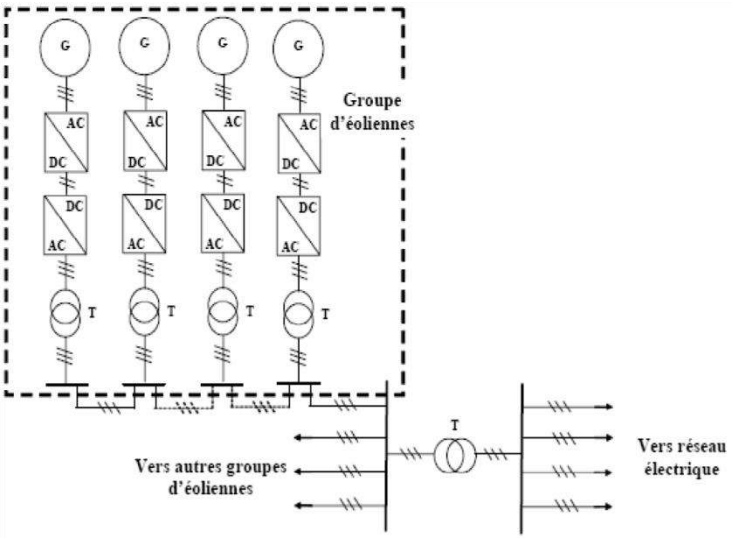



**Figure I-25** : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives [30]

- La seconde architecture consiste à connecter les éoliennes entre elles à travers une liaison en tension continue dont le bus continu est dimensionné pour la tension nominale de la génératrice ; et puis y a un seul convertisseur continu-alternatif qui permet la liaison au réseau électrique. Cette architecture est particulièrement envisagée pour les fermes éoliennes offshore et permet une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de raccordement. [26] [27]

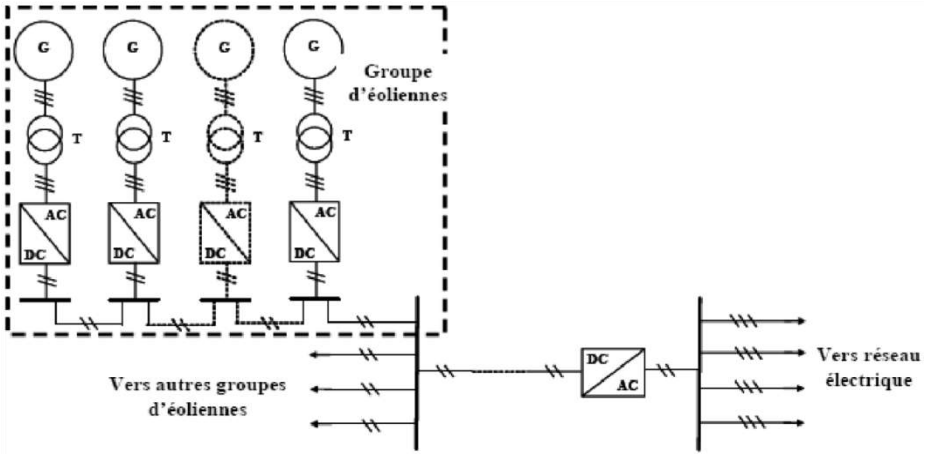



**Figure I-26 :** Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues [30]

### I.9.2 Tension de raccordement :

Les modalités de raccordement au réseau électrique des installations de production, et notamment les contraintes techniques, sont définies par des textes réglementaires tels que décrets et arrêtés. Les contraintes techniques dépendent principalement de la puissance à raccorder qui définit le réseau de connexion. Le tableau I-4 donne les niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance [23].

| Type de réseau | Plage de tension | Niveau de tension | Puissance |
|---|---|---|---|
| BT | BT monophasé | 230V | S≤18KVA |
| BT | BT triphasé | 400V | S≤250KVA |
| MT | 1Kv<U≤50KV | 15KV, 20KV | P≤12MW |
| HT (HTB1) | 50Kv<U≤130KV | 63KV, 90KV | P≤50MW |
| HT (HTB2) | 130Kv<U≤350KV | 150KV, 225KV | P≤250MW |
| HT(HTB3) | 350Kv<U≤500KV | 400KV | P>250MW |

**Tableau I-4 :** Niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur Puissance

.Les installations de production relèvent donc :

- du réseau public de transport si la puissance installée est supérieure à 12 MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension supérieur ou égal à 63 kV (domaine de la haute tension HT).
- du réseau public de distribution si la puissance installée est inférieure ou égale à 12 MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieure ou égale à 20 kV [21].

### I.9.3 Contraintes de raccordement de l'éolien au réseau de distribution :

❖ En fonction de leur type, de leur tension de raccordement et de leur puissance ; les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement.

❖ En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr. Ces services comprennent :

- Les réglages primaire et secondaire de la tension ;

- Les réglages primaire et secondaire de la fréquence ;
- Le fonctionnement en réseau séparé ;
- Le renvoi de tension et la participation à la reconstitution du réseau.

• Les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport. Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence (c'est-à-dire de la vitesse pour les groupes tournants) qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation.

• Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter, dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation, les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gestionnaire du réseau de transport. Les contraintes de raccordement en fonction du type d'installation. Sans prétendre être exhaustifs, nous allons évoquer quelques-unes de ces contraintes dans la suite de cette section et dans la section suivante.

## I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales d'une éolienne. En premier lieu, nous avons donné des généralités sur l'éolienne suivie d'un bref aperçu sur la situation actuelle de cette dernière.

Ensuite, nous avons décrit les différents types d'aérogénérateurs à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. L'aspect aérodynamique de la conversion de l'énergie éolienne est aussi détaillé dans ce chapitre en se basant sur la limite de BETZ et la production d'énergie mécanique.

Le contrôle électrique au niveau de la génératrice et transmission au réseau nous offre deux structures essentielles (entrainement à vitesse fixe et variable). Compte tenu des deux principaux modes de fonctionnement d'une éolienne, à savoir: génération d'énergie électrique de façon autonome sur des charges isolées ou raccordement sur un réseau déjà existant, il nous a paru intéressant de pouvoir étudier chaque mode de fonctionnement. Aussi, nous avons

exposé l'état de l'art des différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable.

La dernière partie de ce chapitre a décrit les deux modes de connexion des éoliennes pour former une ferme en se focalisant sur les contraintes et les réglementations définissant les modalités de connexion de ces fermes au réseau électrique. L'intégration de la production éolienne dans le système électrique n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement de ce dernier, pour cela on a cité quelques avantages et inconvénients de l'utilisation de l'énergie éolienne.

# Chapitre II :

# Emulateur de vent à base d'une MCC

## II.1. Introduction

L'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application, de création d'emplois et de richesses [1]. Les éoliennes permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [3]. Cependant, la prévision du vent s'avère très difficile parfois impossible et son profil est aléatoire (généralement fort en hiver et faible en été). Pour combler cette lacune, il faut équiper certaines éoliennes d'un système de stockage d'énergie, ou les utiliser comme énergie d'appoint (complémentaire) aux autres sources telles que l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité, l'énergie thermique, etc. Pour les recherches sur le développement et l'essai des stratégies de contrôle avancées et des algorithmes de suivi du point de fonctionnement à puissance maximale [7], [9], [19] la mise à disposition d'une plate-forme expérimentale contrôlable sans dépendance de la source naturelle du vent est très importante. Cependant, le développement et les essais de nouvelles technologies doivent être effectués en utilisant un banc d'essai isolé et contrôlé. Dans la littérature ce type de système existe, mais la majorité d'entre eux sont concentrés dans le contrôle et la modélisation de la génératrice. Dans [28], une brève description des différents types de système de conversion d'énergie éolienne est présenté, mais ce document se réfère au problème de l'initialisation et ne signale pas la mise en œuvre d'un prototype. Dans [21] un examen des principaux types de générateurs et de convertisseurs statiques sont présentés. Un émulateur éolien en utilisant un moteur à courant continu pour caractériser la turbine réelle est présenté dans [5] où les caractéristiques statiques et dynamiques sont modélisées. La mise en œuvre expérimentale est la meilleure de tous les documents examinés, mais il est possible d'améliorer les performances en utilisant un simple régulateur PI pour la commande linéaire à la place du filtre de Kalman. Ce chapitre montre les étapes de la modélisation d'un émulateur physique de turbine éolienne. Les variations du vent sont d'abord reconstruites grâce à sa décomposition spectrale de Van der Hoven [5], [19], [31], [32]. Elles sont ensuite appliquées à un modèle de turbine éolienne dont les variations de vitesse ainsi obtenues sont appliquées en référence à une machine à courant continu (MCC). L'intérêt de cette étude est de pouvoir disposer d'un émulateur physique auquel nous pouvons coupler différentes génératrices électriques

de façon à tester leur intégration et leur efficacité dans un système éolien et sur un réseau électrique.

## II.2. Construction de l'émulateur :

L'émulateur est basé sur le système de conversion d'énergie montré (figureII.1)comme il n'est pas possible d'utiliser une éolienne dans un laboratoire, les chercheurs remplacent le vent et la turbine éolienne par un PC afin d'émuler le comportement de la turbine éolienne par une machine à courant continu (figure II.2) [36]. Le couple généré par la turbine est appliqué en référence à la MCC accouplée à la génératrice. Le PC implémentant MATLAB/SIMULINK contient un programme qui contient le modèle de la turbine éolienne et sa commande en MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation ainsi que la commande en couple de la MCC. [32]

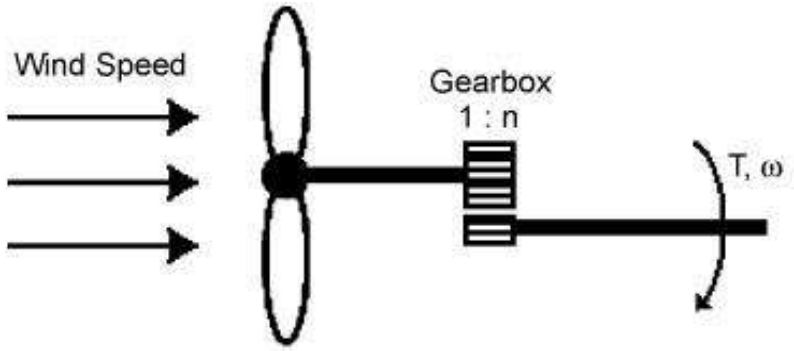



**Figure.II.1 :** système d'une turbine éolienne *[32]*

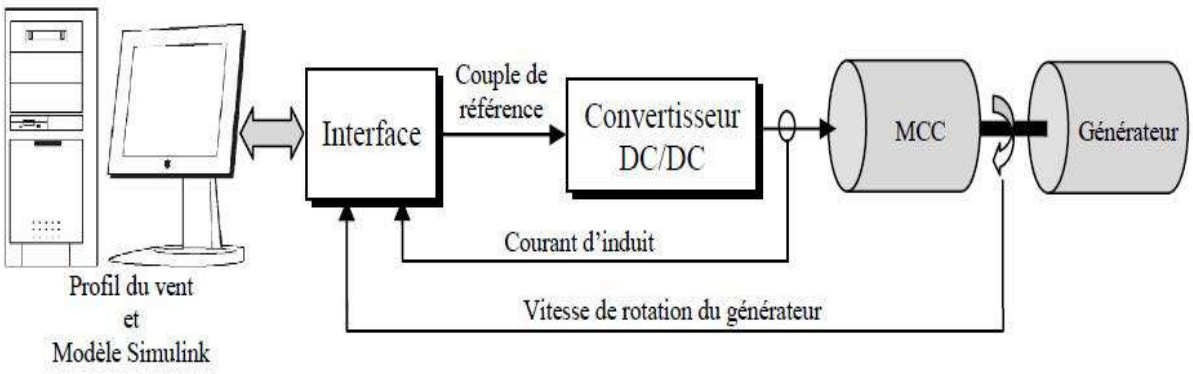



**Figure II.2 :** schéma du système d'un émulateur éolien à base d'une MCC[31].

## II.3. Modélisation de la turbine éolienne :

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur *R*, fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain *G*.

### II.3.1 Modélisation de la turbine :

La figure (II.3) montre le schéma d'une turbine éolienne.

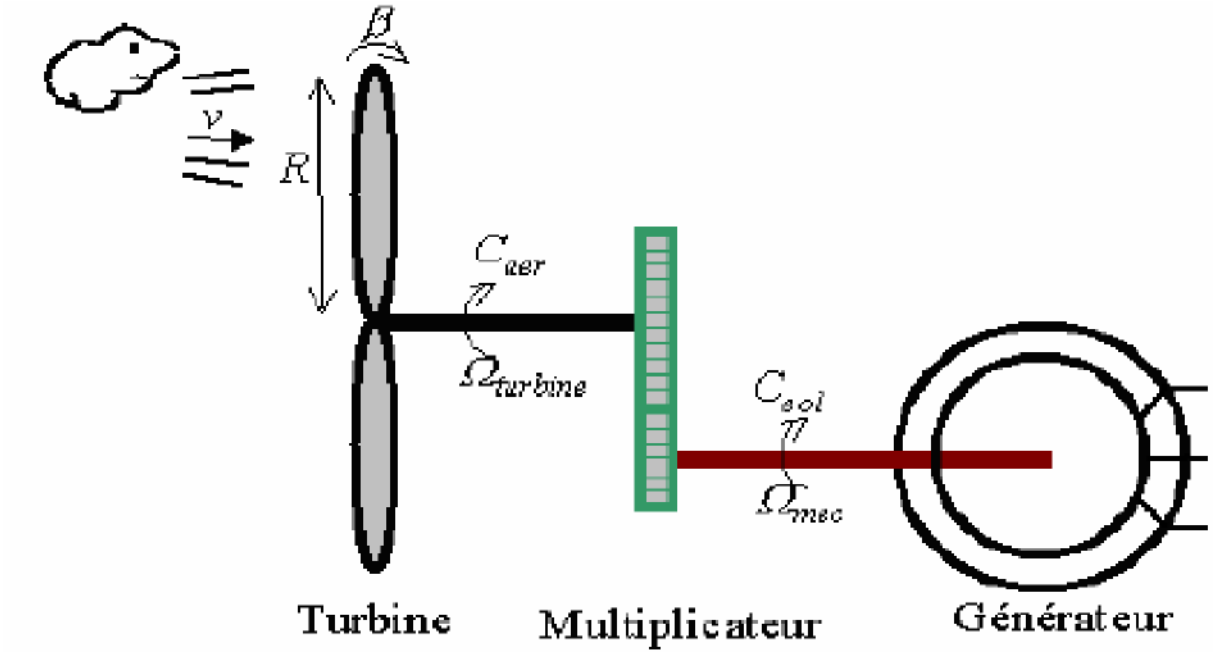



**Figure .II.3***: Schéma d'une turbine éolienne.*

La puissance du vent est définie comme suit :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S V^3 \qquad \text{(II.1)}$$

Ou :

$$S = \pi . R^2{}_p \qquad \text{(II.2)}$$

Rp: Rayon de la turbine (longueur de pale)

La puissance mécanique disponible sur le rotor PT est généralement exprimée en utilisant le coefficient de puissance et est donnée par:

$$PT = \frac{1}{2} S.\rho.Cp(\lambda,\beta)V^3 \qquad \text{(II.3)}$$

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

$$P_{oer} = P_v . C_p = C_p(\lambda,\beta)\frac{1}{2}\rho S V^3 \qquad \text{(II.4)}$$

Avec :

$C_p$: est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, généralement valables pour une turbine particulière : chaque turbine a un comportement spécifique. Ainsi, tout le monde est confronté à ce problème de modélisation du coefficient de puissance. Néanmoins la modélisation utilisée dans ce travail apparait dans d'autres références [2], [4], [5], [7]. Elle a l'avantage de se présenter sous la forme d'une seule équation, valable quel que soit l'angle de calage p et quel que soit le rapport de vitesse $\lambda$.

Le coefficient de la puissance Cp est en fonction du rapport de vitesse λ. et de l'angle de calage des pales β. Celui utilisé a pour expression :

$$C_P(\lambda,\beta) = (0.5 - 0.001675(\beta - 2))\sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad \text{(II.5)}$$

$\beta$: est l'angle d'orientation des pales.

$\lambda$:est le rapport de vitesse défini par :

$$\lambda = \left(\frac{\Omega_{tr} R}{V_{ve}}\right) \quad \text{(II.6)}$$

$\Omega_{tr}$: vitesse de la turbine[rad/s].

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{tr}} \frac{1}{2\Omega_{tr}} C_p \rho S V^3 \quad \text{(II.7)}$$

Sur la Figure II.4, plusieurs courbes sont distinguées, mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 8.1, Cpmax, \beta = 0$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance Cp et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de $\beta$ permet de réduire le coefficient Cp et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

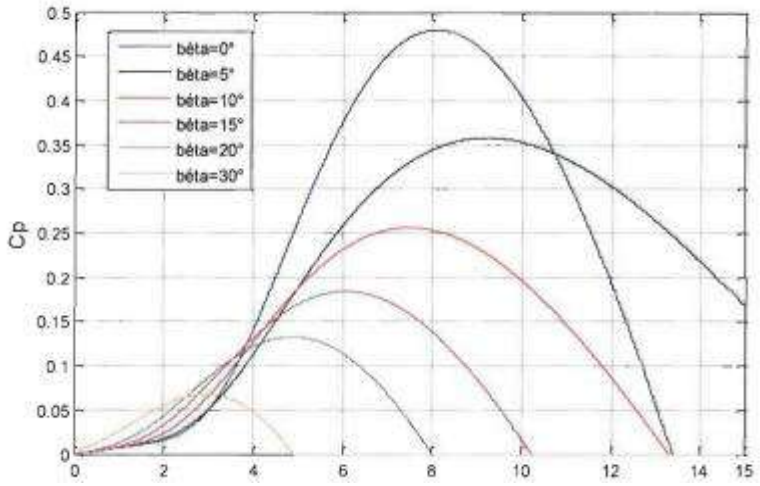



**Figure II.4** : Courbe du coefficient Cp $(\lambda, \beta)$

La puissance aérodynamique de l'éolienne peut être aussi exprimée comme suit :

$$Pt = \Omega t . Tt \tag{II.8}$$

L'expression du couple aérodynamique TT est alors donnée par:

$$T_t = \frac{1}{2}\rho\pi R p^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 \tag{II.9}$$

$C_p(\lambda, \beta)$- est le coefficient du couple, son expression est donnée par:

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\Omega t} \tag{II.10}$$

on connaissant la vitesse de rotation de la turbine et la puissance mécanique disponible, le couple mécanique disponible sur l'arbre de la turbine est donc exprimé par la formule suivante :

$$Ct = \frac{Pt}{\Omega t}\frac{1}{2\lambda}\rho\pi R^3 V^2 C_p(\lambda) \tag{II.11}$$

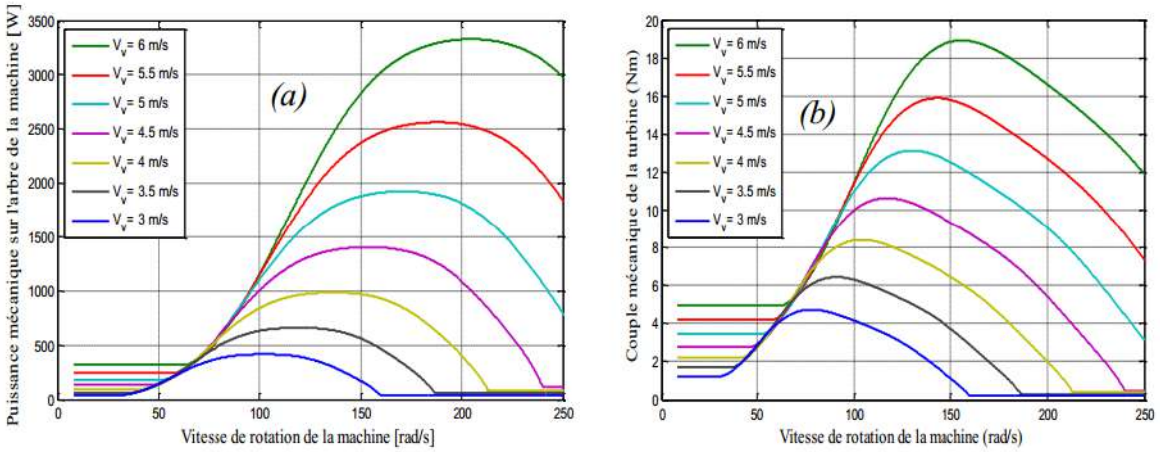



**Figure II.5** : Caractéristique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation pour différentes valeur de la vitesse de vent, (a) : Puissance mécanique sur l'arbre de la machine et (b) : couple mécanique

## II.3.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement comme suit :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \tag{II.12}$$

Avec :

$C_g$:Couple issu du multiplicateur.

$C_{aer}$:Couple aérodynamique.

$G$ : gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{tr} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{II.13}$$

## II.3.3 Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$j_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum des\ couples = C_{mec} \tag{II.14}$$

$j_t$: C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

$C_{mec}$: C'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

Cem : Le couple électromagnétique produit par la génératrice

$C_{vis}$ : Le couple de frottement visqueux

Cg : et le couple issu du multiplicateur.

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.15}$$

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

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \tag{II.16}$$

## II.3.4 Schéma bloc du modèle de la turbine :

La figure (II.6) montre le schéma bloc du modèle de la turbine.

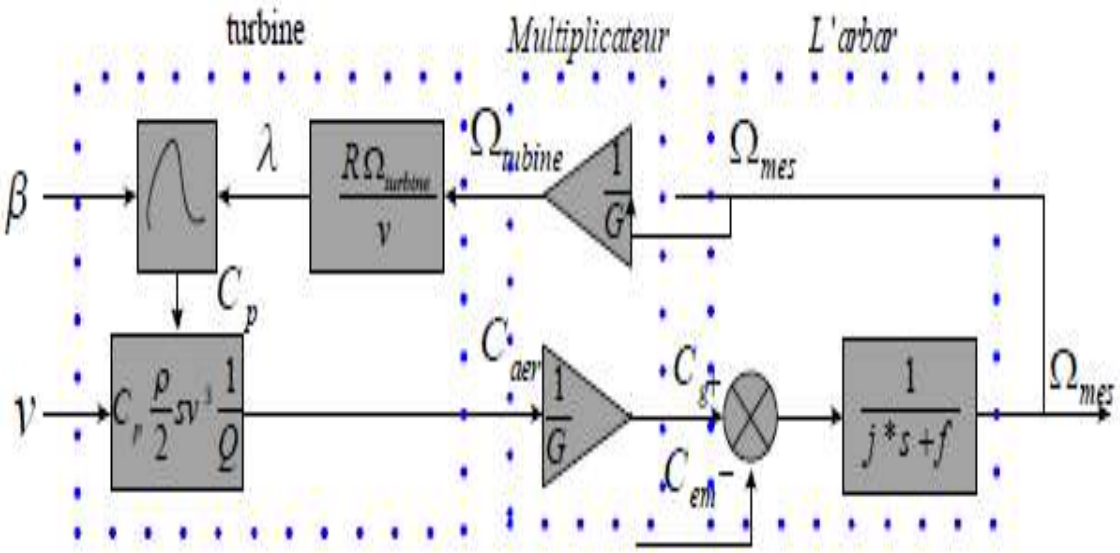



**Figure II.6***: Schéma bloc du modèle de la turbine*

La turbine génère le couple aérodynamique équation (II.6) qui est appliquée au multiplicateur.

Les entrées de la turbine sont :

$v$ : La vitesse du vent.

$\beta$: L'angle d'orientation des pales.

$\Omega_{mec}$: La vitesse de rotation de la turbine.

Le modèle de l'arbre d'écrit la dynamique de la vitesse mécanique il a donc deux entrées :

-Le couple du multiplicateur.

-Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle de la pale

-Le couple électromagnétique de la génératrice

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

La figure (II.7) représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

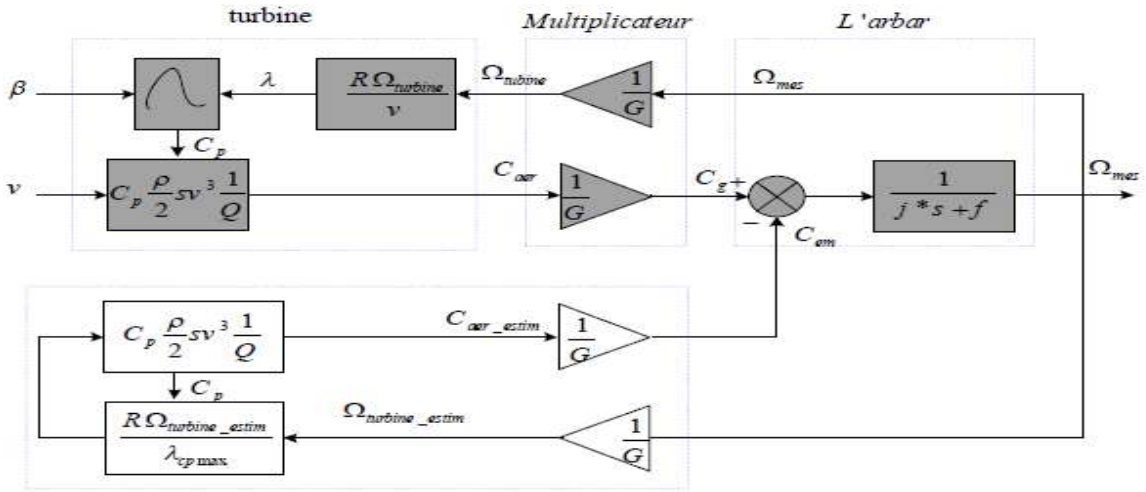



**Figure II.7:** Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

## II.4. Modélisation de la MCC :

Pour notre travail on utilise une MCC à excitation séparée représentée dans figure suivante:

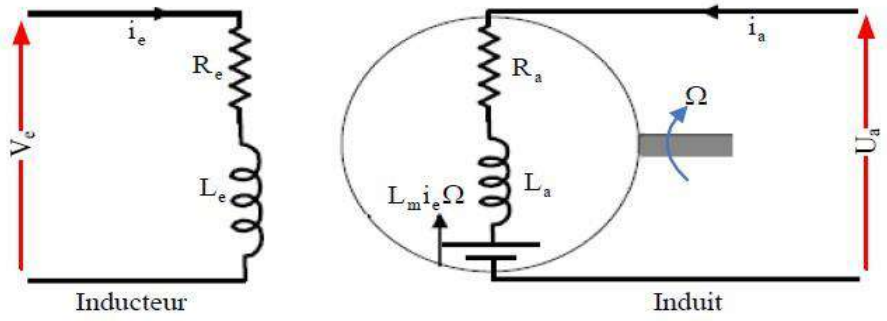



**Figure II.8 :** Modèle électrique de la MCC à excitation séparée [36]

La machine à courant continu peut être modélisée par ses équations électriques mécaniques et électromécaniques ;

### II.4.1 Partie électrique de la machine :

Prenant en compte la résistance Ra et l'inductance La du circuit d'induit, du collecteur, des balais et des connexions, et en les supposant toutes deux constantes (pas de variation due à l'échauffement ni à la saturation magnétique), l'équation de tension induite s'écrit:

$$Ua = E + Raia(t) + La\frac{dia(t)}{dt} \quad \text{(II.17)}$$

La tension induite e(t), appelée force électromotrice (FEM) est proportionnelle à la vitesse angulaire Ωmcc(t) et au flux inducteur De(t) qui à son tour est proportionnel au courant d'inducteur ie(t) et à l'inductance mutuelle Lm :

$$E = K.\Omega mcc(t) \quad \text{(II.18)}$$

$$K(t) = Lm.Ie(t) \quad \text{(II.19)}$$

Le couple électromagnétique de la MCC

$$Ce = \frac{Pe}{\Omega} = \frac{EIa}{\Omega} = Ke.Ie \quad \text{(II.20)}$$

## II.4.2.Partie mécanique :

Ainsi l'équation mécanique peut s'écrire comme suit :

$$(Jm + Jmcc)\frac{d\Omega}{dt} + (fm + fmcc)\Omega = Ce - Cr = KeIa - Cr \quad \text{(II.21)}$$

$$Cem - Cr - J\frac{d\Omega}{dt} - f\Omega = 0 \quad \text{(II.22)}$$

$$Cem - Cr = J\frac{d\Omega}{dt} - f\Omega = 0 \quad \text{(II.23)}$$

fmcc :Coefficient de frottement.

J mcc (t) : Inertie de la machine à courant continu.

Voilà en somme les équations régissant le fonctionnement du moteur. Mais pour mieux les exploiter, nous allons utiliser leurs transformées de Laplace.

Les transformées de Laplace des équations sont les suivante :

$$Ua(t) = E + Raia + La.\frac{dia(t)}{dt} \qquad Ua - E = (Ra + pLa)Ia \quad \text{(II.24)}$$

$$E = Ke.\Omega mcc(t) \qquad E = K.\Omega mcc \quad \text{(II.25)}$$

$$Cem - Cr = J\frac{d\Omega}{dt} - f\Omega = 0 \qquad \text{Cem} - \text{Cr} = \Omega\,(\text{f} + \text{JPJ}) \quad \text{(II.26)}$$

Les transformées de Laplace obtenues nous permettent de modéliser le moteur sous forme de schéma bloc suivant :

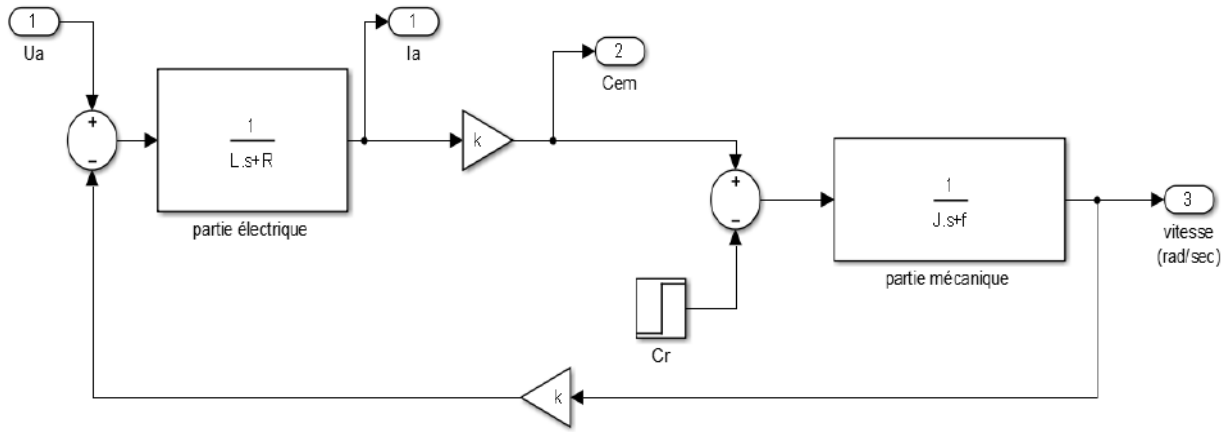



**Figure.II.9:***:* : Schéma bloc du modèle de MCC

## II.4.3.Stratégie de commande de la machine à courant continu

À la sortie du modèle de la turbine on a une vitesse de rotation. Elle représente la vitesse de rotation de référence à laquelle on souhaite asservir la vitesse de rotation de la machine. L'objectif de la commande à réaliser est d'asservir la vitesse en dépit du couple résistant et ce au moyen des mesures du courant d'induit et de la vitesse de rotation de la machine. Les régulateurs utilisés pour la commande du système seront du type proportionnel intégral (PI), pour sa simplicité et afin de réduire l'erreur statique. Le régulateur comprendra deux structures en cascade: une boucle interne régulant le courant de la machine et une boucle externe contrôlant la vitesse de rotation de la machine (Figure II.13). La boucle interne sera 10 fois plus rapide que la boucle externe afin d'avoir une bonne régulation. Les fonctions de transferts des régulateurs sont de la forme:

Pour la boucle de courant:

$$FTcourant = \frac{Kpi.P+Kii}{P} \tag{II.27}$$

Pour la boucle de vitesse:

$$FTvitesse = \frac{Kpv.P+Kiv}{P} \tag{II.28}$$

Et les paramètres de ces régulateurs sont déterminés par compensation des pôles:

$$Kpi = 2\rho L_a - R_a \tag{II.29}$$

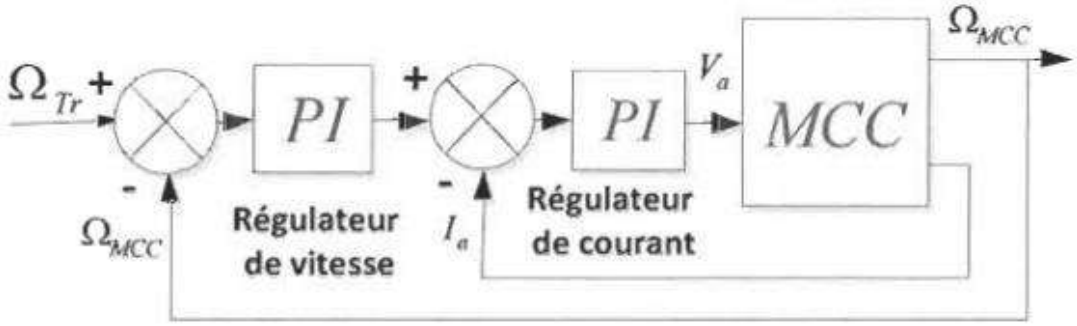
$$Kii = 2\rho^2 L_a \tag{II.30}$$

$$Kpv = (2\rho J - f)/p \quad \text{(II.31)}$$

$$Kiv = (2\rho^2 J)/p \quad \text{(II.32)}$$

La fonction de transfert de la MCC qui permet de mettre en évidence les régulateurs est de la forme:

$$FTmcc = \frac{1}{PLa+Ra} . \frac{Ke}{Pjmcc+fmcc} \quad \text{(II.33)}$$




**FigureII.10** : Schéma bloc du régulateur

## II.5.Principe du variateur de vitesse pour un moteur à courant continu :

Il y a plusieurs façons de procéder pour varier la vitesse d'un moteur à courant continu. On peut le faire en variant la tension d'alimentation à ses bornes mais dans ce cas une partie importante de l'énergie est consommée par le dispositif d'alimentation. Pour cette raison, on préfère l'alimenter de façon discontinue avec un hacheur et faire ainsi varier la tension moyenne à ses bornes. On parle alors de Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI), très utilisé dans le domaine de la régulation de vitesse de rotation d'un moteur courant continu [9].

### II.5.1. Hacheur réversible en tension et en courant :

On reprend la structure du hacheur réversible en tension que nous venons de donner en remplaçant les interrupteurs par des interrupteurs réversibles en courant. Dans ce cas, le courant dans la charge peut changer de signe. Comme pour le hacheur simplement réversible en courant, ce sera la diode ou le transistor qui sera passant,

suivant le signe du courant dans l'interrupteur. On obtient donc la structure représentée dans la figure (II.11).

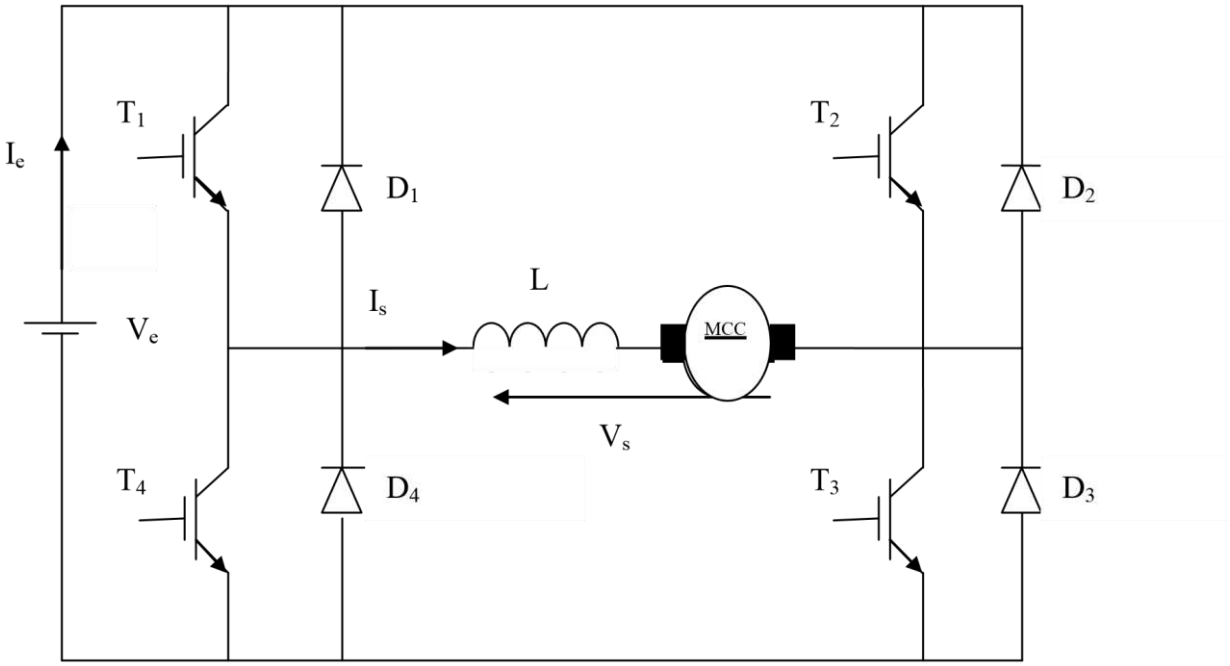



**Figure II-11**:Schéma de principe du hacheur révisible en tension et en courant

Cette fois, la tension moyenne de sortie et le courant moyen de sortie peuvent être positifs ou négatifs. Source et charge peuvent avoir tous les modes de fonctionnement.

## II.5.2. Technique de commande à MLI :

La qualité de la tension de sortie d'un hacheur dépend largement de la technique de commande utilisée pour commander les interrupteurs de ce hacheur. Il existe plusieurs techniques de commande et le choix d'une technique parmi toutes les autres dépend essentiellement du type d'application auquel l'appareil est désigné. La technique la plus utilisée dans les variateurs de vitesse pour moteur à courant continu est la commande par modulation de la largeur d'impulsion MLI.

## II.5.3. régulation de vitesse des moteurs à courant continu :

Au cours de fonctionnement d'un moteur à courant continu, des éléments peuvent varier :

Le couple résistant, la tension du réseau …etc., Provoquent une déstabilisation de la vitesse réelle par rapport à celle désirée ; C'est ici qu'apparait l'intérêt de la régulation.

La régulation doit être double ; c'est-à-dire on doit agir sur la vitesse mais aussi sur le courant pour le maintenir dans des limites acceptables lors des situations suivantes : Démarrage rapide, variation brutale du couple résistant, freinage brusque ou accroissement très rapide de la consigne de la vitesse.

La structure d'un variateur de vitesse comporte donc généralement deux boucles de régulation en cascade , La grandeur principale à contrôler est la vitesse Ω. Celle-ci compare la tension correspondant à la vitesse réelle, avec la tension de référence de vitesse et l'autre boucle contrôle le courant, comme la montre la figure (II.12).

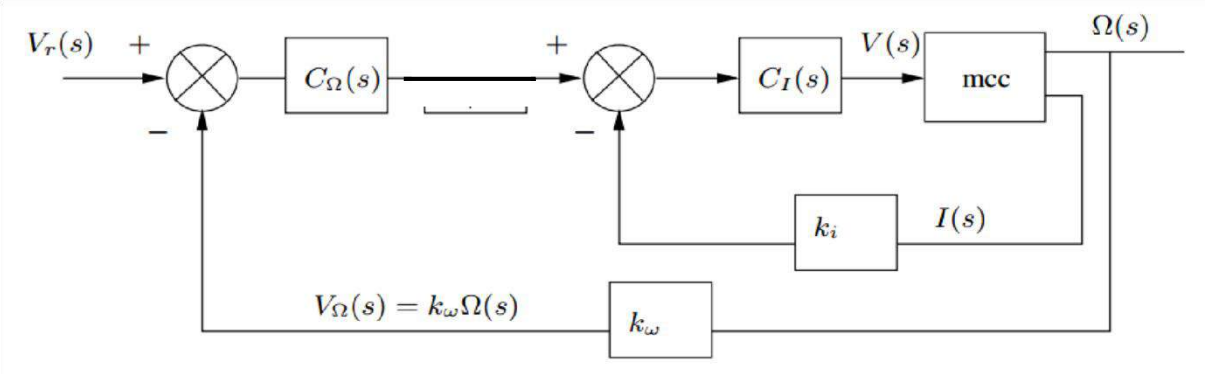



**Fig.II.12** : Principe de régulation de la vitesse d'un moteur à courant continu.

## II.5.4. Simulation de l'émulateur :

Afin de pouvoir simuler l'émulateur, nous avons utilisé la commande MPPT avec asservissement de vitesse utilisé dans la turbine réelle. La simplicité du système à commander nous a amené à choisir un correcteur PI, le modèle d'état est représenté dans la figure (II.13).

Une fois que la commande de la MCC établie, on ajoute la turbine précédemment étudiée en ajoutant une commande en couple par le biais d'un régulateur PI. Cet ensemble permet d'émuler la partie mécanique de l'aérogénérateur ; le schéma bloc de l'ensemble est représenté à la figure :

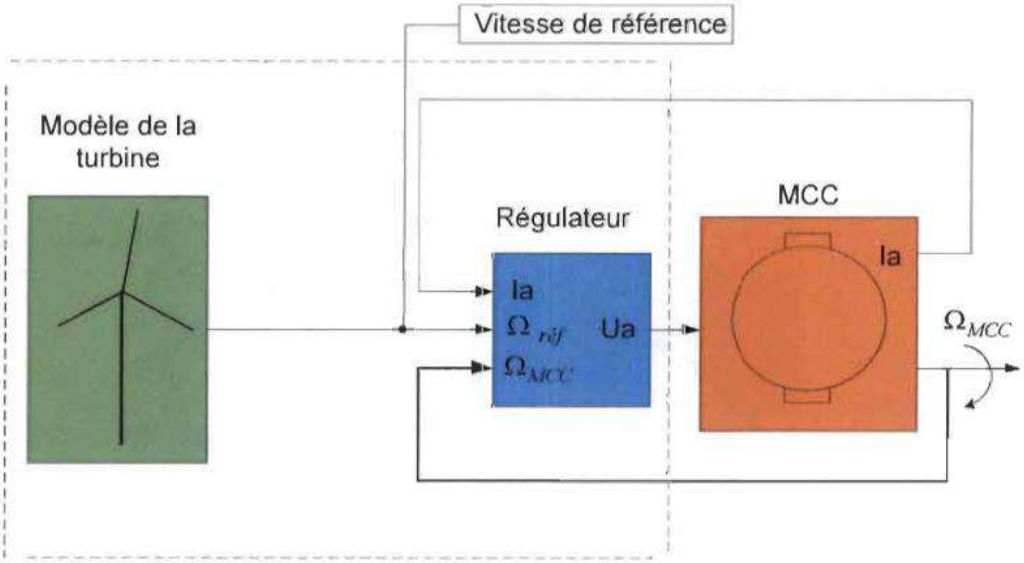



**Figure II.13 :** *schéma bloc de l'émulateur*

## II.5.5. Résultats de simulation :

Les tests par simulation sont conduits selon le schéma Matlab-Simulink de la figure II.14

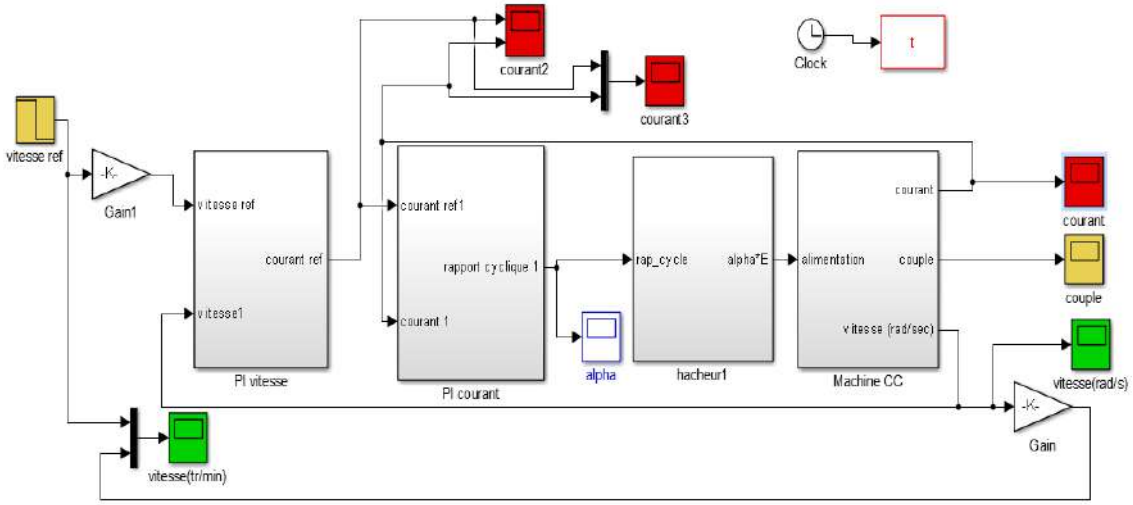



**Figure II.14** : Schéma Matlab –Simulink du système étudié

Après avoir mis en œuvre l'émulateur de la turbine éolienne on peut dire que la MCC a été bien commandée en couple, d'où le couple électromagnétique de la machine est tout le temps égal au couple de référence.

Les figures 15 ,16 et 17représentent, respectivement la vitesse de rotation, , le courant d'induit et le couples en fonction du temps :

Nous avons considérés une vitesse de rotation de référence variable de 1500rad/s de t=0s jusqu'à t=1.s et 1000rad/s pour t>1s jusqu'à t=3s. Puis, elle diminue pour atteindre 1000rad/s. On remarque que la vitesse de rotation suit parfaitement sa valeur de référence. Toutefois, on constate que la tension d'alimentation varie en fonction de la variation de la vitesse de rotation. Et cela, peut être justifié le fait que la tension de référence de la commande MLI et la sortie système de commande de la chaine d'entrainement.

Par ailleurs on remarque que, le changement de la vitesse de rotation n'influence pas le changement du courant, ce qui démontre que les deux grandeurs (Vitesse de rotation et Courant) peuvent être contrôlées indépendamment.

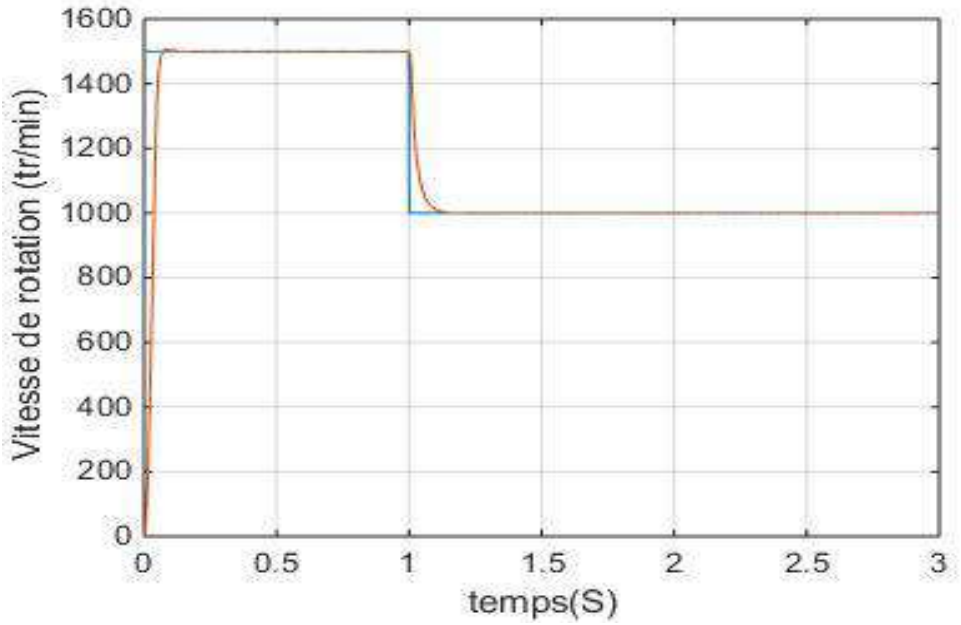



**Figure II.15***: vitesses de rotation en fonction du temps*

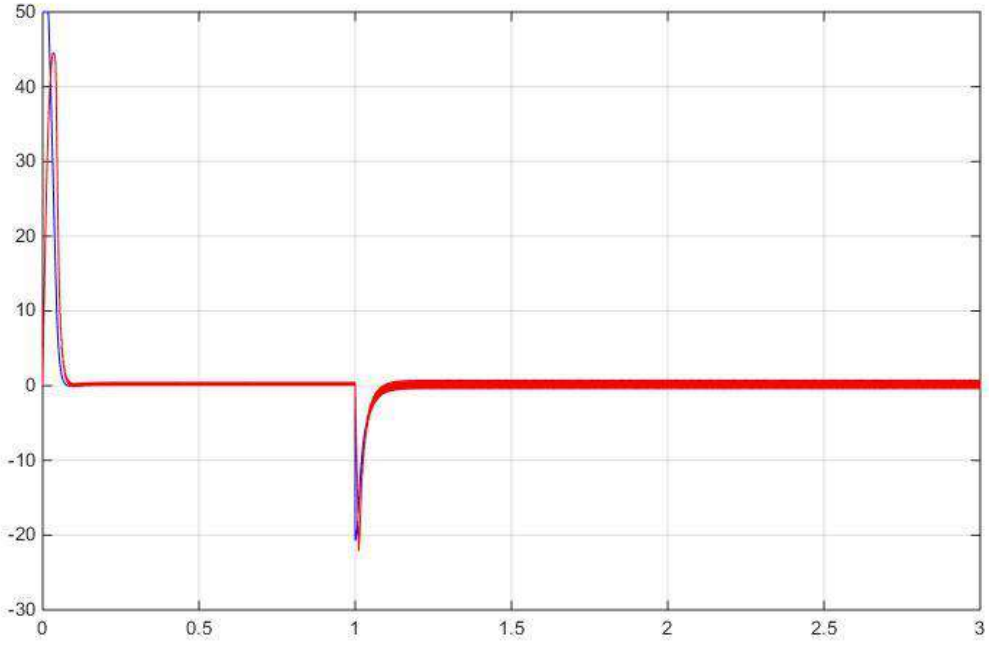



**Figure II.16**: *Courant d'induit*

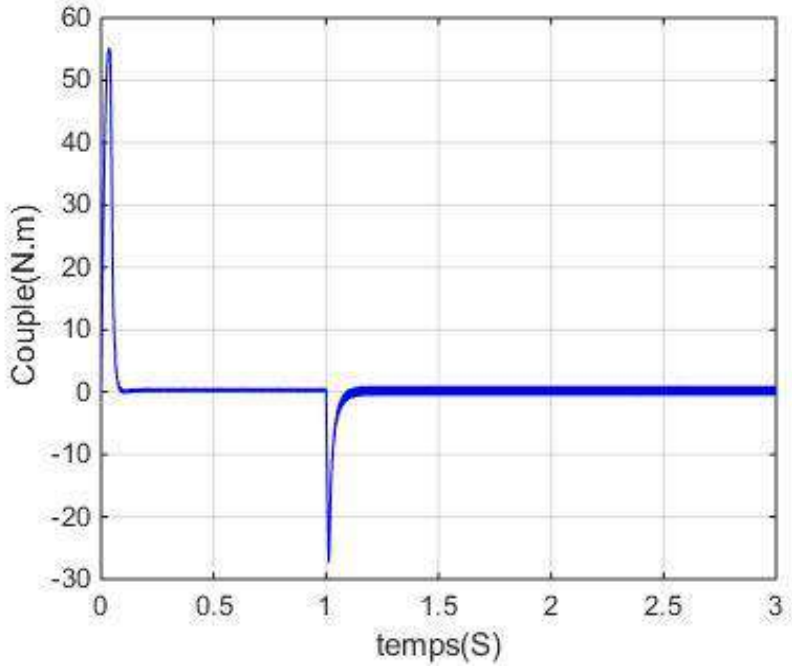



**Figure II.17**: *couple en fonction du temps*

## II.6 Modélisation et reproduction des variations du vent :

### II.6.1 Définition du vent :

Le vent est un courant d'air qui se forme lorsque l'air d'une zone de haute pression se déplace vers une zone de basse pression ; et comme étant un champ de vitesse de déplacement de masses d'air, il est aussi le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, ainsi il constitue la source primaire d'énergie déterminant pour le calcul de la production de l'électricité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie.

### II.6.2.Modélisation de la vitesse du vent :

Dans le but de reproduire les caractéristiques de la vitesse du vent, il existe deux méthodes qui sont les mesures expérimentales à partir d'un site bien déterminé et la modélisation analytique à partir d'un modèle mathématique. Dans notre cas on utilisera la deuxième méthode pour sa flexibilité à envisager plusieurs scénarios. Parmi les méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent, celle qui utilise la caractéristique spectrale de Van Der Hoven [5], [19], [24], [31], [32] est le plus répandue. La vitesse du vent V est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [19].

$$V=f(t) \qquad (II.34)$$

Cette fonction du vent peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations [19], [24] :

$$V = V0 + \sum_{i=1}^{n} A_i \sin(\omega_i + \varphi_i) \qquad (II.35)$$

Tel que:

Vo: est la composante moyenne;

Ai, $\omega_i$ et $\varphi_i$ sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante. Sur la Figure II.32 est montré un exemple de profil de vent reconstruit à partir de la caractéristique spectrale de Van der Hoven et c'est ce profil qui sera appliqué au système étudié dans ce mémoire. Son équation est donnée par:

V= 6+0.2*sin(0.1047*t)+2*sin(0.2665*t)+sin(1.2930*t)+0.2*sin(3.6645*t) (II.36)

Le schéma du modelé de la turbine éolienne Matlab-Simulink

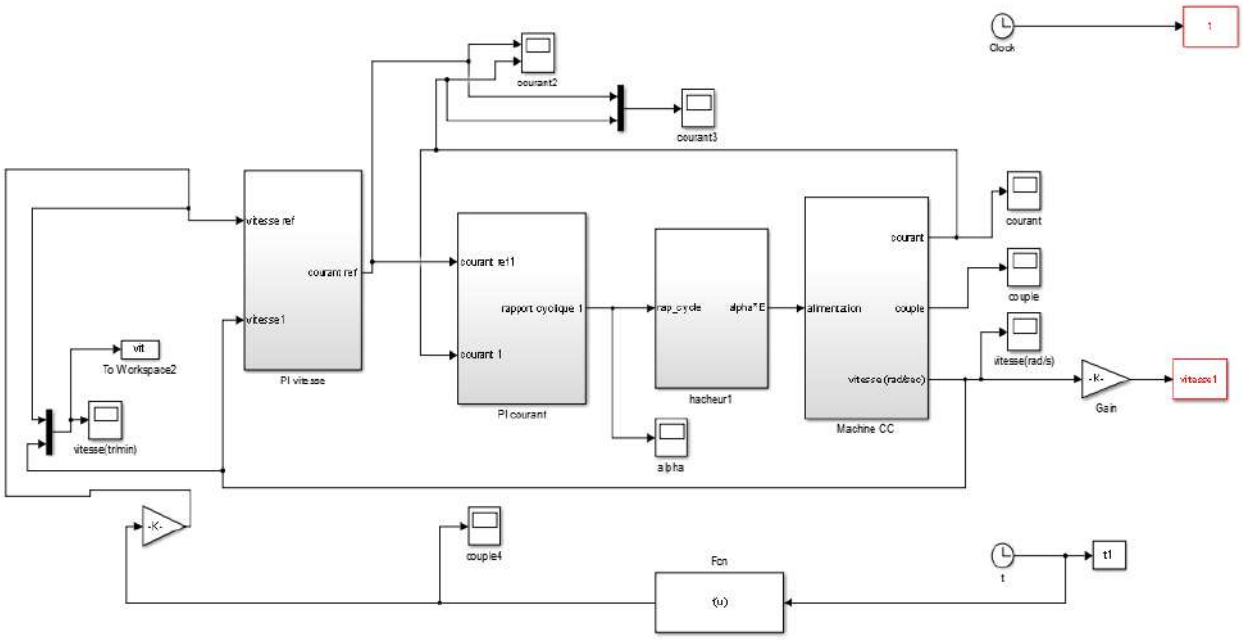



**Figure II.18** :schéma du modelé de la turbine éolienne Matlab-Simulink

L'évolution temporelle obtenue après avoir simuler l' équation (II.36) est la suivante :

## II.6.3. Résultats de simulation des modèles de la turbine et de la machine à courant continu :

Le schéma utilisé pour la simulation est représenté sur la Figure II.18 et le modèle Simulink est présenté Par Figure II.19. La Figure II.20 représente l'allure de la vitesse du vent. La Figure II.221 montre la vitesse de la MCC et sa référence. On voit bien qu'il y a une bonne poursuite de la valeur de référence.

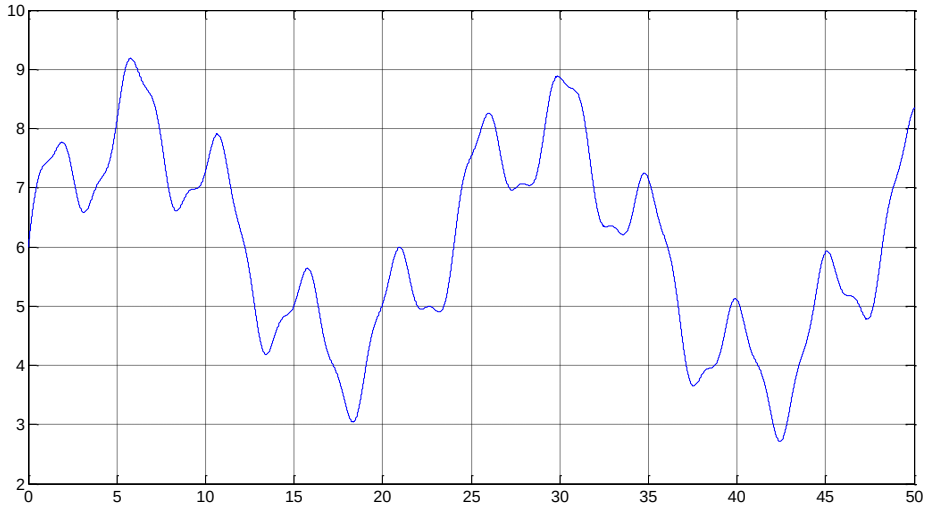



**Figure II.19** : Profil de vitesse du vent

pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une valeur variable au environ de l'intervalle [3,9.2] ce qui montre clairement la perturbation que crée profil du vent sur le couple mécanique de la turbine ce qui génère des vibrations indésirables au fonctionnement du système.

La figure (II.20) montre la vitesse de référence et vitesse mesurée de la MCC.

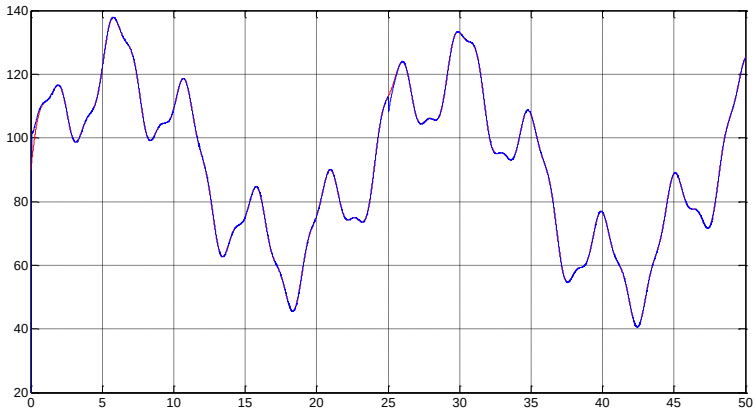



**Figure II.20**:Vitesse de référence et vitesse mesurée de la MCC

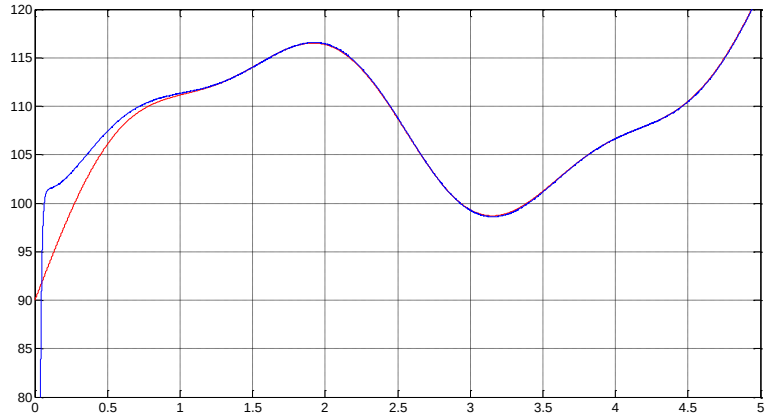



**Figure II.21** :Zoom de vitesse de l'émulateur

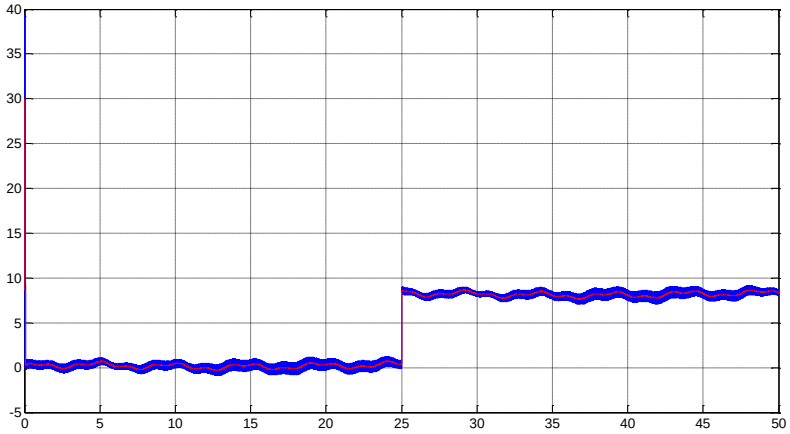



**Figure II.22** :couple de l'émulateur et sa référence

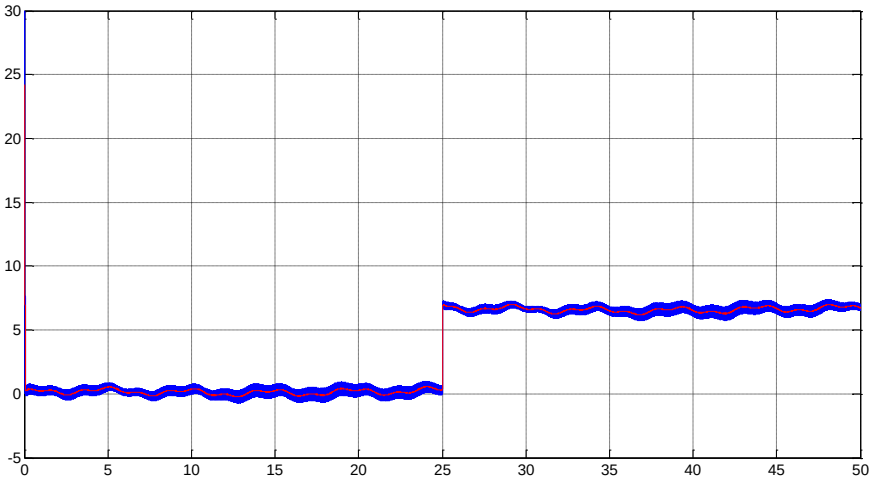



**Figure II.23**: Le courant de la MCC et sa référence

## II.7 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de décrire les étapes de modélisation d'une turbine éolienne dans le but d'entraîner une machine à courant continu destinée à reproduire les variations de vitesse d'une éolienne. Dans un premier temps, nous avons établi un modèle permettant de reproduire des variations de la vitesse du vent en se basant sur la décomposition spectrale de Van der Hoven. Ces variations de vent sont ensuite appliquées à un modèle de turbine de utilisant les équations de base donnant le couple éolien en fonction de la densité de l'air, du coefficient de puissance de l'éolienne, de la vitesse du vent et de la longueur d'une pale. La vitesse de rotation de l'éolienne calculée en fonction de l'inertie est alors imposée comme référence à une machine à courant continu de même puissance. La MCC a été modélisée à son tour et elle a été commandée par un régulateur PI pour sa simplicité et afin de réduire l'erreur statique. Les résultats de simulation montrent une bonne poursuite de référence de vitesse. Cependant, en adaptant la vitesse de la turbine à celle du vent on peut extraire la puissance maximale de la turbine. Cette étude fera l'objet du prochain chapitre.

# Chapitre III :

# La logique floue

## III.1 Introduction

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. Elle a été connue en première fois comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle. Elle est complémentaire et utilisée particulièrement lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander, ou lorsque ce dernier présente de fortes non linéarités ou imprécisions. De plus, l'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague.

. Dans ce chapitre, on présentera un aperçu général sur la théorie de la logique floue et ses principes de base. Ensuite, on montrera comment construire un régulateur flou, et l'appliquera au réglage de puissance de la MADA

On a étudié La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituants une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'à son contrôle. Puis, à l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

## III.2.Principe fondamentale de la logique floue :

Comparativement à la logique classique, les bases théoriques de la logique floue sont établies de manière à pouvoir traiter des variables inexactes de valeurs comprises entre 0 et 1, par contre la logique de Boole dont les variables ne peuvent prendre que les valeurs 0 et 1.

A titre d'exemple la classification des personnes à travers leur âge par les deux logiques présenté dans la figure III.1 et figure III.2

Fait apparaître que :

1. La logique classique (logique de Boole) n'admet pour les variables que les valeurs 0 et 1, qui font que les personnes âgées de moins de 30 ans sont systématiquement jeunes et les plus de 50 ans sont âgées, sans pour autant que, cette classification soit logique.
2. Alors que la logique floue, dont les variables peuvent prendre n'importe qu'elle valeur comprise entre 0 et 1, permet de tenir compte du passage progressif de l'individu d'un âge à un autre, on parle alors, de fonction d'appartenance u.

Les limites ne varient pas soudainement, mais progressivement, la figure ( ) montre une classification possible ; une personne de 25 ans appartient à l'ensemble (jeune) avec une valeur u = 0.75 de la fonction d'appartenance, et à l'ensemble (entre deux âges) avec u = 0.25. par contre une personne de 70 ans appartient avec une valeur u = 1 de la fonction d'appartenance à l'ensemble (âge).

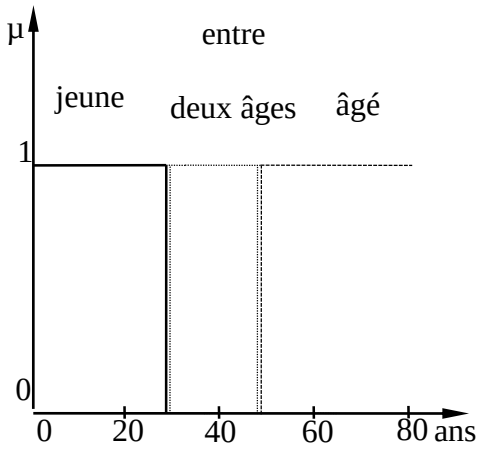



**Fig. III.1** :Représentation classique

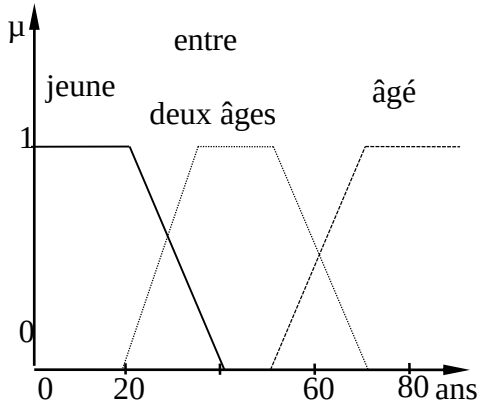



**Fig. III.2**:Representation par la logique floue

## III.3.Système d'inférence flou :

Le principe d'un système flou, c'est de pouvoir calculer des paramètres de sorties en fournissant au système un ensemble de règles formulés en langage naturel[120]. Pour implémenter un système d'inférence flou, trois étapes sont nécessaires[58] :

### III.3.1. Fuzzification :

Convertir des données classiques ou des données numériques en données floues ou fonctions d'appartenance .

### III.3.2. Processus d'inférence floue :

Combiner les fonctions d'appartenance avec les règles de contrôle pour dériver la sortie floue.

### III.3.3. Defuzzification :

Utiliser différentes méthodes pour calculer chaque sortie associée et les mettre dans une table : la table de recherche. Décrochez la sortie de la table de recherche en fonction de l'entrée en cours pendant une application.

Ces trois étapes constituent ce qu'on appelle moteur d'inférence flou :

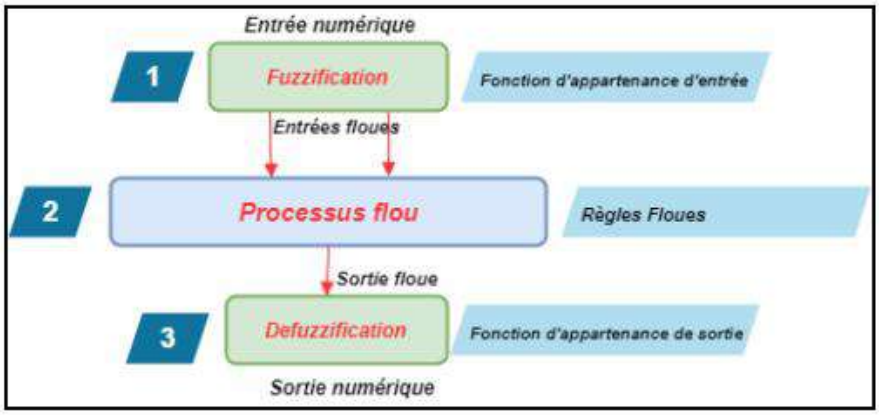



**Figure III.3.** Moteur d'inférence flou

## III.4.Fuzzification :

Afin de permettre aux machines de gérer une entrée de langage vague, les entrées et sorties numériques doivent être converties en variables linguistiques avec des composants flous. Par exemple, pour qu'un client évalue les critères d'un service web en valeurs linguistiques, Ces critères doivent être convertis en variables linguistiques associées telles que **ÉLEVÉ**, **MOYEN**, **FAIBL**E et **RAPIDE**, ou **LENT**. Aussi, la valeur finale (de sortie) pour évaluer un tel service doit être convertie en floue, l'entrée et la sortie doivent également être converties à partir de donnéesnettes en données floues. Cette étape de conversion est appelée fuzzification.

L'étape de fuzzification a pour but de transformer une donnée numérique en variable linguistique. Pour cela, le concepteur du système flou doit créer des fonctions d'appartenances

qui permettent de définir le degré d'appartenance d'une donnée numérique à une variable linguistique.

## III.5.Processus d'inférence floue :

Une fois les variables numériques sont transformées en variables linguistiques, on va pouvoir les passer dans le moteur d'inférence. Ici, chaque règle du moteur d'inférence est écrite par le concepteur du système flou en fonction de connaissance qu'il possède. (Généralement, ces règles doivent d'être dictées par des experts pour donner plus de performance au système).

La règle de contrôle floue peut être considérée comme la connaissance d'un expert dans tout domaine d'application connexe. La règle floue est représentée par une séquence de la forme IF THEN, conduisant à des algorithmes décrivant quelle action ou sortie doit être prise en termes d'informations actuellement observées, ce qui inclut l'entrée et la rétroaction si un système de contrôle en boucle fermée est appliqué[58].

La loi pour concevoir ou construire un ensemble de règles floues est basée sur la connaissance ou l'expérience d'un être humain, qui dépend de chaque application réelle différente.

Pour commencer le processus d'inférence floue, il est nécessaire de combiner les fonctionsd'appartenance avec les règles de contrôle pour dériver la sortie de contrôle et d'organiser ces sorties. La règle de contrôle est le noyau du processus d'inférence floue, et ces règles sont directement liées à l'intuition et au sentiment d'un être humain.

## III.6.Deffuzification :

La défuzzification est le processus de conversion d'une sortie fuzzifiée en une seule valeur crisp par rapport à un ensemble flou. La valeur défuzzifiée dans un système d'inférence flou représente l'action à entreprendre pour contrôler le processus.

Lors de la seconde étape, on a généré un tas de commandes sous la forme de variables linguistiques (une commande par règle).

Le but de la défuzzification est de fusionner ces commandes et de transformer les paramètres résultants en donnée numérique.

L'étape de défuzzification se déroule en deux temps [120] : Dans la première étape, il faut fusionner les variables linguistiques communes à l'aide d'un opérateur de la logique floue choisi par le concepteur du système. Si on a plusieurs règles d'inférences qui génèrent plusieurs valeurs de la même variable linguistique, on peut choisir un opérateur pour combiner les valeurs de la variable. Cet opérateur sera dans la grande majorité des cas, le OU logique utilisant l'opérateur de maximalité.

Dans une deuxième étape, nous pouvons réellement entamer la partie délicate de la défuzzification. On a une série de variables linguistiques qui caractérisent une seule et même donnée.

Ces variables linguistiques possèdent chacune une fonction d'appartenance. Défuzzifier une donnée revient donc à trouver la meilleure valeur quantitative en fonction des fonctions d'appartenances des variables linguistiques. pour faire cette étape de defuzzification, on aura besoin d'appliquer une technique de defuzzification.

## III.7.Méthodes de defuzzification :

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de de défuzzification, par la suite, nous allons présenté seules qui sont couramment utilisées[56] :

## III.8.Méthode Centre de gravité (COG) :

Cette méthode fournit une valeur numérique basée sur le centre de gravité de l'ensemble flou. La zone totale de la distribution des fonctions d'appartenance utilisée pour représenter l'action de contrôle combinée est divisée en un certain nombre de sous-zones. La zone et le centre de gravité ou centroïde de chaque sous-zone sont calculés, puis la somme de toutes ces sous-zones est prise pour trouver la valeur défuzzifiée pour un ensemble flou discret.

## III.9.Méthode Moyenne de maximum(MOM) :

Dans cette méthode, la valeur défuzzifiée est considérée comme l'élément avec les valeurs d'appartenance les plus élevées. Lorsque plusieurs éléments ont des valeurs d'appartenance maximum, la valeur moyenne des maxima est prise.

## III.10.Méthode moyenne pondérée (WAM) :

Cette méthode est valable pour les ensembles flous avec des fonctions d'appartenance de sortie symétriques et produit des résultats très proches de la méthode COG ou COA. Cette méthode nécessite moins de calculs. Chaque fonction d'appartenance est pondérée par sa valeur d'adhésion maximale.

## III.11.Résultat de simulation

Les résultats de simulation reportés sur les figures suivantes concernent la commande de la chaine de conversion éolienne à base d'une machine à courant continu à vitesse variable. A travers les figures suivantes, nous observons que les grandeurs mesurées ( la vitesse et le couple) suivent leurs valeurs de références. Au vu de ces résultats, on constate une meilleure poursuite des régulateurs flous à celle des régulateurs PI présentée au chapitre 02.

Résultat de simulation par régulateur floue :

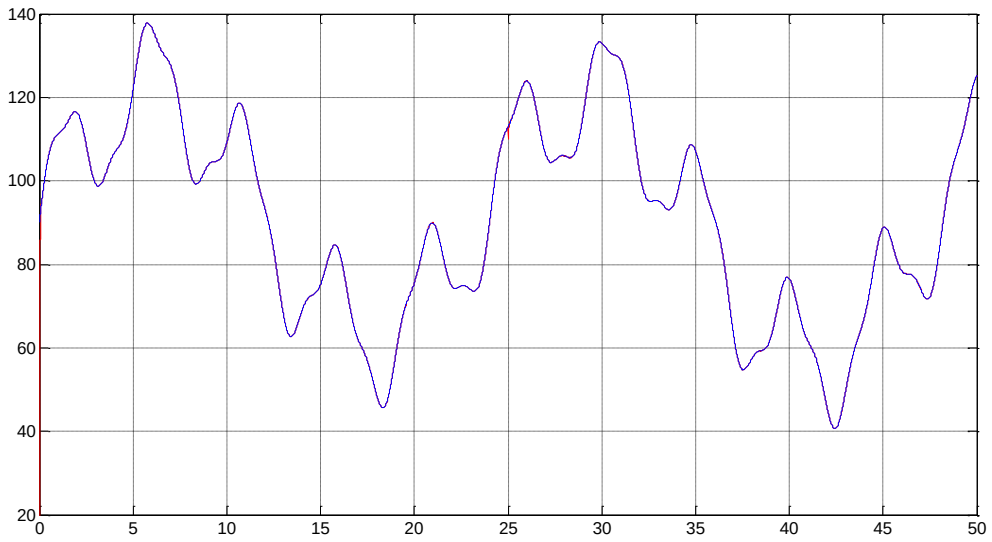



**Figure IV.4 :** la vitesse de l'émulateur par réglage flou

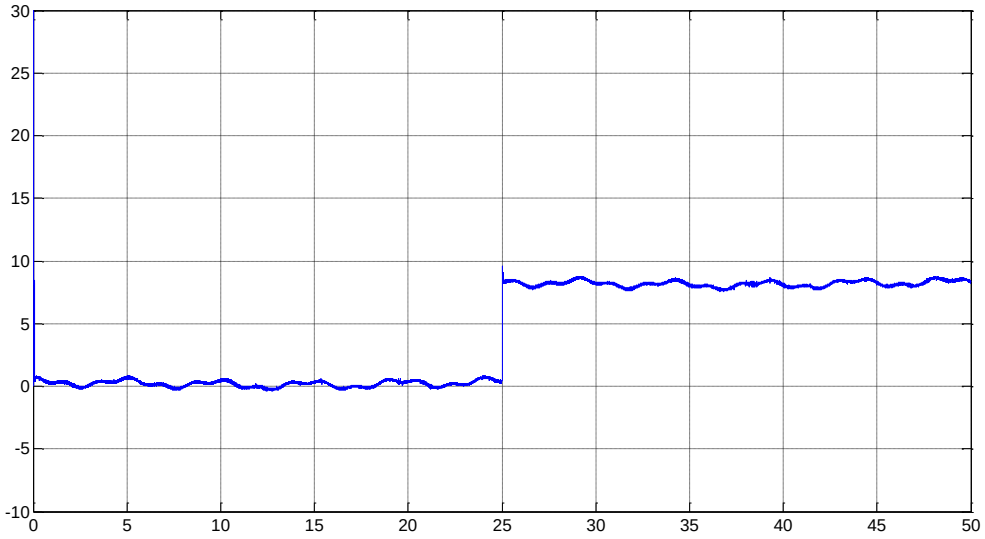



**Figure III.5 :** Le couple de l'émulateur

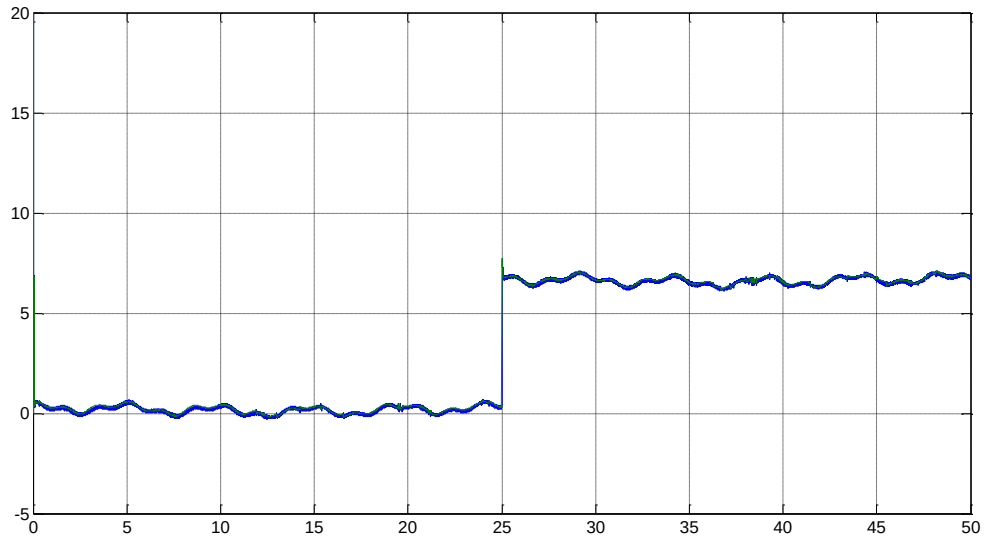



**Figure.III.6** : Le courant d'induit

Les Figures III.4 , III.5 et III.6. illustrent l'évolution du courant et de la vitesse de l'émulateur sans variation paramétrique. Nous pouvons remarquer que la vitesse suit parfaitement sa vitesse de référence. Sachant que, nous avons utilisé deux régulateurs flous pour la commande du courant et de la vitesse. On remarque que le dépassement et le temps de réponse pour le cas d'un régulateur classique est supérieur à celui d'un régulateur flou.

## III.12.CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'avoir une vue générale sur les systèmes flous type-1. Nous avons montré comment appliquer cette théorie en vue de la conception d'un régulateur flou. Une simulation à base d'un contrôleur flou type-1 a été effectuée pour faire le réglage de la vitesse et le courant d'une machine à courant continu. Les résultats obtenus montrent que le régulateur flous type-1 présente des performances de poursuite très satisfaisantes, il a amélioré la dynamique par rapport à celle du réglage par PI. On a étudié les différents éléments d'une éolienne utilisant la stratégie MPPT où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée.

# Chapitre IV :

# Réalisation d’un émulateur de vent

## IV.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter la réalisation d'une maquette expérimentale afin de valider les performances réelles de l'algorithme de commande proposé dans les chapitres précédents. Le banc comporte : une carte dspace 1103, un convertisseur ,et un moteur à courant continu . Le banc permet de :

- Définir et associer les différents éléments matériels et logiciels.
- Développer un programme de commande pour un convertisseur, en utilisant la dspace 1103.
- Tester l'algorithme.
- Relever les résultats expérimentaux côté puissance (vitesse et courant).

## IV.2. Description générale :

Pour valider expérimentalement la technique de commande présentée dans le cadre de ce travail, nous avons construit un banc d'essai. Ce dernier est constitué d'un convertisseur (Hacheur série), dont les interrupteurs du bras sont constitués d'un transistor IGBT monté en antiparallèles avec une diode, le signal de commande de l'IGBT est issu d'une carte DS1103 à base d'un processeur dédié au traitement du signal. La photo du banc expérimental est présentée par la figure (

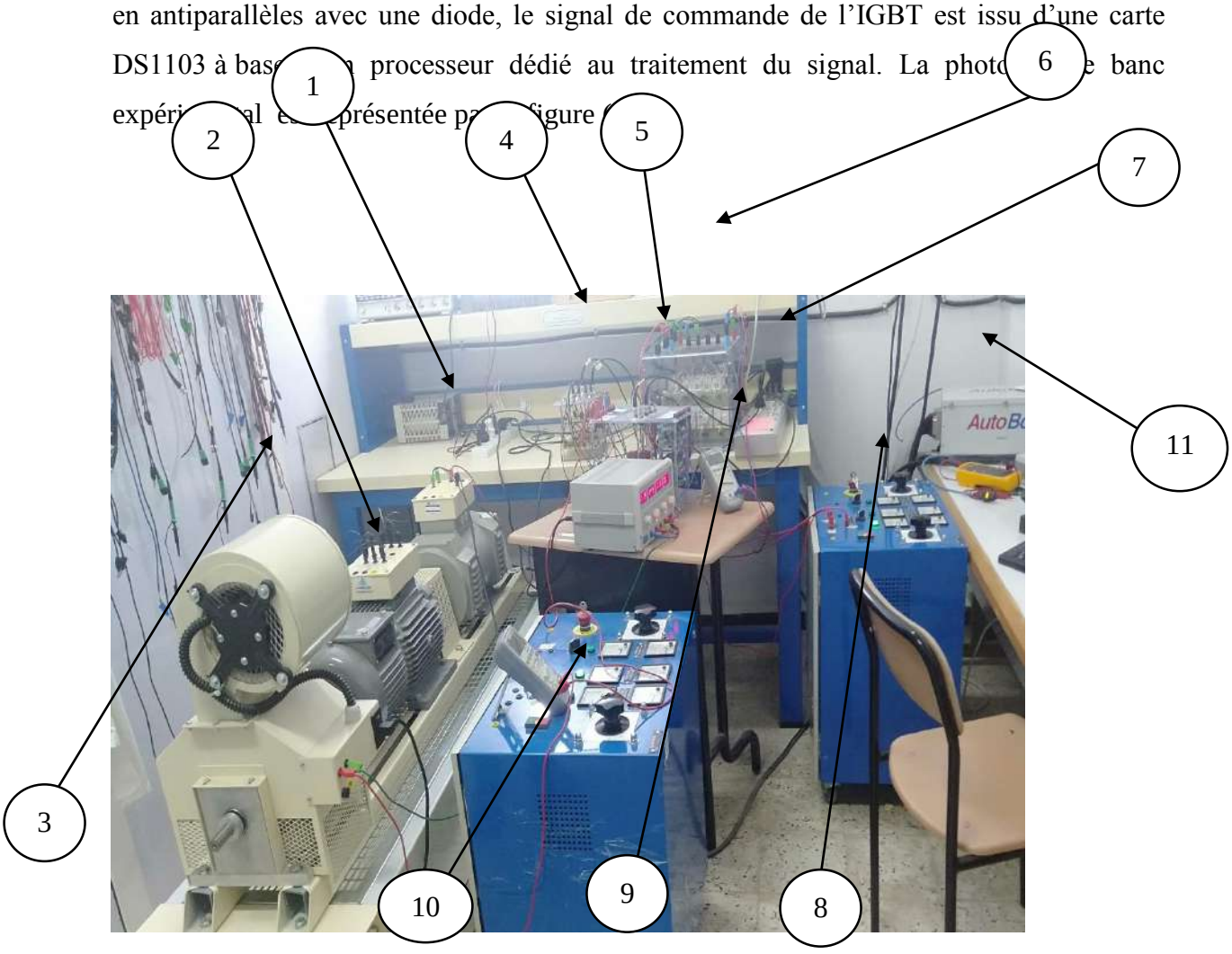



**Figure.IV.1**: Photo du banc d'essai

1- Machine à courant continu

2-MADA

3-Frein à poudre.

4-génerateur d'impulsion.

5-capteur de courant

6-hacheur

7- Control Panel de la carte DS pace 1103

8- -Alimentation symétrique.

9-volte mètre

10—Alimentation

11-carte d'acquisition AUTO BOX

Ce banc d'essai met en évidence trois différentes parties :

- La partie puissance qui regroupe :
  - Le convertisseur (Hacheur série), interrupteurs.
  - d'une MCC.
- La partie mesure, constituée de capteur de courant (pour mesurer le courant d'induit) et d'un capteur de vitesse pour mesurer la vitesse du moteur.

- La partie commande est constituée d'une carte de contrôle DS 1103 pilotée par un ordinateur. L'ordinateur permet de générer le code objet défini à partir de l'algorithme de commande.

- **Convertisseur (Hacheur série) réalisé**

La photo du hacheur réalisé est donnée sur la figure(IV.2)

Les interrupteurs de puissance utilisés dans le hacheur réalisé sont composés d'un module

IGBT et d'une diode de référence

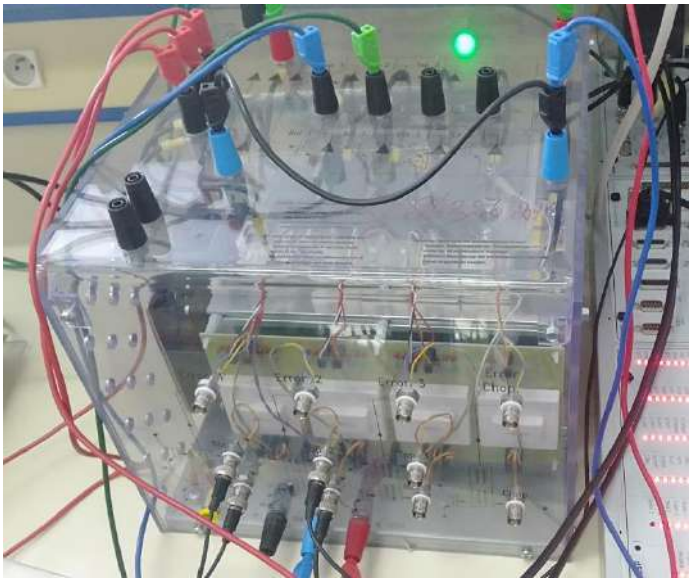


**Figure .IV.2 :** Photo du Hacheur série utilisé

Des capteurs pour mesurer le signal d'entre le courant( Ia) et la vitesse de rotation

Figure IV.3

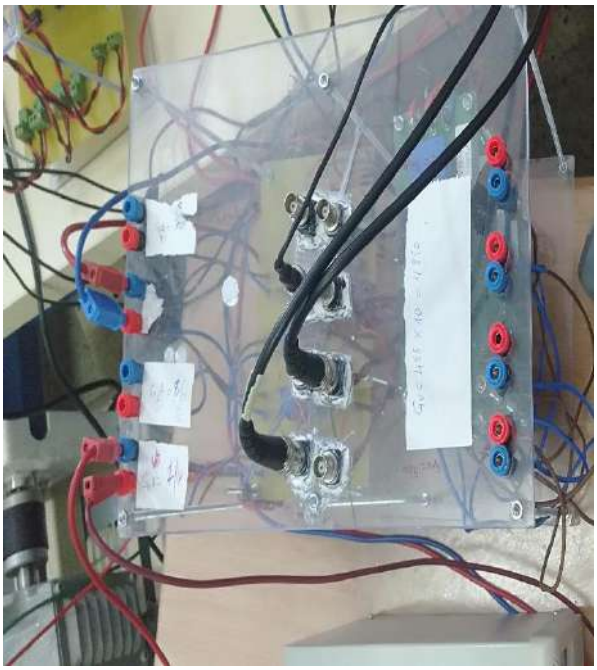


**Figure IV .3.a** : capteur de courant



**Figure IV.3.b** :Capteur dr position

## ➢ Une carte de commmande DSPACE1103

Le système de commande numérique dspace répond de manière satisfaisante à notre besoin. Son principal intérêt est de permettre d'écrire l'essentiel de l'algorithme de commande par schéma blocs sous logiciel Matlab Simulink

En effet, l'outil Real Time Workshop de Simulink procure une façon rapide et efficace pour traduire le modèle de simulation fournissant une procédure automatique pour le codage,

la compilation, le codage, l'édition de liens et le téléchargement des exécutables sur le processeur cible DSP.

La figure (IV.4) présente les différentes étapes de l'implantation de la commande.

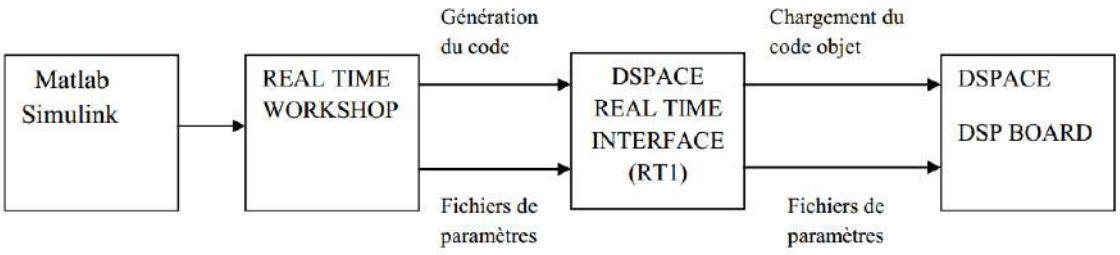



**Figure .IV.4** : Procédure de l'implantation temps réel

Le logiciel ControlDesk (figure IV.5) qui est associé à la DSpace, permet de suivre l'exécution du programme implanté dans le DSP, en affichant les courbes d'évolution des variables, et en offrant la possibilité de modifier ces variables en temps réel [13].

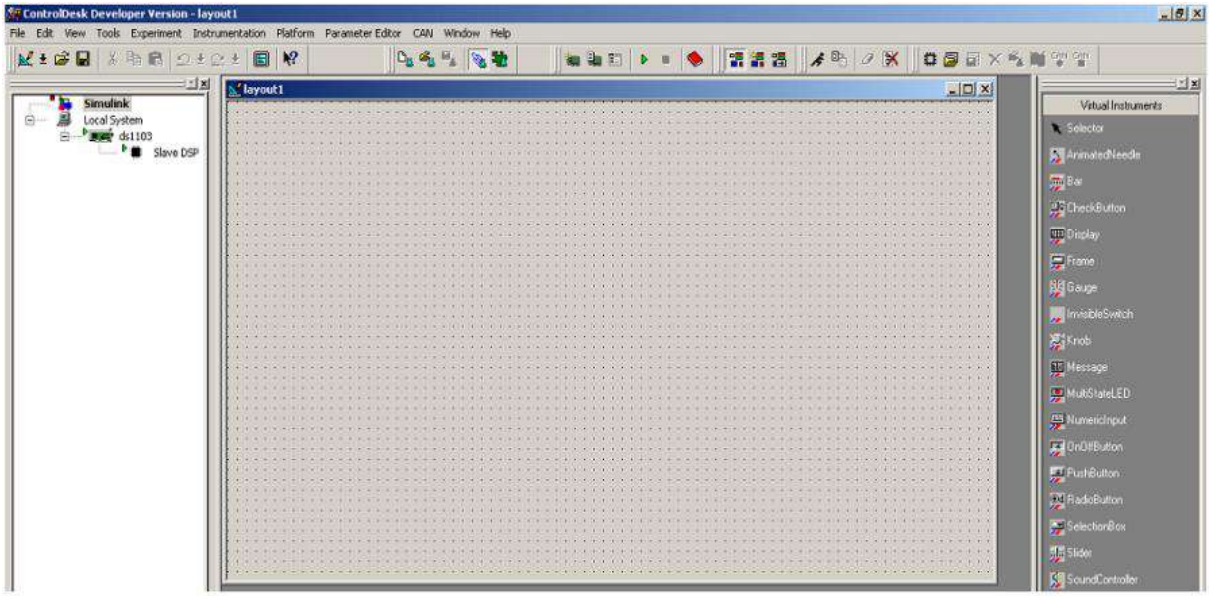



**Figure .IV.5**: La fenêtre du logiciel ControlDesk

## .IV.3 : Résultats obtenus et interprétation :

Les résultats obtenu apre application de la methode du gradient sont resumes dans le tableau suivant :

| Les parametres de la MCC utilise signification | Paramétre de la MCC par methode clasique |
|---|---|
| Tension nominale | Van=220[V] |
| Courant de l'induit nominale | Ian=9[A] |
| Couple nominale | Cn=K.Ian |
| Constante de flux du moteur | K=1.2376 |
| Resistance de l'induit | Ra=2.3183[Ω] |
| Moment d'inertie | J=0.0138 |
| Inductance de l'induit | La=0.0830[N.m] |
| Coéfficient de frottement visqueux | f=0.002 |
| | Nn=1470 |

**Tableau IV.1** : Les parametres de la MCC

La figure IV.6 montre la vitesse réelle applique a la MCC. D'après cette courbe la vitesse de l'émulateur suit entièrement sa référence imposée par le vent. On voit que le courant capté suit aa référence. On remarque aussi que le courant représente quelques ondulations imposées par les instants de commutation d'interrupteur de commande, si non la boucle de courant fonctionne sans poser de risque sur la partie de commande.

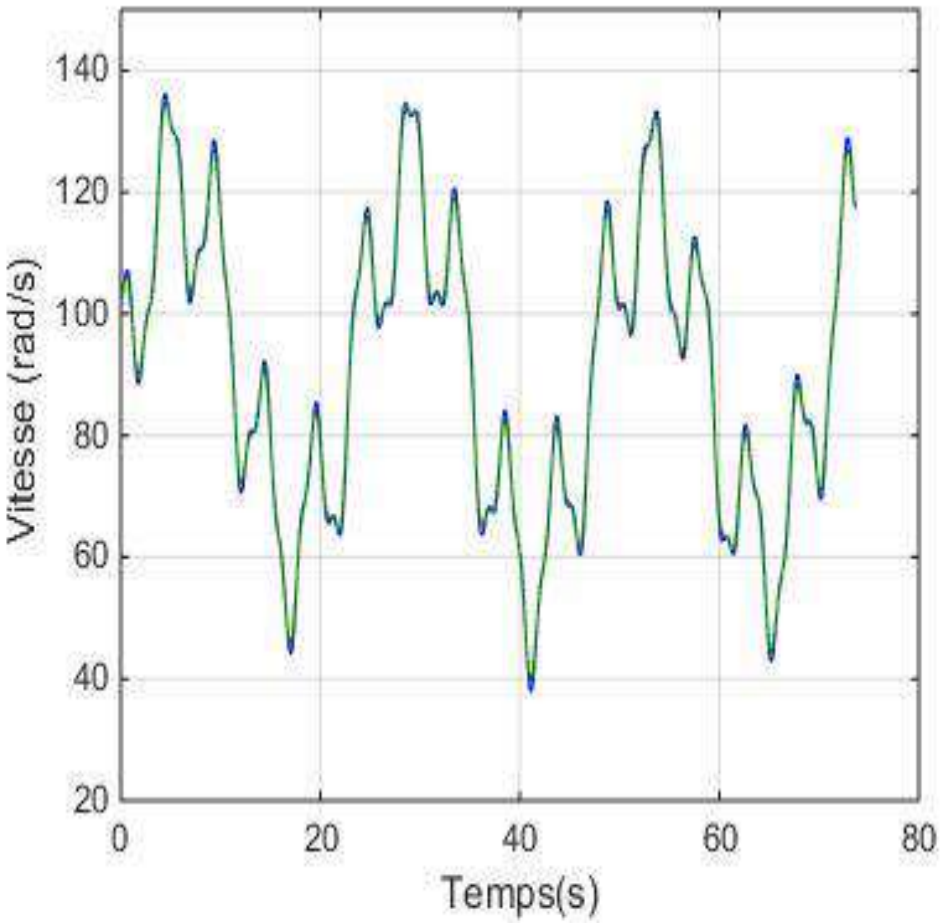



**Figure.IV.6** :vitesse simulé et réel

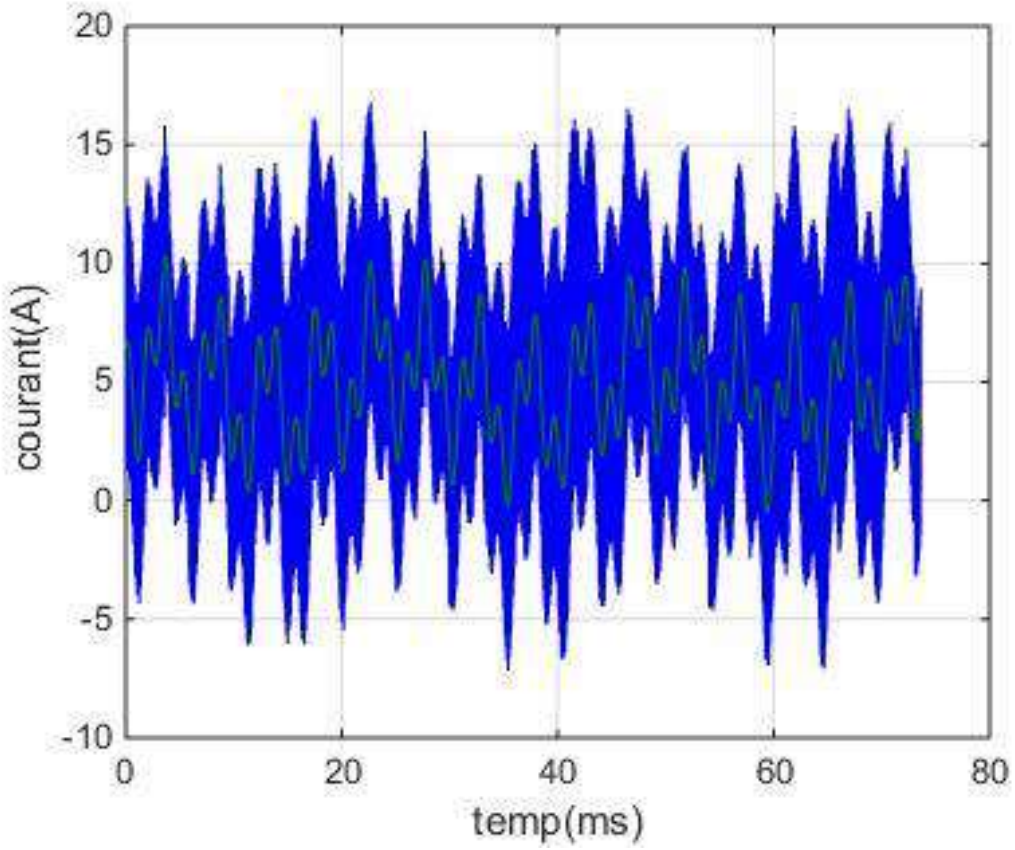



**Figure.IV.7** :courant réel et sa référence

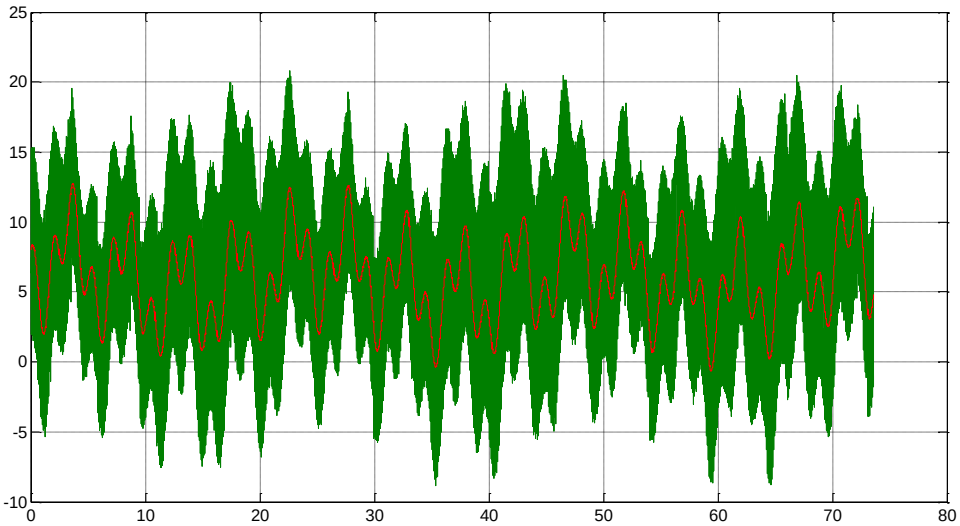
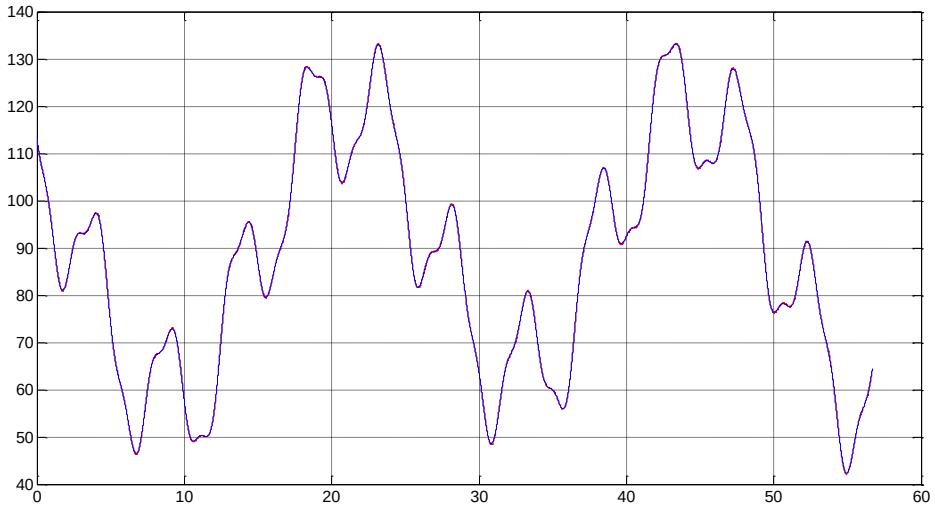



**Figure.IV.8** : Couple réel et sa référence




**FigureIV.9** :Vitesse mesurée de l'émulateur et sa référence

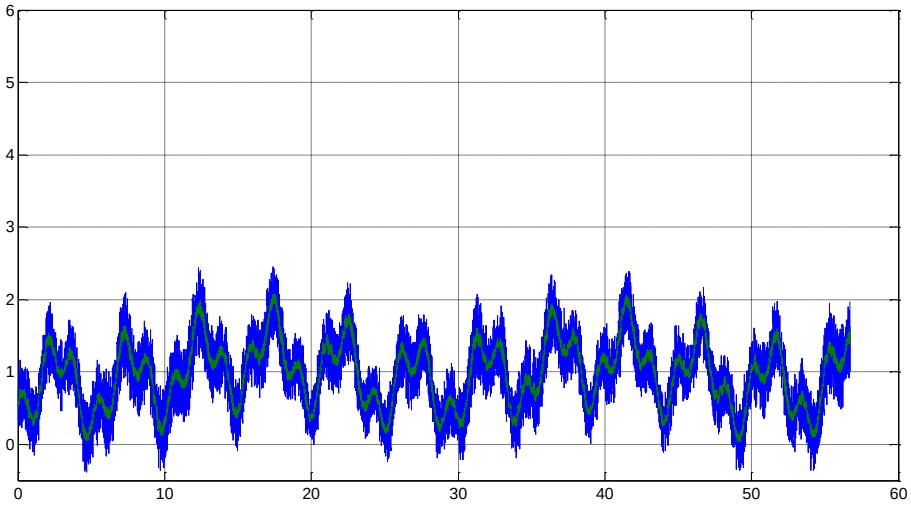



**Figure .IV.10 :**Le courant de l'émulateur et sa référence

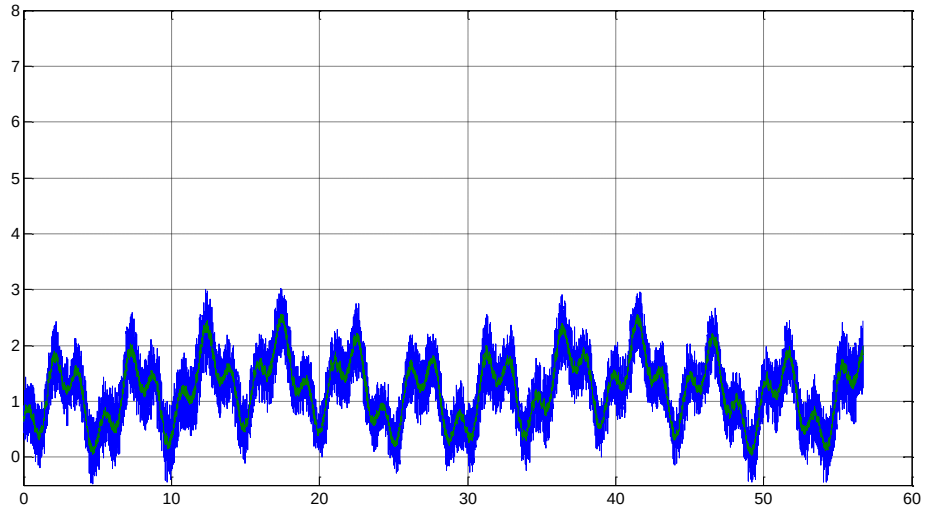



**Figure.IV.11:**Le couple de l'émulateur et sa référence

## Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différentes parties de l'assemblage qui ont été mises en œuvre dans le laboratoire. Cette réalisation est conçue autour d'une carte de commande dSPACE 1103, Nous avons aussi réalisé une régulation numérique et la logique floue afin de réguler la vitesse du moteur.

L'essai expérimental montre une bonne dynamique de la vitesse et du courant d'induit.

Les résultats obtenus expérimentalement sont conformes aux objectifs fixés :

- Le courant d'induit suit le courant de référence.
- La vitesse du moteur suit la vitesse de référence.
  Le couple du moteur suit le couple de référence .

Les résultats obtenus valident l'utilisation de l'émulateur à base d'une MCC dans une chaine de conversion éolienne dans le laboratoire afin de remplacer la turbine mécanique.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale :

Dans le cadre de réalisation de notre projet de fin d'étude, nous avons choisi de travailler sur l'émulation d'une turbine éolienne à base d'une machine à courant continu MCC. Pour cela nous avons choisi comme objectif la commande et la simulation d'une chaine de conversion éolienne constituée d'une turbine éolienne de 3KW associée à une génératrice. Afin d'atteindre notre objectif nous avons organisé notre travail selon quatre chapitres.

Le premier chapitre a été consacré au traitement de l'état de l'art des systèmes éoliens en tenant compte de l'état actuel de l'exploitation de ce créneau énergétique. Puis nous avons cité les types d'éoliennes avec leurs différentes structures existantes à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. Nous avons aussi traité les notions fondamentales permettant la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. On a, ensuite, effectué un comparatif entre les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable, ce qui nous a permis de choisir un système à vitesse variable. Et aussi, on a cité les différentes topologies utilisées dans ce domaine. Il était indispensable de citer les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, d'où nous avons pu mettre en évidence l'intérêt de cette énergie. Ainsi on a parlé de la connexion des fermes éolienne au réseau dans l'intérêt de voir l'interaction entre gestionnaire du réseau et le producteur de l'énergie électrique de type éolienne.

Dans le deuxième chapitre montre les étapes de réalisation d'un émulateur de la turbine éolienne à base d'une machine à courant continu où on a mis en évidence le contrôle de la turbine avec asservissement de vitesse pour pouvoir simuler l'émulateur. On a appliqué un profil de vent à la turbine éolienne étudiée en chapitre 2 dont le couple obtenu est appliqué en référence à une machine à courant continu à excitation séparée ; cette dernière est contrôlée couple en utilisant des régulateurs PI. A l'aide de l'outil SIMULINK de MATLAB, le modèle de la MCC est couplé comme la turbine à une génératrice. Après avoir simulé l'ensemble et en comparant les résultats, on voit que l'émulateur a reproduit les mêmes caractéristiques de la turbine éolienne d'où l'objet de cette étude.

Dans le troisième chapitre, on a appliqué un régulateur PI flou ensuite, une comparaison entre les deux régulateurs ( PI classique et PI flou, a été établi dans l'environnement Matlab/Simulink.

Le dernier chapitre montre les étapes de réalisation d'un émulateur de la turbine éolienne à base d'une machine à courant continu où on a mis en évidence le contrôle de la turbine avec asservissement de vitesse pour pouvoir simuler l'émulateur. On a appliqué un profil de vent à la turbine éolienne étudiée en chapitre 2 dont le couple obtenu est appliqué en référence à une machine à courant continu à excitation séparée ; cette dernière est contrôlée

en couple en utilisant des régulateurs PI. A l'aide de l'outil SIMULINK de MATLAB, le modèle de la MCC est couplé comme la turbine à une génératrice. Après avoir simulé l'ensemble et en comparant les résultats, on voit que l'émulateur a reproduit les mêmes caractéristiques de la turbine éolienne d'où l'objet de cette étude.

Afin de s'approcher plus du système réel, nous proposerons quelques perspectives qui feront l'objet des études à venir :

- Test de cette commande sur un banc d'essai réel

## Références Bibliographiques :

[1] M. DAHMANI, H. YAKOUBI « commande d'un système de production de l'énergie éolienne », mémoire de Master, UMMTO, 2016

[2] M. BOUARAKI. « Etude d'un entrainement à double alimentation pour une turbine éolienne à vitesse variable : application sur site à TINDOUF », Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2012.

[3] T. GHENNAM « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au régle des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, l'Ecole de LIILE et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011

[4] F.POTIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.

[5] J. Martin, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traité de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.

[6] B. KELKOUL « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Mémoire de Magister API, TLEMCEN, 2011 .

[7] O. BOUHALI « contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement de la production de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, école centrale de LILLE, 2007.

[8] S. METATLA « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA »Magister, 2009, Ecole nationale supérieur polytechnique, Alger.

[9] M. SMAILI « modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération » Thèse de Doctorat Université de Québec, Aout 2013.

[10] Z. LEMMOUCHIA, « commande robuste de la machine asynchrone doublement alimentée MADA avec et sans capteur de vitesse » Magister, 2013, Université de EL OUED.

[11] M. ADJOUDJA, M. ABIDA, A. AISSAOUIA, Y. RAMDANIA, H. BOUNOUA « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne »Département d'électrotechnique, Université DJILLALI ABBES BP 89 SIDI BEL ABBES.

[12] A. TENINGE « participation aux services système de parcs éoliens mixtes : applications en milieu insulaire » thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2009.

[13] Y. DJERRIRI « commande directe du couple et des puissances d'une MADA associé à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle » Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-bel-abbes, 2015.

[14] E. CHEKHET, I. SHAPOVAL, V. MIKHALSKY and V. SOBOLEV, « Control of the

stand-alone doubly fed induction generator supplied by the matrix converter »; Proc of the International Workshop on Renewab.le Energy Based Units and Systems REBUS'06, pp.35-40, St. Petersburg, Russia, June 2006.

[19] TOUAL Be1kacem, Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Éolien à Vitesse Variable, mémoire de magister, (2010), Université de Batna, Algérie.

[20] B. MULTON, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, «Aérogénérateurs électriques», Techniques de l'ingénieur, D3 960, France.

[21] Marques J, Pinheiro H, Grundling H, Pinheiro J, Hey H., «A survey on variablespeed wind turbine system,» In: Proceedings of Brazilian conference of electronics of power, vol. 1, 2003. p. 732-8.

[22] S. BELAKEHAL, Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Énergies Renouvelables, Thèse (2010), Université de Constantine, Algérie.

[23] A. MIRECKI, Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse N°2213 (2005), Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[24] H. CAMBLONG, Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable, Thèse N°2003-22 (2003), École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, France.

[25] Y. Amirat, M. E. H. Benbouzid, B. Bensaker, and R. Wamkeue, «Generators for Wind Energy Conversion Systems: State of the Art and Coming Attractions, » Journal ofElectrical Systems vol. 3-1, pp. 26-38, 2007.

[26] L. Refoufi et al., "Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 14, pp. 333-339, 1999.

[27] G. A. Smith and K. A. Nigim, "Wind-energy recovery by a static Scherbius induction generator," Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, vol. 128, pp. 317-324,1981.

[28] J. G. Slootweg, et al., "Initialization of wind turbine models in power system dynamics simulations," in Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, 2001, p. 6 pp. volA.

[29] L. HEMOUZAL, M.MEDIOUNI, M.KOURCHI. «Stratégies de commande d'une turbine éolienne en vue de l'extraction de sa puissance maximale ». Laboratoire de l'Energie et de l'Environnement, ENSA, Agadir

[30] K. MESBAH « Etude du générateur asynchrone et coordination des puissances dans une ferme éolienne connectée au réseau » thèse doctorat, UMMTO, 2016.

[31] A.BECHOUCHE « Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la

commande d'une machine asynchrone : Application à une éolienne » Thèse doctorat, UMMTO, 2013.

[32] M. MONFARED, H. M. KOJABADI, H. RASTEGAR, « Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled DC motor » Renewable Energy Vol: 33,.PP 906-913. (2008).

[32] M. MONFARED, H. M. KOJABADI, H. RASTEGAR, « Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled DC motor » Renewable Energy Vol: 33,.PP 906-913. (2008)

[33] T.WILDI, C.SYBILLR, Electrotechnique, Edition de Boeck, 4 éme édition, 2005

[34] A.FOUILLE, Machine continues, électronique de puissance, Edition DUNOD, 4 éme édition Paris, 1980.

[35] S.ABDOULAYE MAMADIE « modélisation d'un émulateur éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire, université de QUEBEC, 2013.

[36] H.BOUKHAMKHAM « Diagnostique des défaillances dans une machine asynchrone utilisé dans une chaine éolienne » Magister en électrotechnique, université de Biskra, 2011.