

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Automatique  
Option : Automatique et informatique industrielle

Réf : .....

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

*Thème*

# **Etude et réalisation d'une turbine éolienne**

**Présenté par : Islam Jar Allah Boulegroune**

**Soutenu le : Septembre 2020**

**Devant le jury compose de :**

Mr	<b>KHALED ABADA</b>	<b>MCB</b>	<b>Président</b>
Mr	<b>ALI ARIF</b>	<b>MCA</b>	<b>Encadreur</b>
M	<b>NAIMA RECHID</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2019 / 2020**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Automatique  
Option : Automatique et informatique industrielle

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

*Thème*

# **Etude et réalisation d'une turbine éolienne**

**Présenté par : Islam Jar Allah Boulegroune**

**Avis favorable de l'encadreur :**

**Avis favorable du Président du Jury :**

**Cachet et signature**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Automatique  
Option : Automatique et informatique industrielle

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

*Thème*

# **Etude et réalisation d'une turbine éolienne**

**Présenté par : Islam Jar Allah Boulegroune**

**Diriger par : Ali Arif**

**Résumé :**

*L'énergie renouvelable est la meilleure alternative à l'énergie nucléaire et aux énergies fossiles. Cela a incité de nombreux pays à l'utiliser. Parmi ces pays se trouve l'Algérie, même si elle n'a pas encore été utilisée à grande échelle, car il existe encore un certain nombre d'obstacles et d'obstacles qui empêchent l'expansion de l'utilisation, y compris l'augmentation le coût.*

*Comme il est nouvellement utilisé, il n'est toujours pas compétitif sur le plan commercial, cette étude vise donc à trouver des moyens de développer l'utilisation des énergies renouvelables en Algérie, en particulier l'énergie éolienne, car c'est l'objet de notre étude.*

*Mots-clés: Énergie renouvelable, énergie solaire, énergie éolienne ,l'Algérie.*

## المخلص:

الطاقة المتجددة هي البديل الامثل للطاقة النووية و الطاقات الاحفورية هذا مادفع الكثير من الدول على استخدامها ومن بين هته الدول الجزائر بالرغم من انها لم تستخدم بعد على نطاق واسع حيث لا يزال هناك عدد من المعوقات والعقبات التي تحول دون التوسع في الاستخدام ، بما في ذلك ارتفاع التكلفة.

ويعتبارها حديثة الاستخدام لا تزال غير قادر على المنافسة تجاريا لذلك تهدف هذه الدراسة إلى إيجاد طرق لتطوير استخدام

الطاقات المتجددة في الجزائر و بالتحديد طاقة الرياح باعتبارها محور دراستنا.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة ، الطاقة الشمسية ، طاقة الرياح ،الجزائر

## REMERCIEMENT

Au débute Mes remerciements à Allah pour la santé et la patience et la volonté qu'il m'a données durant toutes ces longues années.

Je remercie très bien mon encadreur **ARIF ALI** pour l'aider et la compréhension qu'il nous a toujours montrée, ainsi que sa patience, son attitude sage et sa disponibilité.

Nous remercions également **Mr. Ben chaaban** qui nous a apporté un aide appréciable pour l'élaboration de ce travail

J'adresse de sincères remerciements à **Mr. Abada khaled** et **M. Naima Rechid** pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Enfin Je remercie ma famille pour leur soutien et pour leur présence et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

Islam jar Allah Boulegroune

## DEDICACE

Je dédie ce travail à mon cher père le symbole du courage et de volante que Dieu le garder qui m'a toujours aider et soutenir dans les moments difficiles.

Je dédie ce travail à ma chère maman que Dieu la garder la personne qui as tout me donner et qui a beaucoup sacrifié pour moi merci tu es l'essence de ma réussite.

À mes très chers frères pour leur encouragement et leur soutien.

A tous mes enseignants pour être avec nous dans notre cheminement académique et pour leurs efforts

À mes chers amis et à tous les étudiants de ma Promotion,

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à finaliser cette thèse.

# LISTES DES FIGURES

FIGURE I.1: Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA), données de 2018...	5
FIGURE I.2. Carte du potentiel éolien en Algérie.....	6
FIGURE I.3. éolienne a axe verticale.....	8
FIGURE I.4 :éolienne horizontale.....	8
FIGURE I.5 : Chaîne de conversion de l'énergie éolienne.....	9
FIGURE I.6 :Pont redresseur triphasé a thyristors.....	11
FIGURE II.7: Représentation schématique de la machine dans le repère diphasé (Transformation de Park) .....	19
FIGURE II.8 : Evolution du vecteur flux Statorique dans plan $(\alpha,\beta)$ .....	23
FIGURE II.9 : sélection de vecteur tension V Correspondant au contrôle de l'amplitude de flux.....	23
FIGURE II.10 : Orientation de l'axe d du repère tournant selon la direction du flux rotorique.....	26
FIGURE II.11 : Sélection du vecteur tension $V_s$ selon la zone $N=i$ .....	27
FIGURE II.12 : Correcteur du flux à hystérésis et sélection des vecteurs tensions correspondante.....	29
FIGURE II.13 :correcteur de couple.....	30
FIGURE II.14:: Table de commutation avec séquences nulles.....	30
FIGURE II.15 : Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple.....	31
FIGURE II.16: Réponses du système.....	33
FIGURE II.17 : Profil de vent appliqué a la turbine.....	34
FIGURE II.18: Coefficient de puissance de l'éolienne en fonction du $\lambda$ .....	35
FIGURE II.19 la puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation.....	35
FIGURE III.20 :: Structure de la turbine éolienne a axe verticale.....	38
FIGURE III.21 :: Turbine éolienne a axe verticale en marche.....	39
FIGURE III.22 :: La variation de la vitesse du vent.....	41
FIGURE III.23 :: La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne( Expérimentale).....	41
FIGURE III.24:: La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne( Expérimentale et Modèle de prédiction).....	42

FIGURE III.25 :: La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de vent.....	43
FIGURE III.26 :: La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de sortie.....	43
FIGURE III.27 :: La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de la turbine.....	44

## LISTE DES ABREVIATIONS

G : gain de multiplicateur

$J_t$  : Inerties de la turbine.

$J_m$  : Inerties de la machine.

$C_{em}$  : Couple électromagnétique Produit par la génératrice

$C_{vis}$  : Des frottements visqueux

$f_m$  : Coefficient de frottement de la machine.

$f_t$  : Coefficient de frottement des pâles.

$\Omega_{mec}$  : la vitesse de rotation

$C_{mec}$  : Couple mécanique

$T_e$  : période d'échantillonnage.

$C_{mul}$  : le couple du multiplicateur

$\lambda$  : la vitesse réduite

( $\Omega_{turbine}$  : vitesse de la turbine

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

$\rho$  : Densité de l'air

R : Rayon de l'éolienne

$S$  : Surface circulaire balayée par la turbine

$v$  : vitesse du vent.

$P_v$  : puissance de vent

$P_{eol}$  : puissance éolienne

$C_p$  : Le coefficient de puissance

$V_m$  : Valeur moyenne de la vitesse du vent

k: le Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

$a_n$  : Amplitude de l'harmonique de l'ordre

$\omega_n$  : Pulsation de l'harmonique de l'ordre

$C_{emref}$  : est le couple de référence,

$C_{em}$  : est la bande d'hystérésis du correcteur.

$\vec{\Phi}_s(K)$  : vecteur du flux statoriques au d'échantillonnage actuel,

$\vec{\Phi}_s$  : vecteur de flux statoriques

$\lambda_{opt}$  : Vitesse relative optimale

$C_{pmax}$  : Coefficient de puissance maximale

$l_s$  : Inductance de fuite statoriques.

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique

$\theta$ : est l'angle entre l'axe rotorique et l'axe statoriques.

$\theta_s$ : est l'angle entre l'axe rotorique et l'axe direct d.

$\theta_r$ : est l'angle entre l'axe statorique et l'axe direct d.

$L_s$ : L'inductance propre d'une phase statorique

$L_r$ : L'inductance propre d'une phase rotoriques

$M_s$ : L'inductance mutuelle entre phase statorique

$M_r$ : L'inductance mutuelle entre phase statoriques

# Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1. Généralité sur les turbines Eolienne</b>	
Introduction générale.....	2
1.1 Introduction .....	4
1.2 Historique .....	4
1.3 Statistique de production de l'éolienne :.....	4
1.3.1 Production de l'éolienne dans le monde :.....	4
1.3.2 Production de l'éolienne dans l'Algérie :.....	5
1.4 Définition de l'énergie éolienne : .....	6
1.5 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :.....	6
1.5.1 Les avantages : .....	6
1.5.2 Inconvénients : .....	7
1.6 Applications de l'énergie éolienne : .....	7
1.7 Les différents types des turbines éoliennes : .....	7
1.7.1 L'éolienne a axe verticale : .....	7
1.7.2 L'éolienne a axe horizontal :.....	8
1.7.3 Les avantages et inconvénients des axes :.....	9
1.7.3.1 Les avantages de l'éolienne à axe horizontal.....	13
1.7.3.2 Les inconvénients de l'éolienne à axe horizontal .....	14
1.7.3.3 Les avantages de l'éolienne à axe vertical.....	14
1.7.3.4 les inconvénients de l'éolienne à axe vertical.....	14
1.8 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne :.....	9
1.9 Principe de fonctionnement d'une éolienne : .....	10
1.10 Les Convertisseurs statiques :.....	10
1.10.1 Définition des Convertisseurs statique :.....	10
1.10.2 Type de Convertisseurs statique utilise :.....	10
1.10.2.1 L'onduleur .....	10
1.10.2.2 Le Redresseur.....	10
1.11: La machine asynchrone .....	11
1.11.1 Définition :.....	11
1.11.2 Constitution de la machine asynchrone :.....	11

1.11.3 Principe de fonctionnement d'un Générateur asynchrone a cage.....	11
1.12 Conclusion .....	12

## **Chapitre 2. Modélisation et Simulation du Système**

2.1 Introduction.....	14
2.2 Modélisation de la turbine éolienne .....	14
2.2.1 Modélisation de vent.....	14
2.2.2 Modélisation de la turbine éolienne .....	15
2.2.3 Modélisation de l'arbre de la machine .....	15
2.2.4 Modélisation de multiplicateur de vitesse .....	16
2.3 Modèle général de la machine asynchrone.....	17
2.3.1 La transformation de Park de la MAS.....	18
2.3.2 Choix du référentiel .....	20
2.4 Commande directe du couple (DTC).....	21.
2.4.1Contrôle du flux statoriques .....	22
2.4.2 Contrôle du couple électromagnétique de la machine.....	24
2.4.3 Avantages et Inconvénients de la DTC.....	26
2.4.3.1 Avantages de la DTC.....	26
2.4.3.2 Inconvénients de la DTC.....	26
2.4.4 Sélection du vecteur de tension $V_s$ .....	26.
2.4.5 Estimateurs .....	27
2.4.5.1 Estimateur du flux satyriques.....	27
2.4.5.2 Estimateur du couple électromagnétique .....	28
2.4.6 Elaboration du vecteur de commande.....	28
2.4.6.1 Correcteur de flux.....	28
2.4.6.2 Le correcteur de couple .....	29
2.4.6.3 Correcteur à deux niveaux.....	29
2.4.6.4 Correcteur à trois niveaux .....	30
2.4.7 Elaboration de la table de commande .....	30
2.4.8 Schéma de simulation.....	30
2.4.9 Résultats de simulation d'une MAS par DTC.....	31
2.5 Résultats de simulation de l'aérogénérateur.....	34
2.6 Conclusion .....	36

## **Chapitre 3 Réalisation et résultats pratique de léolienne**

3.1 Introduction .....	38
3.2 La forme de la turbine éolienne a axe verticale réalisée .....	38
3.3 Matériel utilisé .....	39
3.4 Résultats de la réalisation pratique.....	40
3.4.1 Interprétation des résultats .....	41
3.5 Conclusion.....	45

# Introduction générale

### Introduction générale

L'augmentation considérable de la consommation en énergie et l'incapacité des réserves en énergies fossiles qui se caractérisent à la fois par une forte émission de gaz à effet de serre et par des prix instables ont conduit à assurer les besoins pour le long terme. Cela a conduit les gens à rechercher des sources d'énergie, inépuisables et peu coûteuses. Parmi l'énergie propre et renouvelable de source on destine l'énergie géothermique, biomasse et l'énergie solaire ou éolienne et elle est devenue un axe de recherche et sujet de l'intérêt des chercheurs et des scientifiques dans le but de diversifier leur source énergétique.

L'énergie éolienne Parmi les énergies renouvelables qui ont pris un élan remarquable ces dernières années, elle est pour l'instant l'un des systèmes les plus écologiques d'obtenir de l'électricité et cette source est inépuisable et elle a des avantages importants.

On peut voir que des différents types d'éoliennes ont été développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles et il est devenu utilisable dans diverses applications telles que l'éclairage et le pompage.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous allons présenter quelques généralités sur les éoliennes et leurs différents types et les machines associées, ainsi que le gisement éolien mondial et en Algérie aussi leurs chaînes de conversion.

Au cours du deuxième chapitre nous avons fait la modélisation et simulation du système sous l'environnement MATLAB/SIMULINK qui est composée d'une éolienne à axe verticale, génératrice asynchrone, d'un redresseur, d'un onduleur, ainsi que les performances et la robustesse des stratégies de commande des différentes parties de ce système qui seront discutées et commentées.

Le troisième chapitre sera consacré aux différents composants qui ont servi à la conception de l'éolienne et présentera les étapes de la réalisation. Nous donnons les résultats obtenus d'après les valeurs d'essais pratiques, On termine par une conclusion générale.

# **Chapitre 1**

## **Généralité sur les turbines éolienne**

## 1.1 Introduction

Les énergies renouvelables se considèrent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux parce qu'elles sont propres et inépuisables et moins coûteuses par rapport aux autres sources d'énergie qui sont à coût élevé (énergies fossiles, énergies nucléaires...).

De là vient l'importance des énergies renouvelables, comme l'énergie éolienne, où l'énergie éolienne est convertie en énergie électrique et elle a connu une forte croissance au cours des dernières décennies.

Dans ce premier chapitre, nous présentons une définition de l'énergie éolienne et son historique de manière générale, puis des statistiques sont données montrant l'évolution de la production de l'énergie éolienne dans le monde et en Algérie.

### 1.2 Historique

Les humains connaissaient l'énergie éolienne et se l'ont exploitée 2000 ans avant JC elle fut utilisée pour la propulsion des navires, et les moulins à blé. La date d'environ 400 ans avant J.-C. et la première utilisation de la pompe à eau remonte à 1700 ans avant JC. Dans la civilisation babylonienne.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul Lacour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice.

Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée. [Is3], Cette technologie est améliorée durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale avec une grande échelle par les ingénieurs danois. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences, cette fois à plus grande échelle [Is5].

Certains pays se lancent donc dans l'énergie éolienne telle que le Danemark qui ne voulait pas tenter le nucléaire.

Des programmes nationaux ont été lancés ces dernières années dans des pays européens (Allemagne, Espagne, Danemark, France ...), dans le but d'améliorer l'éolien et son utilisation dans la production d'électricité. Le développement dans les dernières années de nouveaux modèles d'éoliennes a relancé le marché qui était resté assez latent.

Le rythme de développement des éoliennes n'a alors cessé d'augmenter [Is3].

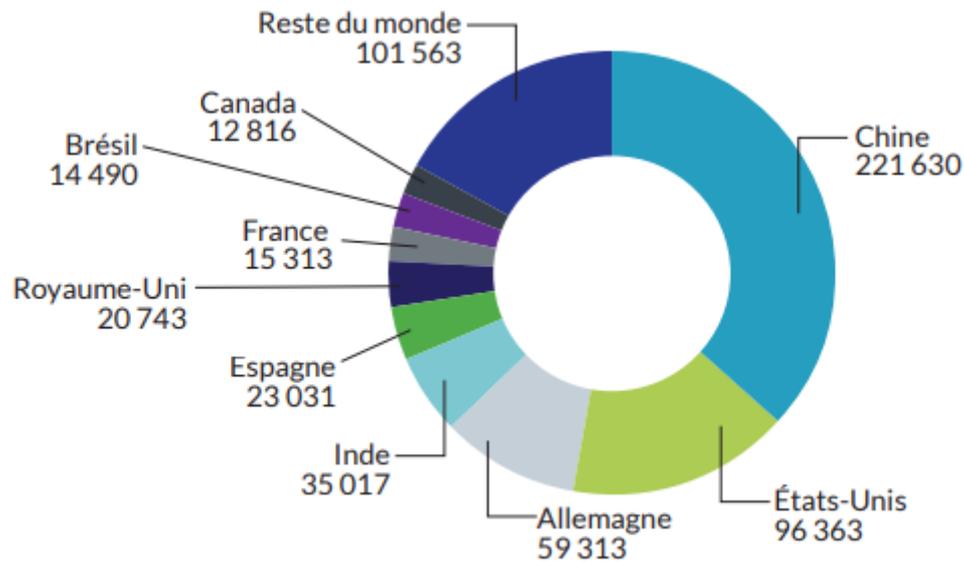
## 1.3 Statistique de production de l'éolienne :

### 1.3.1 Production de l'éolienne dans le monde :

L'utilisation moderne de l'énergie éolienne est aujourd'hui pratiquement réservée à la production d'électricité. La découverte capitale de la puissance éolienne se fit avec la crise du pétrole en 1973, quand la montée en flèche des prix du pétrole passait de 12 à 35 US\$.

Soudainement, les pays de l'OCDE voulurent devenir plus indépendants des importations de pétrole et se tournèrent vers le développement de l'énergie éolienne, et ce pratiquement exclusivement pour la production d'électricité [Is4], l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an.

Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020 soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW [Is6].



**FIGURE I.1.** Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA), données de 2018 [Is16]

### 1.3.2 Production de l'éolienne dans l'Algérie :

L'Algérie cherche à investir dans les énergies renouvelables, notamment dans l'éolien, et a donc mené une grande étude sur l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent afin d'identifier les régions ventées de l'Algérie et le résultat de cette étude c'est que le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec microclimats autour d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et à Biskra [Is5]. Au sud d'Algérie, on y trouve des vitesses de vent plus importantes qu'au nord, elles sont particulièrement supérieures à 4 m/s au sud-ouest, et supérieur à 6m/s dans la région d'Adar [Is1].

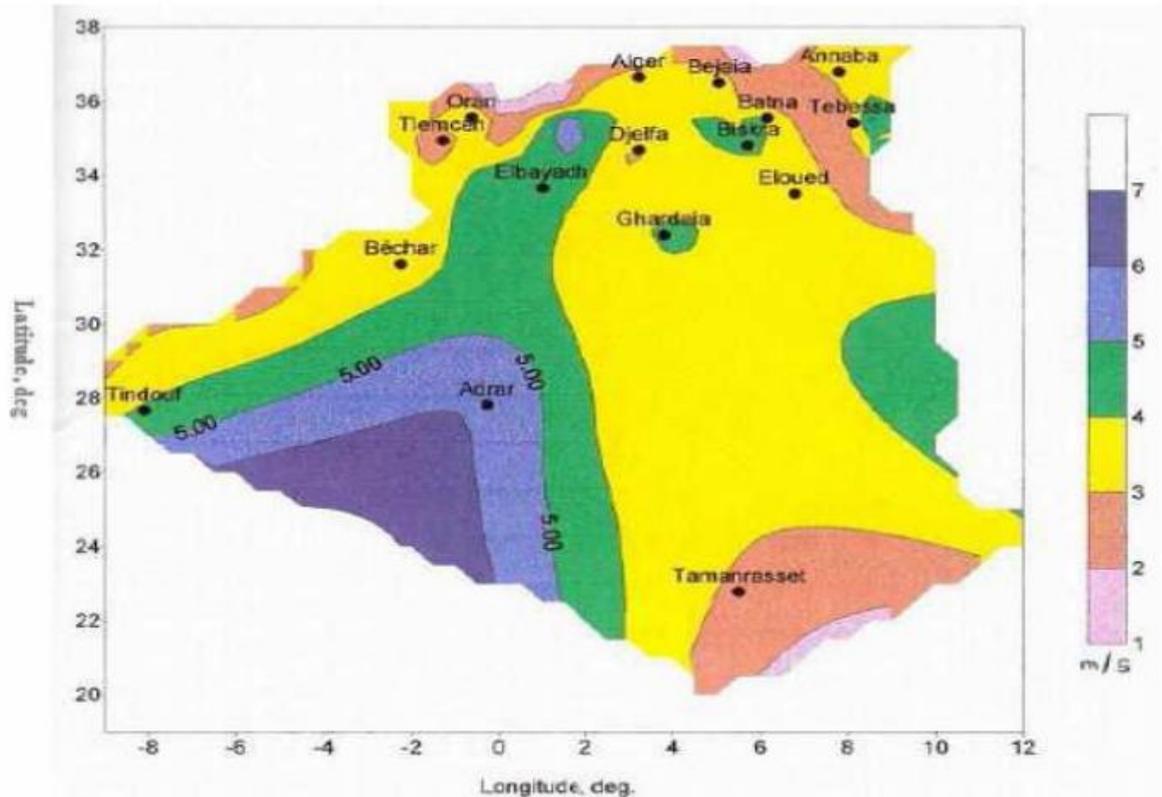


FIGURE I.2. Carte du potentiel éolien en Algérie [Is17]

#### 1.4 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne partie des énergies renouvelables les plus utilisées depuis l'Antiquité.

L'énergie éolienne était utilisée à des fins d'irrigation et pour moulin le grain [Is4], elle connaît depuis environ 30 ans un essor remarquable notamment dû aux premiers chocs pétroliers [Is6], De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif [Is3], et L'énergie est produite par, Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne [Is5].

#### 1.5 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

##### 1.5.1 Les avantages :

- Il est considéré comme une énergie renouvelable
- plus bas coût par rapport au nucléaire
- Une source d'énergie qui ne provoque pas de pollution
- C'est une solution efficace pour alimenter les zones reculées avec l'énergie
- la facilite de monter et démonter Les parcs éoliens

### 1.5.2 Inconvénients :

- le Mouvement du vent aléatoire les aérogénérateurs produits une qualité de puissance n'est pas toujours très bonne.
- Le bruit et impact visuel produit par les aérogénérateurs peut être dérangeant
- Les parcs éoliens besoin des grandes surfaces
- intervention électromagnétiques

### 1.6 Applications de l'énergie éolienne :

- Production de l'énergie électrique
- Utilisé pour déplacer des navires et des voiliers
- Utilisé pour moulin la farine
- Faire des activités sportives
- Le pompage de l'eau

### 1.7 Les différents types des turbines éoliennes :

On peut partager les éoliennes en deux grandes familles selon la disposition géométrique de l'arbre : celles à axe vertical (VAWT: Vertical Axis Wind Turbine) et celles à axe horizontal (HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine) :

#### 1.7.1 L'éolienne a axe verticale :

Ce type de machines est les premières à être utilisées pour capter l'énergie éolienne, car elles sont d'une conception beaucoup plus simple que celle a axe horizontale[Is1],Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles[Is3] , Elle ne nécessite pas de système d'orientation des pales par rapport à la direction du vent[Is1],De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue[Is4] , Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol on tété les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale[Is5]



FIGURE I.3. Eolienne a axe verticale [Is18]

### 1.7.2 L'éolienne a axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un cout moins important [Is4] , elle fonctionne selon le principe des moulins à vent , Elles comportent généralement des hélices à trois pales [Is5] , les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales [Is4].



FIGURE I.4 : éolienne horizontale [Is19]

### 1.7.3 Les avantages et inconvénients des axes :

#### 1.7.3.1 Les avantages de l'éolienne à axe horizontal :

- Choix plus large
- Installateurs compétents
- Technologie éprouvée
- Le prix
- Un bon rendement

#### 1.7.3.2 Les inconvénients de l'éolienne à axe horizontal :

- Nuisances sonores éventuelles
- Emprise au sol du mat si haubanage
- Mauvais rendement avec des vents turbulents
- Doit être orienté selon les vents
- Fonctionnement par intermittence

#### 1.7.3.3 Les avantages de l'éolienne à axe vertical :

- Faible encombrement (selon les modèles)
- Peut être intégrée aux bâtiments
- Démarre avec des vents faibles
- Ne nécessite pas de système d'orientation
- Bon comportement aux vents turbulents

#### 1.7.3.4 Les inconvénients de l'éolienne à axe vertical :

- Le prix
- Poids peut être important
- Faible rendement

### 1.8 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne :

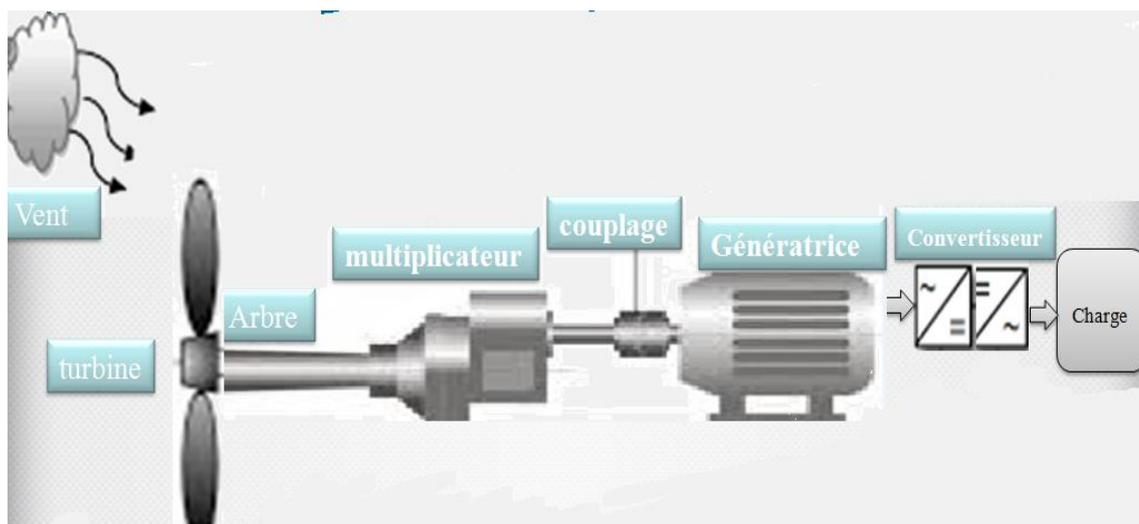


FIGURE I.5 : Chaîne de conversion de l'énergie éolienne

- **Une turbine** : qui permet de transféré l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.
- **Une transmission mécanique** : transmet l'énergie mécanique au générateur
- **Le multiplicateur** : il permet de minimiser le couple et d'augmenter la vitesse.
- **Une génératrice** : qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un système de liaison électrique.**
- **Les convertisseurs**

### 1.9 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Le aérogénérateur capte l'énergie cinétique du vent qui permet de tourner des pales qui met en mouvement un rotor pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et la vitesse de rotation de rotor pas suffisant pour un bon fonctionnement du générateur il doit être utilise un multiplicateur qui permet augmentée La vitesse de rotation du rotor jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

### 1.10 Les Convertisseurs statiques :

#### 1.10.1 Définition des Convertisseurs statique :

Un convertisseur statique est un système utilisant des interrupteurs à semi conducteurs pour ce 'adapter un transfert d'énergie entre une source d'entrée et une source de sortie.

#### 1.10.2 Type de Convertisseurs statique utilise :

##### 1.10.2.1 L'onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique qui transforme une énergie électrique de la forme continue à une énergie électrique à la forme alternative pour fonctionner les machine qui nécessite une tension alternative.

##### 1.10.2.2 Le Redresseur :

C'est un convertisseur statique utilisé pour alimenter une charge fonctionnant avec une tension continue à partir d'une source alternative et pour recharger des batteries.

- **Les redresseurs non commandé** : ils sont à base de diodes, sont seulement utilisé lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée [Is1].
- **Les redresseurs semi commandés** : ils comportent des thyristors et des diodes qui empêchent la tension aux bornes de la charge de s'inverser, mais permettent de régler la tension moyenne. Les redresseurs non commandés et les redresseurs semi commandés sont appelés les convertisseurs unidirectionnelle car la puissance peut circuler que de l'alimentation alternative vers la charge continue [Is1].

- **Redresseur commandé** : ne comporte que des thyristors, ils sont appelés les convertisseurs bidirectionnelle car la puissance peut circuler dans les deux sens [Is1].

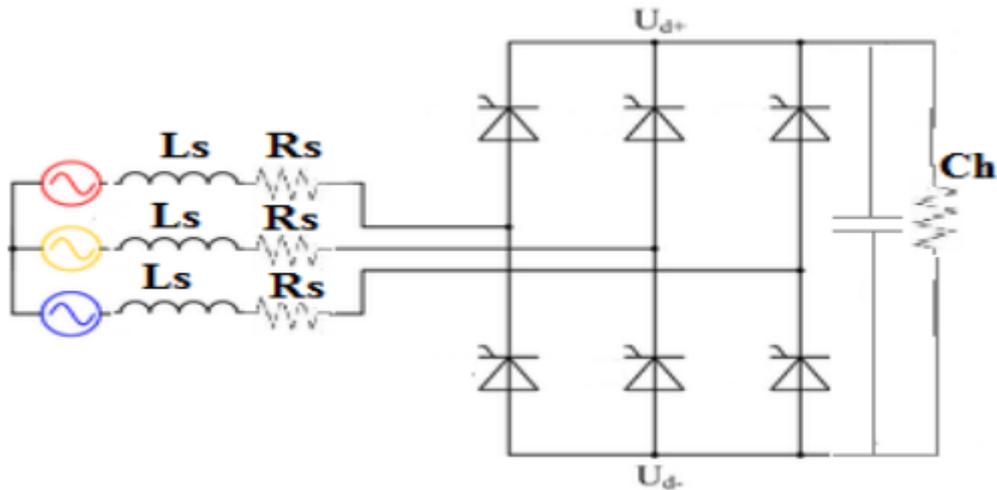


FIGURE I.6 :Pont redresseur triphasé a thyristors[Is1]

## 1.11: La machine asynchrone

### 1.11.1 Définition :

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement et le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique [Is11]

### 1.11.2 Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer
- Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.
- Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien du différent sous ensemble [Is11]

### 1.11.3 Principe de fonctionnement d'un Générateur asynchrone a cage :

la vitesse de rotation d'une génératrice doit être proche du synchronisme point  $g=0$  comme ce cas la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min et le rotor de la machine asynchrone est couplé mécaniquement à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et La

machine doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée glissement inférieur à 2% parce que elle a un nombre de pair de pôles fixe.

### **1.12 Conclusion :**

Dans ce premier chapitre, on a présenté quelques définitions et généralités sur l'énergie éolienne

On a présenté un aperçu sur les différents types d'éoliens, ainsi que sur le générateur dédié à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, ensuite, on a présenté les convertisseurs utilisés. Pour le prochain chapitre, nous allons étudier la modélisation des éléments de la chaîne de conversion.

## **Chapitre 2 :**

# **Modélisation et simulation du système**

## 2.1 Introduction

La modélisation c'est un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système qui nous allons l'étudier et elle est nécessaire de connaître alors les données de base c'est-à-dire les données relatives aux équipements et les données météorologiques et les données du site, les données relatives aux utilisateurs,

Dans ce chapitre, nous ferons la modélisation et simulation du système sous l'environnement MATLAB/SIMULINK de la turbine, la génératrice asynchrone du bus continu, de l'onduleur, du redresseur, de la pompe centrifuge, ainsi que de MAS et aussi les performances et la robustesse des stratégies de commande des différentes parties de ce système seront discutés et commentés.

## 2.2 Modélisation de la turbine éolienne

### 2.2.1 Modélisation de vent

- Le vent est une grandeur important qui représente l'entrée du système éolien et sa vitesse est tridimensionnelle Avec contraste aléatoire et caractéristique très volatile.

Il est donc nécessaire de modéliser la vitesse du vent comme une fonction scalaire qui se varie avec le temps.

$$V=f(t) \quad (1)$$

- Elle modélisée par une somme des composantes harmoniques avec la forme :

$$V = V_m + \sum_{n=1}^k a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_n \cdot t) \quad (2)$$

$V_m$ : Valeur moyenne de la vitesse du vent

$k$ : le Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

$a_n$ : Amplitude de l'harmonique de l'ordre

$\omega_n$ : Pulsation de l'harmonique de l'ordre

### 2.2.2 Modélisation de la turbine éolienne

On doit faire une modélisation d'une turbine éolienne qui contient des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice et la modélisation de la turbine est basée sur le concept du coefficient de conversion.

- On a la puissance éolienne (puissance du vent) est sous la forme suivante :

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

- le couple aérodynamique entraînant la génératrice est sous la forme suivante :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega_{turbine}} \quad (4)$$

d'après la caractéristique propre de la voilure qui donne La puissance aérodynamique apparaissant au rotor de la turbine sous la forme suivante :

$$P_{ero} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (5)$$

le  $C_p$  est un coefficient dépend de la caractéristique de la turbine et il représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et son changement dépend du facteur de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation des pales  $\beta$ .

le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent sous la forme suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (6)$$

Avec :

$\Omega$  Turbine : vitesse de la turbine

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

$\rho$ : Densité de l'air

$S$ : Surface circulaire balayée par la turbine

$v$ : vitesse du vent.

$C_p$  : Le coefficient de puissance

$(\Omega_{turbine} \cdot R)$  : la vitesse des pales et  $R$  : longueur des pales

### 2.2.3 Modélisation de l'arbre de la machine

$J$  est l'inertie totale de la turbine qui Transféré sur le rotor et le modèle mécanique de ce l'inertie totale  $j$  est :

$$J = j_{génératrice} + j_{turbines} \quad (7)$$

• Le couple mécanique compte le couple des frottements visqueux et le couple électromagnétique et le couple du multiplicateur :

$$C_{mec} = C_{mul} - C_{em} - C_{vis} \quad (8)$$

• le comportement mécanique de l'ensemble turbine - génératrice est représenté par l'équation différentielle suivante :

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec}$$

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mul} - C_{em} - C_{vis}$$

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mul} - C_{em} - (f_m + f_t) \Omega_{mec} \quad (9)$$

Avec :

$J_t$  : Inerties de la turbine.

$J_m$  : Inerties de la machine.

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} = (f_m + f_t) \Omega_{mec}$$

$C_{em}$  : Couple électromagnétique Produit par la génératrice

$C_{vis}$  : Des frottements visqueux

$f_m$  : Coefficient de frottement de la machine.

$f_t$  : Coefficient de frottement des pâles.

$\Omega_{mec}$  : la vitesse de rotation

$C_{mul}$  : le couple du multiplicateur

### 2.2.4 Modélisation de multiplicateur de vitesse :

• Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et Modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement sont négligés. Les pertes Énergétiques dans cet organe sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante]. **[Is6]**

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{générateur}}{G} \quad (10)$$

• Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour Obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur. **[Is6]**

$$C_{générateur} = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (11)$$

Avec: G : gain de multiplicateur

### 2.3 Modèle général de la machine asynchrone :

On écrit les équations générales de la machine asynchrone dans un repère triphasé sous la forme matricielle suivante

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] &= [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{aligned} \quad (12)$$

Les vecteurs des courants statoriques et rotorique :

$$[i_{s,abc}] = [i_{s,a} \ i_{s,b} \ i_{s,c}]^t, \quad [i_{r,abc}] = [i_{r,a} \ i_{r,b} \ i_{r,c}]^t \quad (13)$$

les vecteurs des tensions statoriques et rotorique :

$$[V_{s,abc}] = [V_{s,a} \ V_{s,b} \ V_{s,c}]^t, \quad [V_{r,abc}] = [V_{r,a} \ V_{r,b} \ V_{r,c}]^t \quad (14)$$

les vecteurs des flux statoriques et rotorique :

$$[\Phi_{s,abc}] = [\Phi_{s,a} \ \Phi_{s,b} \ \Phi_{s,c}]^t, \quad [\Phi_{r,abc}] = [\Phi_{r,a} \ \Phi_{r,b} \ \Phi_{r,c}]^t \quad (15)$$

les matrices des résistances statoriques et rotorique:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (16)$$

Les flux totalisés et des phases statoriques et rotorique s'expriment sous la forme:

$$\begin{aligned} [\Phi_{s,abc}] &= [L_s][i_{s,abc}] + [M_{sr}][i_{r,abc}] \\ [\Phi_{r,abc}] &= [L_r][i_{r,abc}] + [M_{rs}][i_{s,abc}] \end{aligned} \quad (17)$$

Avec :  $[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$

les matrices des inductances statoriques et rotorique :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (18)$$

Et la matrice des inductances mutuelles entre phase statoriques et phase rotorique est donnée par :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (19)$$

$M_{sr}$  étant le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor d'après les expressions (12) dans (17), nous obtenons le système d'équations électriques nécessaire à l'étude du fonctionnement de la machine à tous les régimes :

$$\begin{aligned} [V_{s,abc}] &= [R_s][i_{s,abc}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{s,abc}] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_{r,abc}]) \\ [V_{r,abc}] &= [R_r][i_{r,abc}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{r,abc}] + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [i_{s,abc}]) \end{aligned} \quad (20)$$

La matrice  $[M_{rs}]$  des inductances mutuelles présentent des à éléments non constants et les expressions des tensions obtenues ci- dessus sont d'ordre élevé (6ème ordre).

Avec

$L_s$ : L'inductance propre d'une phase statorique

$L_r$ : L'inductance propre d'une phase rotoriques

$M_s$ : L'inductance mutuelle entre phase statorique

$M_r$ : L'inductance mutuelle entre phase statoriques

### 2.3.1 La transformation de Park de la MAS:

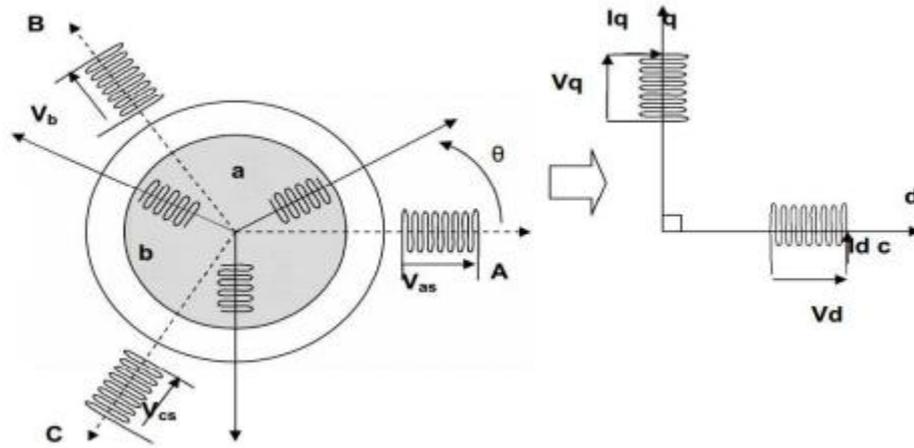
La transformation de Park est un outil mathématique a pour but de traiter et de faire la simplification des équations des machines électriques triphasées et elle permet une transformation d'un repère triphasé en un repère diphasé.

Elle transforme le système en un système équivalent diphasé et cette transformation peut être appliqué aux courants, tensions, et aux flux et la transformation est donnée sous la forme suivante :

$$[X_{dq0}] = [T][X_{abc}] \quad (21)$$

Et La matrice de transformation est définie comme suit :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (22)$$



**FIGURE II.7:** Représentation schématique de la machine dans le repère diphasé (Transformation de Park) [Is13]

Avec :

$$\theta_s = \theta_r + \theta$$

$\theta$ : est l'angle entre l'axe rotorique et l'axe statoriques.

$\theta_s$ : est l'angle entre l'axe rotorique et l'axe direct d.

$\theta_r$ : est l'angle entre l'axe statorique et l'axe direct d.

Le système d'axes (d, q) tournant à la vitesse

$$\omega_a = \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$$

L'indice *o* est une composante homopolaire.

La transformée de Park est appliquée pour chaque vecteur défini comme vecteur de tension, courant, flux et en remplaçant dans la matrice de Park par  $\theta_r$  pour celles du rotor et par  $\theta_s$  pour les équations du stator

$$[V_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{sabc}] \tag{23}$$

$$[V_{rdq}] = [P(\theta_r)] \cdot [V_{rabc}]$$

et

$$[i_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [i_{sabc}] \tag{24}$$

$$[i_{rdq}] = [P(\theta_r)] \cdot [i_{rabc}]$$

et on a :

$$\begin{aligned} [\Phi_{sdq}] &= [P(\theta_s)]. [\Phi_{sabc}] \\ [\Phi_{rdq}] &= [P(\theta_r)]. [\Phi_{rabc}] \end{aligned} \quad (25)$$

On obtiens d'après le développement et la simplification, des tensions statoriques et rotorique et les équations des flux magnétiques les équations suivent :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_a \Phi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_a \Phi_{sd} \\ 0 &= R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_a - \omega) \Phi_{rq} \\ 0 &= R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_a - \omega) \Phi_{rd} \end{aligned} \quad (26)$$

et

$$\begin{aligned} \Phi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Phi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \Phi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \Phi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{aligned} \quad (27)$$

Tel que :

$$L_m = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs} : \text{Mutuelle cyclique entre rotor stator.}$$

### 2.3.2 Choix du référentiel :

On mise trois systèmes d'axes de coordonnées qui sont des cas particuliers du système d'axes généralisé (d, q). Ces systèmes d'axes sont :

- Le système d'axes ( $\alpha, \beta$ ) lié au stator,

$$\omega_a = 0$$

- Le système d'axes (x, y) lié au stator

$$\omega_a = \omega$$

- Le système d'axes (d, q) lié par rapport au champ tournant

$$\omega_a = \omega_s$$

En choisissant un référentiel ( $\alpha, \beta$ ) lié au stator ( $\omega_a = 0$ ), le système est :

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\
 V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\
 0 &= R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\
 0 &= R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd}
 \end{aligned} \tag{28}$$

La transformation de PARK exprime les flux statoriques et rotorique dans le repère de en fonction des courants, par la relation matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \tag{29}$$

On a :

$L_s = l_s + L_m$  : Inductance cyclique statoriques.

$L_r = l_r + L_m$  : Inductance cyclique rotorique.

$l_s$  : Inductance de fuite statoriques.

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique

Les équations électriques de la machine exprimées dans le repère dq:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot L_m \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot L_m & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot L_m & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot L_m & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \tag{30}$$

### 2.4 Commande directe du couple (DTC) :

Le contrôle direct du couple, venu du terme anglais " Direct Torque Control (DTC)", des machines asynchrones proposé par **Takachachi** et **Depenbrok** est apparu dans la deuxième moitié des années 1980 comme concurrentielles des méthodes classiques , Dans un repère lié au stator, les valeurs instantanées du flux statoriques du couple électromagnétique sont estimées à partir des grandeurs statoriques. En utilisant des comparateurs à hystérésis, le flux et le couple sont contrôlés directement et indépendamment avec une sélection appropriée du vecteur de tension imposé par l'onduleur. [\[Is11\]](#)

La DTC ou (direct torque contrôle) est une régulation du couple de la machine asynchrone, par l'application des différents vecteurs des tensions de l'onduleur, qui détermine son état.

Les variables contrôlées sont le flux statoriques et le couple électromagnétique, elles sont habituellement contrôlées par des régulateurs à hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension de l'onduleur optimale à appliquer à chaque instant de commutation. **[Is11]**

Elle présente des avantages déjà bien connus par rapport aux techniques classiques, notamment en ce qui concerne la réduction du temps de réponse du couple ; l'amélioration de sa robustesse par rapport aux variations des paramètres rotorique ; l'imposition directe de l'amplitude des ondulations du couple et du flux statoriques ; l'absence de transformations de Park.

D'autre part, cette loi de commande en couple s'adapte par nature à l'absence de capteur Mécanique (vitesse, position) . Beaucoup de travaux ont été faits par les chercheurs dans ce domaine dont le but d'améliorer la technique de base énoncé par **Takahashi [Is12]**.

#### 2.4.1 Contrôle du flux statoriques

Le contrôle direct du couple est basé sur l'orientation du flux statorique, l'expression du flux statoriques dans le référentiel lié au stator de la machine est donné par **[Is13]**:

$$V_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \Phi_s \quad (1)$$

On obtient :

$$\Phi_{sa} = \int_0^t (V_s - R_s i_{sa}) dt \quad (2)$$

Dans le cas où on applique un vecteur de tension non nul pendant un intervalle de temps  $[0, T_e]$  et si on considère que  $V_s$   $R_s$   $I_s$  donc l'équation (2) en discret peut s'écrire **[Is13]**:

$$\Phi_{sa}(k+1) = \Phi_{sa}(k) + V_s \cdot T_e \quad (3)$$

Donc :

$$\Delta \Phi = V_s \cdot T_e \quad (4)$$

Avec

$\Phi_s(K+1)$  : vecteur du flux statoriques à l'échantillonnage suivant,

$\Phi_s(K)$  : vecteur du flux statoriques au d'échantillonnage actuel,

$\Delta \Phi$  : variation du vecteur flux statoriques ( $\Phi_s(K+1) - \Phi_s(K)$ ),

$T_e$  : période d'échantillonnage.

L'équation (3) implique que l'extrémité du vecteur flux  $c(t)$  se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur de la tension appliquée  $V_s$  comme il est illustré sur la fig9 [Is13]

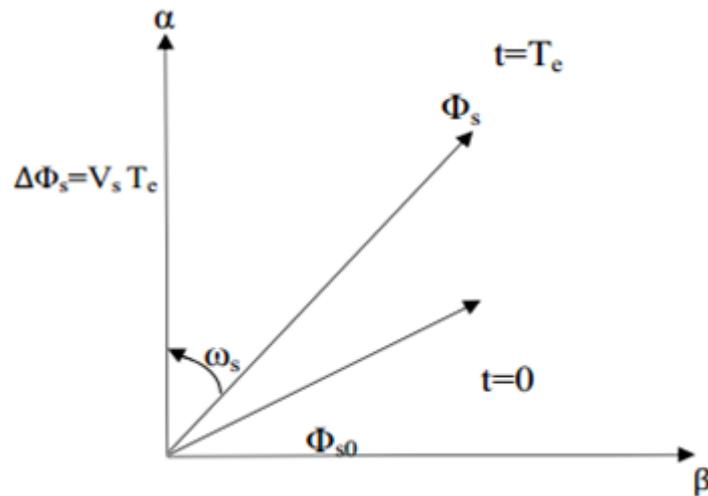


FIGURE II.8 : Evolution du vecteur flux Statorique dans plan  $(\alpha,\beta)$  [Is13]

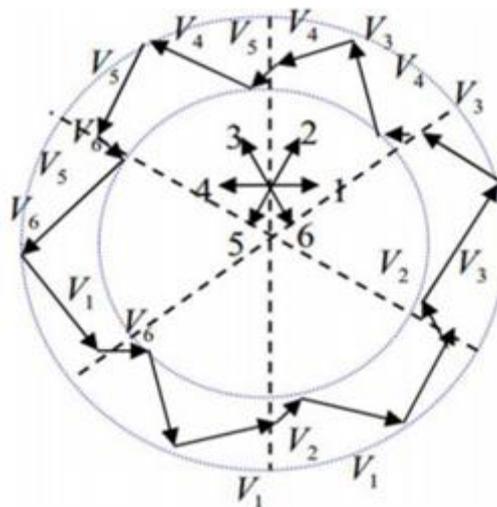


FIGURE II.9 : sélection de vecteur tension  $V$  Correspondant au contrôle de l'amplitude de flux [Is13]

La composante radiale du flux fait varier l'amplitude de  $\Phi_s$  et la composante tangentielle du couple fait varier la position de  $\Phi_s$ . En choisissant une séquence adéquate des vecteurs  $V_s$ , sur les périodes de commande  $T_c$ , il est donc possible de fonctionner avec un module de flux  $\Phi_s$  pratiquement constant, en faisant suivre à l'extrémité de  $\Phi_s$  une trajectoire et presque circulaire, si la période  $T_c$  est très faible devant la période de rotation du flux statoriques, lorsque le vecteur tension  $V$  sélectionné est non nul, la direction du déplacement de l'extrémité de  $\Phi_s$  est donnée par sa dérivée  $(\frac{\partial \Phi_s}{\partial t})$  ainsi la vitesse de

déplacement de l'extrémité de  $\varnothing_s$ , La vitesse de rotation de  $\varnothing_s$  dépend fortement du choix de  $V_s$ , elle est maximale pour un vecteur  $V_s$  perpendiculaire à la direction de  $\varnothing_s$  et nulle si on applique un vecteur nul, elle peut aussi être négative. [Is13]

### 2.4.2 Contrôle du couple électromagnétique de la machine

on exprime le couple électromagnétique en fonction du flux statoriques et du flux rotorique de la façon comme suit. :

$$C_{em} = P(\varnothing_{s\alpha} i_{s\beta} - \varnothing_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (5)$$

on exprime la dérivée du couple de la façon comme suit :

$$\frac{dC_{em}}{dt} = P(\varnothing_{s\alpha} \frac{di_{s\beta}}{dt} - \varnothing_{s\beta} \frac{di_{s\alpha}}{dt}) + P(i_{s\beta} \frac{d\varnothing_{s\alpha}}{dt} - i_{s\alpha} \frac{d\varnothing_{s\beta}}{dt}) \quad (6)$$

Est les équations magnétiques suivantes :

$$\begin{aligned} \varnothing_{s\alpha} &= L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \\ \varnothing_{s\beta} &= L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \\ \varnothing_{r\alpha} &= L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \varnothing_{r\beta} &= L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \end{aligned} \quad (7)$$

On a les d'équations (7) de la machine expriment dans repère d'axes fixes :

$$V_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{d(is+ir)}{dt} \quad (8)$$

$$0 = R_r i_r + L_s \frac{di_r}{dt} + M \frac{d(is+ir)}{dt} - j\omega \varnothing_r \quad (9)$$

Et  $M \gg L_s, L_r$  on suppose

$$\frac{d(is+ir)}{dt} = 0 \quad (10)$$

On séparant deux instants d'échantillonnage sur un intervalle de temps court pour obtiens

$$i_s = -i_r \quad (11)$$

Donc le système des équations (8), (9) devient

$$V_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} \quad (12)$$

$$0 = R_r i_r + L_s \frac{di_r}{dt} - j\omega \varnothing_r \quad (13)$$

on prend l'équation (11) et les deux autre équations (12), (13) s'ajoutent et se résument en une seule équation et on obtient :

$$V_s = (R_s + R_r) i_s + (L_s + L_r) \frac{di_s}{dt} + j\omega \Phi_r \quad (14)$$

la dérivée du courant statoriques est exprimé en fonction de la tension statorique, du flux rotorique et du courant statoriques

$$\begin{aligned} \frac{dis\alpha}{dt} &= \frac{1}{(is+ir)} [V_{s\alpha} - (R_s + R_r) i_{s\alpha} + j\omega \Phi_{r\beta}] \\ \frac{dis\beta}{dt} &= \frac{1}{(is+ir)} [V_{s\beta} - (R_s + R_r) i_{s\beta} + j\omega \Phi_{r\alpha}] \end{aligned} \quad (15)$$

à partir de l'expression (1) nous avons le système d'équation suivant:

$$\begin{aligned} \frac{dis\alpha}{dt} &= V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} \\ \frac{dis\beta}{dt} &= V_{s\beta} - R_s i_{s\beta} \end{aligned} \quad (16)$$

En remplaçant les équations (15) et (16) dans l'équation (.6), nous obtenons l'équation de la variation du couple (19) avec :

$$\begin{aligned} \Phi_{r\alpha} &= \Phi_{s\alpha} - (L_s + L_r) i_{s\alpha} \\ \Phi_{r\beta} &= \Phi_{s\beta} - (L_s + L_r) i_{s\beta} \end{aligned} \quad (17)$$

La dérivée du couple valable à l'échelle de temps de la commutation donne :

$$\frac{dCem}{dt} = \frac{p}{(is+ir)} [\Phi_{r\alpha} (v_{s\beta} - \omega \Phi_{s\alpha}) - \Phi_{r\beta} (V_{s\beta} - \omega \Phi_{s\beta}) - \frac{R_s + R_r}{P} Cem] \quad (18)$$

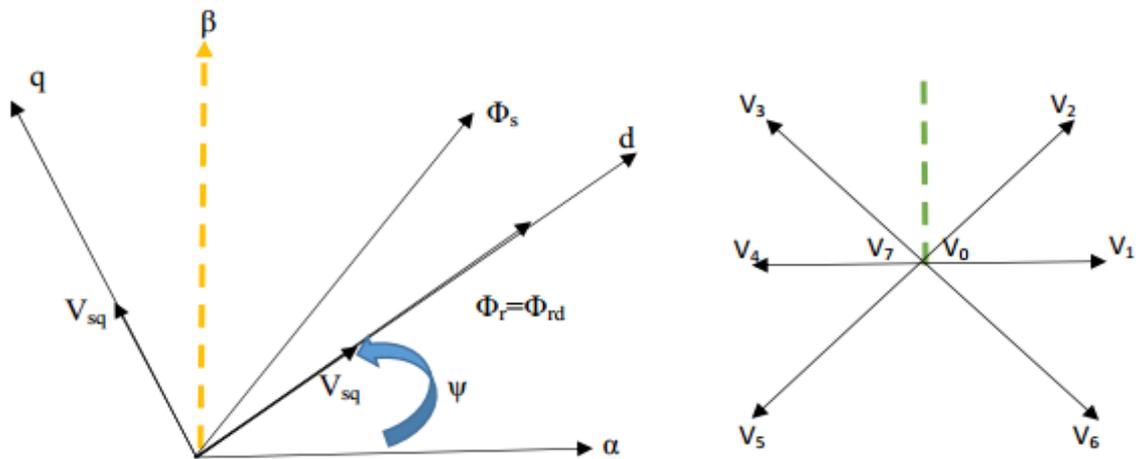
Ou bien :

$$\frac{dCem}{dt} = \frac{p}{(is+ir)} [\text{Im}[\Phi_r (V_s - j\omega \Phi_s)] - \frac{R_s + R_r}{P} Cem] \quad (19)$$

On présente la dérivée du couple dans un repère tournant d'axes (d, q) ou l'axe d coïncide avec le flux rotorique fig.10.

D'apere l'équation (20) qui permet l'approche d'évolution du couple électromagnétique pour tout point de fonctionnement de la machine asynchrone et quel que soit la séquence de tension appliquée .

$$\frac{dC_{em}}{dt} = \frac{p}{(is+ir)} [(V_s - j\omega\phi_s) \parallel \phi_r] - \frac{Rs+Rr}{p} C_{em} \quad (20)$$



**FIGURE II.10 :** Orientation de l'axe d du repère tournant selon la direction du flux rotorique [Is13]

### 2.4.3 Avantages et Inconvénients de la DTC :

#### 2.4.3.1. Avantages de la DTC :

- Il n'est pas nécessaire de faire la transformation des coordonnées, car les courants et les tensions sont dans un repère lié au stator.
- Utilise un modèle simplifié du moteur à induction.
- Il n'existe pas de bloc qui calcule la modulation de la tension (MLI).
- Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle.
- La réponse dynamique du couple est très rapide.
- Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

#### 2.4.3.2 Inconvénients de la DTC :

- L'existence de problèmes à base vitesse (influence du terme résistif).
- La nécessité de disposer des estimations de flux statorique et du couple.
- L'existence des oscillations de couple.
- La fréquence de commutation n'est pas constante (utilisation des régulateurs à hystérésis), ce qui conduit à un contenu riche en harmoniques qui fait augmenter les pertes et amène à des bruits acoustiques et des oscillations de couple pouvant exciter des résonances mécanique

#### 2.4.4 Sélection du vecteur de tension $V_s$ :

Une sélection appropriée du vecteur tension  $v_s$  par  $(S_a, S_b, S_c)$  permet de déplacer vecteur Flux  $\varphi_s$  de manière à maintenir son amplitude constante. Le choix de  $V_s$  dépend alors de la variation souhaitée pour le module du flux statoriques  $\varphi_s$  du sens de rotation des  $\varphi_s$ , mais également de l'évolution souhaitée pour le couple [Is11].

Lorsque le vecteur flux  $\varphi_s$  se trouve dans une zone numérotée  $N=i$ , le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des quatre vecteurs tension, Sur toute la zone  $N=i$  parcourue par le vecteur flux statorique, le rôle du vecteur tension  $V_s$  sélectionné reste le même soit [Is15] :

- Si  $V_{i+1}$  (pour  $i \leq 5$  sinon  $V_{i-5}$ ) est sélectionné alors  $\varphi_s$  croît et  $C_e$  croît.
- Si  $V_{i+5}$  (pour  $i \leq 1$  sinon  $V_{i-1}$ ) est sélectionné alors  $\varphi_s$  croît et  $C_e$  décroît.
- Si  $V_{i+2}$  (pour  $i \leq 4$  sinon  $V_{i-4}$ ) est sélectionné alors  $\varphi_s$  décroît et  $C_e$  croît.
- Si  $V_{i+4}$  (pour  $i \leq 2$  sinon  $V_{i-2}$ ) est sélectionné alors  $\varphi_s$  décroît et  $C_e$  décroît.

Quelque soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans une zone de position  $N=i$ , les deux vectrices tensions  $V_i$  et  $V_{i+3}$  ne sont jamais utilisés puisque ils peuvent augmenter ou diminuer le couple selon la position du flux  $\varphi_s$  dans le secteur  $i$ . [Is15]

Il s'agit des vecteurs  $V_{i+1}$ ,  $V_{i+2}$ ,  $V_{i+4}$ ,  $V_{i+5}$  représentés sur la figure 11 :

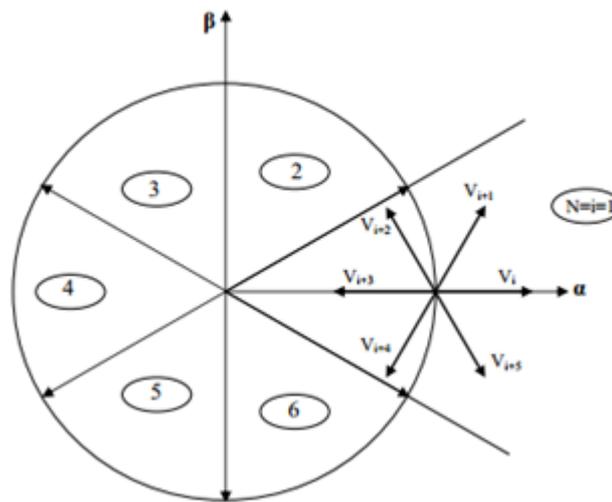


FIGURE II.11 : Sélection du vecteur tension  $V_s$  selon la zone  $N=i$  [Is15]

### 2.4.5 Estimateurs :

#### 2.4.5.1 Estimateur du flux statoriques

à partir des mesures des grandeurs statoriques courant et tension de la machine on fait l'estimation de flux statoriques et il s'écrit sous l'expression suivante :

$$\bar{\Phi}_s = \int_0^1 (\bar{V}_s - R_s \bar{I}_s) dt$$

Le vecteur flux statoriques est calculé à partir de deux axes ( $\alpha, \beta$ ), tel que :

$$\bar{\Phi}_s = \Phi_{s\alpha} + j \Phi_{s\beta}$$

Nous utilisons la transformation de Concordia Pour calculer les composantes  $i_{s\alpha}$  et  $i_{s\beta}$  à partir des courants ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$  et  $i_{sc}$ ) mesurés :

$$\begin{aligned} I_s &= i_{sa} + j \cdot i_{s\beta} \\ I_{sa} &= \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa} \\ I_{s\beta} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{aligned}$$

à partir de la tension d'entrée de l'onduleur  $U_0$  et des états de commande ( $S_a, S_b, S_c$ ) On obtient  $v_{s\alpha}$   $v_{s\beta}$  :

$$\begin{aligned} v_{s\alpha} &= \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 (S_0 - \frac{1}{2}(S_b + S_c)) \\ v_{s\beta} &= \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 (S_b - S_c) \end{aligned}$$

Le module et la phase du flux statoriques s'écrivent :

$$\begin{aligned} |\Phi_s| &= \sqrt{\Phi_{s\alpha}^2 + \Phi_{s\beta}^2} \\ \Phi_s &= \arctg \frac{\Phi_{s\beta}}{\Phi_{s\alpha}} \end{aligned}$$

#### 2.4.5.2 Estimateur du couple électromagnétique :

A partir des flux statoriques, et les courants statoriques On peut estimer le couple électromagnétique

$$C_{em} = P(\Phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{s\beta} i_{s\alpha})$$

2.4.6 Elaboration du vecteur de commande :

2.4.6.1 Correcteur de flux :

ce type de contrôleur, permet facilement de contrôler et piéger l'extrémité du vecteur flux dans une couronne circulaire, comme le montre la figure.12 pour sélectionner le vecteur tension correspondant la sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de  $\phi_s$ .

La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne  $C_{flx}$  indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée ( $C_{flx}=1$ ) ou diminuée ( $C_{flx}=0$ ) de façon à maintenir

$$|(\phi_c)_{ref} - \phi_c| \leq \Delta\phi_c$$

Avec :  $(\phi_c)_{ref}$  la consigne de flux et de  $\Delta\phi_c$  largeur d'hystérésis du correcteur.

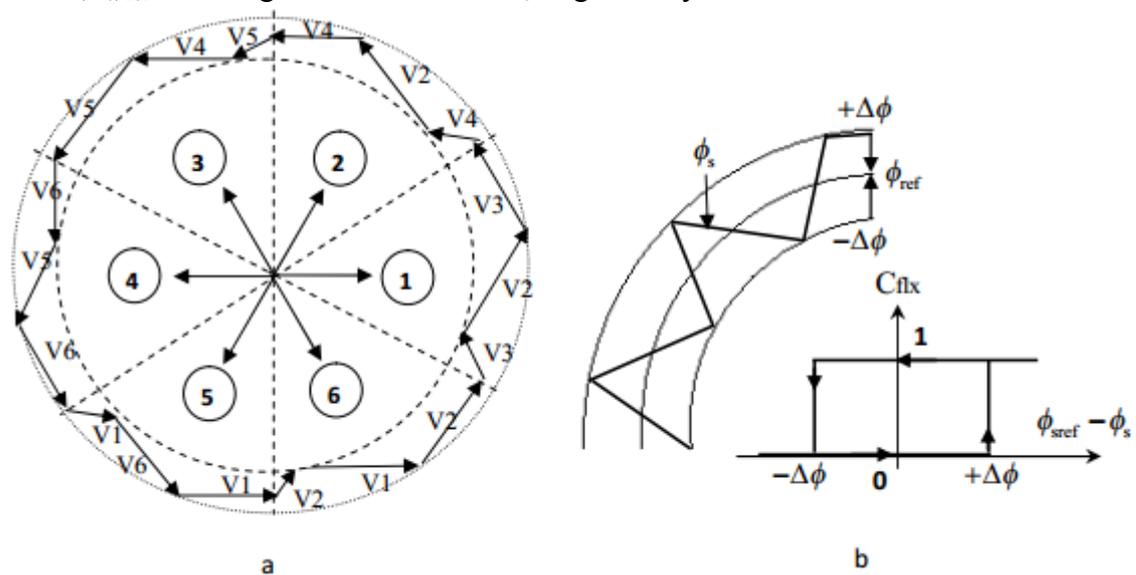


FIGURE II.12 : Correcteur du flux à hystérésis et sélection des vecteurs tensions correspondante[Is11]

2.4.6.2 Le correcteur de couple :

Le but d'utiliser le correcteur de couple est de maintenir le couple dans sa bande d'hystérésis et d'imposer ainsi l'amplitude des ondulations du couple et il est défini comme suit :

$$| C_{emref} - C_{em} | \leq \Delta C_{em}$$

Avec:

$C_{emref}$  :est le couple de référence,

$C_{em}$  : est la bande d'hystérésis du correcteur.

On peut obtenir Deux solutions d'après la différence avec le contrôle du flux est que le couple peut être positif ou négatif selon le sens de rotation de la machine un correcteur à hystérésis à deux niveaux et un correcteur à hystérésis à trois niveaux.

### 2.4.6.3 Correcteur à deux niveaux

Le comparateur à deux niveaux diffère du précédent par la plus grande simplicité de son application. Il se réduit au contrôle du couple sur un seul sens de rotation du moteur. Ainsi, seuls les vecteurs  $v_{i+1}$  et  $v_{i+2}$  peuvent être sélectionnés pour faire évoluer le vecteur flux et par conséquent la diminution du couple et uniquement opérée par l'application des vecteurs nuls. [Is11]

Par contre, pour tourner la machine dans l'autre sens le correcteur ne permet pas d'inverser le sens de rotation du vecteur flux. Le changement du sens de rotation se fait donc par croisement de deux phases statoriques. [Is11]

### 2.4.6.4 Correcteur à trois niveaux

Il permet de contrôler le moteur dans les deux sens de rotation, soit pour un couple positif ou négatif. La sortie du correcteur, représentée par la variable booléenne  $ccpl$  indique directement si l'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue ( $ccpl = 1$  pour une

Consigne positive et  $ccpl = -1$  pour une consigne négative) ou diminuée ( $ccpl = 0$ ). [Is13]

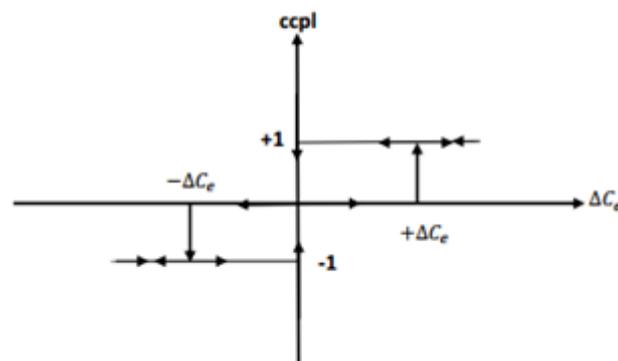


FIGURE II.13 :correcteur de couple [Is13]

### 2.4.7 Elaboration de la table de commande :

La table de commande est construite en fonction de l'état des variables  $C_{flx}$ ,  $C_{cpl}$  et la zone N qui définit la position du vecteur flux statoriques  $\Phi_s$ . Plusieurs tables de commutation peuvent être utilisées pour contrôler le couple et le flux statoriques. [Is14]

N		1	2	3	4	5	6
Flux	Couple						
KΦ=1	KCem=1	2	V	V3	V4	V5	V6
	KCem=0	7	V	V0	V7	V0	V7
	KCem=-1	6	V	V1	V2	V3	V4
KΦ=0	KCem=1	3	V	V4	V5	V6	V1
	KCem=0	0	V	V7	V0	V7	V0
	KCem=-1	5	V	V6	V1	V2	V3

FIGURE II.14:: Table de commutation avec séquences nulles[Is20]

2.4.8 Schéma de simulation :

la stratégie de commande directe de couple d'une machine asynchrone est montre sur la figure suivant :

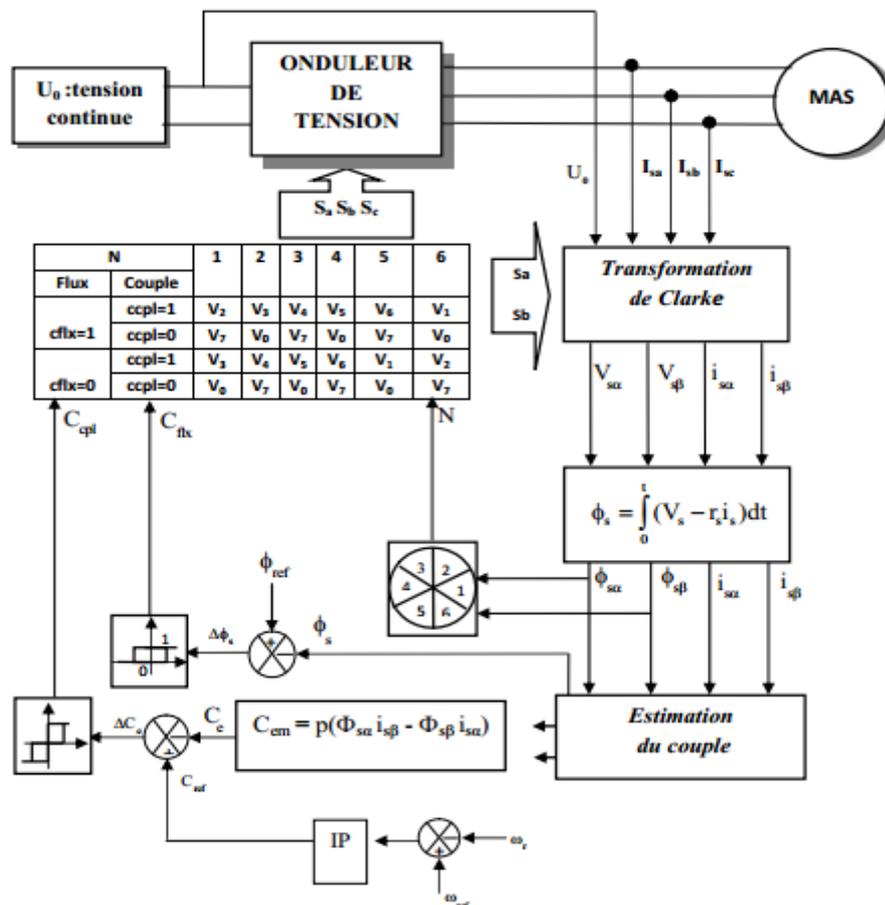


FIGURE II.15 : Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple.[Is11]

### 2.4.9 Résultats de simulation d'une MAS par DTC :

d'après le programme de simulation d'une machine asynchrone on obtient Les résultats dont les paramètres sont récapitulés dans l'annexe A, est simulé sous l'environnement Matlab/Simulink et la simulation est effectuée dans les conditions suivantes :

- Cem (réf) est récupéré à la sortie d'un PI,
- La valeur de référence du flux statorique est  $\Phi_s \text{ réf} = 1.2 \text{ Wb}$ .
- La bande d'hystérésis du comparateur de flux est fixée à  $\pm 0.005 \text{ Wb}$
- la bande d'hystérésis du comparateur de couple est fixée à  $\pm 0.25 \text{ N.m}$

La figure II.16 représente les performances statiques et dynamiques du contrôle direct du couple de la machine asynchrone.

Cette figure présente les résultats de simulation du système pour démarrage d'un couple de charge de 8 N.m à l'instant  $t=1 \text{ s}$  après un démarrage à vide qui nous montre :

- l'augmentation de la constante d'intégration permet d'avoir un rejet rapide de la perturbation mais aussi peut entraîner des dépassements au niveau de la réponse dynamique de vitesse.
- le couple suit correctement la valeur de la consigne et reste dans la bande d'hystérésis
- La réponse du module du flux statorique n'est pas affectée par la variation du couple de charge.
- On voit que la composante de tension  $V_s$  présente une allure sinusoïdale peu bruitée à l'instant de variation de charge et aussi les composantes en courant présentent des allures sinusoïdales bruitées qui augmentation d'amplitude des ondulations légèrement à l'instant  $t=1 \text{ s}$  suit à l'application du couple de charge.
- La tension de bus reste toujours constante, quelque soit les variations des autres paramètres.

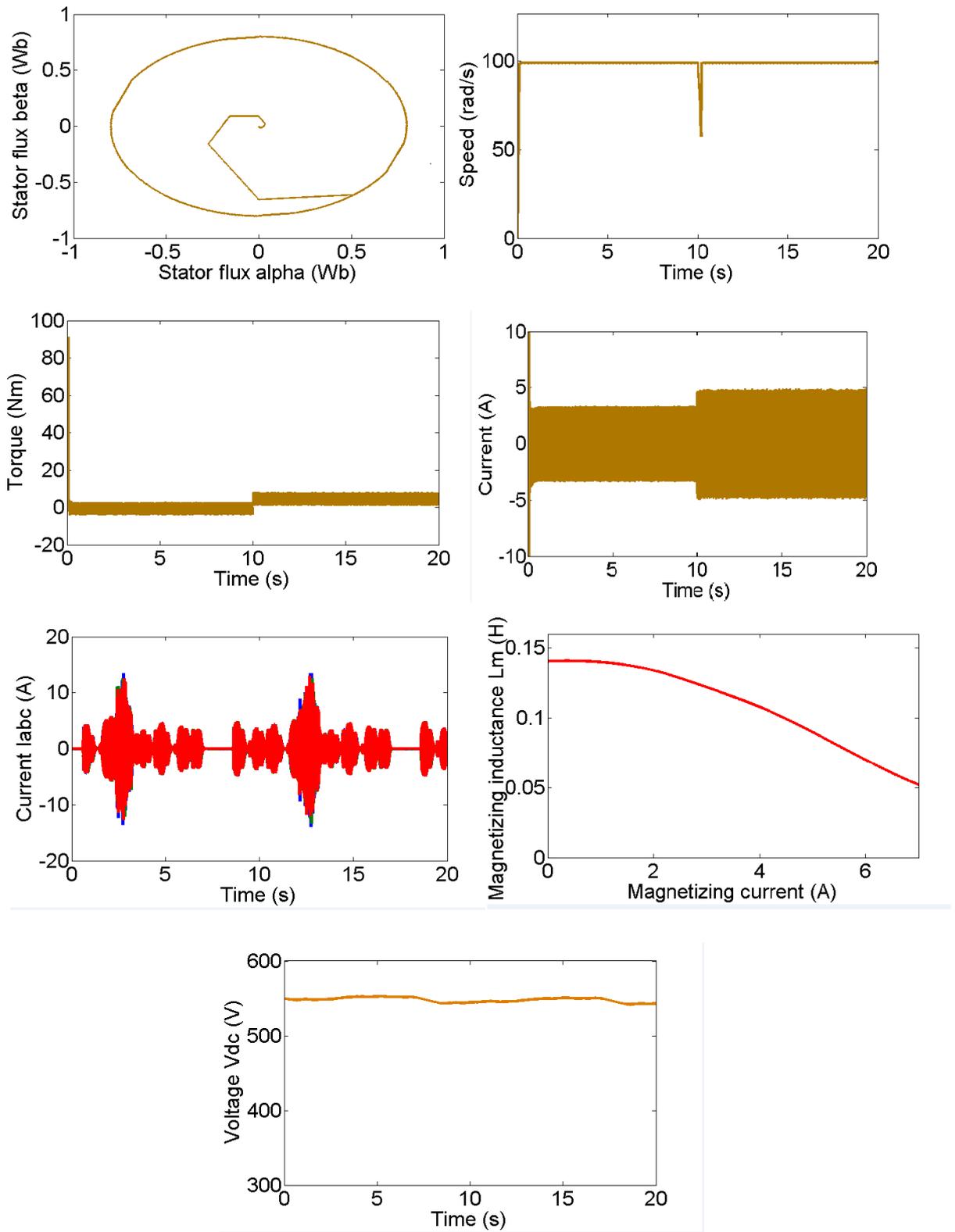


FIGURE II.16: Réponses du système.

On conclut d'après le test que la vitesse et le flux sont insensibles aux variations de la charge, couple présente des oscillations au démarrage et aussi le courant présente des forte oscillations au démarrage.

### 2.5 Résultats de simulation de l'aérogénérateur :

la Figure II.17 représente les résultats de simulation d'un profil aléatoire du vent et ce profil est imposé comme une entrée du système et il est constitué d'une composante oscillante variant autour d'une composante moyenne de 9 m/s et cette simulation décrivant les performances du système.

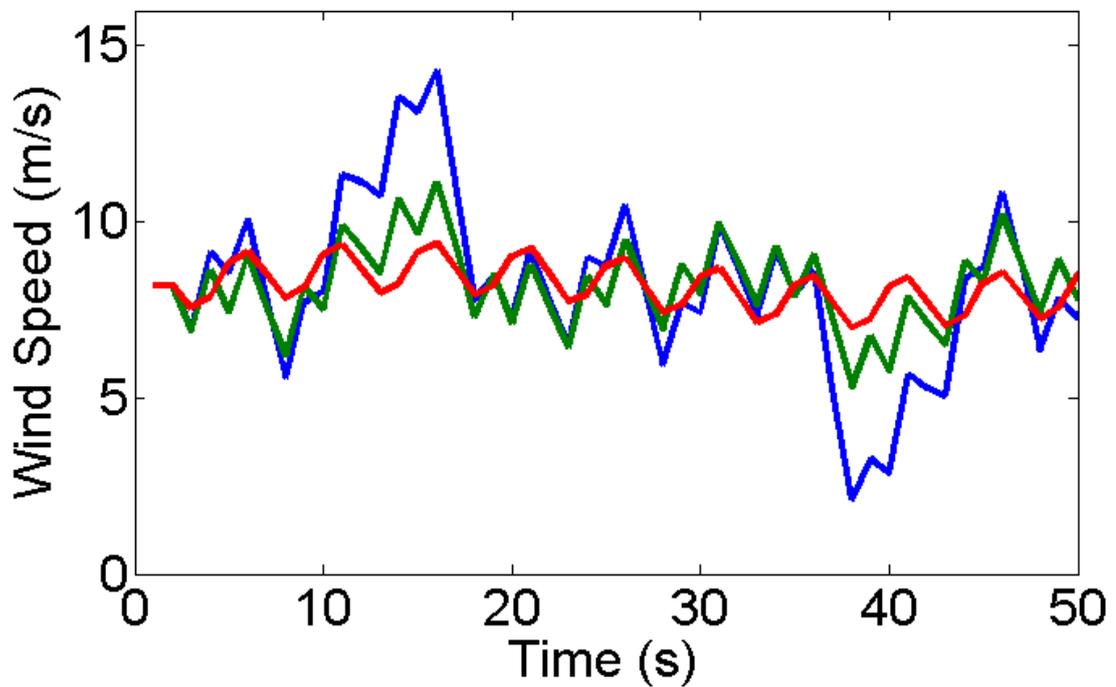


FIGURE II.17 : Profil de vent applique a la turbine

La figure II.18 représente le coefficient de puissance  $c_p$  qui est dépend de la caractéristique de la turbine.

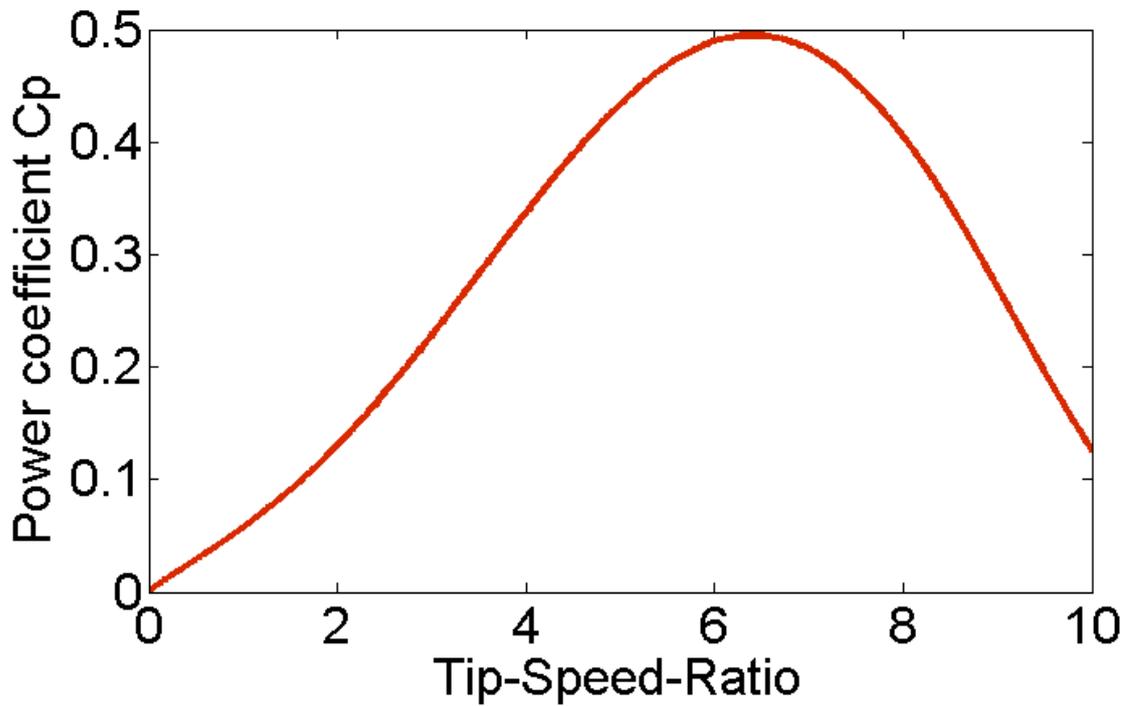


FIGURE II.18: Coefficient de puissance de l'éolienne en fonction du  $\lambda$ .

La figure II.19 représente la puissance aérodynamique, comme fonction de la vitesse de rotation.

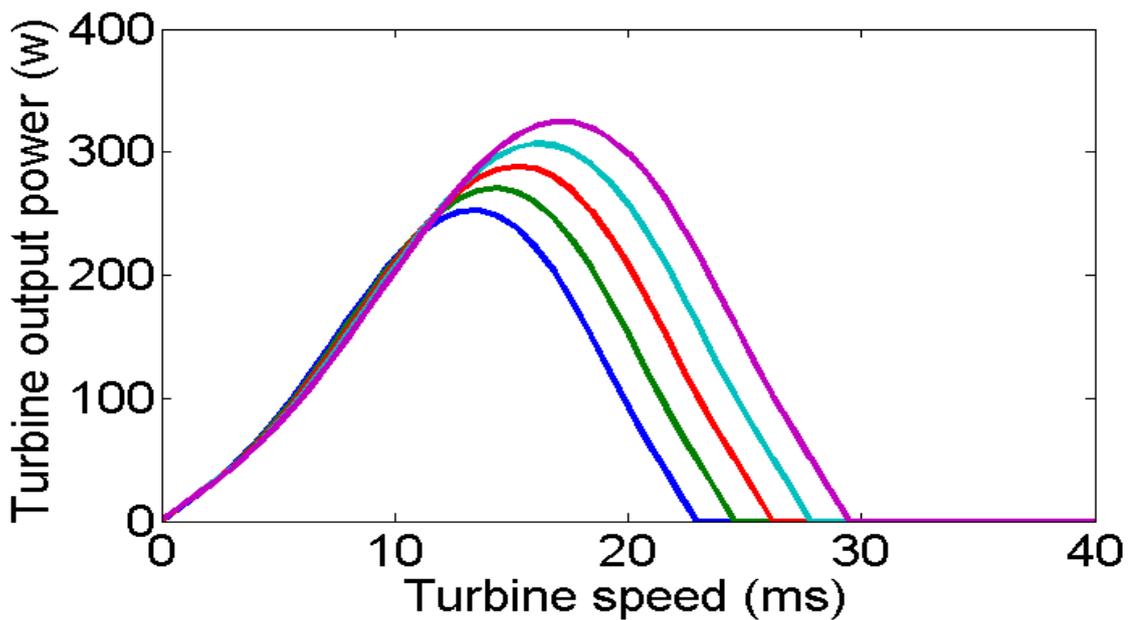


FIGURE II.19 la puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation

## 2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation et la simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK de système qui contient des différents composants de deux parties essentielles du système de conversion d'énergie éolienne

La première partie représente la partie mécanique qui constitue par la turbine et l'arbre de la génératrice. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons établi un modèle mathématique de la génératrice asynchrone et les convertisseurs (onduleur, redresseur), bus continu.

Ainsi les performances et la robustesse des stratégies de commande des différentes parties de ce système qui sont discutés et commentés.

.

## **Chapitre 3**

# **Réalisation et résultats pratique de l'éolienne**

### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les composants qui ont été utilisés pour la conception de la turbine éolienne et présenter les étapes de réalisation du projet et les résultats obtenus de l'essai pratique de cette turbine éolienne à axe verticale.

### 3.2 La forme de la turbine éolienne à axe verticale réalisée :



**FIGURE III.20 ::** Structure de la turbine éolienne à axe verticale



**FIGURE III.21 ::** Turbine éolienne à axe verticale en marche

### 3.3 Matériel utilisé :

Pour la réalisation de la turbine on a utilisé le matériel suivant :

- ❖ Un support : Quatre barres rectangulaires creuses en acier
- ❖ Les pales en acier
- ❖ Un alternateur
- ❖ Une courroie
- ❖ Une Poulie
- ❖ Arbre
- ❖ Multiplicateur de vitesse
- ❖ Placs en bois avec une forme ronde
- ❖ des roulements
- ❖ Des appareils de mesures :

-Une balance électronique : est une balance avec un support qui porte les masses à peser, et contient un moniteur avec une précision de 1/1000.

-Un Tachymètre: Un dispositif pour mesurer le nombre de tours.

-Un Soufflerie: C'est le dispositif du canal d'air où il peut changer les vitesses.

-Anémomètre: Un appareil pour mesurer la vitesse du vent avec la capacité de mesurer la température.

- Un différentielle de Pression: Cette instrument est utilisé pour mesurer la différence de pression entre deux point donné. On peut aussi enregistrer la pression placée sur les bords de l'entrée et de la sortie de l'éolienne.

### 3.4 Résultats de la réalisation pratique

Pour avoir des bons résultats d'essais de la turbine éolienne pour des différent nombre de palle, on a utilisé le dimensionnement suivant :

$$R=60 \text{ cm}=0,6\text{m}$$

$$S= \pi R^2=1,13$$

$$\rho = 1,22 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Avec :

R : Rayon de l'éolienne

S: Surface circulaire balayée par la turbine

$\Omega$  : La vitesse de la turbine

$\rho$ : Densité de l'air

- ❖ Pour calculer la puissance de vent on utilise l'équation suivant :

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

- ❖ On a utilisé l'équation suivant pour trouvé la puissance éolienne :

$$P_{eol} = \Delta_p \cdot S \cdot \Omega$$

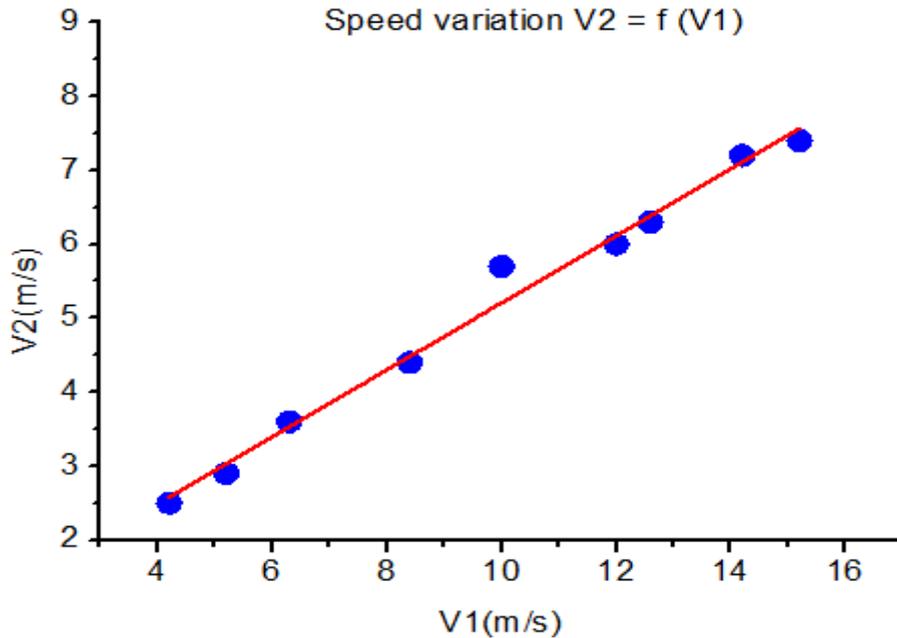
- ❖ On a appliqué la relation suivante pour trouver le facteur de vitesse :

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

❖ On a utilisé la relation suivante pour calculer le couple éolienne :

$$C_{\text{eol}} = \frac{P_{\text{eol}}}{\Omega_{\text{turbine}}}$$

### 3.4.1 Interprétation des résultats :



**FIGURE III.22 ::** La variation de la vitesse du vent

Les figures précédentes montrent l'évolution de la vitesse de sortie (V2) en fonction de la vitesse d'entrée (V1) et elle forme une fonction linéaire toujours croissante.

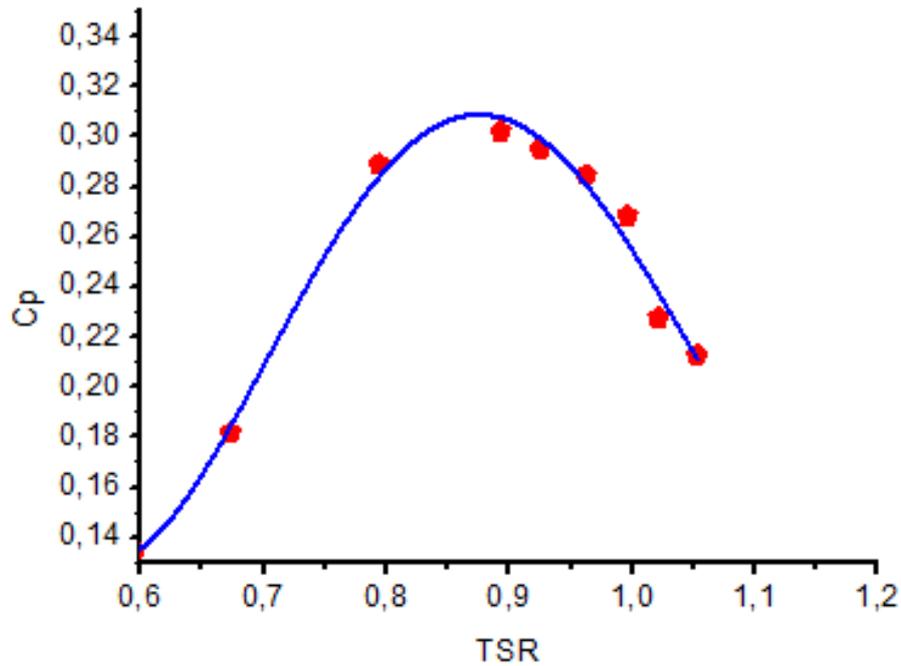


FIGURE III.23 : La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne ( Expérimentale)

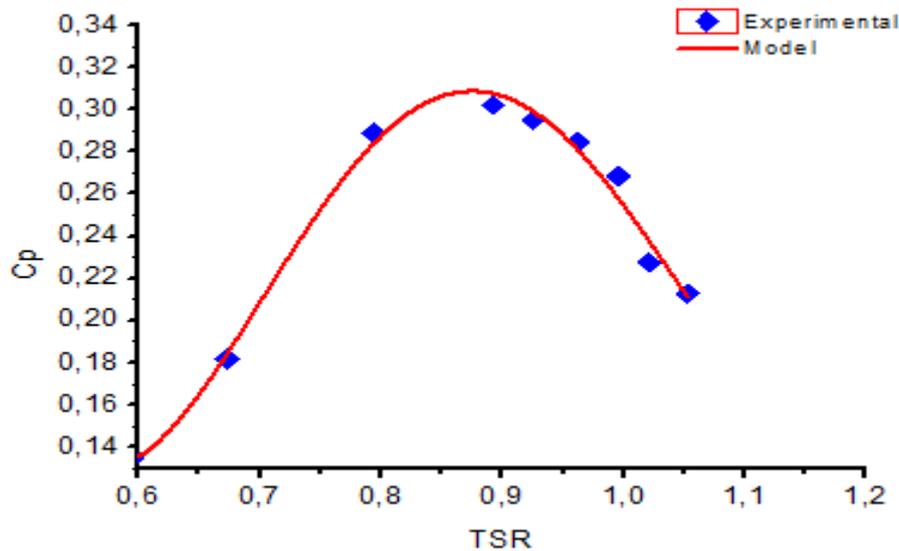


FIGURE III.24: La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne( Expérimentale et Modèle de prédiction)

La FIGURE III.23 et FIGURE III.24 représente un model Expérimentale et de prédiction de la variation du Coefficient de puissance de l'éolienne en fonctionne de la vitesse réduite au bout des pales  $C_p(\lambda)$  et nous remarquons que il ya une compatibilité entre ces deux model et on vois que il existe une valeur optimale  $\lambda_{opt} = 0.85$  pour laquelle le facteur de puissance est le plus élevé  $C_{pmax} = 0.31$  donc l'efficacité de la production d'énergie être plus élevée .

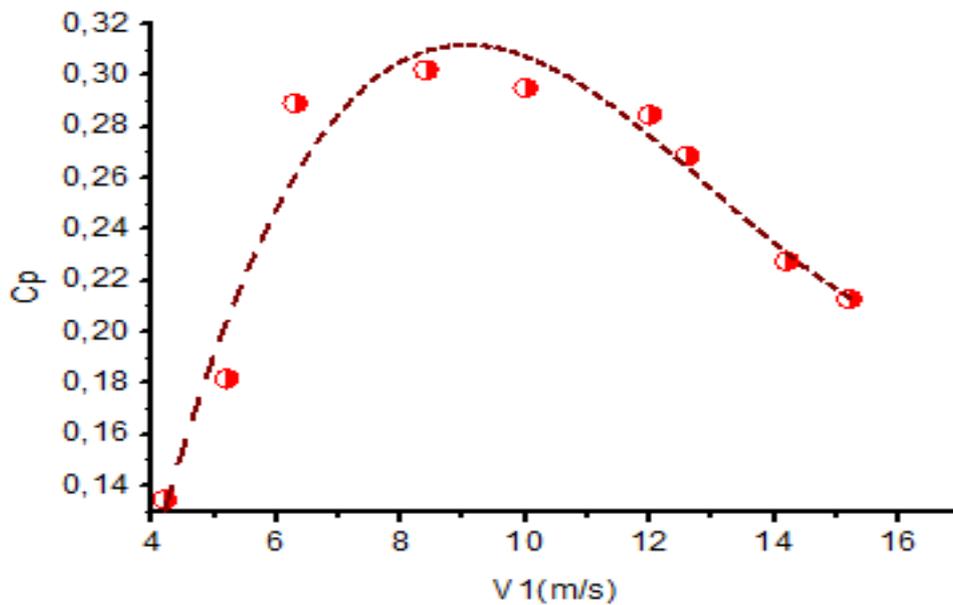
Pour optimiser la conversion de puissance et obligé d'essayer de conserver cette vitesse réduite ( $\lambda_{opt} = 0.85$ )

Equation du modèle:

$$C_p = 10,3341 - 52,95388*\lambda + 99,10238*\lambda^2 - 78,88816*\lambda^3 + 22,66016*\lambda^4$$

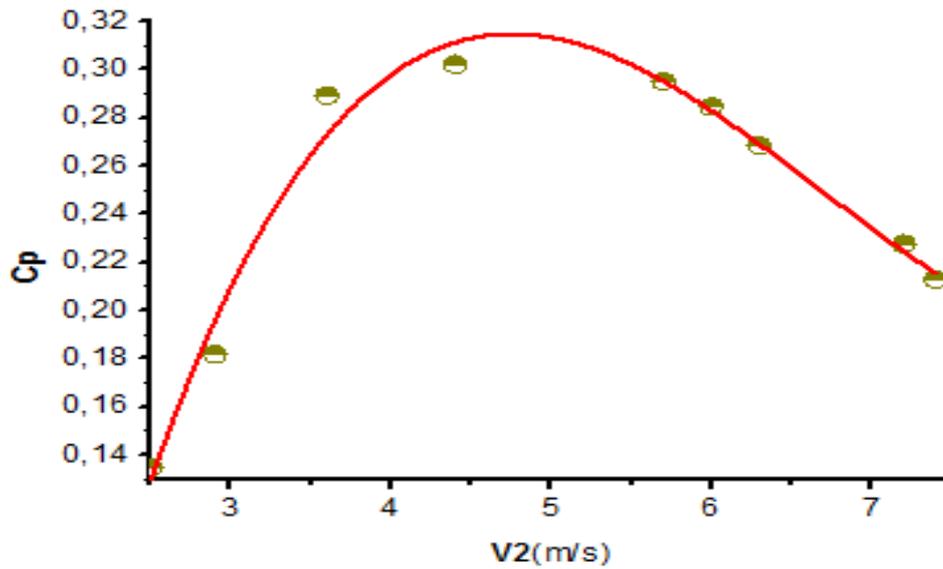
Avec:

$$R^2=0,9766$$



**FIGURE III.25 :** La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de vent

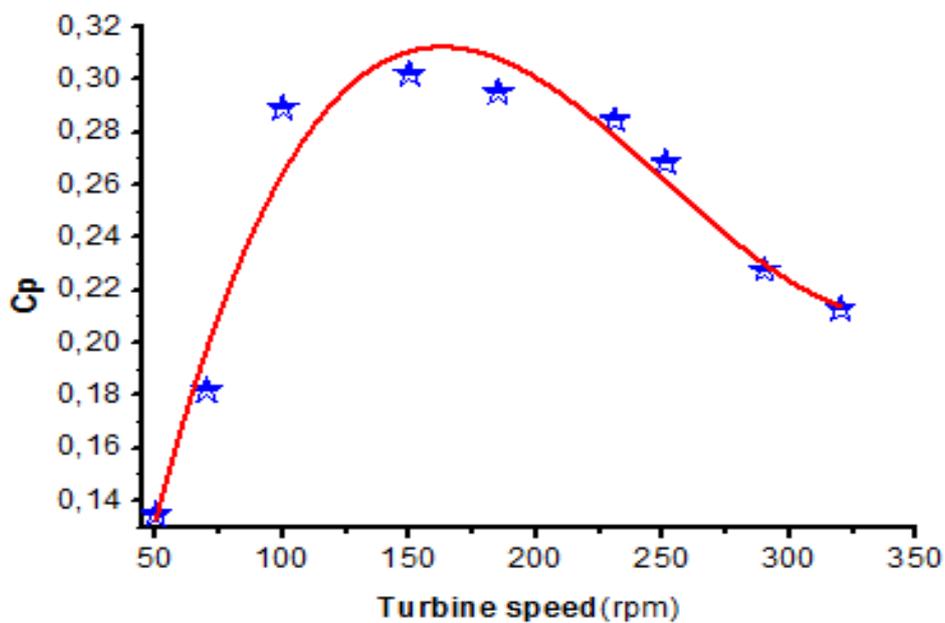
Dans la FIGURE III.25 On remarque que le coefficient de puissance augmente au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente où la valeur la plus élevée de  $C_p$  a été enregistrée à 0,31 à la vitesse de 9 m/s Ensuite, nous avons remarqué une diminution du  $C_p$ , bien que la vitesse du vent continue d'augmenter .



**FIGURE III.26 :** La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de sortie

La figure III.26 montre une croissance de  $C_p$  en fonction de la vitesse de sortie ( $V_2$ ) et la valeur la plus élevée de  $C_p$  a été enregistrée à 0,31 à la vitesse de 4.5 m/s et en vois que il ya une décroissance de  $C_p$  malgré l'augmentation de la vitesse de sortie ( $V_2$ )

- À partir des FIGURE III.25 et 26, nous concluons que la vitesse de la sortie ( $v_2$ ) est toujours moïn que la vitesse vent ( $v_1$ )



**FIGURE III.27 :** La variation du Coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de la turbine

d'après la figure III.27 on remarque dans ces essais que la valeur 175 rpm permette d'obtenir une valeur la plus élevée  $C_p$  égale 0.32 et si on augment le nombre de tour de la turbine qui signifie la vitesse de la turbine augmente en vois une décroissance de  $C_p$ .

- A partir des figures III.25 et 27, on peut dire que si la vitesse du vent était bien supérieure à la vitesse de rotation du rotor de la turbine, dans ce cas, l'énergie cinétique ne serait pas acquise de manière significative du vent, ce qui conduit à une diminution de ce facteur de puissance **cp** d'une part et d'autre part la vitesse élevée de l'éolienne par rapport au vent fait dévier la trajectoire du vent sur l'éolienne, ce qui entraîne également une diminution du facteur de puissance **cp**.

Cette information a des considérations dans la conception et dans le choix des emplacements des parcs éoliens.

### **3.5 Conclusion :**

Dans ce troisième chapitre on a montré la conception de la turbine éolienne et de tester l'éolienne et voir son comportement, nous avons procédé à plusieurs essais et interprétation des résultats obtenus

## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Dans cette mémoire on a fait la modélisation et la simulation d'une éolienne à base d'un générateur asynchrone et on a présenté les différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical que nous avons construit sous la forme (H).

On considère la vitesse du vent comme une entrée perturbatrice de ce système.

On peut contrôler la vitesse de la turbine par action sur deux entrées le couple électromagnétique de la génératrice, l'angle d'orientation de la pale.

Notons qu'à vide la vitesse du rotor est proche de la vitesse de synchronisme.

Enfin l'objectif principal de notre étude et d'intégrer la commande artificielle dans cette éolienne que nous allons construire.

## Références bibliographiques

- [Is1] Mr.AFTIS Zahir & M<sup>r</sup>ASLOUNI Youcef ,Commande non linéaire d'un système de pompage éolien, mémoire master, Université de Bejaia (2016)
- [Is2] khattara abdelouahab, Modélisation, command et gestion de l'énergie d'un générateur éolienne, mémoire master , universités de Biskra(2014)
- [Is3] Mr. SAIDI Yazid & Mr.YAHIAOUI Yahia, Etude et réalisation d'une turbine éolienne, mémoire master , Université Abderrahmane Mira-Bejaia (2014)
- [Is4] Khelfat Lotfi & Maataoui Lakhdar, Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, mémoire master , UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA (2017)
- [Is5] HERISSI Belgacem , Commande d'une Eolienne basée sur les modèles flous de Takagi-Sugeno], mémoire master ,UNIVERSITÉ LARBI TEBESSI-TÉBESSA(2015)
- [Is6] A. Guettaf, Optimisation floue-génétique d'un système de pompage éolien, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider–Biskra (2013)
- [Is7] BOUDRAHEM Lyes & DJOUADI Lamine ,Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque , mémoire master , Université de Bejaia (2011)
- [Is8] Amal Resfa , Étude d'un système de pompage photovoltaïque, mémoire master ,Université Tlemcen(2016)
- [Is11] Messai Med Ibrahim & Redouani Med Mokhtar, Contrôle Direct du Couple d'une Machine Asynchrone, Université , d'EL-Oued (2013)
- [Is12] AKKOUCHI KAMEL, Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone, UNIVERSITE de ANNABA(2007)
- [Is13] ABDELKRIM Hamza & ELGHARBI Kamel , Commande Directe du Couple DTC-SVM d'une Machine Asynchrone(MAS), UNIVERSITE de M'SILA (2016)
- [Is14] M. Abd elkebir & N. Merzoug , contrôle direct de couple d'une machine a induction , mémoire d'ingénieur ,université de Msila( 2005)
- [Is15] B. Messaoudi , Utilisation du contrôle direct du flux statorique et du filtre de kalman envue du contrôle direct du couple d'un moteur asynchrone , thèse de magister d'électrotechnique, université de Biskra (2007)
- [Is16] Filiere-Eolienne-juillet2019
- [Is17]- معوقات استخدام الطاقة المتجددة في الجزائر وسبل تطويرها (مقاربة تحليلية – استشرافي) - مجلة الحقيقة - جامعة احمد دراية ادراة - العدد 30- د بلال بوجمعة، أ.خيرجة
- [Is18]<https://www.archiexpo.fr/prod/ningbo-feng-shen-fengdian/product-62398-1587803.html>
- [Is19]<http://tpe-si-2011.e-monsite.com/pages/l-energie-eolienne/les-differents-types-d-eoliennes.html>
- [Is20] sadam , thèse de magister , université de Biskra(2015)

## ANNEXE

Paramètres de la chaîne de conversion éolienne

Tab.B. Paramètre de la turbine éolienne

Paramètre	Valeur numérique
Rayon de la turbine $R$	0.6 m
Masse volumique de l'air $\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Vitesse relative optimale $\lambda_{opt}$	0.85
Coefficient de puissance maximale $C_{pmax}$	0.31

## المُلخَص:

الطاقة المتجددة هي البديل الأمثل للطاقة النووية و الطاقات الاحفورية هذا مادفع الكثير من الدول على استخدامها ومن بين هته الدول الجزائر بالرغم من انها لم تستخدم بعد على نطاق واسع حيث لا يزال هناك عدد من المعوقات والعقبات التي تحول دون التوسع في الاستخدام ، بما في ذلك ارتفاع التكلفة. وبعبارها حديثة الاستخدام لا تزال غير قادر على المنافسة تجاريا لذلك تهدف هذه الدراسة إلى إيجاد طرق لتطوير استخدام الطاقات المتجددة في الجزائر و بالتحديد طاقة الرياح بعبارها محور دراستنا. الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة ، الطاقة الشمسية ، طاقة الرياح ،الجزائر.

## Résumé:

*L'énergie renouvelable est la meilleure alternative à l'énergie nucléaire et aux énergies fossiles. Cela a incité de nombreux pays à l'utiliser. Parmi ces pays se trouve l'Algérie, même si elle n'a pas encore été utilisée à grande échelle, car il existe encore un certain nombre d'obstacles et d'obstacles qui empêchent l'expansion de l'utilisation, y compris l'augmentation le coût.*

*Comme il est nouvellement utilisé, il n'est toujours pas compétitif sur le plan commercial, cette étude vise donc à trouver des moyens de développer l'utilisation des énergies renouvelables en Algérie, en particulier l'énergie éolienne, car c'est l'objet de notre étude.*

*Mots-clés: Énergie renouvelable, énergie solaire, énergie éolienne ,l'Algérie.*

