

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

UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR FACULTE DES SCIENCES ET  
DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DES SCIENCES  
TECHNOLOGIES



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME

DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIE R  
ENOUVELABLE

## Thème

**Modélisation et présentation d'un générateur  
synchrone à aimant permanent dédiée à la production  
de l'énergie éolienne.**

Soutenu:

Présenté par :

Rahmouni Khadidja- Hanan  
Rabhi Afaf

Encadré par : Dr. Harrouz Abdelkader

Université Adrar

Président : Mr. Hadjadj Kacim

Université Adrar

Examineur : Dr. Ibrahim Yaichi

Université Adrar

2019-2020



.....السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

## Résumé

Parmi des différentes énergies renouvelables, l'éolien connaît un essor particulièrement important depuis plus de 30 ans. Dans ce mémoire nous abordant le potentiel national de l'énergie éolienne et les différentes structures utilisé dans le système éolien ; notre étude est basée sur une Génératrice Synchrone à Aimant Permanent (PMSG) débitant dans la charge. Pour cela, nous présentons la modélisation de la machine synchrone, ainsi que toutes les composants de système éolien. Les simulations sur Matlab-Simulink, présentées en fin de mémoire.

Mots clés : (PMSG) ; charge ; turbine ; Matlab-Simulink

			تلخيص
30	الرياح	شهدت	بين
الرياح	الرياح والهياكل	الوطنية	هذه
	للهذا .	مغناطيسي (PMSG) يتم تفريغته	
Matlab-Simulink	الرياح.	جميع	نهاية
	سيمولينك	: الرئيسية (PMSG)	

## Summary

Among the various renewable energies, wind power has experienced particularly significant growth for more than 30 years. In this dissertation we discuss the national potential of wind energy and the different structures used in the wind system; our study is based on a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) discharging into the load. For this, we present the modeling of the synchronous machine, as well as all the components of a wind power system. Simulations on Matlab-Simulink, presented at the end of the thesis.

**Keywords:** (PMSG); charge ; turbine; Matlab-Simulink

# Dédicaces

*Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de finir ce modeste travail.*

*C'est par un vif plaisir que je dédie ce modeste travail conçu comme fruit  
prés requis à:*

*A celle qui ma donnée la vie, qui ma bercée mes nuits, celle qui ma vécue  
qu'un jour réussir, ma très chère mère ; que dieu la protège.*

*A l'âme sainte de mon père Que Dieu le tout puissant*

*accueille votre âme en son vaste paradis.*

*A mes très chères sœurs et mes frères..*

*A toute la famille RAHMOUNI et RABHI.*

*A tous mes collègues de la promotion de 2019/2020. À tous les  
professeurs et enseignants qui ont collaboré à mon formation depuis  
mon premier cycle d'étude jusqu'à la fin de cycle universitaire.*

# Remerciements

*Au terme de ce modeste travail, Nous tenons pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet. à remercier en premier notre DIEU tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience, la fois et la volonté pour pouvoir continuer et réaliser ce travail.*

*Nous remercions vivement notre promoteur Dr-HAROUZE ABDELKADER, pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour ses conseils précieux et*

*Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire. Sans omettre bien sur de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du présent travail.*

**Chapitre I :**

<b>Figure I.1 :</b>	Production mondiale d'électricité renouvelable par région .....	2
<b>Figure I.2 :</b>	centrale solaires thermique .....	3
<b>Figure I.3 :</b>	Le principe d'énergie géothermique.....	4
<b>Figure I.4 :</b>	La production d'énergie par la biomasse .....	5
<b>Figure I.5 :</b>	Centrale hydraulique.....	5
<b>Figure I.6 :</b>	La production d'énergie par des cellules photovoltaïques .....	6
<b>Figure I.7 :</b>	Puissance éolienne installée annuelle dans le monde en 2019 (en MW).....	7
<b>Figure I.8 :</b>	Présente la carte des vents en Algérie .....	10
<b>Figure I.9 :</b>	1 <sup>er</sup> ferme éolienne d'Adrar .....	11
<b>Figure I.10 :</b>	Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	12
<b>Figure I.11 :</b>	Principaux organes du système de conversion éolien.....	12
<b>Figure I.12 :</b>	Principe composants d'une éolienne.....	14
<b>Figure I.13 :</b>	Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	16
<b>Figure I.14 :</b>	Eolienne a axe vertical.....	17
<b>Figure I.15 :</b>	Eolienne à axe horizontal.....	18
<b>Figure I.16:</b>	Différentes structure d'éoliennes à axe horizontal.....	19
<b>Figure I.17:</b>	Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.....	20
<b>Figure I.18:</b>	Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné.....	21
<b>Figure I.19:</b>	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe).....	22
<b>Figure I.20:</b>	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	22
<b>Figure I.21:</b>	Machine asynchrone à doubl stator.....	23
<b>Figure I.22:</b>	Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation.....	23

**Chapitre II :**

<b>Figure II.1 :</b>	Circuit magnétique associé à un aimant .....	26
<b>Figure II.2 :</b>	machine synchrone à aimant .....	26
<b>Figure II.3 :</b>	cycle d'hystéresi .....	27
<b>Figure II.4 :</b>	Illustration d'une courbe B-H des aimants .....	28
<b>Figure II.5 :</b>	Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants .....	29
<b>Figure II.6 :</b>	Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques .....	30
<b>Figure II.7 :</b>	Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent .....	30
<b>Figure II.8 :</b>	Rotor avec pièces polaires.....	32

**Chapitre III**

<b>Figure III.1 :</b>	Structure du générateur éolien étudié .....	38
<b>Figure III.2 :</b>	Vitesse de vent sous Matlab /Simulink.....	39
<b>Figure III.3 :</b>	La vitesse du vent en fonction de temps .....	39
<b>Figure III.4 :</b>	Voilure à axe vertical de type Savonius. ....	40
<b>Figure III.5 :</b>	Courbe caractéristique retenue pour les essais.....	41
<b>Figure III.6 :</b>	Modèle du couple éolien sous Simulink.....	41
<b>Figure III.7 :</b>	La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation .....	42
<b>Figure III.8 :</b>	Modèle du couple de la turbine éolienne.....	43
<b>Figure III.9 :</b>	Schéma bloc de la turbine éolienne .....	43
<b>Figure III.10 :</b>	Schéma de simulation du générateur synchrone .....	46
<b>Figure III.11 :</b>	Structure du bloc « gen_synchron ».....	47
<b>Figure III.12 :</b>	Structure du bloc « Charge »... ..	48
<b>Figure III.13 :</b>	Tensions instantanées des phases.....	49
<b>Figure III.14 :</b>	Courants instantanées des phases.....	49
<b>Figure III.15 :</b>	Variations du couple éolien et Variations de la vitesse sur l'arbre.....	50
<b>Figure III.16 :</b>	Variations du couple électromagnétique.....	50
<b>Figure III.17 :</b>	Variations du facteur de puissance.....	50

## INDEX DES NOTATIONS

MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents
$V$	Vitesse du vent en m/s
$V_1$	Vitesse du vent avant le convertisseur
$V_2$	Vitesse du vent après le convertisseur
$V_m$	La vitesse moyenne du vent.
$P_m$	puissance instantanée du vent
	la masse volumique de l'air
$A$	La surface balayée par la turbine
$R$	le rayon de la voilure
$H$	Hauteur
	La vitesse spécifique
$C_p$	Le coefficient de puissance de l'éolienne
$\omega$	la vitesse angulaire de rotation des pales en rad/s.
$C_e$	Le couple éolien
$J$	le moment total d'inertie
$C_f$	le couple de frottement
$C_{em}$	couple électromagnétique développé par le générateur
$F$	le coefficient de frottement visqueux dans la machine en N.m.
$J_{gen}$	L'inertie de la génératrice
$J_t$	L'inertie de la turbine
$I$	Courant
$a_k$	Amplitude des harmoniques
$\omega_k$	Fréquence des harmoniques
$U_{s(abc)}$	tensions des phases statoriques
$(d, q)$	Indice du repère de Park lié au rotor
$L_q$	Inductance statorique quadratique
$(v_{sd}, v_{sq})$	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park



$i_s (abc)$	courants des phases statoriques
$\vec{\psi}$	Vecteurs flux statoriques des phases a,b et c
	C'est la valeur crête du flux crée par l'aimants rmanentspe à travers les enroulements statorique.
$p(\ )$	Transformation de Park
$I_{dq}$	Courant statoriques sur les axes d et q
$U_{dq}$	Tension statoriques sur les axes d et q
$C$	la composante homopolaire, direct et quadrature.
$P$	Le nombre de paires de pôles
$R_s$	la résistance statorique.
$L_{dq}$	l'inductance statorique sur les axes d et q
$K_t$	le coefficient du couple.
$\omega, TSR$	Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio
	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)
$\varphi_e$	le flux d'excitations produit par les aimants
	l'angle entre un axe de référence du stator et un axe du pole nord du rotor
$L_{ch}, R_{ch}$	Paramètres de charge
$e$	le couple active développé par l'éolienne
	Vitesse de rotation mécanique du rotor
$\omega_t$	Vitesse de la turbine
$\omega$	Vitesse angulaire en rad/s

## Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Résumé	
Introduction générale.....	1

### Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables

I.1	
Introduction:.....	<b>Erre</b>
<b>ur ! Signet non défini.</b>	
I.2 Notions et principe sur les énergies renouvelables : .....	2
I.3 Génération d'énergie renouvelable .....	3
I.3.1 Génération de la chaleur .....	3
I.3.1.1 Thermo solaire .....	3
I.3.1.2 Géothermie.....	4
I.3.1.3 Biomasse .....	4
I.3.2 Génération d'électricité.....	5
I.3.2.1 Hydraulique : .....	5
I.3.2.2 Photovoltaïque .....	6
I.3.2.3 L'Eolien : .....	6
I.4 Production éolienne : .....	7
I.5 Données Chiffrées sur l'éolien : .....	7
I.6 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne: .....	7
I.7 Statistique de production de l'éolienne : .....	8
I.7.1 Production de l'éolienne dans le monde : .....	8
I.7.2 L'éolienne en Algérie : .....	9
I.7.2.1 Ferme éolienne d'Adrar : .....	11
I.8 Définition de l'énergie éolienne: .....	11
I.9 principaux composants d'une éolienne : .....	13
I.9.1 Le mât : .....	13
I.9.2 La nacelle : .....	13
I.9.3 Le rotor : .....	14

I.9.3.1 Les rotors à vitesse fixe :	14
I.9.3.2 Les rotors à vitesse variable :	14
I.10 Constitution d'une éolienne :	15
I.10.1 Principe de fonctionnement :	15
I.11 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	16
I.11.1 Avantages :	16
I.11.2 Inconvénients :	16
I.12 les différents types des turbines éoliennes :	17
I.12.1 Les éoliennes à axe verticale :	17
I.12.1.1 les Avantages de la structure à axe vertical :	17
I.12.1.2 les Inconvénients de la structure à axe vertical :	17
I.12.2 Les éoliennes à axe horizontale :	18
I.12.2.1 Structure en Amont :	19
I.12.2.2 Structure en Aval :	19
I.12.2.3 Avantages :	19
I.13 Types des machines électriques dans les systèmes éoliennes :	20
I.13.1 Systèmes utilisant la machine synchrone :	20
I.13.1.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents :	20
I.13.1.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné :	21
I.13.2 Les systèmes éoliens utilisant la machine asynchrone :	21
I.13.2.1 Génératrices asynchrones à cage :	21
I.13.2.2 Machine asynchrone à double stator :	22
I.13.2.3 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA) :	23
I.14 Conclusion :	23

## **Chapitre II: Présentation de la générateur synchrone a aimant permanent**

II.1 Introduction	25
II.2 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents	26
II.2.1 Aimants permanents	26
II.2.1.2 Caractéristiques générales des aimants permanents	27
II.2.1.3 Différents types d'aimants permanents	28
II.3 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents	29
II.3.1 Principe de fonctionnement de la MSAP	31
II.3.2 Classification du rotor de MSAP	31

II.3.3 Différentes structures de machines synchrones à aimants permanent .....	33
II.3.3.1 radial (RFPM):Structures à flux.....	33
II.3.3.2 Structures à flux axial (AFPM) .....	34
II.4 Domaine d'application.....	35
II.5 Avantages des machines synchrones à aimants permanents.....	35
II.6 Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents .....	36
II.7 Couple des machines synchrones à aimants permanents .....	36
II.8 Conclusion .....	37

## **Chapitre III: Modélisation et Simulation du système éolien**

III.1 Introduction: .....	38
III.2 Modélisation du vent:.....	38
III.3 Modélisation de la turbine éolienne: .....	39
III.4 Modélisation mécanique du couplage turbine – génératrice : .....	42
III.5Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents: .....	44
III.5.1. Hypothèses simplificatrices:.....	44
III.6 La réalisation sous simulink du modèle de couple éolien: .....	44
III.7 Conclusion:.....	51

# **Introduction Générale**

### Introduction générale

Le recours systématique aux carburants fossiles, tel que le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont les plus répandus pour la production d'électricité, et permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>.

De nouvelles sources d'énergies dites « Energies renouvelables » ont émergé, c'est un groupe important de sources qui dépend directement du rayonnement énergétique du soleil. Parmi ces énergies renouvelables on peut citer le photovoltaïque, l'éolien, la géothermie, la biomasse et la marée motrice. Elles ont toutes l'immense avantage d'être naturelles, diverses, non polluantes et durables.

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique connaît un essor considérable depuis ces dernières décennies. Cela est dû d'une part, à des contraintes d'ordre environnementales mais également à une maîtrise de plus en plus grande des technologies mises en œuvre pour assurer cette conversion.

Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre, abondante et inépuisable qui peut produire l'électricité pratiquement sans l'émission de gaz polluants. Sachant que nous nous intéressons à un système de pompage éolien, nous devons nous familiariser avec tous les éléments le constituant [1].

Dans la région d'Adrar (située au sud-ouest de l'Algérie), il existe des sites isolés, où l'utilisation de cette source d'énergie abondante, est une solution économique et durable. La machine synchrone à aimants permanents est caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible et des faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la génératrice des performances élevées, un rendement important et un meilleur contrôle. Ce qui met cette machine en concurrence à la machine asynchrone [2].

L'objectif de ce mémoire de fin d'étude est de présenter un modèle global d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents. Ce modèle permet de garder la puissance produite optimale et réglable. Le modèle sera développé par logiciel MATLAB/SIMULINK.

Ce mémoire sera structuré en trois chapitres. Le premier chapitre nous présentera l'énergie éolienne d'une façon générale, nous définirons la structure et tous les éléments de la chaîne de production éolienne.

Dans le deuxième chapitre, on va présenter la machine synchrone MSAP qui sera raccordée avec la turbine éolienne.

Le dernier chapitre est consacré à la modélisation globale de la chaîne de production éolienne. Nous allons faire simulation sur MATLAB de tout l'élément qui constitue le système de production proposé.

Nous terminons ce travail par conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur les énergies renouvelables**



## I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, hydraulique, géothermique ...etc).

L'énergie éolienne est une source d'énergie 100% propre (elle est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante + 30 % par an en moyenne depuis 10 ans. [1])

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'une façon générale les énergies renouvelable et leur développement et en terminer par spécification l'énergie éolienne.

## I.2 Notions et principe sur les énergies renouvelables

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire. [1]

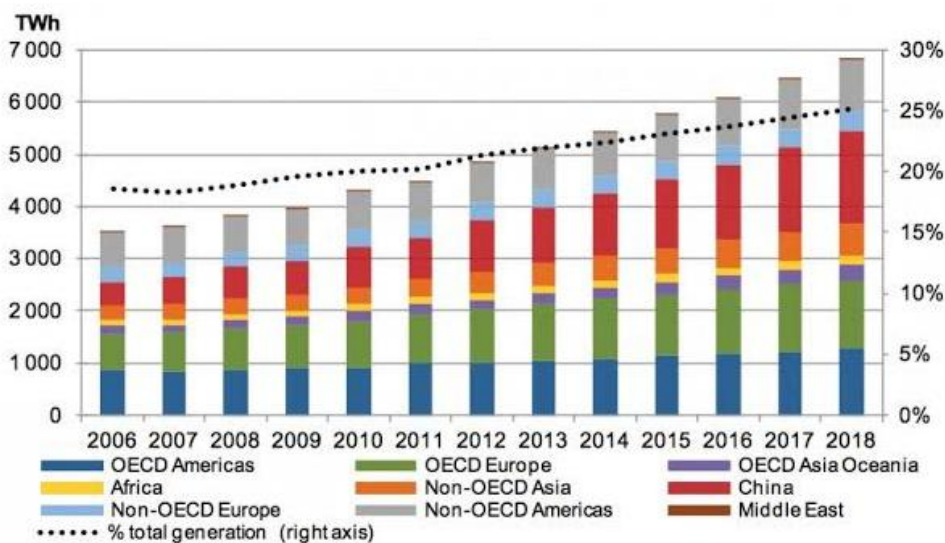


Figure I.1 Production mondiale d'électricité renouvelable par région [1].

### I.3 Génération d'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, géothermie, ..) [2].

#### I.3.1 Génération de la chaleur

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (Sources conventionnelles, sources renouvelables). Une description quelques sources renouvelables sont proposées ci-dessous.

##### I.3.1.1 Thermo solaire

L'énergie solaire thermique est une énergie renouvelable qui a pour principe de convertir en chaleur le flux solaire par le biais de capteurs solaires thermiques. Cette énergie peut être utilisée pour le chauffage, mais également pour produire l'électricité. L'énergie solaire thermique est également utilisée dans des installations solaires thermodynamiques, fours solaires, ou cheminées solaires [3].

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent [4], [5].



**Figure I.2:** centrale solaires thermique [6].

### I.3.1.2 Géothermie

L'énergie géothermie est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité [1].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer.

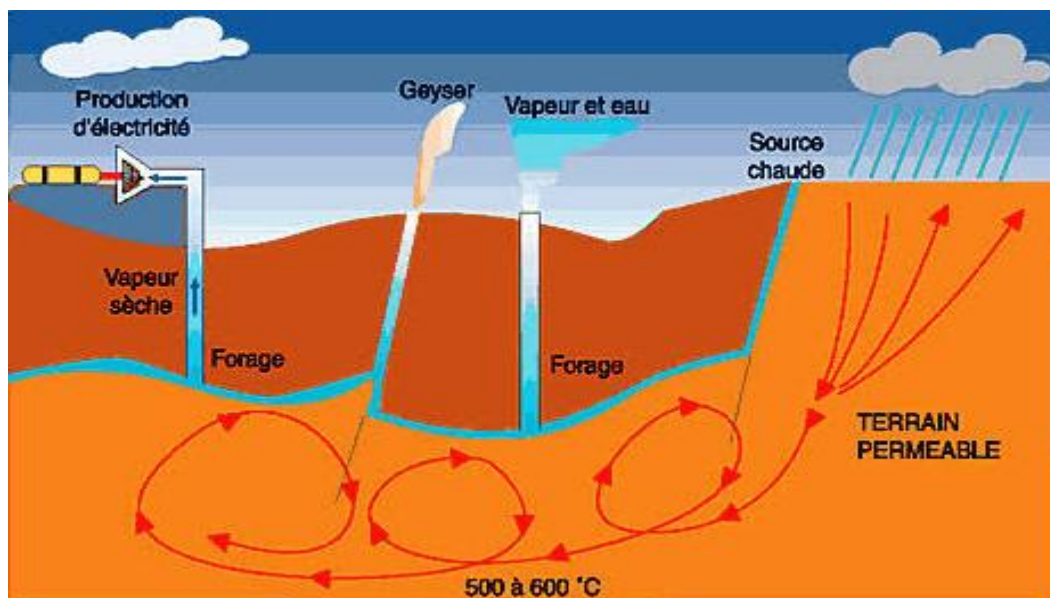
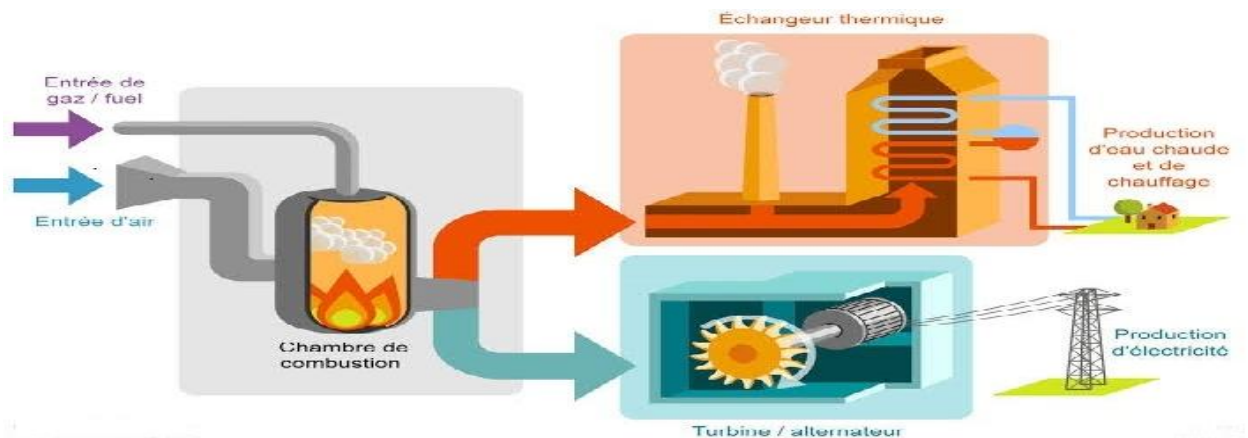


Figure I.3 : Le principe d'énergie géothermique, [6]

### I.3.1.3 Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement [7], La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1% de la production d'électricité mondiale [3]. Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. L'utilisation du biogaz

n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir.



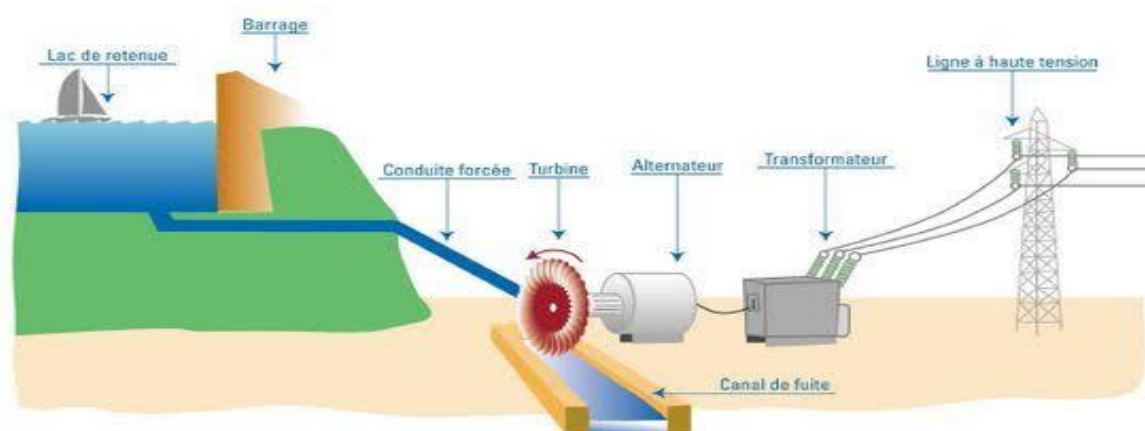
**Figure I.4 :** La production d'énergie par la biomasse [6].

### I.3.2 Génération d'électricité

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes.

#### I.3.2.1 Hydraulique :

L'eau, comme l'air, est en perpétuel mouvement. Par rapport à l'air, sa densité plus importante en fait un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et « stockable » [7].



**Figure I.5:** Centrale hydraulique [6].

### I.3.2.2 Photovoltaïque

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. L'énergie solaire photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production.

L'avantage des cellules photovoltaïques réside dans la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, et dans leur souplesse d'utilisation qui les rend utilisable notamment dans les pays en voie de développement qui ne dispose pas de réseau électrique important. Cependant, leur rendement reste faible [4].



**Figure I.6 :** La production d'énergie par des cellules photovoltaïques [6].

### I.3.2.3 L'Eolien :

L'énergie du vent ou l'énergie éolienne est le résultat des déplacements de l'air et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte.

**Direct :** Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin,

**Indirect :** Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [8].



## I.4 Production éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. [9].

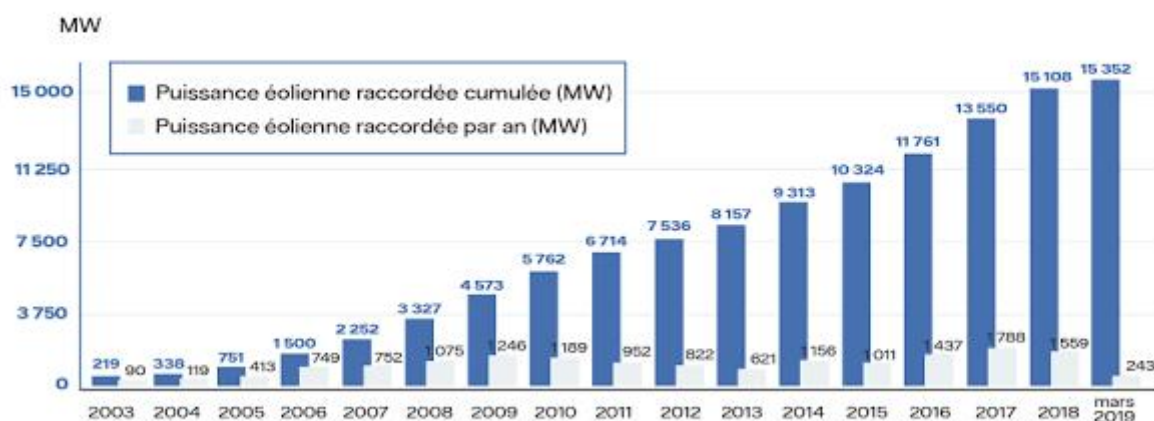
## I.5 Données Chiffrées sur l'éolien :

En 2018, 26.100 GWh éoliens ont été produit en France, soit 5,8 % de l'électricité consommée, représentant l'équivalent de la consommation électrique de plus de 8 millions de foyers (hors chauffage).

C'est la région Nord-Pas-de-Calais qui détient le record, tous chiffres confondus:434 sites totalisant une puissance de 4157 MW, pour une production de 7.019 GWh.

La région Provence-Alpes-Cote-D'azur, avec ses 17 sites et ses 48 MW, ne produit que 99 GWh.

Les trois grands pays producteurs d'énergie éolienne sont l'Allemagne, l'Espagne et le Royaume-Uni, avec respectivement 79,8 TWh, 50,16 TWh et 37,25 TWh. [10].



**Figure I.7 :** puissance éolienne installée annuelle dans le monde en 2019 (en MW). [6].

## I.6 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne:

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ),

l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable.

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

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

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

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW [11].

Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [12].

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte.

## I.7 Statistique de production de l'éolienne

### I.7.1 Production de l'éolienne dans le monde

1-En Suisse : Les 34 éoliennes installées en Suisse, totalisant 60 Mégawatts (MW) de puissance électrique, ont produit 110 millions de kilowattheures (kWh) en 2015.

La production annuelle moyenne est estimée à 108 millions de kilowattheures (kWh) C'est la consommation équivalent à 30'000 ménages suisses ou 0,2% de la consommation d'électricité totale de notre pays.

2-En Europe : Fin 2015, la production continentale de l'énergie éolienne, correspondait à environ 11,4% de la consommation d'électricité totale

- En France : On recense 10'400 MW,
- En Allemagne : 45'000 MW
- En Italie : 9'000 MW d) En Autriche : On comptait 1119 éoliennes, soit 2'400 Mégawatts de puissance installée. Ces installations ont permis de fournir 1.5 millions de ménages en électricité propre.

3-Dans le monde :

En 2015, l'énergie éolienne a couvert ~3% de la consommation d'électricité mondiale totale grâce à une puissance de 432'000 MW installé).

4- Leaders mondiaux :

Au Danemark Cette part dépasse 40 %, en Espagne et au Portugal c'est plus de 20%. La chine est une de six pays qui dominant le marché mondial de l'éolien tel que l'USA, l'Allemagne, l'Inde, l'Espagne et l'Angleterre et l'Asie semble être la plus porteuse. . La part d'éolien dans le mix électrique est très élevée dans certains %. [13]

### I.7.2 L'éolienne en Algérie

L'Algérie à l'instar des autre pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier.

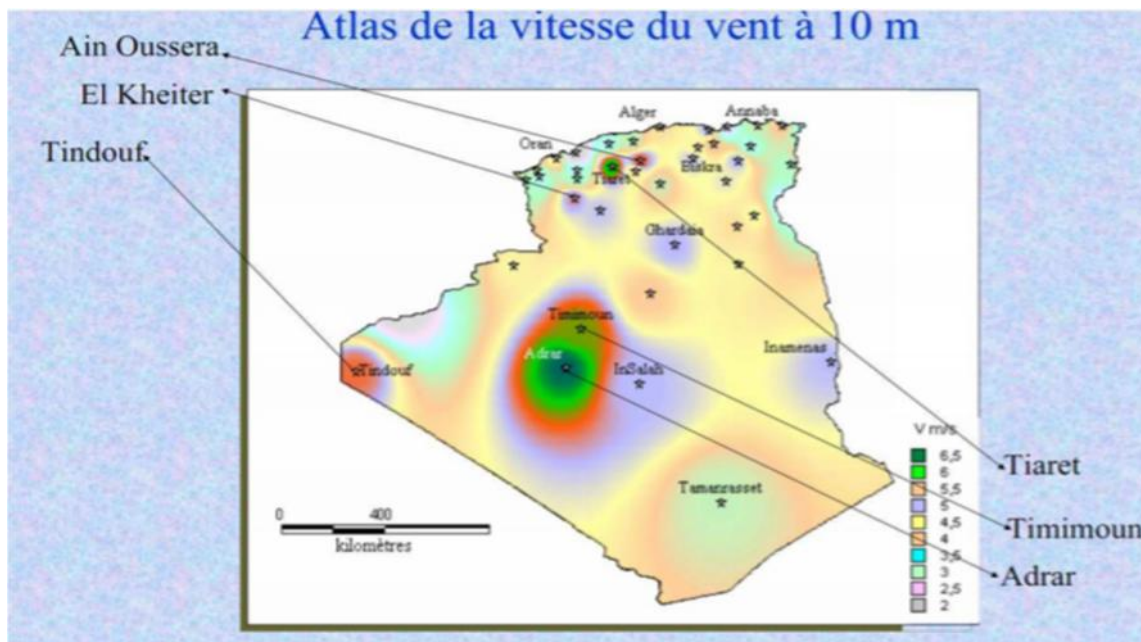
Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions



avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays. [14].

La carte représentée dans la figure (I.9) montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qui ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventée. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver.



**Figure I.8 :** présente la carte des vents en Algérie, [15].

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées pour avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Des projets de ce genre sont en phase d'étude et d'autres commencent à voir le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10MW, les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les

années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie. Ceci a permis l'identification de neuf zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes [16] :

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

### I.7.2.1 Ferme éolienne d'Adrar :



**Figure I.9 :** 1<sup>er</sup> ferme éolienne d'Adrar. [6].

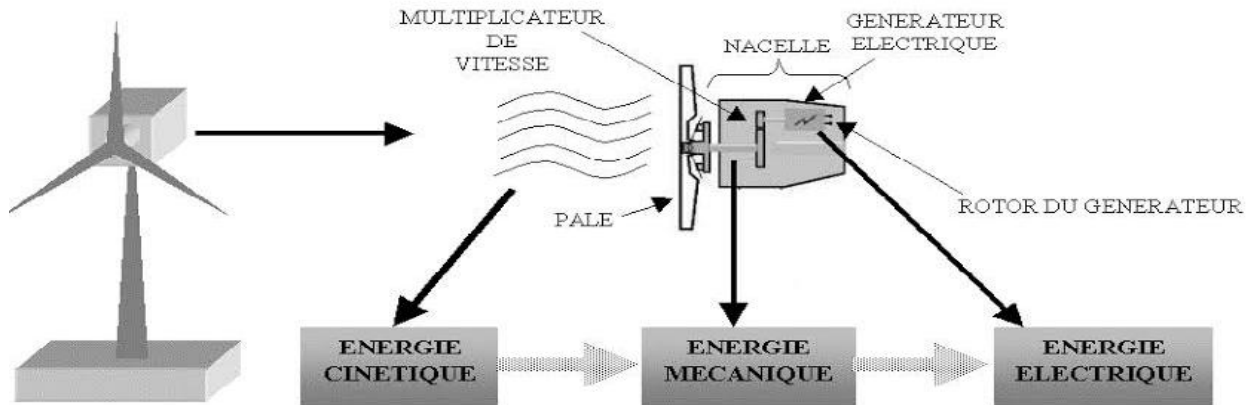
Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024 [17]. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars. [17].

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien.

En matière d'énergie renouvelables, le plan du gouvernement devrait être réalisé en trois phases. La première (2011-2013), consacrée aux études et au lancement de projets pilotes ; la seconde (2014-2015), à la réalisation des premières installations, et la troisième (2016-2020), au lancement de l'industrie à grande échelle [18]. A ce rythme, la production à grande échelle ne peut intervenir qu'après 2020.

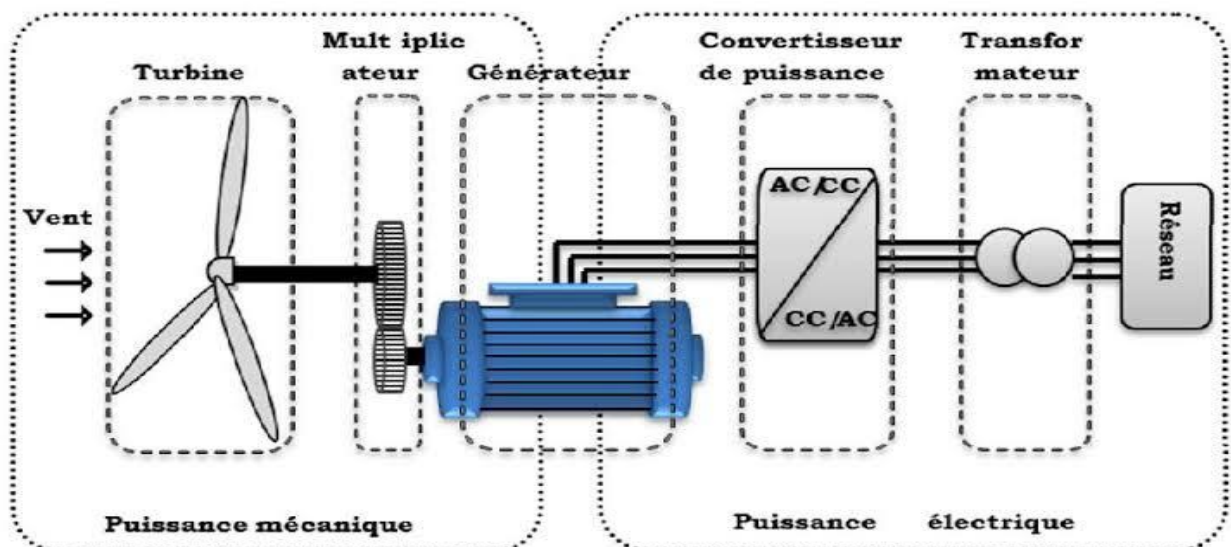
**I.8 Définition de l'énergie éolienne :**

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. [19].



**Fig. I.10 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent [6].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. [19]. Selon la Figure (I.11).



**Fig. I.11 :** Principaux organes du système de conversion éolien [6].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. 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'un générateur (Figure (I-12)), Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. [20].

L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

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

### **I.9 principaux composants d'une éolienne :**

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux [21]:

#### **I.9.1 Le mât :**

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

#### **I.9.2 La nacelle :**

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

### **I.9.3 Le rotor :**

Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées ; actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique. L'augmentation du diamètre du rotor va accroître la masse des pales.

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable. [22].

#### **I.9.3.1 Les rotors à vitesse fixe :**

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût [22].

#### **I.9.3.2 Les rotors à vitesse variable :**

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées. [22].

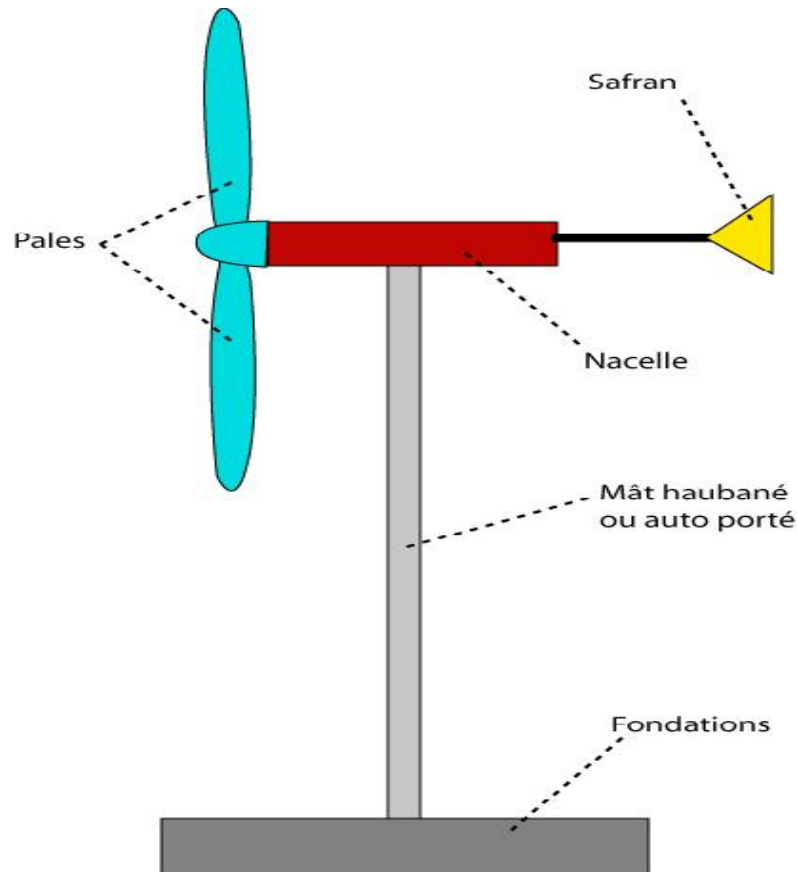


Figure I.12 : principe composants d'une éolienne.[6]

## I.10 Constitution d'une éolienne :

### I.10.1 Principe de fonctionnement :

«La fabrication d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, selon plusieurs étapes :

Transformation de l'énergie par les pales : les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion. La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur : les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur.

Production d'électricité par le générateur : l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. En tournant à grande vitesse, le générateur produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts

Traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur : l'électricité produite ne peut pas être utilisée directement. Elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée à 20 000 volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation pour être injectée sur le réseau électrique»

Le fonctionnement général est illustré par la Figure (I. 14) L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.[11].

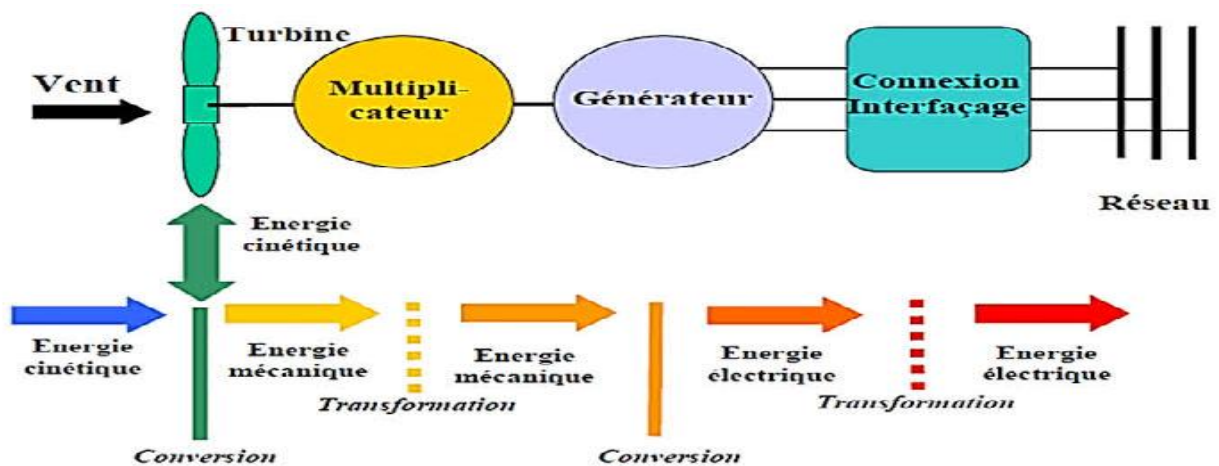


Figure I.13 : principe de la conversion de l'énergie éolienne.[6].

## I.11 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

### I.11.1 Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- 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 minimales.



### I.11.2 Inconvénients :

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe. [23].

### I.12 les différents types des turbines éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéra-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient :

- Les éoliennes à axe verticale.
- Les éoliennes à axe horizontale.[24].

#### I.12.1 Les éoliennes à axe verticale :

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. [24].



**FigureI.14** : éolienne a axe vertical. [6].



Elles présentent les avantages et les inconvénients suivants :

#### **I.12.1.1 les Avantages de la structure à axe vertical :**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

#### **I.12.1.2 les Inconvénients de la structure à axe vertical :**

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.

#### **I.12.2 Les éoliennes à axe horizontale :**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. 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 coût moins important.

Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour. [1].



**Figure I.15 :** éolienne à axe horizontal.[6].

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

Eoliennes de petite puissance : inférieur à 40 W.

Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.

Eoliennes de forte puissance : supérieur à 1 MW.

A titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

**Tableau (I-1) :** classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [22]

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1MW et plus

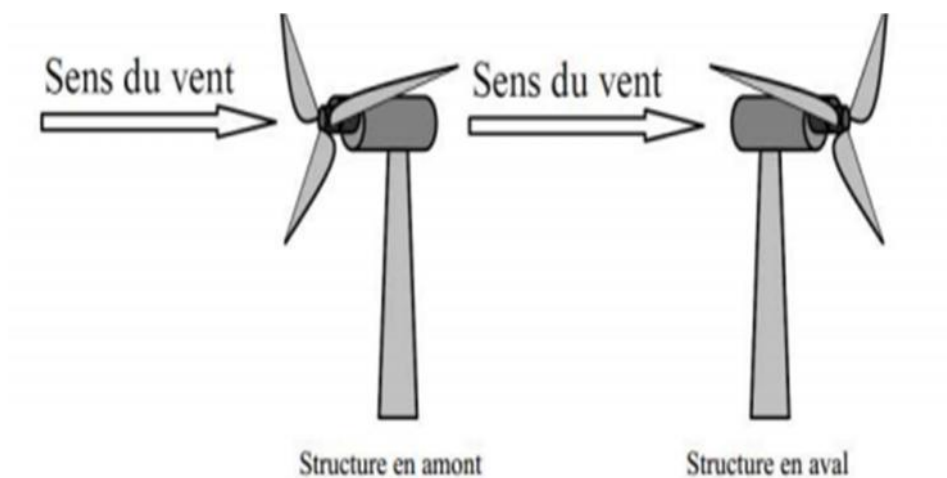
Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal :

#### I.12.2.1 Structure en Amont :

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

#### I.12.2.2 Structure en Aval :

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.



**Figure I.16 :** différentes structure d'éoliennes à axe horizontal.[25].

**I.12.2.3 Avantages :**

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du

sol.

- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.
- Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

**I.12.2.4 Inconvénient :**

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

**I.13 Types des machines électriques dans les systèmes éoliennes :**

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones [9]:

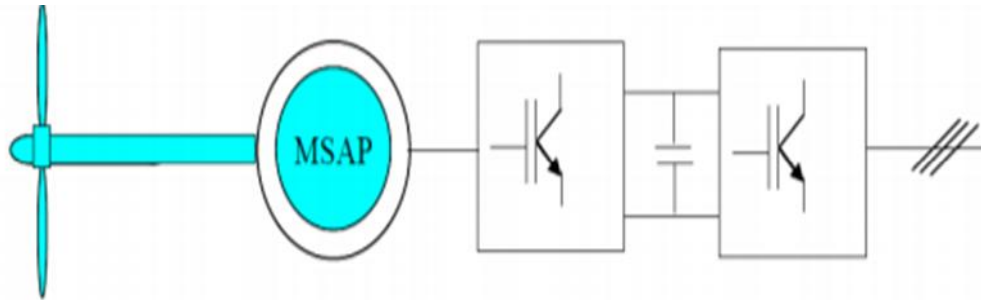
**I.13.1 Systèmes utilisant la machine synchrone :**

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente. [1].

**I.13.1.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents :**

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance,

les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif. [10].

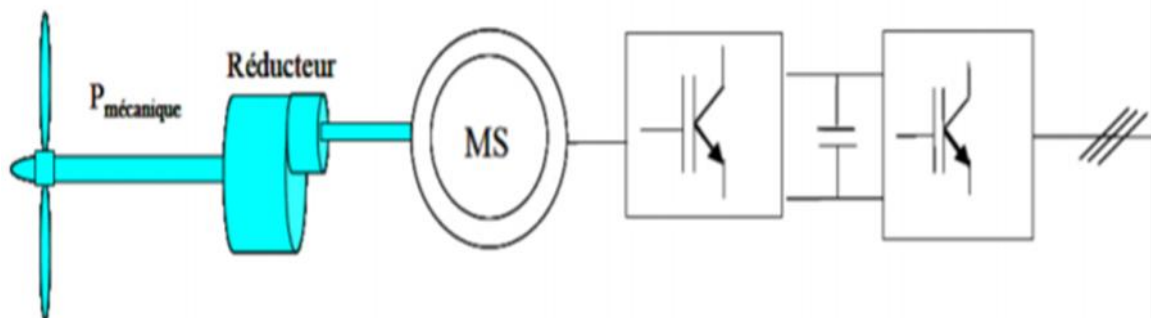


**Figure I.17:** Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.

### I.13.1.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné :

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [21].

On trouve également des machines synchrones associées à un multiplicateur de vitesse. Ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent sur un redresseur commandé, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau.



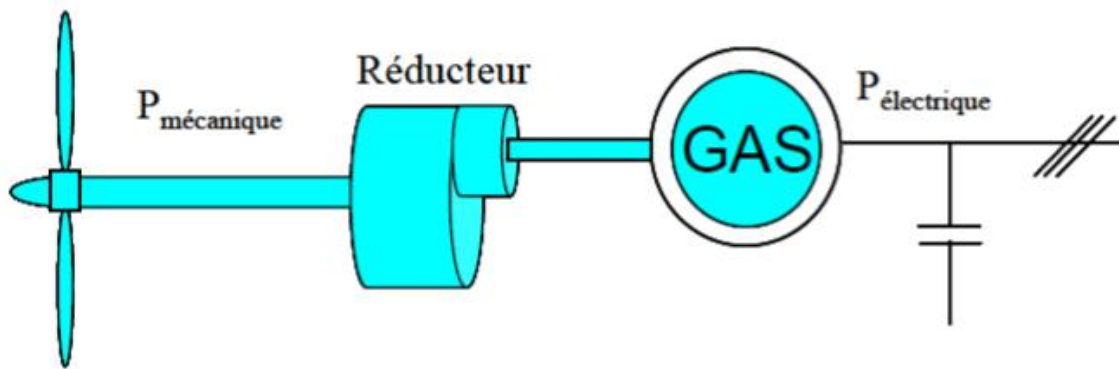
**Figure. I.18:** Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné.

### I.13.2 Les systèmes éoliens utilisant la machine asynchrone :

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

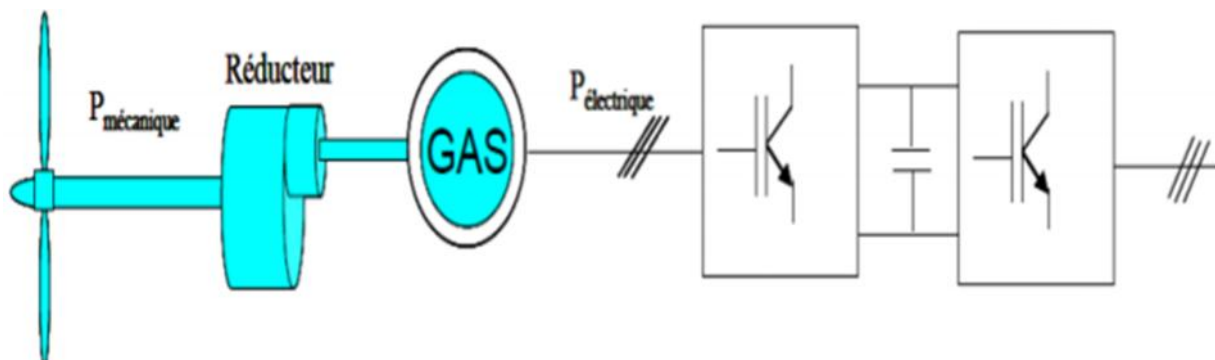
### I.13.2.1 Génératrices asynchrones à cage :

C'est dans les grandes puissances que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire [26]. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse [5].



**Figure I.19 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée. [26].



**Figure I.20 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

### I.13.2.2 Machine asynchrone à double stator :

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I.21)

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [19].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées.

La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

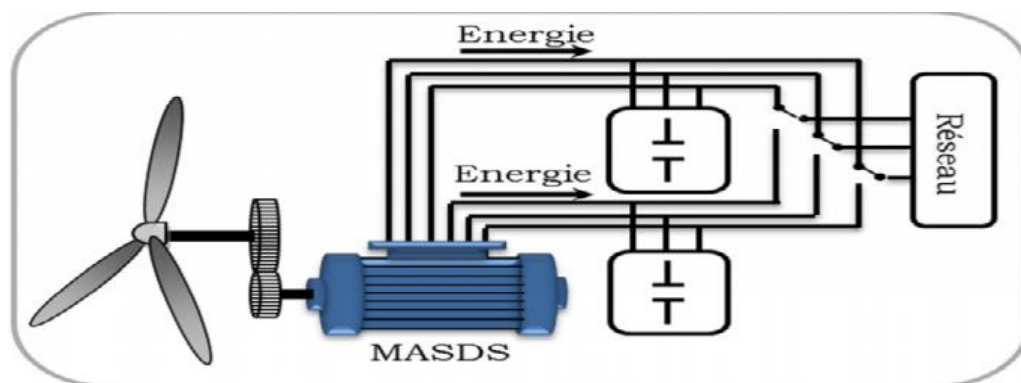
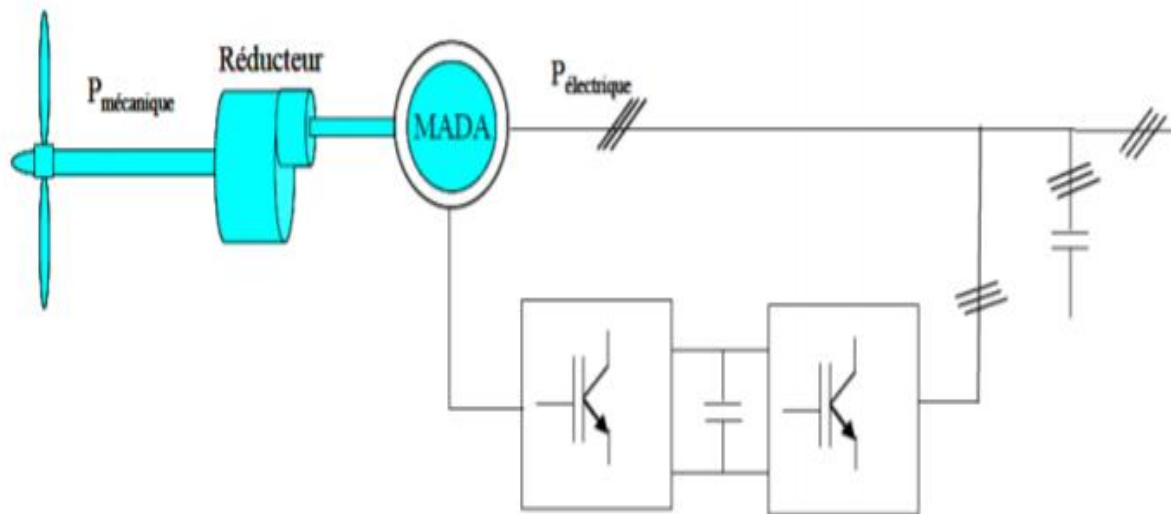


Figure I.21: Machine asynchrone à double stator.

### I.13.2.3 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA) :

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté. Dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur, qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la

différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor. [27].



**Figure I.22 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation

#### I.14 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la notion générale sur les différentes sources énergétiques renouvelables à faible pollution environnementale, Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne ainsi que leurs avantages et inconvénients., différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Les caractéristiques de plusieurs types des machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs.

# **Chapitre II**

## **Présentation du générateur synchrone à aimant permanent**



## II.1 Introduction:

Dans le domaine de la conversion électromécanique d'énergie, les aimants permanents ont depuis longtemps le mérite de constituer une source d'excitation appropriée notamment pour les actionneurs de la robotique et les machines de faible puissance. Les machines à aimants permanents offrent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines électriques à savoir :

- Une source d'excitation indépendante intégrée dans la machine.
- Un procédé de refroidissement généralement moins complexe et moins onéreux qui ne concerne que le stator.
- Une faible inertie.
- Une fiabilité accrue dû à l'absence de contact glissant.
- Des pertes rotoriques faibles.

La modélisation de ces machines présente un intérêt primordial aussi bien pour le concepteur que pour l'automaticien. La représentation du processus par les modèles mathématiques constitue une étape très importante dans l'asservissement des systèmes. Afin d'élaborer une structure de commande, il est important de disposer d'un modèle mathématique représentant fidèlement les caractéristiques du processus. Ce modèle ne doit pas être trop simple pour ne pas s'éloigner de la réalité physique, et ne doit pas être trop complexe pour simplifier l'analyse de la synthèse des structures de commande [28].

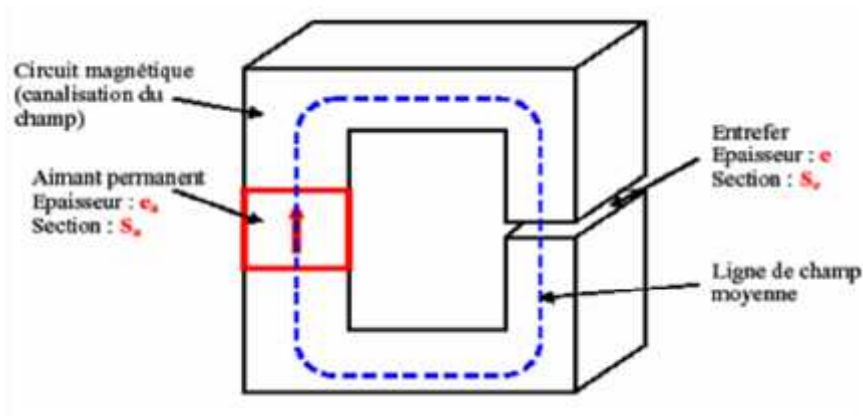
Dans ce chapitre, nous présentons un rappel théorique sur les éléments essentiels des matériaux magnétiques utilisés dans l'excitation de certaines structures de machines synchrones. Puis nous verrons la modélisation de la MSAP en simplifiant le modèle à l'aide de la transformation de Park. La validation du modèle proposé est testée à l'aide du logiciel MATLAB-Simulink.

## II.2 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents:

### II.2.1 Aimants permanents:

#### II.2.1.1 Définition:

Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique qui possède une aimantation rigide susceptible de créer un champ magnétique extérieur et de maintenir en permanence une force magnétique.



**Figure II.1:** Circuit magnétique associé à un aimant.



**Figure II.2:** machine synchrone à aimant.

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (figure.II.3) et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants

permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur . La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe [13].

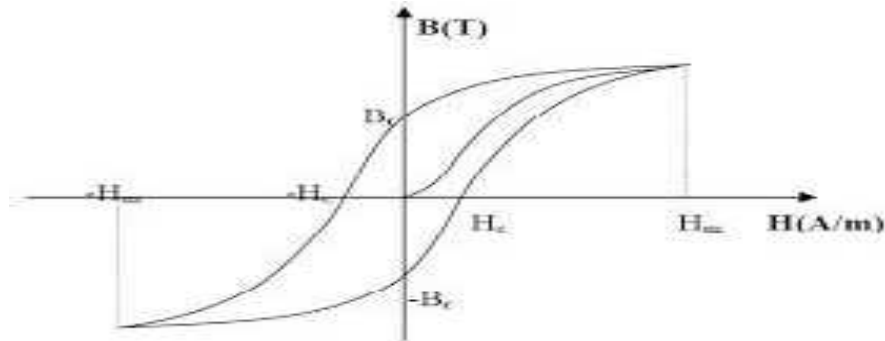


Figure II.3: cycle d'hystérésis.

### II.2.1.2 Caractéristiques générales des aimants permanents:

Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan -

H figure (II.4). Cette courbe est caractérisée par :

- L'induction rémanente  $B_r$ , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé, c'est une indication de la puissance potentielle de l'aimant.
- Le champ coercitif de l'induction ( $H_{CB}$ ) qui est le champ démagnétisant annulant l'induction résiduelle, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable.
- Le produit d'énergie volumique max  $(BH)_{max}$ .

le champ coercitif de polarisation,  $H_{CJ}$ , qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau, la démagnétisation est totale et irréversible.

Les valeurs  $H_m$  et  $B_m$  du point de fonctionnement optimal M correspondant à  $(BH)_{max}$  On peut classer les différents types d'aimants en fonction de ces paramètres.

En plus de ces propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître le point de curie qui représente la température au-delà de laquelle l'aimant perd ces propriétés magnétiques. Il est indispensable de connaître aussi les propriétés mécaniques et physico-

chimiques, le prix, la perméabilité réversible, ainsi que la caractéristique magnétique.

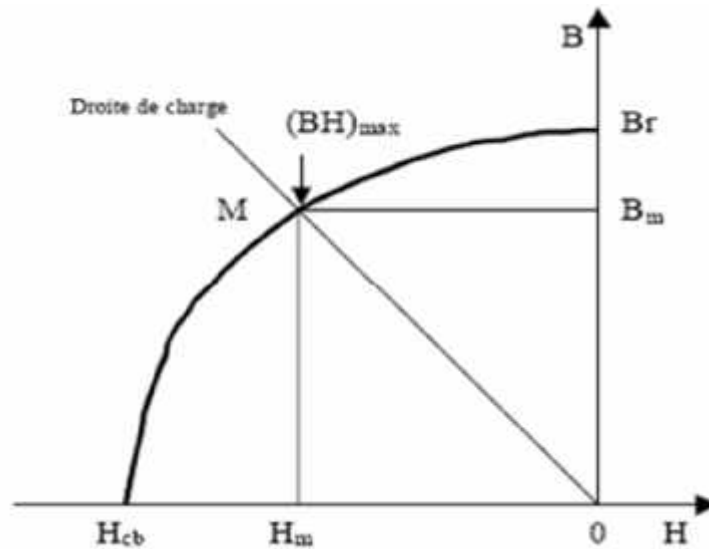


Figure II.4: Illustration d'une courbe B-H des aimants [29][30].

### II.2.1.3 Différents types d'aimants permanents:

Les matériaux utilisés au niveau des machines électriques, du point de vue de leurs propriétés magnétiques peuvent se classer en deux grandes familles:

- Les matériaux magnétiques durs qui sont des aimants permanents.
- Les matériaux magnétiques doux qui ne présentent des propriétés magnétiques

qu'en présence d'une excitation extérieure.

Il existe maintenant une grande variété de matériaux pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont très diverses. Ce sont, soit des matériaux céramiques, soit des matériaux métalliques.

Parmi les aimants les plus utilisés, on peut citer deux types :

- Les aimants permanents "terres rares" ( $\text{SmCO}_5$  et  $\text{Sm}_2\text{C}_{17}$ ),  $\text{NdFeB}$ ,...
- Les aimants à alliages métalliques, ferrites (aimants robustes et peu coûteuses)

Alnicos.

On note que les aimants permanents du type terres rares ( $\text{SmCo}$ ,  $\text{NdFeB}$ ) sont les plus utilisés, car ils présentent une induction rémanente ( $B_r$ ) et un champ coercitif  $H_c$

(kA/m) plus élevés.

Ces aimants sont très appréciés par les constructeurs, car ils permettent une réduction importante du poids et de l'encombrement de la machine pour une même puissance, puisque ils possèdent une puissance massique élevée. En effet, la puissance électrique d'une machine à aimants permanents est directement proportionnelle à la densité d'énergie emmagasinée dans les aimants.

La courbe ci-dessous présente la courbe désaimantation des différents aimants cités. [31].

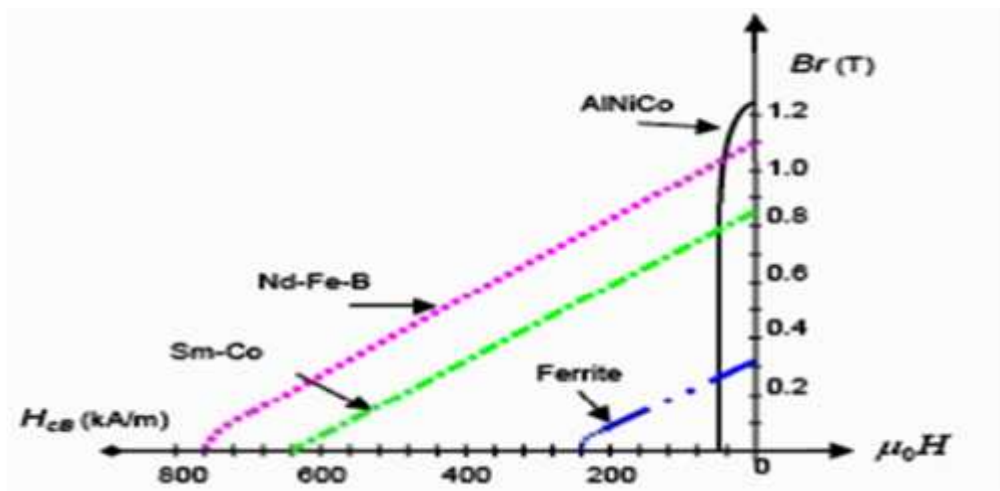


Figure II.5 : Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants .

### II.3 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents:

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique :

La famille de la machine synchrone à aimant permanent regroupe en fait plusieurs sous familles :

- les machines synchrones à rotor bobiné.
- les machines synchrones à réluctance.
- les machines synchrones à aimants permanents .

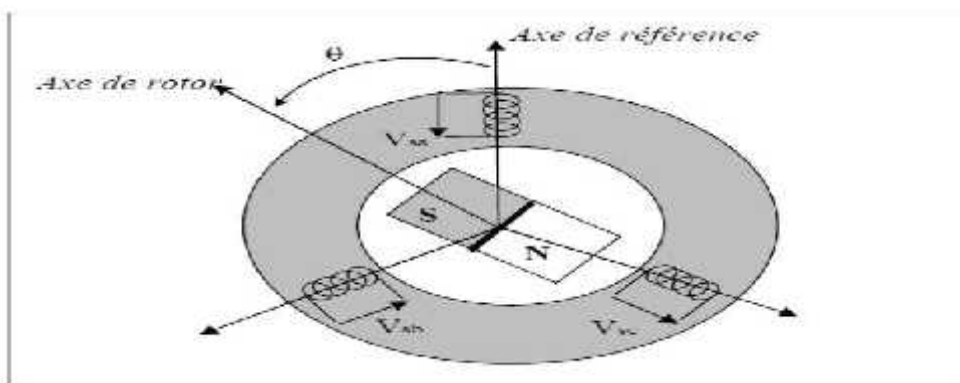
Nous intéresserons-nous plus particulièrement vers cette dernière catégorie. En effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé), la machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.[32]



**Figure II.6:** Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques [37].

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone. Il est constitué d'un empilage de tôles magnétiques qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $120^\circ$ . Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constant, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.



**Figure II.7** Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent.

### II.3.1 Principe de fonctionnement de la MSAP:

Le fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents est beaucoup plus simple que celui du moteur à courant continu : le stator muni d'un enroulement polyphasé, triphasé dans la plus part des cas, est alimenté par un système de tensions et courants créant dans l'entrefer un champ d'induction tournante  $B_{ri}$ .

Le champ d'induction  $B_{ri}$  a tendance à attirer le rotor, lequel est muni d'aimants permanents produisant le champ d'induction  $B_{ri}$ . De ce fait, les champs d'induction créés par le stator et le rotor ont tendance à s'aligner, raison pour laquelle un couple d'origine électromagnétique prend naissance [29].

Comparativement à la machine à courant continu, on voit que c'est le rotor qui joue le rôle d'inducteur (excitation), l'induit étant alors au stator. Le rotor se met à tourner à une vitesse angulaire  $\omega_r$  correspondant à la pulsation  $\omega_s$  de l'alimentation triphasée, ce qui justifie la désignation du moteur synchrone.

### II.3.2 Classification du rotor de MSAP:

Le rotor de la MSAP est généralement de deux types:

- Rotor possédant des pièces polaires.
- Rotor sans pièces polaires.

#### a)Le Rotor avec pièces polaires:

Le rôle des pièces polaires consiste à élever l'induction dans l'entrefer à une valeur supérieure à celle fournie par les aimants, particulièrement lorsque l'on y ajoute un effet de concentration géométrique du flux magnétique. On peut distinguer deux types de machines avec pièces polaires. [33]:

- Les rotors avec aimants sous les pièces polaires comportant des aimants disposés contre le noyau magnétique. ces aimants peuvent être de forme parallélépipédique à aimantation parallèle ou en forme de tuile aimantée radialement.
- les rotors à concentration de flux qui utilisent l'aimantation tangentielle d'aimants généralement parallélépipédiques disposés entre les pièces polaires contre un arbre magnétique. Ces dernières réalisent une concentration de flux à condition que le nombre de pôles soit suffisamment élevé, ce qui permet d'augmenter le module du champ dans l'entrefer de façon significative .

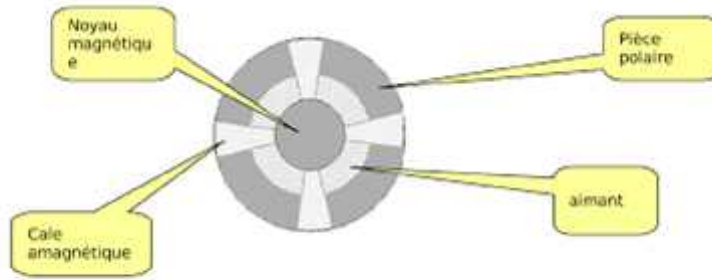


Figure II.8 : Rotor avec pièces polaires [6].

### b) Le Rotor sans pièces polaires:

Les machines sans pièces polaires comportent un rotor dont les aimants sont fixés à la périphérie du noyau magnétique rotorique et sont maintenus par collage ou frettage. La frette doit être amagnétique et éventuellement non conductrice si on veut éviter la circulation de courants induits par les harmoniques de l'alimentation. Son épaisseur s'ajoute à l'entrefer mécanique de sorte que l'épaisseur des aimants doit être suffisante afin de fournir un niveau d'induction voulu dans l'entrefer.

Ce type de structure se caractérise principalement par une réluctance constante le long de l'entrefer. L'inductance est donc constante et de faible valeur en raison de la perméabilité de l'aimant souvent proche de  $\mu_0$  s'ajoutant à un entrefer assez large pour loger la frette sur les rotors intérieurs.

La simplicité de réalisation de ces structures les rend particulièrement avantageuses pour des actionneurs performants à faible coût.

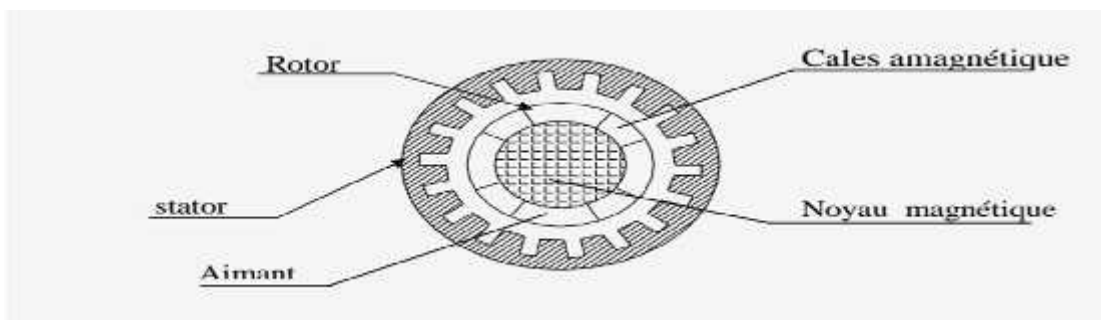
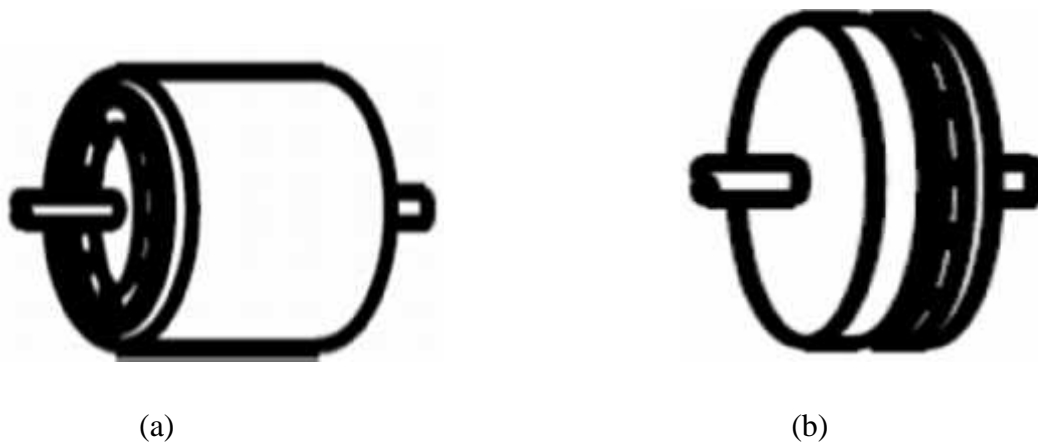


Figure II.9: rotor sans pièces polaires.



### II.3.3 Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents:

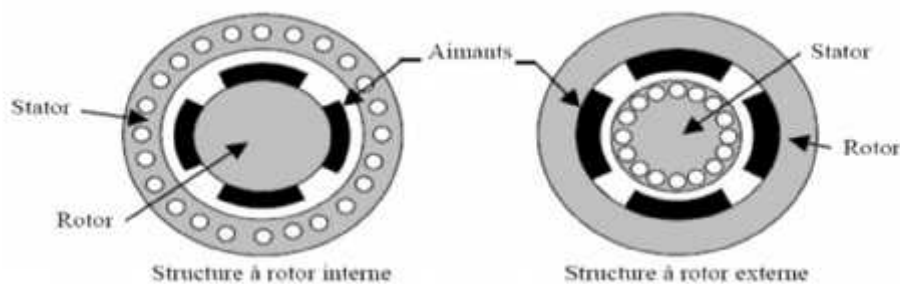
Les structures des machines synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). Celles-ci peuvent être alimentées, soit par des courants sinusoïdaux dans le cas des PMSM ou par des courants en créneaux dans le cas des BDCM. Une vue schématique des deux types de machines à aimants, à flux radial et à flux axial, est donnée par (la figure I.19). [34].



**Figure II.10:** Vue schématique des machines : (a) à flux radial, (b) à flux axial.

#### II.3.3.1 radial (RFPM): Structures à flux

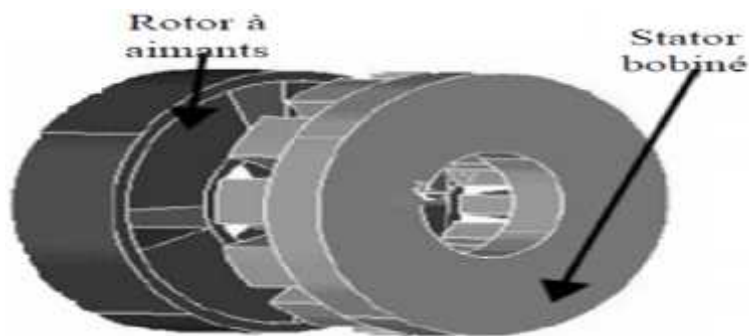
La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimant la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure II.11). Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit encastrés ou enterrés. [34].



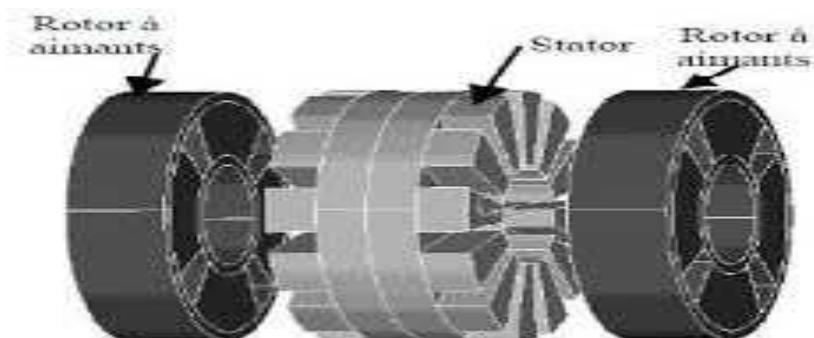
**Figure II.11 :** Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe.

### II.3.3.2 Structures à flux axial (AFPM) :

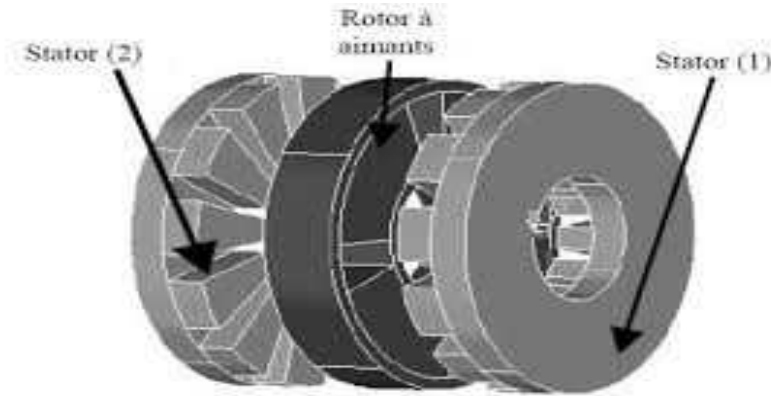
Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales. Comparées à la structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale. Différentes configurations à flux axial existent: celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (Figure II.12) et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors (Figure II.13) ou un seul rotor inséré entre deux stators (Figure II.14). L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [34].



**Figure II.12:** Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator.



**Figure II.13:** Structure à flux axial avec double rotor et un stator.



**Figure II.14:** Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor.

#### II.4 Domaine d'application:

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteur) à plusieurs méga Watts (système de propulsion des navires), dans des applications aussi diverse que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction .

- Il fonctionne comme compensateur synchrone.
- Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières (domestique,...)

#### II.5 Avantages des machines synchrones à aimants permanents:

Lors de la construction des machines synchrones à aimants permanents (MSAP), la place des bobinages d'excitation offrent beaucoup d'avantages:

- Moins de pertes cuivre, les pertes viennent surtout du stator d'où le rendement du moteur est amélioré.
- Une faible inertie et un couple massique élevé.
- Une meilleure performance dynamique.
- Construction et maintenance plus simple.

- Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contacte bague balais dans ces machines. Le choix des aimants permanents dépend des facteurs suivants:
- Performance du moteur.
- Poids du moteur.
- Dimension du moteur.
- Rendement du moteur.
- Facteur économique.

### II.6 Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents:

- Le commutateur mécanique est remplacé par un autre électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle du moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu.
- Le prix des aimants le rend plus cher.
- La présence de pulsation de couple.
- Le risque de désaimantation, ce qui limite l'utilisation contrainte comme la température max, courant max....etc.
- Les pertes par courant de Foucault dans les aimants.

### II.7 Couple des machines synchrones à aimants permanents

On distingue trois types de couple:

#### ➤ **Couple de détente**

Quand les aimants tournent avec le rotor et passent devant les dents du stator, ils rencontrent une réluctance variable qui entraîne un couple de valeur moyenne nulle que l'on appelle couple de détente; pour tenter de l'annuler, les encoches peuvent être inclinées d'un pas d'encoche, mais cela rend plus difficile l'opération de bobinage, il est préférable d'incliner les aimants plutôt que les encoches.

#### ➤ **Couple réluctance**

Appelé aussi couple de saillance, il est dû aux variations des inductances des enroulements statorique en fonction de la position du rotor. Il faut noter que dans le cas des aimants montés en surface, le flux d'induit rencontre la même réluctance quelle que soit la position du rotor , il n'y a pas donc pour ces moteurs de couple de réluctance à prendre en compte.

#### ➤ **Couple mutuelle**

Il est dû à l'interaction des deux champs statorique et rotorique. [33].

### **II.8 Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons présenté avec détail la machine synchrone à aimant permanent MSAP qui sera l'objectif de notre étude. Nous avons donné le principe de fonctionnement de la machine MSAP et les composants générale et aussi les inconvénients et avantages et les structures de cette machine.

Le chapitre suivant, sera consacré à la modélisation et simulation de ce système avec la charge raccordé sur environnement MATLAB.

# **Chapitre III**

## **Modélisation et simulation du système éolien**

### III.1 Introduction:

Après avoir présenté les différents types d'éolienne, et le principe de conversion d'énergie éolienne, nous nous attachons dans ce chapitre à modéliser les éléments de la partie électromécanique de la chaîne de conversion constituée d'une turbine éolienne et d'une génératrice synchrone à aimants permanents.

Les modèles qui seront présentés dans ce chapitre, ont pour finalité la simulation comportementale du notre système sur la plan électrique et énergétique, à vide et en charge. [35].

La figure (III.1): montre la chaine complète de conversion d'énergie éolienne avec toutes les composants qui seront modélisées dans ce chapitre.

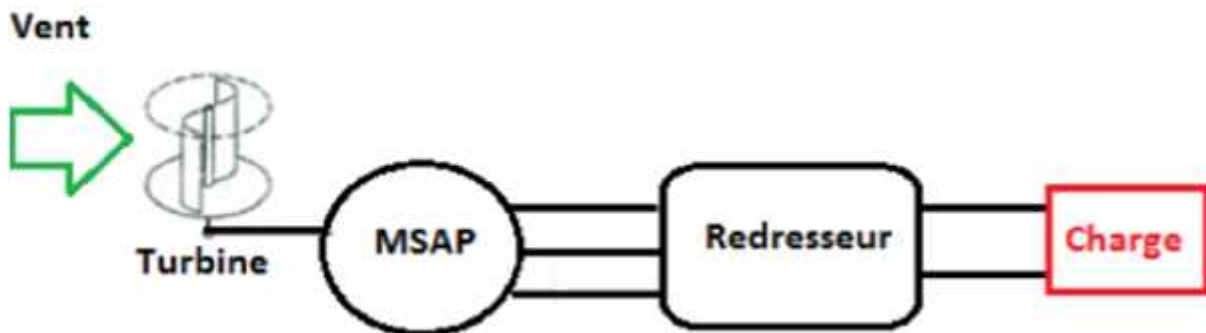


Figure III.1 : Structure du générateur éolien étudié, [21].

### III.2 Modélisation du vent:

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une année à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Il est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc pour la rentabilité [36]. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent

(cf. formule (III.2)). Ces fluctuations étant influencées par le déplacement des masses d'air en altitude, mais également par le relief, le type de recouvrement du sol et la stabilité thermique de l'atmosphère. Le vent varie en direction et en intensité, mais pour les besoins du modèle, on se limite à la variation du vent en intensité, dans une seule direction afin de déterminer une séquence valable et représentative de vents réels. [37].[38].

Le schéma de bloc de la 2<sup>ème</sup> modèle de vitesse du vent donné par la figure suit :

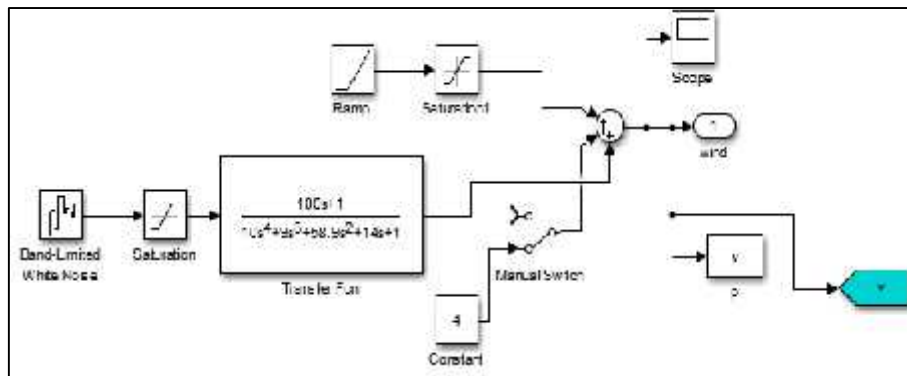


Figure.III.2 : Vitesse de vent sous Matlab /Simulink.

Leur implémentation Simulink est donnée par la figure suivant :

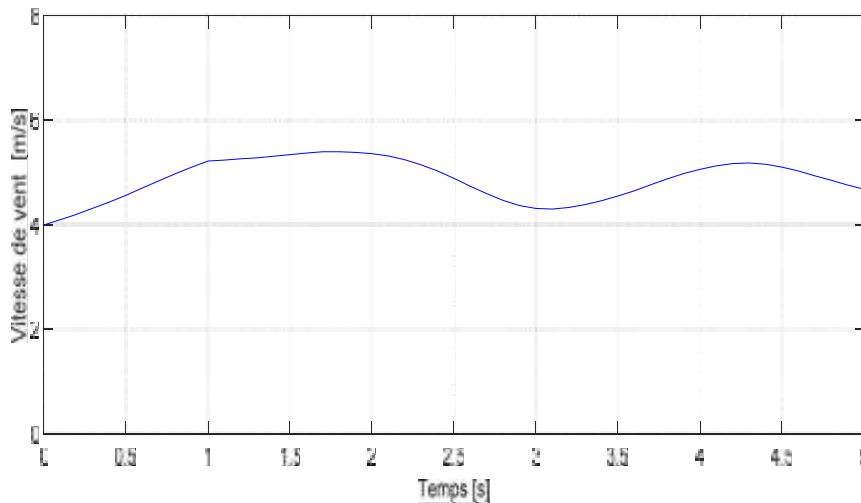


Figure III.3 : La vitesse du vent en fonction de temps.

La figure (Figure II.3) montre la simulation sur environnement Matlab Simulink avec un temps 5s.

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

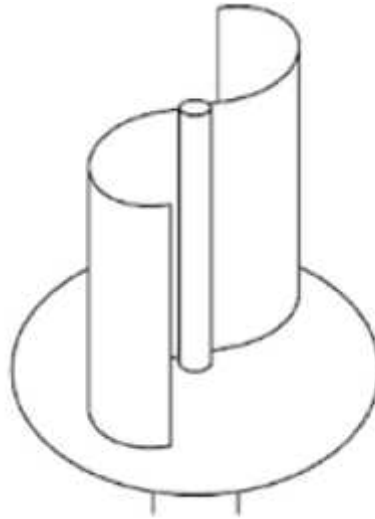
La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} C_P S V_v^3 \tag{III.3}$$



où  $\rho$  est la masse volumique de l'air, qui vaut approximativement  $1.2 \text{ kg/m}^3$ .  $S$  est la surface balayée par la turbine en  $\text{m}^2$ ,  $V_v$  est la vitesse du vent en  $\text{m/s}$ .  $C_p$  (coefficient de puissance).

La turbine, utilisée dans le cadre de notre travail, est une éolienne "Savonius" à axe vertical (voire Figure.II.3).



**Figure.III.4:**Voilure à axe vertical de type Savonius. [34]

La surface "S" donnée par la formule suivant :

$$S=2R.H \quad (\text{III.4})$$

où  $R$  représente le rayon de la voilure (m) et  $H$  sa hauteur (m).

En utilisant le coefficient de puissance  $C_p$  ( ), la puissance éolienne est calculée ainsi :

$$P_{eol} = P_{m\acute{e}} = C_p( ) .H.R.V_v^3 \quad (\text{III.5})$$

où  $C_p$  est un coefficient qui exprime l'efficacité de la voilure dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est en fait souvent donné en fonction de la vitesse réduite (la vitesse spécifique ) qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit définie par :

$$\frac{R.\Omega_t}{V} \quad (\text{III.6})$$

Où :  $\Omega_t$  la vitesse angulaire de rotation des pales en  $\text{rad/s}$ .

L'évaluation du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour cette turbine [40], par l'équation analytique en fonction de  $\lambda$  (résultante de l'interpolation) suivant :

$$C_p(\lambda) = -0.12992 \lambda^3 - 0.11681 \lambda^2 + 0.45406 \tag{III.7}$$

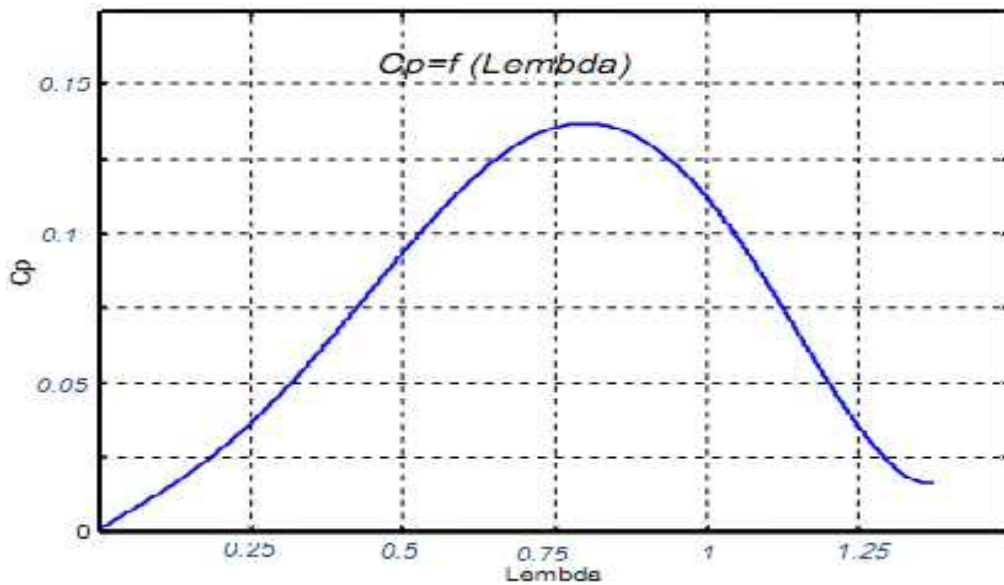


Figure III.5: Courbe caractéristique retenue pour les essais.

La figure (Figure III.5) représente les caractéristiques de coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$ . Il présente un facteur de puissance maximal :  $C_{Pmax} = 0.13$  pour  $\lambda_{max} = 0.85$

A partir de la puissance éolienne; le couple éolien est donc donné par :

$$C_e = \frac{P}{\Omega t} = \frac{C_p \lambda \cdot \rho \cdot H \cdot R^2 \cdot V^2}{\lambda} \tag{III.8}$$

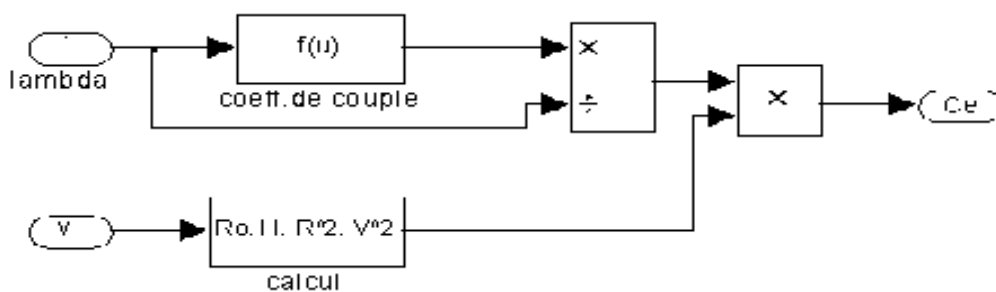
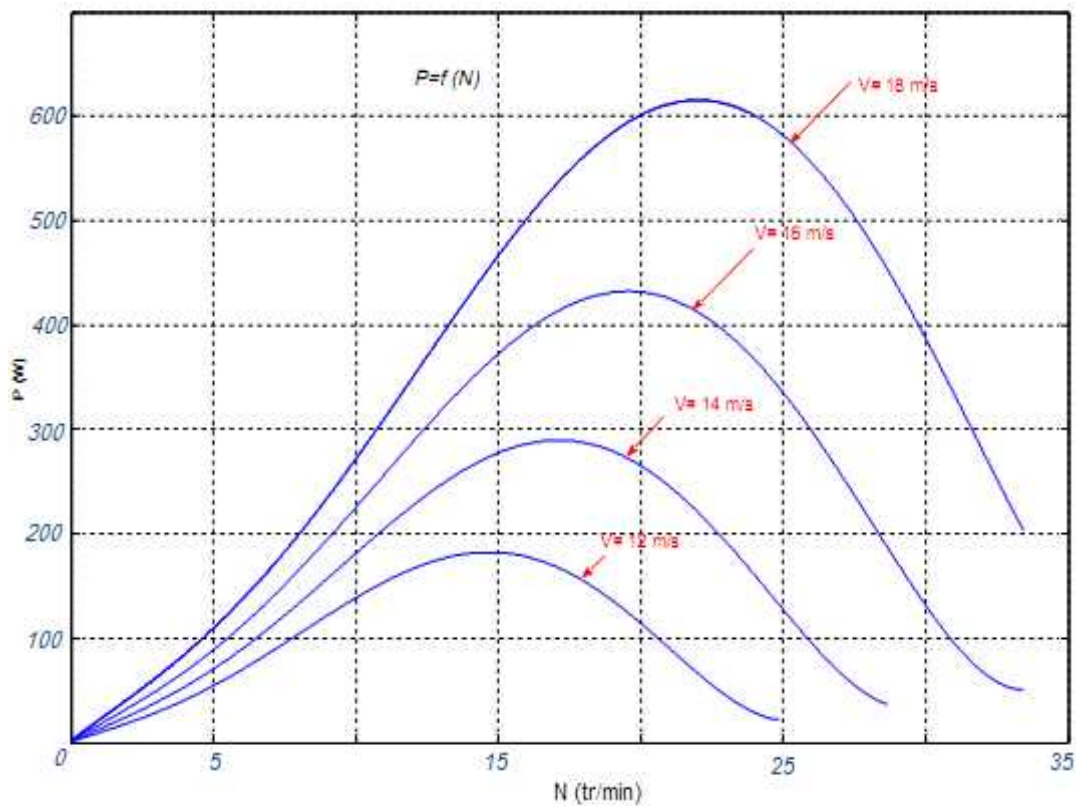


Figure III.6: Modèle du couple éolien sous Simulink.

La figure (Figure.III.6) présente la caractéristique de la turbine à travers de la courbe d'extraction de puissance éolienne de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.



**Figure.III.7:**La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

On remarque à la figure (Figure III.7) que la puissance électrique est variable avec la variation de la vitesse angulaire mécanique de la turbine. L'allure de la puissance électrique en fonction de la vitesse angulaire mécanique est semblable à celle du  $C_p$  en fonction de  $\Omega$ . On remarque aussi que plus la vitesse du vent est grande plus la puissance délivrée est grande car la puissance est exprimée par la vitesse au cube du vent.

#### III.4 Modélisation mécanique du couplage turbine – génératrice :

Le comportement dynamique (mécanique) de l'ensemble turbine et génératrice peut être représenté par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_{em} - C_f \quad (\text{III.9})$$

où  $\Omega$  la vitesse sur l'arbre du générateur,  $C_f$  le couple de frottement,  $C_{em}$  le couple électromagnétique développé par le générateur,  $C_e$  le couple mécanique appliqué à l'arbre de l'alternateur et  $J$  est le moment total d'inertie, calculé avec :

$$J = J_{gen} + \frac{dJ}{i} \tag{III.10}$$

On note que :

$$C_f = f_m \cdot \Omega \tag{III.11}$$

Où  $f_m$  est le coefficient de frottement visqueux en N.m.

Le couple éolien fourni par la turbine, permet d'entraîner la génératrice. En tenant compte des chutes de couple causées par le frottement et l'inertie de la turbine, nous pouvons établir le modèle électromécanique de la figure (Figure.III.8).

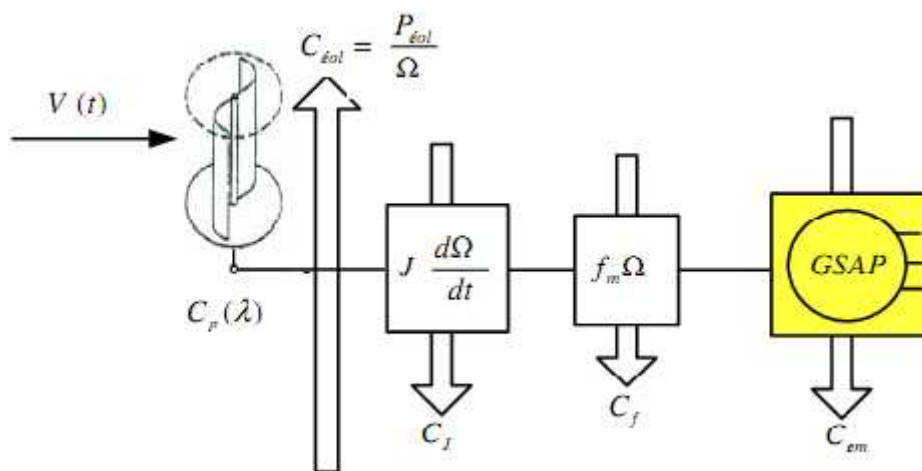


Figure III.8:Modèle du couple de la turbine éolienne.

On peut aussi, modéliser la turbine par le schéma bloc suivant:

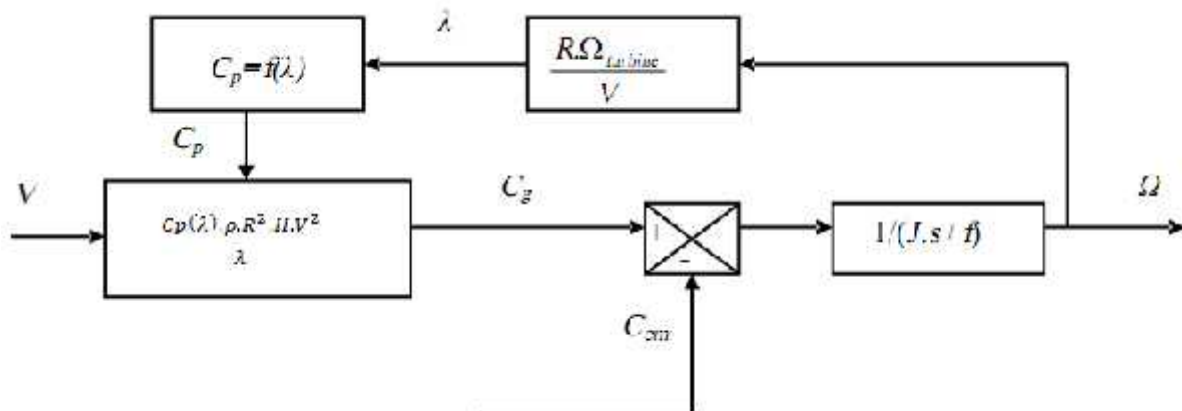


Figure III.9:Schéma bloc de la turbine éolienne.

### III.5 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents:

Grâce aux nombreux avantages qu'elle présente par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. La structure de la machine à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation est créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air. [41].

#### III.5.1. Hypothèses simplificatrices:

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le stator connecté en étoile, neutre en l'air pour éliminer la composante homopolaire des courants.
- La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases ;
- La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- L'effet de peau et de la température sur les résistances sont négligés. [42].

### III.6 La réalisation sous simulink du modèle de couple éolien:

La réalisation sous simulink du modèle de couple éolien est présentée dans la figure III.8. Le bloc noté par « Turbine » est détaillé par le schéma que contient les blocs « vent » et « subsystem 1 ». En fonction de la position du commutateur manuel présent dans le schéma, la vitesse du vent est considérée soit comme variable sous la forme des variations en échelon, soit comme une vitesse qui présente une composante de turbulence. Cette composante est générée par le filtrage d'un bruit pseudo aléatoire. La partie de bas de la figure III.9 présente les configurations des blocs de calcul « Lmbd » et « Couple ». Ces blocs calculent la vitesse relative selon la relation (III.6), respectivement le couple éolien avec l'équation (III.8).

L'équation de mouvement de l'ensemble turbine-générateur est :

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = e - em \quad (\text{III.12})$$

Où  $\omega$  est la vitesse sur l'arbre du générateur et  $J_t$  est le moment total d'inertie, calculé avec :

$$J_t = J_{gen} + \frac{J_{turbine}}{i^2} \quad (\text{III.13})$$

Dans l'équation (III.13),  $i$  est le rapport de transmission du multiplicateur de vitesse. L'équation de mouvement est implémentée sous Simulink par le bloc « Eq .mouvement », qui a comme grandeur d'entrée les couple éolien et électromagnétique et comme grandeur de sortie, la vitesse sur l'arbre du générateur .

Les variables d'entrée et de sortie utilisées pour la modélisation et la simulation d'un générateur synchrone à aimants permanents sont :

- à l'entrée : le couple active développé par l'éolienne,  $e$ , et les paramètres de charge  $R_{ch}$  et  $L_{ch}$ .
- à la sortie : les courants  $i_A, i_B, i_C$ , les tensions  $u_A, u_B, u_C$ , le couple électromagnétique, les puissance active et réactive.

Les équations du générateur sont [9] :

$$\begin{aligned} u_d &= -Ri_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q p \frac{d\theta}{dt} \\ u_q &= -Ri_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d p \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

Où :  $\theta$  est l'angle entre un axe de référence du stator et un axe du pôle nord du rotor,  $p$  le nombre de paires de pôles,  $R$  la résistance d'une phase statorique,  $u_d, u_q$  et  $i_d, i_q$  sont les composantes sur les axes  $d$  et  $q$  de la tension, respectivement du courant statoriques .

Les flux sur les axes  $d$  et  $q$  sont :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d - \psi_e \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Où  $\psi_e$  est le flux d'excitations produit par les aimants,  $L_d$  et  $L_q$  sont les inductances équivalentes sur les axes d, respectivement q (les inductances synchrones longitudinales, respectivement transversales).

Le couple électromagnétique :

$$M_{em} = k \cdot p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = k \cdot p\{i_q [i_d(L_d - L_q) - \psi_e]\} \quad (III.16)$$

Où k prends la valeur 1 ou 1,5, en fonction de la façon dont est réalisée la transformation (A, B, C) – (d, q).

Les équations de la tension sur la charge sont :

$$\begin{cases} u_A = R_{ch} i_A + L_{ch} \frac{di_A}{dt} ; \\ u_B = R_{ch} i_B + L_{ch} \frac{di_B}{dt} ; \\ u_C = R_{ch} i_C + L_{ch} \frac{di_C}{dt} ; \end{cases} \quad (III.17)$$

Nous avons utilisé les valeurs numériques suivantes :  $J_t = 0.55 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$  ;  $R = 3.3$  ;  $L_d = 41.56 \text{ mH}$  ;  $L_q = 57.06 \text{ mH}$  ;  $p = 3$  ;  $\psi_e = 0.4382$ .

Le schéma de simulation du générateur synchrone est donné dans la figure 4.6 Ce schéma est interconnecté avec celui de l'équation de mouvement ( voir figure III.10) : le couple électromagnétique est fourni dans un sens et la variable de réponse reçue et la vitesse de rotation sur l'arbre .

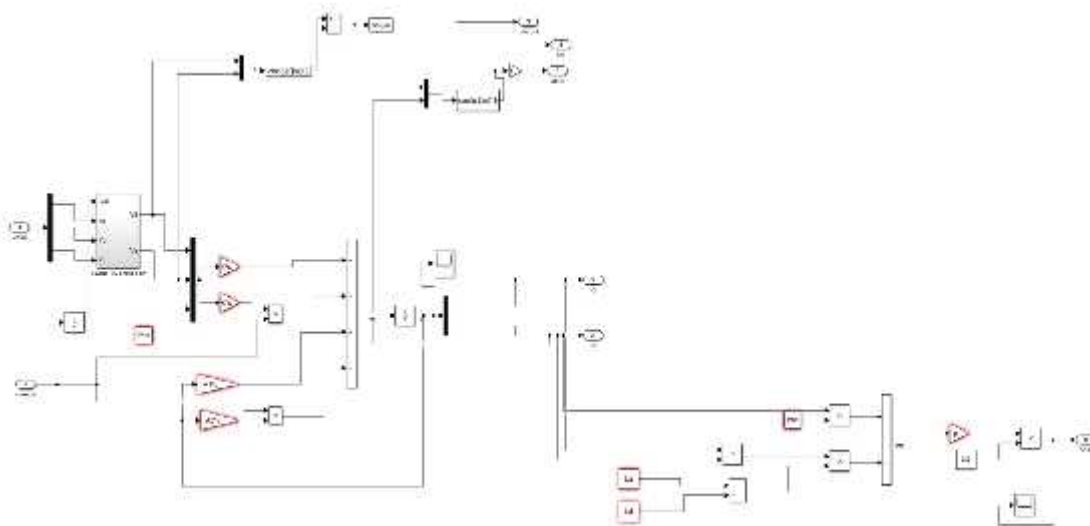
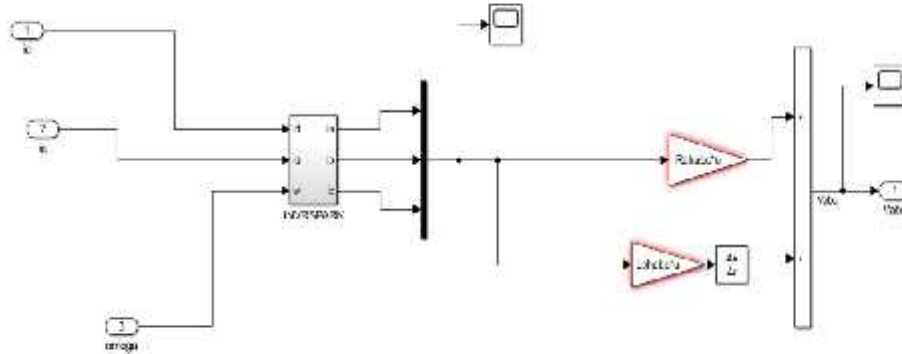


Figure III.10: Schéma de simulation du générateur synchrone.

La structure du bloc « gen\_synchrone » est donné dans la figure (III.11)



**FigureIII.11:** Structure du bloc « gen\_synchrone »

Dans cette figure,l'ensemble « Stator » simule les équation d'état du système .Si on remplace  $\psi_d$  et  $\psi_q$  en (III.14) par les relations données en (III.15) et  $\frac{d\theta}{dt} = \omega_r$  étant la vitesse sur l'arbre du rotor,on obtient

$$\begin{cases} \dot{i}_d = \frac{1}{L_d} (L_q i_q - R i_d - u_d) \\ \dot{i}_q = \frac{1}{L_q} - [(L_d i_d - \psi_e) - R i_q - u_q] \end{cases} \quad (III.18)$$

Où  $\omega_r$  est la pulsation électrique.Cette relation est à la base du schéma bloc « gen\_synchrone », donné dans la figure III.12

Le bloc « Charge » de la figure III.10est réalisé avec les relations III.17 et a la structure donnée dans la figure III.14



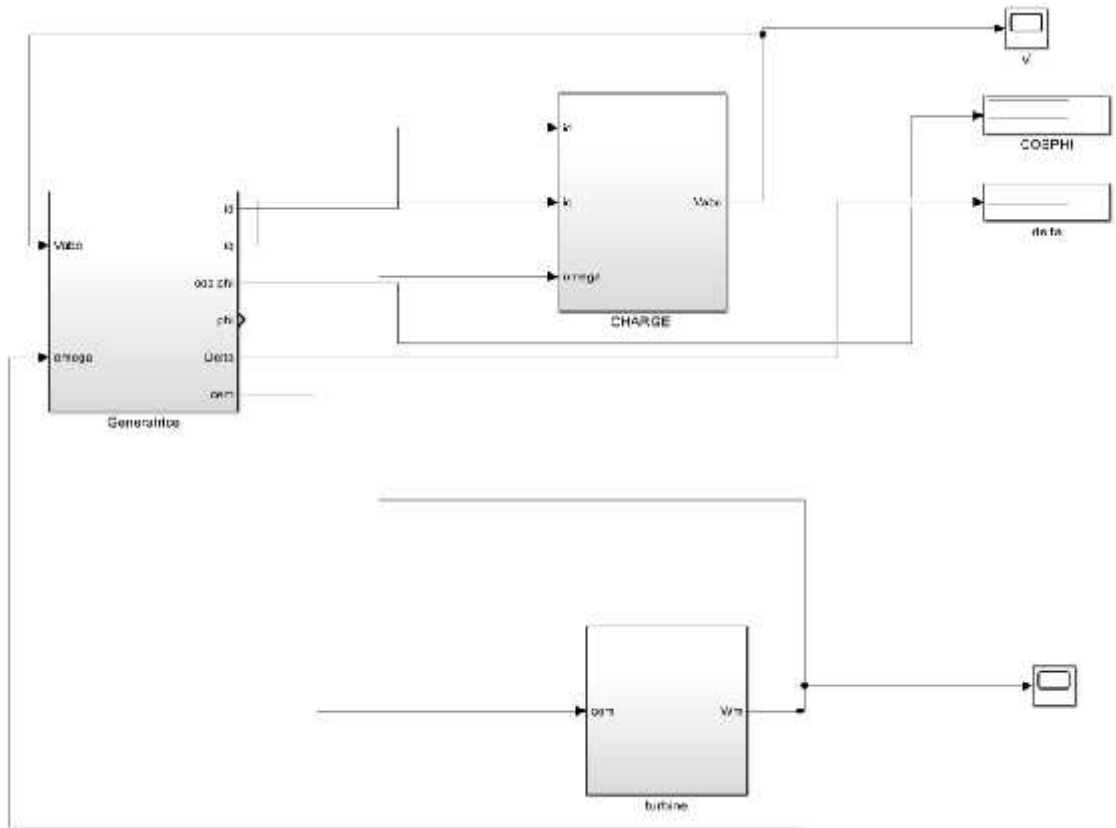
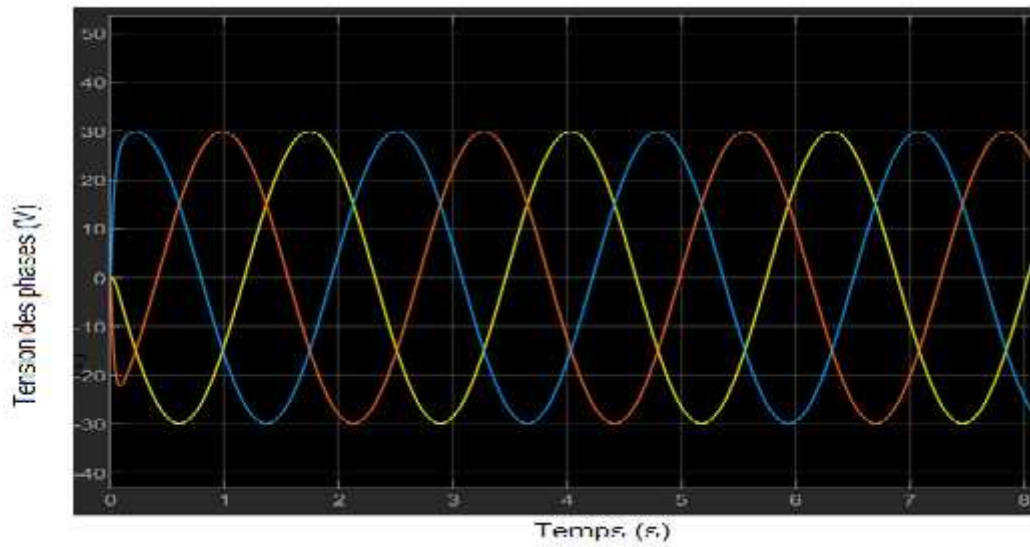


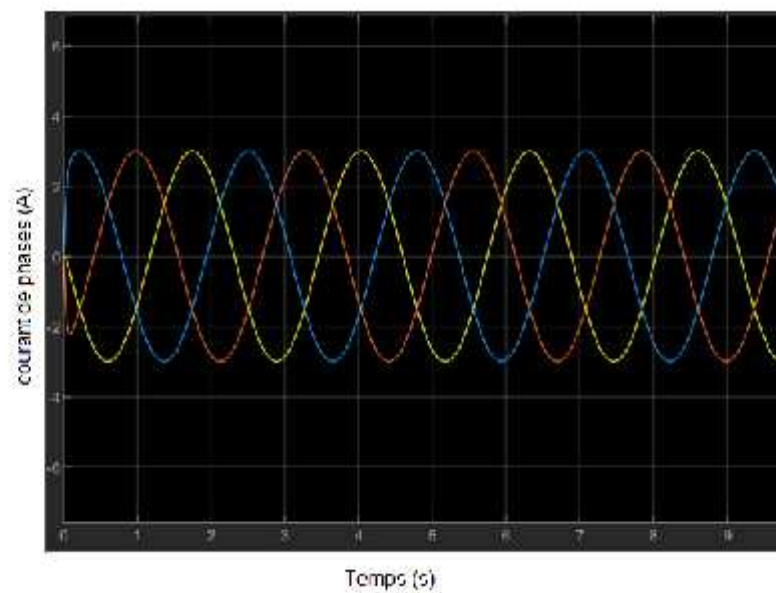
Figure.III.12: Structure du bloc « Charge ».

Les figures III.15 et III.1 présentent les valeurs instantanées des tensions respectivement des courants de phases, au démarrage de l'aérogénérateur avec une charge  $R_{ch}=300$  ,  $L_{ch}=5mH$

Après le démarrage, à  $t=3$  s, on a réalisé un échelon de charge (couplage de charge),  $R_{ch}$  prenant la valeur de 200 .



**Figure.III.13:** Tensions instantanées des phases.



**Figure .III.14:** Courants instantanés des phases.

Les figures III.17, III.18, et III.19, présentent les variations du couple éolien (après le multiplicateur), respectivement de la vitesse sur l'arbre, du couple électromagnétique et du facteur de puissance . Nous pouvons constater que tous les régimes dynamiques correspondent aux interprétations physiques des processues du système.

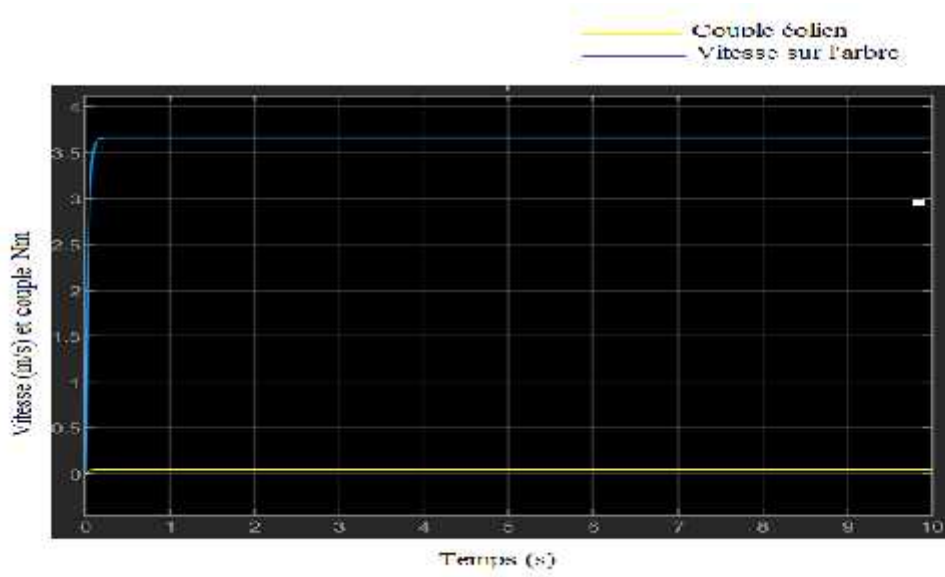


Figure.III.15: Variations du couple éolien et Variations de la vitesse sur l'arbre

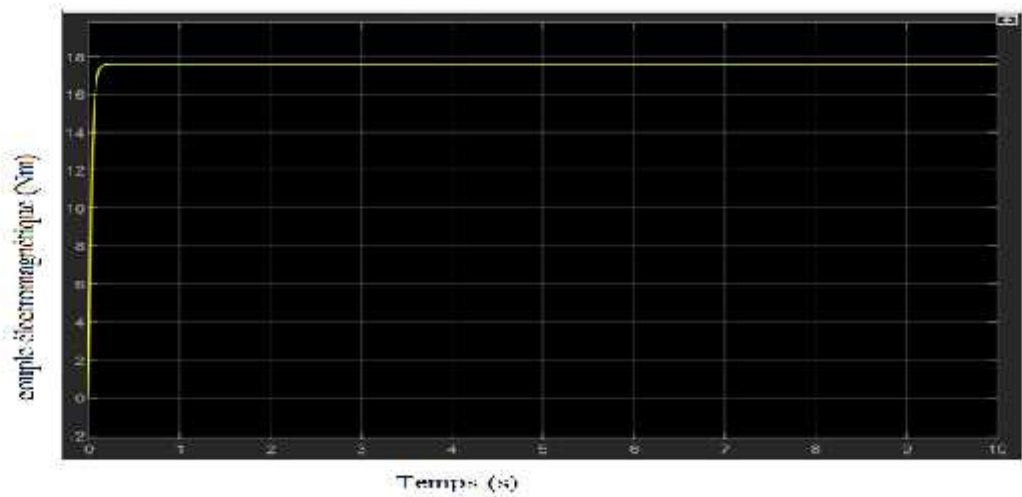


Figure.III.16: Variations du couple électromagnétique

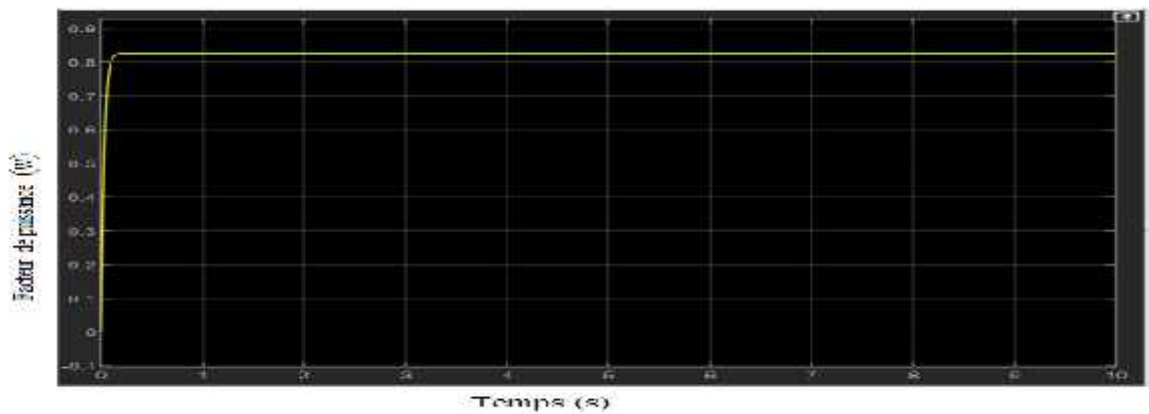


Figure.III.17: Variations du facteur de puissance

Afin de mettre en évidence le comportement de l'aérogénérateur aux bornes de la charge , nous avons déduit la caractéristique externe

$$U=F(I) \quad (III.18)$$

Où U et I sont les valeurs efficaces de la tension , respectivement du courant sur une phase . Pour cela , en gardant constante la vitesse du vent , nous avons varié très légèrement la résistance de charge,  $R_{ch}$ , de sorte que les composantes dynamique des variations des grandeurs du système soient négligeables .

### III.7 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons pu modéliser les constituants mécaniques et électriques permettant d'effectuer la conversion entre énergie mécanique et électrique jusqu'à la charge. Pour ce faire, nous avons bien entendu procédé à des simplifications et des estimations afin de mettre en œuvre des outils comme la transformation de PARK avec comme objectif, permettant d'une part d'exploiter le maximum de l'énergie récupérable. Les résultats de simulation permettent de valider la cohérence de cette modèle, avec des valeurs qui concordent avec celles attendues.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale

Dans le cadre de la réalisation de ce mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur la modélisation d'un système de la production et la conversion de l'énergie éolienne. Pour cela, nous avons pris pour objectif de la modélisation et de la simulation d'une chaîne de conversion éolienne avec un modèle du vent et une turbine à axe verticale associée à une génératrice synchrone à aimants permanents. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers la charge à alimenter. Cette mémoire master a été construite avec 03 chapitres :

Le premier chapitre, qui présente des généralités sur l'énergie éolienne dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme : la méthode de description du gisement éolien. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Une comparaison entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe nous a permis de choisir un système à vitesse variable. Puis la comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents MSAP.

Le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur les machines synchrones à aimants permanents en basant ; son principe de fonctionnement ainsi que les différentes structures des machines. Nous avons donné le modèle mathématique de la machine et une simulation numérique a été effectuée sous MATLAB/SIMULINK. Les résultats de simulation de la GSAP à vide et en charge sont présentés.

Dans le chapitre trois, nous avons présenté la modélisation de la turbine éolienne à axe vertical de type Savonius avec la génératrice synchrone à aimants permanents et la charge du bus continu.

Comme perspective de ce travail, il sera très utile de appliquer une commande par intelligence artificielle afin d'optimiser la puissance générée par le générateur.

# Bibliographie

- [1] A. Harrouz, A. Benatallah, O. Harrouz, "Modeling of small wind energy based of PMSG in south of Algeria", Journal "IEEE Explore" of 2nd International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA 2012), pp.191 – 195.
- [2] [www.energie-renouvelable.fr](http://www.energie-renouvelable.fr)
- [3] S.WINJNBERGEN, "Wind force 12 a blueprint to achieve 12 of the world s electricity from wind power –by 2020", Globale Wind Energy Council ( GWEC) report Jun 2005.
- [4] [www.photeus.info](http://www.photeus.info)
- [5] <http://www.vedura.fr/environnement/energie/energie-solaire-thermique>
- [6] **Google earth** : image satellitaire
- [7] Tahiri, F. Bekraoui, F. Boussaid I, Ouledali, O. Harrouz A. Direct Torque Control (DTC) SVM Predictive of a PMSM Powered by a photovoltaic source. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(1),1-7. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.1>
- [8] Harrouz A, Tahiri, F. Bekraoui, F. Boussaid I. Modelling and Simulation of Synchronous Inductor Machines. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(1),8-23. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.2>
- [9] N.CHERFIA, "modélisation et commande des génératrices éoliennes", diplôme de magistère, Université de Constantine, 07juin 2010.
- [10] A.AKABLI, «Modélisation Energétique et Prévisions de La Vitesse du Vent Menant à l'estimation de la Production d'énergie Eolienne», diplôme de master, Université d'Adrar, 2016 – 2017.
- [11] K.M.Touati, "Etude D'une Générateur éolienne Connectée Au réseau électrique", diplôme de magistère, Université de Batna, 15/01/2015.
- [12] S.BELAKEHAL, " conception & commande des Machines a Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de doctorat, Université de Constantine, juin 2010.

[13] H. Mahdaoui, «Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP», diplôme de master, Université d'Adrar, 25 Mai 2017.

[14] V.Courtesuisse, «supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique», Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole nationale d'Arts en métiers, 2008.

[15] M. Mireck, «Dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable pour les sites de Tlemcen et Adrar», diplôme de master, 2012.

[16] Arama F.Z, Laribi S, Ghaitaoui T. A Control Method using Artificial Intelligence in Wind Energy Conversion System. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(1),60-68. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.6>

[17] Laribi S, Mammar K, Arama F.Z, Ghaitaoui T. Analyze of Impedance for Water Management in Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using Neural Networks Methodology. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(1),69-78. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.7>

[18] Oudrane A, Hamouda M, Aour B. The Thermal Transfers of a Habitable Envelope in an Extremely Dry Area and These Effects on Thermal Comfort. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(1),79-91. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.8>

[19] Belatrache D, Harrouz A, Abderrahmane A, Manaa S. Numerical Simulation of a Pseudo Plastic Fluid Through Sudden Enlargement. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(1),92-98. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.9>

[20] Badoud A. MPPT Controller for PV Array under Partially Shaded Condition. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(1),99-111. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.10>

[21] Mounzar H, Azzi A, Sahli Y, Haida A. Comparative Study of Three Solar Desalination Units Based on Theoretical and Experimental Approach. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(1),112-118. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.11>



- [22] M.BEY, " Modélisation d'un Chaîne de Conversion Eolienne Application au Site de Tlemcen ", Mémoire Magister de Physique Energétique et Matériaux Université de Tlemcen, janvier 2005.
- [23] N.HAMDI, "modélisation et commande des générateur éoliennes", diplôme de Magister, Université de Constantine, 07 juin 2010.
- [24] H. Camblong, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.
- [25] Aggoun Ghania, «Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'une système de génération éolien-ou», mémoire de magister, Université Tizi-Ouzou, 2010.
- [26] Bouzidi M, Harrouz A, Mansouri S. Control and automation of Asynchronous motor using Fuzzy logic. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),154-171. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.5>
- [27] A. Mireck, "Etude comparative des Chaines de Conversion d'Energie Dédiées a une Eolienne de petite puissance", Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [28] Maatallah E, Berbaoui B. Modelling and Control of Photovoltaic System using the incremental conductance method for maximum power point tracking. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),191-197. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.8>
- [29] Dahbi M, Sellam M, Benatallah A, Harrouz A. Investigation on Wind Power Generation for Different Heights on Bechar, South West of Algeria. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),198-203. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.9>
- [30] Ouledali, O. Meroufel, A. Wira, P. Bentouba, S. Genetic Algorithm Tuned PI Controller on PMSM Direct Torque Control. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),204-211. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.10>

[31] Benatiallah D, Bouchouicha K, Benatiallah A, Harrouz A, Nasri B. Forecasting of Solar Radiation using an Empirical Model. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),212-219. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.11>

[32] Benbrahim Amel, «Commande Prédicative Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanent», diplôme de Magistère en Electrotechnique, Université de BATNA, 2009.

[33] WWEA, «Rapport Mondial 2010 su L'énergie Eolienne », Aprile 2011.

[34] BARDADI BENDAHA Mansour, «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel», diplôme de Magister, Université d'Oran, 04/02 /2015.

[35] Mr BENALI, Mr BENOUARET Saâdi, «Contribution à l'étude d'un Système Eolien Basé sur une Machine Synchrone à Aimants Permanents», Diplôme de Master en Electrotechnique, Université A .Mira – BEJAIA, 2013/2014.

[36] D.H. TRAN, "Conception Optimale Intégrée d'une chaine éolienne passive ; Analyse de robustesse, validation expérimentale", Thèse de Doctorat de L'université TOULOUSE, septembre 2010.

[37] J. D. LANGLOIS, "Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseau ", Thèse Master à l'école de technologie Supérieurs, Montréal. 2006.

[38] A. Harrouz, B. A Ali Harrouz, " Modalisation d'une Petite Eolienne Hors Réseaux Basé sur la Génératrice Synchrone a Aimant Permanent", International Conférence on Energy and Sustainable Développent, p 5, 2011.

[39]D.H.TRAN, «Conception Optimale Intégrée d'une chaine éolienne «passive»:Analyse de robustesse, validation expérimentale», thèse de Doctorat de l'université de TOULOUSE, septembre 2010.

[40]A.ABDELLI, «Optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive», Institut Nationale Polytechnique de Toulouse,2007

[41] Lansari F, Edjekouane M, Khelifi O, Boukheteche I, Laksaci H. Elimination of Methylene Blue by low-cost Biomaterial prepared from Local Natural Residue. Algerian

Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2020, 2(1),60-66.  
<https://doi.org/10.46657/ajresd.2020.2.1.9>

[42] Hadj Kouider W, Belfar A, Belmekki M, Ait-Kaci H. Window Layer Thickness Effect on Amorphous Silicon Oxide Solar Cell Performances. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2020, 2(1),67-74.  
<https://doi.org/10.46657/ajresd.2020.2.1.10>

[43] Bourourou F, Tadjer S.A, Habi I. Wind Power Conversion Chain Harmonic Compensation using APF Based on FLC. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2020, 2(1),75-83. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2020.2.1.11>

# **Les annexes**

## Annexe A

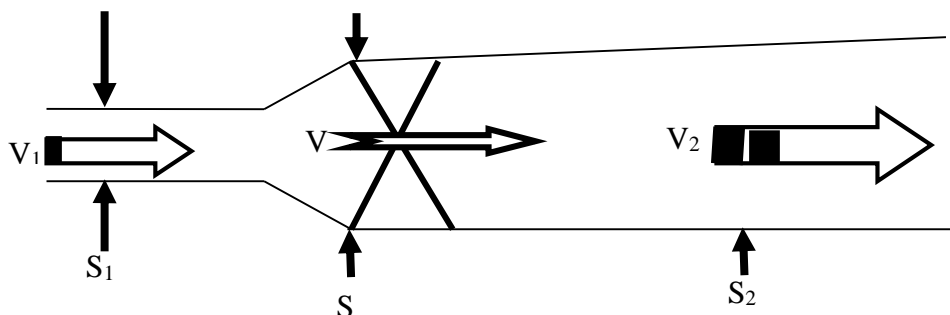
### Limite de Betz

Les turbines de vent transforment l'énergie cinétique éolienne en énergie mécanique. Il y a des principes généraux qui s'appliquent dans ces cas-ci : lois de conservation de la masse, d'élan et d'énergie. La théorie considère un rotor dans le mouvement comme un disque poreux qui éprouve un vent dû axial d'incident de force ou de poussée, et sa théorie axiale dénommée d'élan (figure A.1).

Pour appliquer la théorie elle prévoit les hypothèses suivantes :

- L'air est un fluide idéal, sans viscosité.
- L'écoulement d'incident est unidimensionnel et la pression, la densité et la vitesse sont uniformes.
- La turbine est suffisamment loin de tous les obstacles de sorte que son influence soit sans valeur.
- On le considère dans l'état stationnaire.

Soient  $S_1$  et  $S_2$  les sections amont et aval de la veine de fluide.



**Figure A.1:** Veine d'air sur une éolienne.

La masse d'air  $m$  déplacée par seconde est :

$$M = \dots \times s \times v = \dots \times s_1 \times v_1 = \dots \times s_2 \times v_2 \quad (\text{A-1})$$

$\rho = 1,25 \text{ Kg/m}^3$  est la valeur moyenne de la masse volumique de l'air.

La variation d'énergie cinétique  $E_c$  de la masse d'air qui traverse l'éolienne par seconde est :

$$E_c = \left[ \frac{1}{2} m (v_1)^2 \right] - \left[ \frac{1}{2} m (v_2)^2 \right] = \frac{1}{2} \times \dots \times s \times v \times (v_1 - v_2)(v_1 + v_2) \quad (\text{A-2})$$

La force  $F_e$  exercée sur le moteur éolien par l'air est égale à la variation de la quantité de mouvement du fluide lors de la traversée de la surface  $S$  :

$$F_e = mv_1 - mv_2 = m(v_1 - v_2) = \dots \times s \times v \times (v_1 - v_2) \quad (\text{A-3})$$

Le travail produit par cette force dont le point d'application se déplace d'une distance  $V$  en une seconde, par rapport aux molécules d'air en mouvement, est la puissance absorbée par l'éolienne :

$$P = F_e \times v = \dots \times s \times v^2 \times (v_1 - v_2) \quad (\text{A-4})$$

Il vient que :

$$\frac{1}{2} \times \dots \times s \times v \times (v_1 - v_2)(v_1 + v_2) = \dots \times s \times v^2 \times (v_1 - v_2) \quad (\text{A-5})$$

D'où la vitesse au niveau des pales est :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{A-6})$$

L'expression de la puissance devient alors :

$$P = \frac{1}{4} \times \dots \times s \times (v_1 + v_2)^2 (v_1 - v_2) \quad (\text{A-7})$$

Posons  $X = \frac{v_1}{v_2}$ , un coefficient compris entre 0 et 1 puisque  $v_1 < v_2$ .

Ainsi :

$$\begin{cases} P = \frac{1}{4} \times \dots \times s \times (v_1)^3 (1+X)^2 (1-X) \\ P = \frac{1}{2} \times \dots \times s \times (v_1)^3 \times \left[ \frac{1}{2} \times (1+X)^2 (1-X) \right] \end{cases} \quad (\text{A-8})$$

Avec :

$$C_p = \left[ \frac{1}{2} \times (1+X)^2 (1-X) \right] \quad (\text{A-9})$$

$$P = \frac{1}{2} \times \dots \times s \times (v_1)^3 \times C_p \quad (\text{A-10})$$

En général,  $0.2 < C_p < 0.8$  pour les éoliennes rapides [6].

La valeur maximale de  $P$  s'obtient par :

$$\frac{dp}{dx} = 0 \Rightarrow X_{\max} = \frac{1}{3} \quad (\text{A-11})$$

Reportant cette valeur de  $x$  dans les expressions de (A-9) et de (A-10), il vient :

$$P_m = \frac{16}{27} \times \left[ \frac{1}{2} \times \dots \times s \times (v_1)^3 \right] \quad (\text{A-12})$$

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.592 \quad (\text{A-13})$$

$$P_m = 0.592 \times \left[ \frac{1}{2} \times \dots \times s \times (v_1)^3 \right] \quad (\text{A-14})$$

Alfred Betz, constate que le facteur axial d'induction qui maximise le coefficient de puissance est égal à  $1/3$ , où on déduit que la valeur maximum du  $C_p$  est 0,593, c.-à-d.

la turbine seulement peut extraire 60% de toute l'énergie cinétique du vent dans des conditions idéales.

## Annexe B

### B.1 Transformation de coordonnées abc- et -dq

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{B-1})$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{B-2})$$

### B.2 Transformation de coordonnées dq - et -abc

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (\text{B-3})$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{B-4})$$

## Annexe C

### C.1 Les paramètres de la Turbine éolienne

Le rayon de la voileure	$R$	0.5 m
Hauteur de la voileure	$H$	2 m
La masse volumique de l'air		1.2 kg/m <sup>3</sup> .

### C.2 Les paramètres de la GSAP

Puissance nominale	$P_n$	500 Watt.
Tension nominale	$V_n$	220 Volt.
Fréquence nominale	$f$	50Hz
Résistance d'une phase statorique	$R_s$	0.985 Ohm.
Inductance statorique direct	$L_d$	2.7 mH.
Inductance statorique quadratique	$L_q$	2.7 mH
Flux des aimants	$f$	0.15 Wb
Nombre de paire de pôles	$p$	4
Moment d'inertie	$J$	1.1 10 <sup>-3</sup> N.m.s <sup>2</sup> /rd.
Coefficient de frottement	$F$	6 10 <sup>-3</sup>

### C.3 Les paramètres de la charge

Inductance	$L_{ch}$	2 mH
Résistance	$R_{ch}$	50 Ohm