

**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 DE TECHNOLOGIE**



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

**OPTION : COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES**

**Thème**

**Etude et contrôle d'une turbine éolienne a axe  
verticale couple a un générateur éolien**

**Présenté par :**

**Dlimi Faiza**

**Djelaili Zohour**

**Encadré par :**

**Dr. Harrouz Abdelkader**

**Année universitaire 2019/2020**

# **Dédicace**

Merci notre Dieu de nos 'avoir donné la capacité d'écrire et de penser,

Force et patience pour aller au bout du rêve.

Donner ce travail à nos parents Dieu les protège et les protège.

Au superviseur (Dr. HAROUZ ABDELKADER).

Et à notre famille (DLIMI- DJELAILI).

Pour nos amis dans l'étude nous dédions ce travail.

*Faiza, zohour*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre stage et qui nous ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions dans un premier temps remercier, notre directeur de mémoire **HARROUZ Abdelkader**, Maître de Conférences « classe A » à l'Université d'Adrar, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de l'université d'Adrar et les intervenants professionnels responsables de notre formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Monsieur, **YAICHI IBRAHIM**, Maître à l'Université d'Adrar, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Qui nous avons beaucoup appris sur les défis à relever dans le monde des affaires. Il a partagé ses connaissances et expériences dans ce milieu, tout en nous accordant sa confiance et une large indépendance dans l'exécution de missions valorisantes.

Mademoiselle **Fatiha Bekraoui**, pour ses conseils pour avoir assuré la partie théorique de notre travail.

Monsieur **Hamza Djelaili**, technicien chez l'unité éolienne de KABERTEN à Adrar Qui nous avons guidé pendant la durée de stage, par ses paroles, ses conseils qui ont guidé nos réflexions et a accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant notre recherche

Nos parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

## المخلص

تعتمد الطاقة المتاحة لنظام طاقة الرياح بشكل أساسي على سرعة الرياح. بالإضافة إلى ذلك، نظام الرياح يعطي مخرج استطاعة التي تتغير بدلاله سرعة المولد الذي هو اله متزامنة ذات المغناطيس الدائم في حالتنا. بالإضافة الى ذلك هناك نقطة مثالية التي تمكن من الحصول على اكبر استطاعة مثاليه يتم ضبط هذه النقطة من خلال العمل على سرعة المولد المتزامن . يتكون نظام الدراسة عنفة هوائية تزود بطاريات اثناء استعمال مقوم متحكم كواجهة.

## كلمات مفتاحية

اله متزامنة ذات ممغنط دائم , التحكم في وضع انزلاق, تعديل عرض النبض , نظام ذو هيكل متغير, تعظيم قوة الاستطاعة.

## RESUME

La puissance disponible d'un système éolien dépend principalement de la vitesse du vent. De plus, le système éolien donnera une sortie en puissance qui varie en fonction de la vitesse de sa génératrice qui est une MSAP (machine synchrone à aimants permanents) dans notre cas. Autrement dit, il existe un point de fonctionnement optimal qui permet de tirer profit au maximum de la puissance disponible. Ce point est ajusté en agissant sur la vitesse de la MSAP. Le système que nous désirons étudier consiste en une éolienne alimentant des batteries tout en utilisant un redresseur commandé comme interface.

## LES MOTS CLÉS

GSAP, CMG, SCV, MLI, MSAP, MPPT.

## Abstract

The available power of a wind power system depends mainly on the wind speed. In addition, the wind power system will give a power output, which varies according to the speed of its generator, which is an MSAP (synchronous machine with permanent magnets) in our case. In other words, there is an optimum operating point that allows you to make the most of the available power. This point is adjusted by acting on the speed of the MSAP. The system we wish to study consists of a wind turbine feeding batteries while using a controlled rectifier as an interface.

## KEY WORDS

PMSG, SMC, VSS, PWM, PASM, MPPT.

## Sommaire

### REMERCIEMENTS

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

### **Chapitre I:état de l'art et généralités sur les énergies renouvelable**

I-1 Introduction ..... 4

I-2 Génération d'énergie renouvelable : ..... 4

I-2 -1 Energie solaire : ..... 4

I-2-1-1 Energie solaire photovoltaïque : ..... 5

I-2-1-2 Energie solaire thermique : ..... 6

I-2-2 Energie hydraulique : ..... 7

I-2-3 Energie géothermique : ..... 7

I-2-4 La biomasse : ..... 8

I-2-5 Energie marine : ..... 9

I-3 L'énergies éoliennes : ..... 10

I-3-1 Généralités : ..... 11

I-3-2 Historique : ..... 11

I-4 Vitesse et direction du vent : ..... 12

I-4-1 Gisment de vent en Algerie: ..... 13

I -5-1 Mât : ..... 15

I -5-2 Nacelle ..... 15

I-6 Conversion d'énergie éolienne ..... 17

I-7 Les types des éoliennes ..... 18

I-7-1Eolienne à axe vertical ..... 19

I-7-1-1 Éolienne de type Savonius ..... 19

I-7-1-2 Éolienne de type Darrieus .....	20
I-7-1-3Principe de fonctionnement .....	21
I-7-1-4Avantages et inconvénients .....	22
I-7-2 Eoliennes à axe horizontal .....	22
I-7-2-1Principe de fonctionnement .....	23
I -7-1-3 Avantages et inconvénients .....	23
I.8- Modes de fonctionnement des éoliennes : .....	24
I.-8-1Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique .....	24
I-9-2. Eolienne alimentant une charge isolée .....	25
1-9-3. Zones de travail de l'éolienne .....	25
I-10 Avantage et inconvénients .....	27
Conclusion.....	29

## **CHAPITRE II : étude et modélisation de machine synchrone a aimant permanant**

II.1.Introduction : .....	29
II.2 Principe de conversion d'énergie .....	29
II.3.Généralités sur la machine MSAP : .....	30
II.3.1 Constitution de la MSAP : .....	31
II.3.2 Structure de la MSAP : .....	32
II.3.2.1 MSAP sans Pièces Polaires .....	33
II.3.2.2 MSAP avec Pièces Polaires.....	34
II.3.3 Les aimants permanents dans le rotor : .....	35
II-3-3-1 Motif de choix de la génératrice (GSAP) pour une éolienne .....	38
II 3-3-2 Intérêt des aimants : .....	40
II -3-4 Principe de fonctionnement de la MSAP : .....	41
II -3-5 les Avantages et Inconvénients de MSAP : .....	41
II -4 Modélisation de la GSAP : .....	43
II-4-1 Hypothèses simplificatrices : .....	43

II -4-2 Equations de la machine synchrone à aimants permanents :.....	43
II-4-2-1 Equations de tension et flux : .....	44
II -4-2-2 Equation mécanique.....	44
II-4-3 Transformation de PARK.....	45
II-4-3-1 Passage triphasé au biphasé.....	45
II-4-3-2 Passage biphasé au triphasé.....	46
II.5 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park.....	46
II.5.1 Equations électriques .....	46
II.5.2 Calcul de puissance .....	47
II.5.3 Couple électromagnétique.....	47
II-6 Simulation de la GSAP :.....	48

### **CHAPITRE III :étude et modélisation des éléments éoliennes**

III-1 introduction.....	54
III-2 le vent.....	54
III-3La turbine éolienne .....	55
III-4 modélisation de la partie mécanique de l'éolienne .....	55
III-4-1 modélisation de vent .....	55
III.4.2 Modélisation d'une turbine éolienne .....	56
III.4.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine .....	56
III-4-4 modèle de turbine .....	58
III-4-5Modèle du multiplicateur.....	61
III .5 Modélisation mécanique du couplage turbine – génératrice .....	62
III-6 modèle de GSAP.....	63
III -7- Les simulations.....	64
Conclusion.....	66

## CHAPITRE IV :CONTROLE DE SYSTEME AEROGENERATEUR

IV-1 Introduction .....	69
IV-2 la technique de maximisation de puissance MPPT .....	69
IV.3. la théorie du contrôle par mode de glissement(CMG) :.....	71
IV.3.1 Objectif de la commande par mode glissant .....	72
IV.3.2 Principe du contrôleur à mode glissant .....	72
IV.3.3 Conception de la Commande par Mode de Glissement .....	73
IV.3.4 Application de la commande par mode glissant au GASP .....	73
IV.4 la commande par MLI.....	76
IV.4 .1 Redresseur MLI : .....	76
IV.4.2 Modèle du redresseur MLI .....	77
IV.4.3Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI de tension : .....	78
IV.5 Simulation et interprétation .....	79
Conclusion.....	81
Conclusion générale.....	81
BIBLIOGRAPHIE.....	
ANNEX .....	



## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

FIGURE I. 1 LES TYPES D'ÉNERGIE SOLAIRE .....	5
FIGURE I. 2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE .....	6
FIGURE I. 3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE.....	7
FIGURE I. 4 GEOTHERMIE HAUTE ENERGIE.....	8
FIGURE I. 5 SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE USINE BIOMASSE.....	9
FIGURE I. 6 ATLAS D EOLIENNE ON ALGER.....	14
FIGURE I. 7 LES CONSTITUTIONS DE TURBINE EOLIENNE.....	15
FIGURE I. 8 CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE .....	18
FIGURE I. 9 LES TYPES DES ÉOLIENNES .....	18
FIGURE I. 10 ÉOLIENNE DE TYPE SAVONIUS .....	20
FIGURE I. 11 ÉOLIENNE DE TYPE DARRIEUS.....	21
FIGURE I. 12 EOLIENNE A AXE HORIZONTALE.....	23
FIGURE I. 13 PRINCIPE DE LA CONVERSION DE L'ENERGIE DANS UNE EOLIENNE .....	24
FIGURE I. 14DIAGRAMME DE LA PUISSANCE UTILE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT .....	26

### CHAPITRE II

FIGURE II. 1 LA CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE AU NIVEAU DE L'AEROGENERATEUR.....	30
FIGURE II. 2 MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANANT .....	31
FIGURE II. 3 TYPES DE ROTOR .....	32
FIGURE II. 4 MACHINES A AIMANTS SUPERFICIELS.....	33
FIGURE II. 5 MACHINES A AIMANTS ENTERRES .....	33
FIGURE II. 6 MSAP SANS PIECES POLAIRES.....	34
FIGURE II. 7 MSAP AVEC PIECES POLAIRES .....	34
FIGURE II. 8 MACHINES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS MONTES EN SURFACE.....	35
FIGURE II. 9 MACHINES SYNCHRONES À AIMANTS PERMANENTS INSÉRÉ.....	36
FIGURE II. 10 MACHINES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS ENTERRES.....	36
FIGURE II. 11 COURBE DE DESAIMANTATION.....	38
FIGURE II. 12 GSAP A FLUX RADIAL .....	39
FIGURE II. 13 GSAP A FLUX AXIAL.....	39
FIGURE II. 14 GSAP A FLUX TANGENTIEL .....	40

FIGURE II. 15 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE MSAP .....	41
FIGURE II. 16 SCHEMA REPRESENTATIF DE LA MSAP A MODELISER.....	43
FIGURE II. 17 BLOC DE SIMULATION DE GSAP .....	48
FIGURE II. 18 : EVOLUTION DES TENSIONS STATORIQUE EN FONCTION DU TEMPS (CR=5 N.M PUIS CR=4.2N.M A L'INSTANT T=0.5S) POUR LA MEME INDUCTANCE CHARGE LCH.....	50
FIGURE II. 19 EVOLUTION DE LA TENSION STATORIQUE D'UNE PHASE EN FONCTION DU TEMPS POUR DEUX VITESSE D'ENTRAINEMENT DIFFERENTES (RCH =200Ω PUIS RCH =150 Ω A L'INSTANT T=0.5S) POUR LA MEME INDUCTANCE CHARGE LCH.....	51

### CHAPITRE III

FIGURE III. 1 PRINCIPAUX ORGANES DU SYSTEME DE CONVERSION EOLIENNE .....	54
FIGURE III. 2 MODELE MECANIQUE SIMPLIFIE DE LA TURBINE.....	57
FIGURE III. 3 SCHEMA BLOC DU MODELE DES PALES .....	57
FIGURE III. 4 TURBINE EOLIENNE .....	58
FIGURE III. 5 VOILURE A AXE VERTICAL DE TYPE SAVONIUS .....	59
FIGURE III. 6 COURBE CARACTERISTIQUE RETENUE POUR LES ESSAIS.....	60
FIGURE III. 7 MODELE DU COUPLE EOLIEN SOUS SIMULINK.....	60
FIGURE III. 8 LA PUISSANCE MECANIQUE DE LA TURBINE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION .....	61
FIGURE III. 9 SCHEMA BLOC DU MODELE DU MULTIPLICATEUR DE VITESSE...	62
FIGURE III. 10 MODELE DU COUPLE DE LA TURBINE EOLIENNE.....	63
FIGURE III. 11 SCHEMA BLOC DE LA TURBINE EOLIENNE.....	63
FIGURE III. 12 A : VITESSE DE VENT, B : VITESSE MECANIQUE DE LA TURBINE, C : COUPLE EOLIENNE, D : LA VITESSE ELECTRIQUE DE LA GSAP EN FONCTION DE TEMPS .....	66

### CHAPITRE IV

FIGURE IV. 1 CARACTERISTIQUES D'UNE EOLIENNE DANS LE PLAN PUISSANCE, VITESSE DE ROTATION .....	70
FIGURE IV. 2 SCHEMA FONCTIONNEL DE COMMANDE AVEC L'ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE.....	70
FIGURE IV. 3 SCHEMA BLOCK DE MPPT SOUS SIMULINK.....	71
FIGURE IV. 4 RÉSULTAT DE SIMULATION DE LA COMMANDE MPPT .....	71
FIGURE IV. 5 LA COMMANDE EN MODE GLISSANT SOUS SIMILINK.....	76
FIGURE IV. 6 LE REDRESSEUR MLI .....	77
FIGURE IV. 7 SCHEMA DE L ASSOCIATION GSAP-REDRESSUR MLI .....	78
FIGURE IV. 8 SCHEMA D'UN BRAS DU REDRESSEUR A MLI. ....	78
FIGURE IV. 9 la synoptique de la commande MLI du redresseur et GSAP .....	79
FIGURE IV. 10 TENSION REDRESSE.....	79
FIGURE IV. 11 LE CAURANT $I_d$ .....	80
FIGURE IV.12 LE CAURANT $I_q$ .....	79

FIGURE IV.13 LA VITESSE DE GSAP .....	79
FIGURE IV.14 LE COUPLE $C_e$ .....	80

## SYMBOLE

$a_k$ : Amplitude des harmoniques

$\omega_k$  : Fréquence des harmoniques

$C_p$ : coefficient de puissance

$P_m$  la puissance instantanée

$P$  :la densité volumique de l'air

$H$  : hateur pale

$R$  : rayon de pale

$V$  : la vitesse de vent

$\Lambda$  : la vitesse spécifique

$\Omega$  : la vitesse angulaire de rotation des pales

$C_e$  : couple éolienne

$G$  : le gain du multiplicateur de vitesse

$C_{em}$ : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

$C_g$  : Le couple issu du multiplicateur

$C_f$ : Le couple résistant dû aux frottements

$f$  : le coefficient de frottement total du couplage mécanique

$\theta$  : l'angle entre un axe de référence du stator et un axe du pôle nord du rotor

$p$  : le nombre de paires de pôles

$R_s$  :la résistance d'une phase statorique,

$V_d, V_q$  et  $I_d, I_q$  : les composantes sur les axes d et q de la tension

$\Phi_f$ : le flux d'excitation produit par les aimants permanents

$L_d$  et  $L_q$  : les inductances

$U$ :vecteur de commande.

$U_{eq}$  : vecteur de commande équivalente.

$U_n$ : vecteur de commande discontinu.

$X$ : vecteur de variables.

$S_i$ : vecteur surface de commutation

$E$ : l'erreur

$\delta$ : constante positive

$X_{ref}$ : le signal de référence

$X$ : la variable d'état.

$K$ : le gain de commande

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis les anciennes civilisations, l'Homme a découvert la notion de la force et il a compris qu'il peut puiser dans la nature pour s'en procurer afin de prospérer sur terre, et dompter les obstacles qu'il rencontre dans sa démarche quotidienne vers le progrès. Une de ces forces de la nature est le vent qui est appelée actuellement l'énergie éolienne.

L'Homme a très vite compris la manière de capter cette énergie et comment l'exploiter dans des systèmes simples pour moulinier les grains ou pomper l'eau. On trouve d'ailleurs des ancêtres d'éoliennes jusque dans la perche ancienne. Mais il ne l'a utilisée comme source d'énergie électrique que vers les années quarante du siècle passé. Car jusqu'alors l'électricité était produite à partir des énergies fossiles, du géothermique et de l'hydraulique. Arriva ensuite le nucléaire pour remplacer les ressources traditionnelles déjà en épuisement avec un rendement très important mais des déchets radioactifs très dangereux, et surtout des risques néfastes pour l'environnement et les personnes en cas d'accident ou de séisme ou même d'attaque sur les sites concernés.

Avec l'augmentation de la pollution à cause de l'industrialisation croissante de la majorité des pays, et la surpopulation sur l'ensemble du globe, la demande sur l'énergie électrique est de plus en plus croissante et les sources d'énergie traditionnelles de moins en moins abondantes. L'Homme s'est alors orienté vers des énergies renouvelables mais surtout propres et sans danger.

De nos jours les efforts s'orientent tous vers le développement de la production de l'énergie solaire et éolienne soit à caractère local soit pour la production à grande échelle, suivant le potentiel du site exploité. Du fait de l'abondance de ces ressources et de leur caractère écologique (aucune émission de gaz ni déchets), elles sont considérées comme étant les énergies de l'avenir. Dans ce contexte notre travail va s'intéresser à la filière éolienne et aux outils de son exploitation et son développement.

La majorité des éoliennes installées étaient à vitesse fixe. Elles possèdent néanmoins de nombreux inconvénients : un faible rendement énergétique, dans la mesure où elles ne sont optimisées que pour un point de fonctionnement et une

courte durée de vie à cause des efforts importants subis par leur structure. En outre, ces turbines génèrent des fluctuations considérables de la tension et de la puissance du réseau lors des rafales du vent.

Les éoliennes à vitesse variable ont été alors introduites pour apporter des solutions à ces problèmes. Les fluctuations de puissance peuvent être atténuées avec un dispositif qui permet des vitesses de rotation variables et par conséquent d'emmagasiner l'énergie des rafales sous forme d'énergie cinétique dans les grandes masses tournantes. Ainsi la production annuelle d'une éolienne à vitesse variable est accrue de 5% à 10% par rapport à une éolienne à vitesse fixe.

Parmi différents types de structures éoliennes, la génératrice synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes à vitesse variables plus attractifs. Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien. Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation qui nécessite un multiplicateur mécanique.

La machine synchrone à aimants permanents est également caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible et de faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes, un rendement meilleur et meilleure contrôlabilité, ce qui fait d'elle une sérieuse concurrente de la machine asynchrone.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents à attaque directe. Nous allons également étudier une stratégie de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine ainsi que de contrôleur de mode glissement permettant de contrôler les tensions de sortie de GSAP fournie à la charge est ça l'objectif de notre travail.

Notre mémoire sera structurée comme suit :

- Le premier chapitre expose l'Etat de l'art sur l'énergie renouvelable
- Le deuxième chapitre traite l'étude et la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanent.

- Le troisième chapitre est consacré à l'étude et modélisation des éléments éoliennes.
- L'étude de la commande par mode glissant et son application à la GSAP est traitée dans le dernier chapitre.

Ce travail s'achève par une conclusion générale qui résume tout le travail



**Chapitre I:**  
**État de l'art et généralités**  
**sur les énergies**  
**renouvelable**

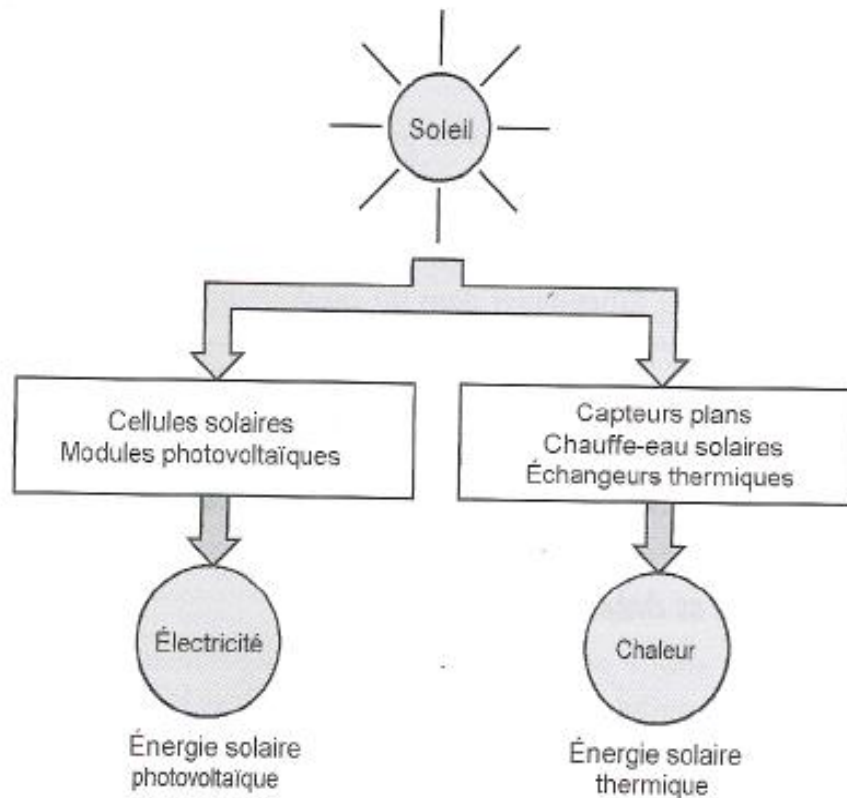
## **I.1 Introduction**

Les énergies renouvelables sont des formes finales d'énergie (électricité, chaleur ou carburant) obtenues à partir de sources renouvelables d'énergie. Contrairement aux sources d'énergie classiques, fossile ou nucléaire, les énergies primaires renouvelables sont inépuisables à très long terme, car issues directement de phénomènes naturels liés au soleil, au vent, aux flux hydrauliques, à la chaleur naturelle de la terre, etc. Leur consommation ne limite pas leur utilisation future. En d'autres termes, elles se reconstituent plus rapidement qu'elles sont utilisées. Les énergies renouvelables reposent sur des flux, par opposition aux énergies classiques qui s'appuient sur des stocks issus de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) ou fissiles (uranium, plutonium, etc.). Les énergies renouvelables ont pour principaux avantages de pouvoir être produites sur place et à un coût limité pour l'environnement, par comparaison avec l'exploitation des énergies fossiles. Plusieurs défis sont cependant à relever concernant les énergies renouvelables : des coûts d'exploitation élevés, des problèmes de stockage et des difficultés de raccordement au réseau.

## **I.2 Génération d'énergie renouvelable :**

### **I.2 .1 Energie solaire :**

Au sein de l'énergie solaire, il faut différencier le solaire photovoltaïque et le solaire Thermique. Le premier génère de l'électricité grâce à la conversion de la lumière du jour. Ce sont les photons, des composants de cette lumière, qui libèrent les électrons des cellules photovoltaïques présentes sur les panneaux solaires. Ces cellules sont constituées de matériaux dont le semi-conducteur plus communément utilisé est le silicium. Le courant continu ainsi produit est transformé ensuite en courant alternatif grâce à un onduleur. Quant à lui, le solaire thermique permet la production d'eau chaude grâce à des capteurs solaires. Il existe également des centrales électriques solaires, qui utilisent un procédé thermique à très haute température, ce qui induit la transformation de l'eau en vapeur pour alimenter une turbine et produire enfin de l'électricité [1].

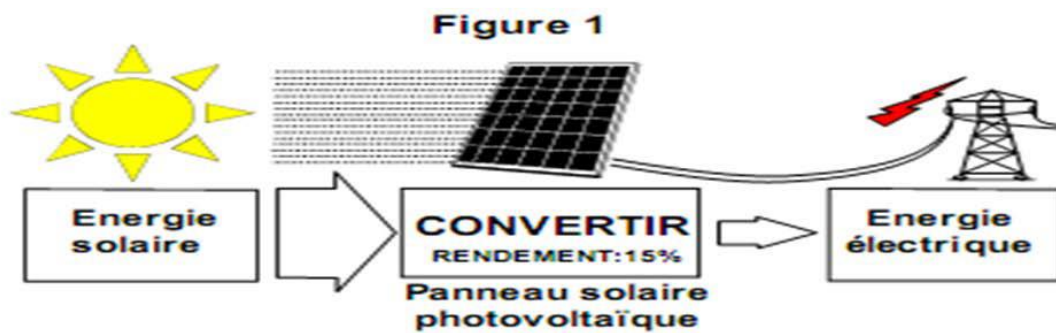


**Figure I.1 les types d'énergie solaire**

### **I.2.1.1 Energie solaire photovoltaïque :**

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standards fournissent une puissance moyenne de 100 W par m<sup>2</sup> (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries. 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. [1].

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. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive



**Figure I.2 principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque**

### **I.2.1.2 Energie solaire thermique :**

Le solaire thermique utilise le soleil tout comme le photovoltaïque mais de façon différente, puisqu'il récupère de la chaleur qu'il transmet ensuite à un circuit d'eau qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des Absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C.

Cette énergie représente un rendement élevé et permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement. La marge de manœuvre, en matière de substitution aux énergies fossiles, est très importante : s'il est certes impossible de se chauffer uniquement par le soleil (la chaleur ne se stocke pas sur de longues périodes), il serait toutefois possible de produire 50% de l'énergie de chauffage dont nous avons besoin. Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs sont élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation on locale (principalement chauffage individuel, piscines). Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement. [1].

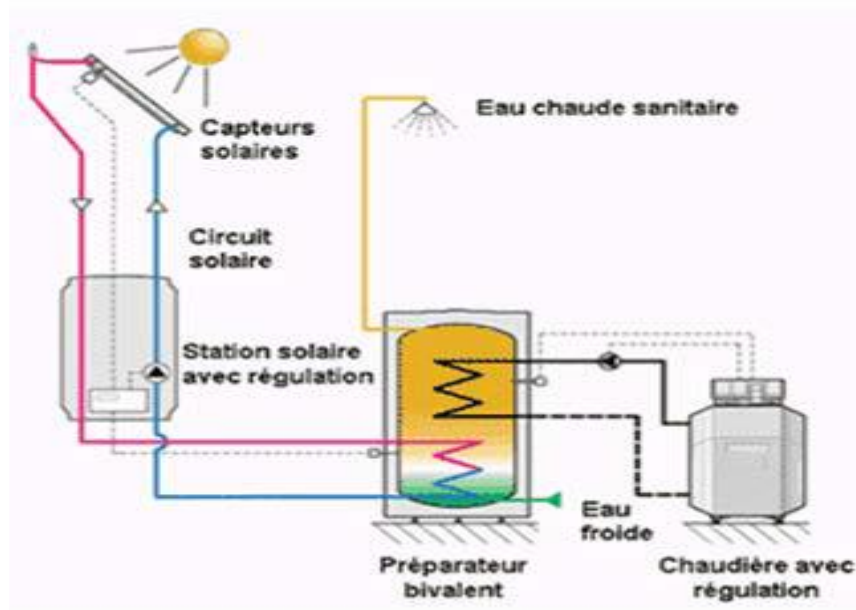


Figure I.3 le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique

### I.2.2 Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique utilise la force du courant qui passe à travers une centrale afin de faire tourner une turbine qui entraîne à son tour un générateur électrique qui injecte de l'électricité sur le réseau. Contrairement à l'éolien et au solaire, l'énergie hydroélectrique est relativement peu dépendante des conditions climatiques. Selon les saisons, les débits enregistrés au niveau des centrales sont toutefois fort différents. Si l'on parle peu de ce type d'énergie en Belgique, son exploitation étant moins récente que celle du vent et du soleil, elle s'avère pourtant importante à l'échelle mondiale, puisqu'elle est à l'origine d'un peu plus de 16 % de la production d'électricité totale et d'environ deux tiers de la puissance électrique attribuée au renouvelable pour l'année 2013 [1].

### I.2.3 Energie géothermique :

La géothermie utilise la chaleur naturelle émanant des nappes aquifères présentes dans le sol pour fournir un système durable de chauffage pour les bâtiments (habitations, commerces, etc.). Si cette énergie géothermique peut être à l'origine de chaleur, elle permet également de produire de l'électricité, moyennant l'utilisation de turbines. Une vingtaine de pays produisent de

l'électricité géothermique, essentiellement en Amérique du Nord et en Asie. En Europe, c'est l'Italie qui fait clairement figure de meilleur élève de la classe en la matière. Pour 2013, l'énergie totale (chaleur et électricité) issue de la géothermie au plan mondial représenterait 167 TWh, dont un peu moins de la moitié pour la production d'électricité (76 TWh).

Pour ce qui est du volet thermique, l'eau chaude qui émane du sol est utilisée pour alimenter un système de chauffage en circuit fermé. C'est une source d'énergie qui ne dépend pas des aléas climatiques, mais qui requiert un potentiel géologique favorable. [1]

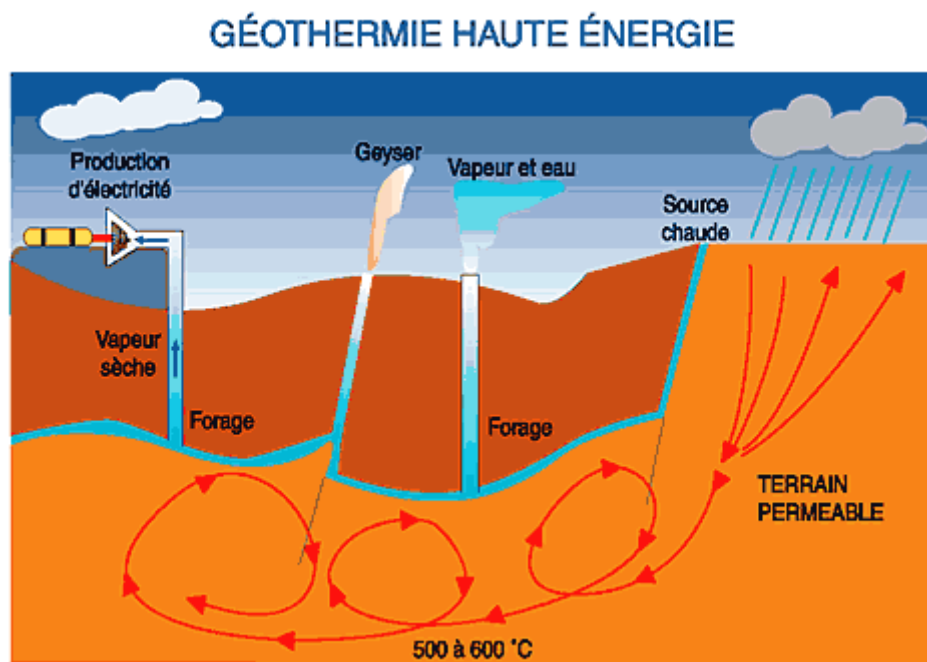


Figure I.4 Géothermie haute énergie

### I.2.4 La biomasse :

La biomasse concerne toutes les matières organiques qui peuvent produire de l'énergie suite à leur combustion ou à toute autre opération de transformation. Elle englobe ainsi tout ce qui se rapporte à la combustion directe du bois sous toutes ses formes (bûches, granulés, etc.) et de ses dérivés (déchets de l'exploitation forestière ou issus des scieries et des industries de transformation du bois telles que les menuiseries et les fabricants de parquets, meubles, etc.). Mais elle vise également le traitement des déchets de l'industrie agroalimentaire, ceux issus de l'agriculture, ainsi que les ordures ménagères. En effet, le biogaz

est obtenu grâce à la fermentation des déchets organiques et sa combustion produit de la chaleur ainsi que de l'électricité grâce à la cogénération. Si l'éolien et le solaire s'invitent régulièrement dans les médias, c'est pourtant la moins célèbre filière de la biomasse qui constitue la source la plus importante d'énergie renouvelable, que ce soit pour l'électricité, la chaleur ou le carburant. La raison principale qui explique l'importance de la biomasse à l'échelle mondiale est qu'une partie non négligeable de la planète utilise encore le bois pour se chauffer ou pour cuisiner. [1].

### Schéma de principe d'une usine biomasse

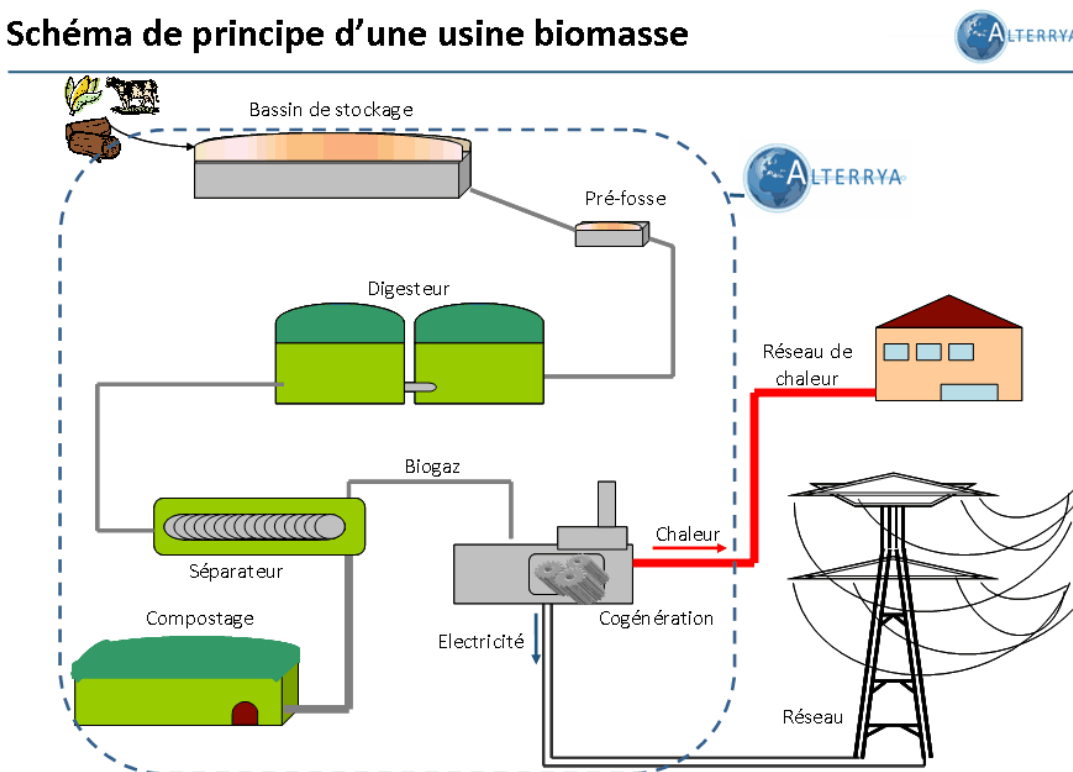


Figure I.5 le schéma de principe d'une usine biomasse

### I.2.5 Energie marine :

Les énergies marines sont l'ensemble des énergies exploitées en mer ou sur le littoral. Ces différentes énergies sont engendrées par l'énergie solaire et la gravité. Parmi ces énergies marines, on distingue :

- **L'énergie marémotrice**, qui exploite les courants de marée ;
- **L'énergie de la houle et des vagues** (houlomotrice), qui utilise les mouvements verticaux des ondes de houle ;

- **L'énergie des courants marins** (courant de houle, courant thermo halin, etc.), qui actionne différents types de turbine ;
- **L'énergie éolienne offshore**, qui profite des vents marins plus puissants et plus réguliers ;
- **L'énergie thermique des mers** (ETM), qui exploite le gradient thermique entre les eaux de surface et les eaux profondes.
- **L'énergie osmotique**, qui utilise les différences de salinité pour produire un flux d'eau.
- **la biomasse marine**, en particulier pour produire des biocarburants à partir des algues.

Les énergies marines ne sont donc pas uniquement hydrauliques. Elles ont aussi des composantes éoliennes, hydro thermiques, etc. L'exploitation de l'une ou l'autre de ces formes d'énergie renouvelable dépend surtout des spécificités locales, certains lieux étant plus propices à l'éolien offshore, d'autres aux hydroliennes, etc. [2].

### **I.3 L'énergies éoliennes :**

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement Diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver, et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [3].

Un aérogénérateur, plus communément est appelé éolien. Une éolienne a pour rôle de Convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de La génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :



- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de L'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à L'électronique de commande). [3].

### **I.3.1 Généralités :**

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'électricité. La production électrique éolienne est en plein développement industriel. Elle présente en effet de nombreux atouts : c'est tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre.

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

### **I.3.2 Historique :**

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. 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). Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte. [4].

#### **I.4 Vitesse et direction du vent :**

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant Modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression).

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse

moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s.

#### **I.4.1 Gisment de vent en Algérie:**

Le nouvel atlas éolien de l'Algérie a été réalisé sur la base de données de 95 stations météorologiques dont 21 représentent les stations les plus proches dans les pays limitrophes.

Les données utilisées sont les observations de vitesses de vent horaires et trihoraires enregistrées sur une période de 10 années consécutives entre 2004 et 2014.

La carte de vitesse obtenue donne une distribution de vitesses beaucoup plus précise et plus importante dans plusieurs sites, notamment dans les régions du Sahara. Ceci est dû à une répartition géographique plus ou moins uniforme entre le Sud et le Nord.

puisque plus de 43 stations de mesure sont réparties dans le Sud contre seulement 14 stations utilisées dans les précédents atlas vent.

La distribution géographique de la moyenne annuelle des vitesses de vent reflète des changements dans l'estimation de la ressource éolienne comparée aux atlas précédents, particulièrement au Sahara.

Ainsi, le site de In Salah affiche une vitesse moyenne de 6,4 m/s ; cette région était sous-estimée dans les travaux précédents.

Le site d'Adrar, dans le Sud-Ouest est caractérisé, quant à lui, par des vitesses moyennes atteignant 6,3 m/s. Ces deux sites avec Timimoun, délimitent approximativement 60000 km<sup>2</sup> d'espaces ventés ouverts. Dans l'extrême Sud-Ouest, le site de Tindouf affiche des vitesses autour de 6 m/s.

Grâce à la prise en compte de nouvelles stations de mesure, le nouvel atlas éolien montre dans la wilaya d'Illizi, des régions avec des vitesses dépassant les 5 m/s.

Un peu plus au Nord, le site de Hassi R'Mel affiche des vitesses moyennes assez importantes atteignant 6,5 m/s.

Au Nord, plusieurs microclimats sont aussi révélés d'ouest en est. Dans les Hauts-Plateaux à l'extrême Ouest, la région de Mecheria affiche une vitesse moyenne très intéressante de 5,6 m/s. Un peu plus à l'est, Tiaret et Djelfa présentent des vitesses de 5,6 m/s et 5,1 m/s respectivement.

Enfin, plus à l'est et au centre, M'Sila apparaît comme une région très intéressante avec une vitesse moyenne annuelle de 5,3m/s [1].

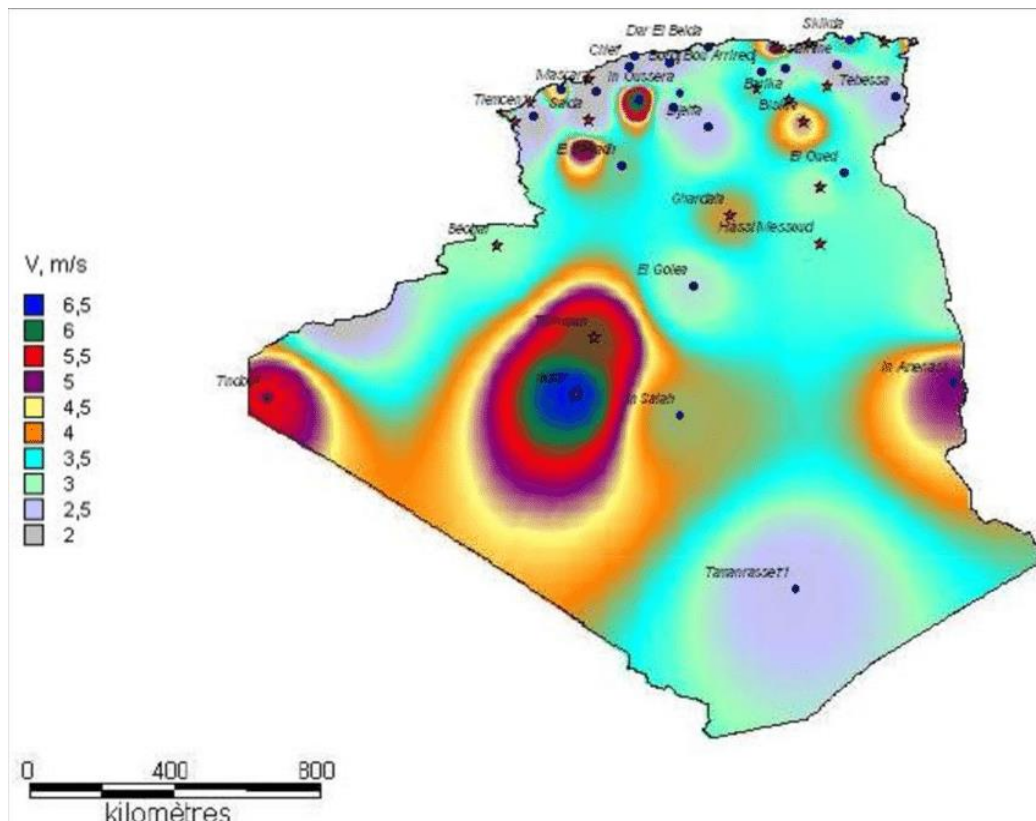
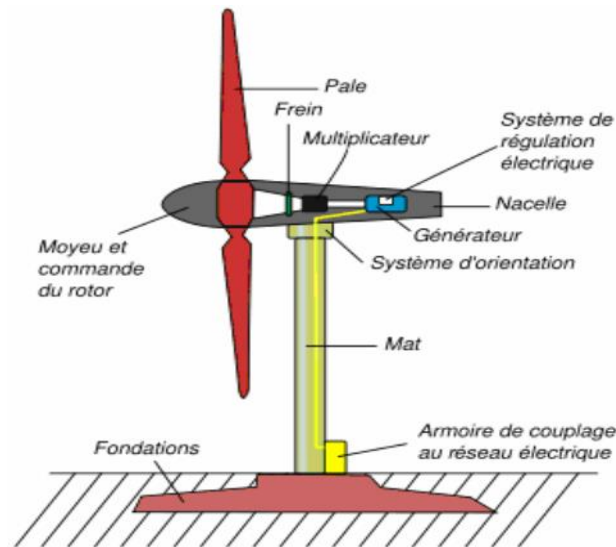


Figure I. 6 le gissement de vent en alger

### I.5 L' architecture d'une turbine eolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :



**Figure I. 7 les constitutions de la turbine eolienne**

### **I .5.1 Mât :**

le mât, généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). les éoliennes sont-elles si haut perchées C'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons...Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance .

### **I .5.2 Nacelle**

La nacelle est une structure en acier ou en fonte, installée au sommet du mât ; permet de regrouper tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de

l'éolienne. Pour les grandes éoliennes, elle pèse très lourd : plus de 30 tonnes, sa taille est celle d'une mini fourgonnette [5].

Les différents composants d'une nacelle :

- **Arbre de transmission** : Il reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner la génératrice électrique. Sur l'arbre de transmission se trouve le frein qui sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.
- **Un multiplicateur** : Appelé aussi transmission, il adapte la vitesse de rotation de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. On ne trouve pas ce composant dans les éoliennes munies des génératrices synchrones (transmission direct).
- **La génératrice** : La fonction de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Dans notre cas c'est une génératrice synchrone.
- **Le système de refroidissement** : Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement par air ou par eau.
- **Anémomètre** : Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et elle est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h) pour assurer la protection de l'éolienne.
- **Frein** : il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.
- **le système de control-commande** : il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'ex.
- **Le rotor et les pales**
- **Le rotor** : est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ

59%(limite de Betz). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne .Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

- **Le pale** : est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.
- **Le moyeu** : C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

## I.6 Conversion d'énergie éolienne

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le Phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol.

S'agissant du mât, il doit être dimensionné précisément en fonction de la machine, des Fondations...Plusieurs systèmes existent : haubané, haubané basculant, treillis, autoporteur... Pour qu'une éolienne produise...Quelques notions importantes Diapositives Plusieurs éléments doivent être pris avant installation. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins, Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m.La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. Il faut que cela reste cohérent avec le prix global de votre projet. L'observation du site (la présence de moulins,

d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation...) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps.

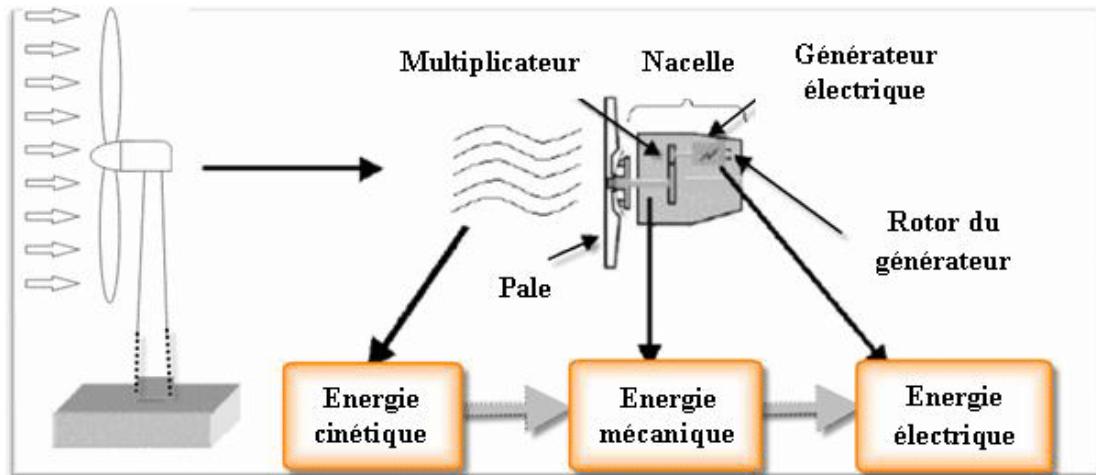


Figure I. 8 conversion de l'énergie éolienne

### I.7 Les types des éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal

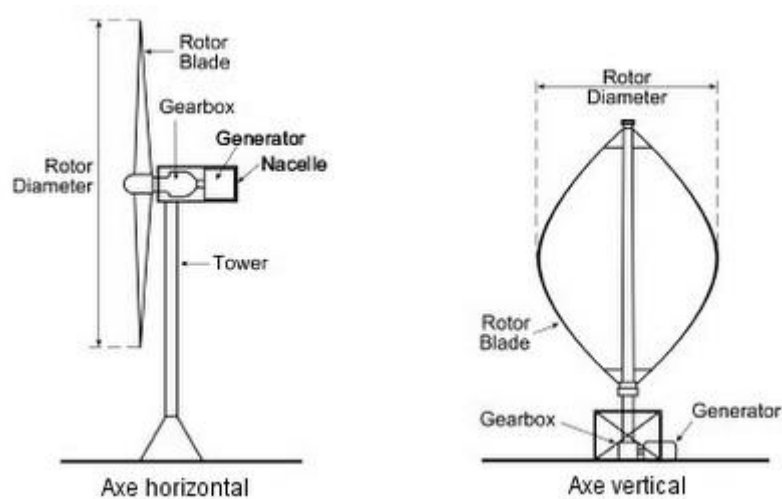


Figure I. 9 les types des éoliennes



### **I.7.1 Éolienne à axe vertical**

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour, mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles : les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924). [06]

#### **I.7.1.1 Éolienne de type Savonius**

C'est le modèle idéal pour les débutants. C'est presque impossible de faire plus simple et moins cher à réaliser. Une des applications les plus connues est d'ordre publicitaire. Il s'agit des fameux panneaux en tôle qui tournent sur eux-mêmes. On entend souvent dire que ce type d'éolienne n'est pas adapté à la production de courant. C'est à la fois vrai et faux. Des modèles commerciaux de conception récente s'avèrent être très productifs, ainsi que de nombreux modèles réalisés par des amateurs éclairés. Cela vaut vraiment le coup de se pencher sur cette conception, car elle possède de gros avantages. Elle démarre avec des vents très faibles, elle résiste bien aux vents violents, elle possède un bon couple et elle est peu bruyante. Son seul défaut est que sa vitesse est limitée, ce qui ne veut pas dire pour autant qu'il faille l'abandonner. De nombreux bricoleurs chevronnés ont contourné le problème de Lenteur par l'allongement des pales et une bonne démultiplication. Certes, on a plus l'habitude de trouver ce type d'éolienne pour le pompage de l'eau, qui est un domaine où elle excelle. Mais les choses sont en train d'évoluer grâce au progrès de l'aérodynamisme et à la passion de certains auto constructeurs. Pour se faire la main sur une première construction, c'est vraiment le modèle qu'il faut choisir [7].

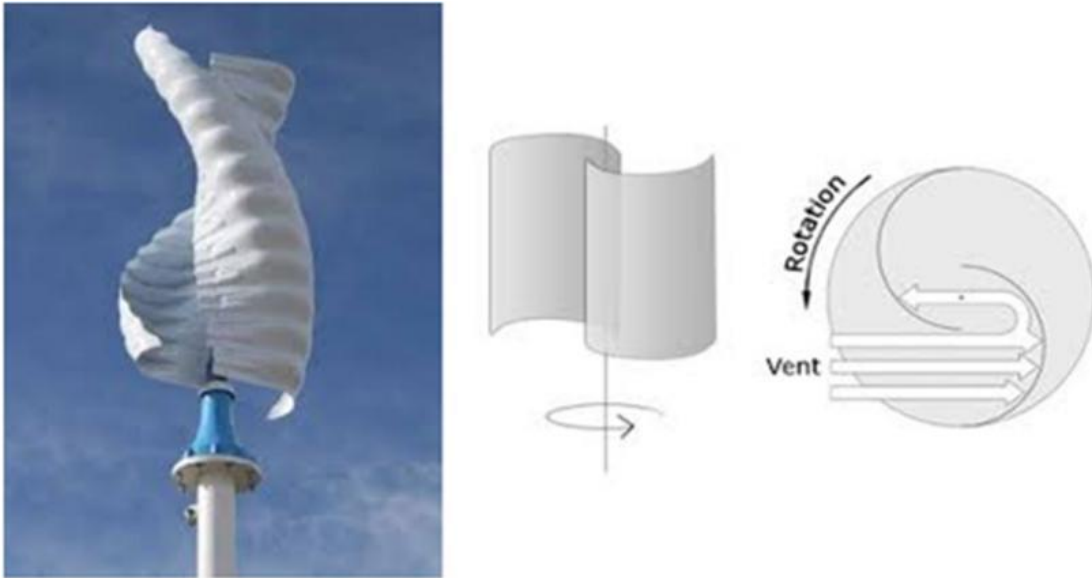


Figure I. 10 Éolienne de type Savonius

### I.7.1.2 Éolienne de type Darrieus

Cette éolienne peut fournir une puissance plus élevée que celle du type Savonius. Par contre, elle ne peut pas démarrer toute seule. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables, la résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation d'une génératrice en moteur).

Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépassent que très rarement 500 kW en raison de leur grande sensibilité. Leur rendement est plus important que celui d'une éolienne de type Savonius [7].

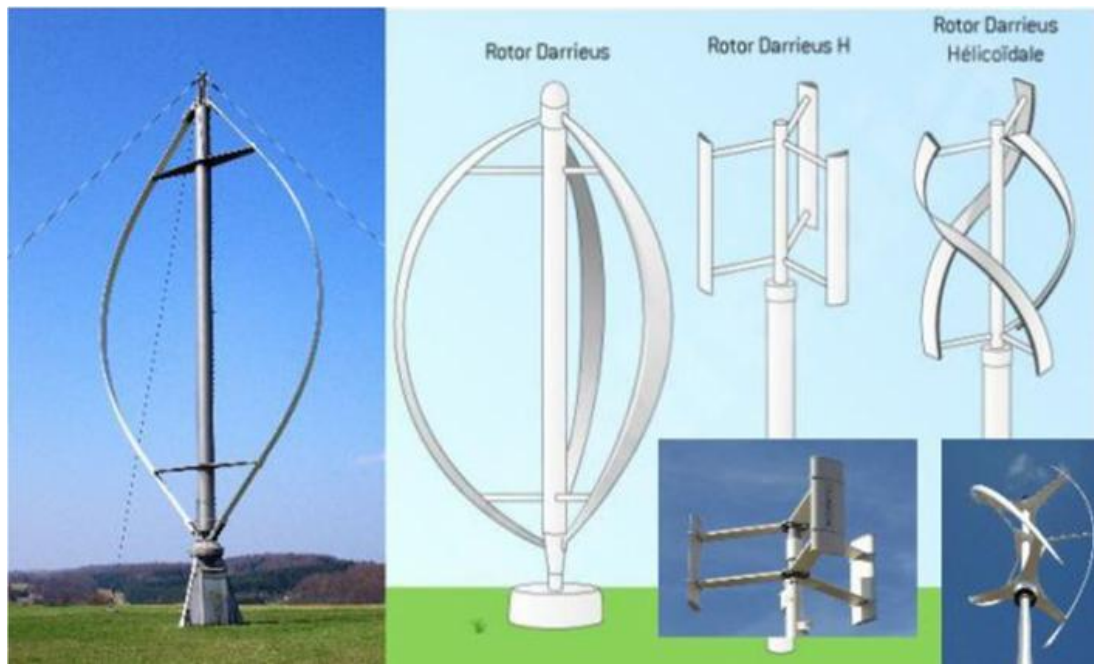


Figure I. 11 Éolienne de type Darrieus

### I.7.1.3 Principe de fonctionnement

Les éoliennes à axe vertical sont toutes pourvues d'une structure, d'un rotor, et d'un système de conversion. La structure est fixe et supporte l'ensemble de la mécanique, permettant de supporter l'ensemble des efforts et de réaliser la liaison pivot avec le rotor. La structure, dans certains cas, peut intégrer un mat afin de surélever l'équipement.

Le rotor est le solide tournant sur l'axe principal de rotation. Il est équipé des pales dont l'aérodynamique permettra de convertir l'énergie du flux en force poussant les pales, puis en couple sur l'axe de rotation du rotor. Certains rotor type cyclo turbine sont équipées de pales orientables. Pour ces machines le rotor est ainsi équipé de pales qui changent d'orientation à chaque tour de la machine.

Le système de conversion est l'équipement permettant de transformer la puissance mécanique transmise par le rotor ( $\text{couple} \times \text{vitesse}$ ) en puissance utilisable. Une éolienne, à l'identique d'un panneau solaire, dispose d'une courbe de fonctionnement complexe qui nécessite une régulation. La vitesse du rotor doit être ajustée en permanence pour correspondre au point optimum de fonctionnement, permettant d'optimiser la captation d'énergie pour chaque vitesse de vent. A l'identique des panneaux solaire pour lesquels le principe de recherche

du maximum s'appelle MPPT, une régulation intelligente de l'éolienne doit être réalisée. Le système de conversion intègre la régulation, bien souvent par le biais d'une génératrice et d'une conversion électronique de puissance permettant d'ajuster la vitesse et la puissance de l'éolienne. Il existe d'autres régulations plus rudimentaires tel qu'une pompe de relevage d'eau, ou un générateur de courant continu chargeant une batterie. Dans ce cas, le rendement est abaissé au profit de la simplicité du système.

### **I.7.1.4 Avantages et inconvénients**

- **Avantages**

- 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.

- **Inconvénients**

- 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.
- 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.

### **I.7.2 Eoliennes à axe horizontal**

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent.



**Figure I. 12** éolienne à axe horizontale

### **I.7.2.1 Principe de fonctionnement**

Les éoliennes à axe horizontal ont été inspirées des moulins à vent. Elles sont généralement formées de deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques : la puissance mécanique du vent fait tourner des pales reliées directement ou via un multiplicateur de vitesse à un alternateur (Poitiers, 2003). Ce dernier produit de l'électricité. Une éolienne est formée de trois parties principales : le rotor, la nacelle et la tour (El-Aimani, 2002). Les éoliennes à axe horizontal peuvent fonctionner en « amont » ou en « aval ».

Pour les éoliennes qui fonctionnent en amont, le vent frappe les pales directement. Il s'ensuit qu'elles doivent être rigides pour pouvoir résister au vent. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000 kW fonctionnent avec ce principe. Pour les éoliennes fonctionnant en aval, le vent frappe sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes.

### **I .7.1.3 Avantages et inconvénients**

#### **•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.

### • Inconvénient

- Coût de construction très élevé.

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

- Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

## I.8. Modes de fonctionnement des éoliennes :

### I.8.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

L'énergie cinétique du vent, captée par les pales, est transformée en énergie mécanique. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est assurée par un générateur de type synchrone ou asynchrone [8].

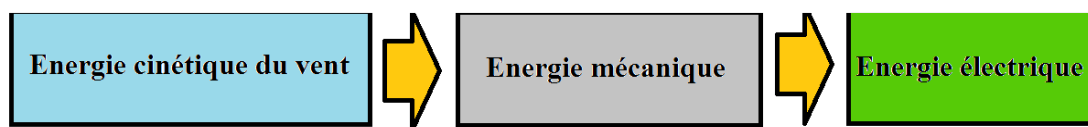


Figure I. 13 Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne

## I.9. MODES D'OPERATION D'UNE EOLIENNE

L'exploitation de l'énergie électrique produite par une éolienne peut se faire de deux manières ; selon qu'elle soit connectée au réseau ou alimentant une charge isolée.

### I.9.1. Eolienne connectée au réseau

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont le plus souvent regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 machines, mais on peut retrouver aussi des machines isolées connectées au réseau [7].

Le courant électrique acheminé à travers le réseau doit avoir une fréquence de 50 Hz avec une tension d'amplitude bien définie. Une éolienne raccordée au réseau se doit donc de fournir une tension respectant ces exigences, quelle que soit la vitesse du vent. Une première technique consiste à garder la vitesse de rotation de la génératrice constante. Cette dernière est alors obtenue par régulation notamment avec l'orientation des pales (Commande STALL). Mais il est également possible de faire fonctionner une éolienne à vitesse de rotation variable en utilisant un convertisseur de fréquence tel que le cyclo convertisseur.

A vitesse trop faible du vent, l'éolienne s'arrête en raison des forces de frottement sec qui s'opposent à la rotation de l'hélice. Cette diminution de la vitesse de rotation ne permet plus de fournir cette fréquence. Dans ce cas, l'éolienne devienne consommatrice d'électricité, elle est donc automatiquement déconnectée du réseau.

Si la vitesse du vent est trop forte (supérieure à 100 km/h par exemple), l'éolienne est mise en sécurité et déconnectée du réseau, ses pales sont "mises en drapeau" et s'arrêtent pour éviter des sollicitations qui pourraient les briser. Certaines éoliennes récentes continuent à tourner mais à vitesse réduite, diminuant ainsi le nombre de déconnexions du réseau et augmentant la production moyenne par vent fort.

### **1.9.2. Eolienne alimentant une charge isolée**

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple Pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel.

### **1.9.3 Zones de travail de l'éolienne**

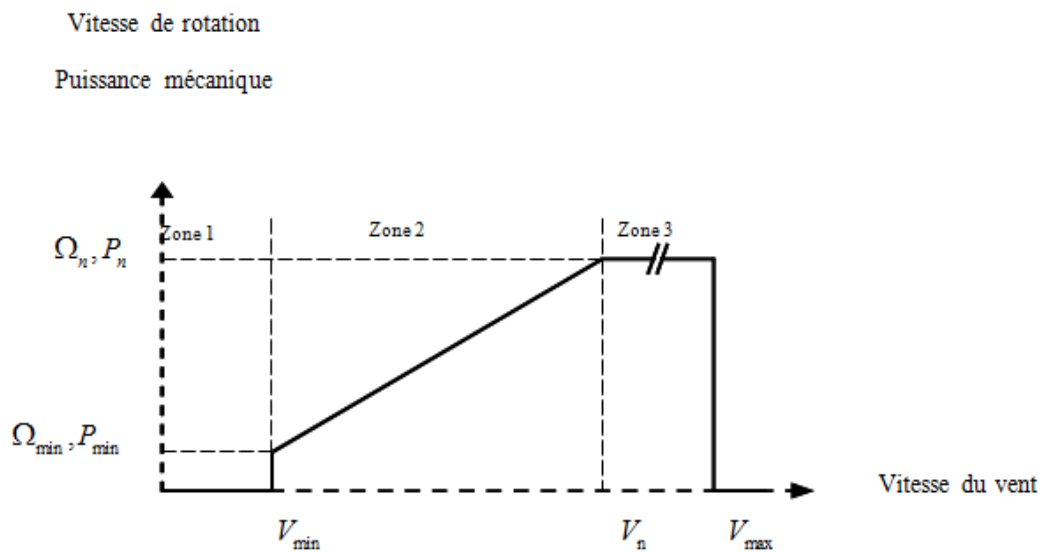
Le rôle de la régulation de vitesse de l'éolienne est d'assurer la sécurité de l'éolienne contre les vents violents (rafales) et d'optimiser l'extraction de la puissance du vent. Suite au diagramme de la Figure 1-14, une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre mécanique une puissance nominale

$P_n$  obtenue à partir d'une vitesse nominale du vent  $V_n$ . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier son mode de fonctionnement afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. A côté de la vitesse nominale  $V_n$ , on spécifie aussi:

- la vitesse de démarrage  $V_d$  à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- la vitesse maximale du vent  $V_m$ , avec laquelle, il y'aura plus de conversion de l'énergie du vent pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses  $V_n$ ,  $V_d$ ,  $V_m$  définissent quatre zones sur le diagramme de puissance utile en fonction de la vitesse du vent:

- **zone I**, où  $P = 0$  (la turbine à l'arrêt) .
- **zone II**, dans laquelle la puissance fournie dépend de la vitesse du vent  $V$ .
- **zone III**, où la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$ .
- **zone IV**, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.



**Figure I. 14** Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent

Il est noté que la plupart des éoliennes démarrent lorsque la vitesse du vent atteint une certaine valeur qui presque égale 3 m/s et s'arrêtent lorsque cette vitesse atteint 25 m/s. Généralement, les éoliennes sont dimensionnées afin d'exploiter au mieux les vents de puissance intermédiaire.



## I.10 Avantage et inconvénients

### • Avantages

-L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général.

-La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on Augure qu'elle doublera pour 2050 [08]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la Température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années [08]. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [08]. « L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub> ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux Énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [08].

-Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de Noix [08]. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides [08].

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [08].

-L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales

nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [08].

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

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [08].

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de Développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [08].

- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [07].

- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [07].

#### • Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

-L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [08].

-Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée [08].

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [08] [9]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent

pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines [08].

-La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [08].

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [08].

## **I.11 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons défini l'énergie éolienne et les types d'aérogénérateurs qui existent dans le milieu industriel. Le prochain chapitre nous consacrer avec bien détaillés sur la machine synchrone à aimant permanente qui est couplé dans la chaîne éolienne.

**CHAPITRE II : étude et modélisation  
de machine synchrone a aiment  
permanant**

## II.1 Introduction :

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (performances, robustesse, ...), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour une application en générateur couplé à une turbine éolienne. Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, ou les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité.

L'approche actuelle de modélisation des machines électriques est basée sur la théorie des deux axes qui transforme un système triphasé en un système biphasé équivalent, ce qui réduit la complexité du modèle et permet l'étude des régimes transitoires [13].

Nous nous attachons dans ce chapitre, à étudier et présenter la modélisation de génératrice synchrone à aimants permanent dans une chaîne éolienne de faible puissance dédiée au stockage sur batterie.

## II.2 Principe de conversion d'énergie

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 passent par la surface active  $S$  de la voilure [14].

Les aérogénérateurs permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui extrait, à l'aide des pales, une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique disponible sur le rotor ;
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique du rotor de la turbine et la convertie en énergie électrique, transmise par la suite au réseau électrique ou à une charge isolée.

La figure (II.1) représente la chaîne de conversion d'énergie au niveau de l'aérogénérateur.



**Figure II. 1 la chaîne de conversion d'énergie au niveau de l'aérogénérateur**

### II.3.Généralités sur la machine MSAP :

Aujourd'hui, les machines synchrones représentent une partie importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie et couvrent une gamme de puissance très large qui s'étend de quelques MW jusqu'à 1GW environ. Traditionnellement, les fortes puissances restent le domaine réservé pour la production d'électricité. En fonctionnement moteur, en revanche, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de MW. Le moteur synchrone fonctionnant en vitesse variable, le plus puissant connu à ce jour, à une puissance d'environ 100 MW, il est conçu pour une soufflerie de la NASA [15].

Une machine synchrone est une machine électrique dont les vitesses de rotation du rotor et du champ magnétique tournant du stator sont égales. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est génère soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position de ce champ est alors fixe par rapport au rotor, ce qui entraîne le synchronisme entre le champ magnétique tournant statorique et le rotor [16]. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques.



**Figure II. 2 Machine synchrone a aiment permanent**

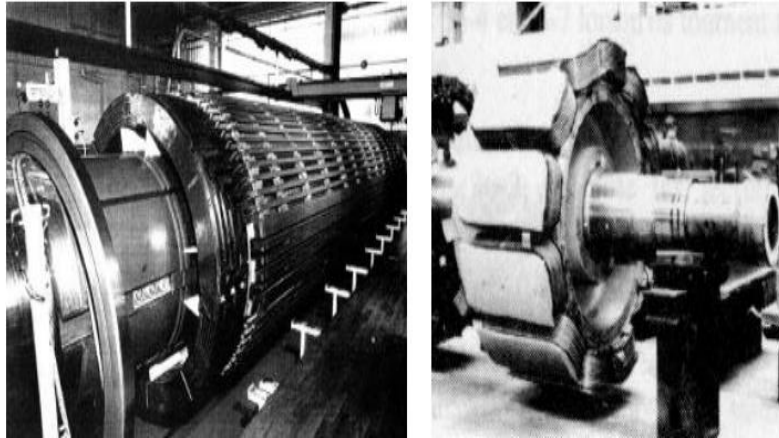
### **II.3.1 Constitution de la MSAP :**

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator. La machine synchrone est constituée de deux parties [17] :

Le stator : est se compose d'un bobinage distribue triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport a l'autre, de  $120^\circ$  électriques.

Le rotor : se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation.

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants (Fig. II -3).



a

b



c

*a. Rotor à pôles lisses*

*b. Rotor à pôles saillants*

*c. Rotor à aimants*

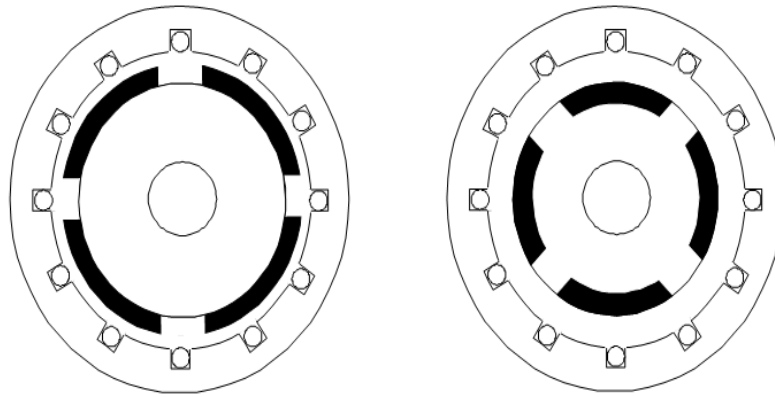
**Figure II. 3 Types de rotor**

### II.3.2 Structure de la MSAP :

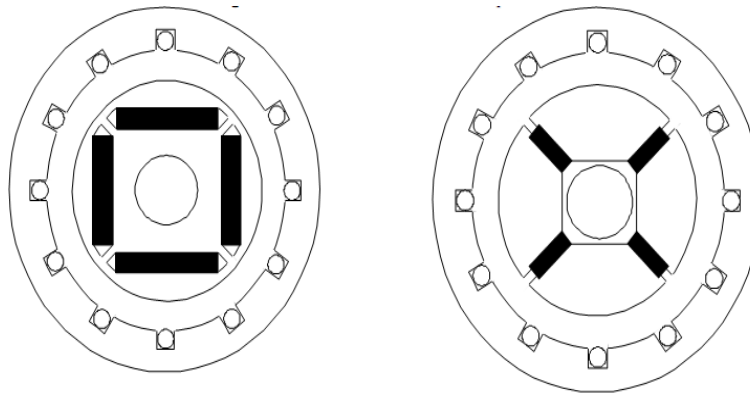
les machines synchrones ont une puissance massique plus importante et flux rotorique étant connu il est plus facile de maîtriser le couple. Les progrès fait dans la fabrication des aimants, qu'ils soient base d'alliages métalliques ou de terre rares font qu'aujourd'hui l'utilisation des MSAP va croissante.

Au plan technologique les aimants peuvent être surfaciques ou placés dans la profondeur du rotor, ils sont dit alors enterrés (cf. Figure II.4 et Figure II.5).





**Figure II. 4 Machines à aimants superficiels.**



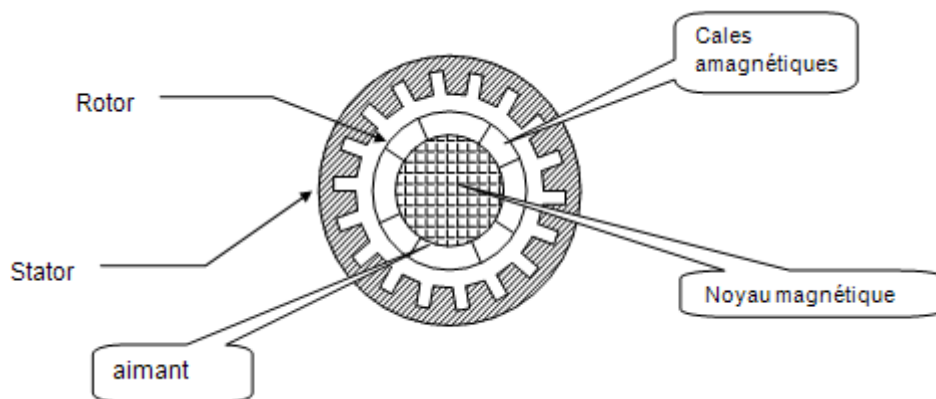
**Figure II. 5 Machines à aimants enterrés**

Il existe deux structures de la MSAP selon la disposition des aimants avec les matériaux magnétiques : l'une avec pièce polaires et l'autre sans pièces polaires. Parmi ces deux catégories, un grand nombre de configurations sont envisageables. Ces différentes possibilités dépendent de la nuance, du sens de l'aimantation, des formes géométriques des aimants et de leur disposition au niveau du rotor.

### **II.3.2.1 MSAP sans Pièces Polaires**

Dans ce cas, les aimants sont en forme de tuile ou en barreaux élémentaires juxtaposés, sont directement fixés sur la surface du rotor grâce à des frettes (Fig. II -7). Le sens d'aimantation peut être radial, tangentiel ou mixte, les structures à pôles lisses sont caractérisées par un entrefer magnétique assez large accentué par l'épaisseur des aimants et par celle de la frette de maintien. De ce fait, l'inductance statorique est plus faible que celle d'une machine classique à rotor

bobiné à pôles lisses. Il est alors difficile d'obtenir un couple massique important [18].

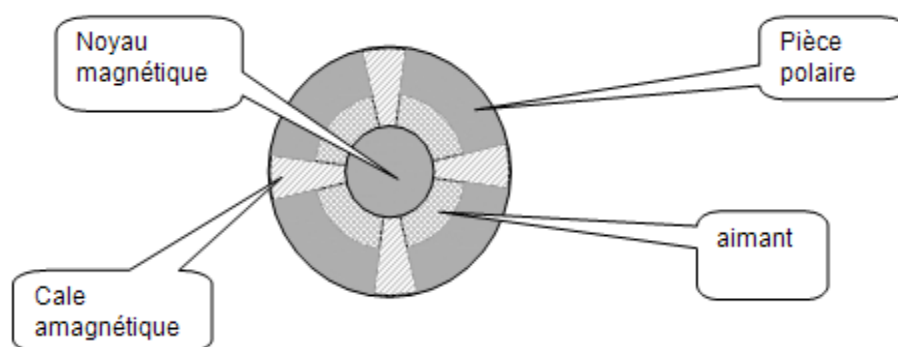


**Figure II. 6 MSAP sans pièces polaires.**

Aussi, la réaction d'induit est plus réduite, ce qui favorise une commande plus simple. De plus, pour une amélioration des performances des machines à aimants [18], l'utilisation des terres rares est plus recommandée pour cette structure.

### II.3.2.2 MSAP avec Pièces Polaires

Les pièces polaires permettant également de fixer les aimants sans avoir à utiliser des frettes et de réduire de façon significative l'épaisseur équivalente de l'entrefer ainsi que le volume des aimants par rapport aux structures sans pièces polaires. Les aimants ferrites et à terres rares peuvent être utilisés [18].



**Figure II. 7 MSAP avec pièces polaires**

### II.3.3 Les aimants permanents dans le rotor :

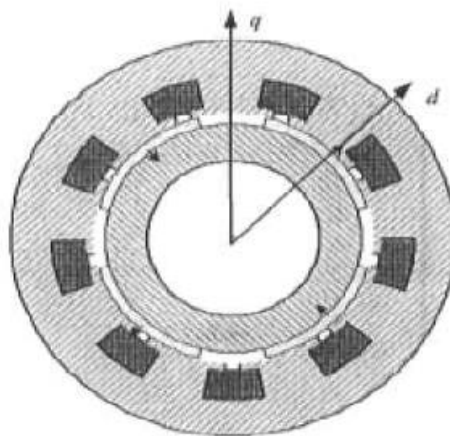
On appelle un aimant permanent tout corps ayant la capacité ou la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente et qui est difficile à se désaimanter lorsqu'il est aimanté [19]. Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieur [20].

Les performances de plus en plus élevées et les avantages que présentent les aimants permanents font que ces derniers sont des éléments de base dans l'industrie moderne. Leurs utilisations dans les machines électriques sont de plus en plus fréquentes. Cependant, les performances des machines utilisant des aimants permanents dépendent des propriétés magnétiques de ceux-ci. Les critères de l'aimant sont à la fois technique et économique [21], [22].

- Il existe de nombreuses façons de disposer les aimants au rotor :

- **Aimants en surface :**

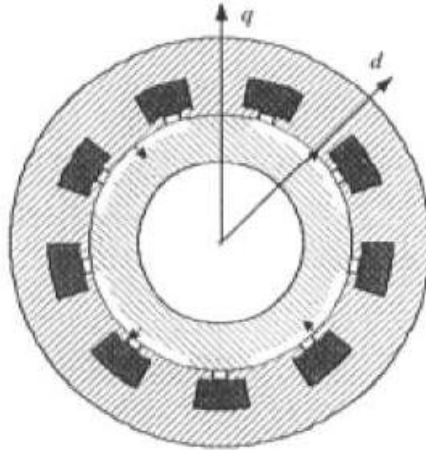
Les aimants sont montés sur la surface du rotor en utilisant des matériaux adhésifs à haute résistance. Ils offrent un entrefer homogène, le moteur est le plus souvent à pôles lisses. Ses inductances ne dépendent pas de la position du rotor.



**Figure II. 8 Machines synchrones à aimants permanents montés en surface.**

**Aimants insères :**

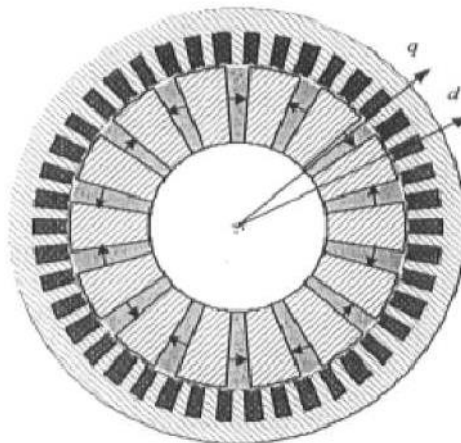
Les aimants du type insères aussi sont montés sur la surface du rotor. Cependant, les espaces entre les aimants sont remplis du fer .L'alternance entre le fer et les aimants provoque l'effet de saillance.



**Figure II. 9 Machines synchrones à aimants permanents inséré.**

- **Aimants en terres :**

Les aimants sont intègres dans la masse rotorique. Le moteur sera à pôles saillants



**Figure II. 10 Machines synchrones à aimants permanents enterrés.**

- **Aimants à concentration de flux (Flux concentrating type) :**

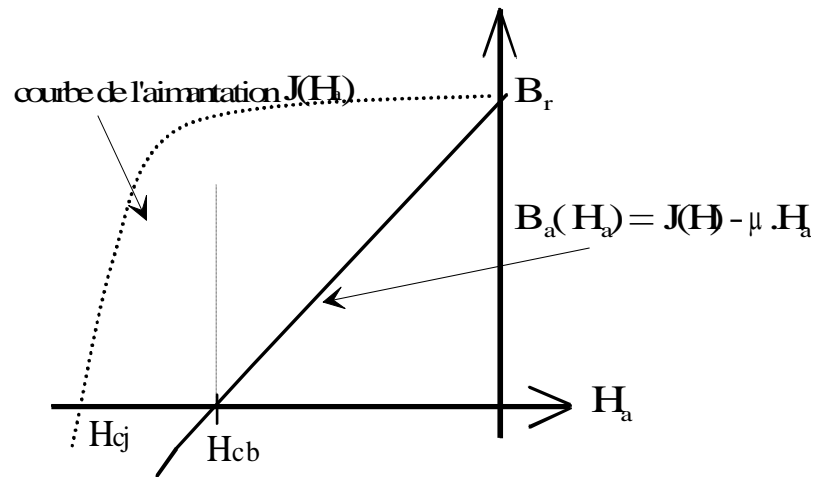
Les aimants sont profondément placés dans la masse rotorique. Les aimants et leurs axes se trouvent dans le sens circonférentiel. Le flux sur un arc polaire du rotor est contribué par deux aimants séparés.

Matériaux pour aimants :

On peut distinguer trois grandes catégories de matériaux utilisés pour la réalisation des aimants :

- **Les alnico:** sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt. Leur champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen.
- **Les ferrites:** sont des composés d'oxyde de ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum, leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante, leur faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants.
- **composés de cobalt et de terres rares:** ces matériaux ont d'excellentes performances techniques, leur champ rémanent et leur excitation coercitive sont élevés, leur inconvénient reste le coût important (par exemple le samarium).

Ces choix permettent de privilégier soit des performances magnétiques très élevées soit une stabilité en température. Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation de deuxième quadrant du plan (B, H). On considère que de 0 à  $H_{dem}$ , l'aimantation J reste constante et égale à  $B_r$ .



**Figure II. 11 Courbe de désaimantation.**

Dans le cas des aimants durs de type ferrite et terres rares,  $H_{cb}$  correspond sensiblement à  $B_a = 0$  (perméabilité relative proche de 1), mais il ne s'agit que de la valeur du champ pour laquelle l'induction s'annule, généralement la valeur limite, conduisant à une désaimantation irréversible significative, est bien plus élevée.

C'est la valeur  $H$  correspondant à l'annulation de l'aimantation qu'il ne faut absolument ne pas atteindre sous peine de désaimantation irréversible.

### II.3.3.1 Choix de la génératrice (GSAP)

La plupart des éoliennes urbaines sont basées sur des machines synchrones à aimants permanents [23]. Par rapport aux autres éoliennes, l'éolienne à base d'une GSAP à un meilleur rendement, en vue de l'absence de divers facteurs embêtants, notamment :

- Le multiplicateur de vitesse qui est toujours le siège de pertes de puissance dues à la transmission mécanique du mouvement ainsi qu'un émetteur de bruit important.
- Le système bagues-balais qui nécessite une source d'alimentation indépendante et un entretien régulier.

Cependant, il existe trois structures principales de GSAP destinées à l'éolien de petite puissance soit à rotor externe, interne, sans pièce polaire ou avec pièce polaire :

- **GSAP à flux radial**

Elle permet d'avoir de bonnes performances sur une grande plage de variation de la vitesse de rotation [24].

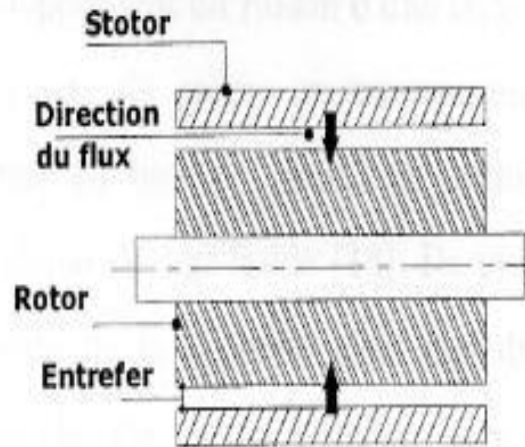


Figure II. 12 GSAP à flux radial

- **GSAP à flux axial**

Le couple produit est beaucoup plus important que celui de la machine précédente et alors la possibilité d'assembler plusieurs machines sur son axe afin d'accroître ce couple [23].

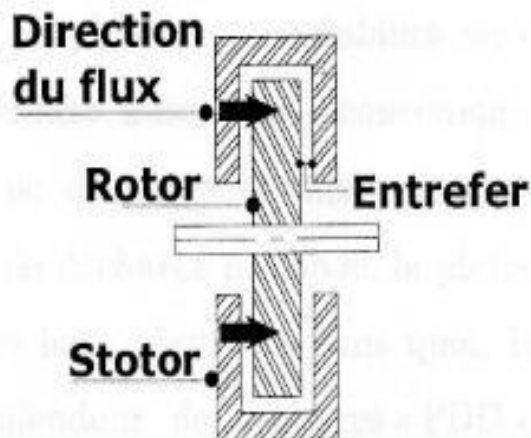


Figure II. 13 GSAP à flux axial

### **GSAP à flux transverse (ou tangentiel)**

C'est une nouvelle technologie présentant un couple massique important et la possibilité d'avoir un très grand nombre de pôles. Cependant, ces atouts sont contrebalancés de conception et encore une réactance synchrone importante qui dégrade son facteur de puissance [24].

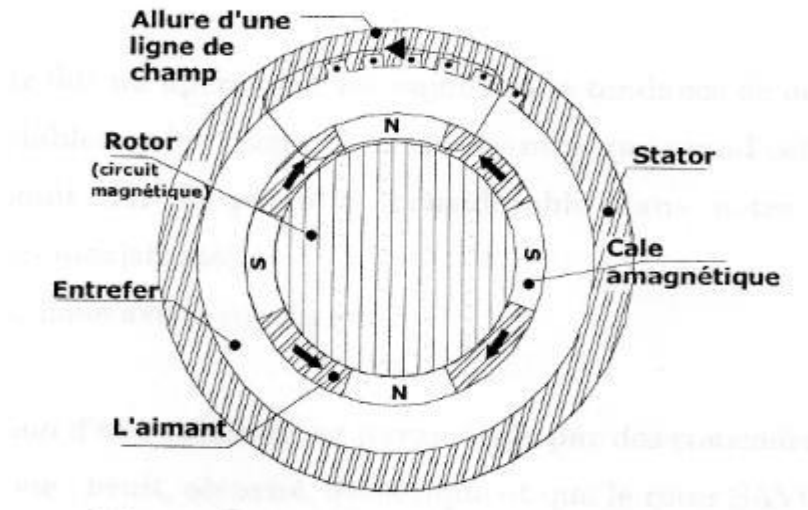


Figure II. 14 GSAP à flux tangentiel

### II .3.3.2 Intérêt des aimants :

Pour la magnétisation de circuits sans pertes joule, particulièrement avantageux pour le rendement et la compacité dans le cas des petits pôles (petits moteurs ou gros moteurs à très grand nombre de pôles).

#### Avantage :

- machines plus compactes (les petits moteurs sont presque tous à aimants),
- meilleur rendement (recherches actuelles pour les économies d'énergie),
- meilleures accélérations pour les moteurs synchrones ou pas à pas...

#### Mais :

- plus coûteux dans le cas des machines à aimants terres rares
- risques de désaimantation (irréversible) : limite de température maxi, courant maxi,
- dé fluxage impossible dans les MCC, délicat dans les MS.



### II .3.4 Principe de fonctionnement de la MSAP :

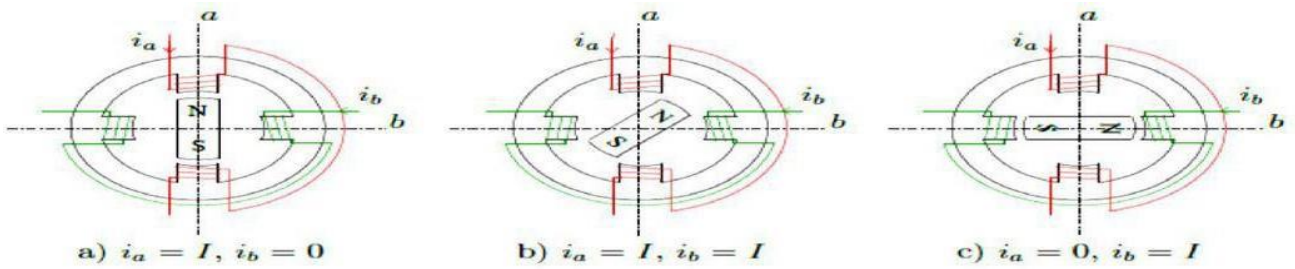


Figure II. 15 Principe de fonctionnement de MSAP

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champ créé par les enroulements du stator interagit avec les aimants du rotor et oriente ce dernier. On définit un “pas” élémentaire  $\theta_p$  comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l’alimentation est commutée d’une phase à la suivante. Nous obtenons pour cette structure  $\theta_p = 90$ . Ceci correspond au passage de la (figure II.15.a) à la (figure II.15.c.) Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (figure II.15.b). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure [25].

### II .3.5 Les Avantages et Inconvénients de MSAP :

#### ➤ **Avantage :**

Comparée à la machine asynchrone et à courant continu, la machine synchrone à aimants permanents présente les principaux avantages suivants [25, 26, 27] :

- Robustesse incontestée par rapport à la machine à courant continu.
- Augmentation de la constante de temps thermique et de la fiabilité grâce à l’élimination des bagues et des balais.
- Facteur de puissance et rendement plus élevés par rapport à la machine asynchrone.
- Cette structure donne à la machine l’avantage de réduire les dimensions et par conséquent un moindre moment d’inertie, ce qui augmente sa fiabilité et sa densité de puissance par unité de volume.
- L’utilisation d’aimants permanents au rotor permet d’éliminer les pertes électriques dans les 2 machines synchrones à aimants permanents.

L’utilisation des aimants permanents dans les machines électriques pour la production du flux présente plusieurs avantages :

- Pertes Joule d'inducteur nulles.
  - Une grande facilité de refroidissement ; car les pertes sont localisées au stator.
  - Un rendement plus élevé.
  - La suppression des frottements des balais sur le collecteur.
  - La diminution des problèmes de maintenance.
- L'excitation de la machine synchrone à aimants permanents permet la suppression des contacts glissants ou des dispositifs à diodes tournants, ce qui permet la réduction de maintenance et facilite le travail de la machine.
- Les moteurs à rotor bobiné sont limités par des problèmes de refroidissement à cause des difficultés liées à l'apport du fluide dans un système tournant. Par contre les inducteurs à aimants permanents sont plus intéressants sur ce plan à cause de l'absence des pertes d'excitation, alors que le stator peut être refroidi facilement par un fluide.
- Un grand nombre des pôles et une très grande vitesse.

➤ **Inconvénients :**

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants.
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule.
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.

## II .4 Modélisation de la GSAP :

### II.4.1 Hypothèses simplificatrices :

Le modèle mathématique de la machine synchrone est établi sur la base de certaines hypothèses simplificatrices essentielles [28]:

- absence de saturation dans le circuit magnétique,
- distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator.
- hystérésis, courants de Foucault et effet de peau négligés.
- effet d'encoche négligeable.
- résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

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 [29].

### II .4.2 Equations de la machine synchrone à aimants permanents :

La machine synchrone à aimants permanents est constituée par trois bobinages statoriques qui constituent les trois phases, et des aimants au rotor distribués en 17 paires de pôles.

Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer.

Le modèle de la MSAP qui sera développé est basé sur le schéma de la figure suivante :

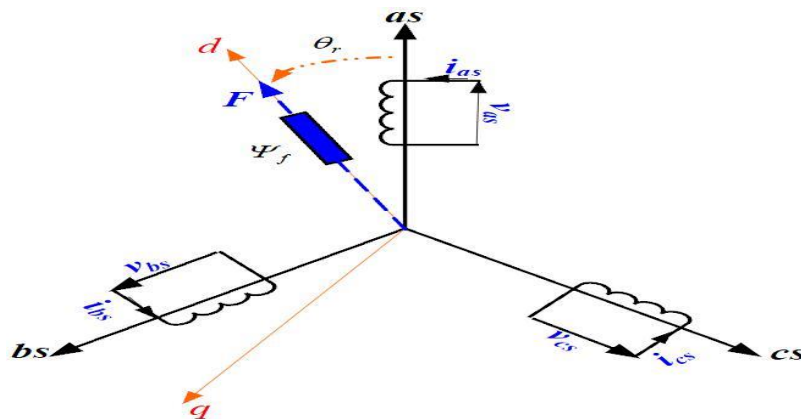


Figure II. 16 Schéma représentatif de la MSAP à modéliser

### II.4.2.1 Equations de tension et flux :

Les expressions des flux mutuels inducteur-phase sont données par [30]:

En adoptant les hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, les équations de la machine synchrone triphasée sous forme matricielle s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II -1})$$

La relation entre flux et courants sous forme réduite s'écrit :

$$[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt} [\varphi_S] \quad (\text{II -2})$$

Où :

$$R_S = R_a = R_b = R_c \quad (\text{II -3})$$

S'écrit :

$$[\varphi_S] = [L_S] \cdot [I_S] + [\varphi_f] \quad (\text{II -4})$$

### II .4.2.2 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\omega}{dt} = P ( C_m - C_{em} ) - F\omega \quad (\text{II -5})$$

Et

$$\omega = P \cdot \Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II -6})$$

Avec :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (couple moteur).

$C_m$  : Couple moteur appliqué sur la génératrice (couple résistant).

$F$  : Coefficient de frottement.

$J$  : Moment d'inertie.

$P$  : Nombre de paires de pôles.

On voit bien que les systèmes d'équations est à coefficients variables en fonction de  $\theta$ . Sa résolution analytique dans ce repère reste très difficile.

### II.4.3 Transformation de PARK

Pour contourner cette difficulté, on introduit la transformation de PARK qui permet le passage d'une machine triphasée alimentée en alternatif et produisant un champ magnétique tournant à un modèle biphasé lié au rotor de grandeurs électriques continues permettant de produire le même champ (Fig. II .11) [13].

On note que :

- d, q: Indices des composantes de Park directe et en quadrature.
- P ( $\theta$ ): Matrice de passage de Park.

Afin de simplifier l'étude, on utilise la transformation de Park qui est un outil mathématique permettant de transformer les axes magnétiques des bobines statoriques (a,b,c) en axes orthogonaux (d,q). Ce qui se traduit par le remplacement des bobinages statoriques (a,b,c) par des bobinages équivalents (d,q) [30].

La transformation de Park est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II -7})$$

#### II-4-3-1 Passage triphasé au biphasé

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II -8})$$

### II-4-3-2 Passage biphasé au triphasé

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II -9})$$

La transformation inverse de PARK est la suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II -10})$$

X : représente soit le courant soit la tension soit le flux.

## II.5 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park

La transformation de PARK s'exprime par la relation suivante :

$$[X_{dq0}] = P(\theta) \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II -11})$$

L'indice « O » désigne la composante homopolaire, direct et quadrature.

### II.5.1 Equations électriques

La machine triphasée est équilibrée et symétrique avec neutre isolé alors la composante homopolaire est nulle. Les équations électriques sont les suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + L_d \frac{d I_d}{dt} - L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_q \frac{d I_q}{dt} + L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{II -12})$$

Où :

$L_d$  : Inductance suivant l'axe (d)

$L_q$  : Inductance suivant l'axe (q)

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$  dans le repère de Park, on peut écrire l'équation (II -12) sous la forme :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{II -13})$$

### II.5.2 Calcul de puissance

La puissance instantanée  $P(t)$  qui s'écrit pour le stator dans le repère  $(d,q)$  :

$$P(t) = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q \quad (\text{II.14})$$

Par ailleurs, la puissance électrique absorbée s'exprime par

$$P(t) = R_s (I_d + I_q) + \left( I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt} \right) + (I_q \phi_d - I_d \phi_q) \omega \quad (\text{II.15})$$

- Le premier terme représente les pertes joules dans l'induit.
- Le deuxième terme représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine.

### II.5.3 Couple électromagnétique

La connaissance du couple électromagnétique de la machine  $Cem$  est essentielle pour la commande de la machine. L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$Cem = k P (\phi_d I_q - \phi_q I_d) \quad (\text{II -16})$$

Où

$k$  prends les valeurs 1 ou 1,5, en fonction de la façon dont est réalisée la transformation de Park (pour notre cas,  $k=1.5$ ).

En utilisant la relation entre flux et courants :

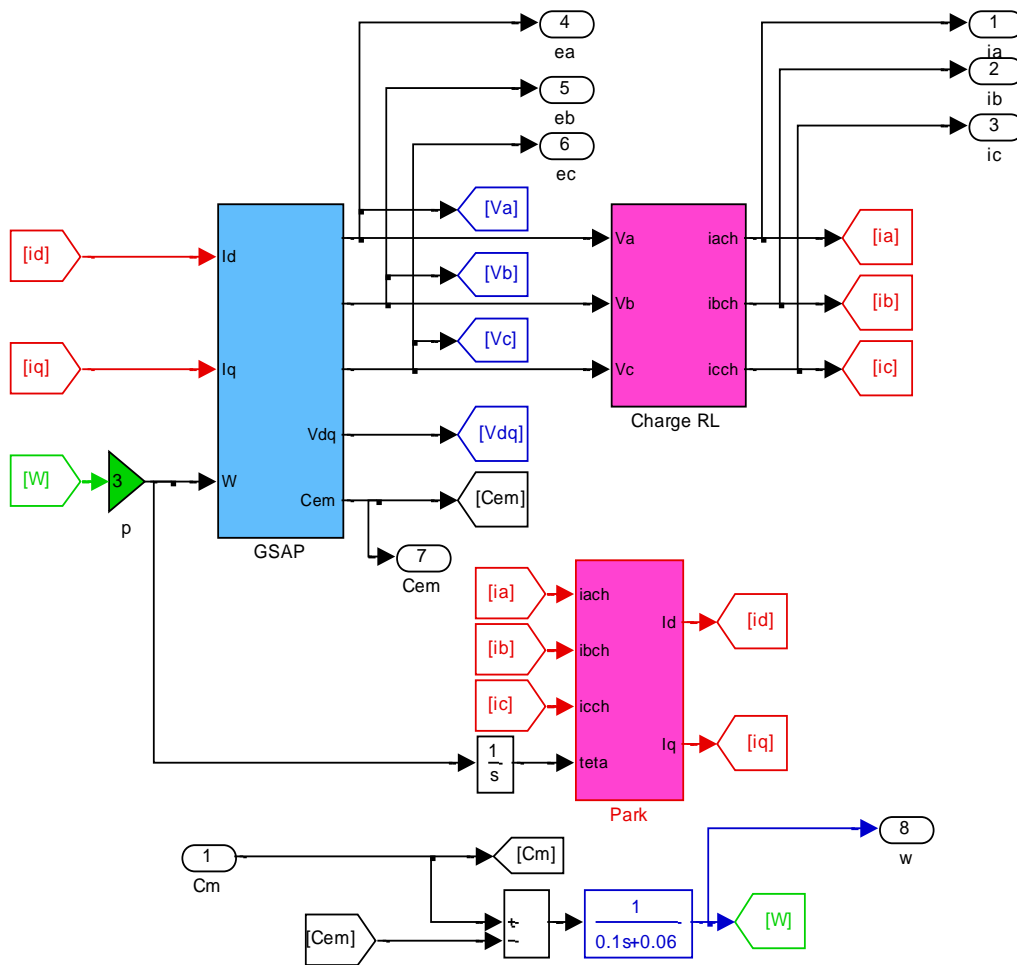
$$\begin{cases} \phi_d = L_d \cdot I_d - \phi_f \\ \phi_q = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad (\text{II -17})$$

Puis en remplaçant (II -17) dans (II-16), on trouve l'équation suivant:

$$Cem = \frac{3}{2}P [( Lq - Ld ) Id \cdot Iq + \phi_f \cdot Iq ] \tag{II -18}$$

En combinant les expressions (II-13) et (II-18), nous obtenons le schéma bloc de la (Fig. II .12).

**II.6 Simulation de la GSAP :**



**Figure II. 17 Bloc de simulation de GSAP**

**La GSAP alimentée une charge (R<sub>ch</sub>, L<sub>ch</sub>) :**

La génératrice alimente a une charge électrique (R<sub>ch</sub>, L<sub>ch</sub>) Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (II.12) :



$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{II -21})$$

D'autre part, l'application des tensions Vd et Vq sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} \cdot I_d + L_{ch} \frac{d I_d}{dt} - L_{ch} \omega \cdot I_q \\ V_q = R_{ch} \cdot I_q + L_{ch} \frac{d I_q}{dt} + L_{ch} \omega \cdot I_d \end{cases} \quad (\text{II -22})$$

En remplaçant les expressions de Vd et Vq dans (II -22), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{d I_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[ - (R_s + R_{ch}) \cdot I_d + \omega (L_q + L_{ch}) \cdot I_q \right] \\ \frac{d I_q}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[ - (R_s + R_{ch}) \cdot I_q - \omega (L_q + L_{ch}) \cdot I_d + \omega \phi_f \right] \end{cases} \quad (\text{II -23})$$

On cherche à obtenir un système d'équation d'état :

$$\begin{aligned} [\dot{X}] &= [A][X] + [B][U] \\ [X] &= [I_d \ I_q]^t, [U] = [0 \ \phi_f]^t \end{aligned} \quad (\text{II -24})$$

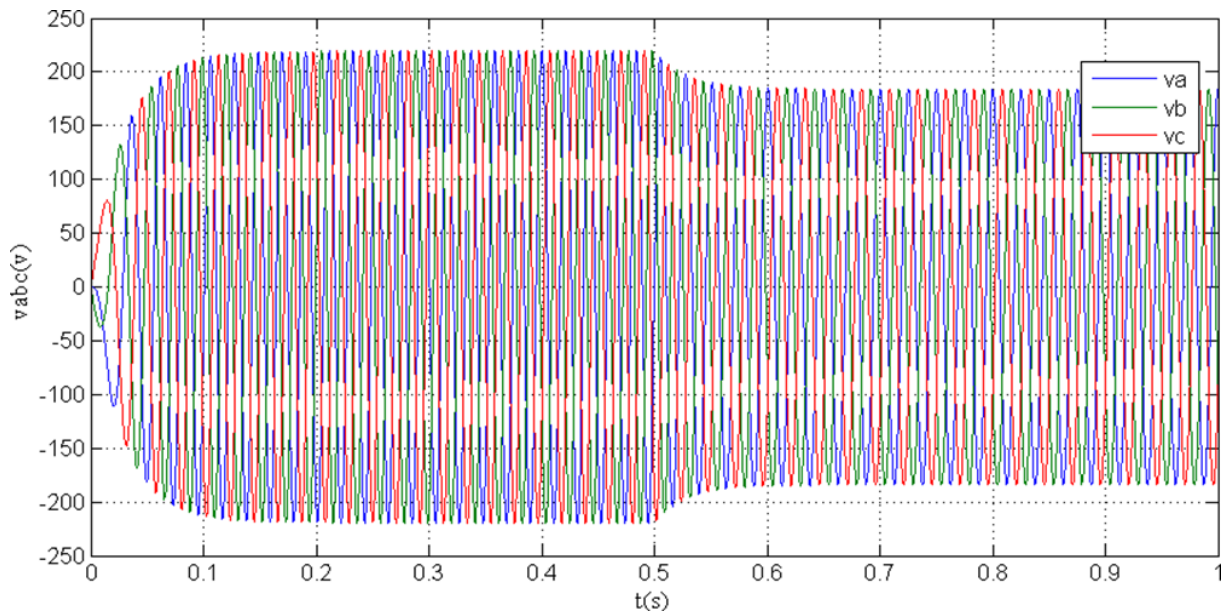
On peut écrire la matrice [A] comme suite :

$$\begin{aligned} [A] &= [A_1] + \omega [A_2] \\ [A] &= \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II -25})$$

Et la matrice [B] sous la forme :

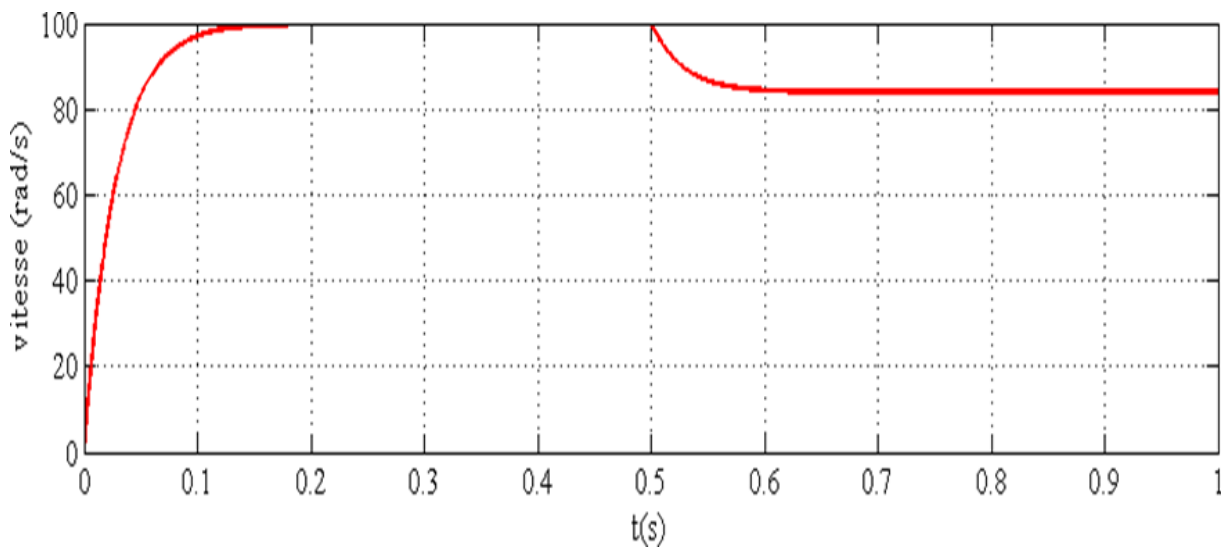
$$[B][U] = \omega \frac{1}{L_q+L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_f \end{bmatrix}$$

## Simulation et interprétation :



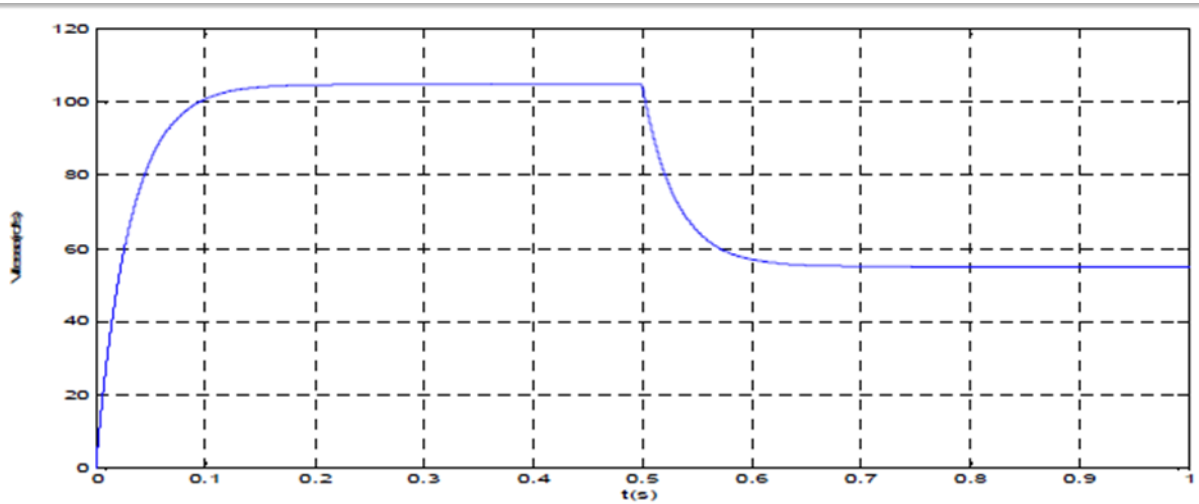
(a)

Figure II. 18 : Evolution des tensions statorique en fonction du temps ( $C_r=5$  N.m puis  $C_r=4.2$ N.m a l'instant  $t=0.5$ s) pour la même inductance charge Lch.

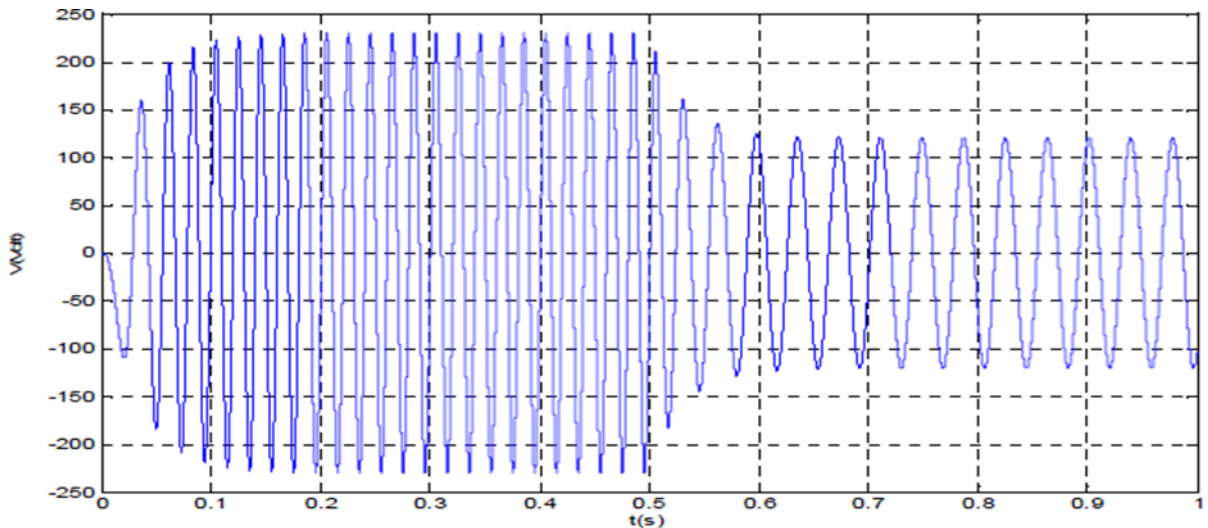


(b)

Figure II. 19 : la vitesse de GSAP en fonction de temps



(a)



(b)

**Figure II. 16 Evolution de la tension statorique d'une phase en fonction du temps pour deux vitesse d'entrainement différentes ( $R_{ch} = 200\Omega$  puis  $R_{ch} = 150\Omega$  à l'instant  $t=0.5$ s) pour la même inductance charge  $L_{ch}$**

#### Interprétation :

La variation de la charge électrique induit une dégradation de la tension au niveau du bobinage statorique et une légère dégradation au niveau de la fréquence. Cela est dû au changement du point de fonctionnement (voir la figure (II.19)).

La variation de la vitesse d'entraînement induit une dégradation de la tension au niveau du Bobinage statorique et une importante dégradation au niveau de la fréquence. Cela est dû au changement du point de fonctionnement (voir la figure (II.20)).

## **II.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la machine synchrone à aimant permanent en vue de la modélisation mathématique de chaque partie de ce machine.

Aussi, nous avons décrit de façon fidèle l'intérêt de la générateur GSAP qui ne cesse de croître pour diverses applications, quelque soit en génératrice pour les énergies renouvelables ou en cas moteur pour certaines applications industrielles.

Dans notre étude, nous avons choisi le mode générateur qui sera raccordé à notre système éolien.

Le chapitre suivant sera dédié à la présenter la modélisation de cette machine avec la turbine (la machine est intégrée dans un système éolien à axe verticale).

# **CHAPITRE III**

## **Étude et modélisation des éléments éoliennes**

### III.1 introduction

Tout système physique peut être considéré comme un ensemble de sous-systèmes. Ainsi, pour simplifier l'étude de l'ensemble, chacune de ses parties est abordée séparément. Puis, une synthèse de toutes ces parties constituant le système global est à déduire.

La conversion de l'énergie du vent à une énergie mécanique se fait au niveau de la turbine, ainsi que la partie de la conversion de l'énergie mécanique à une énergie électrique est faite par le générateur (figure III.1)

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne, basée sur les modèles du profil du vent, du comportement aérodynamique des pales, de l'aérogénérateur et des convertisseurs de puissance du système de commande, est détaillée dans ce chapitre.

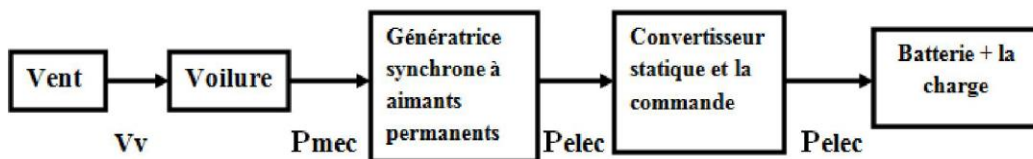


Figure III.1 Principaux organes du système de conversion éolienne

### III.2 le vent

L'atmosphère terrestre se compose de deux parties essentielles. La troposphère dont l'épaisseur représente 80% de la structure atmosphérique, son épaisseur est de l'ordre de 10 km et La stratosphère qui représente les 20%. [28]

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules concentrés dans la troposphère. Dans cette région, à cause de l'échauffement différentiel inégal de la surface terrestre par le soleil aux pôles et à l'équateur, de la rotation de la terre autour de son axe qui mettre l'air en mouvement et des forces de pressions dirigées des hautes pressions vers les basses pressions, provoquent un déplacement d'importantes masses d'air de différentes densité d'une altitude à une autre. Le courant correspondant constitue le vent. [29]

La vitesse de vent augmente au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol.

On remarque que l'Algérie à un régime de vent modéré, de 2 à 6 m/s et que la vitesse augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6 m/s.

D'après [28] la région d'Oran, est classée parmi les régions ventées de l'Algérie et elle dispose d'un potentiel énergétique non négligeable où la valeur moyenne de la vitesse de vent est de 4.5 m/s.

### III.3 La turbine éolienne

La voilure éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Un modèle prenant en compte toutes ces propriétés n'est à l'heure actuelle pas envisageable. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique.

Une voilure éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique [30] [31].

### III.4 modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

#### III.4.1 modélisation de vent

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Des différentes approches utilisées dans la littérature pour la génération d'une série synthétique de vent, dans notre cas, la vitesse de vent sera modélisée par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V_{vent}(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k \cdot t) \quad (III-1)$$

$a_k$  : Amplitude des harmoniques

$\omega_k$  : Fréquence des harmoniques

La vitesse du vent est représentée par la fonction :

$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{III-2})$$

### III.4.2 Modélisation d'une turbine éolienne

Le système de conversion de l'énergie éolienne est complexe. Ce système dépend de la multiplicité des domaines existants, à savoir, aérodynamique, mécanique, et électrique. Par ailleurs, les facteurs, tel que la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine, déterminent la puissance mécanique.

Un modèle dynamique prenant en compte tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine. Afin de contrôler les performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues, le recours à la modélisation est une nécessité.

#### III.4.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [32], [33]:

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement.
- Les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés.
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple (voir Figure. III.2) :



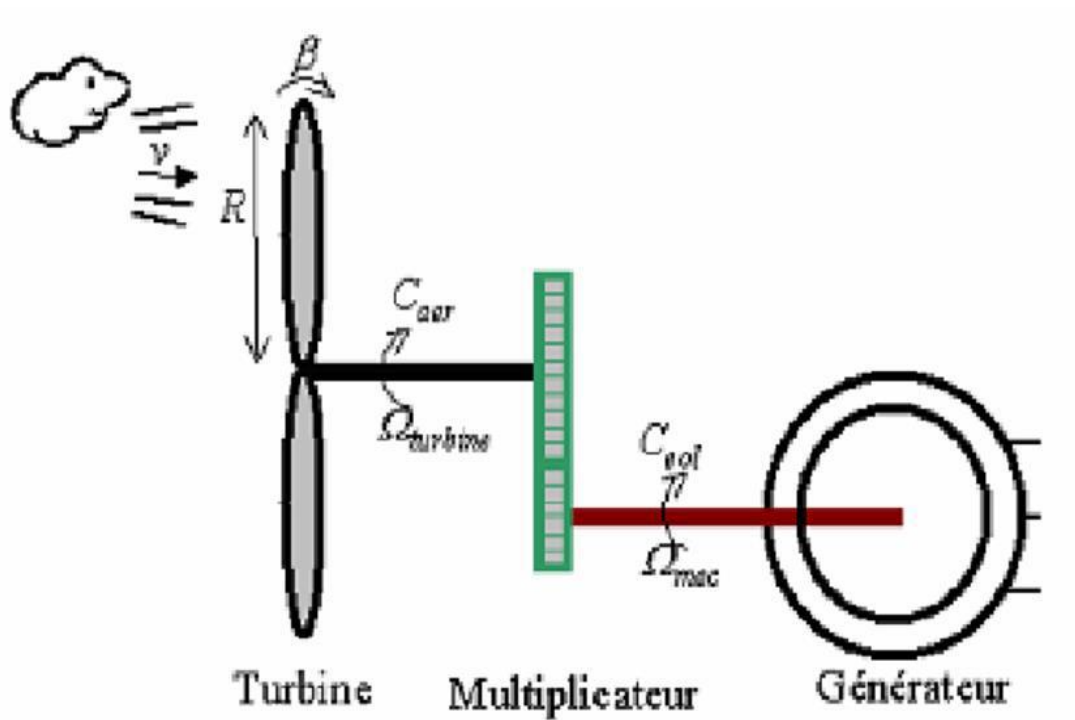


Figure III. 2 Modèle mécanique simplifié de la turbine

### III.4.3 Modèle des pales

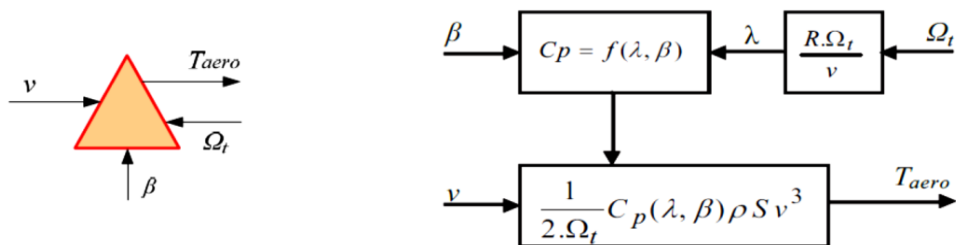


Figure III. 3 Schéma bloc du modèle des pales

### III.4.4 modèle de turbine

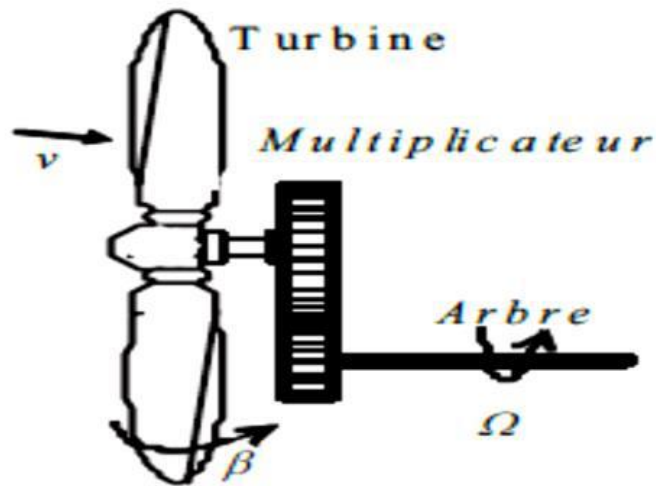


Figure III. 4 turbine éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor ( $A$ ) et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [34].

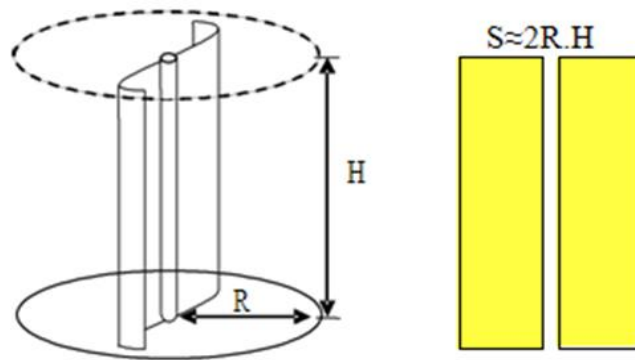
L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [35]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.22 ((116/\lambda) - 0.48 - 5)e^{i\lambda})^{-21} \quad (\text{III } 3)$$

La puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (\text{III } 4)$$

La turbine, utilisée dans le cadre de notre travail, est une éolienne "Savonius" à axe vertical (voire Figure. III. 5).



**Figure III. 5 Voilure à axe vertical de type Savonius**

La surface "A " donnée par la formule suivant :

$$A=2R.H \quad (\text{III-5})$$

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

La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante que nous normaliserons en pu :

$$P_m = C_p (\lambda). \rho. H. R. V^3 \quad (\text{III-6})$$

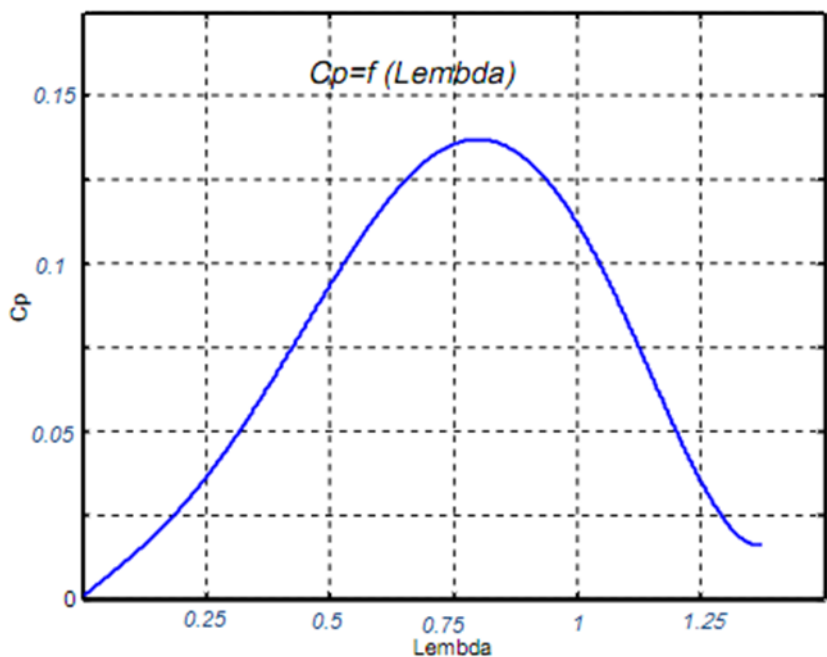
où  $C_p$  est un coefficient qui exprime l'efficacité de la voilure dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est en fait souvent donné en fonction de la vitesse réduite (la vitesse spécifique  $\lambda$ ) qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de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

$$\lambda=(R.\Omega)/V \quad (\text{III - 7})$$

Où  $\Omega$  la vitesse angulaire de rotation des pales en rad/s.

L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour cette turbine, par l'équation analytique en fonction de  $\lambda$  (résultante de l'interpolation) suivant :

$$C_p(\lambda) = -0.12992 \lambda^3 - 0.11681\lambda^2 + 0.45406 \lambda \quad (\text{III-8})$$

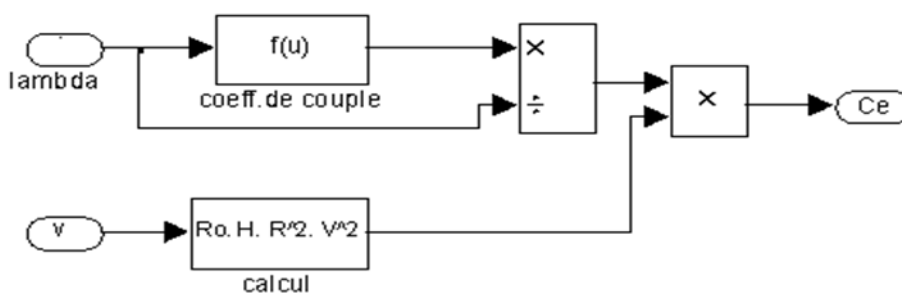


**Figure III. 6 Courbe caractéristique retenue pour les essais**

La figure (Fig.III.6) représente les caractéristiques de coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$ , il présente un facteur de puissance maximal  $Cp_{max} = 0.13$  pour  $\lambda_{max} = 0.85$ .

Le couple éolien noté :  $C_e$  est obtenue partir de l'équation (III-4) et en utilisant l'expression (III - 7) de la vitesse réduite :

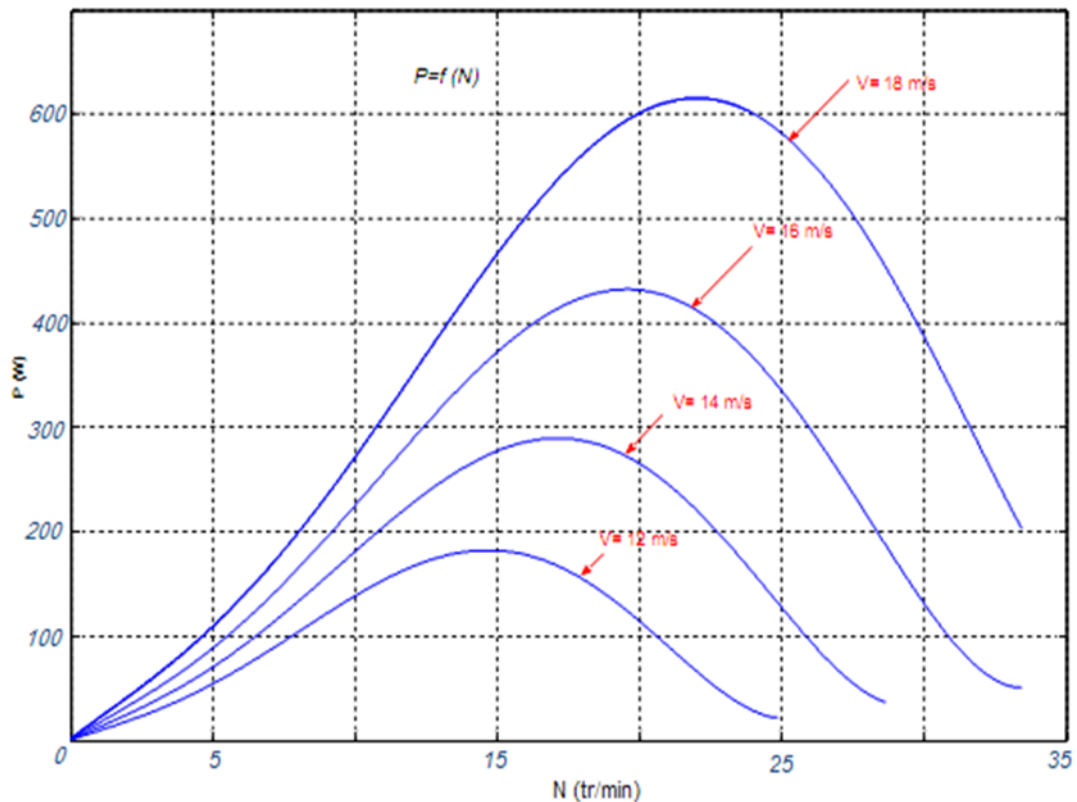
$$C_e = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{Cp(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V^2}{\lambda} \tag{III-9}$$



**Figure III. 7 Modèle du couple éolien sous Simulink**

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la Forme:

$$Paer = Cp(\lambda, \beta) \times \frac{\rho \times S \times V^3}{2} \tag{III 10}$$



**Figure III. 8 La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation**

On remarque de la figure (Fig. III.8) que la puissance électrique est variable avec la variation de la angulaire mécanique de la turbine. L'allure de la puissance électrique en fonction de la angulaire mécanique est semblée à celle du  $C_p$  en fonction de  $\lambda$ . 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 cube du vent.

### III.4.5 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_t$ , assez lente, à celle que nécessite la génératrice  $\Omega$ .

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{III-10})$$

$$G = \Omega_{mec} / \Omega_{tur} \quad (\text{III-11})$$

Avec: G le gain du multiplicateur de vitesse

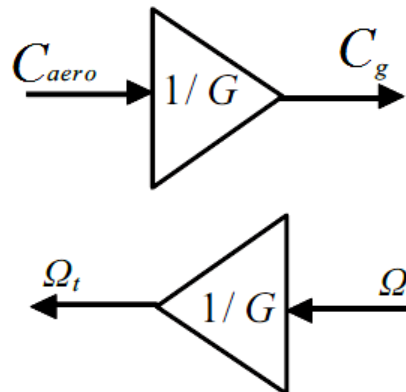


Figure III. 9 Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.

### III .5 Modélisation mécanique du couplage turbine – génératrice

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

$$J.d\Omega_{mec}/dt \quad (III-12)$$

Où :

- J : est l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (III-13)$$

-  $C_{em}$ : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

-  $C_g$  : Le couple issu du multiplicateur

-  $C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements

$$C_f = f . \Omega_{mec} \quad (III-14)$$

Où :

- f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  [35]

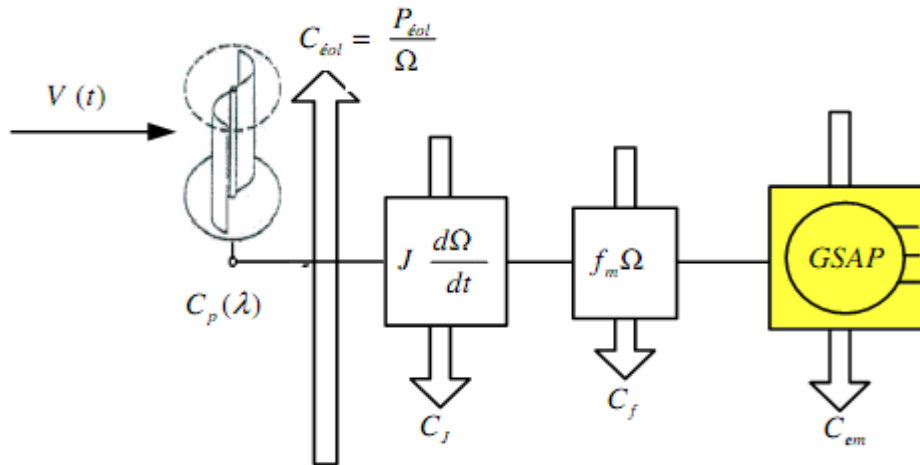


Figure III. 10 Modèle du couple de la turbine éolienne

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

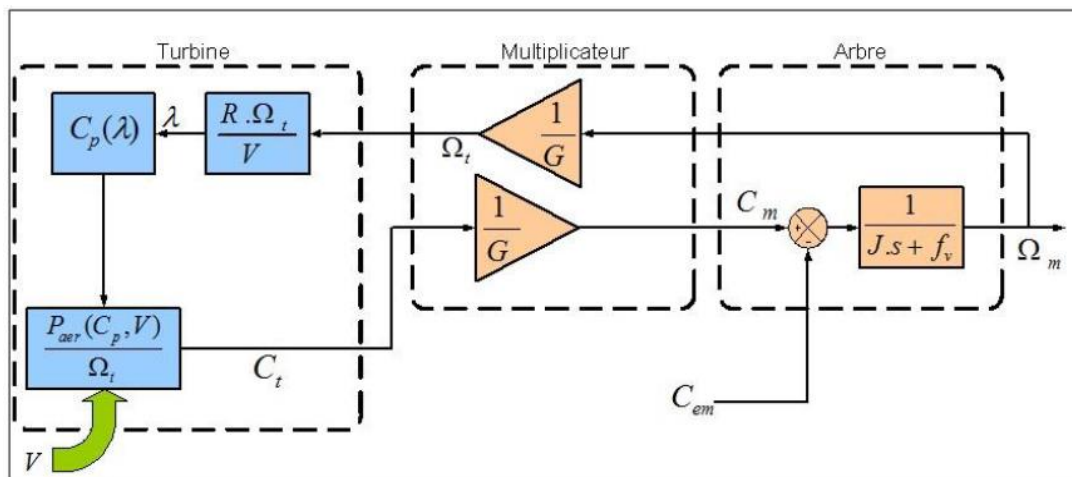


Figure III. 11 Schéma bloc de la turbine éolienne

### III.6 modèle de GSAP

D'après le chapitre II, la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) est classiquement modélisée dans le repère de Park, donnant lieu à l'équation suivantes :

$$\begin{cases}
 V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\
 V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \\
 J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - F \cdot \Omega \\
 C_{em} = \frac{3}{2} P [ ( L_q - L_d ) I_d \cdot I_q + \phi_f \cdot I_q ]
 \end{cases} \quad (\text{III - 15})$$

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,  $R_s$  la résistance d'une phase statorique,  $V_d$ ,  $V_q$  et  $I_d$ ,  $I_q$  sont les composantes sur les axes d et q de la tension, respectivement du courant statorique.

Aussi,  $\phi_f$  est le flux d'excitation produit par les aimants permanents,  $L_d$  et  $L_q$  sont les inductances équivalents sur les axes d, respectivement q (les inductances synchrones direct et quadratique).  $C_{em}$  est le couple électromagnétique,  $C_m$  est le couple moteur appliqué sur la génératrice avec  $F$  le coefficient de frottement,  $J$  : Moment d'inertie et  $p$  le nombre de paires de pôles.

### III .7. Les simulations

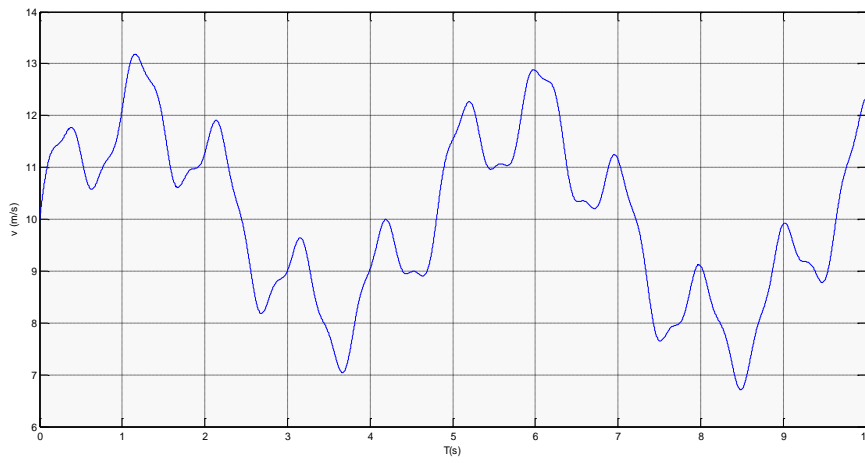
Le vent sera modélisé sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{III - 116})$$

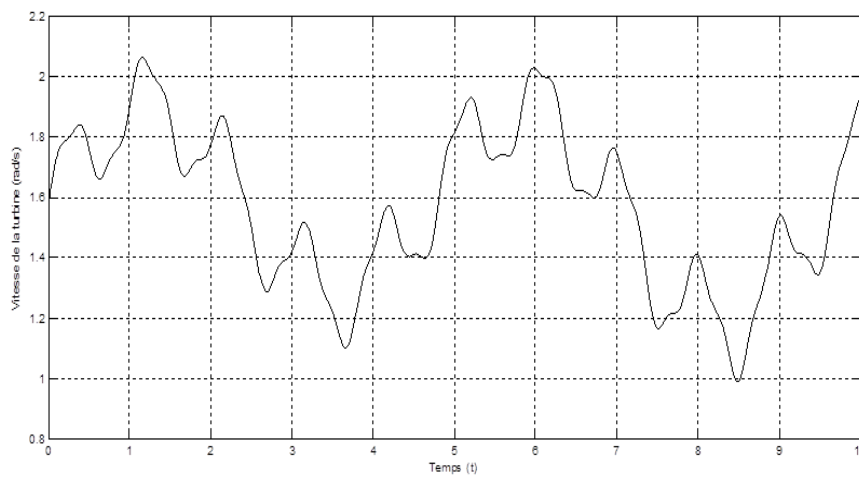
Les résultats de simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents associé à la turbine éolienne et avec la vitesse du vent simulée par l'équation (III - 13) sont donnés par les figures qui suivent :



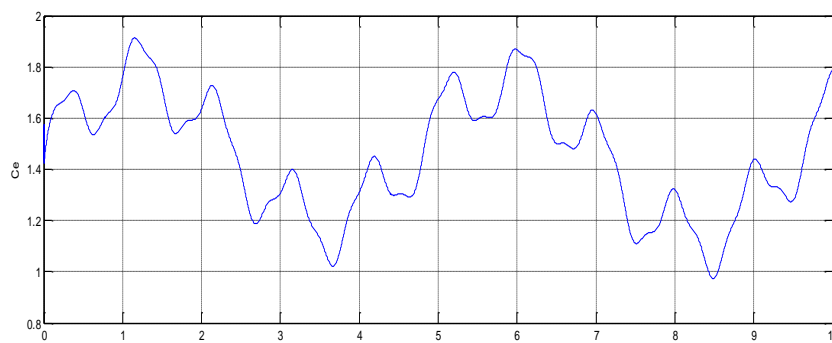
Le vent



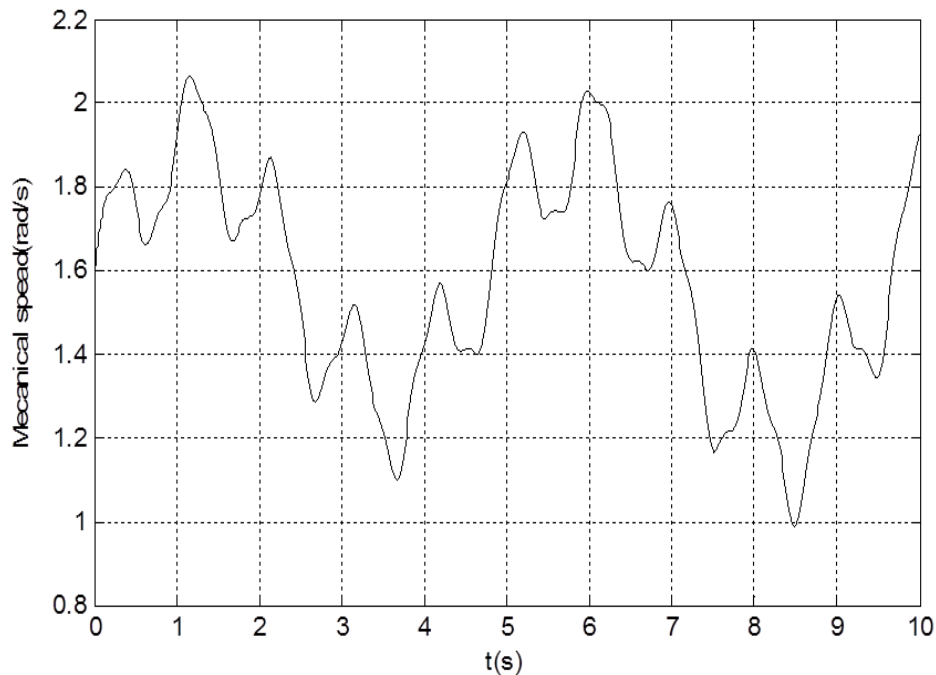
**a) La vitesse du vent en fonction de temps.**



**b) la vitesse mécanique de turbine en fonction de temps**



**c) Couple éolienne**



(d) La vitesse électrique de la GSAP en fonction de temps.

Figure III. 12 a : Vitesse de vent, b : Vitesse mécanique de la turbine, c : Couple éolienne, d : La vitesse électrique de la GSAP en fonction de temps

### III-8 Conclusion

Ce chapitre traite de la modélisation des éléments constituant la chaîne de conversion éolienne qui est couplée d'une machine synchrone à aimants permanents GSAP associée à la turbine. Puis, les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine.

La turbine utilisée est celle à axe vertical de type Savonius.

A la fin, nous avons présenté les résultats de simulation de la chaîne complète de production d'énergie éolienne.

Le chapitre prochain, sera consacré à la commande de l'ensemble de ce système de production d'énergie éolienne.

# **CHAPITRE IV**

## **LA CONTROLE DE SYSTEME AEROGENERATEUR**

## IV.1 Introduction

L'énergie éolienne, même si abondante, varie continuellement et comme les Changements de vitesse du vent dans la journée. Le montant de la puissance du moteur à partir d'un système de conversion d'énergie éolienne (SCEE) dépend de l'exactitude avec laquelle les points de puissance de pointe sont suivis par la recherche de point de puissance maximale (MPPT) de commande du système de commande quel que soit le type de générateur utilisé.

Le système de conversion d'énergie éolienne étudié est composé ; d'une turbine a axe verticale de type Savonius associée à une génératrice synchrone à aimants permanents débitant sur une charge passant par un étage d'électronique de puissance.

Contrairement au chapitre précédent, ce chapitre va se consacré à la contrôle du système Global, donc on va appliquer un algorithme de maximum de puissance sur la turbine qui devra entrainer la génératrice, et une commande par mode glissant est appliquée à cette dernière.

### IV.1a la technique de maximisation de puissance MPPT

L'algorithme de contrôle selon la méthode MPPT permet de rechercher le maximum de Puissance électrique générée pour chaque vitesse de vent. La vitesse d'opération de la génératrice synchrone à aimant permanent est ainsi ajustée afin de produire un maximum de Puissance en tout temps. Pour atteindre ce but, il faut estimer la position et la direction du point d'opération sur la courbe de puissance en fonction de la vitesse. La figure IV.1 présente l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la machine pour différentes valeurs de la vitesse du vent, et pour un angle de calage  $\beta = 0$ . Sur la même figure, on a présenté l'évolution de la puissance maximale générée en fonction de la vitesse de rotation. Il est observé que la puissance maximale que la turbine peut produire pour chaque vitesse de vent, correspond à une vitesse optimale. Cette vitesse optimale est atteinte lorsque le coefficient de puissance  $C_p$  est maximal. Pour chaque valeur de la vitesse de rotation, On peut déduire la puissance maximale qu'on peut obtenir [4] :

$$P_m = \frac{\frac{1}{2}\rho\pi R^5 \omega_m^2}{\lambda^3} \cdot C_p \quad (IV-1)$$

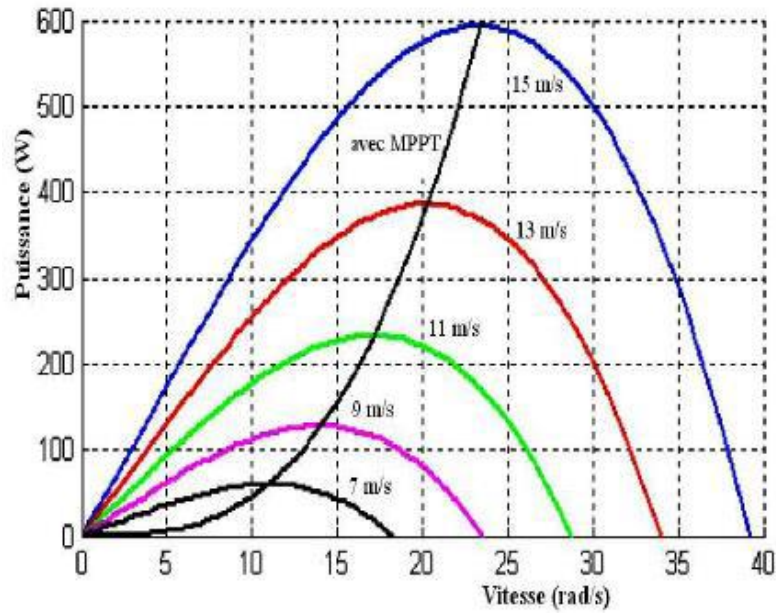


Figure IV. 1 Caractéristiques d’une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

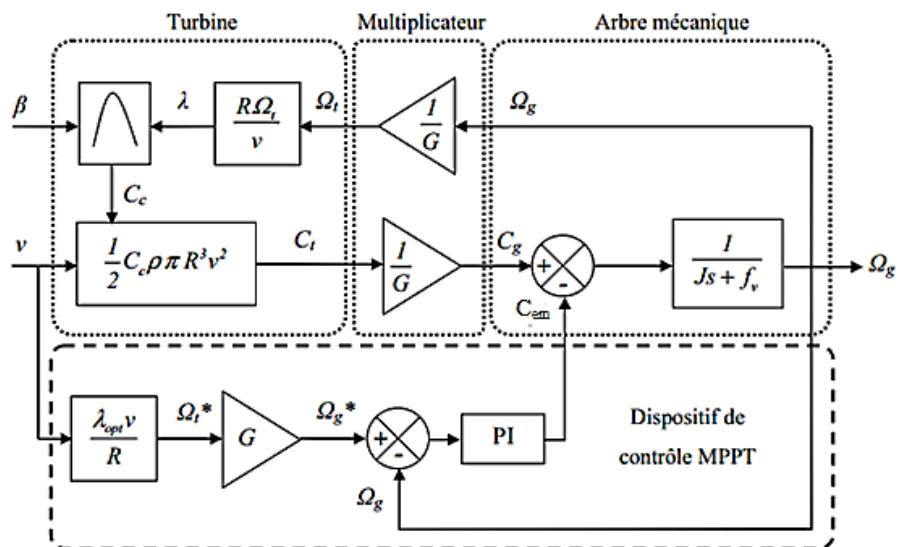


Figure IV. 2 : schéma fonctionnel de commande avec l’asservissement de la vitesse.

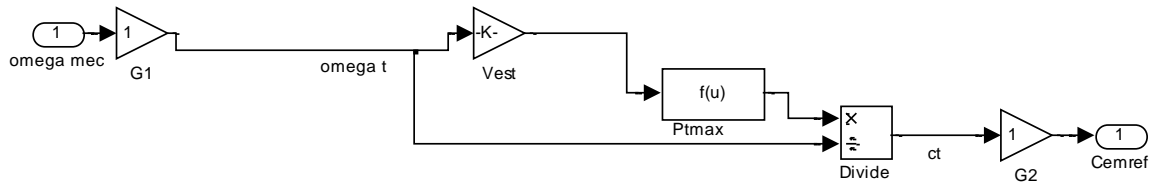


Figure IV. 3 Schéma block de MPPT sous Simulink

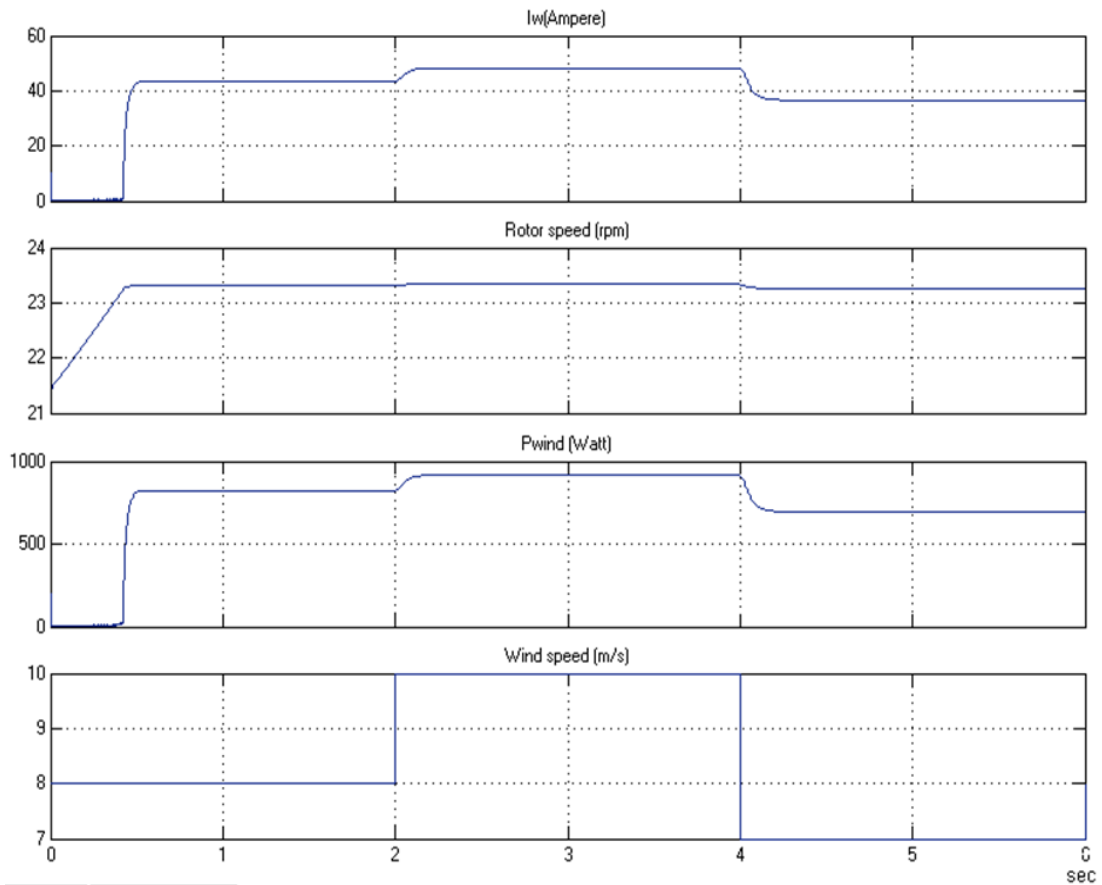


Figure IV. 4 résultat de simulation de la commande MPPT

### IV.3 la théorie du contrôle par mode de glissement(CMG) :

La théorie du contrôle de mode glissant (CMG) a été introduite pour la première fois dans le contexte de la structure des systèmes variables (SSV). À ses débuts, la théorie SMC a été négligée en raison de développement dans la théorie du contrôle linéaire célèbre, [36] au cours des 20 dernières années, il s'est avéré être un très méthode de contrôle efficace.

La commande à structure variable (CSV) est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue. Les commutations

de la commande s'effectuent en fonction des variables d'état, utilisées pour créer une "variété" ou "hyper surface" dite de glissement dont le but est de forcer la dynamique du système de correspondre avec celle définie par l'équation de l'hyper surface.

Quand l'état est maintenu sur cette hyper surface, le système est dit en régime glissant. Ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation et à certaines perturbations. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de simplification sur le modèle du système.[37]

En conséquence, espère concevoir une stratégie de contrôle de haute qualité en appliquant commande de mode glissant (CMG) à la commande de PMSM. [38]

Pour le contrôleur de mode glissant, la méthode de stabilité de Lyapunov est appliquée pour maintenir le système non linéaire sous control SMC fournit une réponse dynamique rapide et précise.

### **IV.3.1 Objectif de la commande par mode glissant :**

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels:

1. Synthétiser une surface  $S(x,t)$ , telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
2. Déterminer une loi de commande (commutation)  $U(x,t)$  qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

### **IV.3.2 Principe du contrôleur à mode glissant**

Elle est une classe de la commande à structure variable elle est efficace et robuste pour les systèmes linéaires et non linéaires.

La tâche principale de la commande par mode glissant, est de fournir une surface de commutation, selon des lois d'existence, de convergence et des stabilités. La surface de commutation peut être atteinte par la trajectoire d'état grâce aux changements appropriés de la structure du système commandé.

Le but de la commande par mode glissant est que la trajectoire d'état soit attiré vers une surface de glissement défini  $S$  (Sliding Surface) et glisse autour d'elle. Une fois la surface de glissement est atteinte, la dynamique du système reste insensible

aux variations des paramètres du processus, et aux perturbations externes [39], [40].

U: vecteur de commande.

$U_{eq}$  : vecteur de commande équivalente.

$U_n$ : vecteur de commande discontinu.

X : vecteur de variables.

$S_i$  : vecteur surface de commutation

### IV.3.3 Conception de la Commande par Mode de Glissement

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

1. Le choix de la surface.
2. L'établissement des conditions d'existence de la convergence.
3. La détermination de la loi de commande.

### IV.3.4 Application de la commande par mode glissant au GASP :

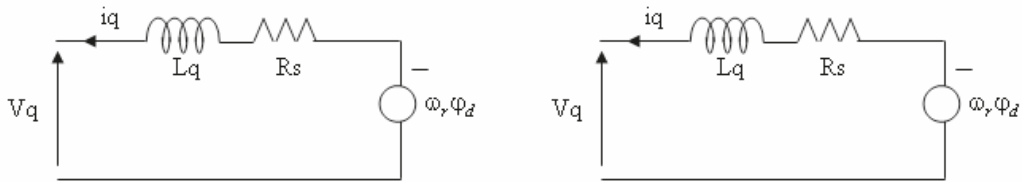
Le modèle dynamique de PMSG a été construit dans le cadre de référence rotatif d-q, où va l'axe q à 90 ° de l'axe d par rapport au sens de rotation. Le modèle électrique du GSAP en le référentiel synchrone d-q, les équations de tension et de couple sont données par :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - F \cdot \Omega \\ C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) I_d \cdot I_q + \phi_f \cdot I_q] \end{cases} \quad (IV-2)$$

$$\Phi_d = L_d I_d + \phi_f$$

$$\Phi_q = L_q I_q \quad (IV - 3)$$





- **La surface de mode glissant** donne par :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \delta\right)^{n-1} e \tag{IV-4}$$

Ou :

$$e(t) = x_{ref}(t) - x(t)$$

**E** est l'erreur,  $\delta$  est une constante positive,  $X_{ref}$  est le signal de référence et **X** est la variable d'état.

- **Condition de convergence:** la fonction de Lyapunov définie la condition de convergence:

$$S(X) \cdot \dot{S}(X) \leq 0 \tag{IV-5}$$

- **Calcul de Commande :** la commande est donne par cette equation:

$$u = u_{eq} + u_n$$

Ou **u** est le signal de commande,  $u_{eq}$  est la commande équivalente,  $u_n$  est le terme de commutation qui définit par la signe de surface glissante multiplie par un constant positive :

$$U_n = k \cdot \text{sing}(S(X)) \tag{IV-6}$$

La surface glissante et sa dérivé de la vitesse mécanique de génératrice ont donnés par:

$$S_\Omega = \Omega_{opt} - \Omega \tag{IV-7}$$

$$\frac{ds_\Omega}{dt} = \frac{d\Omega_{opt}}{dt} - \frac{d\Omega}{dt} \tag{IV-8}$$

En remplaçant (IV-2) dans (IV-8), le nouveau dérivé de la surface de glissement est montré dans (IV-9) :

$$\frac{ds_\Omega}{dt} = \frac{d\Omega_{opt}}{dt} - 1/J(Cm - Cem - F\Omega) \tag{IV-9}$$

La fonction de Lyapunov définie par:

$$V = \frac{1}{2} s_\Omega^2 \tag{IV-10}$$

Selon la condition (IV-5) on obtient:

$$\frac{dV}{dt} = s_{\Omega} \cdot \frac{ds_{\Omega}}{dt} \leq 0 \quad (\text{IV-11})$$

Afin d'obtenir la stratégie de commande pour  $\Omega$ , le couple électromagnétique qui est la commande variable est composé de deux composantes:

$$C_m = C_{m_{eq}} - C_{m_n} \quad (\text{IV-12})$$

Où,  $C_{m_{eq}}$  est la commande équivalente qui permet la poursuite de la trajectoire sur surface de glissement, et elle se déduit de  $\dot{S}_{\Omega} = 0$ . L'autre composante  $C_{m_n}$  est la commande discontinue qui est responsable de l'attractivité de la commande variable autour de la surface de glissement, elle est calculé par:

$$C_{m_n} = k \cdot \text{signe}(\Omega) \quad (\text{IV-13})$$

$K$  est le gain de commande

$$\text{Sign}(s_{\Omega}) = \begin{cases} 1 & s_{\Omega} > 0 \\ 0 & s_{\Omega} = 0 \\ -1 & s_{\Omega} < 0 \end{cases} \quad (\text{IV-14})$$

En résolvant  $\dot{S}_{\Omega} = 0$ , on a trouvé que  $\Omega_{opt} = \Omega$  alors la commande équivalente du couple électromagnétique est donnée par:

$$C_{m_{eq}} = C_m - f \cdot \Omega - J_{eq} \cdot \dot{\Omega}_{opt} \quad (\text{IV-15})$$

Ensuite, la commande de couple électromagnétique exprime comme (IV-16) ; remplaçant par (IV-2) on obtient la surface des courants  $dq$  en (IV-17):

$$C_{em} = C_m - f \cdot \Omega - J_{eq} \cdot \dot{\Omega}_{opt} + k \cdot \text{sign}(\Omega) \quad (\text{IV-16})$$

$$I_{sqr} = \frac{-2}{3 \cdot N_p \cdot \phi_f} [C_m - f \cdot \Omega - J_{eq} \cdot \dot{\Omega}_{opt} + k \cdot \text{sign}(\Omega)] \quad (\text{IV-17})$$

La surface glissant de commandes des courants  $dq$  sont:

$$\begin{cases} s_d = I_{sdr} - I_{sd} \\ s_q = I_{sqr} - I_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV-18})$$

Par (9) et (17), on obtient:

$$v_{sd} = \Omega \cdot L_q \cdot I_{sq} - R_s \cdot I_{sd} \quad (\text{IV-19})$$

$$v_{sq} = -L_q \cdot \frac{dI_{sqr}}{dt} - R_s \cdot I_{sq} - \Omega \cdot L_d \cdot I_{sd} + \Omega \cdot \phi_f$$

Après,  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  sont donnés par la même la méthode comme indiqué par:

$$v_{sd} = \Omega \cdot L_q \cdot I_{sq} - R_s \cdot I_{sd} + k \cdot \text{sign}(\Omega) \tag{IV-20}$$

$$v_{sq} = -L_q \cdot \frac{dI_{sqr}}{dt} - R_s I_{sq} - \Omega \cdot L_d \cdot I_{sd} + \Omega \phi_f k \cdot \text{sign}(\Omega)$$

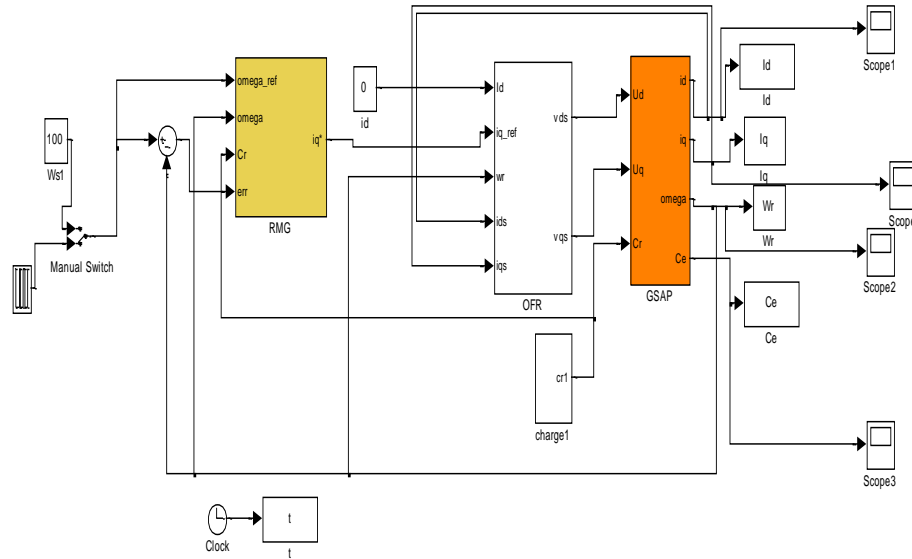


Figure IV. 5 LA COMMANDE EN MODE GLISSANT SOUS SIMILINK

#### IV.4 LA Commande par MLI:

Cette stratégie est une alternative à la commande dans le repère (a, b , c ). Elle exige pour la regulation des courant  $I_q$  et  $I_d$  imposer les tensions de référence  $V_{dref}$  et  $V_{qref}$  dont on déduit les tensions de reference sinusoïdales  $V_{aref}$  ,  $V_{bref}$  et  $V_{cref}$  , pour la Commande de redresseur.

##### IV.4.1 Redresseur MLI :

C'est un convertisseur à modulation de largeur d'impulsions utilisant des transistors à commutation forcée telles que les IGBT, MOSFET, et les GTO, l'utilisation de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmoniques, en prélèvent des courants d'allure sinusoïdal mais aussi un contrôle du facteur de puissance.

Ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. On distingue deux structure la structure en Courant et la structure en tension [41]. On s'intéressera dans la suite de notre travail uniquement à la structure du redresseur MLI de tension.

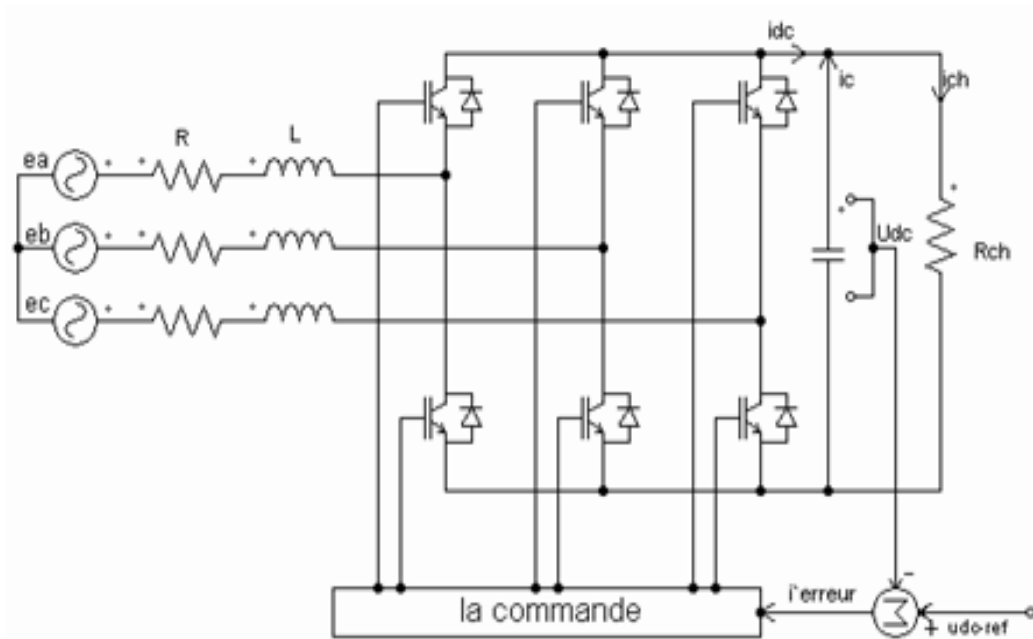


Figure IV.6 Le redresseur MLI

#### IV.4.2 Modèle du redresseur MLI :

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue du redresseur

Nous trouvons également le redresseur à IGBT qui est un redresseur commandé à l'ouverture et à la fermeture, le modèle de ce type de redressement est représenté par la figure (IV.7), il est constitué de transistors IGBT comprenant chacun une diode en antiparallèle d'une manière à assure la continuité des courants de source.

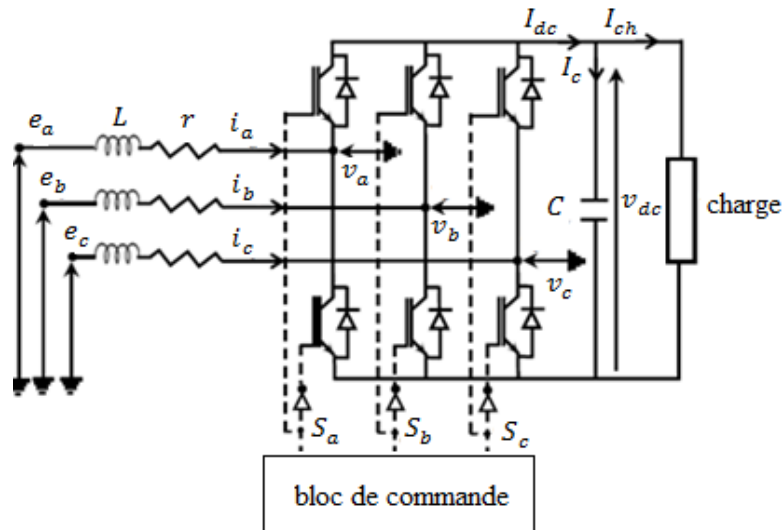


Figure IV.7 Schéma de l'association GSAP – Redresseur MLI

**IV.4.3 Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI de tension :**

Le redresseur MLI est un onduleur de tension utilisé à l'envers permet de produire une tension continue à partir d'une tension alternative (conversion AC/DC), et le même principe qu'un redresseur à diodes. Constitué de trois bras de commutations à Interrupteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture. Chaque bras composé de deux interrupteurs comportant chacune une diode et un transistor. Ces derniers sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode de commutation, chaque bras du convertisseur est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension. La figure.IV.8 illustre ce principe.

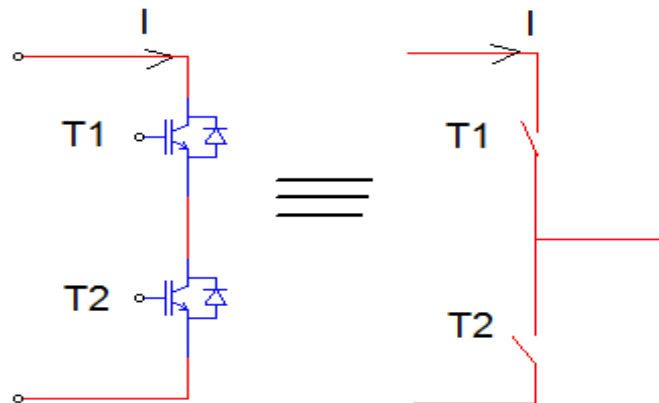


Figure IV.8 Schéma d'un bras du redresseur à MLI.

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée grâce à l'utilisation d'un régulateur (PI, flou,...etc) [41]. La tension du bus continu  $V_{dc}$  est mesurée et comparée avec une référence ( $V_{dréf}$ ), le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du convertisseur à la fermeture ou à l'ouverture.

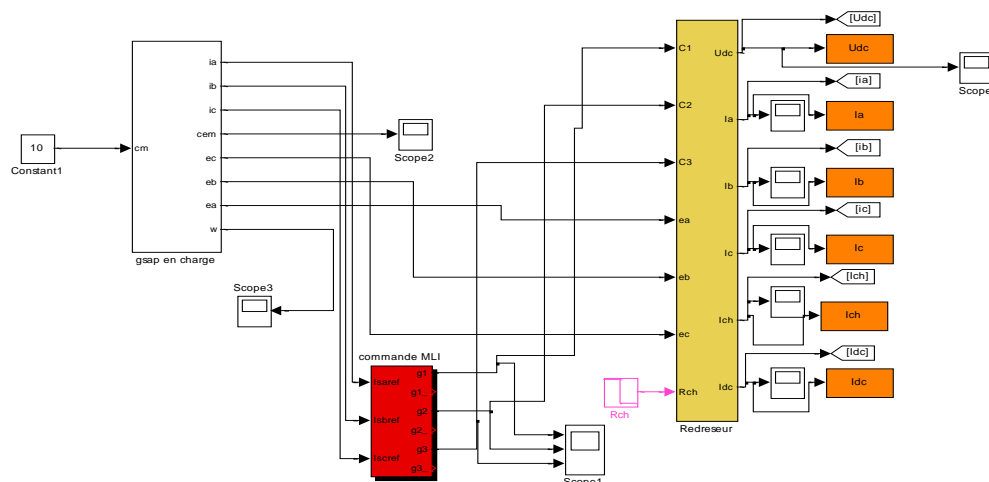


FIGURE IV.9 Synoptique de la commande MLI du redresseur et de GSAP

### IV.5 Simulation et interprétation

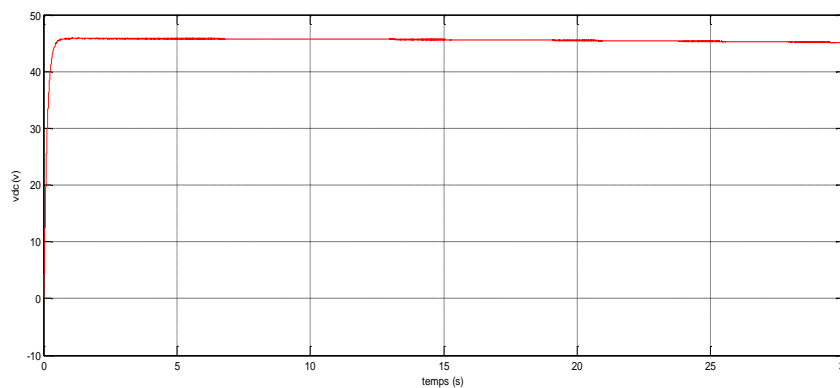


Figure IV.10 LA Tension redressée

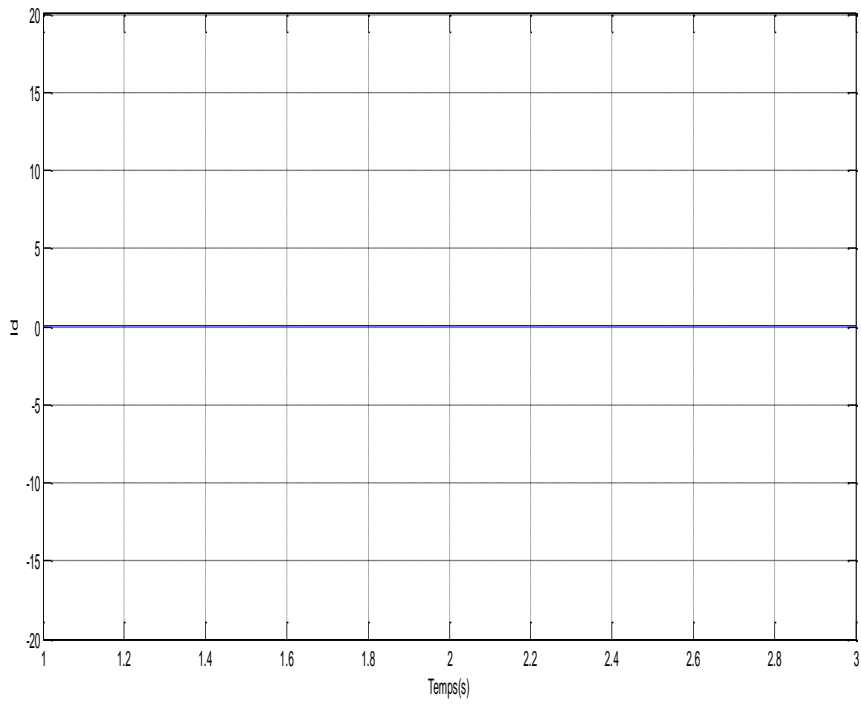


FIGURE IV.11 Courant Id

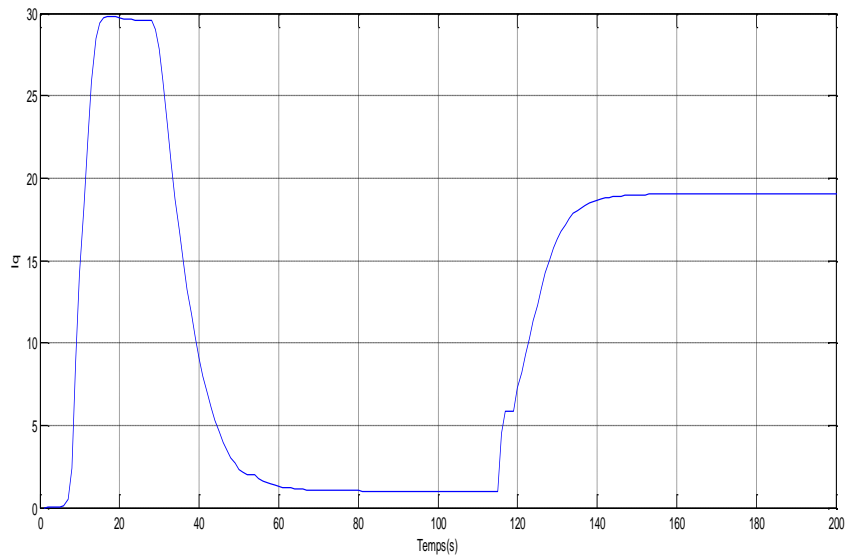
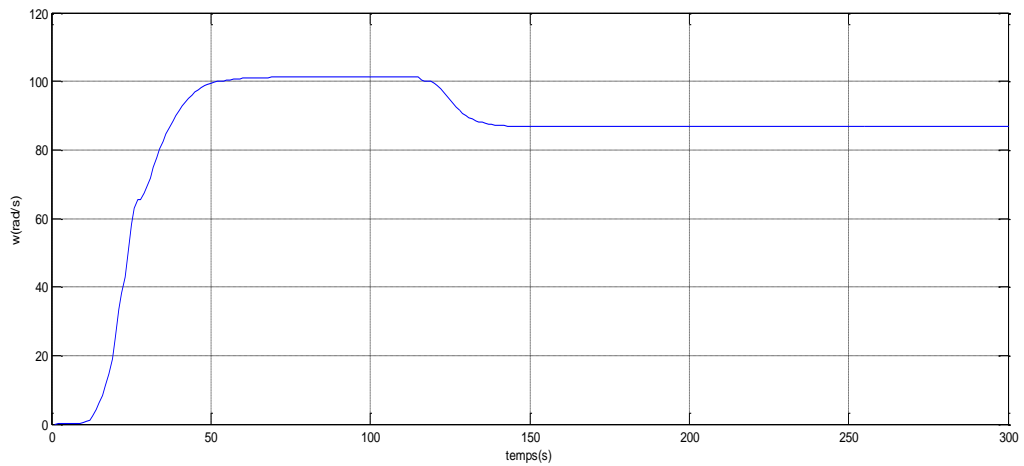
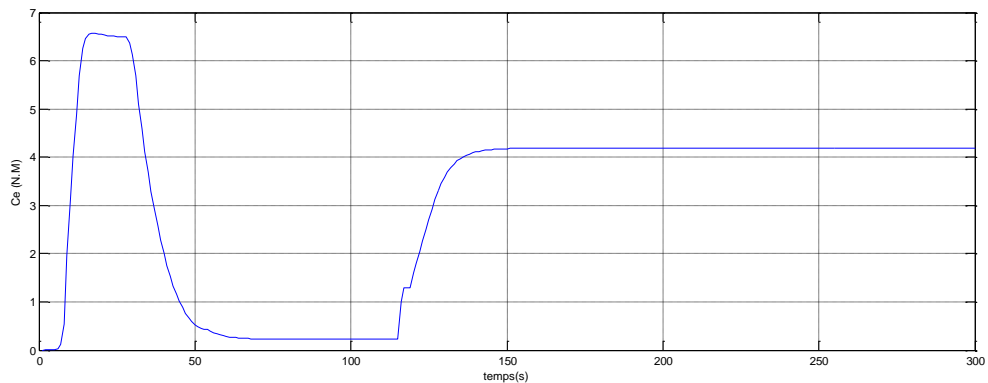


Figure IV.12 Courant Iq



**Figure IV.13 la vitesse de GSAP**



**Figure IV.14 le couple**

### Interpretation :

Des simulations approfondies ont été effectuées à l'aide du logiciel Matlab / Simulink pour examiner le contrôle du mode glissant du générateur synchrone à aimant permanent.

Afin de valider les stratégies de contrôle telles que discutées, des études de simulation numérique ont été système décrit dans la figure IV.5

La régulation de courant continu est obtenue en utilisant le contrôleur proposé malgré la présence des perturbations. La validité du contrôle est démontrée par les résultats montrés dans la Figure IV. (11, 12, 13, 14,). La figure (11,12) montre la



réponse des composants  $i_d$  et  $i_q$ . Les courants statoriques contrôlés par PWM généré par le contrôle (SMC).

#### **IV.6 Conclusion**

Ce chapitre présenté l'étude de la commande par mode glissant. Au début du chapitre, une étude générale a été menée pour la technique de mode glissant et enfin cette étude a été appliquée à la génératrice asynchrone à aimant permanent GSAP. La stratégie de commande par mode glissant est validée par une simulation en environnement SIMULINK/MATLAB. Les résultats de simulation ont révélés ...On fin on conclure que la technique par mode glissant est robuste.



# **Conclusion générale**

### CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la commande en mode glissant d'une Génératrice Synchrone à Aimant Permanent, ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien à vitesse variable. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation, l'analyse de fonctionnement et la commande.

La production de l'énergie éolienne importe de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie motrice de développement durable.

Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs aérodynamiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice. Tout cela a été conçu autour d'une GSAP.

Dans le premier chapitre nous avons dressé un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits.

Le deuxième chapitre a été consacré sur la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents. L'écriture des équations dans le repère de Park pour effectuer la commande afin de faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink.

Le troisième chapitre a été consacré sur la modélisation des éléments de la chaîne éolienne globale. Nous avons établi un modèle globale de la chaîne de conversion éolienne qui est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents.

## Conclusion générale

---

Et quatrième chapitre et base sur la commande on mode glissant de la machine synchrone a aimant permanent nous avons décrit les lois de commande et ses conditions et à la fin nous avons fait une simulation sur Matlab.

GSAP associé à une turbine éolienne; puis nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne et nous avons décrit la commande de la liaison entre une GSAP, un redresseur commandé et la charge. La commande du système a été aussi détaillée; et à la fin, nous avons présenté les résultats de simulation de la chaîne complète de conversion d'énergie éolienne.

En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude de point suivant :

Étudier la gestion des systèmes, c.à.d. réaliser des optimisations sur des critères de minimisation du coût.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] **CREG (2015)**. Programme de Développement des Energies Renouvelables 2015-2030, < <http://www.creg.gov.dz/images/stories/PDF/creg15mars.pdf> > Mars 2015.
- [2] <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2018-04/20180418-rapport-soutien-energies-renouvelables.pdf> (site internet)
- [3] **Frédéric POITIERS** « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation.
- [4] « <http://www.info-éolien.com> » ; Site internet
- [5] **REDJEM Radia** ; « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » ; mémoire de fin d'étude ; université mentouri de Constantine ; 2009.
- [6] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>
- [7] **RIOLET Emmanuel** « Le mini-éolien » ; livre ; 2010.
- [08] **HARITZA CAMBLONG** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne Dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [9] **TOUAL BELKACEM** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de Magister Université de Batna, 2010.
- [10] **A. Harrouz, B. A Ali Harrouz**, " Modalisation d'une Petite Eolienne Hors Réseaux Basé sur la Génératrice Synchrone a Aimant Permanent", International Conference on Energy and Sustainable Development, p 5, 2011.
- [11] **Hamzaou Ihssen**, «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur», Mémoire d'Ingénieur, ENP d'Alger, 2008.
- [12] **Hacene BENZAADI**, Commande DTC-SVM d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2012.
- [13] **Noureddine BOUNASLA**, «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents», Université Ferhat ABBAS Sétif -1 (ALGERIE)/2014.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [14] **Marwa Mohamed Moustafa EZZAT** «commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimants permanents», thèse de doctorat, école doctorat sciences et technologies de l'information et mathématique, école centrale de nantes, 17 Mai 2011.
- [15] <http://www.sonelgaz.dz/?page=article&ida=364>
- [16] **Luc Moreau** « Modélisation, conception et commande de génératrice à reluctance variable basse vitesse » Thèse de Doctorat, Université de Nantes 2005.
- [17] **S. Hamache, Dj.Ghemeri** «Modélisation par éléments finis d'une machine synchrone à Aimant permanent >> mémoire d'ingénieur à l'Université de Bejaia.
- [18] **NICOLAS LAVERDURE** «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [19] **N.laverdure, I. Valero, S. Bacha, L.Gerbaud,** ' Optimisation de l'interfaçage de puissance dans les systèmes éoliens', GEVIQ'2002, merseille, 2002.
- [20] **Luc MOREAU,** modélisation, conception et commande de la génératrice à reluctance variable basse vitesse, thèse doctorat, université de Nantes, 2005.
- [21] **Houari Azzedine** « Etude et simulation d'une petite éolienne à base d'une Génératrice synchrone à aimant permanant », mémoire d'Ingénieur, Université de Bejaia, 2008.
- [22] **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>
- [23] **A. Boyette,** << Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne >>, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [24] **Nicolas Laverdure,** << Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires >>, Thèse de Doctorat, l'INPG, Génie Electrique, 2005.
- [25] **Mayouf Mesaoud,** Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanant, thèse de magister de l'université de Batna, 13-02-2008.



## BIBLIOGRAPHIE

---

- [26] **Bouhedda Ali**, «Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne», Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2011.
- [27] site : [www.suisse-eole.ch/fr/energie-eolienne/statistiques/](http://www.suisse-eole.ch/fr/energie-eolienne/statistiques/)
- [28] **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>
- [29] **Désiré Le GOURIERE**, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des Installations, édition Eyrolles, 1982
- [30] **Adam MIRECKI** «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», THÈSE de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, N° d'ordre : 2213/2005.
- [31] **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>
- [32] **TOUAL BELKACEM** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [33] **LA TRECHE Mohammed Tahar** «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [34] **A. Mirecki**, 'Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Tou.
- [35] **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>
- .
- [36] **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>

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [37] **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>
- [38] **Xin S.** PMSM Servo System Sliding Mode Variable Structure Control. Master's degree thesis, essays of professional control theory and control engineering Wuhan University of Technology, P.R.China 2007.
- [39] **B .Cherif** << Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation >> MEMOIRE de Magister Université Mohamed Khider – Biskra ,2012.
- [40] **B. YACINE** << Commande d'un convertisseur CA/CC et contrôle par différentes techniques >> Mémoire master université d'el-oued ,2015.
- [41] **BOUAFIA ABDELOUAHAB**, ‘‘techniques de commande prédictive et Floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI ‘’, Thèse doctorat, 2010, Université FERHAT ABBAS – SETIF, Algérie.
- [42] **Moungar 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>

# **Annexe**

## Annexe

Le rayon de voilure (R)	0.5 m
Hauteur de voilure (H)	2m
La masse volumique de l'aire	1.2 kg/m <sup>3</sup>
Puissance nominale ( p <sub>n</sub> )	500 w <sub>att</sub>
Tension nominale (V)	220 v
Résistance d'une phase statorique (R <sub>s</sub> )	0.985 ohm
Fréquence nominale (f)	50 Hz
Flux des aiment (φ <sub>f</sub> )	0.15W <sub>b</sub>
Nombre de paire de pôles (p)	4
Moment d'inertie (J)	101.10 <sup>3</sup> N.m.s <sup>2</sup> /rd
Le coefficient de frottement (F)	6.10 <sup>-3</sup>
Inductance statorique direct ( L <sub>d</sub> )	2.7 mH