

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 LA MATIERE



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET  
ENERGIES RENOUVELABLES**

**Thème**

*Modélisation et simulation d'un générateur synchrone à  
aimant permanent couplé à un aérogénérateur*

**Soutenu le : 06/06/2018**

**Présenté par :**

*YAICHI Hayat  
GUENDOZ Sarah*

**Encadré par :** Dr. BOUSSAID Mohammed(Université d'Adrar)

**Cou -encadreur :** Mr. BELBALI Mohammed(Ingénieur à Sonalgaz)

**Président :** Mr. HARROUZ Abdelkader (Université d'Adrar)

**Examineurs :** Mr. OMARI Boumediene(Université d'Adrar)

2017- 2018



*Dédicaces*

*Nous dédions ce modeste travail*

*A*

*Nos très chers parents*

*Nos frères*

*Nos sœurs*

*Toutes nos amies*

*A toute personne ayant participé de près ou de loin à la  
réalisation de ce modeste travail.*

*Ce travail est dédié également à la promotion de physique  
énergétique et énergies renouvelables.*

*Sarah et Hayat*



## *Remerciements*

*Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu le tout puissant qui grâce à son aide nous avons terminé ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement les enseignants **Dr.A.HARROUZ**, **Mr.M .BELBALI** et **Dr. BOUSSAID Mohamed** pour leurs aide et, leurs encouragements et surtout leur compréhension durant toute la période de préparation de ce mémoire.*

*Nous remercions également l'honorable jury qui a bien voulu examiner notre travail.*

*Nos professeurs qui nous ont enrichis de connaissances et tout le département de physique énergétique.*

## Sommaire

### Résumé

### Liste des figures

### Liste des symboles

### Abréviations

### Introduction générale

Chapitre I.....	1
Généralités sur le système de conversion de l'énergie éolienne .....	1
I.1 Introduction .....	1
I.2 Définition de l'énergie éolienne .....	1
I.3 Etat de l'art sur l'éolien dans le monde .....	2
I.3.1 Historique de l'énergie éolienne .....	2
I.3.2 L'énergie éolienne en quelques chiffres .....	3
I.3.2.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne .....	3
I.3.2.2 Répartition continentale .....	4
I.3.2.3 L'énergie Eoliennes en Algérie .....	5
I.4 Répartition régionale de la vitesse du vent .....	6
I.5 Les régions ventées en Algérie .....	7
I.6 L'Atlas de la puissance en sud.....	7
I.7 Futurs challenges.....	9
I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	10
I.8.1 Avantages.....	10
I.8.2 Inconvénients .....	11
I.9 les différents types d'éoliennes .....	11
I.9.1 Eoliennes à axe vertical.....	11
.a. Avantages .....	12
b. Inconvénient .....	12
I.9.2 Eoliennes à axe horizontal .....	13
I.9.2.1 Eoliennes lentes .....	13
I.9.2.2 Eoliennes rapides .....	13

Avantages .....	14
Inconvénient .....	14
I.10 Constitution d'une éolienne moderne .....	14
I.11 Structures de la génératrice GSAP avec système éolien .....	16
I.11.1 Génératrices synchrones connecté à la charge .....	16
I.11.2 Systèmes non couplés au réseau alternatif .....	17
CHAPITRE II .....	20
Etude et modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanent .....	20
II.1 Introduction .....	20
II.2 Machine synchrone à aimant permanent .....	20
II.2.1 Généralités .....	21
II.2.2 Principes généraux .....	22
II.2.3 Structure d'une MSAP .....	22
II.2.3.1 MSAP sans Pièces Polaires .....	23
II.2.3.2 GSAP avec Pièces Polaires .....	23
II.2.4 Les aimants permanents .....	24
II.2.4.1 Description .....	24
II.2.4.2 Propriétés .....	24
II.2.5 Avantages et inconvénients de la MSAP .....	25
III.3 Modèle de la GSAP .....	25
III.3.1 Hypothèses simplificatrices .....	25
II.3.2 Les équations de tension et flux .....	26
II.3.3 Equation mécanique .....	26
II.3.4 La transformation de Park .....	27
II.4 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park .....	28
II.4.1 Equations électriques .....	28
II.4.2 Calcul de puissance .....	28
III .4.3 Expression de Couple électromagnétique .....	30
II.5 Simulation et interprétation .....	30
II.5.1 Fonctionnement à vide .....	30
Interprétation des résultats .....	32
II.5.2 Fonctionnement en charge ( $R_{ch}$ , $L_{ch}$ ) .....	32
Interprétation des résultats .....	36
II.6 Conclusion .....	36
CHAPITRE III .....	39

Modélisation de la chaine de production d'énergie éolienne .....	39
III .1 Introduction .....	39
III.2 Le petit éolien .....	39
III.2.1 Le vent.....	40
III.2.2 Mesure du vent .....	40
Anémomètres à ultrasons .....	41
Anémomètres Propeller.....	41
III .2.3 Modélisation du vent.....	41
III .3 Modélisation de la turbine éolienne .....	42
III .4 Modélisation mécanique du couplage turbine –génératrice .....	45
III .5 Modèle de la GSAP .....	46
III .6 Simulation .....	47
III .7 Conclusion.....	49
Conclusion Générale .....	50
Annexes .....	51
ANNEXE A.....	52
1. Distribution du vent.....	52
2. Puissance du vent .....	52
3.Limite de Betz .....	53
5.Connaissances basiques sur les pales .....	55
Bibliographie.....	58

## Résumé

Le présent mémoire présente une étude d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent connecté a une charge. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiés aux applications éoliennes, des machines de construction standard aux génératrices discoïdes (champ axial), ou encore à rotor extérieur. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones.

## ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة لنظام توربينات الرياح على أساس مولد متزامن ذو مغناطيس دائم متصلاً بحمل. إن الآلات من هذا النوع تحتوي على عدد كبير من الأعمدة وتمكن من توليد عزم دوران ميكانيكي كبير. يوجد العديد من لآلات متزامنة مع مغناطيس دائم مخصصة لتطبيقات توربينات الرياح، آلات البناء القياسية مع المولدات القرصية (حقل محوري)، أو مع الدوار الخارجي. اقتران هذه الآلات مع الالكترونيات أصبح أكثر وأكثر تكنولوجيا مجدية اقتصادياً. مما يجعلها منافساً جدياً للمولدات غير المتزامنة.

## Abstract

This thesis presents a study of a wind turbine system based on a permanent magnet synchronous generator connected to a load. Machines of this type have a large number of poles and make it possible to develop considerable mechanical torques. Synchronous machines with permanent magnets are dedicated to wind turbine applications, standard construction machines with discoid generators (axial field), or with external rotor. The coupling of these machines with the power electronics becomes more and more economically viable. Which makes it a serious competitor of asynchronous generators.

## Liste des figures

<b>Fig.I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [6]</b> .....	2
<b>Fig.I.2 : Capacité mondiale installé en MW [5]</b> .....	3
<b>Fig.I.3 : taux de croissance du marché mondial [3]</b> .....	4
<b>Fig.I.4 : Croissance par continent [%] [3]</b> .....	4
<b>Fig.I.5 : Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010[3]</b> .....	5
<b>Fig.I.6 Eolienne de 100 kW de Grand Vent [9]</b> .....	5
<b>fig.I.7 Eolien d'Adrar [6]</b> .....	6
<b>Fig.I.8 des régions ventées en Algérie [14]</b> .....	6
<b>Fig.I.10 Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés [14]</b> .....	7
<b>Fig.I.11Atlasde la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol. [14]</b> .....	7
<b>FigI.12 Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol</b> .....	8
<b>Fig.I.13 L'énergie éolienne mondiale (MW) [11]</b> .....	9
<b>fig.I 14 Le potentiel total d'énergie renouvelable technique en EJ/an pour 2050[14]</b> .....	9
<b>fig.I.15 Marche mondiales centrales électrique ,1970-2014[14]</b> .....	10
<b>fig.I.16 technologie éolienne à axe vertical [14]</b> .....	12
<b>fig.I.17 technologie éolienne à axe horizontale [14]</b> .....	13
<b>fig.I 18 Classification des turbines éoliennes [16]</b> .....	14
<b>fig.I.19 Différentes parties d'une éolienne [14]</b> .....	15
<b>Fig.I.20 la génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP) [18]</b> .....	16
<b>Fig.I.21 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [18,19]</b> ..	16
<b>Fig.I.22 Système basé sur la machine synchrone et redresseuse à diodes [18,19]</b> .....	17
<b>Fig.I.23 Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu [22]</b> .....	17
<b>Fig. II.1Exemple de générateur synchrone à aimants permanents de petite éolienne 400 W [21,22]</b> .....	51
<b>Fig. II.2 Différents types de rotors d'une MSAP</b> .....	52
<b>Fig. II.3 Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents [21, 22,23]</b> .....	53
<b>Fig. II.4 Structures d'une Machine à Aimants Permanents sans Pièces Polaires [24]</b> .....	54
<b>Fig. II.5 cycle d'hystérésis [25,26]</b> .....	55
<b>Fig. II.6 courbe de désaimantation [25,26]</b> .....	55
<b>Fig. II.7 Modèle de PARK pour la GSAP [27,28]</b> .....	59
<b>Fig. II.8 Modèle de PARK pour la GSAP [27,28]</b> .....	60
<b>Fig. II .9Simulation de la GSAP à vide</b> .....	63
<b>Fig. II .10 Bloc de la simulation de la GSAP en charge</b> .....	65
<b>Fig. II .11Simulation de la GSAP en charge</b> .....	67
<b>Fig. III.1Structure de la chaine éolienne</b> .....	51
<b>Fig.III .2 : Anticyclones et dépression [32]</b> .....	52
<b>Fig.III.3Anémomètres [32]</b> .....	53
<b>Fig.III.4Voilure à axe vertical de type Savonius [36]</b> .....	54
<b>Fig.III.5Courbe caractéristique retenue pour les essais</b> .....	55
<b>Fig. III.6Modèle du couple éolien sous Simulink</b> .....	56
<b>Fig. III.7La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation</b> .....	56
<b>Fig. III.8Modèle du couple de la turbine éolienne</b> .....	57
<b>Fig. III.9Schéma bloc de la turbine éolienne</b> .....	58
<b>Fig. III.10 les résultats de la simulation de système éolien</b> .....	61



<b>Fig.A.1 distribution de Weibull.....</b>	<b>51</b>
<b>Fig.A.2 Limite de Betz.....</b>	<b>52</b>
<b>Fig.A.3 Profil d'aile .....</b>	<b>53</b>
<b>Fig.A.4 pale d'éolienne .....</b>	<b>54</b>
<b>Fig.A.5 rapport de vitesse de pointe .....</b>	<b>55</b>
<b>Fig.A.6 Finesse .....</b>	<b>56</b>

## Liste des symboles

$v_a, v_b, v_c$	Les tensions des phase (a,b,c)
$i_a, i_b, i_c$	Les courants des phase (a,b,c)
$i_{dc}$	Courant continu
$v_{dc}$	Tension du bus continue
P	Nombre de pôles
$t_s$	Temps de la simulation
VL	Tension aux bornes de l'inductance
V1, V2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
$\rho$	densité de l'air
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
$p_m$	Puissance extraite par le rotor éolien
$p_{mt}$	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
$c_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne
$\Lambda$	Vitesse relative de l'éolienne
$\Omega$	Vitesse de rotation de la génératrice
$p_{mg}$	Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice
V	Vecteur vitesse du vent
f	Fréquence du réseau ELECTRIQUE
R	Rayon de la turbine
$c_{em}$	Couple électromagnétique
$R_s$	Résistances des enroulements
$l_s$	Inductance synchrone
$m_j$	Inertie de la machine
$f_m$	Coefficient de frottements
[P]	opérateur de la place
$c_{mec}$	Couple mécanique
$j_t$	Inertie de la turbine
$f_t$	Coefficient de frottement de la turbine
$t_s$	Temps de simulation
$\theta$	L'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé
$R_{ch}$	Résistance de la charge

## Liste des symboles

---

$L_d$  L'inductance sur l'axe d

$L_q$  L'inductance sur l'axe q

$L_{ch}$  Inductance de la charge

$\omega_r$  La vitesse de rotation du champ tournant

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

$R_s$  la résistance d'une phase statorique

$\varphi_f$  est le flux d'excitation produit par les aimants permanents

$C_m$  est le couple moteur appliqué sur la génératrice avec  $F$  le coefficient de frottement,

$J$  : Moment d'inertie

$B_r$ , L'induction résiduelle (ou rémanente)

## Liste des abréviations

MSAP Machine synchrone à Aimant Permanent

GSAP Génératrice Synchrone à Aimant Permanent

MPPT Maximum Power Point Tracking

MLI Modulation de la largeur d'impulsion

# Introduction générale

## Introduction générale

L'Homme a très vite compris la manière de capter cette énergie et comment l'exploiter dans des systèmes simples pour moulinier les grains où pomper l'eau. On trouve d'ailleurs des ancêtres d'éoliennes jusque dans la perce 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 suivre le plan de travail suivant :

Le premier chapitre est un état de l'art sur les systèmes éoliens, on rappelle les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien et les équations qui s'y rapportent ainsi que les différents types d'aérogénérateur, les composants principaux et les différentes structures de couplage du générateur éolien au réseau ou bien hors réseau.

Le second chapitre traite la chaîne de conversion électromécanique qui comporte le générateur synchrone à aimant permanent, ont été modélisés et simulés dans l'environnement Matlab/simulink.

Le troisième chapitre a fait l'objet de la modélisation du vent et de la turbine éolienne à axe vertical. Les modèles mathématiques de ces deux dernières ont été développés, la turbine éolienne est par la suite simulée pour deux profils du vent différents.

Notre travail se termine par des références bibliographiques et une conclusion générale.

# **Chapitre I : Généralités sur** **le système de conversion** **de l'énergie éolienne**



## Chapitre I

### Généralités sur le système de conversion de l'énergie éolienne

#### I.1 Introduction

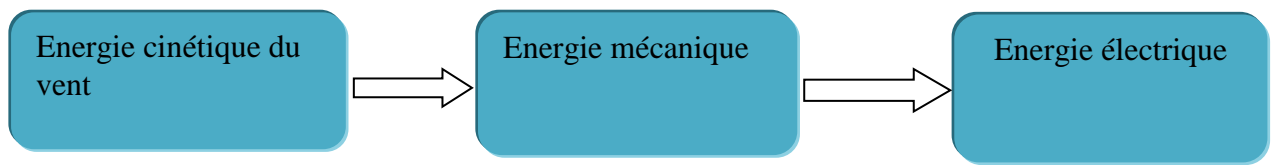
Les énergies renouvelables ou EnR (hydraulique, solaire, éolienne, géothermique,) ne représentent actuellement qu'environ 20 % de la production mondiale d'électricité ; en excluant l'hydroélectricité, ce taux tombe à 2 % [1]. Dans un contexte de crise énergétique mondiale sous-tendue par l'impératif d'un développement durable (problèmes environnementaux, épuisement des ressources fossiles, ...), les défis du futur énergétique nécessiteraient le développement des EnR comme sources de substitution, propres et inépuisables.

A titre indicatif, la Communauté Economique Européenne se donne comme triple objectif à l'horizon 2020 d'augmenter la part des **EnR** à hauteur de 20 %, de dépolluer de 20 % et d'économiser 20 % d'énergie et ce, grâce à de multiples actions politico-économiques et technologiques concertées.[1].

Dans ce contexte, la filière éolienne représente le créneau à plus forte croissance dans la production d'électricité [2]. Parallèlement au marché de la génération éolienne de forte puissance, se développent de plus en plus des systèmes de petite taille en site isolé. Ces derniers s'adaptent bien aux spécificités de notre pays, l'Algérie .Ce qui justifie quelque peu le choix de cette technologie pour notre présente étude. En effet, les chaînes de conversion d'énergie associées utilisent souvent un générateur synchrone à aimants permanents. Afin de maximiser l'efficacité de l'aérogénérateur éolien, diverses solutions ont été examinées à différents niveaux de la chaîne de conversion. En ce qui concerne l'interface électronique de puissance entre le générateur et la charge, son rôle est souvent de commander le générateur afin d'extraire le maximum de puissance du vent [2,4].

#### I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (**Fig.I.1**)



**Fig.I.1** : Conversion de l'énergie cinétique du vent [6]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [1].

### **I.3 Etat de l'art sur l'éolien dans le monde**

#### **I.3.1 Historique de l'énergie éolienne**

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable [7]. 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[8] 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[7].

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[7]

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 [7].

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) [2].

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [2]

### I.3.2 L'énergie éolienne en quelques chiffres

#### I.3.2.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne

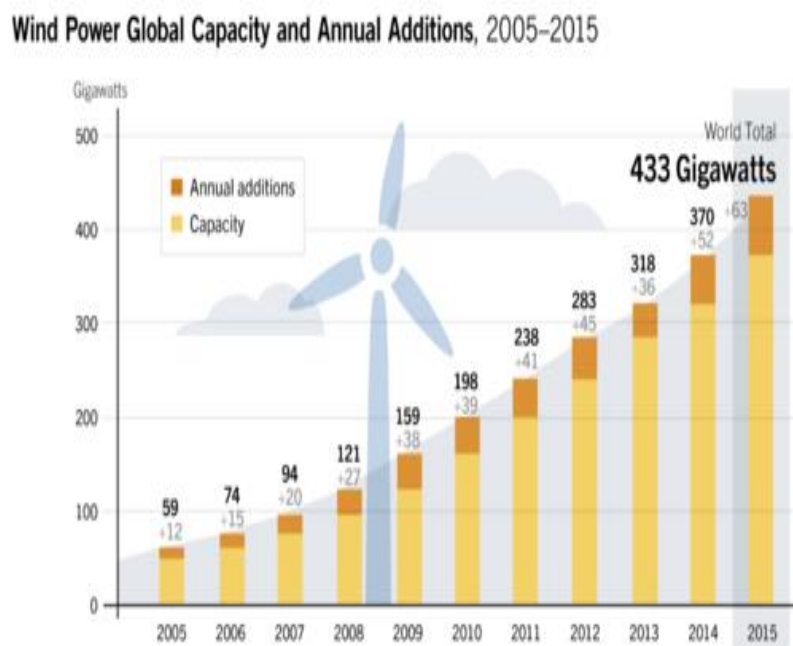


Fig.I.2 :Capacité mondiale installé en gigawatts[5].

Le taux de croissance est le rapport entre la capacité ajoutée et la capacité totale de l'année précédente.[3].

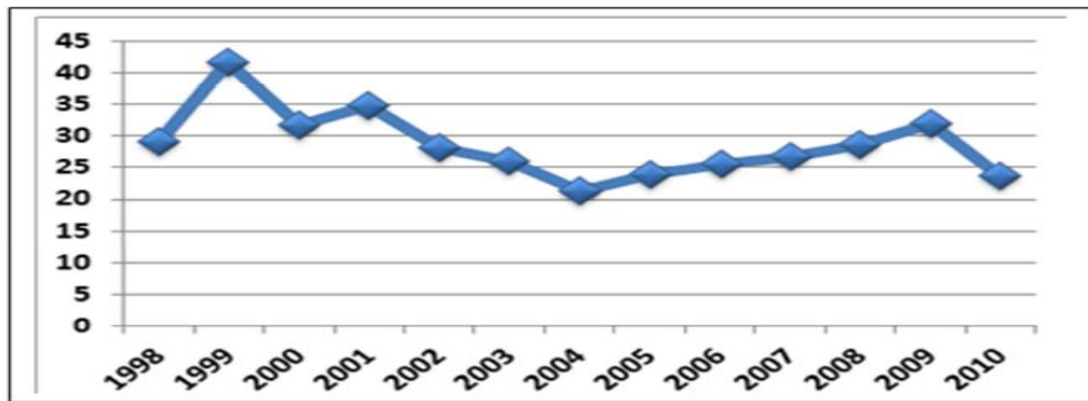


Fig.I.4 :taux de croissance du marché mondial [3].

### I.3.2.2 Répartition continentale

En termes de répartition continentale, la plus forte progression de l'industrie éolienne se situe en Asie, et le centre de gravité de l'éolien mondial s'est encore éloigné de l'Europe et de l'Amérique du Nord [3].

L'Asie représente la plus forte part des nouvelles installations (54.6%), suivie de l'Europe (27.0%) et de l'Amérique du Nord (16.7%), L'Amérique Latine (1.2%), et l'Afrique (0.4%) n'occupent toujours qu'un rôle marginal pour les nouvelles installations.

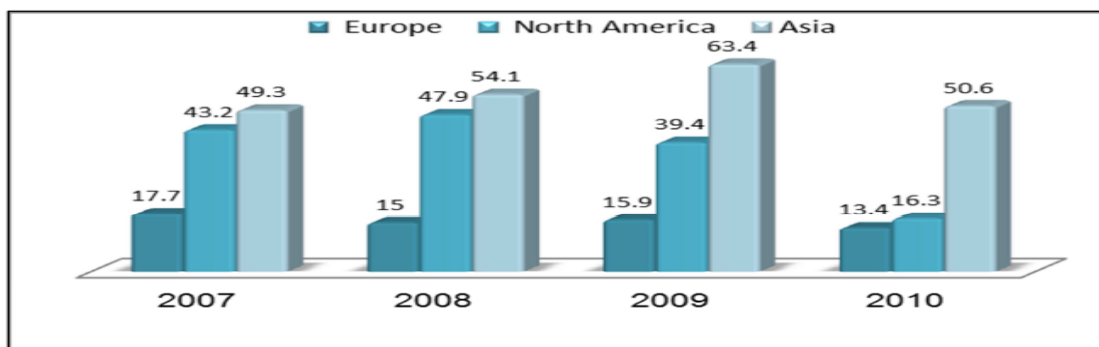
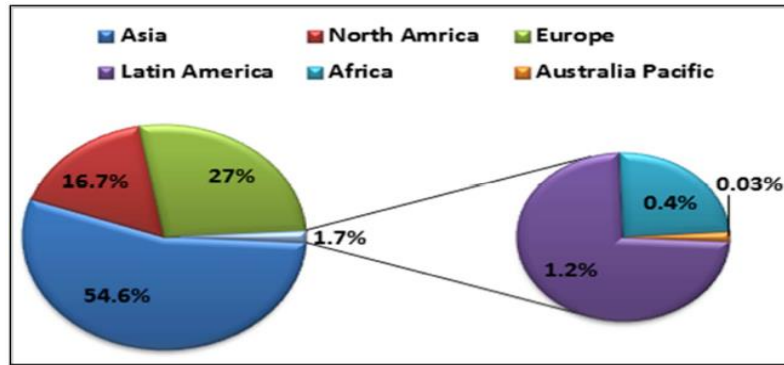


Fig.I.5 :Croissance par continent [%] [3].



**Fig.I.6** :Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010[3].

### I.3.2.3 L'énergie Eoliennes en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [9].



**Fig.I.7**Eolienne de 100 kW de Grand Vent [9]

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique [43]. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans.



fig.I.8 Eolien d'Adrar [6].

Cette Eolienne d'Adrar base sur le type de GSAP.

#### I.4 Répartition régionale de la vitesse du vent

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire ; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La Figure I.9 montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d' Energie Eolienne du Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER, Algérie).

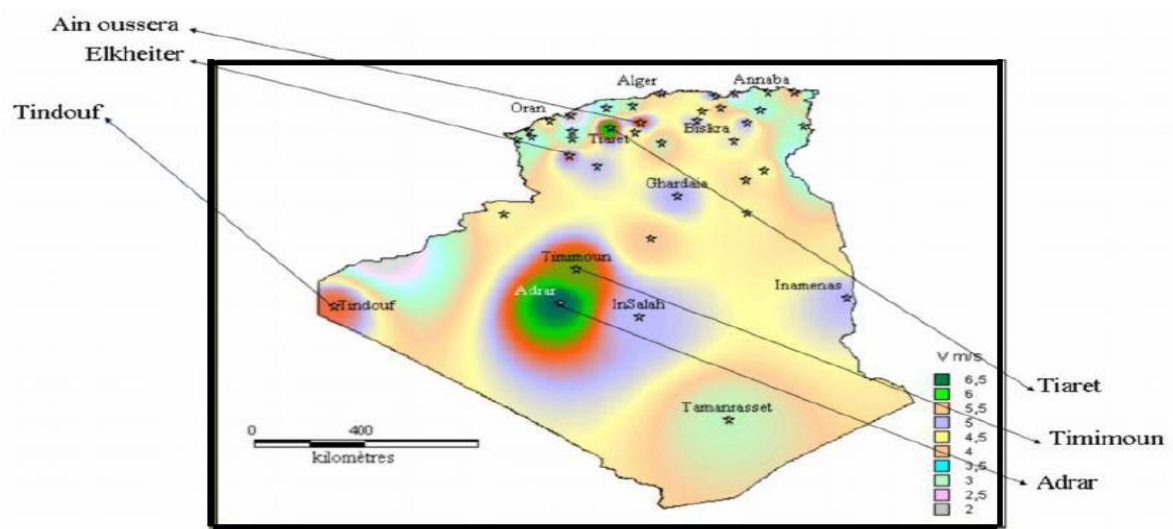


Fig.I.9 les régions ventées en Algérie [14].

### I.5 Les régions ventées en Algérie

D'après les données du CDER, la figure I.8 indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.

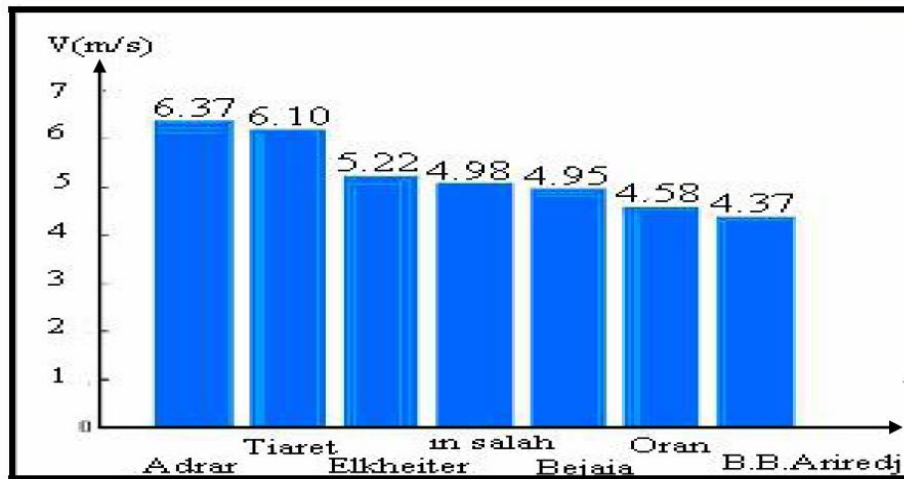


Fig.I.10 Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés [14].

### I.6 L'Atlas de la puissance en sud

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée.

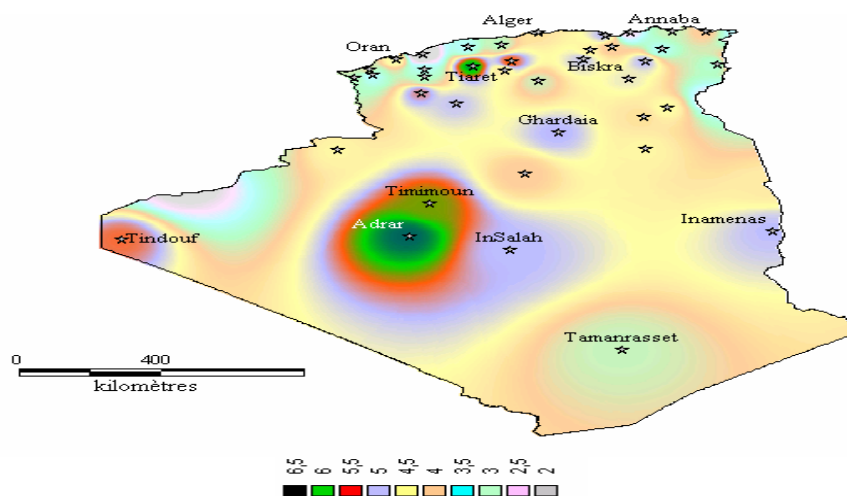
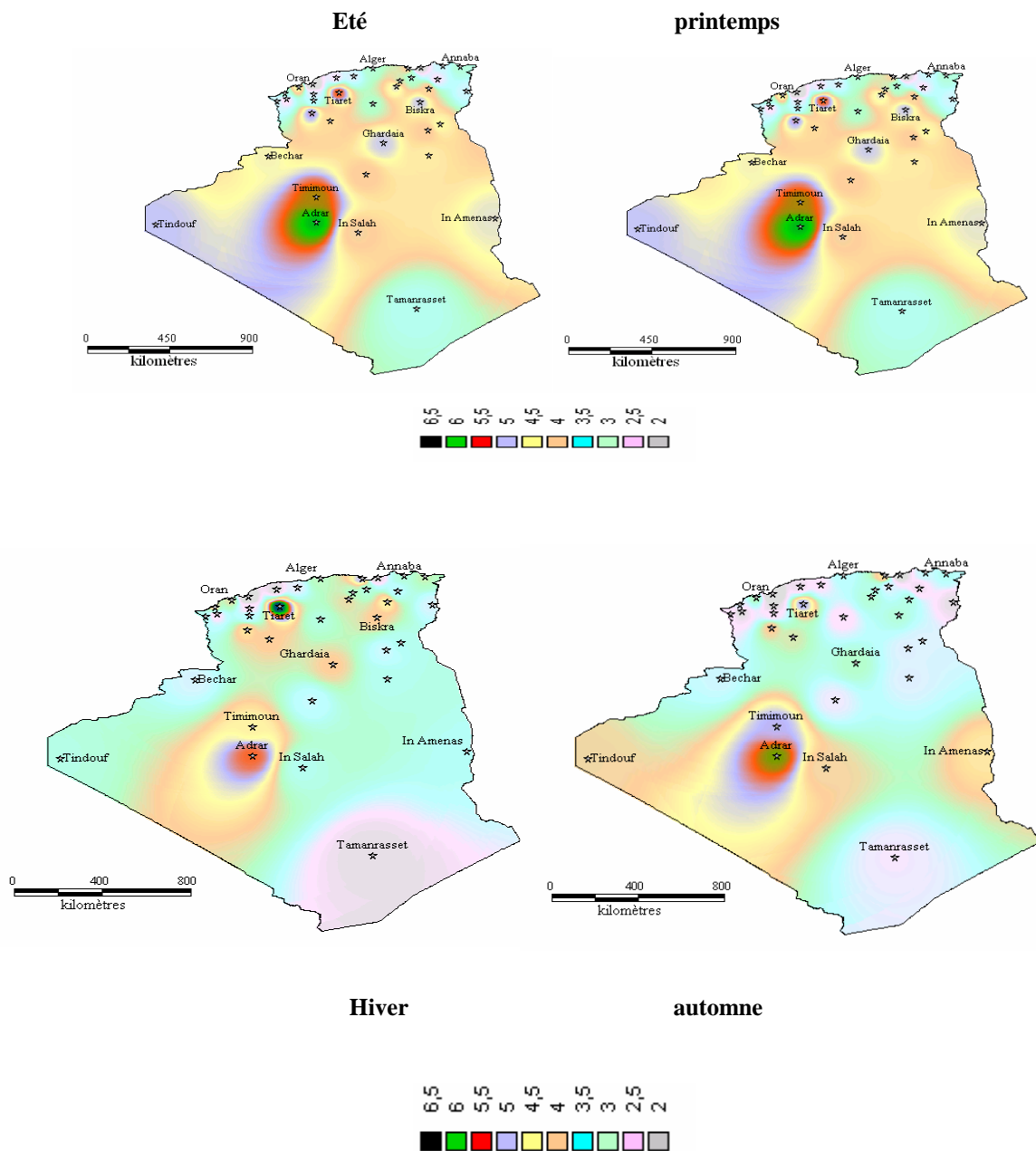


Fig.I.11 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie à 10 m du sol. [14]

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont Représentés en figures I.10 (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On Remarque qu'engénéral, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le Reste de l'année



**FigI.12 Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps)[14].**



### I.7 Futurs challenges

On estime que l'énergie éolienne sera capable de contribuer en 2020 à au moins 12% de la consommation électrique mondiale [10]. En 2015, une capacité totale de 600 000 MW est possible. Fin 2020, au moins 1 500 000 MW peuvent être attendus [11]

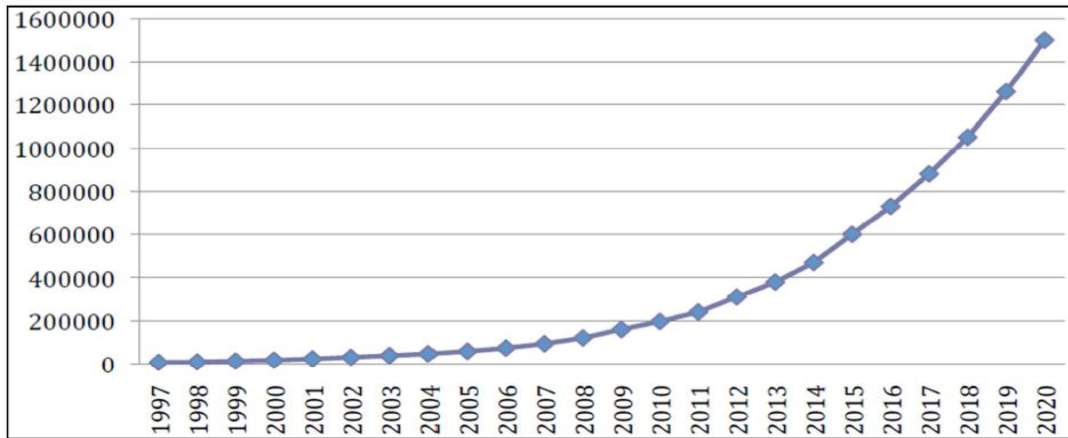


Fig.I.13 L'énergie éolienne mondiale (MW) [11].

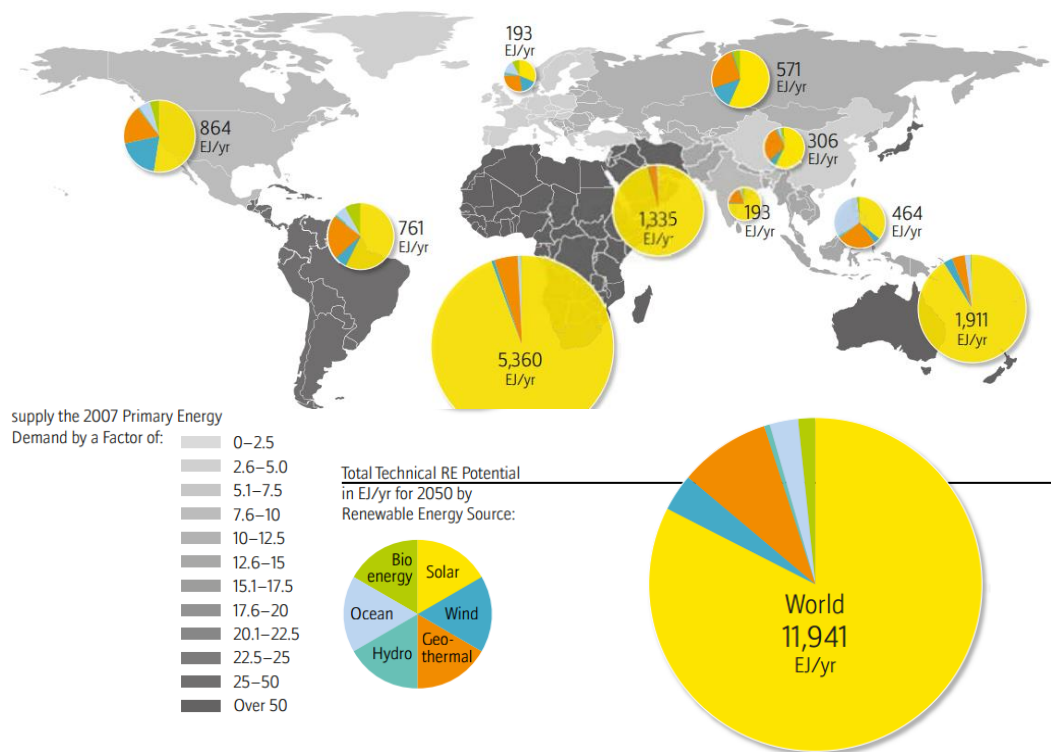


fig.I14 Le potentiel total d'énergie renouvelable technique en EJ/an pour 2050 [14].

### I.7.1 Marché mondial des centrales électrique ,1970-2014

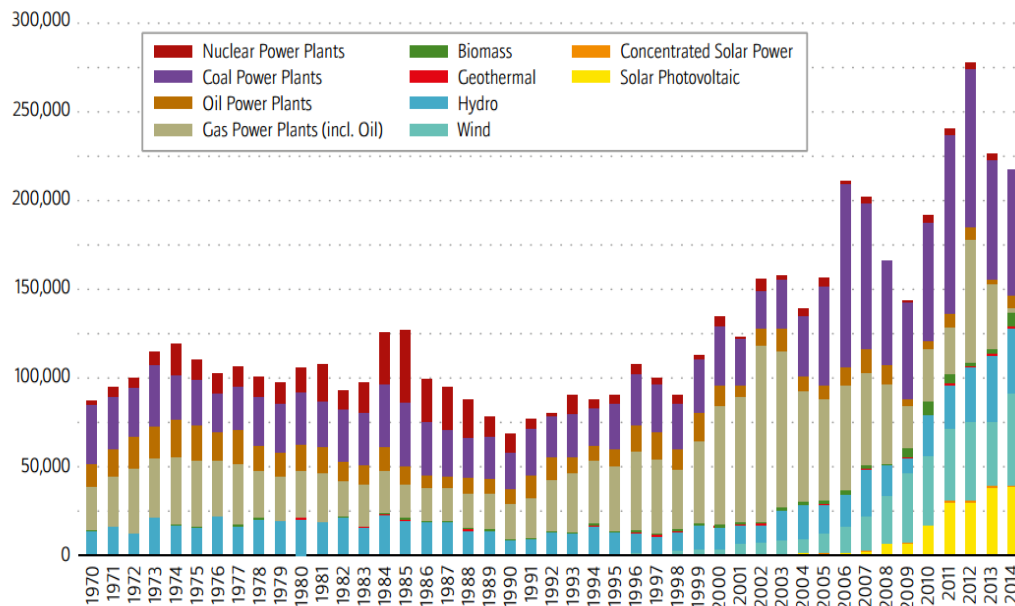


fig.I.15 Marché mondiale centrales électrique ,1970-2014[14].

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

### I.8.1 Avantages

« L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO2 ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- 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.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- 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.

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

### **I.8.2 Inconvénients**

- L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :
- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- 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.
- L'impact sur les oiseaux.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- Le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé par rapport aux sources d'énergie classiques.

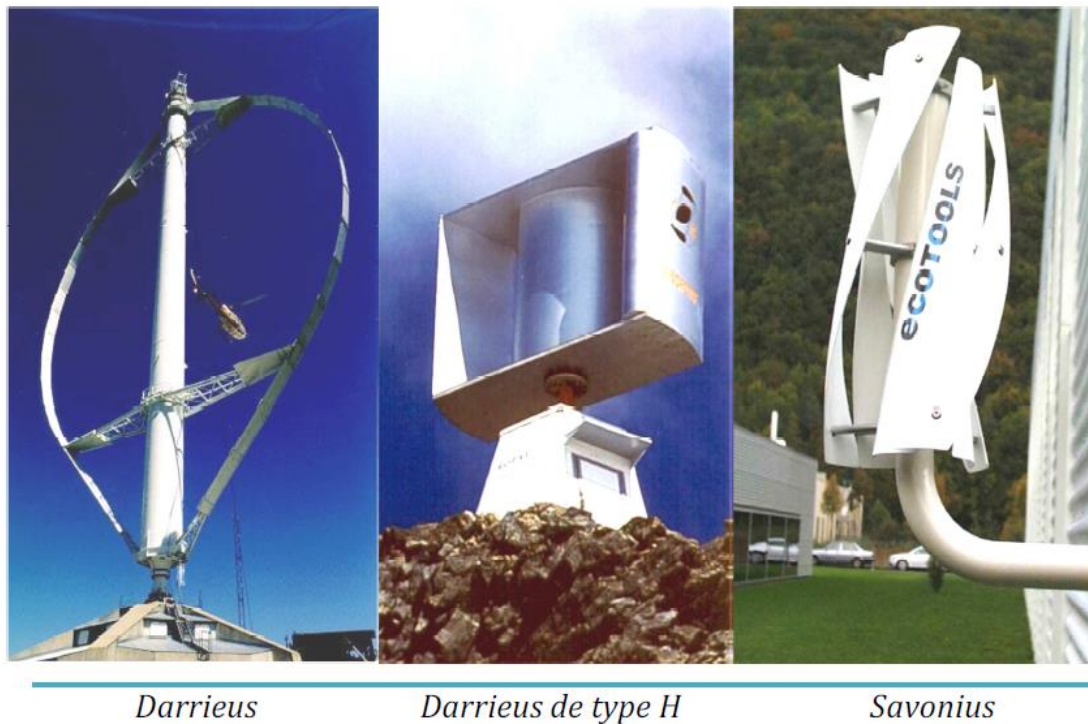
## **I.9 les différents types d'éoliennes**

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître et les éoliennes à axe horizontal qui, elles-mêmes, se divisent en deux types sont :

- \* les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage.
- \* les éoliennes rapides à axe horizontal utilisées dans la production de l'énergie électrique.

### **I.9.1 Eoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement, en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ; donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [14]



**fig.I.16** technologie éolienne à axe vertical [14].

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit.

**.a. 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.

**b. Inconvénient**

- 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.9.2 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 [15,14]



**fig.I.17** technologie éolienne à axe horizontale [14].

#### I.9.2.1 Eoliennes lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse.

#### I.9.2.2 Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé.

Le tableau propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [16,17]

<b>Echelle</b>	<b>Diamètre de l'hélice</b>	<b>Puissance délivrée</b>
<b>Petite</b>	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
<b>Moyenne</b>	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
<b>Grande</b>	46 m et plus	1 MW

**fig.I18** Classification des turbines éoliennes [16].

### **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 [14].

## **I.10 Constitution d'une éolienne moderne**

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : les pales (entre 1 et 3) la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

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

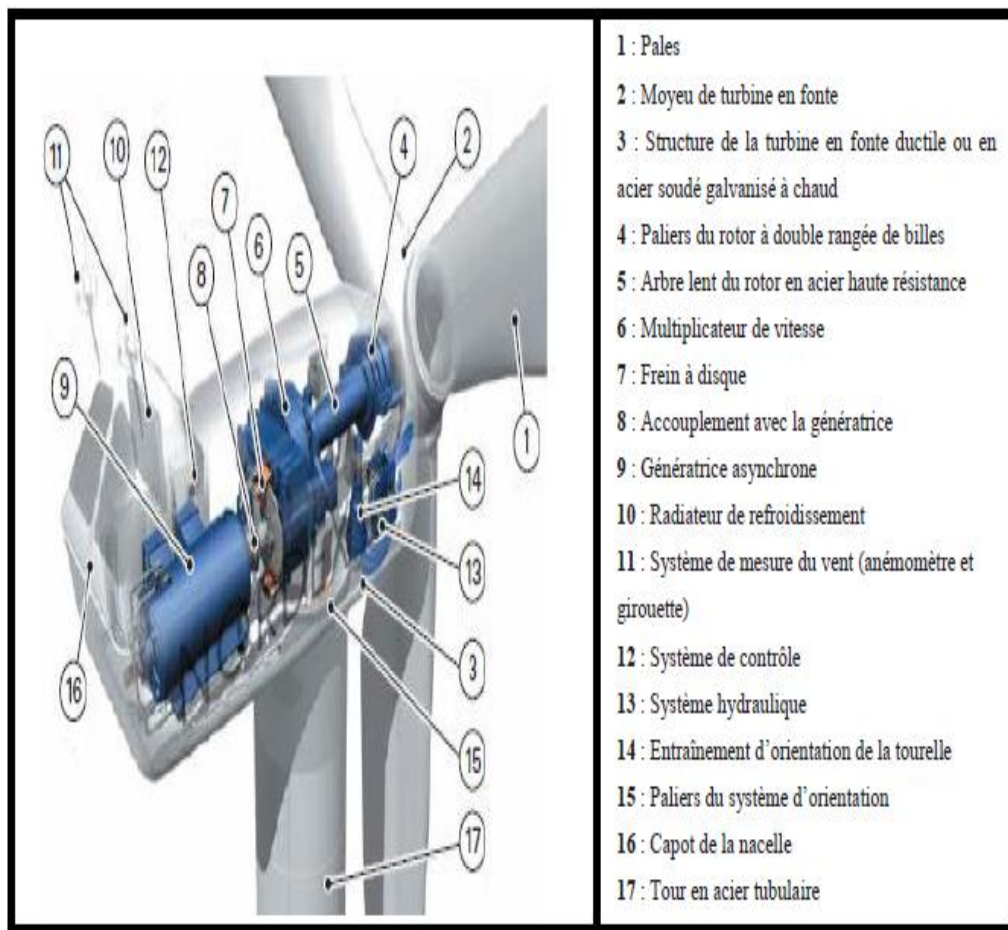
**La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disque qui

permet d'arrêter le système en cas de surcharge ainsi que le générateur et les systèmes électriques d'orientation des pales.

**Le rotor** formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.

**Une armoire de commande** Comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.

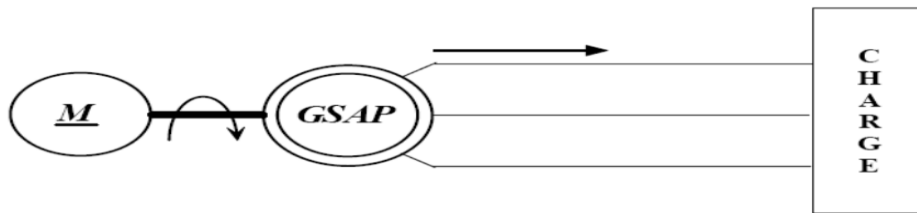
**Un multiplicateur de vitesse** l'objective augmente ou diminuant la vitesse.



**fig.I.19** Différentes parties d'une éolienne [14].

## I.11 Structures de la génératrice GSAP avec système éolien

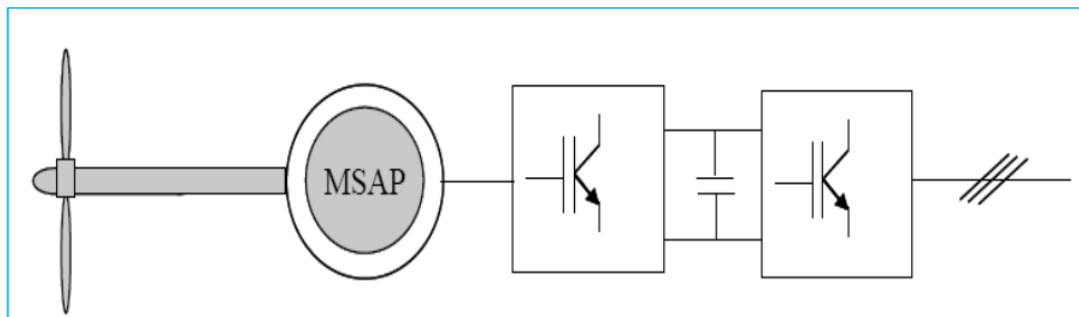
### I.11.1 Générateurs synchrones connectés à la charge



**Fig.I.20** la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) [18].

Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses. L'inducteur (rotor) est bobiné nécessite un système bague-balais ou un système à diodes tournantes sans contact (comme dans les alternateurs classiques de production) pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI.

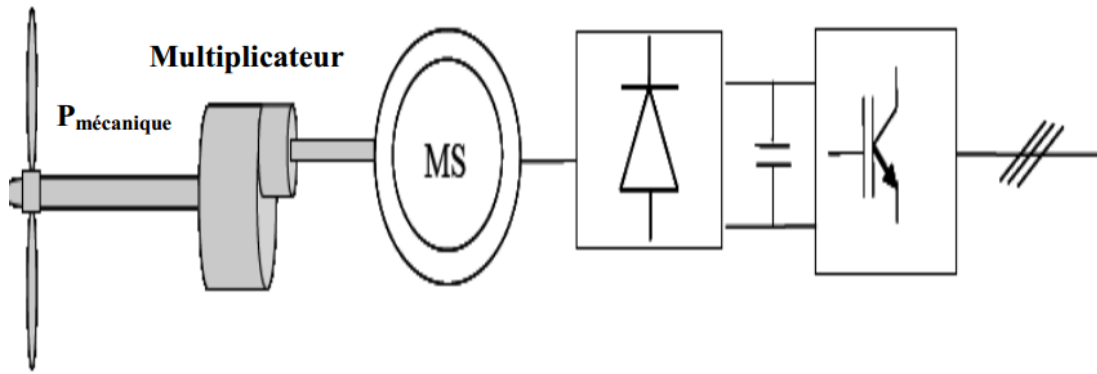
Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années voire (figure I.21).



**Fig.I.21** Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [18,19]

On trouve également des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, comme chez le constructeur Made (gamme au-delà de 800 kW). Ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées comme le montre la figure I.18



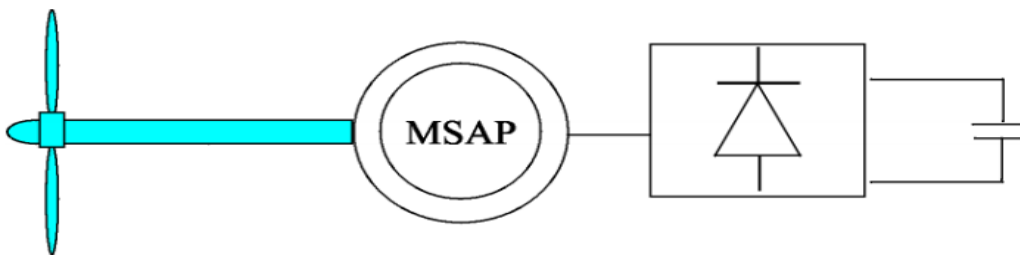


**Fig.I.22** Système basé sur la machine synchrone et redresseuse à diodes [18,19]

De nos jours, dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne, l'intérêt se porte sur l'utilisation des génératrices électriques tournant à basse vitesse sans multiplicateur. Celui-ci est en effet une source de bruit et de pannes fréquentes.

### I.11.2 Systèmes non couplés au réseau alternatif

La figure I.23 montre une solution originale et de faible coût pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique.



**Fig.I.23** Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu [22]

### I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les énergies renouvelables dans le monde et d'une façon particulière en Algérie. Ainsi, nous avons consacré l'étude sur l'énergie éolienne, avantages et inconvénients de cette forme d'énergie, le principe de fonctionnement, les

composants principaux et les différentes structures de couplage du générateur éolien au réseau ou bien hors réseau.

Dans le chapitre qui suite, nous allons présenter le générateur proposé pour faire la simulation en Matlab à vide et en charge.

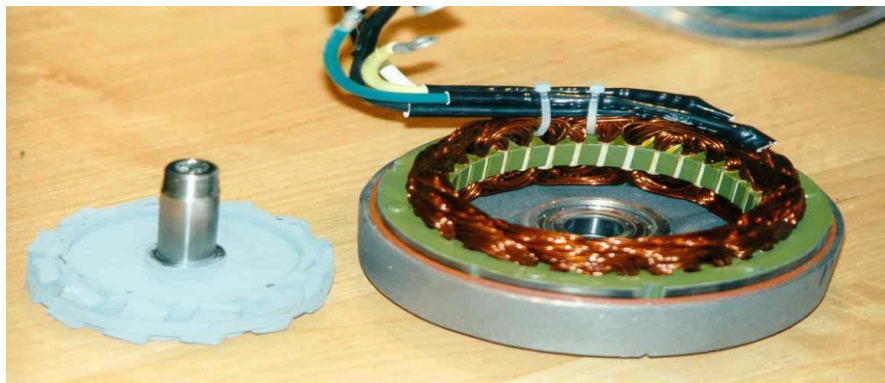
# **Chapitre II : étude et modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent**

## CHAPITRE II

### Etude et modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanent

#### II.1 Introduction

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans le but de commander ce système, il est nécessaire de donner son modèle mathématique en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices afin d'obtenir le modèle le plus simple que possible de la génératrice synchrone à aimants permanent dans la chaîne de production d'énergie éolienne.



**Fig. II.1**Exemple de génératrice synchrone à aimants permanents de petite éolienne 400 W

[21,22]

#### II.2 Machine synchrone à aimant permanent

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. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est génère soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose le synchronisme entre le champ tournant statorique et le rotor ; d'où le nom de machine synchrone [21].

### II.2.1 Généralités

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques On note :

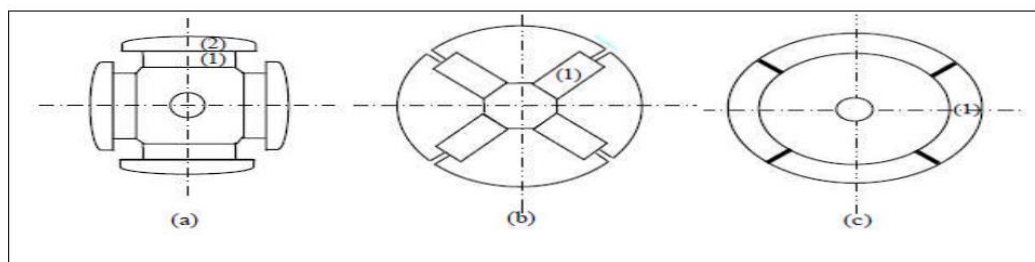
$$\omega_r = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II.1})$$

Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source, il est semblable au stator de toutes les machines électriques triphasées. Il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $\frac{2\pi}{3}$

- Le rotor est une partie mobile, se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable.

-Le rotor possède différentes configurations [21, 22,23]. La figure (II.2) montre trois cas typiques pour un rotor à quatre pôles.

- Une configuration du rotor à pôles saillants possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux est montrée à la figure (II.2.a). Les aimants permanents sont magnétisés dans le sens radial.
- Une autre possibilité consiste à disposer les aimants permanents radialement (aimants noyés dans le rotor). Les aimants sont magnétisés tangentiuellement comme le montre la figure (II.2.b).
- Enfin la figure (II.2.c) représente le cas où les aimants permanents sont distribués uniformément sur la surface cylindrique du rotor. L'aimantation des aimants est radiale.



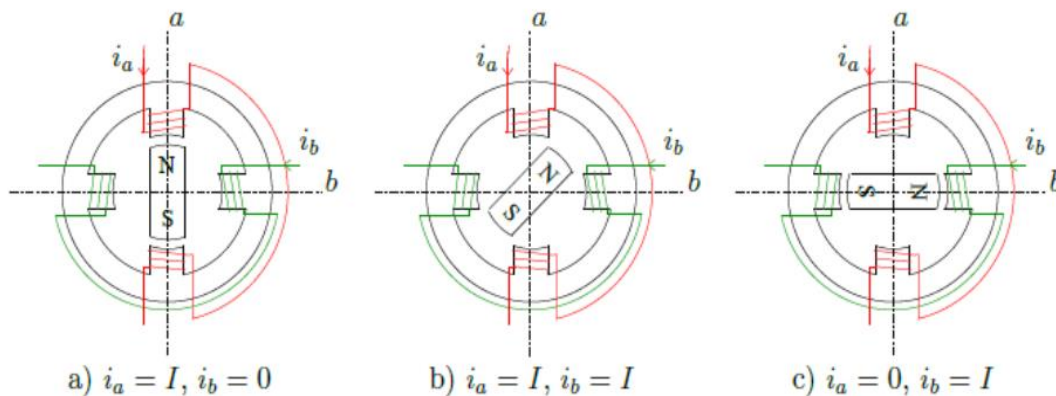
**Fig. II.2** Différents types de rotors d'une MSAP.

(a) aimants permanents (1) et pièce polaire saillante (2),

(b) aimants permanents (1) noyés,

(c) aimants permanents (1) distribués sur la surface du rotor. [21,23],

## II.2.2 Principes généraux



**Fig. II.3** Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents [21, 22,23].

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champ créé par les enroulements oriente le rotor qui est constitué par des aimants. La Figure (II.3) représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator comportant une paire de pôles. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. 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  $\theta_p = 90^\circ$ . Ceci correspond au passage de la Figure (II.3.a) à la Figure (II.3.c). Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (Figure II.3.b)). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure.

## II.2.3 Structure d’une MSAP

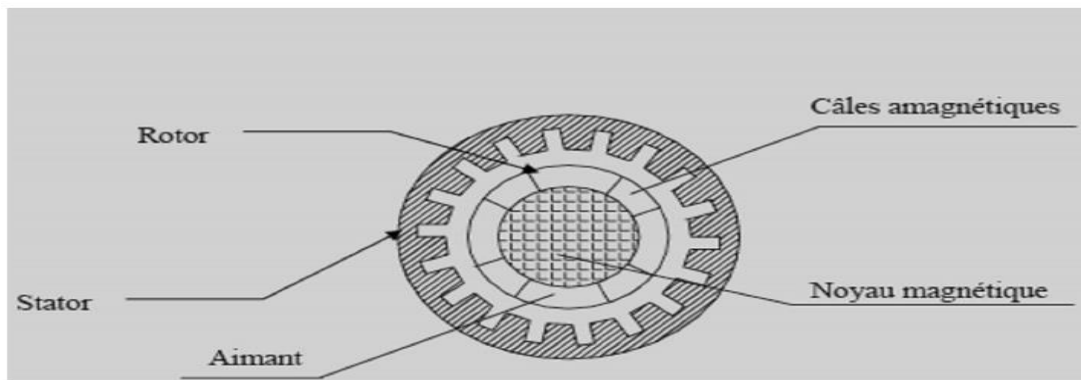
Le rotor d’un moteur synchrone à aimant permanent a une conception spéciale pour donner les caractéristiques exigées. Il existe deux structures de la MSAP selon la disposition des aimants avec les matériaux magnétiques : l’une avec pièce polaires et l’autre sans pièces polaires. Parmi ces deux catégories, 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.

La différence entre les deux structures citées précisément réside dans le fait que les inductances synchrones ont des valeurs sensiblement moins élevées et les ondulations du couple sont moins importantes pour des machines sans pièces polaires que celle avec pièces polaires.

### II.2.3.1MSAP sans Pièces Polaires

Les aimants, en forme de tuile ou en barreaux élémentaires juxtaposés, sont directement fixés sur la surface du rotor grâce à des frettes (Fig. II-4). Le sens d'aimantation peut être radial (Figure II-4.a), tangentiel (Figure II-4.b) ou mixte (Figure II-4.c), 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 Ainsi, 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, l'utilisation des terres rares est plus recommandée pour cette structure.



**Fig. II.4** Structures d'une Machine à Aimants Permanents sans Pièces Polaires [24].

### II.2.3.2 GSAP avec Pièces Polaires

Comme dans les machines synchrones classiques à pôles saillants, la saillance a pour effet de produire une anisotropie au niveau du rotor dont la conséquence est de produire un couple réluctance qui vient s'ajouter au couple d'interaction. A ce principal rôle que doivent assurer les pôles saillants dans les machines à aimants, un autre rôle peut leur être confié, c'est celui de la concentration de flux.

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 [24]

## II.2.4 Les aimants permanents

### II.2.4.1 Description

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (fig.II.5) et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur [25,26] La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe.

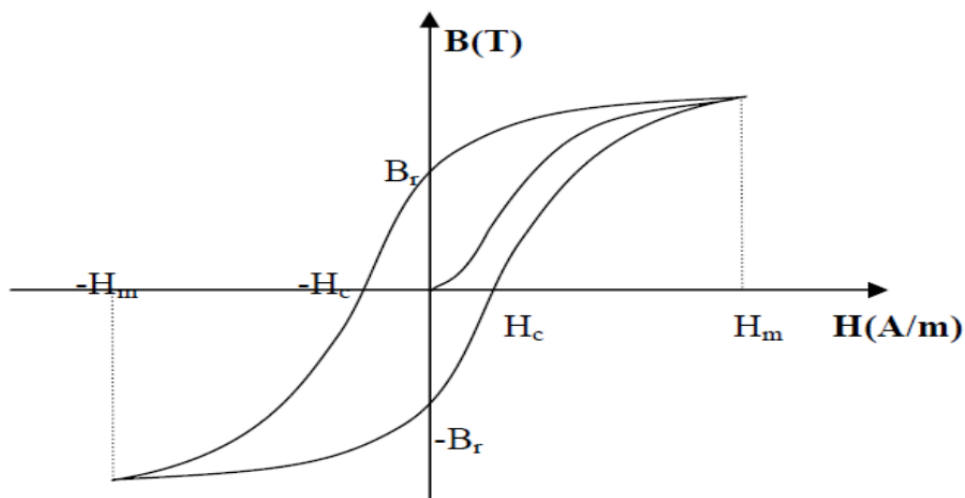


Fig. II.5 cycle d'hystérésis [25,26].

### II.2.4.2 Propriétés

L'état de fonctionnement d'un aimant se situe dans le deuxième quadrant de son cycle d'hystérésis (voir Fig. II.6).

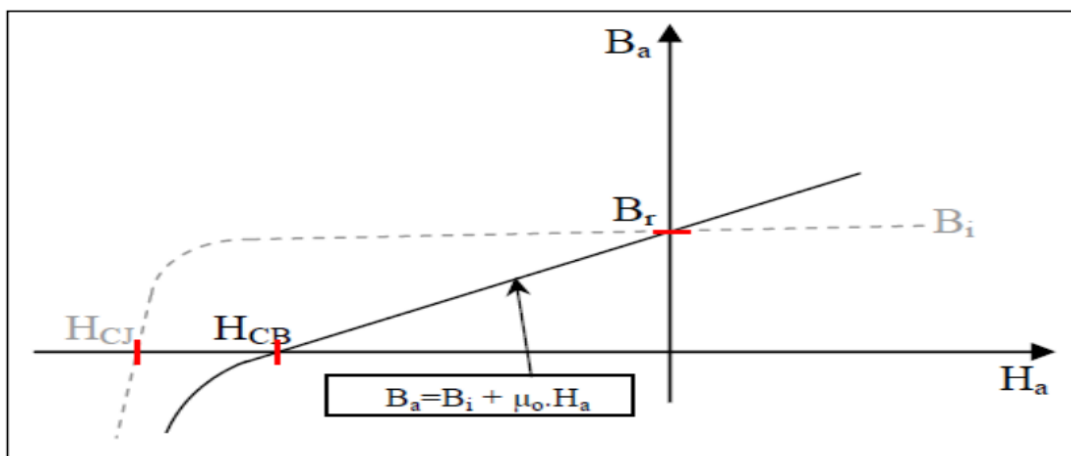


Fig. II.6 courbe de désaimantation [25,26].



Les aimants permanents sont caractérisés par plusieurs paramètres qui sont déterminants

Pour les applications industrielles. Ces paramètres sont :

L'induction résiduelle (ou rémanente),  $B_r$ , qui indique la puissance potentielle de l'aimant et détermine la section normale nécessaire au passage de flux utile pour le maintien du flux d'entrefer.

- le champ coercitif,  $H_{CB}$ , représentant le champ magnétisant capable d'annuler l'induction résiduelle et, dont la valeur est d'autant plus élevée que l'aimant est plus stable.
- le champ coercitif de polarisation,  $H_{CJ}$  qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau, la démagnétisation est totale et irréversible.
- le produit d'énergie  $(B \cdot H)_{MAX}$ : valeur énergétique de l'aimant par unité de volume. En plus des propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître les propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix ainsi que le point de Curie (température au-delà de laquelle l'aimant perd ses propriétés magnétiques).

### II.2.5 Avantages et inconvénients de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents présente un certain nombre d'avantages à savoir

- Une dynamique de la vitesse ; faible inertie du rotor donc faible constante de temps mécanique
- Suppression des contacts glissants et donc possibilité de travailler en air corrosif
- Meilleures caractéristiques thermiques ; la localisation des pertes joules et des pertes fer au stator simplifie le refroidissement de la machine .
- Puissance massique et rendement importants
- Robustesse incontestée par rapport au moteur à courant continu

Ces avantages ont poussé son développement afin de répondre aux exigences grandissantes de positionnement et d'entraînements à performances élevées. Cependant l'inconvénient de ne pas avoir accès au réglage du courant inducteur rend difficile le fonctionnement en survitesse.

## III.3 Modèle de la GSAP

### III.3.1 Hypothèses simplificatrices

La machine synchrone à aimants permanents est un système complexe, dont la modélisation obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes [27,28] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- On admet que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale

### II.3.2 Les équations de tension et flux

La machine à aimant possède trois enroulements statoriques fixes, a, b, c. Au rotor

On trouve des aimants permanents. Le flux créé par les aimants permanents est supposé à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer, les expressions des flux mutuelles inducteur-phases sont donnée par[27]:

$$\varphi_a = \varphi_f \cos(p\theta) \quad (\text{II.2})$$

$$\varphi_b = \varphi_f \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.3})$$

$$\varphi_c = \varphi_f \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.4})$$

$\varphi_f$ : est la valeur crête du flux créée par l'aimant permanent à travers les enroulements statorique.

Les équations électriques de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel triphasé sont :

$$[v_a] = [R_s][I_a] + \frac{d\varphi_a}{dt} \quad (\text{II.5})$$

$$[v_b] = [R_s][I_b] + \frac{d\varphi_b}{dt} \quad (\text{II.6})$$

$$[v_c] = [R_s][I_c] + \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (\text{II.7})$$

$[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]$ : Vecteurs des flux dans les enroulements statoriques.

$[R_s]$ : Résistance d'une phase d'enroulement statorique.

### II.3.3 Equation mécanique

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble

Turbine et générateur est donnée par [27,29] :

$$(f_m - f_t)\Omega + (j_t + j_m) \frac{d\Omega}{dt} = c_{eol} - c_{em} \quad (\text{II.8})$$

Où  $j_t$  et  $j_m$  sont les inerties de la turbine et de la machine respectivement, le  $f_m$

Coefficient de frottement de la machine, le  $f_t$  coefficient de frottement des pôles et  $c_{eol}$  le couple statique fournie par l'éolienne.

Dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voile ne sera pas pris en compte). Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$c_{eol} = J_t \frac{d\Omega}{dt} + c_m + f_m \Omega \quad (II.9)$$

### II.3.4 La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système.

Dans la théorie de PARK, on utilise la transformation unique permettant le passage direct du système triphasé au système diphasé tournant, cette transformation est notée par [P] d'où :

$$P(\theta) = \frac{3}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

Nous appliquons donc le changement de variables défini par la matrice P ( $\theta$ ) aux équations des tensions, courant, et flux on obtient [24] :

$$I_{dq} = P(\theta)[I_{abc}] \quad (II.11)$$

$$V_{dq} = P(\theta)[V_{abc}] \quad (II.12)$$

$$\varphi_{dq} = P(\theta)[\varphi_{abc}] \quad (II.13)$$

La matrice inverse de Park notée, est donnée par la matrice suivante :

$$P(\theta)^{-1} = \frac{2}{3} \sqrt{\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}} \quad (II.14)$$

## II.4 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park

### II.4.1 Equations électriques

En transformant les équations statoriques en leurs nouvelles équations dans le repère (d, q) par l'application de la transformation de Park on obtient le système d'équation suivant [27, 24,28] :

$$V_{dq} = [P(\theta)][V_{abc}] = [P(\theta)][R_s][I_{abc}] + [P(\theta)] \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.15})$$

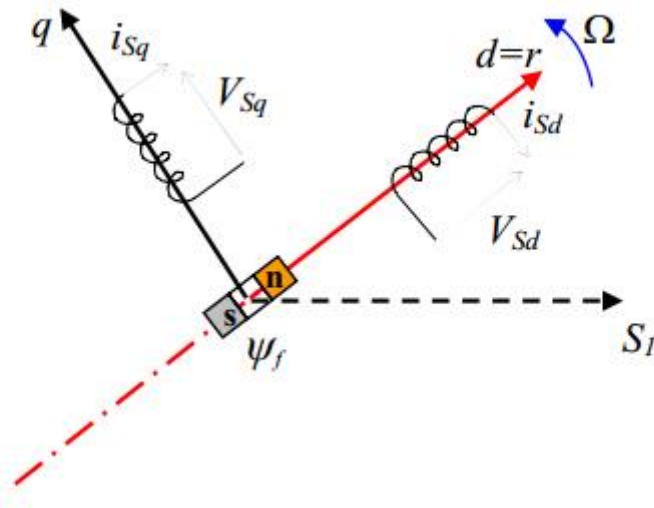
Les composantes de la tension statorique sont données dans le repère de Park par :

$$v_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r L_q I_q \quad (\text{II.16})$$

$$v_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega_r L_d I_d + \omega_r \Phi_f \quad (\text{II.17})$$

Avec  $\theta_q = l_q i_q$

$$\theta_d = l_d i_d + \Phi_f \quad (\text{II.18})$$



**Fig. II.7** Modèle de PARK pour la GSAP [27,28].

### II.4.2 Calcul de puissance

Comme pour le courant, définissons les projections du phaseur  $\bar{V}$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{v}_d = v \cos(\theta_r^\circ - \theta) e^{j\theta_r^\circ} = \frac{v_d}{\sqrt{3}} e^{j\theta_r^\circ} \\ \bar{v}_q = v \sin(\theta_r^\circ - \theta) e^{j(\theta_r^\circ - \frac{\pi}{2})} = j \frac{v_q}{\sqrt{3}} e^{j\theta_r^\circ} \\ \bar{v} = \bar{v}_d + \bar{v}_q \left( \frac{v_d}{\sqrt{3}} - j \frac{v_q}{\sqrt{3}} \right) e^{j\theta_r^\circ} \end{array} \right. \quad (\text{II.19})$$

La puissance complexe fournie par la machine vaut :

$$\mathbf{S} = 3\bar{v}\bar{\mathbf{i}}^* = 3\left(\frac{v_d}{\sqrt{3}} - j\frac{v_q}{\sqrt{3}}\right)\left(\frac{i_d}{\sqrt{3}} - j\frac{i_q}{\sqrt{3}}\right) = (\mathbf{v}_d - j\mathbf{v}_q)(\mathbf{i}_d - j\mathbf{i}_q) \quad (\text{II.20})$$

Dont on tire directement :

$$\begin{cases} p = v_d i_d + v_q i_q \\ Q = v_d i_q + v_q i_d \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Il est fort utile d'établir les expressions des puissances active et réactive en fonction de la tension  $V$ , de la f.é.m.  $E_q$  et de l'angle interne  $\delta$  de la machine (cf figure 4). Pour ce faire, nous négligerons la résistance statorique  $R_a$ , qui, en pratique, est très faible devant  $x_d$  et  $x_q$ .

Sous cette hypothèse, les équations deviennent :

$$v_d = -x_q \dot{i}_q \Rightarrow \dot{i}_q = -\frac{v_d}{x_q} \quad (\text{II.22})$$

$$v_q = -x_d \dot{i}_d + \sqrt{3E_q} \dot{i}_d = \frac{v_q - \sqrt{3E_q}}{x_d} \quad (\text{II.23})$$

Tandis que l'on tire de la figure 4 :

$$v_d = -\sqrt{3}v \sin \delta \quad (\text{II.24})$$

$$v_q = -\sqrt{3}v \cos \delta \quad (\text{II.25})$$

Une substitution de toutes ces relations dans (54, 55) fournit les expressions recherchées :

$$\begin{cases} p = 3 \frac{E_q v}{x_d} \sin \delta + \frac{3v^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta \\ Q = 3 \frac{E_q v}{x_d} \cos \delta - 3v^2 \left( \frac{\sin^2 \delta}{x_q} - \frac{\cos^2 \delta}{x_d} \right) \sin 2\delta \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Qui, dans le cas d'une machine à rotor lisse, devient évidemment :

$$\begin{cases} p = 3 (E_q v)/x \sin\delta \\ Q = 3 (E_q v)/x \cos\delta - (3v^2)/x \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

### III .4.3 Expression de Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante [30,31] :

$$c_{em} = \frac{3}{2} p \{ (L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f \cdot I_q \} \quad (\text{II.28})$$

Où :

$L_d, L_q$ : Inductance du stator ;

$\phi_f$ : Le flux de l'aimant permanent ;

$p$  : Nombre de paire de pôles.

## II.5 Simulation et interprétation

La figure (Fig. II-12) présente le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) utilisé pour simulation en *MATLAB/SIMULINK*. Ce modèle sera exploité dans la commande de système éolienne étudiée. Les paramètres de la machine utilisée sont notés dans l'annexe.

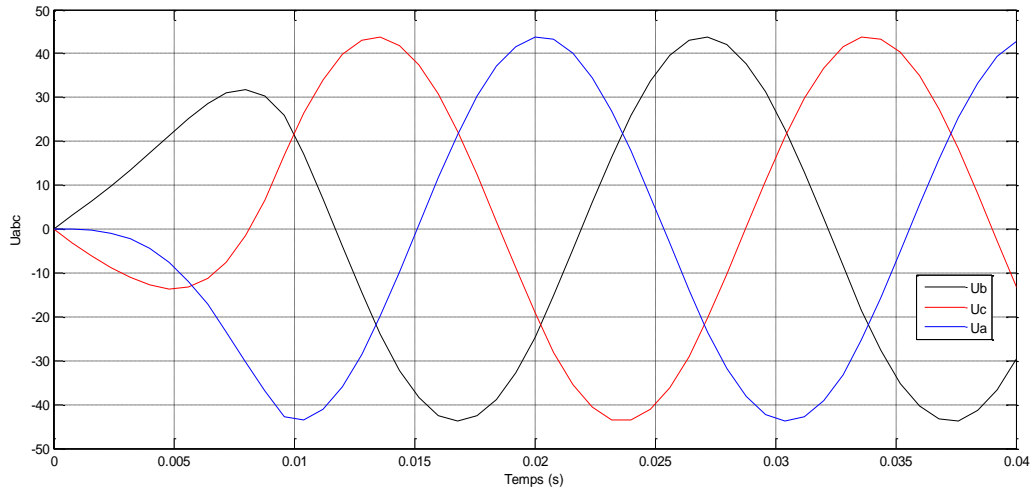
### II.5.1 Fonctionnement à vide

Le fonctionnement à vide est caractérisé par des courants nuls :

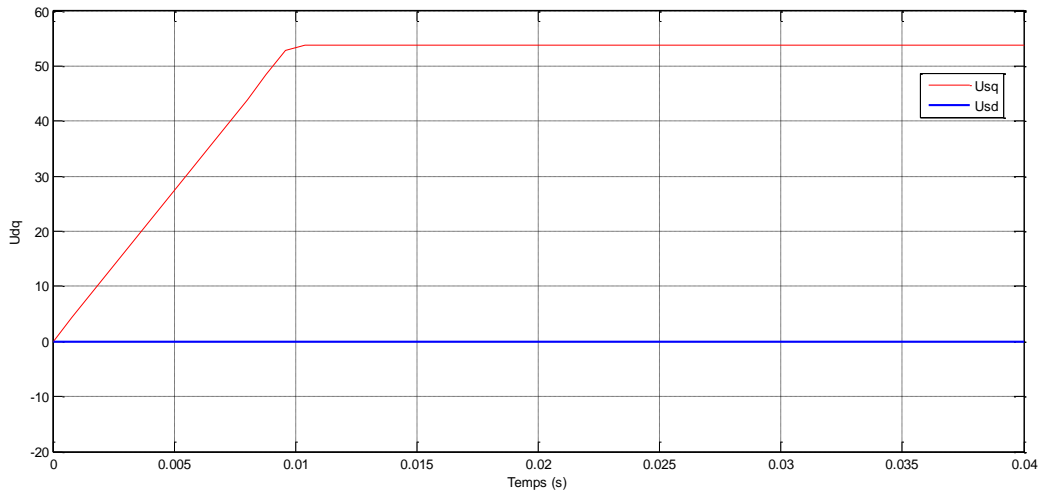
$$\begin{cases} I_{sd} = 0 \\ I_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II -29})$$

Les expressions des tensions et celle du couple deviennent :

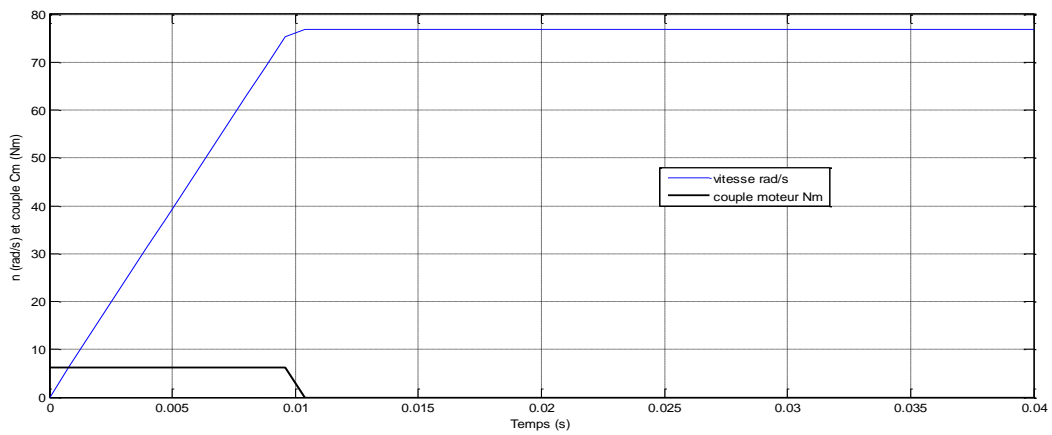
$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = w \cdot \phi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (\text{II -30})$$



(a) Tensions statoriques



(b) Composantes  $U_{sd}$ ,  $U_{sq}$



(c) Vitesse de rotation et couple moteur.

**Fig. II .9** Simulation de la GSAP à vide

### Interprétation des résultats

On lance la génératrice à l'aide d'un couple moteur égal à 6.28 Nm. Etant donné que les frottements sont considérés nuls, on constate d'après la figure (II-13c) qu'à la vitesse de 78.5 rad/s, les tensions de phases sont parfaitement sinusoïdales avec une valeur crête de 55V et une fréquence de 50Hz.

#### II.5.2 Fonctionnement en charge ( $R_{ch}$ , $L_{ch}$ )

La génératrice alimente une charge électrique ( $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ ). Pour obtenir les tensions et les courants résultant de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique les expressions des tensions données par :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{II -31})$$

D'autre part, l'application des tensions  $V_d$  et  $V_q$  sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} \cdot I_d + L_{ch} \frac{d I_d}{dt} - L_{ch} \omega \cdot I_q \\ V_q = R_{ch} \cdot I_q + L_{ch} \frac{d I_q}{dt} + L_{ch} \omega \cdot I_d \end{cases} \quad (\text{II -32})$$

En remplaçant les expressions de  $V_d$  et  $V_q$  dans (II -22), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{d I_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[ - (R_s + R_{ch}) \cdot I_d + \omega (L_q + L_{ch}) \cdot I_q \right] \\ \frac{d I_q}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[ - (R_s + R_{ch}) \cdot I_q - \omega (L_q + L_{ch}) \cdot I_d + \omega \phi_f \right] \end{cases} \quad (\text{II -33})$$

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

$$\begin{cases} \dot{[X]} = [A][X] + [B][U] \\ [X] = [I_d I_q]^t, [U] = [0 \ \phi_f]^t \end{cases} \quad (\text{II -34})$$

On peut écrire la matrice  $[A]$  comme suite :

$$[A] = [A_1] + \omega [A_2]$$

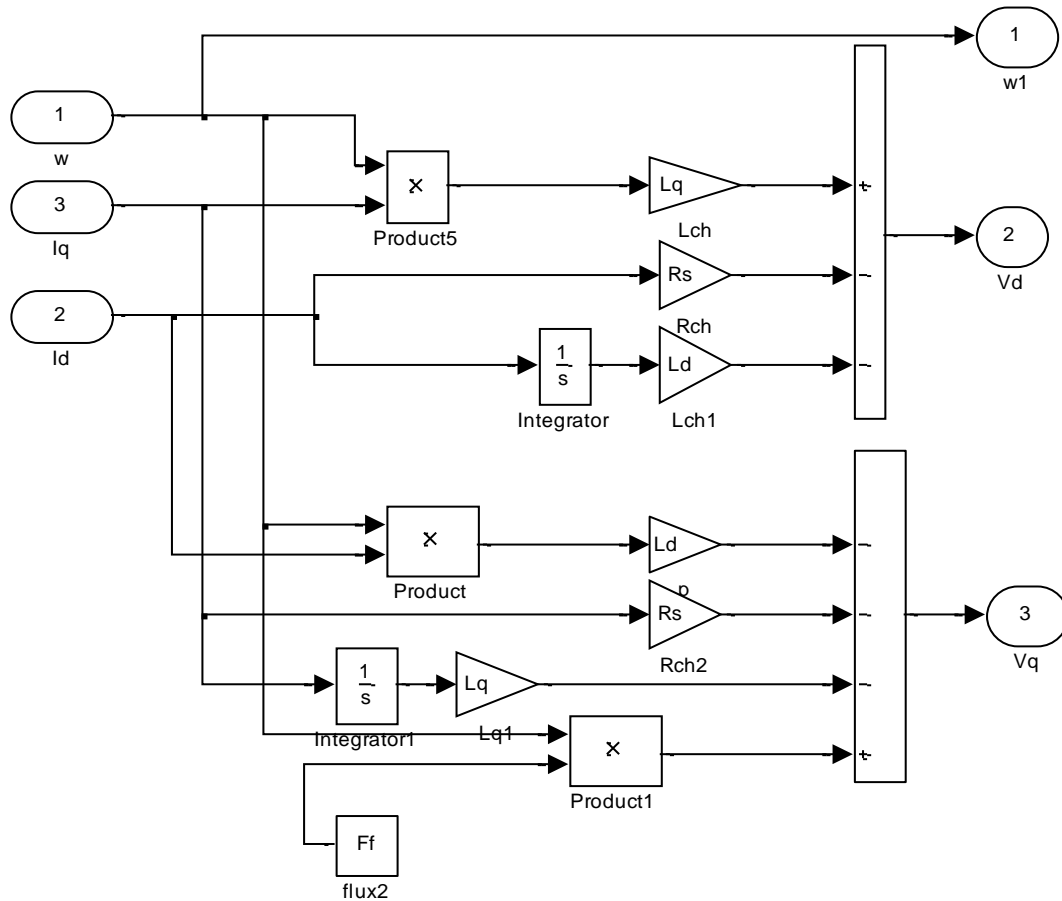
$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II -35})$$



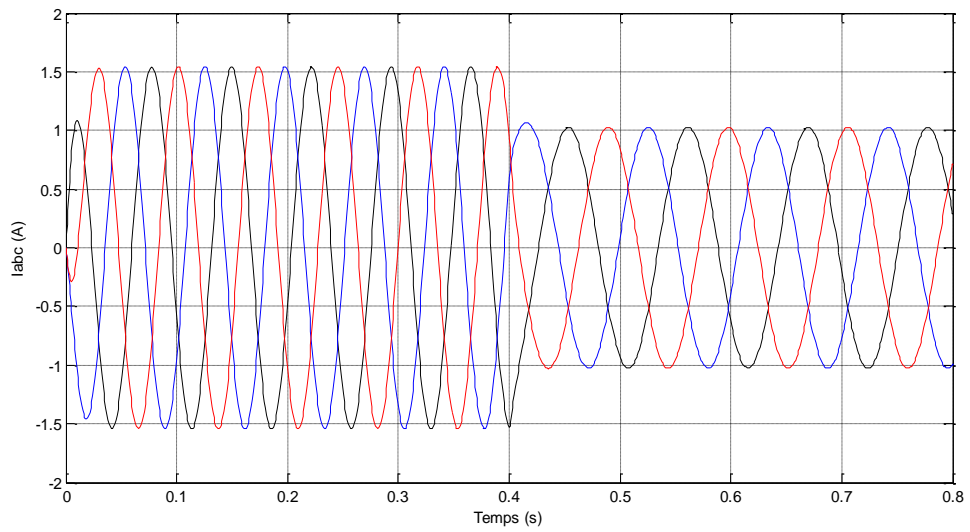
Et la matrice [B] sous la forme :

$$[B][U] = \omega \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II-36})$$

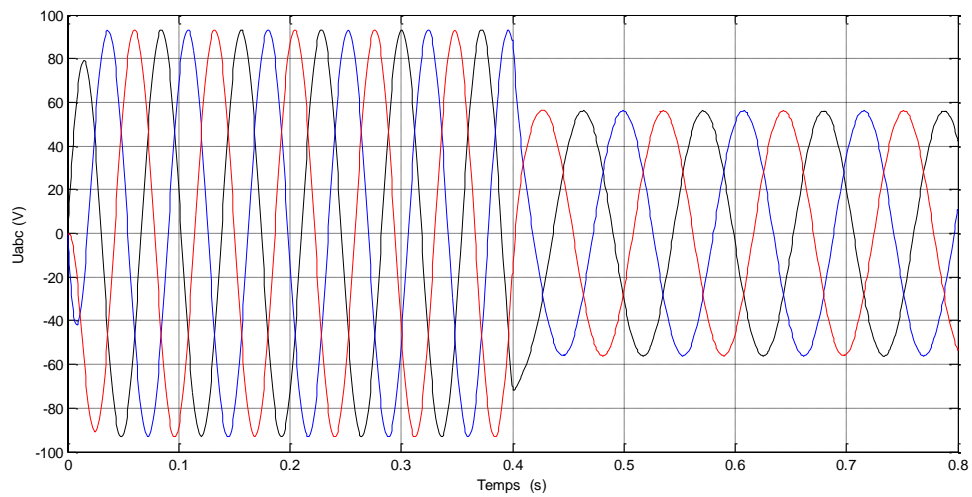
A partir des expressions (II-35 à II-36) et en faisant appel à l'expression du mouvement, on peut construire le bloc de simulation de la génératrice (fig. II- 10).



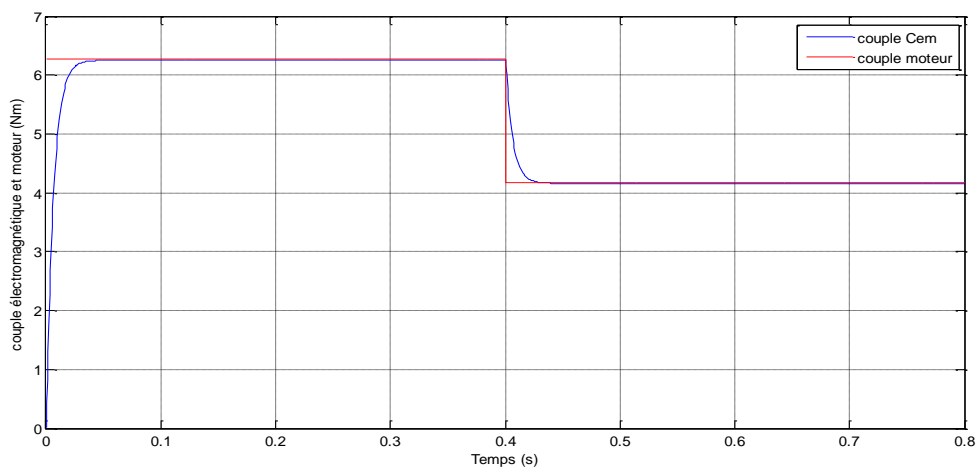
**Fig. II .10** Bloc de la simulation de la GSAP en charge



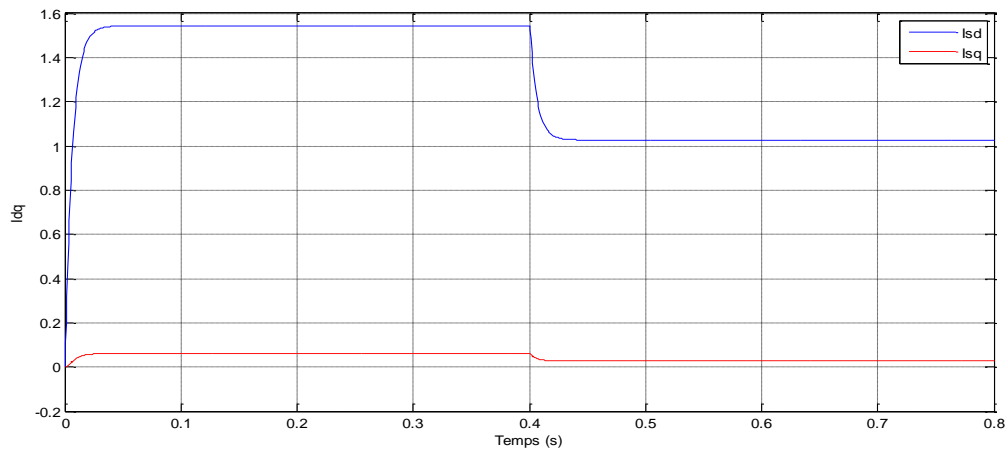
(a) Courants statoriques  $I_{abc}$



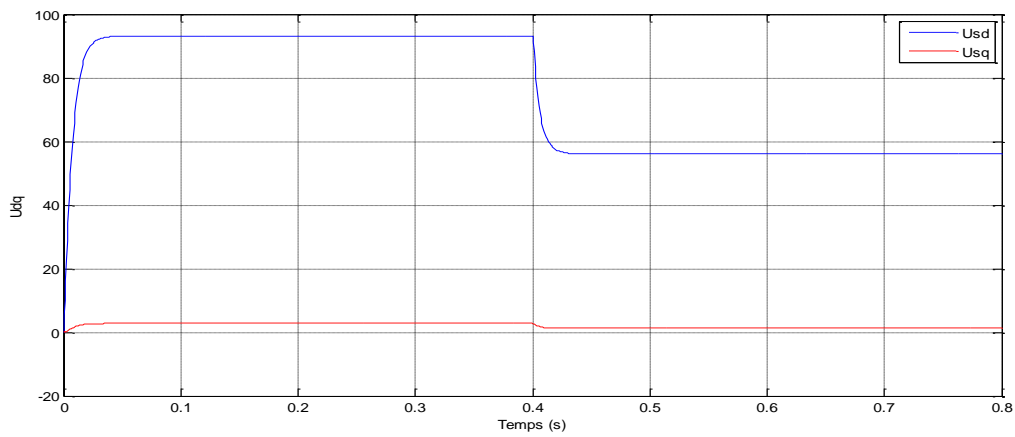
(b) Tensions statoriques  $U_{abc}$



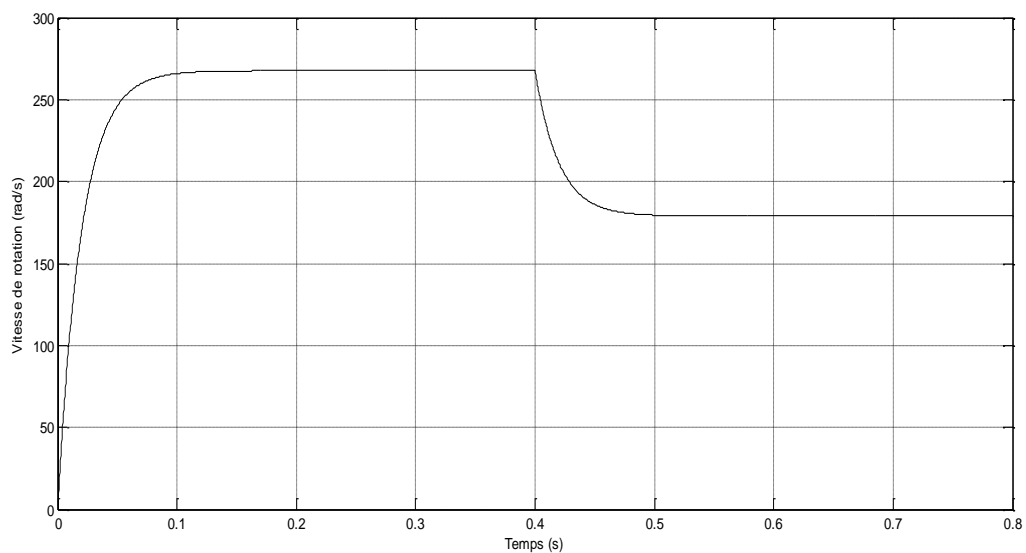
(c) Couples électromagnétique et moteur.



(d) Composants  $I_{sd}$  ;  $I_{sq}$ .



(e) Composants  $U_{sd}$  ;  $U_{sq}$ .



(f) Vitesse de rotation.

Fig. II .11 Simulation de la GSAP en charge.

### **Interprétation des résultats**

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (fig. II.11). On constate que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par de faibles tensions et courants représentés sur les figures (fig. II.11a) et (fig. II.11b). Cela s'explique par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 6.28Nm, à 4.2Nm, la vitesse mécanique varie de 267.60 rad/s jusqu'à 178.9 rad/s. La tension et le courant diminuent respectivement de 77.17V à 51.6V et de 1.54A à 1.03A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

### **II.6 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la présentation et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanent, pour cela nous avons donné un bref aperçu sur la machine synchrone; son principe de fonctionnement ainsi que les différentes structures des machines. Nous avons donné le modèle mathématique de la machine et une simulation numérique a été effectuée sous MATLAB/SIMULINK. Les résultats de la simulation de la GSAP à vide et en charge sont présentés.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la modélisation de la turbine éolienne et l'arbre mécanique ainsi que le système éolien globale avec la GSAP.

# **Chapitre III : Modélisation** **et simulation de la chaîne** **de production d'énergie** **éolienne**

## CHAPITRE III

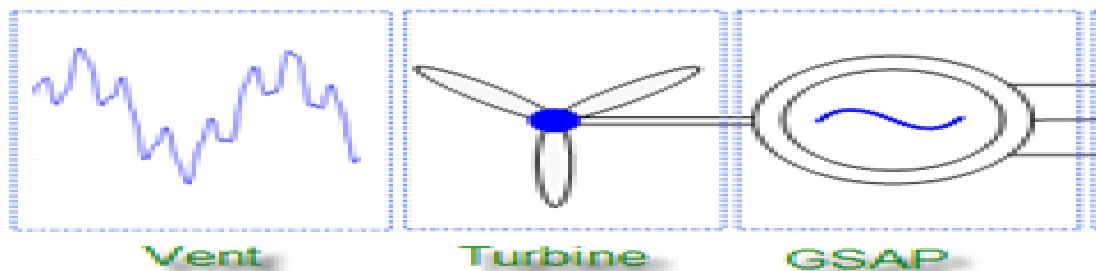
### Modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne

#### III.1 Introduction

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser plus particulièrement à la modélisation des principales composantes d'une éolienne de petite taille adaptée à des régions sahariennes comme Adrar.

La chaîne de conversion éolienne est schématisée comme suite :



**Fig. III.1** Structure de la chaîne éolienne.

Celle-ci est constituée d'une voilure couplée directement à une génératrice synchrone qui débite sur un bus continu via un redresseur à diodes ; c'est la structure que nous retenons pour ce travail.

#### III.2 Le petit éolien

Le petit éolien, ou éolien individuel ou encore éolien domestique, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 100 watts à 20 kilowatts, montées sur des mâts de 10 à 35 mètres, raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques (pompes, éclairage, ...) de manière économique et durable, principalement en milieu rural. Par exemple, une petite

éolienne accompagnée d'un module solaire photovoltaïque et d'un parc de batteries peut garantir l'autonomie énergétique d'un voilier (éclairage, instruments de bord...). L'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est le vent, qui doit être à la fois puissant et fréquent. Les petites éoliennes classiques sont généralement à axe horizontal. Elles comprennent le plus souvent deux à trois pales et développent une puissance électrique de 100 watt à 20 kW. Elles sont fabriquées soit par des professionnels (AWP, Berge, Eoltec, Lakota, Vergnet, South West Wind power, Wind side, ...), soit en auto construction.

### III.2.1 Le vent.

Le vent est une forme d'énergie solaire inépuisable. C'est une énergie renouvelable. Il est créé par un gradient de température (différence de température entre l'équateur et les pôles) qui découle du réchauffement inégal de la terre par le soleil.

Il se forme alors des zones de pressions différentes dans l'atmosphère. On parle alors d'anticyclone (Haute P) et de dépression (Basse P). La compensation de pression est alors assurée par le vent [32].

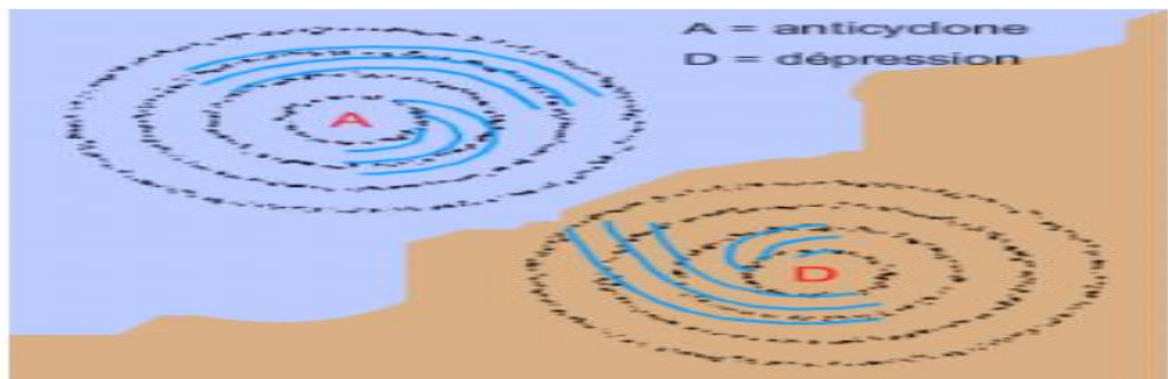


Fig.II.2 : Anticyclones et dépression [32].

### III.2.2 Mesure du vent

Pour mesurer la vitesse du vent on utilise plusieurs types d'anémomètres ou des systèmes à ultrasons.



**Fig.III.3** Anémomètres [32].

### **Anémomètres à ultrasons**

Les anémomètres à ultrasons mesurent la composante horizontale de la vitesse et la direction, tout comme la température acoustique virtuelle.

### **Anémomètres Propeller**

Les anémomètres Propeller mesurent le flux d'air horizontal et vertical. Ils sont le plus souvent utilisés dans la gestion des parcs éoliens pour prévoir la réaction d'une éolienne au flux d'air. La rotation d'un anémomètre Propeller produit un courant qui est directement proportionnel à la vitesse du vent.

## **III .2.3 Modélisation du vent**

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Il est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc pour la rentabilité [33].

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent (cf. formule (III - 2)[33,34] :

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

$a_k$  : Amplitude des harmoniques

$\omega_k$  : Fréquence des harmoniques



La vitesse du vent est représentée par la fonction :

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

Il est à signaler que ce profil de vent particulier correspond à [4, 35, 36, 37].

### III .3 Modélisation de la turbine éolienne

Une turbine éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Pour débiter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse "V" à un moment donné et traverse une certaine surface "A", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

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

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

La turbine utilisée dans le cadre de notre travail, est une éolienne à axe vertical (voir Figure III.4).

"Savonius"

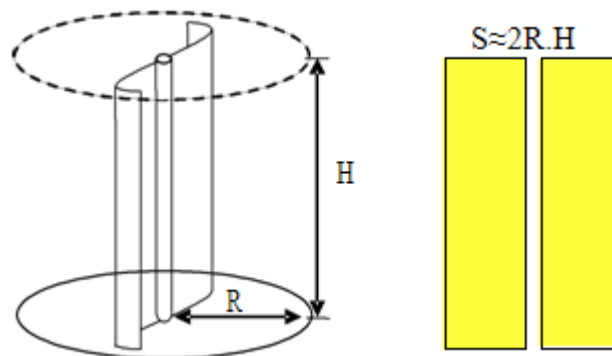


Fig.III.4 Voilure à axe vertical de type Savonius [36].

La surface "A" donnée par la formule suivante :

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

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 :

$$P_m = C_p (\lambda). \rho. H. R. V^3 \quad (\text{III} - 5)$$

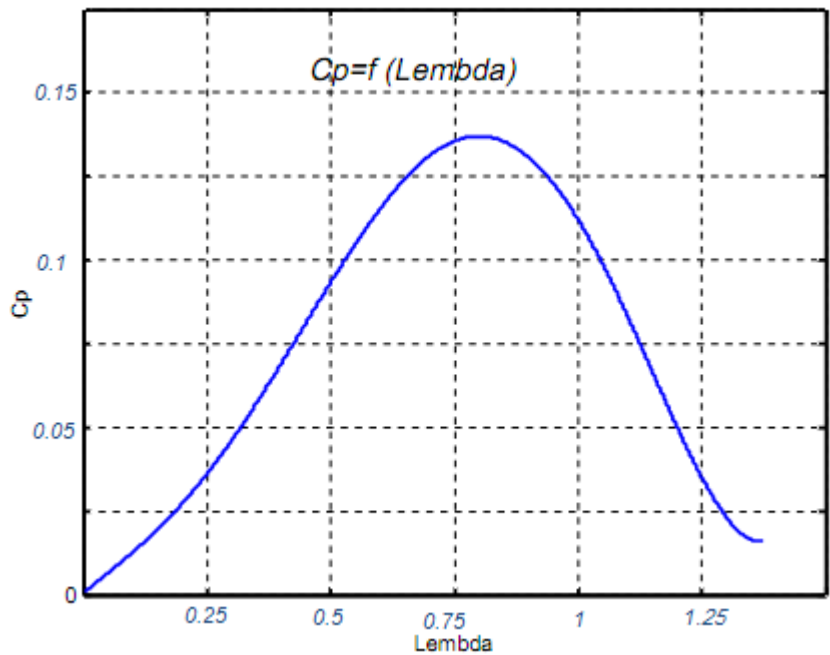
Où  $C_p$  est un coefficient qui exprime l'efficacité de la voilure dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est en fait souvent donné en fonction de la vitesse réduite (la vitesse spécifique  $\lambda$ ) qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de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

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V} \quad (\text{II} - 6)$$

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

L'évaluation du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour cette turbine [4, 35,36], par l'équation analytique en fonction de  $\lambda$  (résultante de l'interpolation) suivant :

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

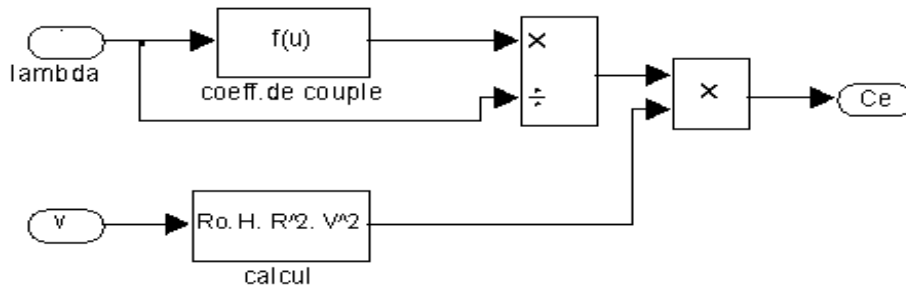


**Fig.III.5** Courbe caractéristique retenue pour les essais.

La figure (Fig.III.5) représente les caractéristiques de coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$ , il présente un facteur de puissance maximal  $Cp_{max} = 0.13$  pour  $\lambda_{max} = 0.85$ .

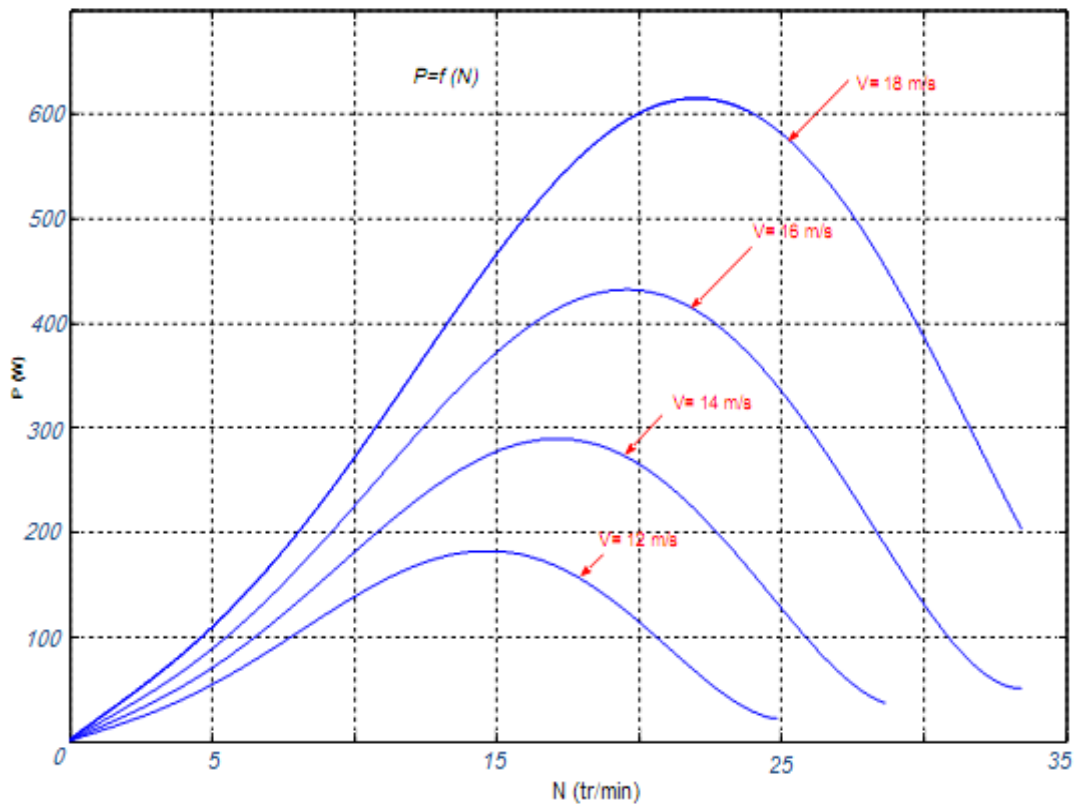
Le couple éolien noté :  $C_e$  est obtenue partir de l'équation (III - 5) et en utilisant l'expression (III - 6) de la vitesse réduite :

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V^2}{\lambda} \quad (\text{III} - 8)$$



**Fig. III.6** Modèle du couple éolien sous Simulink.

La figure (Fig. II.6) présente la caractéristique de la turbine à travers de la courbe d'extraction de puissance éolien de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.



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

On remarque de la figure (Fig. III.7) 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 semblable 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 Modélisation mécanique du couple turbine –génératrice

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

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

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

$$J = J_{gen} + \frac{J_t}{i^2} \quad (\text{III} - 10)$$

On note que :

$$C_f = f_m \cdot \Omega \quad (\text{III} - 11)$$

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

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

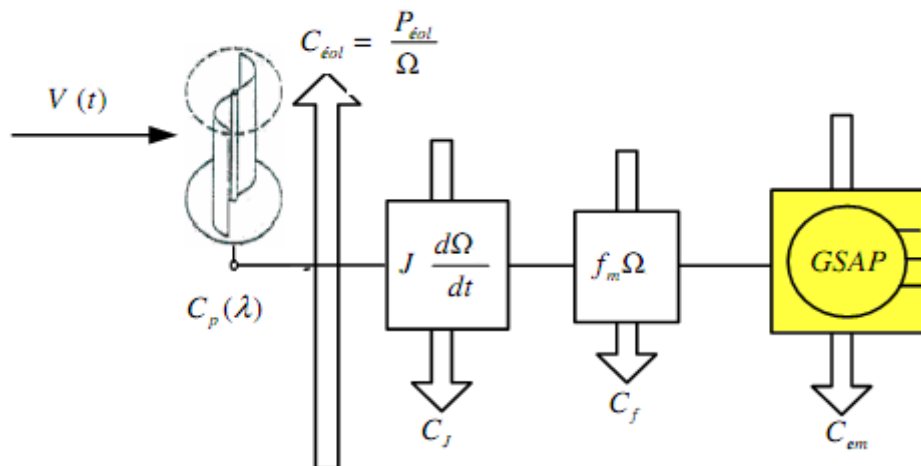


Fig. III.8 Modèle du couple de la turbine éolienne

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

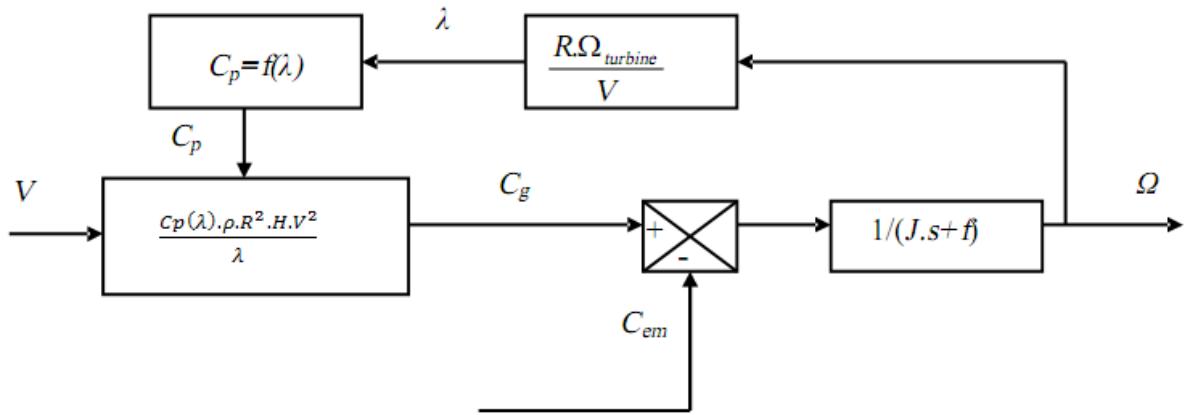


Fig. III.9 Schéma bloc de la turbine éolienne

### III .5 Modèle de la 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 :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - F\Omega \\ C_{em} = \frac{3}{2}P [(L_q - L_d) I_d \cdot I_q + \phi_f \cdot I_q] \end{cases} \quad \text{(III - 12)}$$

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

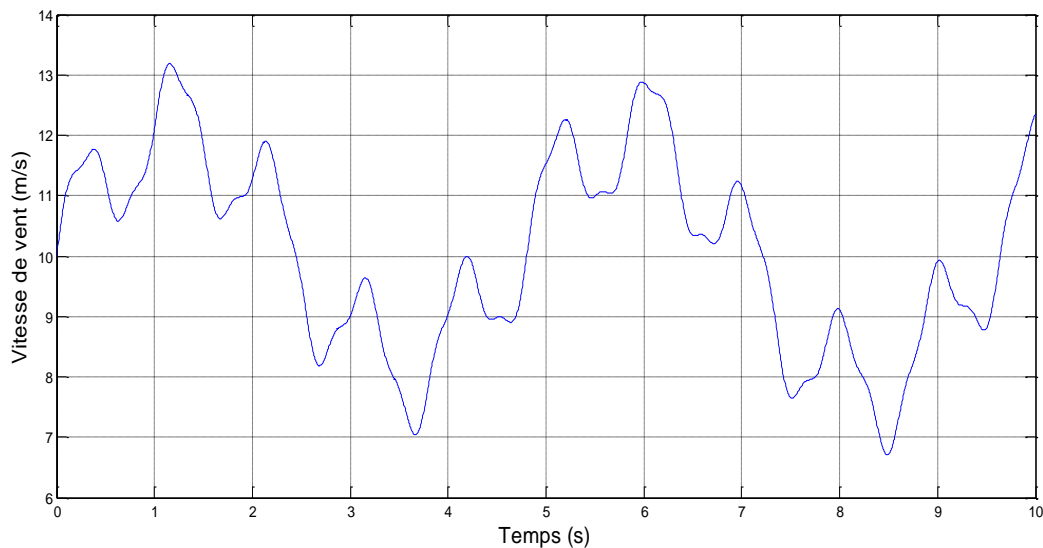
génératrice avec  $F$  le coefficient de frottement,  $J$  : Moment d'inertie et  $p$  le nombre de paires de pôles.

### III .6 Simulation

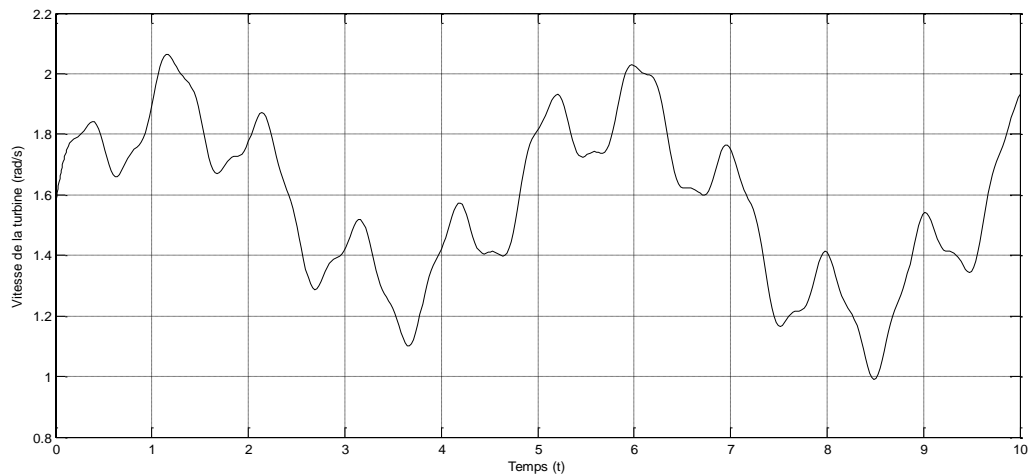
Le vent sera modélisé sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques

$$V(t) = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (\text{III} - 13)$$

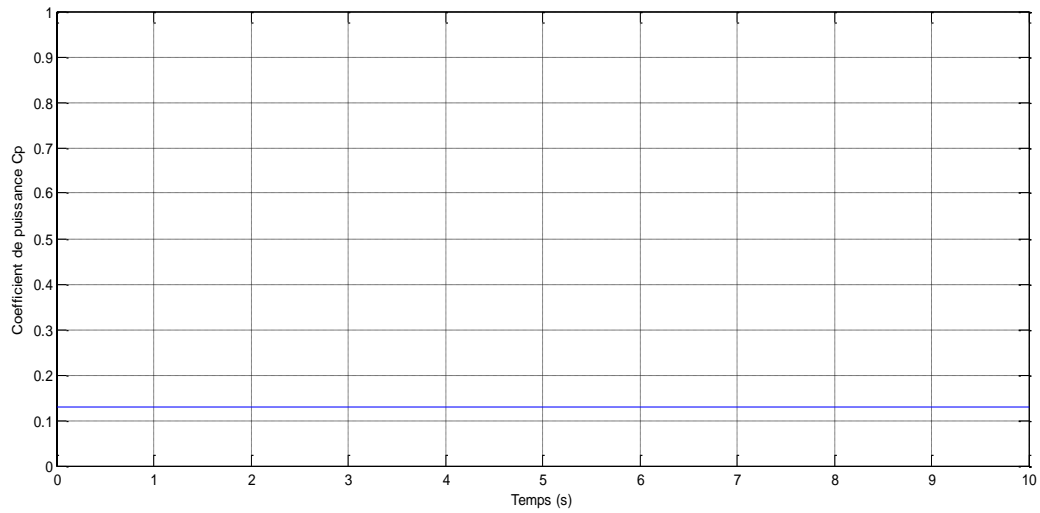
Les résultats de simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents associé à la turbine éolienne et avec la vitesse du vent simulée par l'équation (III - 13) sont donnés par les figures qui suivent :



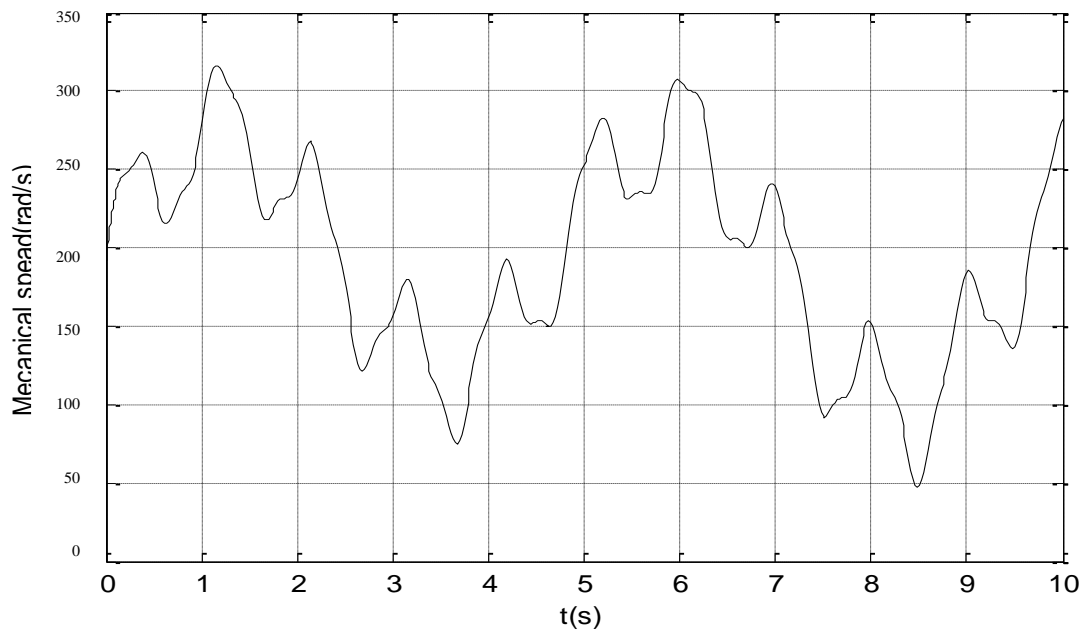
(a) La vitesse du vent en fonction de temps.



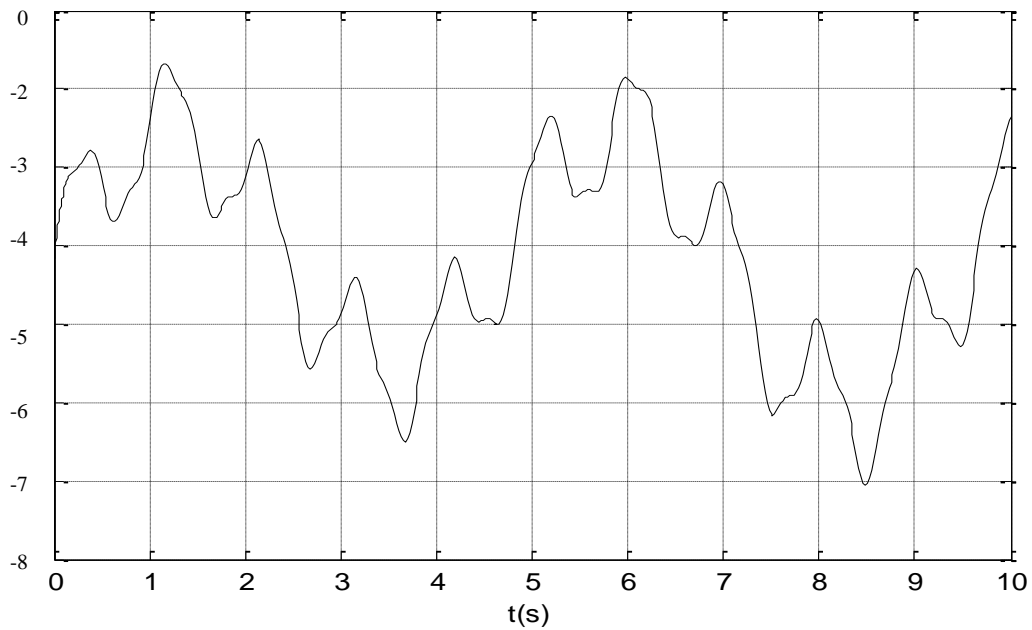
(b) La vitesse de la turbine en fonction de temps.



(c) Coefficient de puissance.



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



(e) La puissance active.

**Fig. III.10** les résultats de la simulation de système éolien.

Nous remarquons que les résultats prennent la forme du vent, le coefficient de puissance est de 0,13 (c'est la valeur maximale pour avoir un maximum de puissance extraite du vent). La puissance active est de l'ordre de 400W. Mais notre système présente des fluctuations dues à la variation de la vitesse du vent pour cela le système nécessite une commande pour maintenir cette puissance à sa valeur nominale.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi un modèle global de la chaîne de conversion éolienne qui est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents GSAP associé à une turbine éolienne. 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.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail dans ce mémoire, a comme but de faire la modélisation d'un système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) qui est utilisée pour la petite dimension pour la production d'énergie électrique.

On a débuté notre travail par le rappel des concepts fondamentaux de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique avec un état de l'art sur les énergies renouvelable et l'énergie éolienne en particulier avec les différentes associations machines électriques - convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne.

Par ailleurs, on a consacré l'étude à la modélisation d'une éolienne de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une machine synchrone à aimant permanent (GSAP). Les résultats de simulation de la génératrice synchrone couplée à la turbine éolienne montrent un fort couplage à la puissance active .

Pour cela comme perspectives, on propose l'étudié de la commande vectorielle qui permet de découpler le modèle de la GSAP afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et la charge.

# **Annexes**

## ANNEXE A

## 1. Distribution du vent

Fonction de probabilité de densité de Weibull:  $f(\vartheta) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{\vartheta}{c}\right)^{(k-1)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\vartheta}{c}\right)^k\right]$

Cette loi indique la probabilité pour laquelle le vent est à une vitesse  $v$ . Elle permet de caractériser la distribution du vent.

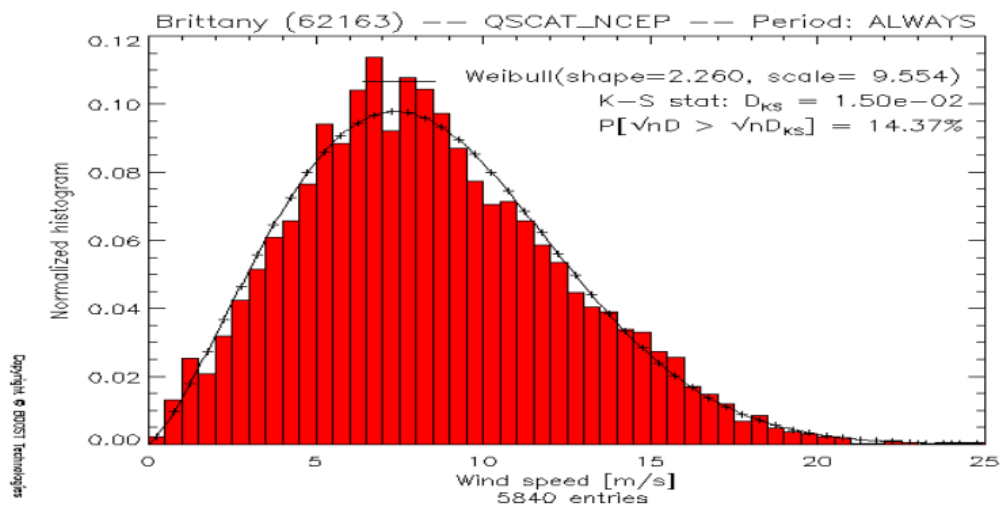


Fig.A.1 distribution de Weibull

«  $k$  » est le facteur de forme de Weibull. Il donne la forme de la distribution et prend une valeur comprise entre 1 et 3. Plus la valeur  $k$  est faible et plus la vitesse du vent est variable, tandis qu'une valeur de  $k$  élevée indique une vitesse de vent constante. «  $c$  » est Le facteur d'échelle de Weibull exprimé en m/s. Il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. «  $c$  » est proportionnel à la vitesse moyenne du vent.

## 2. Puissance du vent

En utilisant la distribution de Weibull, on calcule la puissance que fournit le vent à l'éolienne.

La Puissance du vent contenue dans un cylindre de section  $S$  se calcul à partir de[39]:

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot \vartheta^3$$

$\rho$  : masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$S$  : surface du capteur éolien ( $m^2$ )

$v^3$ : vitesse du vent (en m/s)

### 3.Limite de Betz

Le coefficient de puissance d'une éolienne se calcule à partir de l'équation suivante[38] :

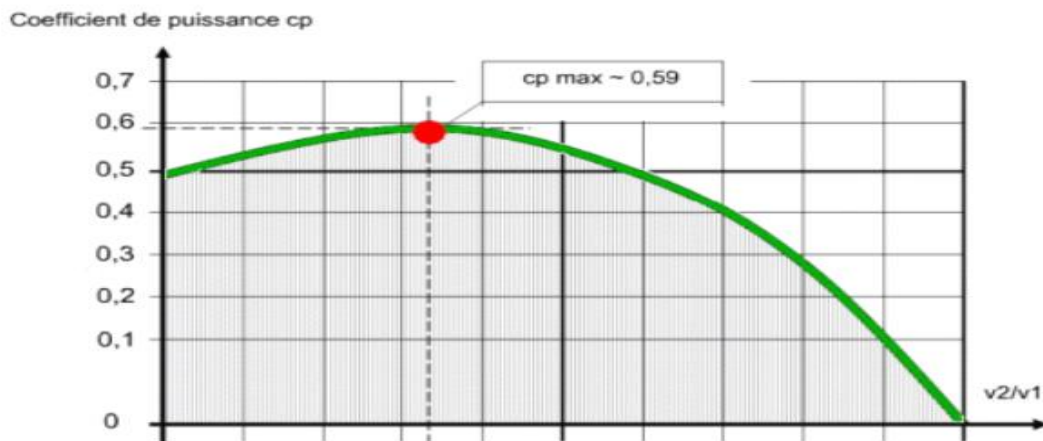
$$c_p = \frac{P_{\text{éolienne}}}{P_0}$$

Où  $P_0 = P$  cinétique est la puissance incidente du vent non perturbé La vitesse de vent  $V_{\text{entrant}}$  rencontrant l'éolienne est freinée à la surface du rotor.

En aval du rotor,  $v_{\text{sortant}}$  s'élève encore à environ 1/3 de la vitesse en amont du rotor.

Si l'on rapporte  $C_p$  en fonction du rapport de la vitesse de vent avant le rotor  $\frac{v_{\text{sortant}}}{v_{\text{entrant}}}$

c'est à-dire du freinage, on obtient un maximum à  $\frac{v_{\text{sortant}}}{v_{\text{entrant}}} = \frac{1}{3}$



**Fig.A.2** Limite de Betz

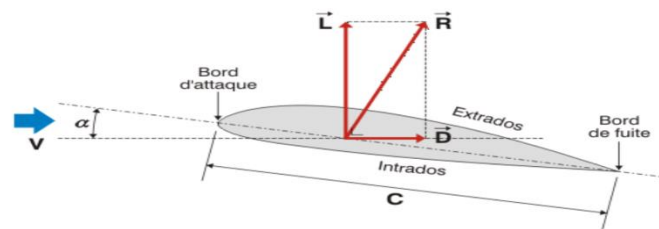
Ce coefficient de puissance maximum  $C_{p\text{max}}$  est aussi appelé valeur limite de Betz.

Elle représente une limite supérieure théorique pour le prélèvement de puissance dans le vent pour une éolienne idéale [38].

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} \approx 0.59$$

De l'énergie du vent (source primaire du système éolien), on ne peut en récupérer qu'au maximum 59 %. C'est la limite de Betz.

#### 4. Notions d'aérodynamique



**Fig.A.3** Profil d'aile

Comme pour l'aile d'un avion, une pâle d'éolienne utilise l'effet de portance. Cet effet est dû à l'écoulement de l'air autour du profil de l'aile. Il est plus rapide sur l'extrados (le dessus) que sur l'intrados (le dessous), ce qui entraîne une dépression sur l'extrados et l'aile est « aspirée » vers le haut par la différence de pression.

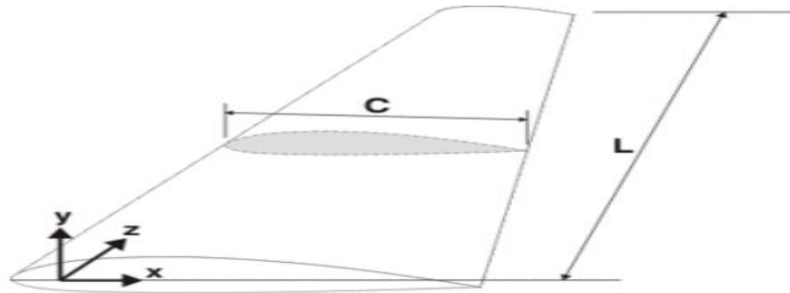
La portance est perpendiculaire à la direction du vent. En aérodynamique la traînée correspond à la résistance d'air. Celle-ci augmente avec la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air. La traînée est une force qui agit sur la pâle dans la même direction que le vent.

Cette force tend à contrer le mouvement d'avancement de la pâle et doit donc être la plus faible possible. L'action aérodynamique totale ou résistance de l'air est la résultante de ces deux forces de traînée et de portance.

## 5. Connaissances basiques sur les pales

### Dimensionnement de l'éolienne

Lorsque l'on connaît l'énergie maximum dont dispose l'éolienne, on doit pouvoir dimensionner le rotor et définir les différents paramètres de l'éolienne afin d'obtenir le meilleur rendement possible.



**Fig.A.4** pale d'éolienne

Sachant que pour une éolienne qui produit de l'électricité le nombre standard de pâles est de trois, on doit calculer le rayon des pâles, le rapport de vitesse de pointe ( $\lambda D$ ), le coefficient de portance ( $C_z$ ) lié à la finesse et l'angle d'attaque ( $\alpha$ ). On doit ensuite créer le profil de l'aile avec la corde ( $C$ ) et l'angle de calage ( $\beta$ )

.Le rayon du rotor peut se calculer à l'aide de l'équation suivante :  $R = \left[ \frac{2 \cdot P_D}{c_{pD} \cdot \eta_d \cdot \eta_g \cdot \rho \cdot \pi \cdot v_D^3} \right]$

Avec

$c_D$ : le coefficient de puissance de conception du rotor

$P_D$ : Puissance attendue de la turbine

$\eta$ : Efficacité du train d'entraînement

$\eta$ : Efficacité du générateur

$V$ : Vitesse de conception du vent

Ou  $\eta_d \cdot \eta_g = 0.9$

### Paramètre de rapidité $\lambda_D$

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté  $\lambda_D$

est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pâles et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre :

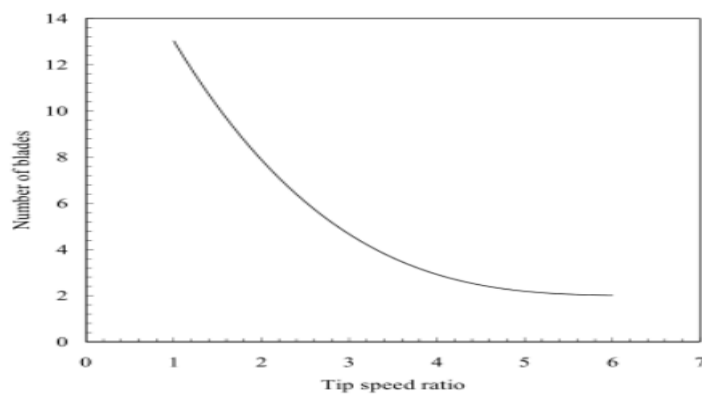
si  $\lambda$  est inférieure à 3, l'éolienne est dite lente

si  $\lambda$  est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide

Le rapport de vitesse de pointe  $\lambda_D$  dépend de l'application pour laquelle la turbine est développée. Par exemple, lorsque nous concevons le rotor pour une pompe à vent qui nécessite un couple de démarrage élevé alors un faible rapport de vitesse de pointe est choisi. D'autre part, si notre intention est de produire de l'électricité, nous avons besoin d'un rotor tournant plus rapidement et donc on choisit un rapport de vitesse de pointe plus élevé.

Pour les pompes  $\lambda_D$  est compris entre 1 et 2.

Pour les aérogénérateurs  $\lambda_D$  doit être supérieur à 5.



**Fig.A.5** rapport de vitesse de pointe

### Finesse du profil de la pôle

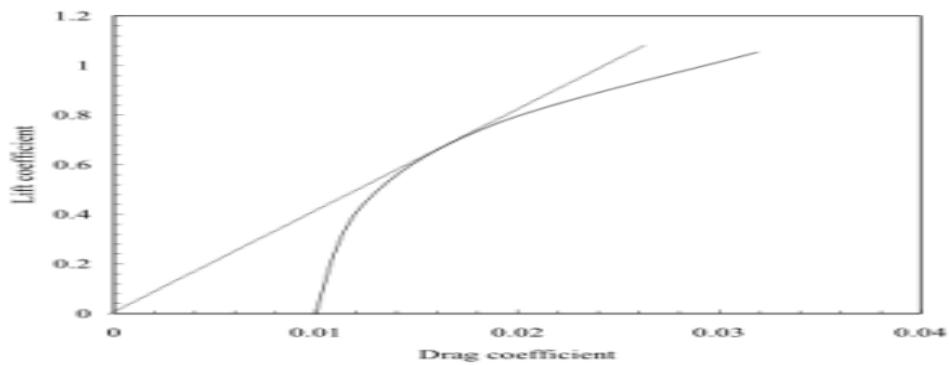
Formule de la finesse :  $S = \frac{C_Z}{C_X}$  : Finesse du profil (sans unité)

$C_Z$  coefficient de portance (sans unité)

$C_X$  Coefficient de traînée (sans unité)

Pour maximiser le rendement d'une éolienne, il faut que la finesse soit maximum, autrement dit que la traînée soit minimale et la portance maximale. La finesse doit être assez grande pour que la traînée n'absorbe pas une partie trop élevée du couple moteur.

La finesse d'un profil dépend de plusieurs paramètres : l'angle d'attaque de la pale (c'est à dire l'angle de la pale par rapport au vent apparent)



**Fig.A.6** Finesse



## Bibliographie

- [1] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.
- [2] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [3] F. Yassa, B. Batoun and R. Khaniche, 'Study of Wind Resources in Algeria Based upon Satellite Data', International Conference on Ecological Vehicles & Renewable Energies, EVER'08, Monaco, March 27-30, 2008.
- [4] A. Mirecki, 'Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 2005.
- [5] [www.ren21.net/map](http://www.ren21.net/map)
- [6] A. Samil, Bulletin des Energies Renouvelables, N°4, Décembre 2003
- [7] 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
- [8] J.RDidat " Etude de l'association des convertisseurs de puissance dans une chaîne éolienne de petite puissance" thèse université Montpellier II – Sciences et techniques du Languedoc, 2006.
- [9] E.Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd ed. Springer, 2005
- [10] TIR ZOHEIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade» WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.
- [14] N. KASBADJI MERZOUK et M. MERZOUK « Perspectives du pompage éolien en ALGERIE », Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger 2008.
- [16] A. Tounzi « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité. », Journées électrotechnique du club EEA, 28-29 janvier 1999, Paris.
- [18] M.Dali, J. Belhadj, X. Roboam, J.M. Blaquiere, 'Control and Energy Management of a Wind-Photovoltaic Hybrid System, EPE conference, Aalborg, Suede, September 2007.

- [19] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, "Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance", *Electrotechnique du Futur* 2001 nov. 2001, Nancy France, pp.17-22
- [23] Philippe Barret, « Régimes transitoires des machines tournantes électriques », Editions Eyrolles 1987.
- [24] G. Lacroux, " Les aimants permanents ", Edition technique et documentation, 1989
- [25] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "The History and State of Art of Variable Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [26] J. Martin, "Energies éoliennes", *Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique*, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [27] <http://www.windpower.org/fr/core.htm>
- [28] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes" *technique de l'ingénieur traité génie mécanique*, BM 4640 ,N° de volume : BL3
- [29] Fernando Soares dos Reis, «Active Shunt Filter for Harmonic Mitigation in Wind
- [30] Fang Liu, Xing Zhang, Zhen Xie, Po Xu, Liuchen Chang, « Shunt Active Power Filter
- [31] NAOUEL HAMDI «Modélisation et commande des génératrices éoliennes» mémoire
- [33] D. H. TRAN, " Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive : Analyse de robustesse, validation expérimentale", Thèse de Doctorat de L'université de TOULOUSE, septembre 2010.
- [34] A. Harrouz, B. A. Ali, O. Harrouz, " Modélisation d'une Petite Eolienne Hors Réseaux Basée sur la Génératrice Synchrone à Aimant Permanent", *International Conference on Energy and Sustainable Development*, p 5, 2011
- [35] J. D. LANGLOIS, "Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseau", Thèse Master à L'école de Technologie Supérieures, Montréal 2006
- [36] D. H. TRAN, " Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive : Analyse de robustesse, validation expérimentale", Thèse de Doctorat de L'université de TOULOUSE, septembre 2010
- [37] A. Abdelli, « optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [38] P. Bauer, S.W.H. De Haan, C.R. Meyl, JTG. Pierik, "Evaluation of Electrical Systems for offshore Wind farms ", *CDROM of the IEEE IAS Conf.*, oct. 2000
- [39] X. Roboam « Le "petit éolien" : marchés, applications, architectures et gestion d'énergie ». *Revue REE*, Vol. 5 01/05/2005

[40] V.Rogez "Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application a l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire". Thèse de doctorat, Université d'Artois, 17/12/2004