

République Algérienne Démocratique et  
Populaire Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA Bejaïa



Faculté de technologie  
Département de Génie Electrique

*Mémoire de fin d'étude*

*En vue de l'obtention du diplôme de master en  
Electrotechnique option Electrotechnique Industrielle*

**Thème**

*Application d'une commande non linéaire dans une chaîne de  
conversion éolienne à base d'une machine synchrone à aimant  
permanent*

**Présenter par :**

**Madi Siham**

**Lamamra Wassim**

**Encadrer par :**

**Mr : S. Traft**

Année universitaire 2020/2021

## *Remercîment*

*Nous tenons remercier et rendre grâce à DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté de mené a réalisé ce modeste travail.*

*Nous remercions Mr. Taraft d'avoir accepté de nous encadrer ainsi que son aide et son suivi pendant la réalisation de notre travail.*

*On tient à remercier notre ami Adel Yehiaoui et Mr A. Hamoudi qui nous ont bien aider à terminer ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi aux membres du jury qui nous ont honorés en acceptant d'examiner ce travail.*

*Nous tenons également à remercier tous nos enseignants, désignés par leur dévouement, à qui nous exprimons notre profonde reconnaissance, et notre infinie gratitude.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicace*

*A la mémoire de mes grands-parents qui sont toujours dans mon cœur et mon esprit, je dédie ce travail et que dieux vous accueille dans son vaste paradis.*

*Je dédie ce travail à ma famille qui ont toujours été les étoiles de mon ciel et ont illuminé mon chemin depuis ma naissance. Aucun mot, ni signe ne pourras témoigner mon amour profond et ma reconnaissance pour tous le soutiens que j'ai reçus.*

*A ma chère mère qui m'a entouré d'amour et d'affection, pour son sacrifice qu'elle a consenti pour mon instruction, mon bien être et ma réussite. Pour cela je te dis merci maman et je pris dieux pour qu'il t'accorde une longue vie pleine de joie.*

*A mon cher père qui ne cesse jamais de m'encourager et qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui. Merci beaucoup papa.*

*A ma sœur Yasmine et mon frère Faiz pour leurs soutiens et leurs amours.*

*Et à mes amis qui ont toujours été présent pour moi.*

*Madī Sīham*

## *Dédicace*

*Aux êtres qui me sont les plus chères dans ma vie pour leurs générosités, leur soutien continu durant mon travail : Mon père et ma mère. Que dieux vous protège.*

*A ma grande sœur et sa fille adorée.*

*A toute ma famille et mes amis.*

*Et enfin, à tous ce qui M'ont encouragé, soutenu durant l'élaboration de ce travail.*

*LAMAMRA WASSIM*

# Sommaire

Liste des symboles .....	1
Liste des figures .....	4
<b>Introduction Générale</b> .....	6
<b>Chapitre I : Aperçu sur la production éolienne</b> .....	8
<b>I.1 Introduction</b> .....	9
<b>I.2 Définition de l'énergie éolienne</b> .....	9
<b>I.3 Avantages et inconvénients</b> .....	10
<b>I.3.1 Avantages</b> .....	10
<b>I.3.2 Inconvénients</b> .....	11
<b>I.4 Composants de l'éolienne</b> .....	11
<b>I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne</b> .....	13
<b>I.6 Loi de BETZ</b> .....	14
<b>I.7 Différents types des aérogénérateurs</b> .....	18
<b>I.7.1 Éolienne a axe verticale</b> .....	18
<b>I.7.2 Éolienne a axe horizontale</b> .....	19
<b>I.8 Types de générateurs électriques utilisés dans les systèmes éoliens</b> .....	20
<b>I.8.1 Machine asynchrone à cage (MAS)</b> .....	20
<b>I.8.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)</b> .....	21
<b>I.8.3 Machine synchrone</b> .....	22
<b>I.9 Modes de fonctionnement des éoliennes</b> .....	23
<b>I.9.1 Eoliennes à vitesse fixe</b> .....	23
<b>I.9.2 Eoliennes a vitesse variable</b> .....	24
<b>I.10 Utilité de la vitesse variable :</b> .....	25
<b>I.11 Conclusion :</b> .....	25
<b>Chapitre II : Modélisation de la chaine de conversion de l'énergie éolienne</b> .....	26
<b>II.1 Introduction</b> .....	27
<b>II.2 Modélisation du vent</b> .....	27
<b>II.3 Modélisation de la chaine de conversion</b> .....	27
<b>II.3.1 Modélisation de la turbine éolienne</b> .....	27
<b>I.3.2 Modélisation du multiplicateur</b> .....	29
<b>II.3.3 Équation dynamique de l'arbre</b> .....	29
<b>II.4 Extraction du maximum de la puissance</b> .....	30

II.4.1 MPPT de la turbine éolienne.....	30
II.5 Modélisation de la machine synchrone a aimant permanent .....	31
II.5.1 La machine synchrone à aimant permanent.....	31
II.5.2 Hypothèses simplificatrices .....	31
II.5.3 Mises en équation électrique et magnétique dans le repaire abc .....	32
II.5.4 Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park (d, q) .....	34
II.5.5 Expression de la puissance et de couple électromagnétique .....	36
II.6 Modélisation des convertisseurs statiques.....	36
II.6.2 Redresseur MLI : .....	36
II.6.2 Modèle de l'onduleur de tension .....	38
II.6.3 Modélisation du filtre .....	40
II.7 Conclusion : .....	41
Chapitre III : Commande en puissance de l'aérogénérateur .....	42
III.1 Introduction.....	43
III.2 Principe de la commande vectorielle.....	43
III.3 Commande vectorielle de la MSAP .....	44
III.4 Modèle de la MSAP par orientation flux.....	44
III.5 Théorie de la commande par mode de glissement .....	45
III.5.1 Système à structure variable.....	45
III.5.2 Conception de la commande par mode glissant .....	46
III.7 Conditions de convergence et d'existence .....	47
III.8 Déterminations de loi de commande .....	48
III.9 Application de la commande mode glissant à l'MSAP.....	51
III.9.1 Régulateur de vitesse .....	52
III.9.2 Régulateur de courant direct Id .....	53
III.9.3 Régulateur de courant quadratique Iq .....	53
III.10 Résultats de simulation et interprétations .....	55
III.11 Conclusion : .....	60
Conclusion générale .....	61
Références Bibliographique.....	63
Annexe.....	66

## Liste des symboles

### Notations

#### I. Turbine :

$v_m$  : La vitesse du vent (m /s).

$\rho$  : masse volumique de l'air ( 1.225 Kg/m<sup>3</sup>).

$P_t$  : puissance de la turbine éolienne (W).

$p_v$  : puissance du vent (W).

$C_p$  : coefficient de puissance.

$\lambda$  : vitesse spécifique .

$R$  : Rayon des pales de l'éolienne (m).

$\Omega$  : La vitesse de rotation de l'éolienne (rad/s) :  $C_{pmax}$  : Coefficient de puissance maximale.

$\beta$  : angle d'orientation des pales (°).

$C_t$  : couple de la turbine éolienne (N.m).

$c_{mec}$  : couple mécanique (N.m).

$\Omega_{mec}$  : vitesse de la génératrice (rad/s).

$G$  : rapport de multiplicateur adaptant la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

$J_t$  : inertie de la turbine (Kg/m<sup>2</sup>).

$J_m$  : inertie de la génératrice (Kg/m<sup>2</sup>).

#### II. MSAP :

$V_{sa} \cdot V_{sb} \cdot V_{sc}$  : Les tensions des phases statoriques.

$R_s$  : La résistance des phases statoriques ( $\Omega$ ).

$i_{sa} \cdot i_{sb} \cdot i_{sc}$  : Les courants des phases statoriques.

$\varphi_{sa} \cdot \varphi_{sb} \cdot \varphi_{sc}$  : Vecteur des flux totaux à travers les enroulements statoriques.

$[R_s]$  : Matrice des résistances statoriques.

$J_g$  : inertie de la génératrice (Kg.m<sup>2</sup>).

$J$  : inertie totale (Kg.m<sup>2</sup>).

$\Omega_g$  : vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

$f_g$  : coefficient de frottement visqueux de la génératrice (N.m/rad. s).

$C_{em}$  : couple magnétique développé par la génératrice (N.m).

$M_{so}$  : inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$[L_{so}]$  : inductance propre d'une phase statorique.

$[L_{ss}]$  : matrice des inductances statoriques.

$[L_{ss}(\theta)]$  : inductance propre d'une phase statorique variable selon la position angulaire du rotor par rapport au stator.

$\theta$  : position angulaire du rotor par rapport au stator ( $^{\circ}$ ).

$\varphi_f$  : flux des aimants permanents (wb).

$p(\theta)$  : matrice de transformation de Park.

$[p(\theta)]^{-1}$  : matrice de transformation de Park inverse.

$[V_{dqo}]$  : matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) (V).

$V_{sd}, V_{sq}$  : tensions statoriques dans le repair (d, q, o) de Park (d, q) (V).

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : tensions de références.

$i_{red}$  : courant redressé (A).

$i_a, i_b, i_c$  : courant à l'entrée de redresseur (A).

$S_a, S_b, S_c$  : fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

$i_{ca}$  : courant de la capacité (A).

$i_{ond}$  : courant de l'onduleur (A).

### III. Onduleur :

$V_{an0}, V_{bn0}, V_{cn0}$  : tensions à la sortie de l'onduleur (V).

$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  : tensions de phase de la charge (V).

$S_a, S_b, S_c$  : fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteurs.

### IV. La commande glissant :

$\varphi_f$  : Flux des aimants.

$n$  : L'indice de neutre de l'onduleur.

$\xi$  : Facteur d'amortissement.

$\Omega_{ref}$  : Vitesse de référence.

$I_{dref}$  : Courant d de référence.

$I_{qref}$  : Courant q de référence.

**V. Abréviation :**

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.

MLI : modulation par largeur d'impulsion.

MPPT : Maximum power point tracking.

CMG : Commande par mode glissant.

CSV : Système de structure variable.

**Liste des figures**

Chapitre I : Aperçus sur la production éolienne

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent..... 9

Figure I.2 : Principe organes du système de conversion éolien ..... 10

Figure I.3 : Les composants d'une éolienne ..... 12

Figure I.4 : Constitution d'une nacelle ..... 13

Figure I.5 : Principes de conversion de l'énergie éolienne ..... 14

Figure I.6 : Démonstration de la loi de BETZ..... 15

Figure I.7 : Coefficient de puissance..... 17

Figure I.8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne ..... 18

Figure I.9 : Technologies des éoliennes à axe vertical..... 19

Figure I.10 : Eolienne amont et éolienne aval..... 20

Figure I.11 : Eolienne utilisant une machine asynchrone ..... 21

Figure I.12 : Système éolien à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage ..... 21

Figure I.13 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation ..... 22

Figure I.14 : Système éolien à vitesse variable basé sur MSAP à grand nombre de pair de pole ..... 23

Figure I.15 : Connexion au réseau d'un système à vitesse fixe ..... 23

Figure I.16 : Connexion d'un système à vitesse variable au réseau électrique..... 24

Figure I.17 : Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent..... 25

Chapitre II : Modélisation de la chaine de conversion éolienne

Figure II.1 : Chaine de conversion d'une éolienne ..... 27

Figure II.2 : Différents parties mécanique de l'éolienne ..... 28

Figure II.3 : Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne ..... 30

Figure II.4 : MPPT de la machine éolienne..... 31

Figure II.5 : Représentation symbolique de la MSAP dans le repaire ABC ..... 32

Figure II.6 : Représentation d'une MSAP dans le repaire de Park (d, q) ..... 34

Figure II.7 : Schéma d'un redresseur MLI..... 37

Figure II.8 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé ..... 38

Chapitre III : Commande en puissance de l'aérogénérateur

Figure III.1 : Principe de la commande vectoriel..... 44

Figure III.2 : Schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandé par l'orientation du flux..... 45

Figure III.3 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase. .... 46

Figure III.4 : Commande équivalente et commande réel  $U_{eq}$ . .... 49

Figure III.5 : Commande discontinue. .... 50

Figure III.6 : Surface de glissement et la commande discontinue..... 50

Figure III.7 : Loi de commande par bande continue au voisinage de la surface de glissement. .... 51

Figure III.8 : Schéma bloc de la chaine de simulation globale. .... 55

Figure III.9 : Profile du VENT..... 56

Figure III.10 : La surface du courant  $I_d$ . .... 56

Figure III.11 : La surface du courant  $I_q$  . .... 57

Figure III.12 : La surface de la vitesse . .... 57

Figure III.13 : Courant d'axe direct  $I_d$  et  $I_{dref}$ ..... 58

Figure III.14 : Courant d'axe en quadrature  $I_q$  et  $I_{qref}$ ..... 58

Figure III.15 : La vitesse mécanique ..... 59

Figure III.16 : Couple electromagnétique et couple résistant. .... 59

Figure III.17 : Puissance active de la MSAP ..... 60

Figure III. 18 : Tension et courant de phase ..... 60

# Introduction Générale

## **Introduction générale**

La demande mondiale d'énergie électrique évolue très rapidement. Le monde devra faire face à une crise énergétique, à l'image de la pénurie des sources d'énergies fossiles largement utilisées pour la production de l'électricité. En effet, les énergies fossiles produisent trois quarts de l'énergie mondiale. Cependant, la combustion des matières fossiles dégage du dioxyde de carbone, l'un des principaux facteurs provoquant les gaz à effet de serre, considérés comme en partie responsable du réchauffement climatique [1].

Pour remédier de ces problèmes, la plupart des pays ont fait appel au développement des énergies renouvelables qui sont des énergies propres non polluante [2].

L'énergie éolienne ou l'énergie du vent est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique. Elle peut être une alternative compétitive contribuant à la réduction de la demande de plus en plus galopante de l'électricité. Le développement et la multiplication de l'utilisation de chaînes de conversion de l'énergie éolienne ont conduit les industriels et les scientifiques à s'investir dans l'amélioration des indices technico-économique de cette conversion et la qualité de l'énergie fournie [2].

Le développement en parallèle de l'électronique de puissance et des aimants permanents ont conduit à la conception d'un nouveau type de machine synchrone excitée par des aimants permanents d'où le nom : Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP).

L'objectif de notre travail est d'appliquer une commande non-linéaire dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent. Ce type de machine est très fiable, présente un facteur de puissance élevé et un bon rendement.

Le premier chapitre est un aperçu général sur l'énergie éolienne, où on décrira ce qu'est une énergie éolienne, on évoquera le principe de fonctionnement d'un système éolien, structure des éoliennes à vitesse fixe ou à vitesse variable, les types des générateurs électriques utilisés dans les systèmes éoliens pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la machine synchrone à aimant permanent, le redresseur MLI, l'onduleur et le filtre.

Le troisième chapitre se portera sur la commande par mode glissant. Sa théorie, sa conception et son application à la MSAP. Finalement on exposera les résultats de la simulation de toute la chaîne.

Notre travail sera achevé par une conclusion générale.

# Chapitre I : Aperçu sur la production éolienne

## I.1 Introduction

L'idée d'exploiter la puissance du vent n'est pas nouvelle. Dès les origines de l'humanité, l'homme a souhaité pouvoir tirer parti de cette énergie que ce soit pour faire avancer des embarcations maritimes ou pour des tâches laborieuses.

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de craies prototypes d'éolienne à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe verticale ou horizontale) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. L'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones.

## I.2 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 et entre dans la catégorie des énergies renouvelables (Figure I.1) [3].

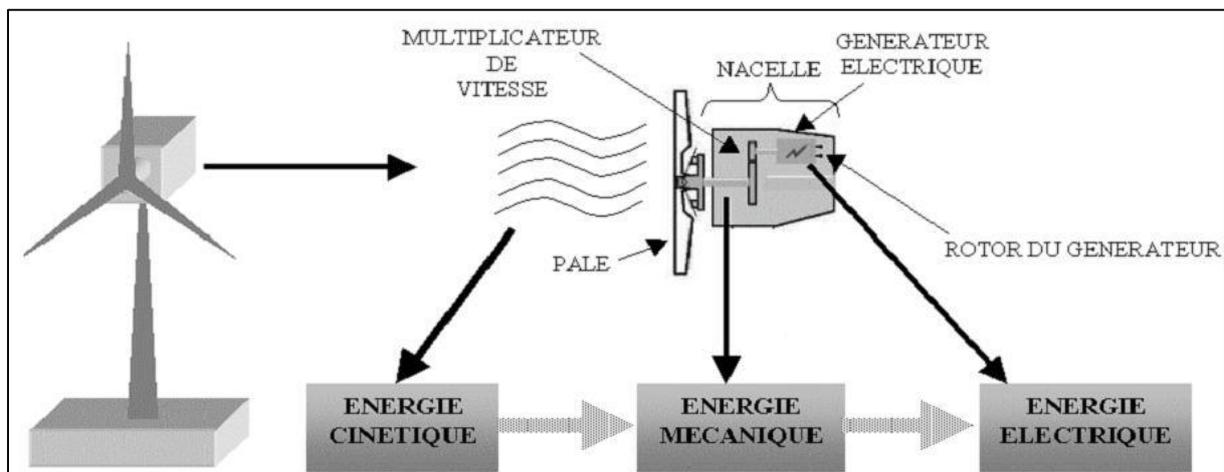
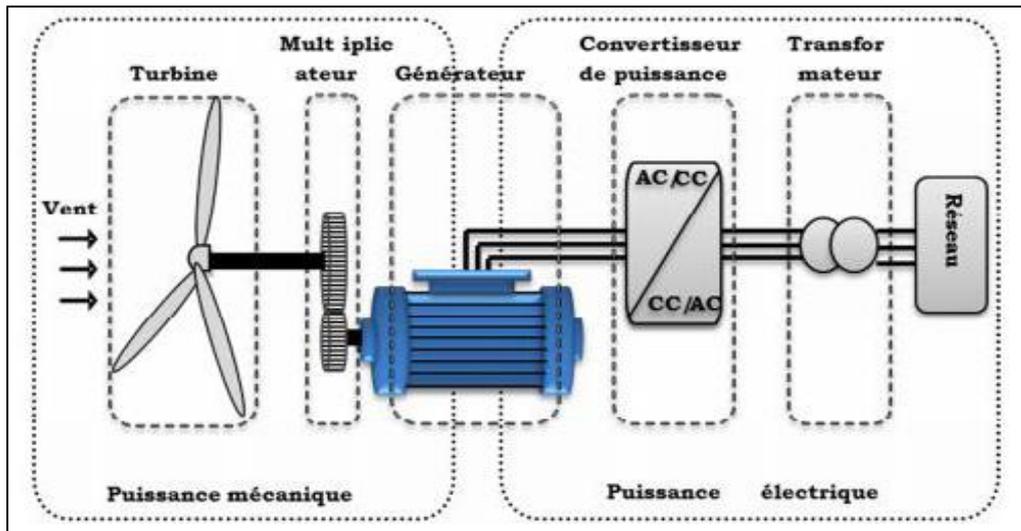


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Le système de Conversion Eolien (SCE) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique (voir la figure I.2) [3].



**Figure I.2 :** Principe organes du système de conversion éolien

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 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts), dans des zones géographiquement dégagées, pour éviter les phénomènes de turbulences [4].

### I.3 Avantages et inconvénients

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après [5].

#### I.3.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, propre, fiable, économique et respecte l'environnement [6].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- 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, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [7].

- 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 [7].
- 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 [7].
- La source d'énergie locale c'est une 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.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles [5].

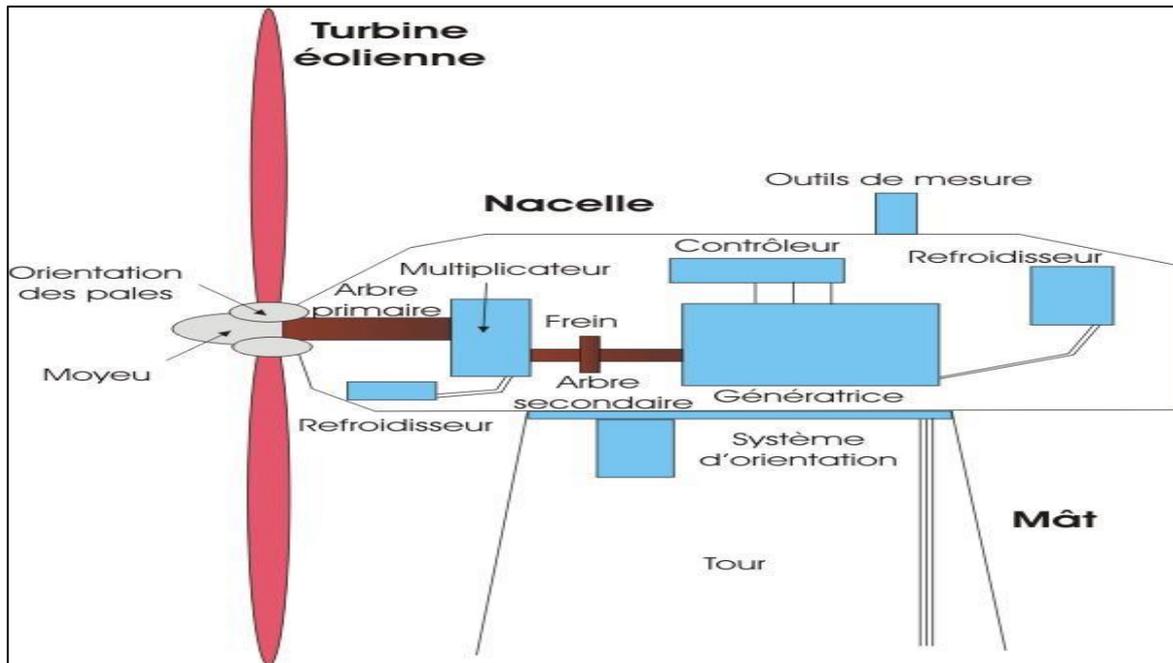
### **I.3.2 Inconvénients**

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- L'impact visuel ça reste néanmoins un thème subjectif [7].
- Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur [7].
- La migration des oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne [6].
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques [6].

### **I.4 Composants de l'éolienne**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de (voir la figure I.3) [3] :



**Figure I.3 :** Les composants d'une éolienne

- **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 [8].
- **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 transmise par le rotor [8].
- **Rotor :** composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres [8].

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [6].

- **Nacelle :** montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [8]. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

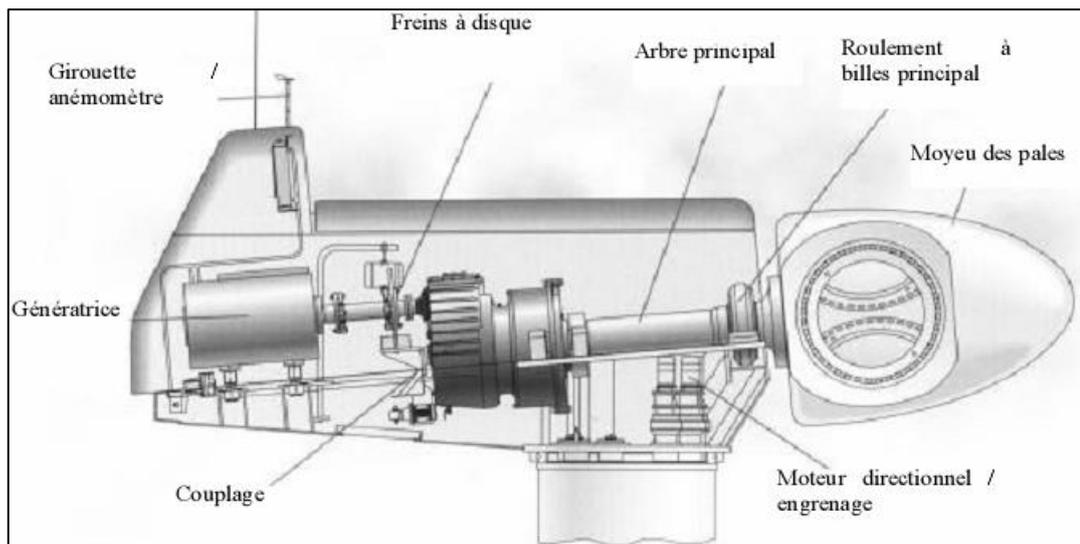


Figure I.4 : Constitution d'une nacelle

- **Différents composants d'une nacelle [9]**

- **Multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- **Arbre secondaire** : comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- **Génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Contrôleur électronique** : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie.
- **Système de refroidissement** : par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile destiné au multiplicateur et à la génératrice.

## I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/min pour une machine à 2 parties de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

Les convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public [10].

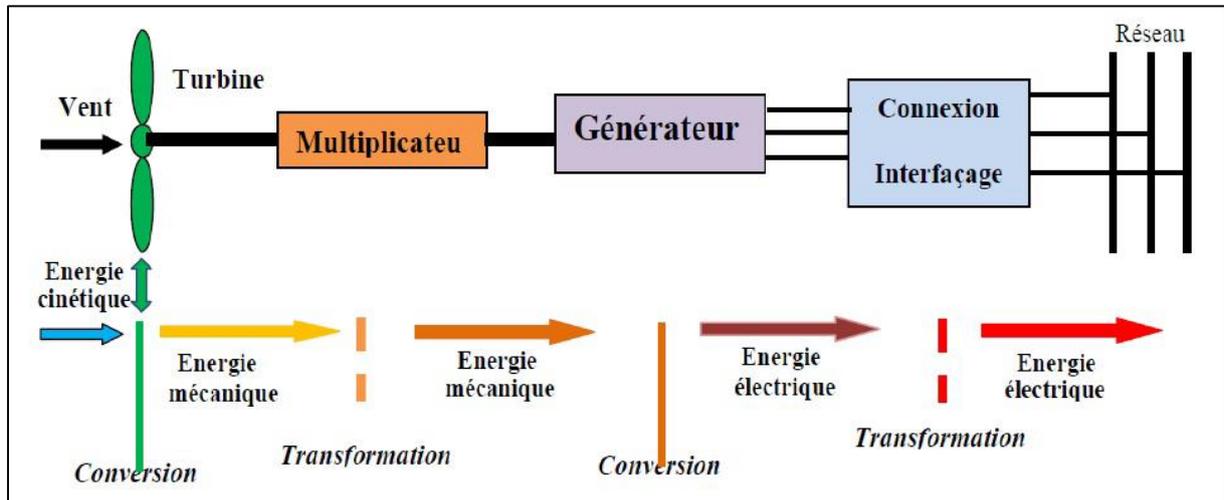


Figure I.5 : Principes de conversion de l'énergie éolienne

## I.6 Loi de BETZ

La loi de BETZ détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de  $16/27$  (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

Selon le théorème de BETZ, la vitesse du vent  $V_m$  traversant la surface  $S$  balayée par le rotor est supposée égale à la moyenne de la vitesse moyenne du vent non perturbé en amont de l'éolienne et de sa vitesse après le passage à travers le plan de rotor (voir figure II.6) [11].

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I.1})$$

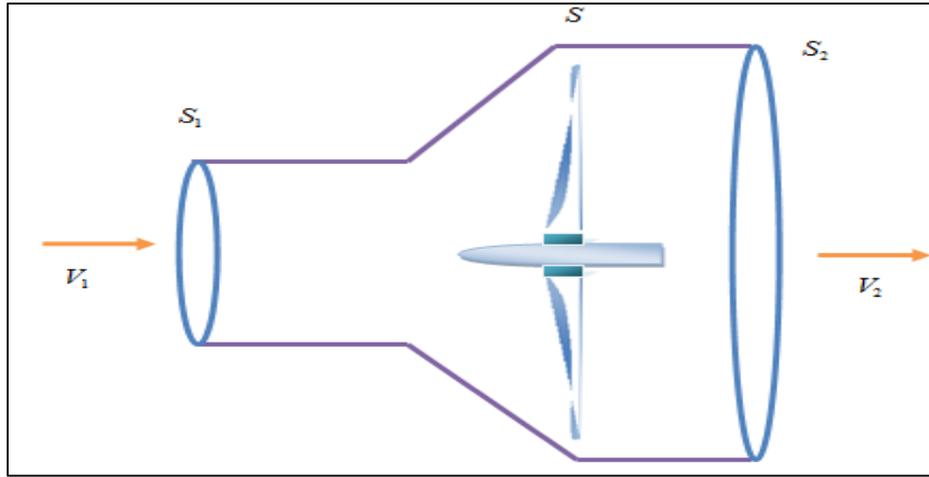
Ainsi, la masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor est donnée par :

$$m = \frac{1}{2} \rho S (V_1 + V_2) \quad (\text{I.2})$$

Où

$\rho$  : masse volumique de l'air (en  $\text{Kg} / \text{m}^3$ ) ;

$S$  : La section de la colonne d'air.



**Figure I.6 :** Démonstration de la loi de BETZ

De plus, la puissance extraite du vent par la turbine selon la seconde loi de Newton est exprimée par la relation suivante :

$$P_t = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.3})$$

En remplaçant par son expression dans (II.2) on obtient :

$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.4})$$

Comparons maintenant ce résultat avec la puissance totale d'un flux d'air non perturbé traversant une même surface  $S$  sans la présence du rotor qui perturbe le vent. Nous notons cette puissance  $P_v$ , elle est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{I.5})$$

La relation entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé est exprimé par :

$$P_t/P_v = \frac{1}{2} (1 - V_2^2/V_1^2) (1 + V_2/V_1) \quad (\text{I.6})$$

Comme on peut le noter, cette fonction atteint son maximum pour  $(V_2/V_1 = 1/3)$  et la valeur maximale de la puissance extractible du vent est 0.59 de la puissance totale contenue dans le vent [12].

Cependant, on peut constater que pratiquement le dispositif de conversion extrait une puissance  $P_t$  inférieure à la puissance  $P_v$ . On définit alors un coefficient de puissance de l'aérogénérateur par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (\text{I.7})$$

Avec  $C_p < 1$  On peut écrire donc :

$$P_t = C_p P_v \quad (\text{I.8})$$

En remplaçant par son expression dans (II.5), on obtient :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3 \quad (\text{I.9})$$

- **Coefficient de puissance**

La valeur de ce coefficient de puissance  $C_p$  dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  comme suit :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V} \quad (\text{I.11})$$

Où

$\Omega_t$  : Est la vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice.

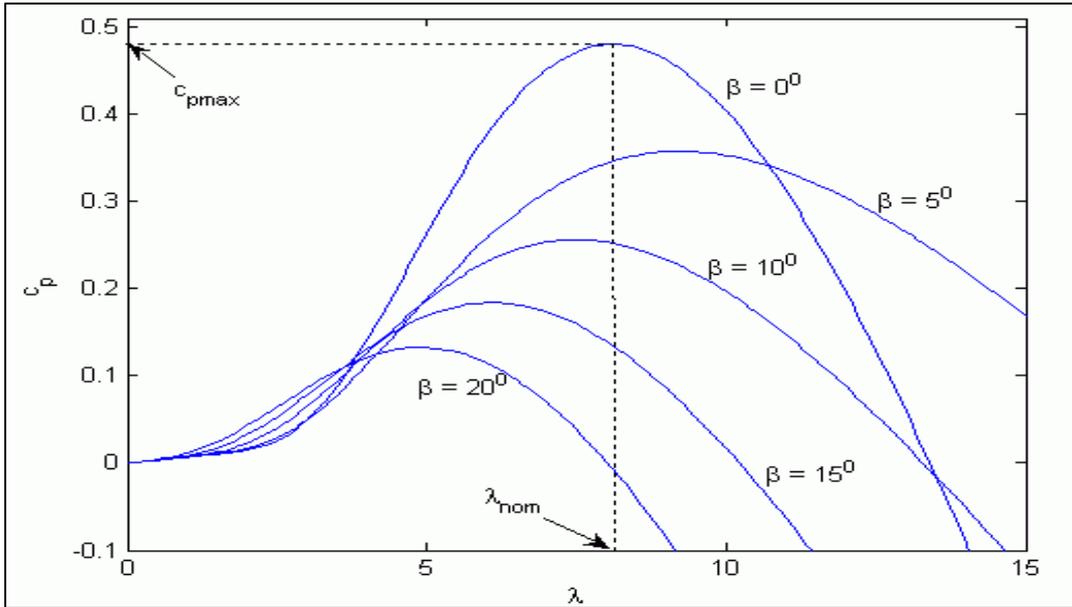
Avec :

$R$  : Rayon des pales de l'éolienne ;

$\Omega_t$  : La vitesse de rotation de l'éolienne ;

$V$  : La vitesse du vent.

On note que ce coefficient de puissance  $C_p$  peut évoluer pour le même type de turbine en fonction du nombre des pales 1, 2, 3 et 4 mais sa valeur reste bien en dessous de la limite de BETZ (0.59). Et pour la même turbine ce coefficient peut varier aussi en fonction de l'angle de calage qui indique le degré d'inclinaison des pales à chaque fois.



**Figure I.7 :** Coefficient de puissance

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient  $\lambda$  varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement) [13].

$$Cp(\lambda, \beta) = 0.44 \left( \frac{125}{\lambda_i} - 6.94 e^{\frac{16.5}{\lambda_i}} \right) \quad (I.12)$$

Avec :

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + \frac{0.002}{\beta^3 + 1}} \quad (I.13)$$

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d’optimiser l’énergie captée par l’éolienne mais demande la mise en œuvre d’un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% [13].

$$Cp(\lambda, \beta) = 0.73 \left( \frac{151}{\lambda} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\frac{-19.4}{\lambda_i}} \quad (I.14)$$

Avec

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} + \frac{0.003}{\beta^3 + 1}} \quad (I.15)$$

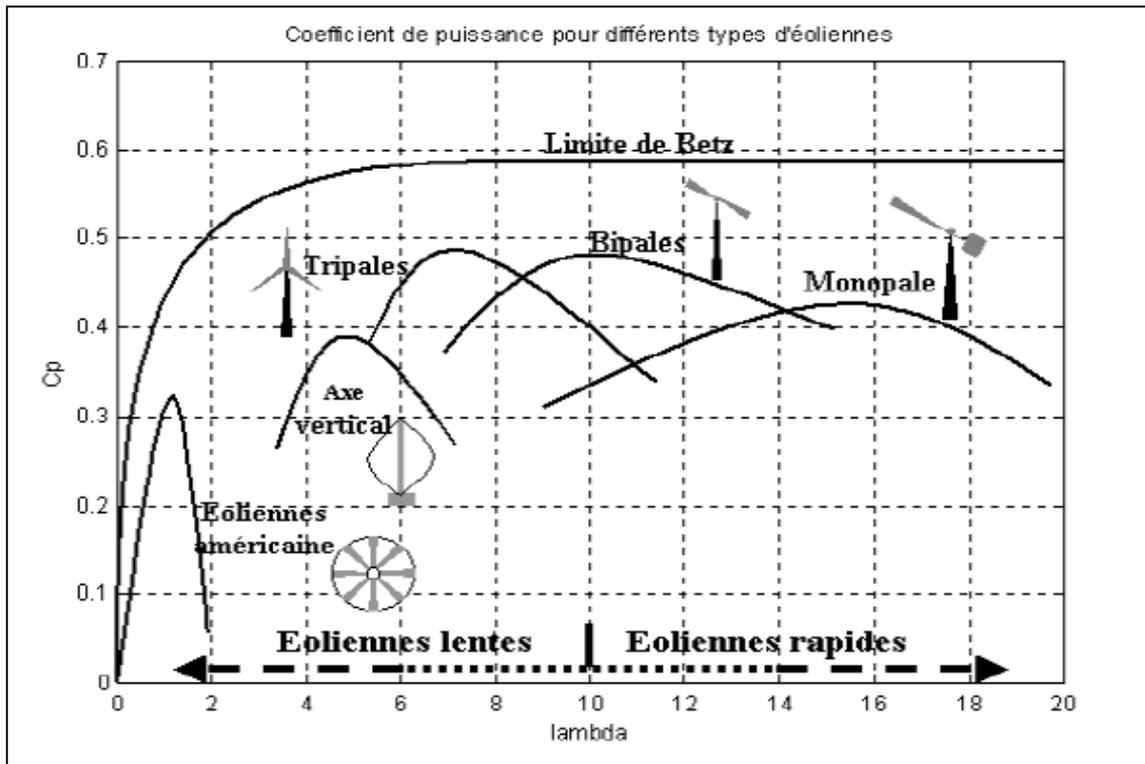


Figure I.8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique  $C_t$  disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\pi}{2\lambda} \rho R^2 V^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{I.16})$$

## I.7 Différents types des aérogénérateurs

En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol, il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement :

- Eolienne à axe vertical.
- Eolienne à axe horizontal.

### I.7.1 Éolienne à axe verticale

L'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation [14].

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus (voir la figure I.9).

- **L'éolienne Savonius** : comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages [14] :

- Elle est simple à fabriquer ;
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.
- **L'éolienne Darrieus** : est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet [14].



**Figure I.9** : Technologies des éoliennes à axe vertical

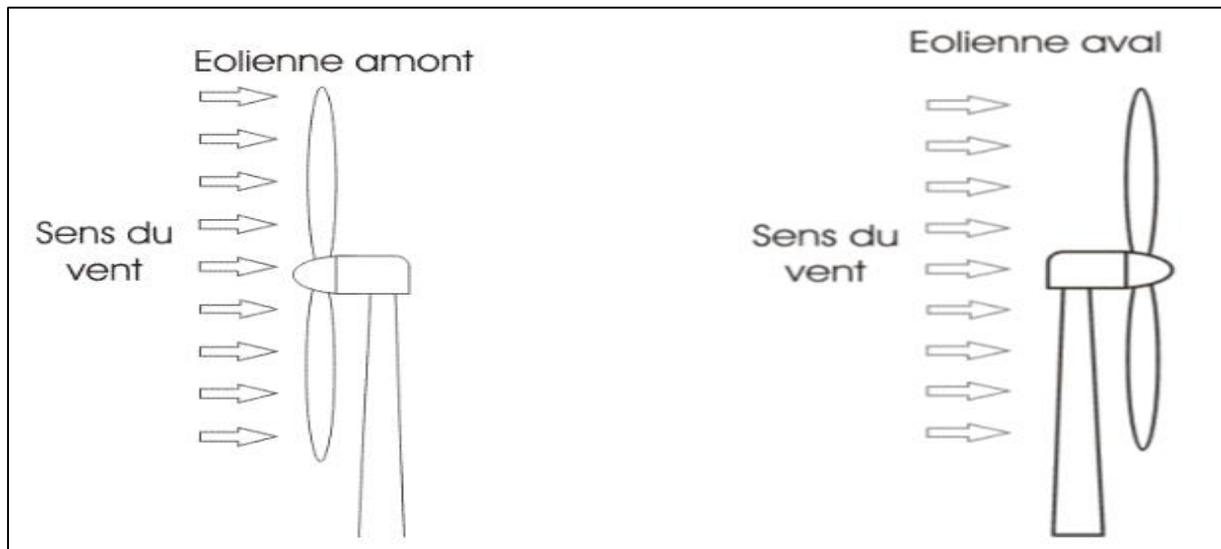
### I.7.2 Éolienne a axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (Figure I.10) [15].

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction [15].

Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle.



**Figure I.10** : Eolienne amont et éolienne aval

## **I.8 Types de générateurs électriques utilisés dans les systèmes éoliens**

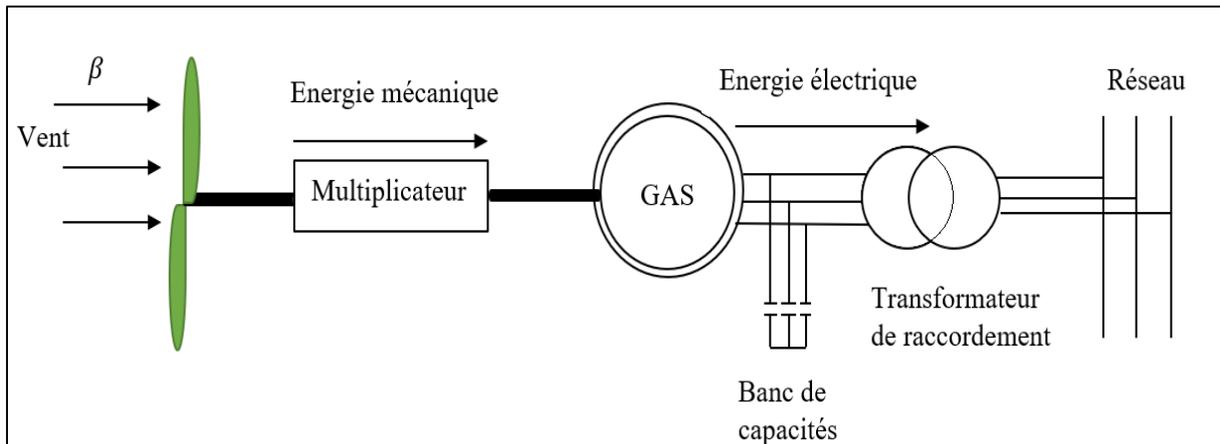
Il existe une grande variété de machines électriques utilisées dans les systèmes aérogénérateurs, pour choisir le type de ce dernier on doit prendre en compte de plusieurs critères à savoir [16] :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge ;
- L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore).

### **I.8.1 Machine asynchrone à cage (MAS)**

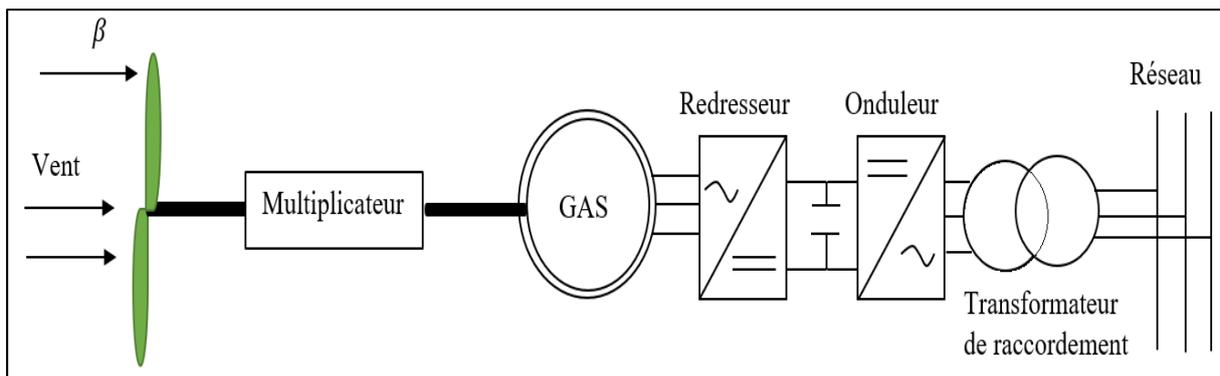
Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles présentent un taux de défaillance très peu élevé et sont moins exigeantes en termes d'entretien.

Ce type de machine peut être directement relié au réseau grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. C'est pour cela toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction (voir la figure I.11) [16].



**Figure I.11** : Eolienne utilisant une machine asynchrone

Pour les aérogénérateurs fonctionnant à vitesse variable, l'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau est obligatoire, malgré son prix élevé, permet de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine (voir la figure I.12) [17].

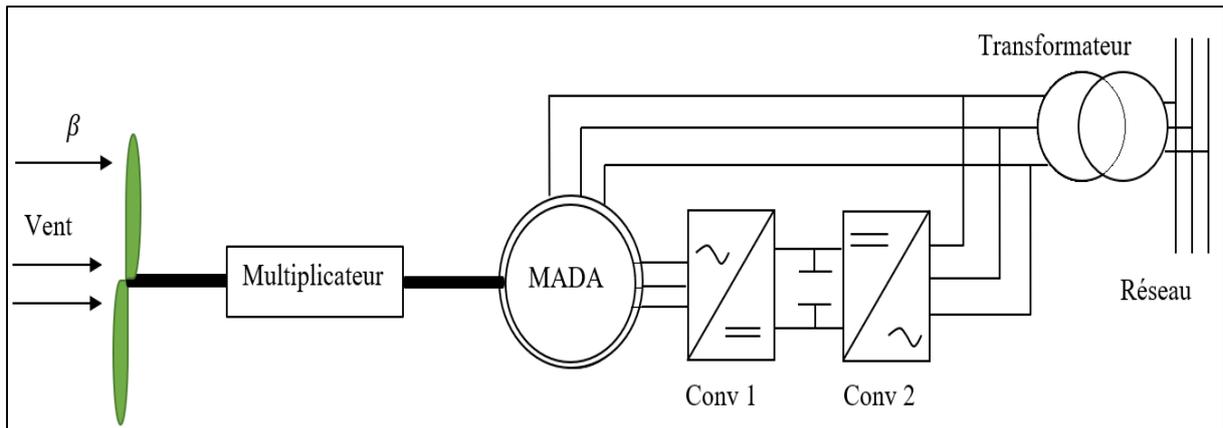


**Figure I.12** : Système éolien à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage

Il est nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur de vitesse car la vitesse de rotation est peu élevée dans les aérogénérateurs à grande puissance et rayon de pales important.

### I.8.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation a la particularité de disposer de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. L'un est relié directement au réseau possédant une tension et une fréquence fixe et transfère la plus grande partie de la puissance alors que l'autre de moindre puissance qui permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance, composé d'un ensemble redresseur/onduleur MLI en cascade, ce dernier est inséré afin de contrôler la vitesse de rotation de la machine [18]. Ces machines nécessitent un multiplicateur de vitesse et leur robustesse est légèrement diminuée à cause de systèmes à bagues et balais, mais le fonctionnement à vitesse variable reste un avantage suffisant (voir la figure I.13).



**Figure I.13 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation

### I.8.3 Machine synchrone

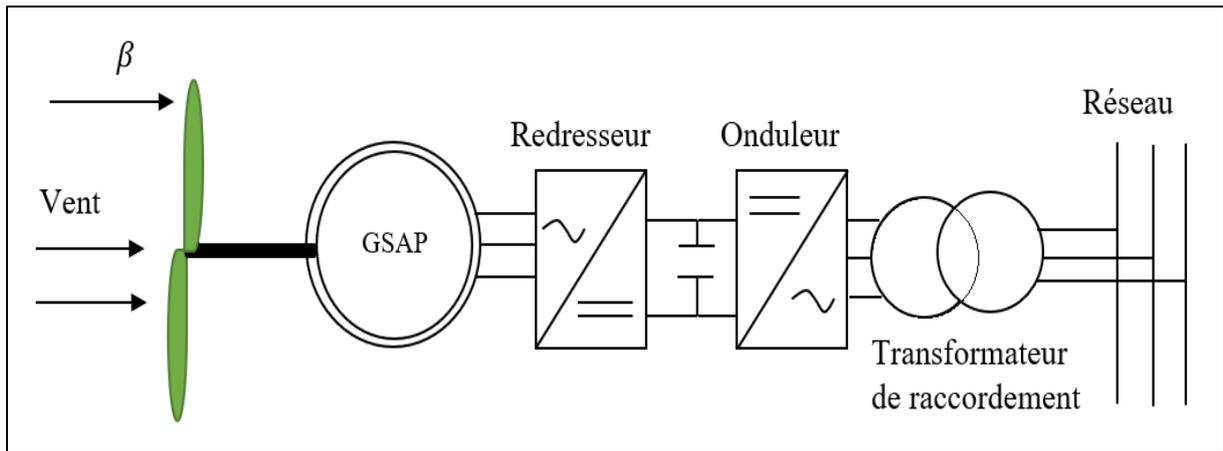
#### a) Machine synchrone à rotor bobiné

Le circuit d'excitation de l'inducteur de la machine synchrone à rotor bobiné demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive et un entretien régulier à cause du système bagues et balais ce qui est un inconvénient [17]. Le fonctionnement direct sans engrenages de la machine synchrone à rotor bobiné multipolaire à vitesse variable implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système [19].

#### b) Machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est la plus performante de toutes les machines électriques. C'est pour cela que la plupart des systèmes éoliens dans la catégorie des petites turbines utilisent les générateurs à aimants permanents et fonctionnent à vitesse variable, vu le facteur de puissance élevé et le bon rendement ainsi que la simplicité de la MSAP grâce au système d'auto excitation basé sur les aimants permanents.

Les génératrices synchrones qui sont généralement utilisées dans les systèmes éoliens sont à structure montées en surface et à structure à aimants encastrés [19]. L'aimantation permanente à plusieurs pôles de cette machine lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit, notamment le système bagues balais et le multiplicateur de vitesse (voir figure I.14). Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible [20].



**Figure I.14** : Système éolien à vitesse variable basé sur MSAP à grand nombre de paires de pôles  
Notre étude se basera sur la machine synchrone à aimant permanent.

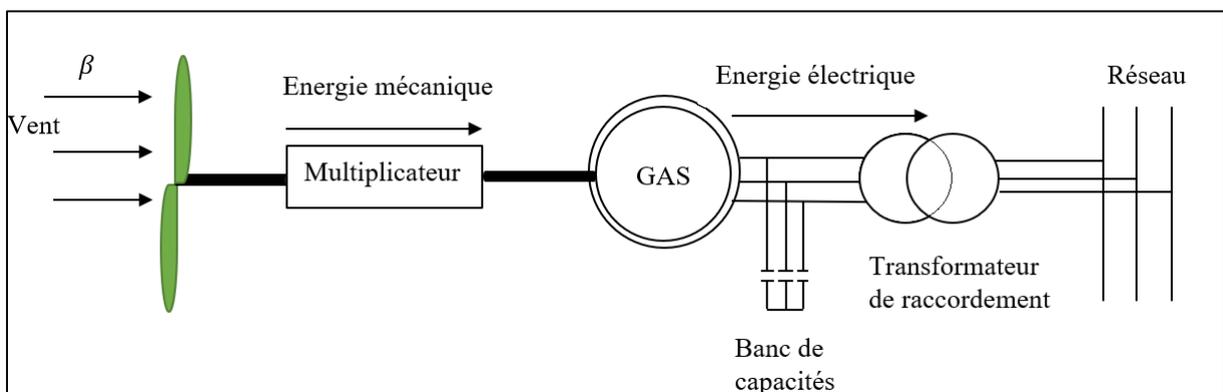
## I.9 Modes de fonctionnement des éoliennes

### I.9.1 Eoliennes à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est imposée par la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice, comme elle peut être couplée à une charge électrique isolée ou enfin peut être couplée à un système de stockage d'énergie (dans des accumulateurs) ou à un réseau autonome [19]. Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales [20].

En conséquence, la puissance générée par cette éolienne peut avoir des caractères très fluctuants, ce qui n'offre pas de possibilité de réglage de la puissance générée par la turbine.

Cependant, cette puissance électrique produite peut être commandée par un système de stockage d'énergie électrique, compensateur synchrone statique (STATCOM). D'autre part, ce type de conversion d'énergie éolienne nécessite l'ajout de bancs de condensateurs de compensation d'énergie réactive afin de limiter la puissance réactive appelée au réseau ou à la charge électrique, un schéma de cette structure est illustré dans la figure (I.15) [19].



**Figure I.15** : Connexion au réseau d'un système à vitesse fixe

**Avantages**

- Système électrique plus simple ;
- Prix modéré et construction robuste ;
- Pas besoin de système électronique ;
- Plus fiable et moins d'entretien.

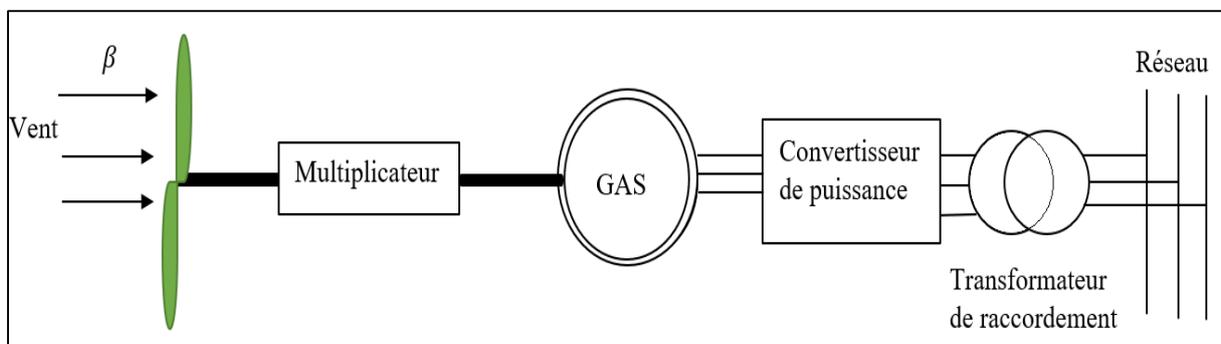
**Inconvénients**

- Puissance générée par la turbine non optimale ;
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone ;
- La connexion directe au réseau électrique d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée ;
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité.

**I.9.2 Eoliennes a vitesse variable**

Les structures à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées permettent d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne pour des vents faibles et moyens et augmente la capacité de production de la machine de 8 % à 15% [19].

Cette technologie nécessite l'électronique de puissance. Ici la vitesse de rotation doit être adaptée par rapport à la vitesse du vent afin de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les efforts mécaniques à vitesse variable du vent (voir figure I.16) [21].



**Figure I.16** : Connexion d'un système à vitesse variable au réseau électrique

**Avantages**

- Optimisation de rendement énergétique ;
- Optimisation de l'énergie captée ;
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.

**Inconvénients**

- Coûts supplémentaires plus importants ;
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.

### I.10 Utilité de la vitesse variable :

Les caractéristiques qui nous donnent la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent comme montrée dans la figure (I.17).

Ces caractéristiques nous montrent clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance (rendement maximum) ne seraient pas exploités. Pour pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il faut ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent [22].

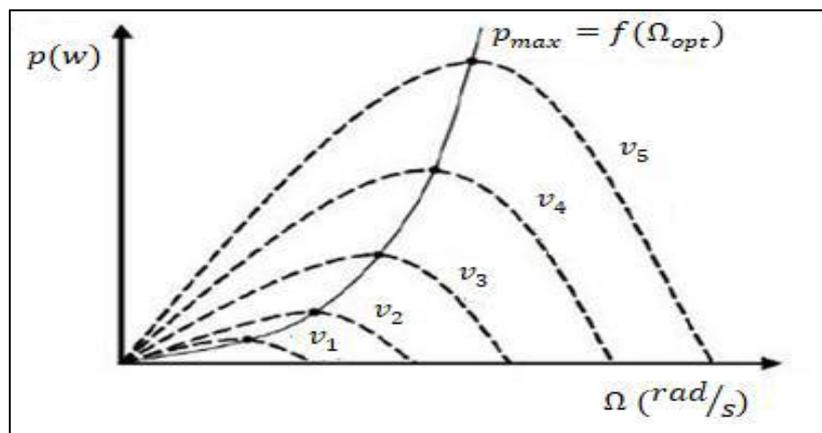


Figure I.17 : Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

### I.11 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. La seconde partie du chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien.

Deux grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machines synchrones. La modélisation de la structure retenue fera l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

## II.1 Introduction

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.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Ce chapitre sera consacré à la modélisation des éléments de la chaîne de conversion constituée d'une turbine éolienne, génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), un redresseur MLI et un onduleur (voir figure II.1).

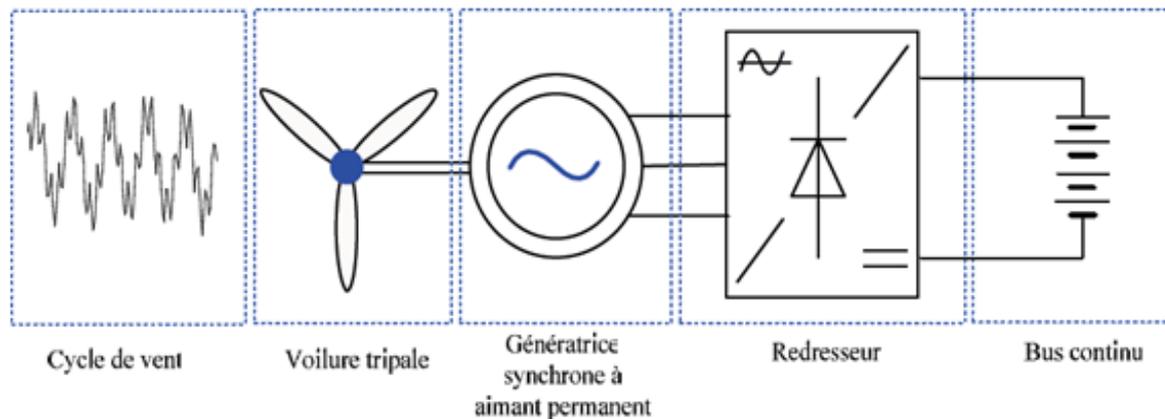


Figure II.1 : Chaîne de conversion d'une éolienne

## II.2 Modélisation du vent

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, évolue au cube de la vitesse de vent.

La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe n'a pas d'importance du point de vue de la voilure éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active.

Les voilures à axes vertical sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours à face du vent), alors le modèle comportemental de vent peut être simplifié considérablement.

La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [23].  $V_v = f(t)$

## II.3 Modélisation de la chaîne de conversion

### II.3.1 Modélisation de la turbine éolienne [1]

Un système éolien classique est constitué d'un aéro-turbine qui transforme de l'énergie de vent en énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  qui permet à la fois de diminuer le couple et augmenter la vitesse de rotation, et d'un générateur électrique convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

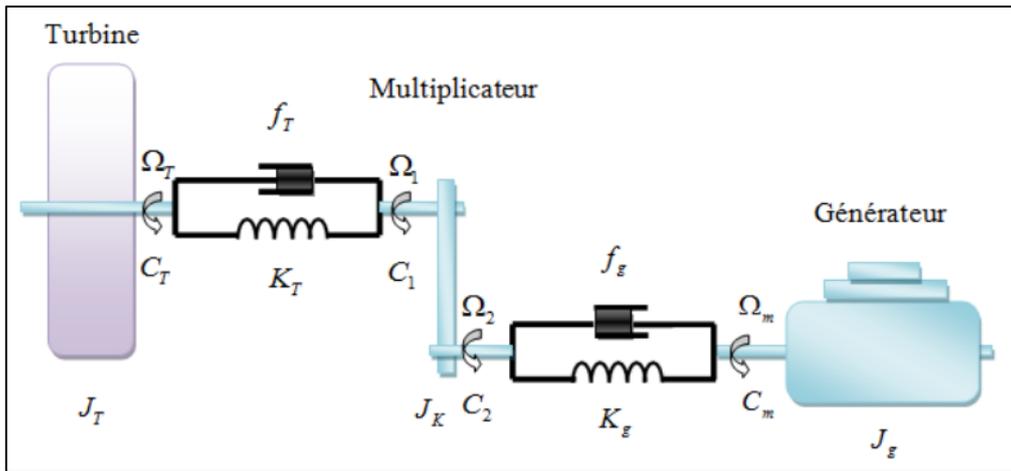


Figure II.2 : Différents parties mécanique de l'éolienne

La puissance du vent captée par les pales est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S V_v^3 \tag{II.1}$$

$\rho$  : Densité de l'air qui est égale à 1.225 Kg/m<sup>2</sup> ;

S= Surface balayé par la turbine ;

$V_v$  : vitesse du vent.

La puissance du vent n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est inférieure à celle du vent, les deux sont liés par l'expression suivante :

$$P_{aero} = C_p(\beta, \lambda) * P_v \tag{II.2}$$

$C_p$ : le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0.593). Le  $C_p$  dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage  $\beta$  et de leur vitesse de rotation.

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{R * \Omega_t}{V_v} \tag{II.3}$$

Avec :

$\Omega_t$  : la vitesse angulaire de la turbine ;

R : le rayon des pales.

Le couple aérodynamique est déterminé par la relation suivante :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_t} \tag{II.4}$$

### I.3.2 Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [24] :

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.5})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$G$  : Rapport de multiplicateur adaptant la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

$C_{méc}$  : Couple mécanique ;

$\Omega_{méc}$  : vitesse de la génératrice (rad/s).

### II.3.3 Équation dynamique de l'arbre [23]

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_t$  comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [26].

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_{méc} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$J_t$  : inertie de la turbine ;

$J_{méc}$  : inertie de la génératrice.

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

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{méc} - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.8})$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux  $f$ , tel que :

$$C_{vis} = f\Omega_{méc} \quad (\text{II.9})$$

$C_{méc}$  : le couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne ;

$C_{em}$ : le couple électromagnétique ;

$C_{vis}$ : Le couple des frottements visqueux (N.m) ;

$f$ : coefficient de frottement visqueux.

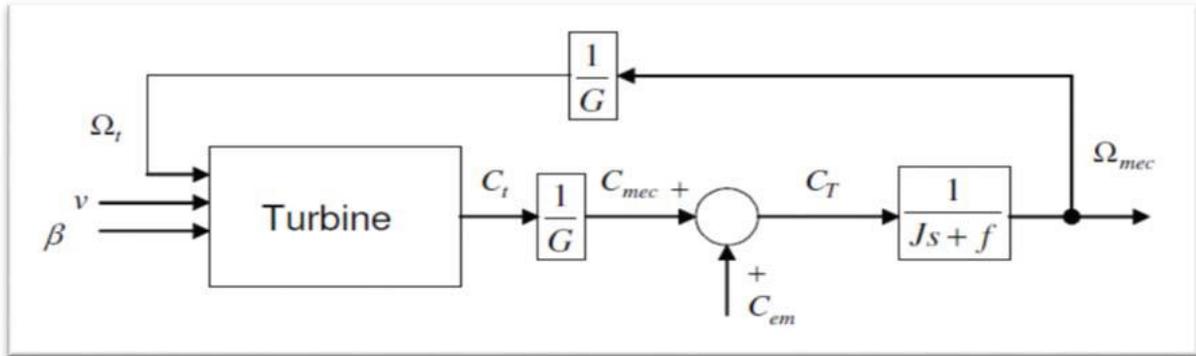


Figure II.3 : Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne

## II.4 Extraction du maximum de la puissance

La caractéristique puissance / vitesse d'une turbine éolienne est non linéaire ce qui mène à un couplage non parfait entre le générateur et la turbine. Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

### II.4.1 MPPT de la turbine éolienne

Le dispositif de commande dans ce cas doit imposer un couple de référence de manière à permettre à la GSAP de tourner à une vitesse réglable afin d'assurer un point de fonctionnement optimal en termes d'extraction de puissance. Dans ce contexte, le ratio de la vitesse de l'éolienne  $\lambda$  doit être maintenu à sa valeur optimale ( $\lambda = \lambda_{opt}$ ) sur une certaine plage de vitesse de vent. Ainsi, le coefficient de puissance serait maintenu à sa valeur maximale ( $C_p = C_{p\_max}$ ). La valeur de la vitesse spécifique est définie comme étant [26] :

$$V = \frac{\Omega_t R}{\lambda} \quad (\text{II.10})$$

Nous remplaçons l'expression (III.10) dans l'équation de la puissance extraite de l'éolienne :

$$P_t = \frac{1}{2} \frac{\rho C_p(\lambda, \beta) S R^3}{\lambda^3} \Omega_t^3 \quad (\text{II.11})$$

Le couple de la turbine est donné par :

$$C_t = \frac{1}{2} \frac{\rho C_p(\lambda, \beta) S R^3}{\lambda^3} \Omega_t^2 \quad (\text{II.12})$$

En se plaçant dans les conditions d'exploitation optimale de l'éolienne, c'est-à-dire  $\lambda = \lambda_{opt}$  le rapport en vitesse angulaire et couple pour avoir le maximum de la puissance est donné par la relation :

$$C_{t_{opt}} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \tag{II.13}$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho C_{p_{max}} \pi R^3}{\lambda_{opt}^3} \tag{II.14}$$

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent.

On constate que sur le point de fonctionnement optimal, le couple aérodynamique est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de l'éolienne [26].

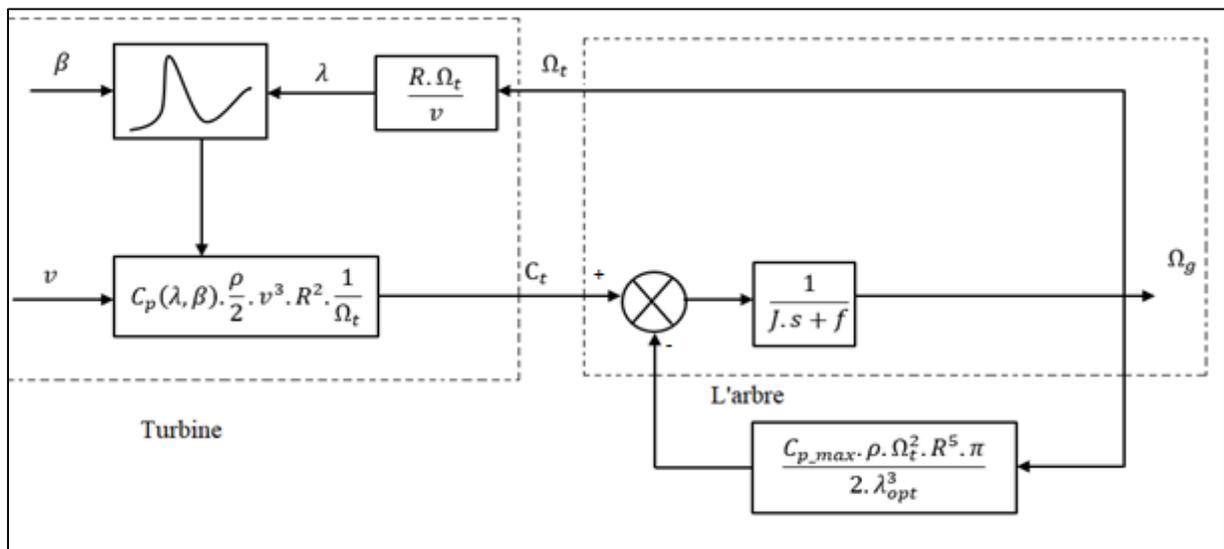


Figure II.4 : MPPT de la machine éolienne

## II.5 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

### II.5.1 La machine synchrone à aimant permanent

L'ensemble des génératrices (ou moteurs) triphasés utilisent un champs magnétique tournant. Si l'on dit que le moteur est synchrone, c'est parce que l'aimant au centre tourne à une vitesse constante qui est synchrone avec la rotation du champ magnétique.

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs [13].

### II.5.2 Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la (MSAP) obéit à certaines hypothèses simplificatrices :

- L'absence de la saturation dans le circuit magnétique ;

- La distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice (fmm), créée par les enroulements du stator ;
- L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligé ;
- L'effet des encoches est négligé ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation es créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air [27].

### II.5.3 Mises en équation électrique et magnétique dans le repaire abc

Le schéma représentatif de la machine à modéliser est donné par la figure (II.4).

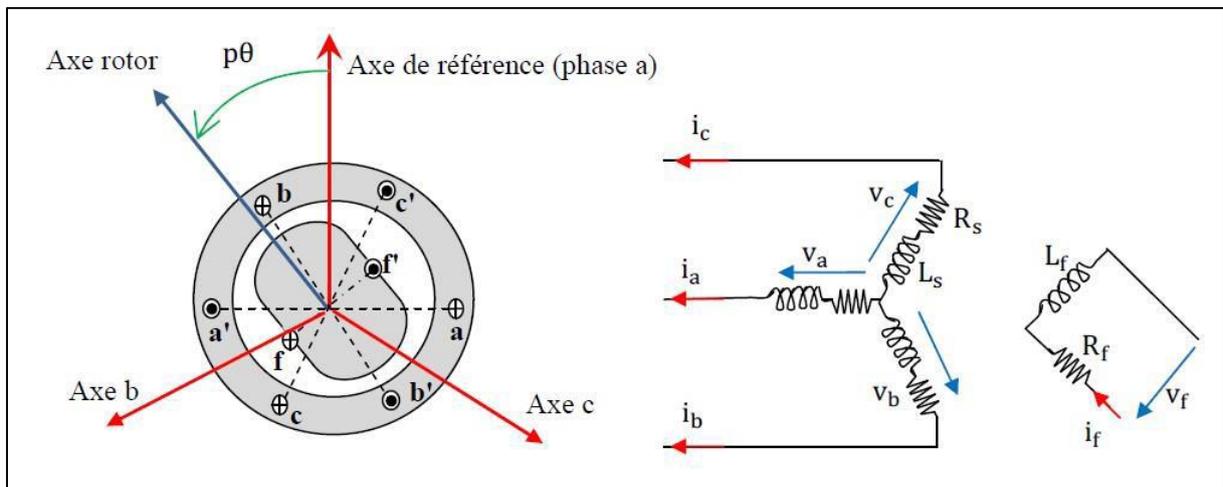


Figure II.5 : Représentation symbolique de la MSAP dans le repaire ABC

#### • Equation électrique [13]

D'après la loi d'Ohm, les expressions des tensions simples aux bornes des trois phases statoriques a, b, c. de la machine peuvent s'écrire :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] \frac{d}{dt} [\varphi_s] \tag{II.15}$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s \cdot i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_{sb} = R_s \cdot i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_{sc} = R_s \cdot i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \tag{II.16}$$

Où :

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : les tensions des phase statoriques ;

$R_s$  : la résistance des phases statoriques ;

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Les courants des phases statorique ;

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$  : Les flux totaux à travers les enroulements statoriques.

• **Equation magnétique [26]**

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux des aimants permanents, tel que :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f] \quad (\text{II.17})$$

Où :

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + L_{s1}(\theta) \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_0 & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$M_{s0}$  : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;

$L_{s0}$  : Inductance propre d'une phase statorique ;

$[L_{ss}]$  : Matrice des inductances statoriques ;

$[\varphi_f]$  : Flux des aimants permanents.

Et :

$$[L_{s1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$\theta$  : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

On peut réécrire le système (II.15) sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \} \quad (\text{II.21})$$

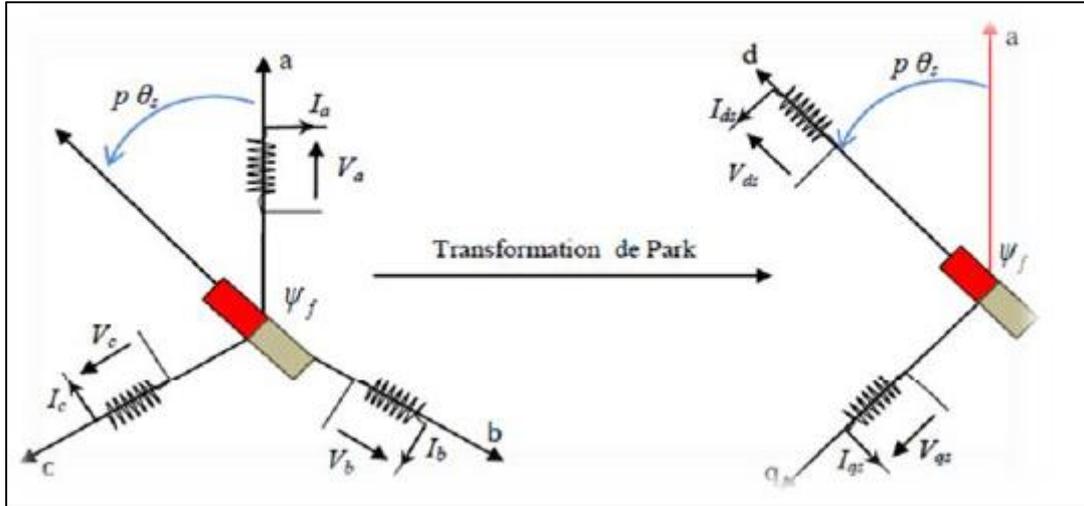
• **Equation mécanique [24]**

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - f\Omega_g \quad (\text{II.22})$$

### II.5.4 Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park (d, q)

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statorique fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor (Figure II.5).



**Figure II.6 :** Représentation d'une MSAP dans le repaire de Park (d, q)

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d ; q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [5].

En réalité, la transformation de Park pour faire un repère diphasé, équivalent du repère triphasé à partir d'un passage défini par la matrice  $[p(\theta_s)]$  reliant les grandeurs des deux domaines (Abc) et (d, q) par l'équation (II.23) [28].

$$X_{dq0} = [P(\theta_s)]X_{abc} \Rightarrow X_{abc} = [P(\theta_s)]^{-1}X_{0dq} \quad (\text{II.23})$$

La matrice de Park est donnée par

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

L'inverse de P(θ) :

$$[P(\theta)^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Le changement de variable effectué, les équations des tensions sont :

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][V_{abc}] \quad (\text{II.26})$$

$$[V_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[V_{dq0}] \quad (\text{II.27})$$

- **Equation électrique [26]**

Les équations statoriques de la MSAP dans le référentiel de Park lié au rotor sont décrites par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - P\Omega_g \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - P\Omega_g \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

- **Equation magnétique [26]**

Les équations de flux magnétiques sont données comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = L_d i_{sd} + \varphi_f \\ V_{sq} = L_q i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Où :

$L_d$  et  $L_q$  : Inductances directe et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de  $\theta$ .

En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (II.28), on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - P\Omega_g L_q i_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + L_d i_{sd} + P\Omega_g \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

### II.5.5 Expression de la puissance et de couple électromagnétique

Selon Park modifié, l'expression de la puissance absorbée s'écrit comme suit :

$$P_a = (V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq}) \quad (\text{II.31})$$

En remplaçant  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  par leur expression (II.30), on obtient

$$P_a(t) = [(R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2))] + \left[ i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \right] + [\varphi_{sd}i_{sq} - \varphi_{sq}i_{sd}] \omega_e \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$\omega_e = P \cdot \Omega_g$  :

W : Pulsation électrique.

Où :

Le premier terme  $R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2)$  : Pertes par effet Joule ;

Le deuxième terme  $\left( i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \right)$  : Variation de l'énergie magnétique emmagasinée ;

Le troisième terme  $(\varphi_{sd}i_{sq} + \varphi_{sq}i_{sd})$  : Puissance électromagnétique.

Donc, on peut écrire :

$$C_{em} = P(L_d - L_q)i_{sd}i_{sq} + P\varphi_f i_{sq} \quad (\text{II.33})$$

Dans les MSAP avec rotor à pôles lisses, les inductances statoriques sur les deux axes d et q sont égales ( $L_d=L_q$ ) et l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = P\varphi_f i_{sq} \quad (\text{II.34})$$

## II.6 Modélisation des convertisseurs statiques

### II.6.2 Redresseur MLI :

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commuté, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée [27].

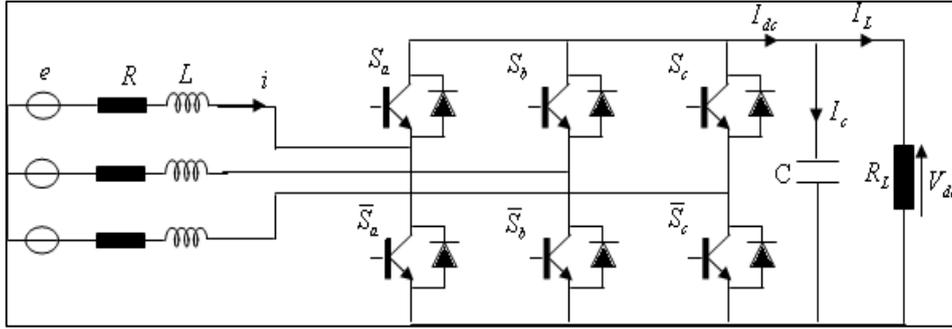


Figure II.7 : Schéma d'un redresseur MLI

Dans l'étude de l'ensemble commande (machine – redresseur – charge), nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine.

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, c'est à dire [29] :

- Résistance nulle à l'état passant.
- Résistance infinie à l'état bloqué.

Réaction instantanée aux signaux de commande [29].

$$S = \begin{cases} +1, \bar{S} = -1 \\ -1, \bar{S} = +1 \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de:  $S_j$ ,  $U_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ .

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II.36})$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} U_{Sab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ U_{Sbc} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ U_{Sca} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L * \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Sa} \\ U_{Sb} \\ U_{Sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} V_{Sa} = \frac{2 \cdot S_a - S_b - S_c}{3} \cdot V_{dc} \\ V_{Sb} = \frac{2 \cdot S_b - S_c - S_a}{3} \cdot V_{dc} \\ V_{Sc} = \frac{2 \cdot S_c - S_a - S_b}{3} \cdot V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$V_{dc}$  : Tension redressée ;

$S_a, S_b, S_c$  : Fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs.

Le courant  $i_{red}$  est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur :

$$i_{red} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{II.40})$$

Avec :

$i_{red}$  : Courant redressé.

### II.6.2 Modèle de l'onduleur de tension

L'onduleur triphasé est un convertisseur statique assure la conversion à partir d'une tension continue à son entrée à des tensions alternatives et de fréquences variables, il est constitué des cellules de commutation généralement à transistor IGBT ou à thyristor GTO pour les grandes puissances [27].

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$  ( $i=a, b, c$ ).

En appelant  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposée des interrupteurs idéaux), on a :

Si  $S_i=+1$ , alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert ;

Si  $S_i=0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant.

Un schéma de l'onduleur est représenté dans la figure (II.7).

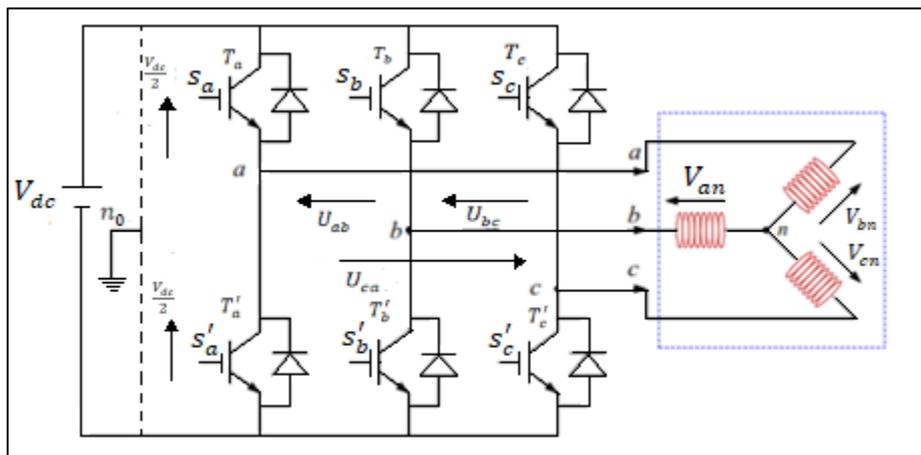


Figure II.8 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé

L'onduleur alimenté par une tension parfaite donne à sa sortie une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs [27].

Soit "n", le point neutre du coté alternatif, alors les trois tensions composées :

Les tensions  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

La charge constituée par la machine est équilibrée ( $V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0$ ), on aura donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\begin{cases} V_{an0} = V_{an} + V_{nn0} \\ V_{bn0} = V_{bn} + V_{nn0} \\ V_{cn0} = V_{cn} + V_{nn0} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

En introduisant le point de référence "n<sub>0</sub>", les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

On peut déduire le potentiel entre les points  $n$  et  $n_0$  :

$$V_{nn0} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II.45})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $S_i$  ( $i=a, b, c$ ), on a :

$$V_{in} = S_i V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} = (S_i - \frac{1}{2})V_{dc} \quad (\text{II.46})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{bn0} = (S_b - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{cn0} = (S_c - \frac{1}{2})V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

En remplaçant (II.45) dans (II.44), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{an0} \\ V_{an0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

En remplaçant l'équation (II.47) dans l'équation (II.48), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

### II.6.3 Modélisation du filtre

L'onduleur est connecté au réseau à travers un filtre (R, L) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau.

Les équations différentielles définissant le filtre sont exprimés par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_t \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

Avec

$V_{a,b,c}$  : Tensions à la sortie de l'onduleur ;

$e_{a,b,c}$  : Tensions du réseau électrique. ;

$R_t, L_t$  : Filtre triphasé.

$i_{1,2,3}$  : Courants injectés au réseau électrique.

Le modèle de la connexion au réseau dans le repère ( $d, q$ ) est obtenu en appliquant la transformée de PARK à l'équation (II.50) :

$$V_q = R_t i_{tq} + L_t \frac{di_{tq}}{dt} - L_t I_{tq} \omega_s + e_q \quad (\text{II.51})$$

$$V_d = R_t i_{td} + L_t \frac{di_{td}}{dt} - L_t I_{td} \omega_s + e_d \quad (\text{II.52})$$

Avec :

$V_q, V_d$  : Composantes de la tension à la sortie de l'onduleur dans le repère ( $dq$ ).

$e_d, e_q$  : Composantes de la tension du réseau dans le repère ( $dq$ ).

$i_{tq}, i_{td}$  : Composantes des courants injectés au réseau dans le repère ( $dq$ ).

## **II.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté au premier lieu la modélisation du vent et les différentes parties d'une chaîne éolienne (turbine, multiplicateur et la MSAP). Cette modélisation nous a permis de présenter le comportement de la machine synchrone à aimant permanent sous forme d'équations (électrique et magnétique).

Dans la deuxième partie nous avons présenté le modèle des convertisseurs statiques (redresseur MLI, l'onduleur et le filtre).

Le prochain chapitre est consacré à la commande par mode glissant et les résultats de simulation.

# Chapitre III : Commande en puissance de l'aérogénérateur

### III.1 Introduction

La technique de commande par modes glissants comme toutes les autres techniques de commande non linéaire a été développées depuis le début des années 80. Cette commande consiste à définir une surface dite de glissement, et une loi de Commande par Mode Glissant (CMG) de manière à conduire et à contraindre le système à rester au voisinage de cette surface dite de "commutation". La CMG s'inscrit dans le cadre de la théorie des systèmes à structure variable qui a pour but l'obtention, en boucle fermée, d'une dynamique largement indépendante de celle du processus et surtout de ses variations paramétriques éventuelles. En ce sens, la commande à structure variable est une commande non linéaire qui possède la propriété de robustesse. Elle est basée sur la commutation autour d'une hyper surface de glissement pour forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de la variété quand l'état est maintenu sur cette hyper surface. Le système se trouve en régime glissant, et sa dynamique est alors insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation et à certaines perturbations extérieures.

Dans ce chapitre nous présentons des notions générales sur les systèmes à structure variables et la conception de la commande non linéaire par mode glissant traiter dans le plan de phase, on présente son application à la MSAP et on interprète les résultats de la simulation.

### III.2 Principe de la commande vectorielle

Le principe du découplage permet de modéliser la machine synchrone comme une machine à courant continu, par application de cette nouvelle technique de commande.

Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique. Le contrôle du couple d'une machine alternative nécessite un contrôle en phase et en amplitude des courants d'alimentation d'où le nom de contrôle vectoriel. Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparé, il est nécessaire de maintenir le courant  $I_d$  nul et de régler la vitesse ou la position par le courant  $I_q$  via la tension  $V_q$  [23].

Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation.

La forme du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = P\varphi_{sf}i_q \quad (\text{III.1})$$

Comme le flux est constant, le couple est directement proportionnel à  $i_q$ , d'où la représentation suivante :

$$C_{em} = k_t i_q \quad (\text{III.2})$$

Avec

$$k_t = P\varphi_{sf} \quad (\text{III.3})$$

La commande vectorielle sert à contrôler les courants statorique  $i_d$  et  $i_q$  en imposant les tensions  $V_d$  et  $V_q$  qui conviennent pour imposer ces tensions il suffit d'imposer les tensions de référence  $V_{qref}$  et  $V_{dref}$  à l'entrée de l'onduleur à l'aide des régulateurs [30].

### III.3 Commande vectorielle de la MSAP [30]

Il existe deux méthodes distinctes pour contrôler le courant :

- L'une ne nécessite pas la connaissance du modèle électrique de la machine et consiste à imposer directement les courants de phase dans une bande autour des courants de référence, c'est la méthode de contrôle par des régulateurs à hystérésis.
- L'autre méthode exige la connaissance du modèle de la machine et permet en fonction de l'erreur des courants de phase par rapport à leurs références de déterminer les références des tensions qui seront imposées aux bornes de la machine grâce à un onduleur de tension commandé en modulation de largeur d'impulsion (M.L.I).

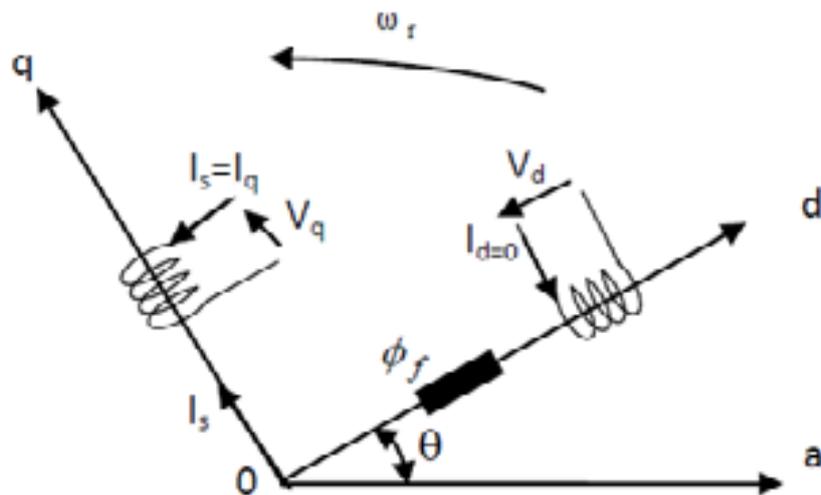
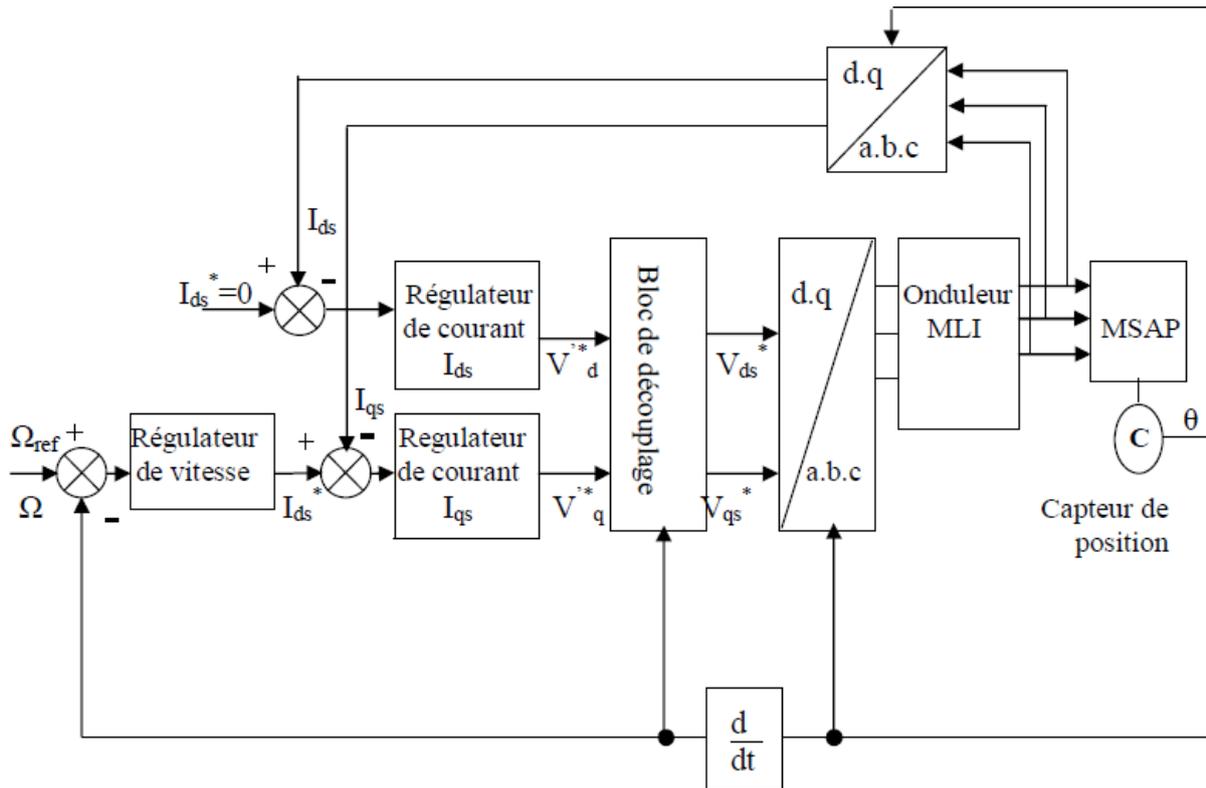


Figure III.1 : Principe de la commande vectoriel

### III.4 Modèle de la MSAP par orientation flux

La commande vectorielle porte en général sur des machines alimentées en tension et régulées en courant sur les axes d et q. Cette topologie permet une meilleure dynamique dans la commande du couple tout en évitant les inconvénients d'une alimentation en courant [31].



**Figure III.2** : Schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandé par l'orientation du flux

### III.5 Théorie de la commande par mode de glissement

Les lois de commande classique de type PID donnent de bons résultats dans le cas des systèmes linéaire à paramètre constants. Pour des systèmes non linéaires, ces lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles ne sont pas robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autre caractéristiques dynamique du système sont strictes.

La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue. Ce type de commande (CSV) présente plusieurs avantages tel que robustesse, précision importante, stabilité, simplicité et temps de réponse faible. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont les modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identification des paramètres, soit à cause de simplification sur le modèle du système.

#### III.5.1 Système à structure variable

Dans Les systèmes à structures variables avec mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface (hyperplan). Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface [32].

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes :

##### ❖ Mode de convergence

C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de Commutation  $s(x, y) = 0$ . Ce mode est caractérisé par la loi de commande et Le critère de convergence.

### ❖ Mode de glissement

C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de Glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est Caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x, y) = 0$ .

### ❖ Mode de régime permanent

Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour du point d'équilibre (origine du plan de phase), il caractérise par la qualité et les performances de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non Linéaires.

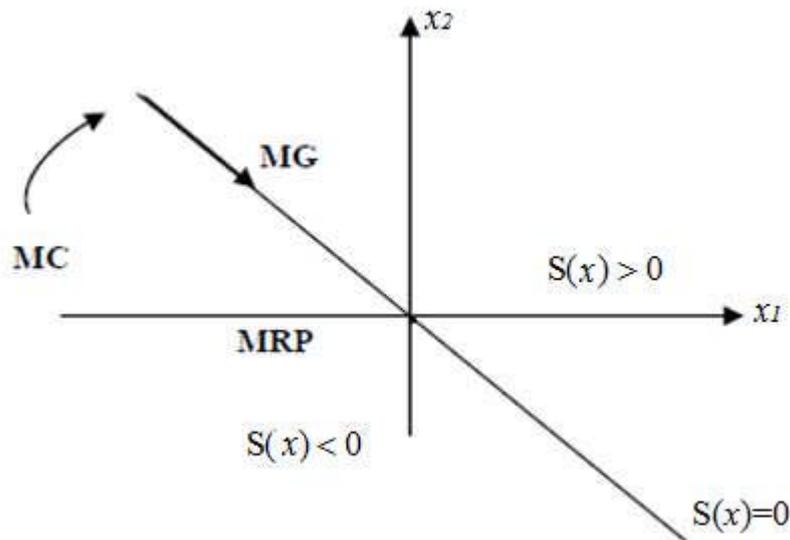


Figure III.3 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

### III.5.2 Conception de la commande par mode glissant

La structure de ce contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle. La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes complémentaires définies par [33] :

- Choix de la surface.
- L'établissement des conditions d'existence.
- Détermination de la loi de commande.

### III.6 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme des fonctions nécessaires. Ces deux facteurs dépendent de l'application et de l'objectif visé.

Pour un système linéaire de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler sur cette surface est tend vers l'origine du plan de phase.

La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler  $x$ , elle peut être donner par :

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.4})$$

$e(x)$  : est l'écart entre la variable à régler et la référence.

$\lambda$  : est une constante positif.

$r$  : est un degré relatif, il présente le nombre de fois qu'il faut dérivée la surface pour faire apparaitre la commande.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$  pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence [33].

### III.7 Conditions de convergence et d'existence [33]

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques de converger vers la surface de glissement est d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence :

#### a. La fonction de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est proposée et étudiée par EMILIANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 & \text{si } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 & \text{si } S(x) > 0 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Cette condition peut être formulée comme suit :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (\text{III.6})$$

#### b. La fonction de Lyapunov :

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive  $V(x) > 0$  pour les variables d'état du système. La loi de commande doit être décroître cette fonction  $\dot{V}(x) < 0$ . L'idée est de choisir une fonction scalaire  $s(x)$  pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa

valeur de référence et de concevoir une commande  $U$  tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov.

Nous définissant la fonction de Lyapunov comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (\text{III.7})$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad (\text{III.8})$$

Pour que la fonction  $V(x)$  puisse décroître, il suffit d'assurer que la dérivée soit négative. Ceci n'est vérifiée que si la condition (III.6) Est vérifiée l'équation (III.7) Explique que la carre de la distance entre un point donne du plan de phase et la surface de glissement exprime par  $S^2(x)$  diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal ou la fréquence de commutation est infinie [33].

### III.8 Déterminations de loi de commande

La structure d'un contrôleur en mode glissant comporte deux parties. La première partie concerne la linéarisation exacte et la deuxième est stabilisation. Cette dernière est très importante dans le réglage par le mode glissant. Elle permet d'éliminer les effets d'imprécision du modèle et de rejeter les perturbations extérieures [33].

$$U = U_q + U_n \quad (\text{III.9})$$

#### a. La commande équivalente

Soit un système linéaire, décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BU(t) \quad (\text{III.10})$$

Un vecteur de commande équivalent  $U_{eq}$  se définit comme étant les équations du régime glissant idéal. On exprime la condition pour l'obtention de la commande équivalente comme :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{III.11})$$

En remplace (III.9), (III.10) dans (III.11), on trouve :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} (Ax + BU_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} BU_n \tag{III.12}$$

Durant du mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle et par conséquent sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles, d'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = - \left( \frac{\partial S}{\partial x} B \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} A \tag{III.13}$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie faut que  $\left( \frac{\partial S}{\partial x} B \neq 0 \right)$

La commande équivalente est interprétée physiquement comme étant une fonction continue représentant la moyenne des commutations successives de "U" entre "U<sub>max</sub>" et "U<sub>min</sub>" d'où la condition [33] :

$$U_{min} \leq U_{eq} \leq U_{max} \tag{III.14}$$

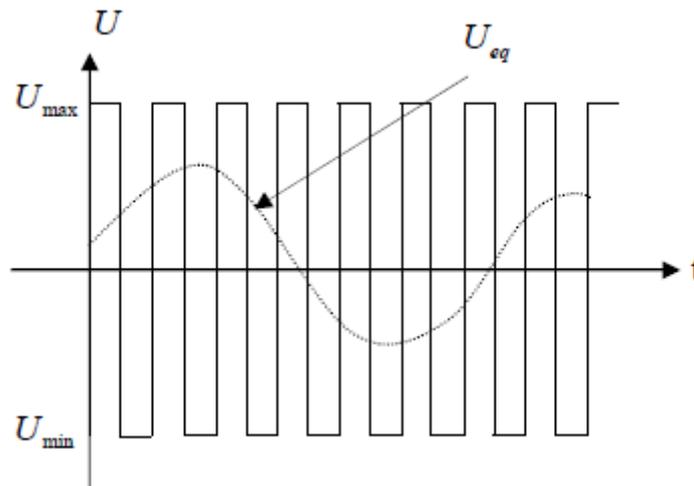


Figure III.4 : Commande équivalente et commande réel U<sub>eq</sub>

**b. La commande commettante**

Il y a plusieurs formes de la commande commettante :

- **La commande discontinue**

Plusieurs choix de commande discontinue U<sub>n</sub> peuvent être faits. Le plus simple consiste à exprimer la commande discontinue U<sub>n</sub> = [U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, U<sub>m</sub>] avec la fonction signe par rapport à S = [S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>] est :

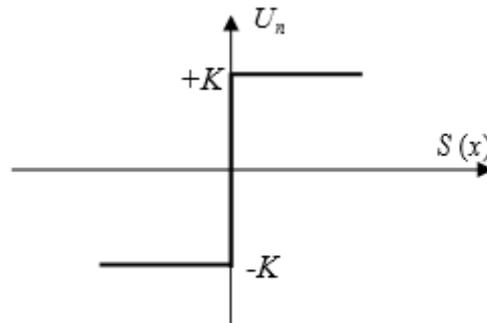
$$sign(S(x, t)) = \begin{cases} +1 & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases} \tag{III.15}$$

$U_n$  : s'exprime donc comme :

$$U_n = -K \cdot \text{sign}(s) \quad (\text{III.16})$$

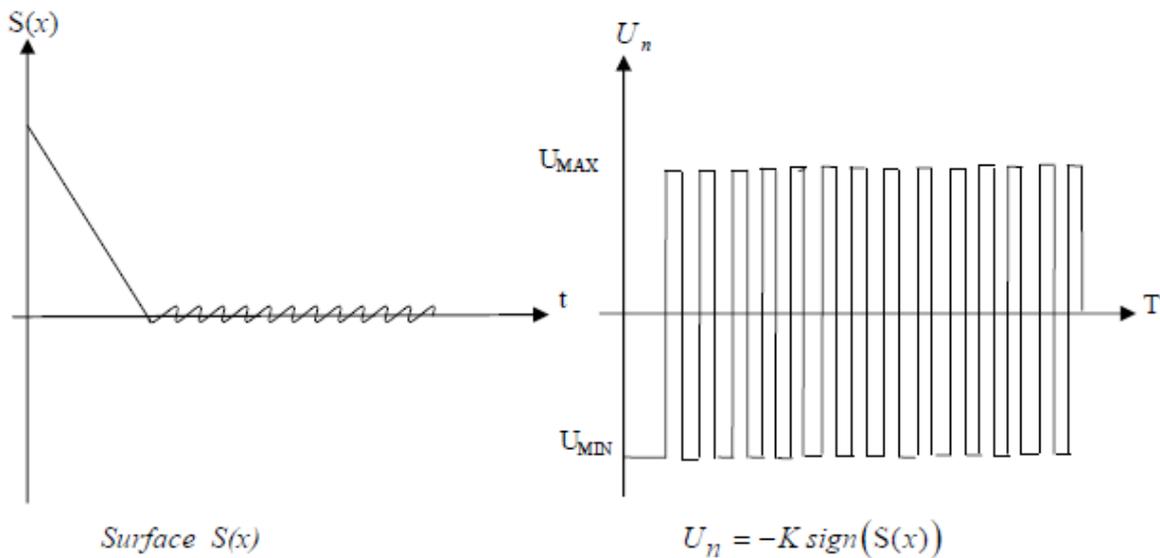
Où  $K$  est un gain positif.

Ce premier choix de la fonction discontinue est représenté sur la figure III.5



**Figure III.5 :** Commande discontinue

Si le gain  $K$  est très petit. Le temps de réponse sera long, si le  $K$  est très grand, le temps de réponse sera rapide mais des oscillations indésirables risquent d'apparaître (couramment appelées Chattering) sur les réponses en régime permanent.



**Figure III.6 :** Surface de glissement et la commande discontinue

Dans le but de réduire les oscillation haute fréquence (indésirables sur les réponses), nous allons présenter quelques solutions classiques qui consiste à imposer une variation de la valeur de la commande  $U_{eq}$  en fonction de la distance entre la variable d'état et la surface de glissement. Certaines de ces méthodes introduisent une commande continue dans une bande de la surface.

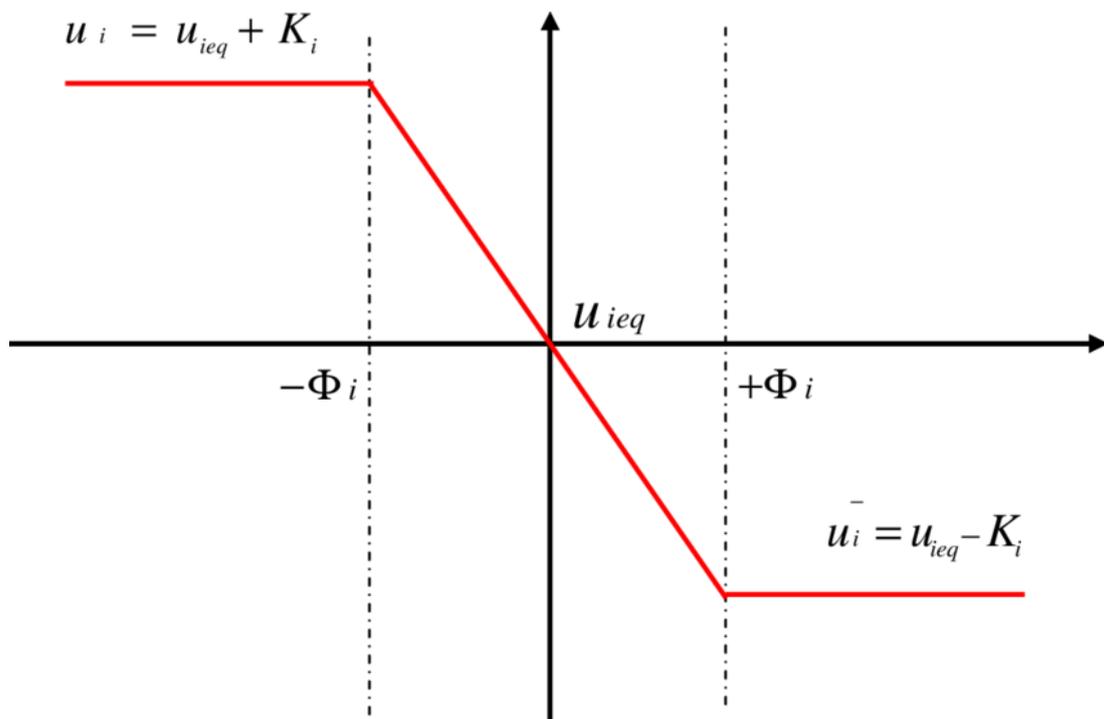
- **Commande continue dans une bande de la surface**

La solution proposée par Slotine consiste à remplacer la loi de commande discontinue par une loi continue en  $x$  à l'extérieur d'une bande fine située au voisinage de la surface de glissement, la discontinuité étant conservée à l'intérieur de cette bande. On choisit pour la composante haute fréquence :

$$U_i = U_{ieq} + U_{in} ; \quad U_{in} = K_i \text{Sat}\left(\frac{S_i}{\varphi_i}\right) \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$\text{Sat}\left(\frac{S_i}{\varphi_i}\right) = \begin{cases} \frac{S_i}{\varphi_i} & |S_i| \leq \varphi_i \\ \text{sign}(S_i) & |S_i| > \varphi_i \end{cases} \quad (\text{III.18})$$



**Figure III.7** : Loi de commande par bande continue au voisinage de la surface de glissement

### III.9 Application de la commande mode glissant à l'MSAP

On reprend le modèle du moteur synchrone à aimants permanents s'exprime sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{I}_d = -\frac{R_s}{L_d} I_d - \frac{L_q}{L_d} p\Omega I_q + \frac{1}{L_d} V_d \\ \dot{I}_q = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{L_d}{L_q} p\Omega I_d - P \frac{\varphi_f}{L_q} \Omega + \frac{1}{L_q} V_q \\ J\dot{\Omega} = C_e - C_r - f \cdot \Omega \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Synthèse de la commande par mode glissant :

On prend les surfaces suivantes :

$$\begin{cases} S(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega \\ S(I_d) = I_{ref} - I_d \\ S(I_q) = I_{ref} - I_q \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

### III.9.1 Régulateur de vitesse

La surface de la vitesse est définie par :

$$\dot{S}(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega \quad (\text{III.21})$$

Durant le régime permanent :

$$S(\Omega) = 0 \text{ et } \dot{S}(\Omega) = 0 \quad (\text{III.22})$$

On déduit :  $I_{qn}=0$

$$S(\Omega) = 0 \rightarrow I_{qeq} = \frac{f \cdot \Omega + C_r}{P \cdot [\varphi_{sd} - (L_d - L_q)I_d]} \quad (\text{III.23})$$

Le produit de la surface par son dérivé dans le mode glissant doit être inférieur à zéro. Cela pour vérifier la condition de Lyapunov :

$$\lim_{s \rightarrow 0} S(\Omega) \cdot \dot{S}(\Omega) < 0 \quad (\text{III.24})$$

Le contrôle du courant  $I_q$  est définie par :

$$I_{qref} = I_{qeq} + I_{qn} \quad (\text{III.25})$$

En substituant l'expression de la commande équivalente (III.22) dans (III.23), la dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{S}(\Omega) = -\frac{P}{J} [\varphi_{sf} - (L_d - L_q)I_d] I_{qn} \quad (\text{III.26})$$

Avec :

$$I_{qn} = K_v \cdot \text{sign}(S(\Omega)) \quad (\text{III.27})$$

### III.9.2 Régulateur de courant direct $I_d$

La surface du courant  $I_d$  est défini par :

$$\dot{S}(I_d) = I_{dref} - I_d \quad (\text{III.28})$$

La dérivée de surface est donnée par :

$$S(\dot{I}_d) = I_{dref} + \frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} p \Omega I_q - \frac{1}{L_d} U_d \quad (\text{III.29})$$

La tension de commande  $U_{dref}$  est définie par :

$$V_{dref} = V_{deq} + V_{dn} \quad (\text{III.30})$$

$$V_{deq} = R_s \cdot I_d - P \cdot L_q \cdot I_q \cdot \Omega \quad (\text{III.31})$$

### III.9.3 Régulateur de courant quadratique $I_q$

La surface du courant  $I_q$  est défini par :

$$S(I_q) = I_{qref} - I_q \quad (\text{III.32})$$

La dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{S}(I_q) = \frac{L_d \Omega P}{L_q} I_d + \frac{R_s}{L_q} I_q + \frac{V_q}{L_q} + \frac{P \Omega \varphi_{sf}}{L_q} \quad (\text{III.33})$$

La tension de la commande  $V_{qref}$  est définie par :

$$V_{qref} = V_{qeq} + V_{qn} \quad (\text{III.34})$$

On obtient :

$$\dot{S}(I_q) = \frac{L_d \Omega P}{L_q} I_d + \frac{R_s}{L_q} I_q + \frac{V_{qeq}}{L_q} + \frac{V_{qn}}{L_q} + \frac{P \Omega \varphi_{sf}}{L_q} \quad (\text{III.35})$$

En régime permanent, nous avons :

$$S(I_q) = 0 \quad \text{alors} \quad \dot{S}(I_q) = 0 \quad (\text{III.36})$$

Avec :

$$V_{qn} = 0$$

On obtient :

$$V_{qeq} = R_s \cdot I_q + P \cdot \Omega [\varphi_{sf} + L_d \cdot I_d] \quad (\text{III.37})$$

Et :

$$V_{qn} = K_q \text{sign}(S(I_q)) \quad (\text{III.38})$$

D'où l'expression de  $V_{qc}$  :

$$V_{qc} = V_{qeq} + V_{qn} \quad (\text{III.39})$$

La stabilité du système nécessite de vérifier que le produit de la surface et sa dérivée inférieure ou égale à zéro. Afin d'assurer cette condition, les paramètres  $K_\Omega$ ,  $K_d$ ,  $K_q$  sont toujours positifs [33].

Ces paramètres sont choisis de façon à :

- Assurer la rapidité de la convergence ;
- Imposer la dynamique en mode de convergence et de glissement ;
- Limiter le courant à une valeur admissible pour un couple maximal. Dans le régime permanent, on a :

$$\dot{I}_d = 0 \quad \dot{I}_q = 0 \quad \dot{\Omega} = 0 \quad (\text{III.40})$$

En remplaçant (III.40) dans (III.19), on obtient :

$$\begin{cases} -R_s \cdot I_d + \omega L_q I_q + V_d = 0 \\ -R_s \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d + V_q - \omega \cdot \varphi_{sf} \\ C_e - C_r = f \cdot \Omega \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

Les conditions d'existence du mode de glissement sont donc :

$$\begin{aligned} K_\Omega &\geq \left| \frac{1}{P\varphi_{sf}} (-f \cdot \Omega - C_r) \right| \\ K_d &\geq |-R_s I_d + \omega \cdot L_q \cdot I_q| \\ K_q &\geq |-R_s I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d - \omega \cdot \varphi_{sf}| \end{aligned} \quad (\text{III.42})$$

### III.10 Résultats de simulation et interprétations

Les résultats de simulation de la chaine obtenue sont résumés sur les figures (III.8), (III.9), (III.10), (III.11), (III.12), (III.13), (III.14), (III.15), (III.16), (III.17).

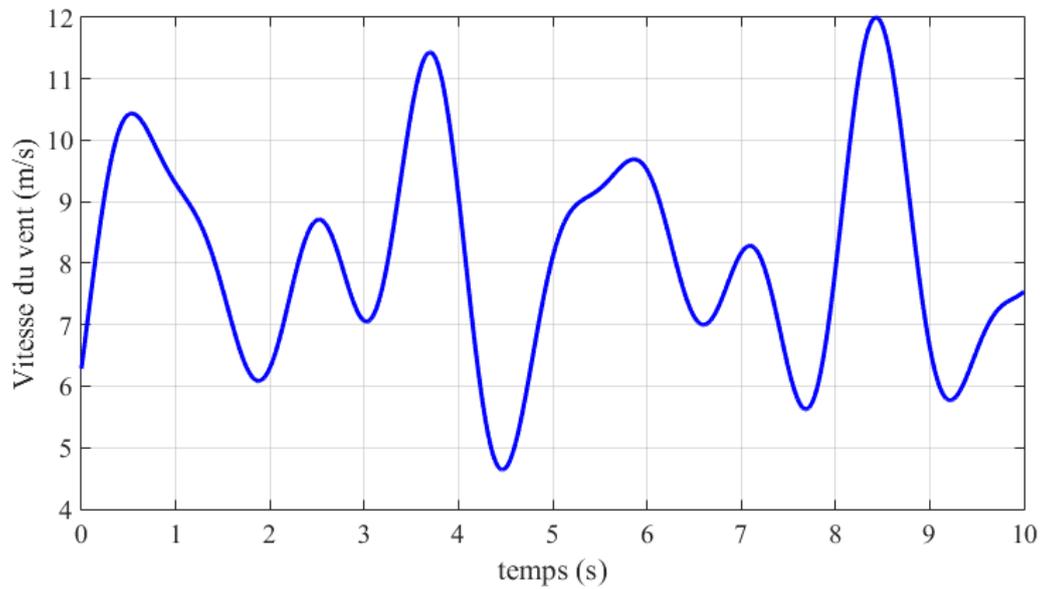


Figure III.8 : Profile du VENT

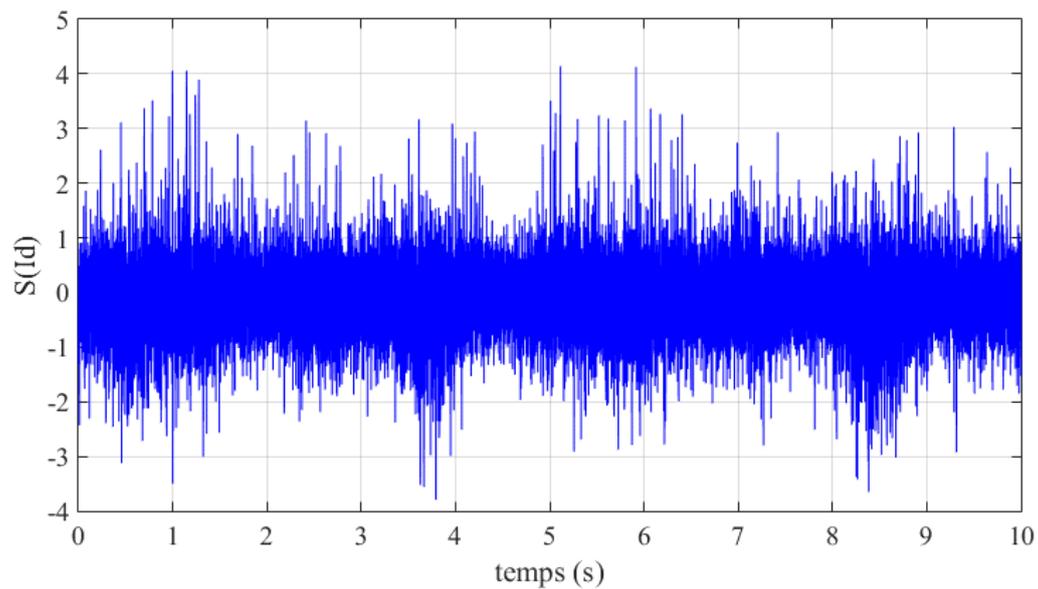


Figure III.9 : La surface de courant  $I_a$

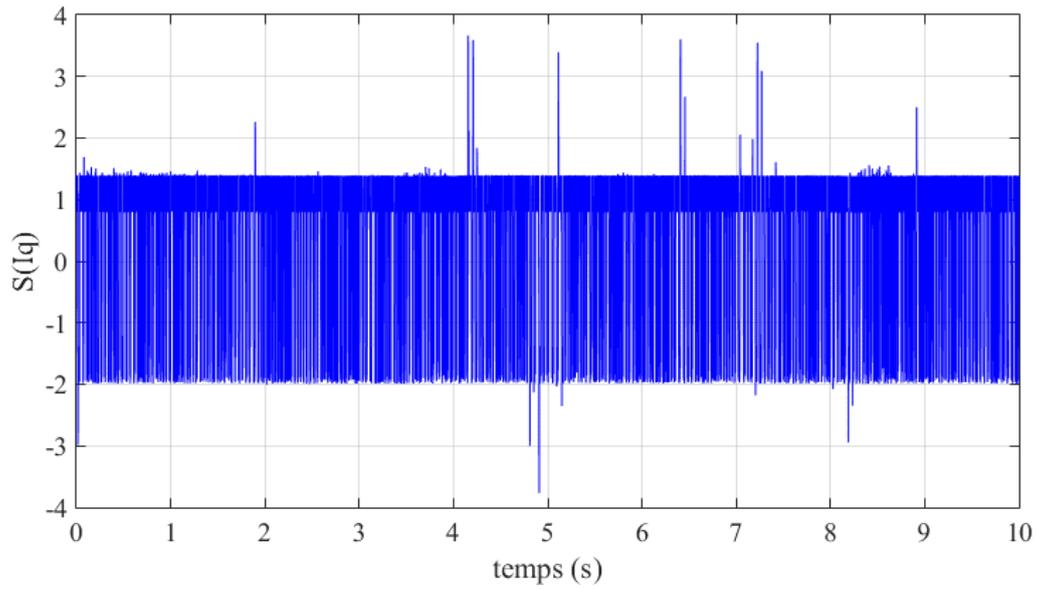


Figure III.10 : La surface de courant  $I_q$

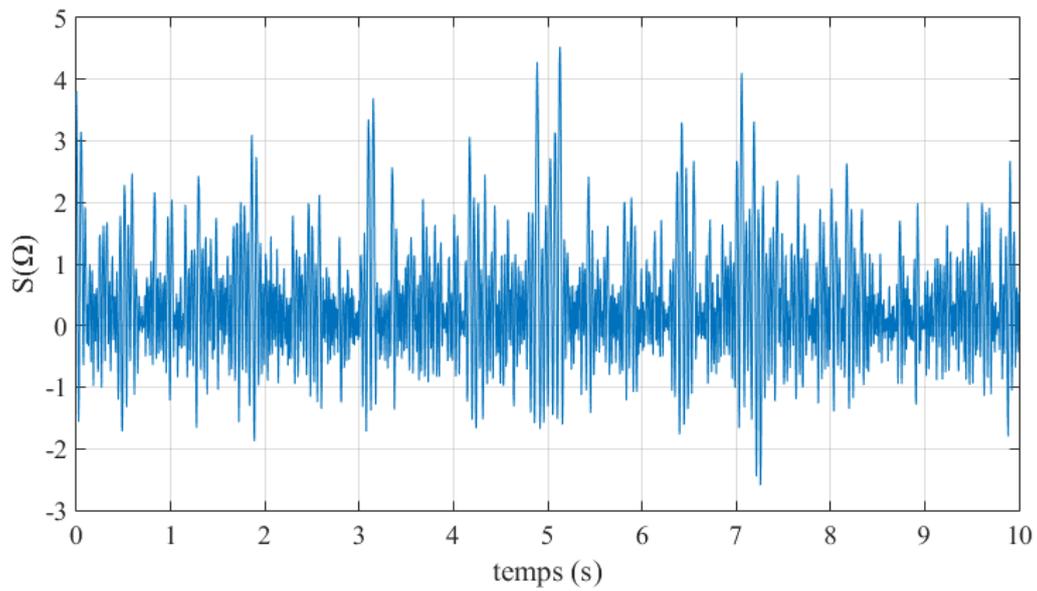


Figure III.11 : La surface de vitesse

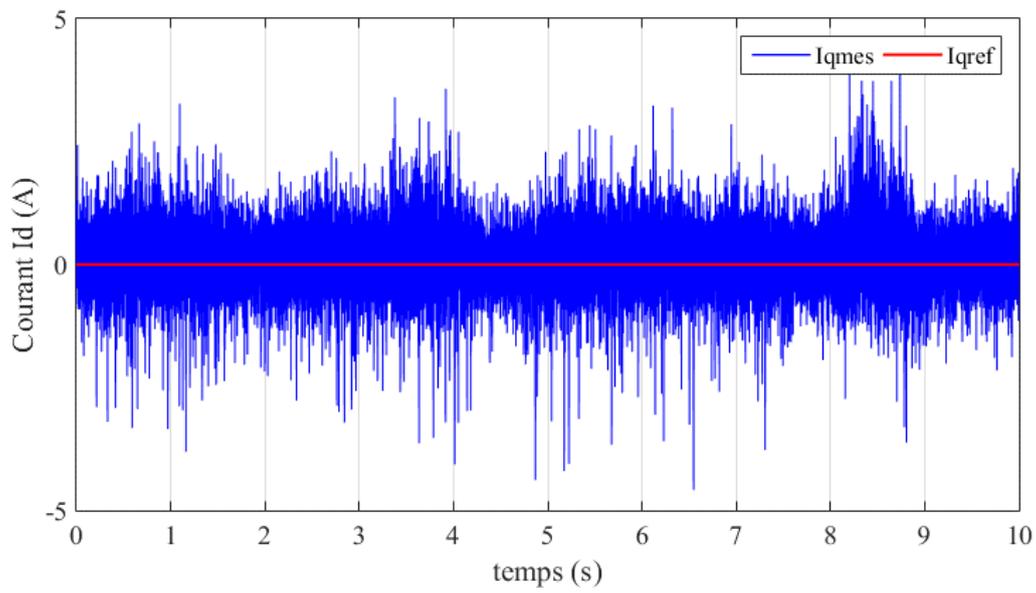


Figure III.12 : Courant d'axe direct  $I_d$  et  $i_{dref}$

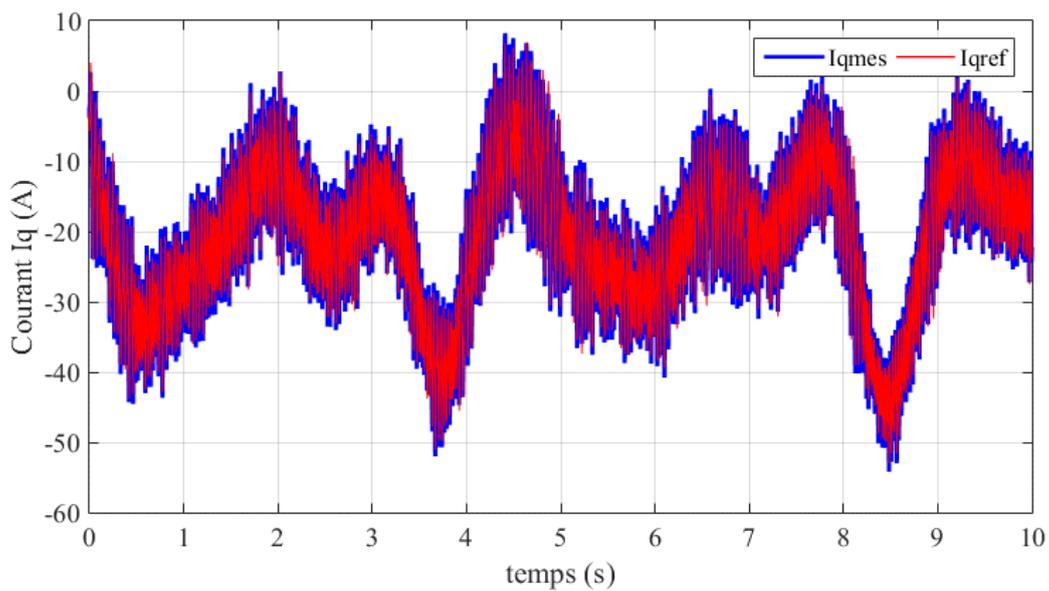


Figure III.13 : Courant d'axe en quadrature  $I_q$  et  $I_{qref}$

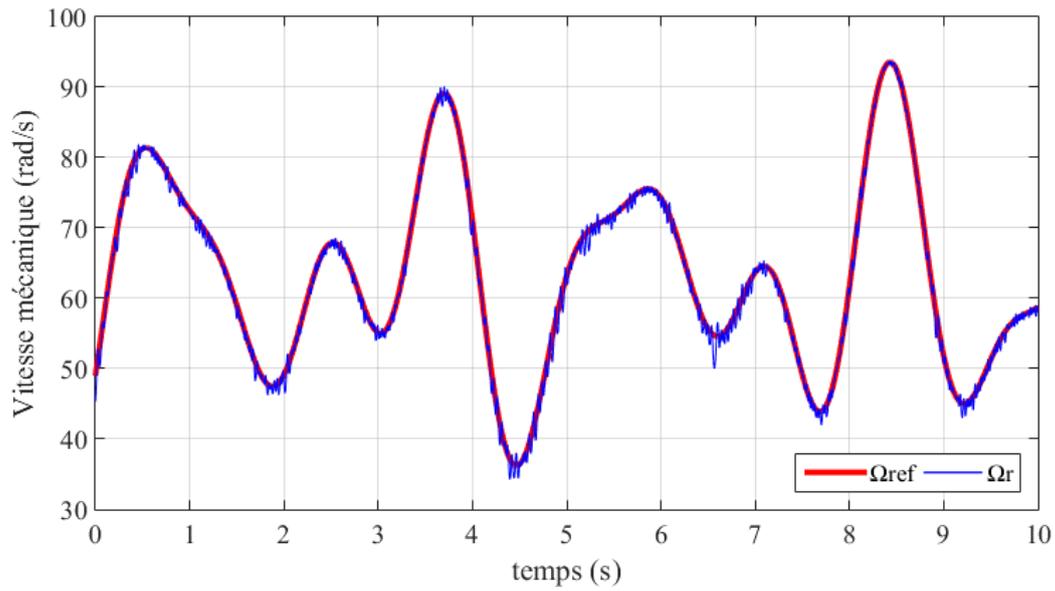


Figure III.14 : la vitesse mécanique

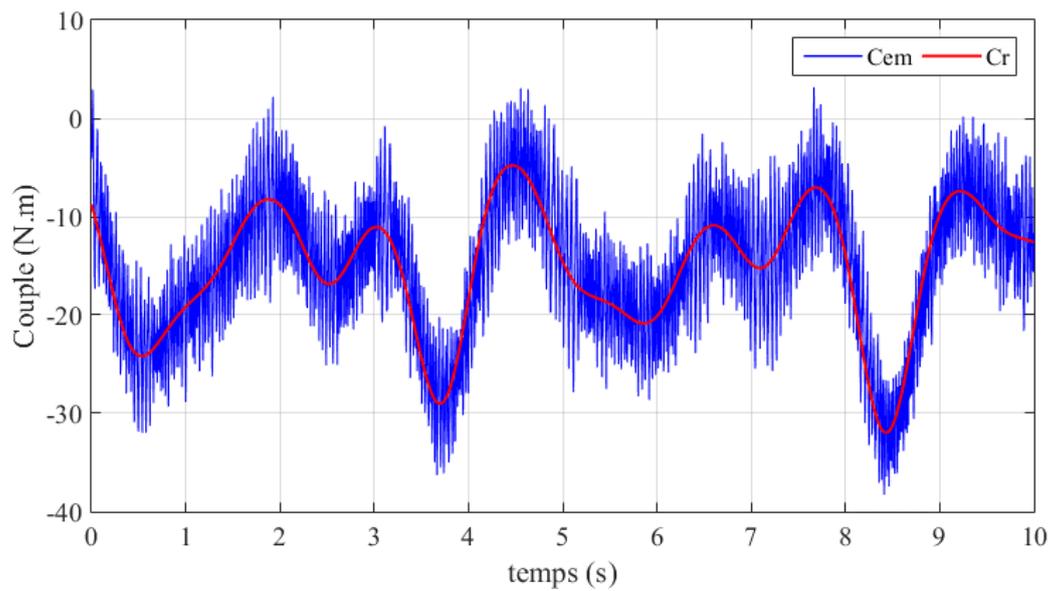


Figure III.15 : Couple électromagnétique et couple résistant

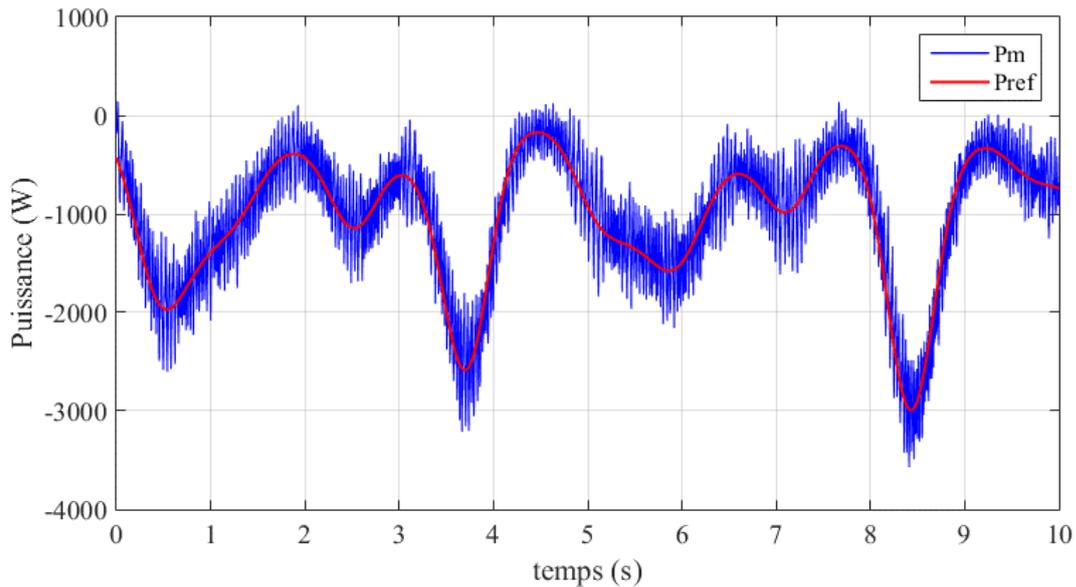


Figure III.16 : Puissance active de la MSAP

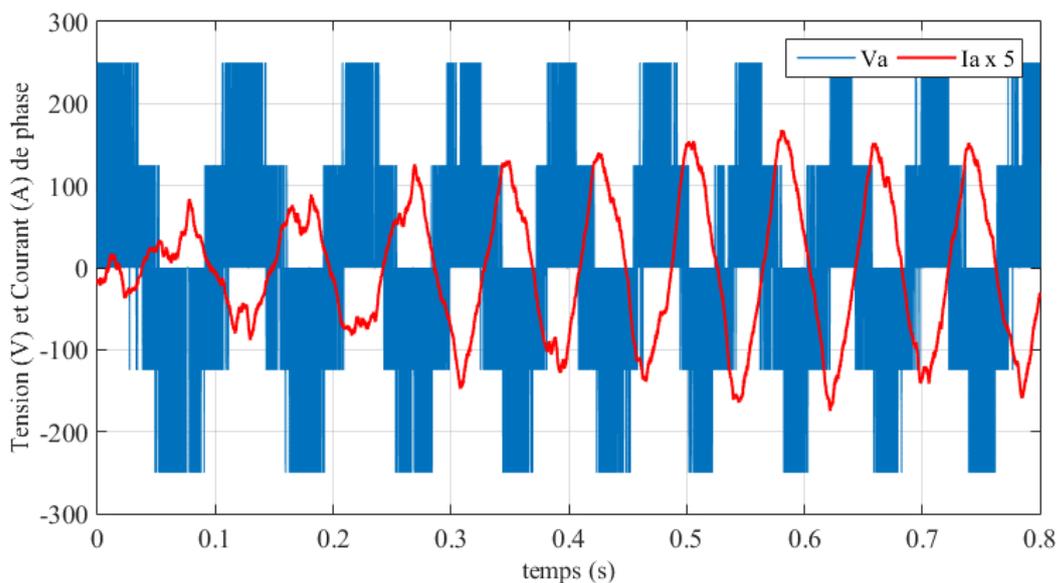


Figure III.17 : Tension et courant de phase

- **Interprétation des résultats**

D'après les résultats de simulation obtenues, on constate que toutes les allures des grandeurs électriques (courant, puissance, vitesse...) sont affectées par le profil du vent. La vitesse mécanique a une bonne adaptation aux variations de la vitesse du vent et la référence est également suivie, elle atteint une valeur de (95 rad/s) comme illustré dans la figure (III.14). La puissance active de la machine synchrone montrée dans la figure (III.16) est négative ce qui indique que l'MSAP fonctionne en mode génératrice. L'allure de la puissance active de la GSAP qui est bien attendue et la puissance de la turbine a une valeur de (3KW) pour une vitesse de vent de (12m/s). Le courant direct est forcé à zéro, alors que le courant en quadrature évolue

d'une façon identique à celle du couple électromagnétique. Le courant de phase prend une forme sinusoïdale et son amplitude varie en fonction du vent.

### **III.11 Conclusion :**

Ce chapitre a fait l'objet de la présentation et l'application de la commande par mode de glissement sur l'MSAP. La commande vectorielle a été présentée en premier lieu. Et après la présentation de la théorie de base de la commande par mode glissant, nous avons défini la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande ; nous constatons que le choix convenable des surfaces de commutation permet d'obtenir des hautes performances. Puis on a appliqué cette commande sur l'GSAP.

Enfin, un schéma global pour le contrôle de la chaîne de conversion a été prévu et simulé sous MATLAB/SIMULINK pour une vitesse du vent donnée.

La commande par mode glissant présente plusieurs avantages tels que, robustesse, précision importante, stabilité et simplicité, temps de réponse très faible.

# Conclusion générale

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'application d'une commande non linéaire dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la MSAP.

Nous avons centré notre travail sur l'étude des performances de la MSAP dans une chaîne de production électrique à partir de l'énergie cinétique du vent. Cette chaîne est composée d'une turbine associée à une génératrice synchrone, alimenté par un onduleur MLI et commandé par le réglage par mode glissant.

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitre :

Dans le contexte de l'énergie éolienne, un aperçu sur la production et la conversion d'énergie éolienne est présente dans le premier chapitre. Nous avons parlé des différents types des éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Nous avons parlé aussi sur les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable et nous avons abordé la description des machine électriques (on s'intéresse à la MSAP).

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents composants d'un système de conversion éolien (vent, turbine, redresseur, bus continu, onduleur, MSAP). Ensuite, une modélisation de la MSAP dans les repères (naturel et Park) a été réalisée. L'exploitation de la stratégie de commande MPPT permet de maintenir le coefficient de puissance à une valeur optimale quelques soient les variations de la vitesse du vent qui sont inférieures à la vitesse nominale.

La commande par mode glissant a fait l'objet d'un troisième chapitre, c'est une commande liée aux systèmes à structures variables, dont le but est de palier les inconvénients des commandes classiques, vu que la commande à structures variables est par nature une commande non linéaire et que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue. L'avantage de cette technique de régulation est la simplicité de mise en œuvre et la robustesse par rapport aux perturbations et aux incertitudes du système.

L'essentiel de notre contribution est abordé, nous avons appliqué la commande à la MSAP. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons présenté les résultats de simulation.

## Références Bibliographique

- [1] **Ibrahim Guenoun** « Commandes non linéaires robustes de systèmes éoliens » thèse doctorat, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen 2018 ;
- [2] **Fateh Louar** « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016 ;
- [3] **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 ;
- [4] **Z.TIR**, « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010 ;
- [5] **Boudissa Malika, Boudjemil Houria** « Commande d'une éolienne à base d'une Machine Synchrone à aimant permanent » Mémoire de fin d'étude de Master Académique 2017 ;
- [6] **T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion**, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129 ;
- [7] **H. Ben Ahmed**, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004 ;
- [8] **L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen**, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, december 2001 ;
- [9] **S El Aimani**, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL) ;
- [10] **Khelat Lotfi, Maataoui Lakhdar : Mémoire de master 2017** « Etude et simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée » ;
- [11] **Khettache L** « Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée » Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université de Batna, Algérie, 2007 ;
- [12] **Betz A.** : Wind Energy and its Use by Windmills. 1926 ;
- [13] **Redjem Radia** « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magistère en électrotechnique ;
- [14] **A.M. Houekpohéha, B. Kounouhéwa, B.N. Tokpohozin et N. Awanou**, « Estimation de la Puissance Energétique Eolienne à Partir de la Distribution de Weibull sur la Côte Béninoise à Cotonou dans le Golfe de Guinée », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17, N°3, pp. 489- 495, 2014 ;

[15] **Brahimi Oussama, Mechernene mohammed walid : Mémoire de master 2017** « Commande d'une machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) utilisé dans une chaine éolienne » ;

[16] **Belkacem Toual** « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable » Mémoire de Magister, Université de Batna, 2010 ;

[17] **Adam Mirecki** « Étude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005 ;

[18] **Sabrina Ben aicha** « Etudes théorique et expérimentale d'une génératrice synchrone utilisées dans une chaine éolienne à axe vertical » Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014 ;

[19] **Issam Attoui** « Contribution au diagnostic de défauts d'une génératrice asynchrone dans une chaine de conversion d'énergie éolienne » Thèse de Doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, 2015 ;

[20] **Arnaud Davigny** « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007 ;

[21] **Liuchen Chang**, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne » IEEE Canadian Review - summer / Eté 2002, pp. 1-5 ;

[22] **Tarak Ghennam** « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de Doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Ecole Centrale de Lille, 2011 ;

[23] **A. Abdelli** « Optimisation multicritère d'une éolienne passive » Thèse de Doctorat, institut National polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007 ;

[24] **M. BOUHADOUZA Boubekour** « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Fermes Eoliennes par l'utilisation du STATCOM » thèse de Magistère, université Ferhat Abbas Sétif, 2011 ;

[25] **Griche I** « Etude de la Stabilité Transitoire des Systèmes Electriques en Présence des Fermes Eoliennes » thèse de magister, Université de Sétif 2008 ;

[26] **Slimanou Merouane, Guelguoum Idir** : Mémoire de fin d'étude Master 2020« Etude d'un système de pompage éolien à base de deux machine synchrone à aimant permanent » ;

[27] **Benhadda Abdelmoundir, Bentifour Mustapha** « Commande d'une turbine éolienne à pitch variable basée sur un générateur synchrone à aimant permanent » Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master. Université Tlemcen 2017 ;

[28] **N. La verdure** « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » ; thèse doctorat de l'NPG ; Spécialisé : Génie électrique ; 09 décembre 2005 ;

[29] **Amoura Rabah, Arab Rezki** « Modélisation et commande d'un aérogénérateur synchrone à aimant permanent à attaque direct » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master Académique 2013 ;

[30] **Mebarki Idir, Allaoua Sofiane** « Etude d'une chaine de conversion éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » Mémoire de fin cycle, 2018, université Targua Ouzemour, Bejaïa ;

[31] **Amiri Mohammed, Ali Dahmane Oussama** « Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur mode glissant » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master Académique 2017 ;

[32] **Aribi Fouad Salim, Nedjaa Riad Abdelhafid** « Commande par mode glissant de la machine synchrone à aimant permanent » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master Académique 2018, université de Kasdi Merbah OURGLA ;

[33] **NOUADJA Mohammed CHACHA Lokman** « Commande par mode glissant appliquée à un système électro-énergétique » Mémoire MASTER ACADEMIQUE Domaine : science et technique, UNIVERSITE DE KASDI MERBAH OURGLA 2017.

**Annexe****Paramètre de la turbine éolienne :**

$$R_t = 1.5 \text{ [m] ;}$$

$$\rho = 1.225 \text{ [Kg/m}^3\text{] ;}$$

$$G = 1 \text{ ;}$$

$$P_n = 3000 \text{ [W] ;}$$

$$\lambda_{opt} = 11.7 \text{ ;}$$

**Paramètre de la GSAP :**

$$R_s = 0.1738 \text{ [\Omega] ;}$$

$$L_d = 9.515.e-4 \text{ [H] ;}$$

$$L_q = 9.515.e*4 \text{ [H] ;}$$

$$\phi_{sf} = 0.12 \text{ [web] ;}$$

$$P = 4 \text{ ;}$$

$$J = 0.1 \text{ [Kg/m}^2\text{] ;}$$

$$f = 0.008 \text{ [N.m/rad] ;}$$

**Paramètres des régulateurs des trois surfaces de la commande mode glissant :**

$$K_\Omega = 70 \text{ ;}$$

$$K_d = 50 \text{ ;}$$

$$K_q = 300 \text{ ;}$$