

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira – Bejaïa



Faculté de Technologie  
Département de Génie électrique

## MEMOIRE

*En vue de l'Obtention du Diplôme de Master 2 en Electrotechnique*  
**Option : Electromécanique**

### Thème :

*Commande et modélisation d'une éolienne à base  
d'une MSAP couplé au réseau*

**Réalisé par :**

**TABTI ALI**

**AHMEDI ZAHIR**

**Encadré par :**

**M<sup>r</sup> AOUZELLAG Djamal**

**M<sup>me</sup> CHENNA Amina**

**Session Juin 2013**

# Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier mon DIEU LE TOUT PUISSANT, qui a rendu cet ouvrage possible.

*Nous tenons à remercier notre promoteur monsieur AOUZELLAG Djamel pour nous avoir conseillé et orienté tout au long de ce travail.*

*Comme nous exprimons nos remerciements à Madame CHENNA Amina, pour sa disponibilité entière et pour avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires à la concrétisation de notre travail.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement nos familles pour avoir été à nos côtés toutes ces années. On a eu la chance de pouvoir effectuer nos études en toute sérénité, et nous sommes reconnaissant à nos parents et nos frères et sœurs pour cela.*

*Nous tenons aussi à remercier le président et les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Nos remerciements vont également à tous qui ont aidé et conseillé de près ou de loin tout au long de nos études jusqu'à la finalisation de ce projet.*

# Dédicace :

A nos famille :

Pour votre affection dont vous nous avez toujours comblé, pour l'éducation, les abnégations et les sacrifices infinis que vous n'avez cessé de consentir pour nous.

Pour votre soutien inlassable et vos encouragements le long de notre cursus étudiantin et professionnel. Les mots sont insuffisants pour exprimer combien grande est l'affection que nous vous portons.

Ce simple document ne saurait exprimer notre reconnaissance.

A nos collègues :

Aucune dédicace ne saurait exprimer notre gratitude et notre estime. nous ne pourrions vous remercier pour votre soutien dans les moments difficiles. Puissiez-vous trouver ici l'expression de notre grande reconnaissance.

A nos amis :

Avec toute notre affection fraternelle et en hommage des souvenirs qu'on partage. Que vous trouvez ici l'expression de notre amour et fraternité.

A tous ceux qui nous sont chers.

$P_v$	Puissance cinétique du vent (w)
$\beta$	L'angle de calage ( $^\circ$ )
$\rho$	Densité d l'aire ( kg /m <sup>3</sup> )
$v$	vitesse du vent (m/s)
$C_p(\lambda, \beta)$	Coefficient aérodynamique
$S$	la surface balayée par les pales (m <sup>2</sup> )
$R$	rayon des pales (m)
$C_{aero}$	Couple aérodynamique (N.m)
$\Omega_t$	la vitesse de la turbine (rad/s)
$\lambda$	ration de vitesse
$\Omega$	vitesse de la génératrice (rad/s)
$C_{vis}$	Couple des frottements visqueux (N.m)
$C_{em}$	Couple électromécanique (N.m)
$f$	Frottements visqueux (N.m.s/rad)
$p_{mec}$	Puissance mécanique (w)
$J$	(inertie kg.m <sup>2</sup> )
$\omega_n$	Pulsation propre (naturelle)
$p_{nom}$	Puissance nominale de l'éolienne (w)
$\lambda_{opt}$	Ration de vitesse optimale
$c_{p-max}$	Coefficient de puissance optimale
$[V]_{abc}, [V]_{dq}$	Tensions statoriques de la MSAP dans le repère réel et de Park respectivement

$[V_{ref}]$	Vecteur des tensions de références du côté réseau électrique
$R_f$	Résistance de l'enroulement d'excitation
$[V]_{dq}$	Tensions statoriques de la MS dans le repère réel et de Park respectivement
$u_d, i_d$	Tension et courant en amont du hacheur
$P(\theta)$	Matrice de Park
$[i]_{abc}, [i]_{dq}$	Courants statoriques de la MS dans le repère réel et de Park respectivement
$[\Phi]_{abc}, [\Phi]_{dq}$	Flux magnétiques statoriques de la respectivement dans le repère initial et de Park respectivement
$\alpha$	Rapport cyclique du hacheur
$p$	Nombre de paires de pôles de la MSAP
$i_{r1}, i_{r2}, i_{r3}$	Courants envoyés au réseau électrique
$U_{dc}^*$	Tension de référence du bus continu
$P_{res}^*, Q_{res}^*$	Puissances active et réactive de références du côté réseau électrique
$P_{res}^*, Q_{res}^*$	Puissances active et réactive de références du côté réseau électrique
$P_{dc}, u_{dc}, i_{dc}, C_{dc}$	Puissance, tension, courant et capacité du bus continu (en aval du hacheur) respectivement
$[V_{ref}]$	Vecteur des tensions de références du côté réseau électrique
$P_{res}, Q_{res}$	Puissances active et réactive du côté du réseau électrique
$M$	Inductance magnétisante de la MSAP
$[R]_{abc}$	Résistance des enroulements statoriques
$[\Phi]_{abc}, [\Phi]_{dq}$	Flux magnétiques statoriques de la MS3E dans le repère initial et de Park respectivement
$[M_{sf}]$	Matrices des inductances mutuelles stator-rotor
$L_d, L_q$	Inductances directe et quadratique de la MSAP
$\theta$	Position mécanique du rotor
$L_{a0}$	Inductance propre
$M$	Inductance magnétisante de la MSAP

$C_m$	Couple mécanique
$C_{em}$	Couple électromécanique
$v_f, i_f, \Phi_f$	Tension, courant et flux magnétique de l'enroulement d'excitation de la MSAP respectivement
$I_q$	Courant quadrature
$[i]_{abc}, [i]_{dq}$	Courants statoriques de la MS dans le repère réel et de Park respectivement
$\Delta i$	Bande d'hystérésis définie dans le régulateur à hystérésis
$i_{ond}, I_{ond}^*$	Courant d'onduleur réel et de référence respectivement
$i_{r1}^*, i_{r2}^*$	Courants de références du réseau électrique
$[X]$	Transposée de la matrice
$v_{r1}, v_{r2}, v_{r3}$	Tensions du réseau électrique
$v_{ond1}, v_{ond2}, v_{ond3}$	Tensions simples de l'onduleur (côté réseau)
$P_a$	Puissance active
$P_{res}, Q_{res}$	Puissances active et réactive du côté du réseau électrique
$v_{r1}, v_{r2}, v_{r3}$	Tensions du réseau électrique
$F_1, F_2, F_3$	Fonctions de connexions du convertisseur statique
$v_{rd}, v_{rq}$	Tensions directe et quadratique du réseau électrique
$[L_s]$	Matrice des inductances propres statoriques.
$i_{ond}, I_{ond}^*$	Courant d'onduleur réel et de référence respectivement
$L_f, r_f$	Inductance et résistance du filtre respectivement.
$P(\theta)$	Matrice de Park
$R_s$	Résistance d'une phase statorique
$M_0$	Maximum de l'inductance mutuelle stator-rotor.
$\omega$	Pulsation des grandeurs électriques
$I_d^*, I_q^*$	Courants de références directe et quadratique, respectivement, de la MSAP
$i_{rd}^*, i_{rq}^*$	Courants direct et quadratique de références du côté réseau électrique
$P_{ms}, Q_{ms}$	Puissances active et réactive de la MSAP

$R_f$	Résistance de l'enroulement d'excitation
$R_s$	Résistance d'une phase statorique
$[L_s]$	Matrice des inductances propres statoriques
$[M_{sf}]$	Matrices des inductances mutuelles stator-rotor
$M_0$	Maximum de l'inductance mutuelle stator-rotor
$[M_{sf}]$	Matrices des inductances mutuelles stator-rotor
$M_0$	Maximum de l'inductance mutuelle stator-rotor
$p$	Nombre de paires de pôles de la MSAP
$\theta$	Position mécanique du rotor
$L_d, L_q$	Inductances directe et quadratique de la MSAP
$\omega$	Pulsation des grandeurs électriques
$P_{dc}, u_{dc}, i_{dc}, C_{dc}$	Puissance, tension, courant et capacité du bus continu (en aval du hacheur) respectivement
$I_d^*, I_q^*$	Courants de références directe et quadratique, respectivement, de la MSAP
$\Delta i$	Bande d'hystérésis définie dans le régulateur à hystérésis.
$V_{ond1}, V_{ond2}, V_{ond3}$	Tensions simples de l'onduleur (côté réseau)
$V_{rd}, V_{rq}$	Tensions directe et quadratique du réseau électrique
$i_{r1}, i_{r2}, i_{r3}$	Courants envoyés au réseau électrique
$i_{r1}^*, i_{r2}^*$	Courants de références du réseau électrique
$i_{rd}^*, i_{rq}^*$	Courants direct et quadratique de références du côté réseau électrique
$L_f, r_f$	Inductance et résistance du filtre respectivement



## Chapitre I :

<b>Figure I.1 :</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	4
<b>Figure I.2:</b> Croissance de la puissance éolienne installée dans le monde de 1995 à 2012.....	6
<b>Figure. I.4 :</b> Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) .....	7
<b>Figure I.5:</b> Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius) .....	7
<b>Figure I.6:</b> Aérogénérateur à axe horizontal .....	8
<b>Figure I.7:</b> Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur .....	9
<b>Figure I.8:</b> Puissance mécanique pour un type d'éolienne donné .....	10
<b>Figure. I.9 :</b> Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage .....	11
<b>Figure I.10 :</b> Système éolien basé sur la machine asynchrone à fréquence variable. .	12
<b>Figure I.11:</b> Système éolien basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage électronique du glissement (fonctionnement à vitesse variable) .....	13
<b>Figure I.12 :</b> système éolienne basé sur une machine synchrone à rotor bobiné .....	14
<b>Figure I.13 :</b> système éolienne basé sur une MSAP couplé au réseau.....	14
<b>Figure I.14 :</b> GSAP à flux radial .....	15
<b>Figure I.15 :</b> GSAP à flux axial .....	15
<b>Figure I.16 :</b> GSAP à flux tangentiel .....	16

## Chapitre II :

<b>Figure II.1 :</b> <i>Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent</i> .	18
<b>Figure II.2 :</b> Caractéristiques de puissance pour les deux modes de régulation.....	19
<b>Figure II.3 :</b> Turbine éolienne.....	19
<b>Figure. II.4 :</b> Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine de puissance 660 kW .....	20

---

<b>Figure II.5 :</b> Schéma bloc du modèle des pales .....	21
<b>Figure II.6 :</b> Schéma bloc de la simulation de la turbine éolienne .....	22
<b>Figure II.7 :</b> Vitesse du vent .....	22
<b>figure II.8 :</b> Vitesse de la turbine éolienne .....	22
<b>Figure II.9 :</b> $C_p$ en fonction du temps .....	23
<b>Figure II.10 :</b> $C_p$ en fonction de ratio de vitesse .....	23
<b>Figure II.11 :</b> Ratio de vitesse en fonction du temps .....	23
<b>Figure II.12 :</b> Puissance mécanique.....	23
<b>Figure II.13 :</b> Couple mécanique .....	23
<b>Figure II.14 :</b> Vitesse du vent .....	24
<b>Figure II.15 :</b> Vitesse de la turbine éolienne .....	24
<b>Figure II.16 :</b> $C_p$ en fonction du temps .....	24
<b>Figure II.17 :</b> $C_p$ en fonction du ratio de vitesse .....	24
<b>Figure II.18 :</b> Allure du ratio de vitesse en fonction du temps .....	24
<b>Figure II.19 :</b> La puissance mécanique.....	24
<b>Figure II.20 :</b> le couple mécanique .....	24

### Chapitre III :

<b>Figure III.1 :</b> Schéma du système étudié et de la stratégie de sa commande .....	26
<b>Figure III.2:</b> Représentation symbolique de la machine synchrone .....	27
<b>Figure III.3:</b> Machine équivalente au transformateur de Park .....	29
<b>Figure III.4:</b> Diagramme vectoriel d'une phase statorique .....	32
<b>Figure III.5 :</b> Principe de la commande du redresseur (côté machine).....	33
<b>Figure III.6 :</b> Comparaison des courants de références avec les courants réels .....	34
<b>Figure (III.7) :</b> Schéma de principe du convertisseur statique .....	35
<b>Figure (III.8) :</b> Bus continu avec un hacheur survolteur .....	36

<b>Figure III.9</b> : Régulation de la tension du bus continu .....	37
<b>Figure (III.10)</b> : Commande de l'onduleur du côté réseau électrique .....	37
<b>Figure III.11</b> : Régulation du courant envoyé au réseau .....	39
<b>Figure III.12</b> : Allure de tension et de courant de la machine .....	40
<b>Figure III.13</b> : Allures du couple ( $C_{em}$ , $C_m$ ).....	40
<b>Figure III.14</b> : Allure de la vitesse de référence et la vitesse de la génératrice .....	40
<b>Figure III.15</b> : Allures du couple ( $P_{ref}$ , $P_m$ ) .....	41
<b>Figure III.16</b> : Facteur de puissance côté machine .....	41
<b>Figure III.17</b> : Allure de courant et de tension de bus continu .....	41
<b>Figure III.18</b> : Allure de tension et de courant de coté réseau .....	42
<b>Figure III.19</b> : Allure du puissance ( $P_{res}$ , $P_m$ ).....	42
<b>Figure III.20</b> : Allure du puissance ( $Q_{res}$ , $Q_m$ ) .....	42
<b>Figure III.21</b> : Facteur de puissance côté reseau .....	42
<b>Figure III.22</b> : vitesse du vent .....	43
<b>Figure III.23</b> : la vitesse da la machine .....	43
<b>Figure III.24)</b> : Allures de la tension et du courant de la machine .....	43
<b>Figure III.25</b> : Allures du couples ( $C_t$ , $C_{em}$ ) .....	43
<b>Figure III.26</b> : Allures du puissances ( $P_t$ , $P_m$ ) .....	43
<b>Figure III.27</b> : Facteur de puissance côté machine .....	44



Introduction générale .....	1
<u>CHAPITRE I: Etat d'art sur l'énergie éolien</u>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Historique .....	3
I.3. Définition de l'énergie éolienne .....	4
I.4 avantage et inconvénient de l'énergie éolienne .....	4
I.4.1 Avantages .....	4
I.4.2 Inconvénients .....	5
I.5 Situation actuelle de l'énergie éolienne .....	5
I.6 Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	6
I.7 Types d'aérogénérateurs .....	6
I.7.1 Aérogénérateurs à axe vertical .....	6
I.7.2 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus .....	7
I.7.3 Aérogénérateurs à rotor de Savonius .....	8
I.7.4 Aérogénérateurs à axe horizontal .....	9
I.8 Principe de conversion d'énergie .....	10
I.8.1 Conversion en énergie mécanique .....	10
I.9 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens .....	11
1. Systèmes non couplés au réseau alternatif .....	11
2. Systèmes couplés au réseau alternatif .....	12
2.1. Machine asynchrone à cage .....	12
2.2. Machine asynchrone à double alimentation .....	13
2.3. Machine synchrone .....	13
a) Machine synchrone à rotor bobiné .....	13

B) Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) .....	14
I.10. Motif de choix de la génératrice (GSAP) pour une éolienne .....	15
I.11. Conclusion .....	16

## **Chapitre II : Etude de la turbine éolienne**

II.1. Introduction .....	17
II.2. Modes de fonctionnement des éoliennes .....	17
II.2.1. Eoliennes à vitesse fixes .....	17
II.2.2. Eoliennes à vitesse variable .....	17
II.3. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne .....	18
II.4. Modélisation des pales .....	19
II.5. Modélisation de l'arbre mécanique .....	21
II.6. Technique d'extraction du maximum de la puissance .....	21
II.6.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse .....	22
II.7. Résultats de simulation .....	22
II.8. Résultats de simulation avec limitation de puissance .....	24
II.9. Conclusion .....	25

## **Chapitre III : Etude de la chaîne de conversion d'énergie connectée au réseau**

III.1. Introduction .....	26
III.1. Description de la chaîne de production .....	26
III.3. Modélisation du générateur synchrone en régime linéaire .....	27
III.3.1. Equations initiales de la machine .....	27
1. Equations des tensions .....	27
2. Equations des flux magnétiques .....	28
3. Equation mécanique .....	28
III.3.2. Transformation de Park .....	28

## SOMMAIRE :

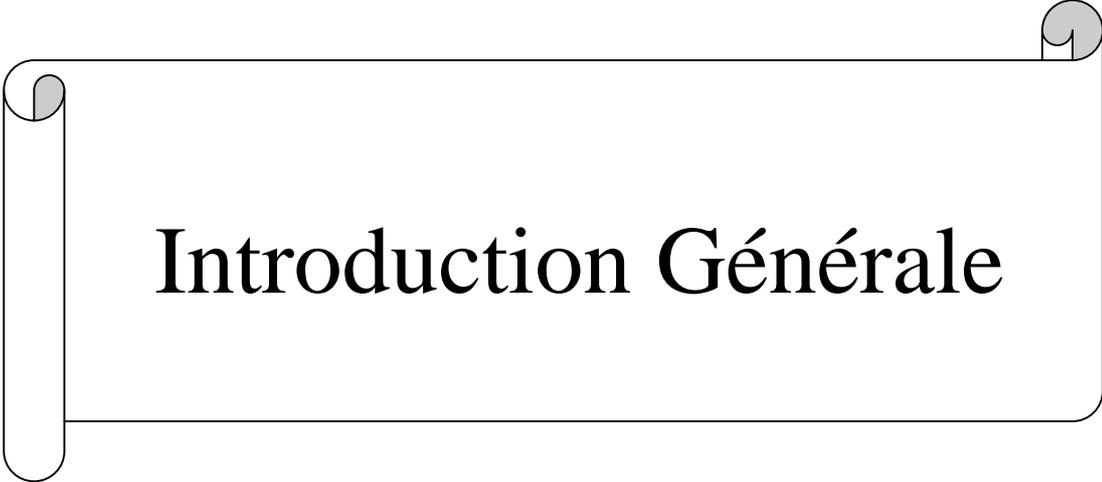
---

1. Matrice de Park et relations de passage .....	29
2. Equations de la machine dans le repère de Park .....	29
a) Equations des flux .....	29
b) Equations des tensions .....	30
c) Expression du couple électromagnétique .....	30
III.3.3. Modèle d'état de la machine synchrone à aimants permanents .....	30
III.4. Stratégie de commande de la MSAP .....	32
III.4.1. Principe de la commande .....	32
III.4.2. Régulation des courants .....	33
III.5. Modèle mathématique du convertisseur MLI .....	34
III.6. Régulation de la tension du bus continu .....	36
III.7. Commande de l'onduleur du côté réseau électrique .....	37
III.7.1 Régulation des courants .....	37
III.7.2 Calcul des courants de références .....	39
III.8. Résultats de simulation .....	40
III.9. Résultats de simulation et interprétations .....	43
III.10. Conclusion .....	44
Conclusion générale .....	45

Bibliographie

Annexe

---

A decorative scroll graphic with a black outline and grey shading on the top and bottom edges, containing the text "Introduction Générale".

# Introduction Générale

### Introduction générale

Actuellement, l'énergie que nous consommons, pour nous chauffer, nous déplacer, provient principalement du combustible fossile et du nucléaire [Bou06]. Or, outre le fait que ces combustibles fossiles s'épuisent et que les déchets nucléaires posent problème, une grande partie des gaz à effets de serre sont constituées de  $CO_2$  et d'origine énergétique.

Pour répondre aux questions de sécurité d'approvisionnement énergétique, d'émissions atmosphériques polluantes mais aussi de valorisation des ressources locales et de création d'emploi, les énergies renouvelables présentent une grande opportunité, elles sont inépuisables dont nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Même si certaines technologies restent coûteuses et des questions comme le raccordement au réseau et le stockage d'énergie ne sont pas entièrement résolues, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et développements plus approfondis visant à viabiliser ; baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et d'augmenter l'efficacité énergétique [Mir 05].

Étant donné un aperçu général sur les énergies renouvelables, notre étude sera dédiée à l'énergie éolienne qui semble l'une des prometteuses avec un taux de croissance européen et mondial très élevé, alors qu'elle fut complètement négligée pendant l'ère industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydro-électricité et des énergies fossiles.

Parmi les applications potentielles de l'éolienne, on peut citer le domaine de l'électrification rurale pour une consommation locale d'électricité ou pour sa transformation vers d'autres vecteurs énergétiques [Tou 99] : pompage, traitement de l'eau, l'électrolyse de l'eau et stockage d'hydrogène à plus long terme. Au-delà de ces réseaux isolés, on parle aussi aujourd'hui d'intégration des énergies renouvelables en site urbain.

Tout convertisseur électromécanique peut être utilisé pour produire de l'énergie. En règle générale, pour les éoliennes de forte puissance, il s'agit d'une génératrice synchrone ou asynchrone [Cha 02]. Mais pour un aérogénérateur, servant à la charge de batteries par exemple, on peut utiliser une génératrice à courant continu [Cam 03].

Les générateurs synchrones sont de type des machines qui sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrale thermique, hydraulique ou nucléaire). Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence

du réseau [Cam 03]. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [bou 06]. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

Ce mémoire présente l'étude d'une chaîne de conversion électrique par énergie éolienne. Cette chaîne sera connectée au réseau à travers un dispositif électrique.

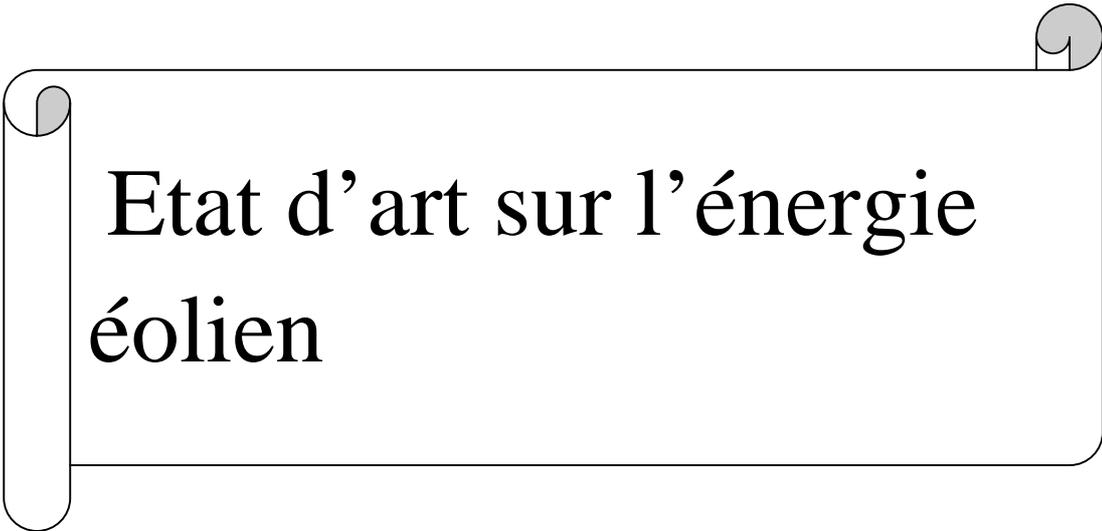
Dans le premier chapitre, on présente quelques généralités sur la chaîne de conversion d'énergie éolienne et le choix de la structure à étudier.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation et la commande de la turbine éolienne. La simulation sous MATLAB nous permet de déterminer le comportement dynamique de la turbine.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de la chaîne de conversion d'énergie éolienne connectée au réseau. La génératrice synchrone à grand nombre de pôles est pilotée vectoriellement en couple. Des résultats de simulation sous Matlab sont présentés.

Finalement, ce travail est clôturé par une conclusion générale et les perspectives envisagées à la lumière de ce mémoire.

---

A decorative scroll graphic with a black outline and grey shading on the top and bottom edges, containing the title text.

# Etat d'art sur l'énergie éolien

## I.1. Introduction

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à des nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables.

Ce premier chapitre présente un état d'art sur l'énergie éolienne et son historique et la croissance de l'exploitation de cette énergie en présentant les différents types des éoliennes.

## I.2. Historique

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

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que Danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [Tou 10].

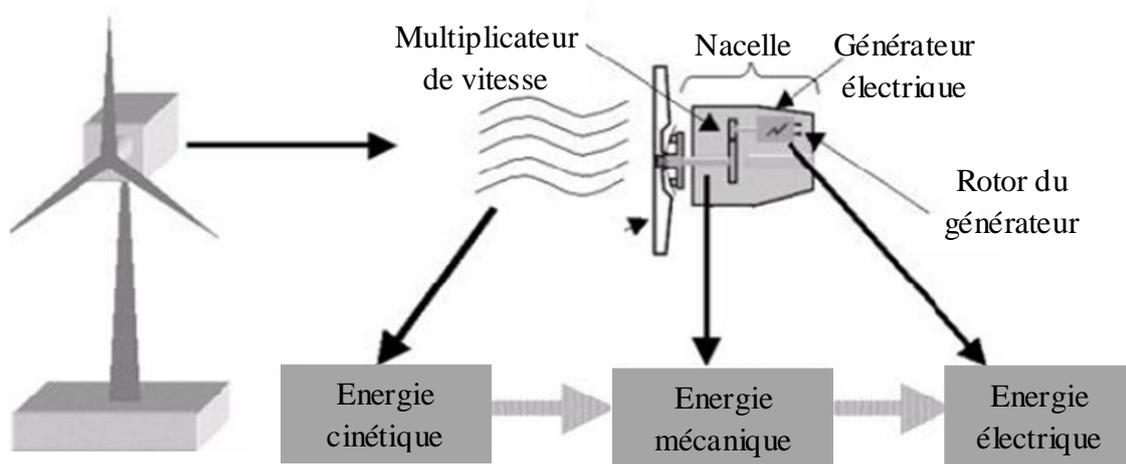
Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer à investir pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985 [Tou 10].

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW [Tou 10].

### I.3. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure I.1) [Poi 03].



**Figure I.1 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent [poi 03]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée 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 mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 180m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [Poi 03].

### I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a des avantages 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.

#### I.4.1 Avantages :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier, l'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO<sub>2</sub>, ni d'autres gaz. Elle a permis d'éviter l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 milles tonnes de SO<sub>2</sub> et 17.5 milles de tonnes de NO<sub>x</sub>. Ces

émissions sont les responsables des pluies acides [Tou 10] ; elle ne nécessite aucun carburant l'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets ; l'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires ; c'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches ; c'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [bour 99] après l'hydraulique ; L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite; Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace ; La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte ; 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; Enfin ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

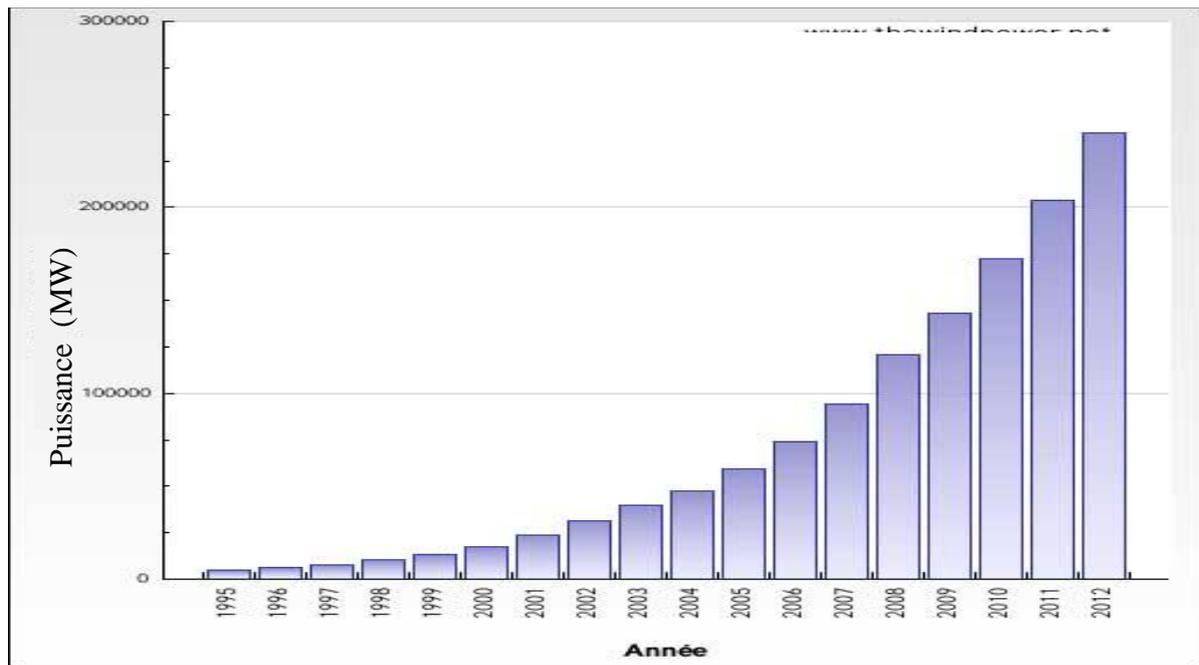
#### **I.4.2 Inconvénients**

L'énergie éolienne possède aussi les inconvénients qu'il faut citer :

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- la qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées, c'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés [khet 07].

#### **I.5. Situation actuelle de l'énergie éolienne**

Le rapport publié par le GWEC (global Wind Energy Council) pour l'année 2012 montre l'énorme intérêt voué à l'énergie éolienne à travers le monde, en effet la puissance totale installée à travers le monde jusqu'à la fin de l'année 2012 est estimée à plus de 240 GW contre 200 GW pour l'année précédente (figure I.2), et cela malgré la crise financière qui a secoué le monde durant l'année 2009 .



**Figure I.2:** Croissance de la puissance éolienne installée dans le monde de 1995 à 2012 [Féd]

Les systèmes à ailes ou à pales tournantes convertissent l'énergie cinétique du vent (sa vitesse) en énergie mécanique disponible sur l'axe. La rotation de cet axe anime une génératrice qui produit de l'électricité. Le principe de l'éolienne se résume donc en un système (un couple rotor-génératrice) qui, à partir d'une énergie extrêmement variable (le vent), devra produire une énergie électrique présentant des caractéristiques constantes [Bou 06].

### I.7. Types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [Ham 08].

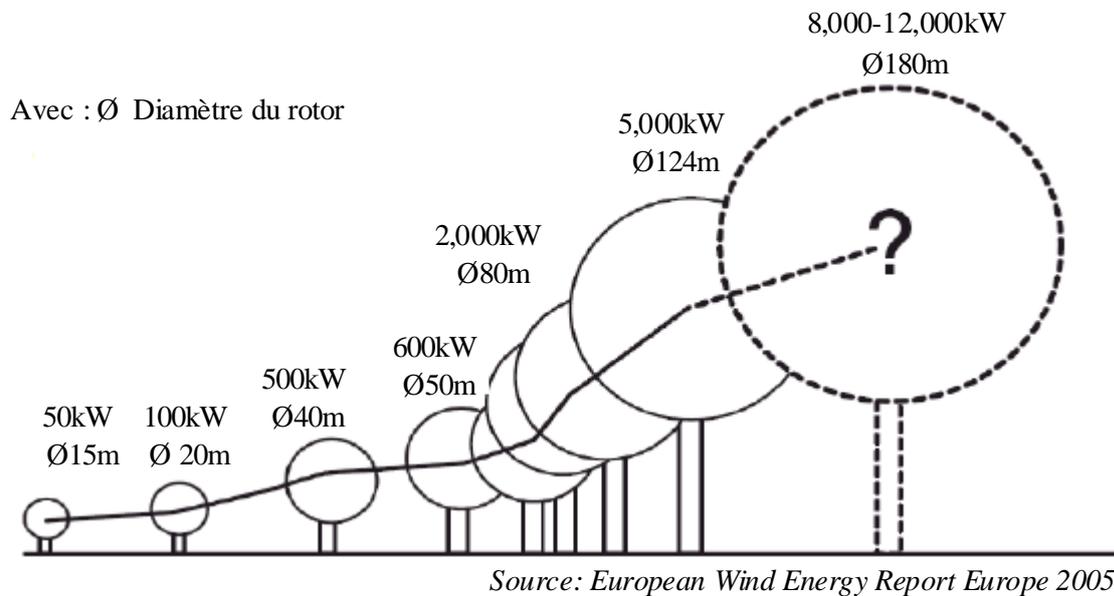
#### I.7.1. Aérogénérateurs à axe vertical

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

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [Tar11]:

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW ;
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW ;
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

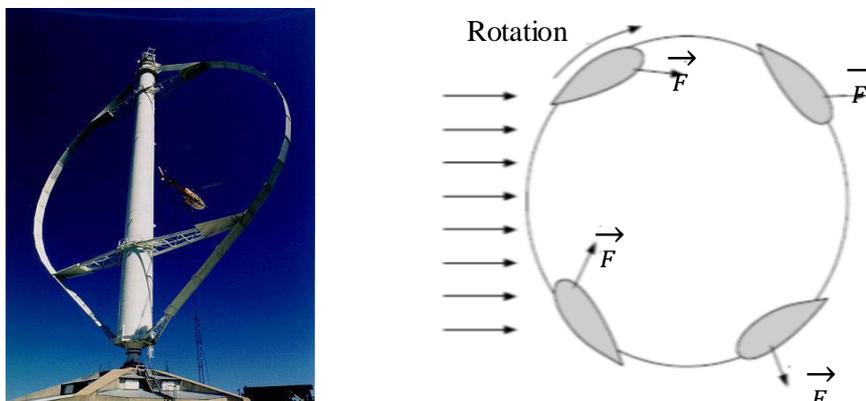
La figure (I.3) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.



**Figure I.3** : Correspondance taille-puissance des éoliennes [Tar11]

### I.7.2. Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

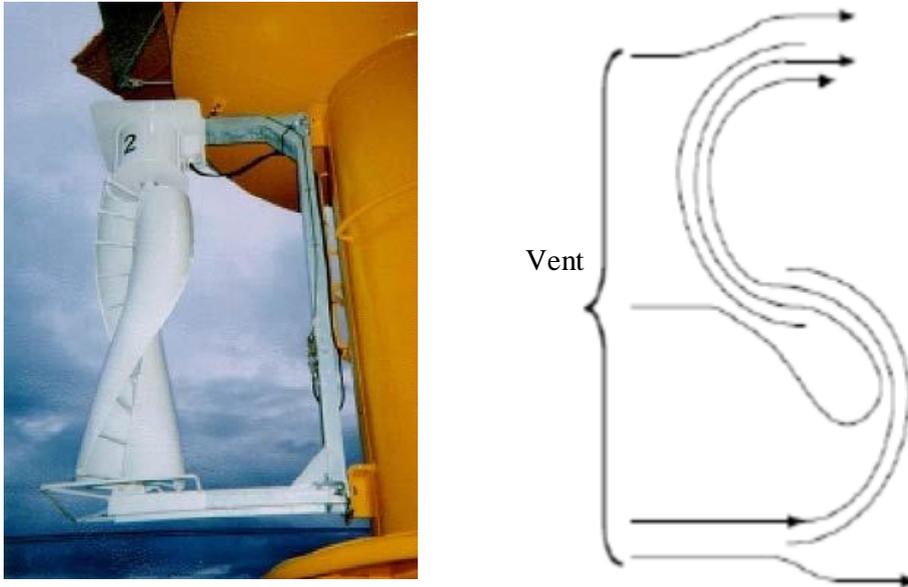
Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig. I.4). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.



**Figure. I.4** : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [Boy 06]

### I.7.3. Aérogénérateurs à rotor de Savonius :

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Figure. I.5).



**Figure I.5:** Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance,
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

### I.7.4. Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal (Figure I.6) sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [Poi 03]. Elles sont constituées de

plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [Ham 08].

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.

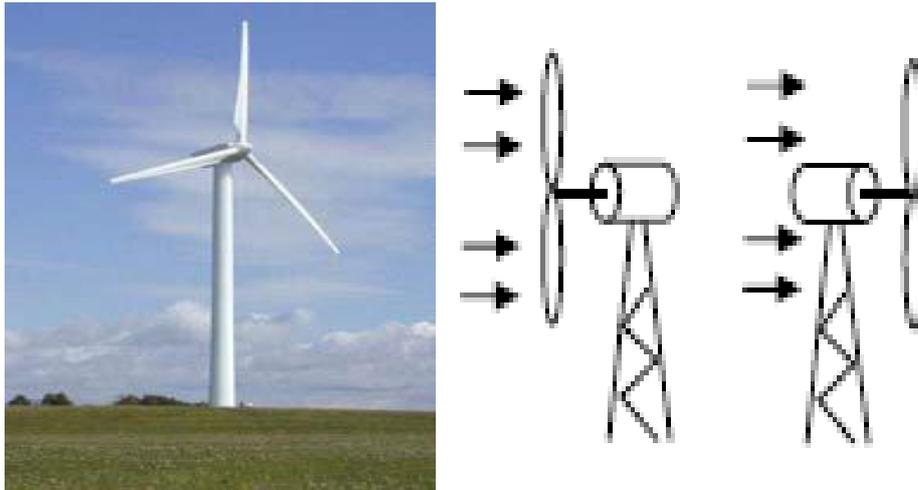


Figure I.6: Aéro-générateur à axe horizontal

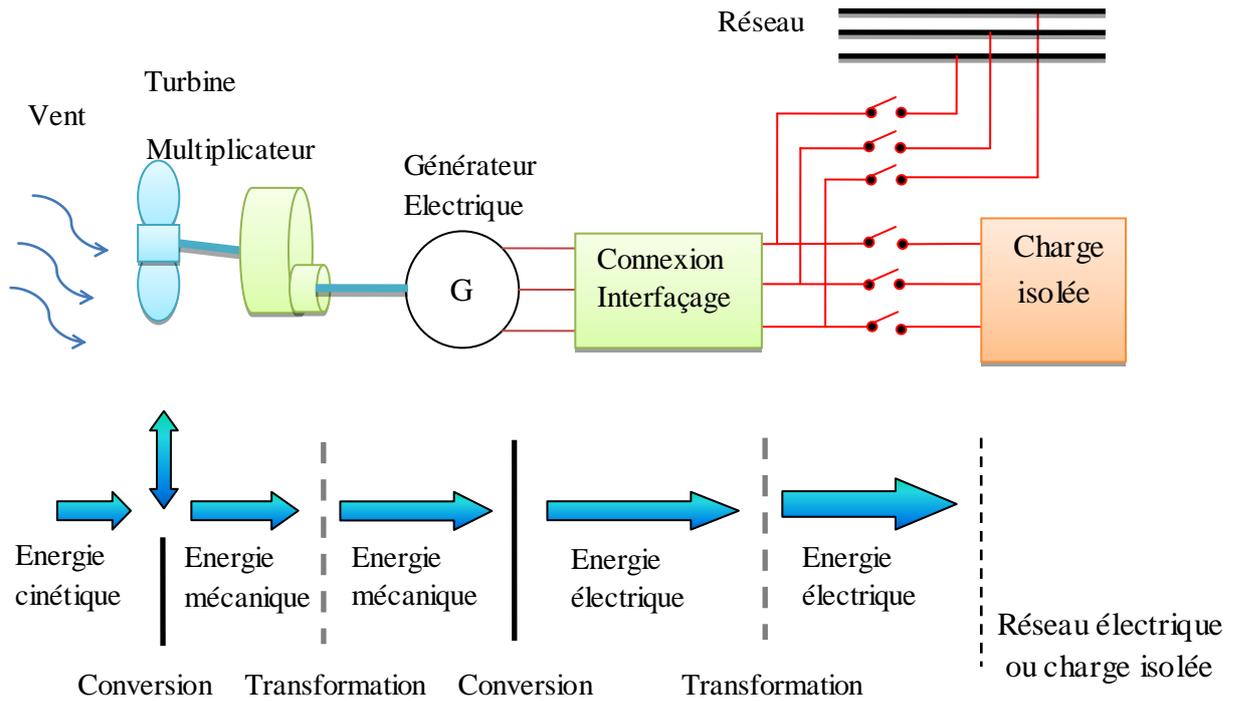
### I.8. Principe de conversion d'énergie

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active  $S$  de la voilure [Ham 08].

Les aéro-générateurs permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

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

La figure (I.7) représente la chaîne de conversion d'énergie au niveau de l'aéro-générateur.



**Figure I.7:** Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur

### I.8.1. Conversion en énergie mécanique

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s v_v^3 \quad \text{I.1}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v_v} \quad \text{I.2}$$

Appelée vitesse spécifique ou (Tip-speed-ratio).

Avec  $\Omega_1 R$  vitesse linéaire au bout des pales.

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre est :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega R}{v_v} \right) \rho s v_v^3 \quad \text{I.3}$$

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différents vitesses de vent (figure I.8).

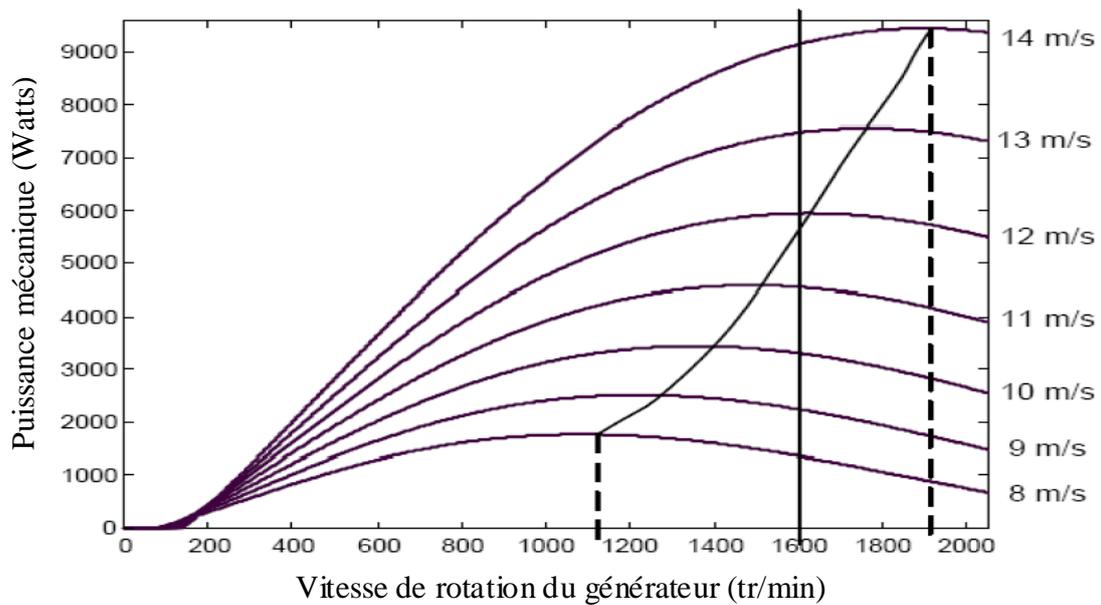


Figure I.8: Puissance mécanique pour un type d'éolienne donné [Ham 08]

### I.9. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge ;
- L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore) ;
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

#### 1. Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent de diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto-amorçée par condensateurs [tou 10].

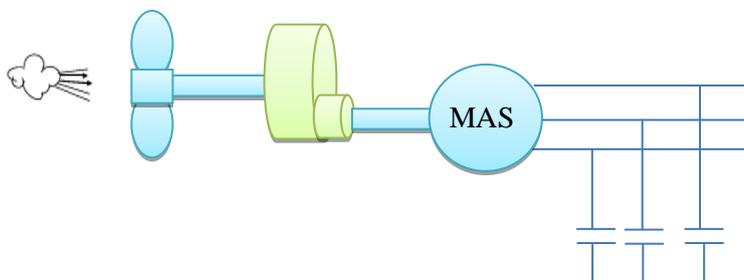


Figure. I.9 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage

## 2. Systèmes couplés au réseau alternatif

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [cam 03].

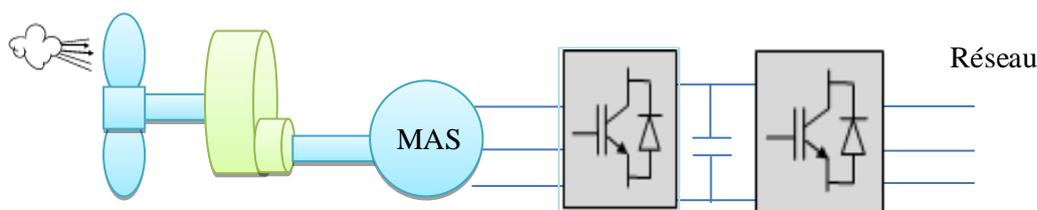
Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéro-turbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance.

### 2.1. Machine asynchrone à cage

Les machines électriques asynchrones à cage 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 sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction [Tou 10].

Dans les années 90, les danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant voir la figure I.10 [Tou 10].

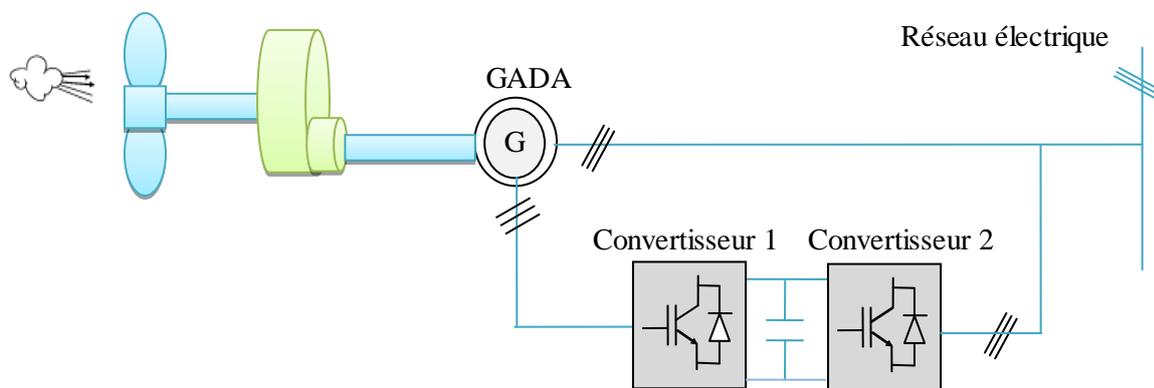


**Figure I.10 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone à fréquence variable.

## 2.2. Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage (figure I.11).



**Figure I.11 :** Système éolien basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage électronique du glissement (fonctionnement à vitesse variable)

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [Tou 10].

## 2.3. Machines synchrones

### a) Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine (synchrones à rotor bobiné) possède l'inconvénient de la nécessité d'une source d'alimentation indépendante de l'inducteur en puissance. Un autre inconvénient est la nécessité d'un entretien régulier du collecteur (système bagues-balais).

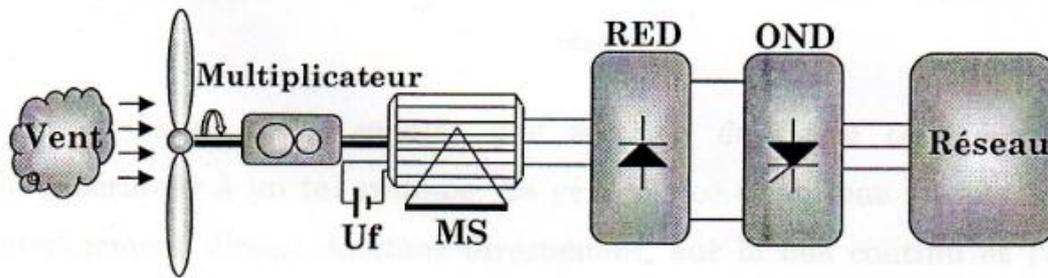


Figure I.12 : système éolienne basé sur une machine synchrone à rotor bobiné

### B) Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les systèmes de conversion basés sur des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse. Ce mode de transformation de puissance (transmission direct) offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes. De part son aimantation permanente à plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit, notamment le système bagues balais et le multiplicateur de vitesse. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible.

Les éoliennes à base de MSAP présentent un bon rendement, un facteur de puissance élevé et un taux de défaillance minime par rapport aux autre machines, elles ne nécessitent presque aucun entretien puisque il n'y a que des hélices qui sont en mouvement [Mir 05].

L'inconvénient unique de ces machines est la matière rare de l'aimant et son cout élevé. Une association de ces éoliennes à une électronique de puissance garantit les performances énergétiques en terme de signal induit, et encore le moindre cout de ces installations c'est ce qui fait d'ailleurs en ces éoliennes le premier rival des éoliennes à base de MAS et MADA [Abd 04].

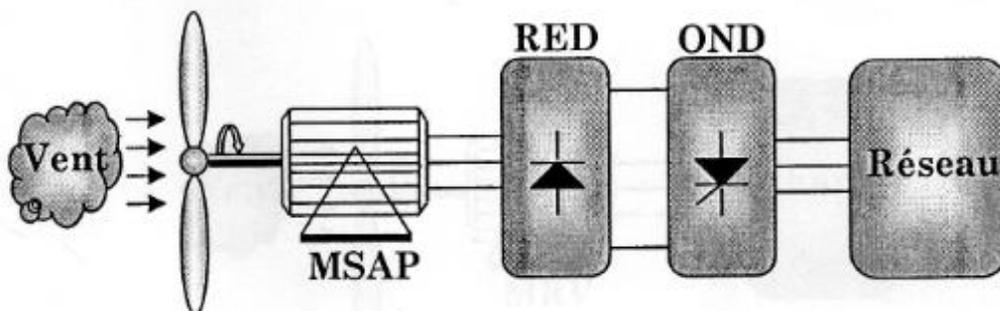


Figure I.13 : Système éolienne basé sur une MSAP couplé au réseau

### I.10. Motif de choix de la génératrice (GSAP) pour une éolienne

La plupart des éoliennes urbaines sont basées sur des machines synchrones à aimants permanents [Mor 05]. Par rapport aux autres éoliennes, l'éolienne à base d'une GSAP a un meilleur rendement, en vue de l'absence de divers facteurs embêtants, notamment :

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

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

#### GSAP à flux radial

elle permet d'avoir de bonnes performances sur une grande plage de variation de la vitesse de rotation [Hou 08].

#### GSAP à flux axial

Le couple produit est beaucoup plus important que celui de la machine précédente et alors la possibilité d'assembler plusieurs machines sur son axe afin d'accroître ce couple [Mor 05].

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

C'est une nouvelle technologie présentant un couple massique important et la possibilité d'avoir un très grand nombre de pôles. Cependant, ces atouts sont contrebalancés de conception et encore une réactance synchrone importante qui dégrade son facteur de puissance [Hou 08].

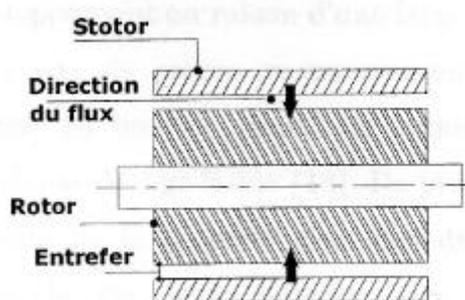


Figure I.14 : GSAP à flux radial

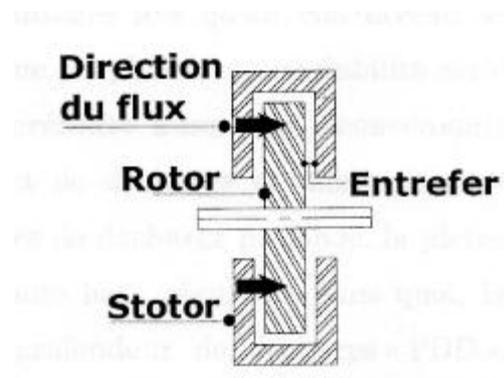


Figure I.15 : GSAP à flux axial

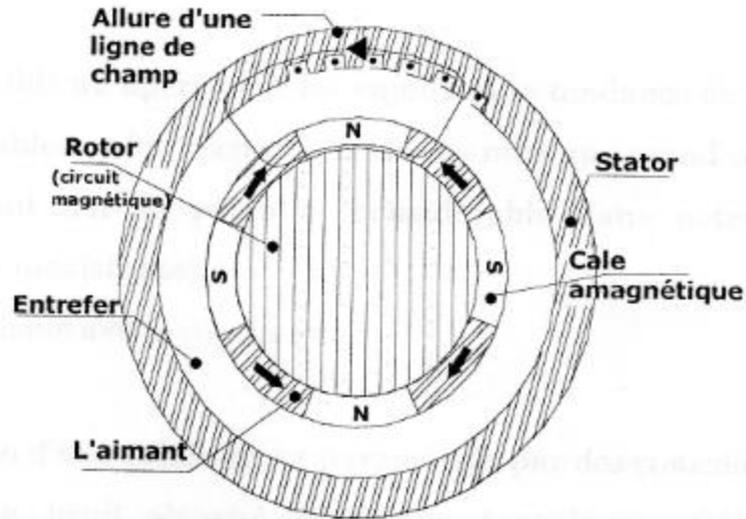


Figure I.16 : GSAP à flux tangentiel

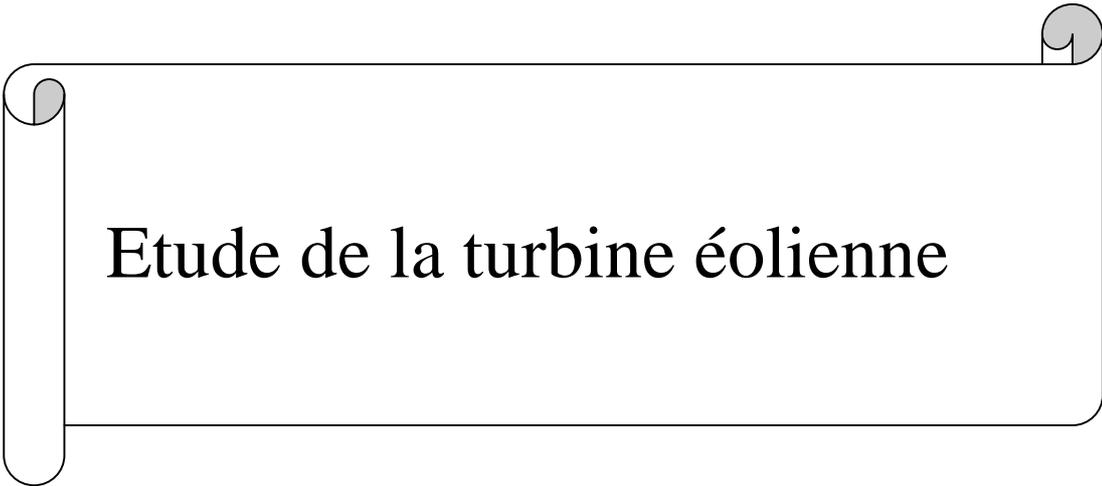
### I.11.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, son historique et son évolution, puis, un bref aperçu sur les différents types des éoliennes. On a présenté aussi la variation de la puissance extraite du vent en fonction de la vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent.

Les machines électriques utilisées dans la conversion aérodynamique sont aussi présentées avec quelques spécifications propres liées aux structures d'alimentation différentes. Puis on a cité quelques avantages liés à la croissance de l'énergie éolienne et quelques inconvénients liés à l'empêchement de son avancement.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude, à la modélisation et la simulation numérique de la turbine éolienne.

---



# Etude de la turbine éolienne

## II.1.Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude du fonctionnement et à la modélisation de la turbine éolienne. La connaissance des paramètres de la turbine éolienne, précisément sa courbe du maximum de puissance, permet de faciliter l'extraction du maximum de puissance de l'énergie cinétique du vent.

La limitation de la puissance pour les forts vents est aussi importante que l'extraction du maximum de puissance. Par conséquent, une technique de limitation est décrite et les résultats de simulation obtenus sous Matlab sont présentés.

## II.2.Mode de fonctionnement des éoliennes

Suivant la vitesse de rotation, les éoliennes sont souvent regroupées en deux catégories :

Les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

### II.2.1.Eoliennes à vitesse fixes :

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales. Chaque pale est alors motorisée pour pivoter sur elle-même. Le souci d'obtenir une vitesse constante s'explique par le mode de génération d'énergie [Tou99]. Ses avantages sont les suivants [Cam03]:

- Système électrique plus simple ;
- Plus grand fiabilité ;
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- Pas besoin de système de commande électronique ;
- Moins chère.

### II.2.2.Eoliennes à vitesse variable :

Le principe intérêt du fonctionnement à vitesse variable est l'optimisation de l'énergie captée par l'éolienne. Ce sont des règles générales des éoliennes qui utilisent de l'électronique de puissance pour la conversion d'énergie [Tou 10].

#### a. Avantages

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

#### b. Inconvénients

- Utilisation des machines spéciales ;
- Convertisseur de puissance (complexe).

### II.3. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

La relation I.1 indique que la puissance éolienne captée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Donc, il existe pour la puissance éolienne nominale  $P_n$  une vitesse du vent nominale pour laquelle l'aérogénérateur est bien dimensionné dans ses divers éléments.

A coté de la vitesse nominale  $v_n$  on spécifie aussi [Nik94] :

- Vitesse de démarrage  $v_d$  qui représente la vitesse de début de fonctionnement ;
- Vitesse maximale du vent  $v_{max}$  pour laquelle la turbine ne convertit plus d'énergie éolienne, pour des raisons de sécurité de fonctionnement.

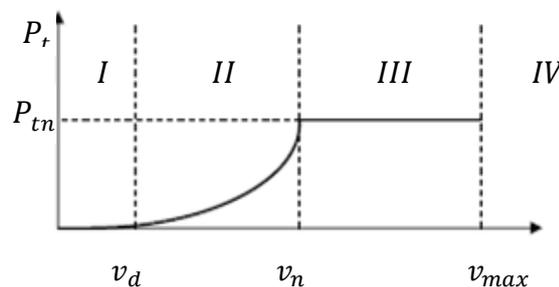
Les vitesses  $v_d$ ,  $v_n$  et  $v_{max}$  définissent quatre zones de fonctionnement sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (voir figure II.1) :

La zone I: où  $P_t=0$ , la turbine ne fonctionne pas ;

La zone II: la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent ;

La zone III: la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance  $P_t$  fournie reste égale à  $P_{tn}$ ;

La zone IV: il faut arrêter le transfert d'énergie par un système de sureté.



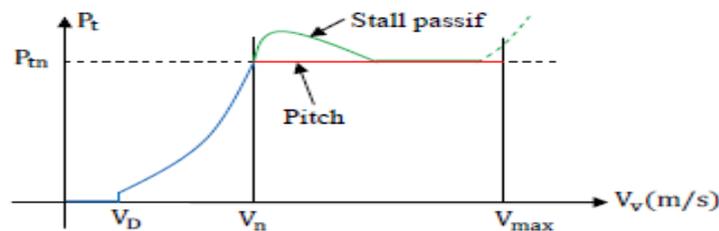
**Figure II.1** : Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

Comme déjà mentionné, la puissance captée par l'éolienne doit être limitée à sa valeur maximale lorsque le vent devient trop important. Il existe deux grandes stratégies de contrôle de la puissance aérodynamique d'une éolienne [Lop 00, Rog 04] :

D'une part, le comportement aérodynamique de la turbine peut être contrôlé activement en modifiant l'angle de calage des pales autour de l'axe longitudinal. Ce type de contrôle est appelé pitch control ou variation de l'angle de calage. Ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire par la mise en drapeau des pales. L'inconvénient principal des systèmes utilisant ce mode de contrôle provient de la nécessité d'avoir un dispositif, électrique ou hydraulique, de mise en pas des pales et un système de contrôle associé. D'où une complexité et un coût supplémentaire.

D'autre part, le comportement des pales peut évoluer de manière passive en fonction de la valeur du coefficient de vitesse spécifique. En effet, à partir d'une certaine vitesse du vent, la turbulence provoquée par le profil des pales entraîne un décrochage aérodynamique et par suite une décroissance du couple capté par les pales. Ce genre de contrôle est appelé stall control ou contrôle par décrochage aérodynamique. Les éoliennes utilisant ce mode de contrôle possèdent en général un mécanisme de freinage en bout de pale.

La figure II.2 présente les allures de la puissance en fonction de la vitesse du vent pour les deux modes de contrôle [Mun 08]. Le décrochage aérodynamique des pales donne une allure peustable à la courbe de puissance et la régulation par calage des pales permet de maintenir constante la puissance fournie par l'éolienne, pour les mêmes vitesses du vent.

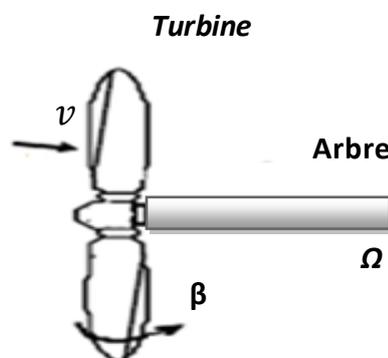


**Figure II.2 :** Caractéristiques de puissance pour les deux modes de régulation

Les éoliennes actuelles utilisent exclusivement le pitch control. Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, le stall actif, dans lequel le décrochage est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch [Rog 04].

#### II.4. Modélisation des pales

Nous considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice (Figure II.3).



**Figure II.3 :** Turbine éolienne

La puissance cinétique du vent est donnée par [Ela 04] :

$$P_v = \frac{\rho s v^3}{2} \quad \text{II. 1}$$

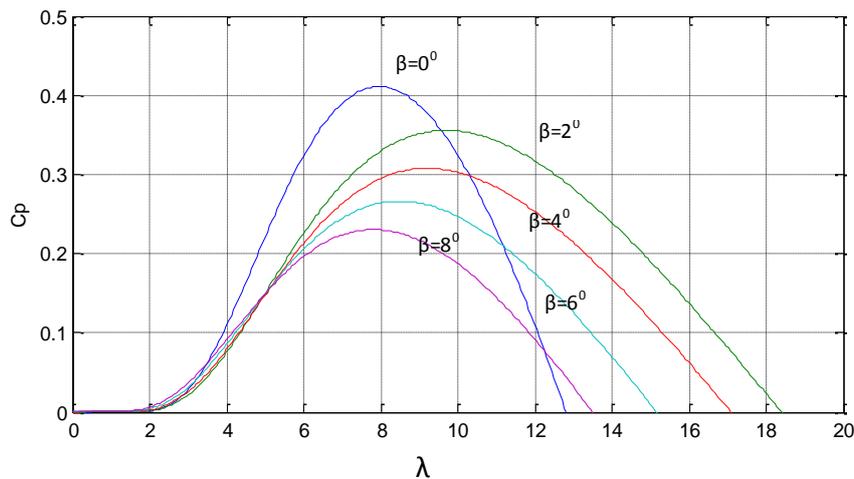
La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique  $C_{aero}$  est donné par l'expression suivante [Mul 00] [Beu 07] :

$$C_{aero} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho s v^3}{2 \Omega_t} \quad \text{II. 2}$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho s v^3}{2} \quad \text{II. 3}$$

- $C_p$  est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine (Figure II.4). Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse  $\lambda$  et l'angle d'orientation de la pale  $\beta$ ).



**Figure. II.4 :** Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine de puissance 660 kW [Ram 10]

Le ratio de vitesse  $\lambda$  est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine  $\Omega_t R$  et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad \text{II. 4}$$

Ainsi le schéma bloc des pales étudiées sont représentés en figure II.5

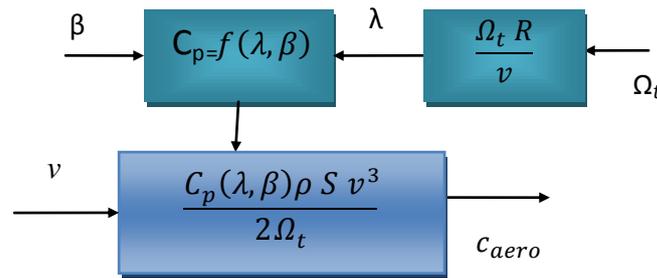


Figure. II.5 : Schéma bloc du modèle des pales

### II.5. Modélisation de l'arbre mécanique

L'évolution de la vitesse mécanique  $\Omega_t$  dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice  $C_{mec}$  qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice  $C_{em}$ , d'un couple de frottement visqueux  $C_{vis}$  et d'un couple du multiplicateur de vitesse  $C_g$

$$C_{mec} = J \frac{d}{dt} \Omega_t \tag{II.5}$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.6}$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux  $f$

$$C_{vis} = f \Omega_t \tag{II.7}$$

En remplaçant (II.6) et (II.7) dans (II.5), nous aurons :

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_t}{dt} + f \Omega_t \tag{II.8}$$

### II.6. Technique d'extraction du maximum de la puissance

L'équation II.3 qualifie la puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient  $C_p$ . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse  $\lambda$ ), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique  $P_{aéro}$  diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique.

$$P_{elec} = P_{aer} - P_{ertes} \tag{II.9}$$

La puissance mécanique ( $P_{mec}$ ) est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique ( $C_{mec}$ ) et la vitesse mécanique ( $\Omega_t$ )

$$P_{méc} = C_{mec} \Omega_t \tag{II.10}$$

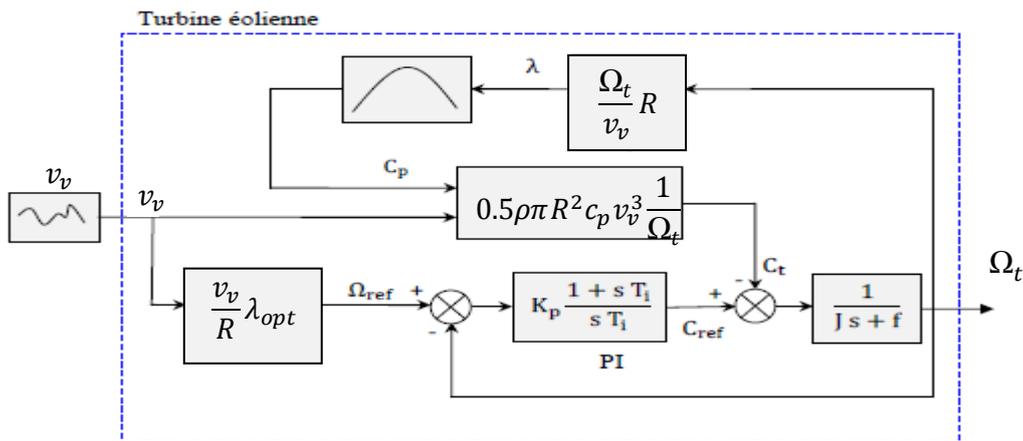
Dans contre partie, nous présenterons la stratégie de commande par asservissement de vitesse pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière maximiser la puissance électrique générée.

**II.6.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse**

Cette solution peut être appliquée lorsque la valeur de la vitesse spécifique optimale  $\lambda_{opt}$  est connue. En effet, selon la relation II-4 la vitesse de référence est :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v_v \tag{II.11}$$

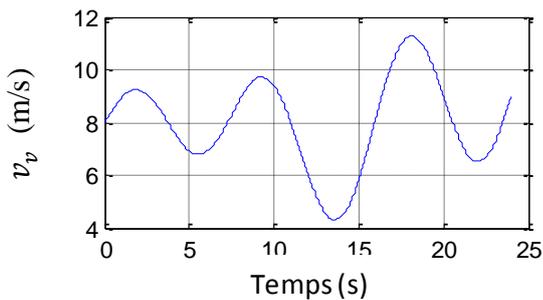
Le schéma de principe pour la simulation d'une turbine éolienne par cette méthode, en utilisant un régulateur PI (proportionnel-intégral) pour l'asservissement de la vitesse mécanique, est donné sur la **figure II.6**



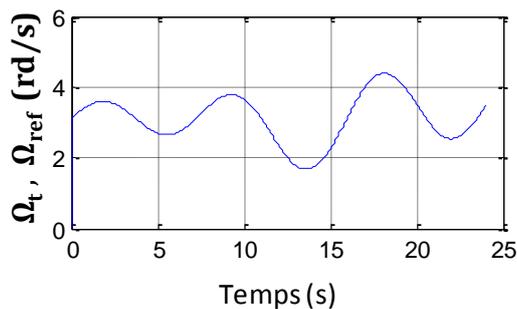
**Figure II.6 :** Schéma bloc de la simulation de la turbine éolienne

**II.7. Résultat de simulation**

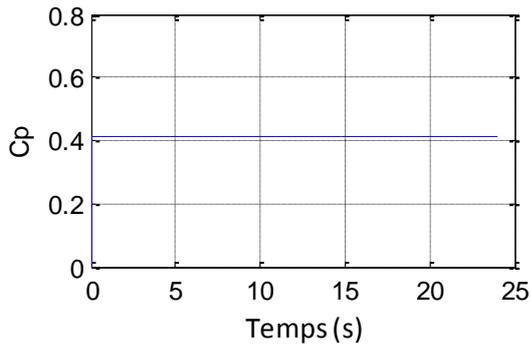
Les résultats de simulation obtenus (les paramètres sont donnés en annexe) en asservissement de vitesse de type PI, sont donnés sur les figures (II.7) – (II.13) :



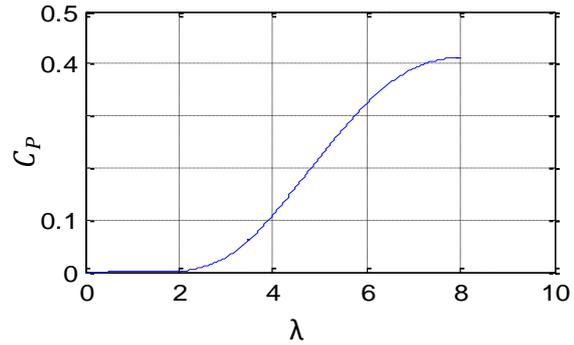
**Figure II.7 :** Vitesse du vent



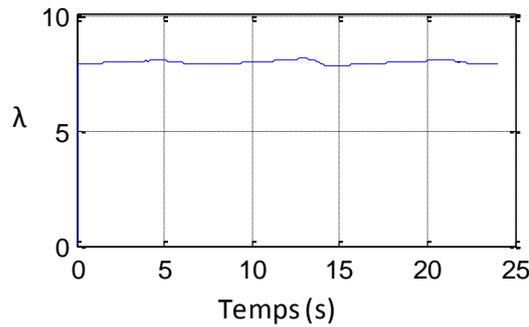
**Figure II.8 :** Vitesse de la turbine éolienne



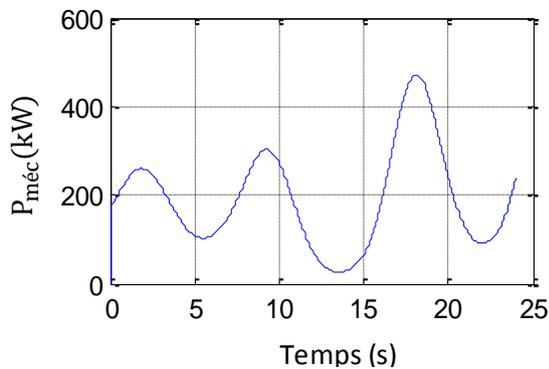
**Figure II.9 :**  $C_p$  en fonction du temps



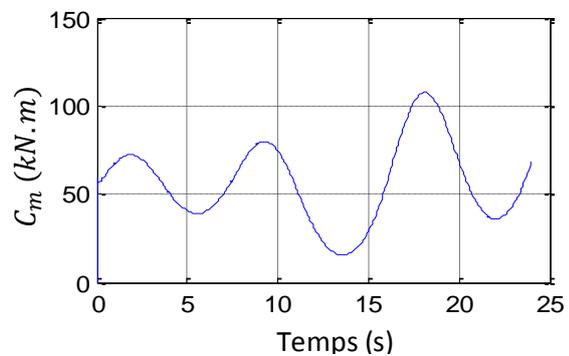
**Figure II.10 :**  $C_p$  en fonction de ratio de vitesse



**Figure II.11 :** Ratio de vitesse en fonction du temps



**Figure II.12 :** Puissance mécanique

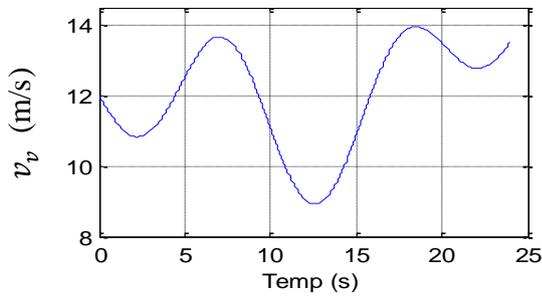


**Figure II.13 :** Couple mécanique

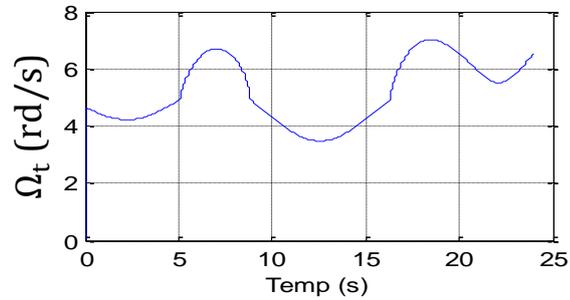
On peut remarquer que la vitesse de rotation suit parfaitement sa référence, qui est variable selon le profil du vent imposé, le coefficient de puissance et la vitesse spécifique sont maintenus à leurs valeurs optimales. Cela permet d'avoir la puissance maximale extractible. Cette méthode nécessite la mesure de la vitesse du vent par un anémomètre disposé sur la nacelle, cela constitue un inconvénient car la vitesse mesurée ne correspond pas exactement à la vitesse au niveau des pales et économiquement cette solution est onéreuse et sa réalisation pratique présente quelques difficultés.

**II.8.Résultat de simulation avec limitation de puissance sans utiliser le décalage des pales**

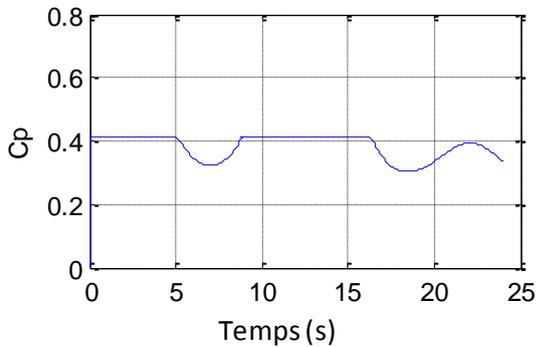
Nous avons opté pour le profil de vent donné sur la figure (II.17) les résultats de simulation obtenus sous matlab sont montrés sur les figure (III.18)-(III.23):



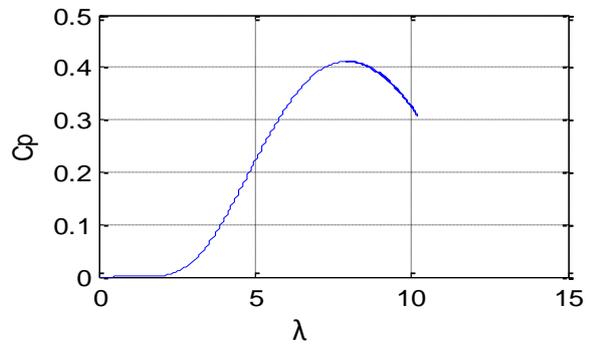
**Figure II.14 : Vitesse du vent**



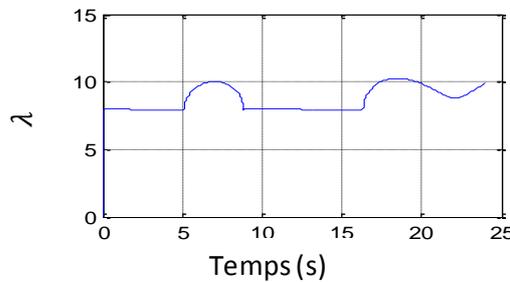
**Figure II.15 : Vitesse de la turbine éolienne**



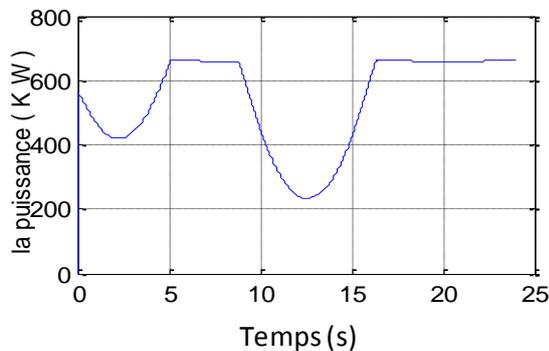
**Figure II.16 :  $C_p$  en fonction du temps**



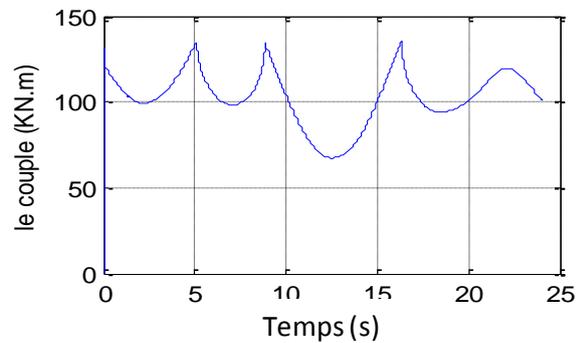
**Figure II.17 :  $C_p$  en fonction du ratio de vitesse**



**Figure II.18 : Allure du ratio de vitesse en fonction du temps**



**Figure II.19 : Puissance mécanique**



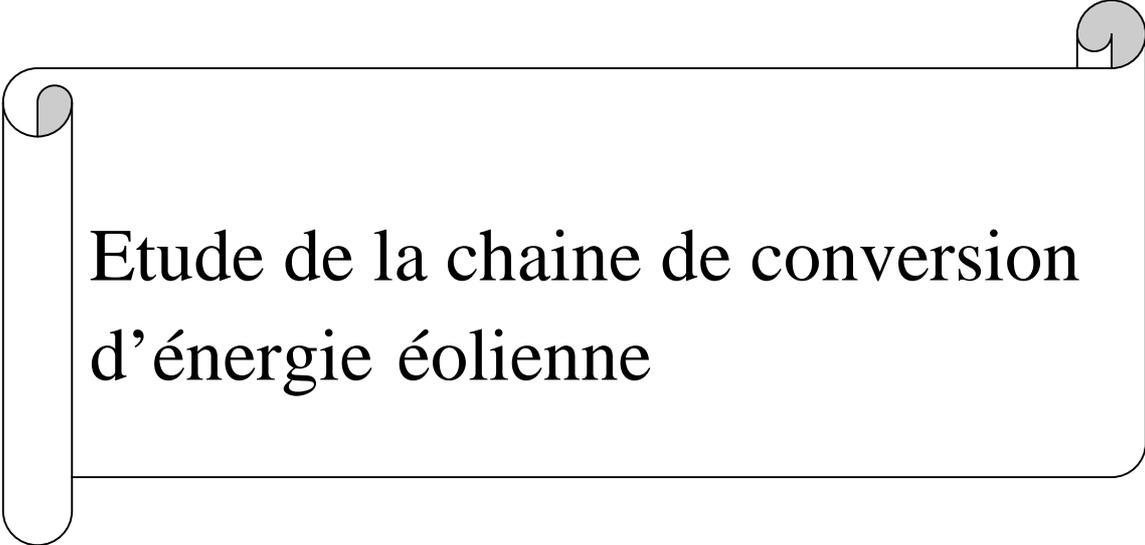
**Figure II.20 : Couple mécanique**

Le profil de la vitesse du vent considéré présente deux zones de fonctionnement au dessus de la vitesse nominale. Sur ces deux zones, on constate sur les figures (II.16 II.18) que le coefficient de puissance diminue alors que la vitesse spécifique augmente ce qui correspond à une limitation de puissance à droite du point optimal sur la caractéristique  $\lambda - C_p$ .

## **II.7.Conclusion**

Dans ce chapitre une modélisation de la turbine éolienne est effectuée avec une description de ces différentes zones de fonctionnement, principalement les zones de maximisation et de limitation de la puissance captée par la turbine. A cet effet, on a utilisé un asservissement de vitesse pour maximisation et limitation de la puissance.

---

A decorative scroll graphic with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, containing the title text.

# Etude de la chaine de conversion d'énergie éolienne

### III.1.Introduction

Cette partie est dédiée à l'étude d'une chaîne de production éolienne de grande puissance basée sur une machine synchrone à aimants permanents sans multiplicateur de vitesse. Chaque élément de la chaîne de conversion est modélisé en vue d'une simulation globale du système de production raccordé au réseau électrique de distribution. Les résultats de simulation et interprétations sont donnés à la fin du chapitre.

### III.1.Description de la chaîne de production

Comme le montre la figure (III.1), le système est composé d'une éolienne (tripale), d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP), un filtre de raccordement au réseau électrique.

L'éolienne d'une puissance de 660 kW est contrôlée pour le fonctionnement dans les deux zones données sur la figure (II.3) ; c'est-à-dire, la maximisation de puissance dans la zone II selon la courbes des maxima de puissance de la turbine éolienne et une limitation de puissance dans la zone III. sans modification de l'angle de calage.

La machine synchrone à aimants permanents à nombre de pôles élevé,  $2p=128$  permet un fonctionnement à faible vitesse de rotation.

Les convertisseurs d'électronique de puissance (redresseur et onduleur) sont contrôlés par la technique MLI générée pour le redresseur à l'aide du contrôle par hystérésis des courants dans la machine. Pour l'onduleur côté réseau la MLI est générée à travers le contrôle des puissances active et réactive envoyées au réseau.

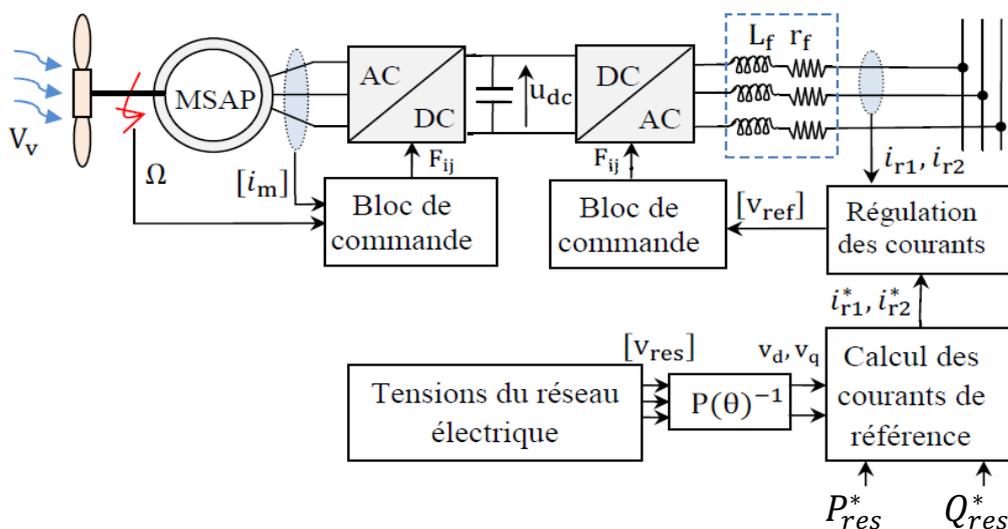


Figure III.1 : Schéma du système étudié et de la stratégie de sa commande

### III.3.Modélisation du générateur synchrone en régime linéaire

Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné ont un stator identique. Les aimants permanents à terres rares utilisés récemment dans les machines synchrones permettent d'avoir des couples massiques élevés. Nous considérons le cas d'une machine synchrone à pôles saillants, à aimants permanents et sans amortisseurs. Le modèle de la MSAP à pôles lisses est obtenu par une simple modification des équations obtenues pour la machine considérée.

#### III.3.1.Equations initiales de la machine

Considérons une machine synchrone à 2p pôles sans amortisseurs (figure III.2). L'ensemble d'équations (électriques, magnétiques et mécanique) régissant le fonctionnement de la machine est donnée dans les sections suivantes.

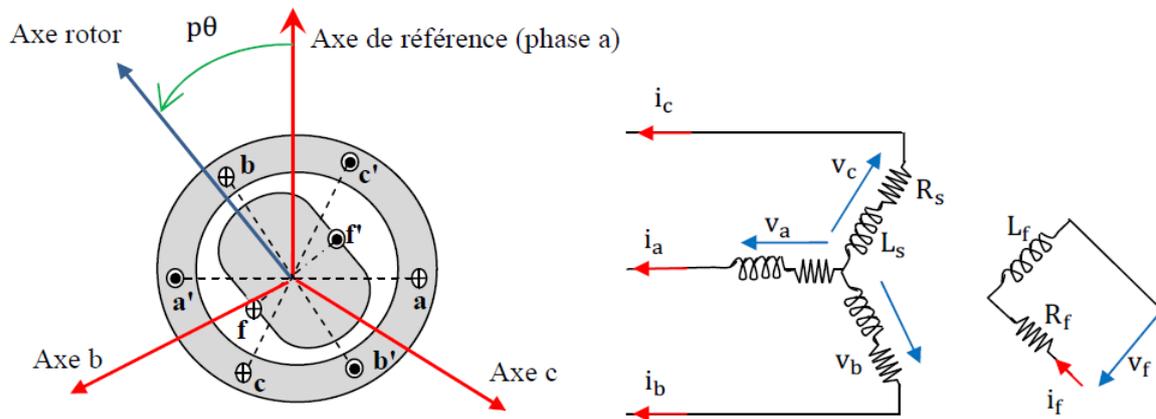


Figure III.2: Représentation symbolique de la machine synchrone

#### 1. Equations des tensions

Sous forme matricielle, les tensions statoriques s'expriment par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \tag{III.1}$$

La tension d'excitation est donnée par l'équation :

$$V_f = R_f I_f + \frac{d}{dt} \Phi_f \tag{III.2}$$

## 2. Equations des flux magnétiques

Les équations des flux s'écrivent :

$$[\Phi]_{abc} = [L_s][i]_{abc} + [M_{sf}]i_f \quad \text{III.3}$$

$$\Phi_f = [M_{fs}][i]_{abc} + L_f i_f \quad \text{III.4}$$

Dans une machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statorique est une fonction de la position  $\theta$  du rotor, elle est de la forme [Pou95, Jea99, Moh03]:

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad \text{III.5}$$

La matrice  $[L_{s0}]$  (à coefficients constants) a pour expression :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad \text{III.6}$$

Les termes de la matrice  $[L_{s2}(\theta)]$  sont fonction de l'angle  $2p\theta$ , elle est donnée par :

$$[L_{s2}](\theta) = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2p\theta) & \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta) \\ \cos(2p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta) & \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{III.7}$$

Le terme  $L_{s2}$  est constant.

La matrice de couplage stator-rotor a pour expression :

$$[M_{fs}] = [M_{sf}]^t = M_0 \left[ \cos(p\theta) \quad \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \right] \quad \text{III.8}$$

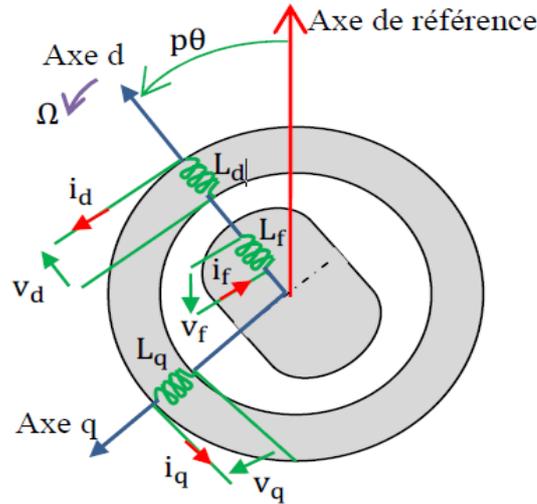
## 3. Equation mécanique

L'équation mécanique dépende de la charge. Son expression la plus simple est :

$$c_{em} = J \frac{d}{dt} \Omega + c_{mec} \quad \text{III.9}$$

### III.3.2. Transformation de Park

La représentation schématique de la machine synchrone équivalente au sens de Park est donnée sur la figure (III.3)



**Figure III.3:** Machine équivalente au transformateur de Park

### 1. Matrice de Park et relations de passage

On note le vecteur  $[X]$  comme suit ( $[X]$  peut être le vecteur des tensions, des flux ou des courants) :

$[X]_{dq} = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}$  : Dans le repère tournant de Park lié au rotor.

La matrice de Park est donnée comme suit [Jea99]

$$p(\varepsilon) = C R(\varepsilon) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & -\sin(\varepsilon) \\ \cos(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad \text{III.10}$$

Le passage du repère initial au repère de Park ou l'inverse se fait à l'aide des relations suivantes :

$$\begin{cases} [X]_{dq} = p^t(\varepsilon)[X]_{abc} \\ [X]_{abc} = p(\varepsilon)[X]_{dq} \end{cases} \quad \text{III.11}$$

### 2. Equations de la machine dans le repère de Park

#### a) Equations des flux

Les expressions des flux s'obtiennent en partant des équations (III-3) et (III-4) et en utilisant les relations de passage (III-11) (on prend  $\varepsilon = p\theta$ ):

$$\begin{cases} \Phi_d = (L_{s0} - M_{s0} + \frac{3}{2}L_{s2})i_d + M i_f \\ \Phi_q = (L_{s0} - M_{s0} + \frac{3}{2}L_{s2})i_q \\ \Phi_f = M i_d + L_f i_f \end{cases} \quad \text{III.12}$$

Avec :  $M = \sqrt{\frac{3}{2}} M_0$

On constate que le découplage entre les axes est réalisé et l'angle  $\theta$  n'apparaît plus dans les équations des flux. Les expressions des inductances directe et quadratique ( $\Phi_d$  et  $\Phi_q$ ) sont exprimées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} L_d = (L_{s0} - M_{s0}) + \frac{3}{2}L_{s2} \\ L_q = (L_{s0} - M_{s0}) + \frac{3}{2}L_{s2} \end{cases} \quad \text{III.13}$$

### b) Equations des tensions

A l'aide des équations (III.1), (III.2) et des relations de passage (III.11), on obtient les équations des tensions comme suit :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + p\Omega \Phi_q + \frac{d}{dt} \Phi_d \\ V_q = R_s i_q + p\Omega \Phi_d + \frac{d}{dt} \Phi_q \\ V_f = L_f i_f + \frac{d}{dt} \Phi_f \end{cases} \quad \text{III.14}$$

### c) Expression du couple électromagnétique

La puissance est conservée lors du passage du repère initial au repère de Park, son expression est la suivante :

$$p = v_f i_f + (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) = v_f i_f + (v_d i_d + v_q i_q) \quad \text{III.15}$$

Le développement de cette expression donne les différents termes, qui correspondent aux pertes Joule, à la puissance électromagnétique emmagasinée dans les bobinages et la puissance mécanique convertie, qui a pour expression :

$$p_{mec} = p \Omega (\Phi_d i_d + \Phi_q i_q) \quad \text{III.16}$$

L'équation du couple électromagnétique est donc :

$$c_{em} = \frac{p_{mec}}{\Omega} = p (\Phi_d i_d + \Phi_q i_q) \quad \text{III.17}$$

Ou encore :

$$c_{em} = p [(L_d - L_q) i_d + M i_f] i_q \quad \text{III.18}$$

On introduisant l'équation (III-18) dans l'équation mécanique (III-9), on obtient :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = p [(L_d - L_q) i_d + M i_f] i_q - C_m \quad \text{III.19}$$

### III.3.3. Modèle d'état de la machine synchrone à aimants permanents

Dans le cas de la machine synchrone à aimants permanents (excitation constante), La troisième expression (tension d'excitation) du système d'équations (III-14) est inutile. Il suffit de poser :

$$\Phi_f = Mi_f \quad \text{III.20}$$

Ainsi les équations des flux direct et quadratique deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + Mi_f \\ \Phi_q = L_q i_q \\ \Phi_f = Mi_f \end{cases} \quad \text{III.21}$$

En introduisant les expressions des flux (III-21) dans les équations de tensions (III.14), on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p\Omega \begin{bmatrix} 0 & -L_d \\ L_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad \text{III.22}$$

Tel que :  $[e]_{dq}$  représente les forces contre électromotrices directe et quadratique, proportionnelles à la vitesse  $\Omega$  :

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ p\Phi_f\Omega \end{bmatrix} \quad \text{III.23}$$

Le choix de  $i_d$  et  $i_q$  comme variables d'état dans l'équation (III-22), nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{R_s}{L_d} i_d + p \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega + \frac{1}{L_d} V_d \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{R_s}{L_q} i_q - p \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega + p \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega + \frac{1}{L_q} V_q \end{cases} \quad \text{III.24}$$

Nous considérons une machine à rotor lisse, à cet effet la matrice  $L_{s2}(\theta)$  est nulle

Et  $L_q = L_d$  l'équation du couple (III-18) se simplifie en :

$$C_{em} = p\Phi_f i_q \quad \text{III.25}$$

En tenant compte de l'équation mécanique (III-19), l'équation différentielle en vitesse mécanique sera :

$$\frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} (p\Phi_f i_q - C_{mec}) \quad \text{III.26}$$

La vitesse mécanique du rotor est exprimée en fonction de la position du rotor par l'équation :

$$\Omega = \frac{d}{dt} \theta \quad \text{III.27}$$

Finalement, on obtient le modèle d'état avec  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $\Omega$  et  $\theta$  comme variables :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ \Omega \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + p \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q - p \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega + p \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega \\ \frac{1}{J} (p \Phi_f \Omega - C_{mec}) \\ \Omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \quad \text{III.28}$$

### III.4.Stratégie de commande de la MSAP

#### III.4.1.Principe de la commande

En reprenant l'équation (III.18), on constate que lorsque le courant  $i_d$  est nul, le couple devient proportionnel au courant  $i_q$ , en effet :

$$C_{em} = p \Phi_f i_q \quad \text{III.29}$$

Cela permet d'envisager une commande en couple de la machine par un asservissement à zéro du courant direct. Le courant quadratique de référence  $i_q^*$  est obtenu par la boucle de régulation de la vitesse de rotation de la génératrice (par un régulateur PI dont les paramètres sont donnés en annexe). Il s'agit d'un pilotage vectoriel de la MSAP qui nécessite la connaissance de la position du vecteur flux rotorique. Elle peut être obtenue grâce à la mesure de la position angulaire du rotor à l'aide d'un capteur de position [Mir05], ou à partir d'une estimation analytique [Nah01, Ros09]. L'annulation du courant direct, qui correspond à l'alignement du flux d'excitation sur l'axe direct fait que l'angle  $\alpha$  entre le vecteur force électromotrice  $E_s$  de la machine et son courant  $I_s$  est nul (figure III.4), ce qui ne permet pas d'avoir un facteur de puissance unitaire [Mir05].

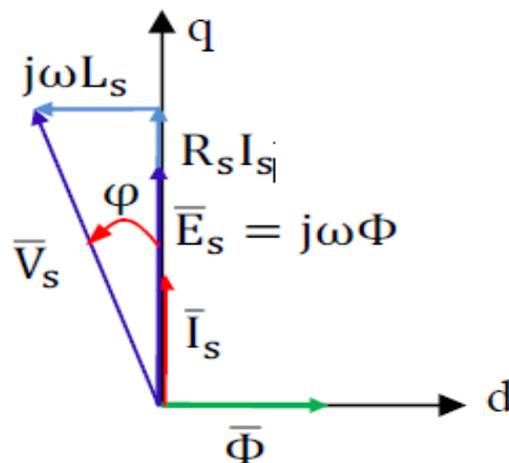
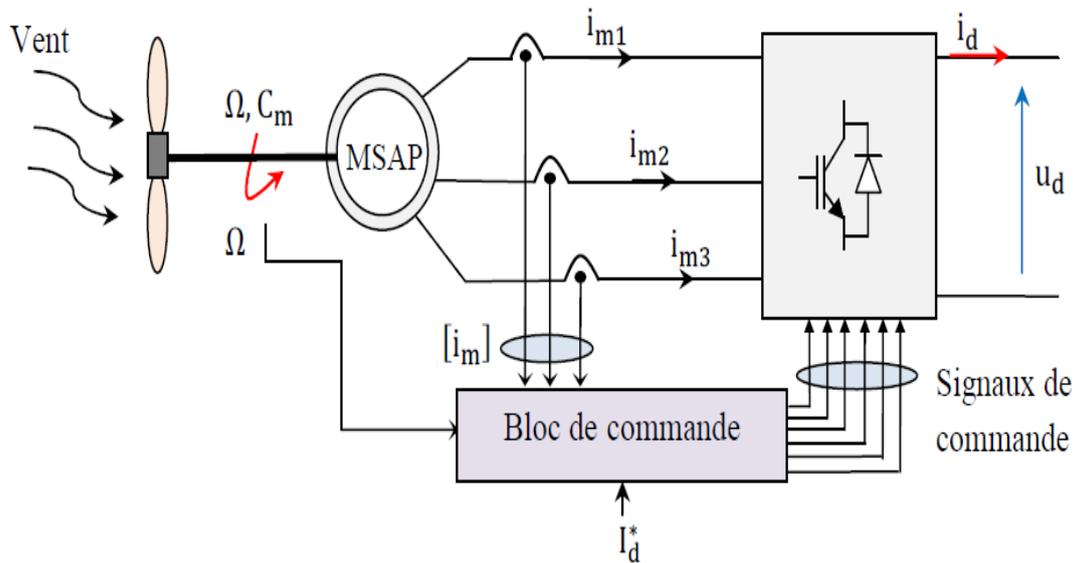


Figure III.4: Diagramme vectoriel d'une phase statorique

Le schéma de la figure (III.5) donne le principe de la commande adoptée pour la génération des signaux de commande du redresseur.



**Figure III.5** : Principe de la commande du redresseur (côté machine)

### III.4.2. Régulation des courants

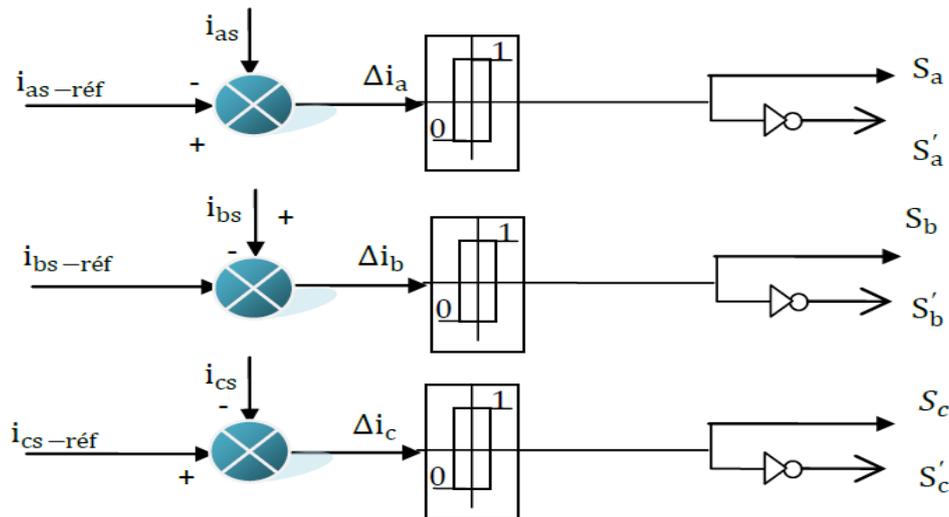
Le principe général de ce type de stratégie consiste à maintenir la variation du courant dans chaque phase dans une bande de largeur donnée, centrée autour des courants de référence. Ce principe est schématisé par la figure (III.6).

Cette stratégie permet une réaction rapide à des variations de la consigne ou des paramètres de la partie puissance (charge).

Un comparateur à hystérésis mesure la différence entre le courant réel et sa référence

$$\Delta i_s = i_s - i_{s\text{réf}}$$

- Si :  $\Delta i_d \geq h$  la tension est forcée à son niveau minimal pour faire décroître le courant,
- et le comparateur à hystérésis sature  $T_i'$  qui continue à conduire
- $\Delta i_d \leq -h$  la tension est forcée à son niveau maximal pour faire accroître le courant, et le comparateur à hystérésis bascule et sature  $T_i$  d'où la nature itérative de l'opération.



**Figure III.6 :** Comparaison des courants de références avec les courants réels

Pour chaque bras de l'onduleur, les transistors  $T_i$  et  $T_i'$  sont reliés l'un à la sortie du comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur. L'entrée du comparateur est attaquée par la différence  $\Delta i$  entre le courant réel  $i_s$  et le courant de référence  $I_{sréf}$ . Le changement de signe de cette différence entraîne le basculement du comparateur, par conséquent l'un des deux transistors  $T_i$  ou  $T_i'$  qui conduisait initialement cesse de conduire et laisse la relève à l'autre.

Les fonctions logiques  $S_i$  représentant les interrupteurs sont définies par les équations

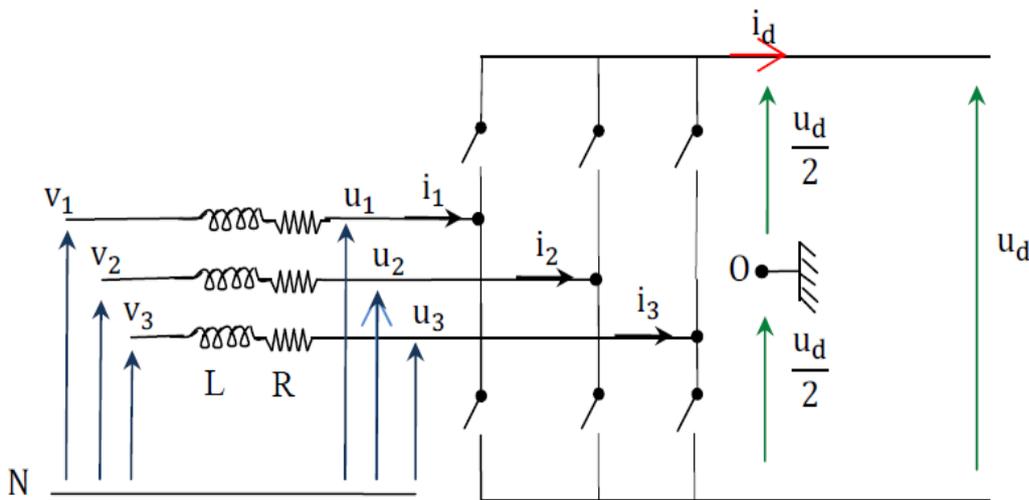
$$\begin{cases} S_i(k+1) = 0 & si : \Delta i > h \\ S_i(k+1) = 1 & si: \Delta i < -h \\ S_i(k+1) = S_i(k) & si: -h < \Delta i < h \end{cases} \quad \text{III.30}$$

Les courants de références sont :

$$\begin{cases} i_{as-réf} = i_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t) \\ i_{as-réf} = i_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{as-réf} = i_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{III.31}$$

### III.5. Modèle mathématique du convertisseur MLI

Le convertisseur statique est un élément clé dans la chaîne de conversion d'énergie, l'utilisation d'interrupteurs totalement commandables (commutation forcée) permet le contrôle des puissances active et réactive du côté de la machine comme du côté du réseau. La figure (III.7) représente un convertisseur à six interrupteurs commandés.



**Figure (III.7) :** Schéma de principe du convertisseur statique

Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un IGBT et d'une diode en antiparallèle. Il permet un fonctionnement à fréquence fixe (côté réseau) ou variable (côté machine). Les tensions  $v_1, v_2$  et  $v_3$  représentent les forces contre électromotrices de la MSAP ou les tensions du réseau. Les éléments (RL) représentent la résistance et l'inductance de la machine ou celle du filtre du raccordement au réseau. Les équations électriques relatives au schéma s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} v_1 - u_1 = L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 \\ v_2 - u_2 = L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 \\ v_3 - u_3 = L \frac{di_3}{dt} + Ri_3 \end{cases} \quad \text{III.32}$$

$$i_d = \sum_{j=1}^3 (F_j I_j)$$

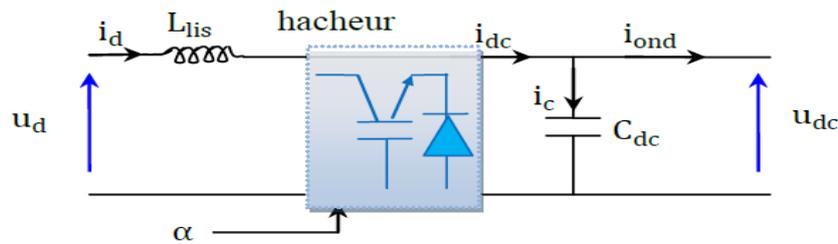
$F_j$  désigne la fonction de commutation relative à l'interrupteur haut de chaque bras du convertisseur ( $j=1, 2, 3$ ), elle est obtenue à la sortie des régulateur à hystérésis (MLI à hystérésis ou par la MLI triangulo-sinusoïdale).

En exprimant les tensions de phase par rapport au point milieu O et en considérant un système triphasé équilibré, on aboutit au modèle mathématique du convertisseur [Cap02][Gom05]:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \frac{u_d}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad \text{III.33}$$

### III.6. Régulation de la tension du bus continu

La tension continue, en amont du convertisseur DC/AC, est maintenue constante à sa valeur de référence à l'aide d'un hacheur survolteur. La commande du hacheur est obtenue à partir de la boucle de régulation de la tension  $u_{dc}$ . Le circuit électrique du bus continu est donné par la figure (III.8).



**Figure (III.8) :** Bus continu avec un hacheur survolteur

Les relations entre les courants et les tensions en amont et en aval du hacheur sont données par les expressions suivantes ( $\alpha$  est le rapport cyclique du hacheur) :

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{1}{1-\alpha} u_d \\ i_{dc} = (1-\alpha) i_d \end{cases} \quad \text{III.34}$$

Les équations électriques en aval du hacheur s'expriment par les relations suivantes :

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (i_{dc} - i_{ond}) \quad \text{III.35}$$

$$i_c = i_{dc} - i_{ond}$$

L'inversion directe de l'équation (III-35) donne le courant  $I_{ond}^*$  de référence qui s'exprime comme suit [Ham08]:

$$I_{ond}^* = i_{dc} - \text{PI}(s) (u_{dc}^* - u_{dc}) \quad \text{III.36}$$

On peut considérer la fonction de transfert entre les courants  $I_{ond}^*$  et  $i_{ond}$  du premier ordre avec une dynamique très élevée pour la synthèse du correcteur ; parce que la dynamique du courant est en générale plus rapide que celle de la tension [Ham 08]. Le schéma global de régulation est donné sur la figure (III.9), les paramètres figurant sur le schéma sont donnés en annexe.

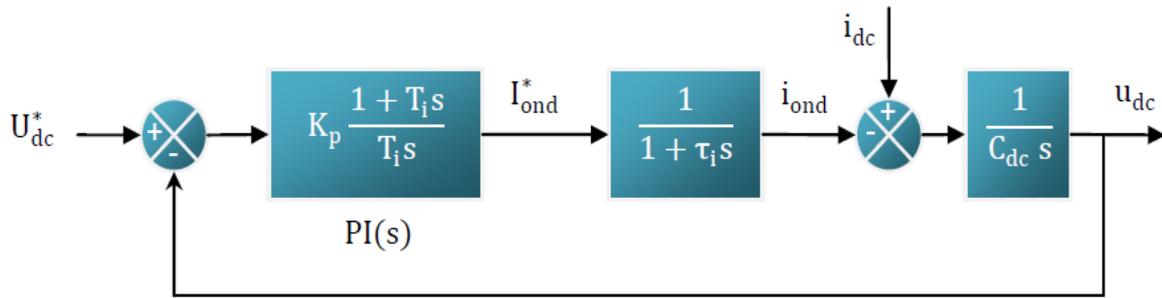


Figure III.9 : Régulation de la tension du bus continu

La puissance active est exprimée par le produit du courant continu par la tension comme suit :

$$p_{dc} = u_{dc} i_{dc} \tag{III.37}$$

### III.7. Commande de l'onduleur du côté réseau électrique

La commande de l'onduleur côté réseau a pour but d'avoir des courants et des tensions qui ont des formes d'ondes acceptables (aussi proche de la sinusoïde que possible) et assurer un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire. Par conséquent, la puissance réactive de référence est nulle et la puissance active correspond à la puissance optimale de l'éolienne. Le schéma de la figure (III.10) donne la stratégie de commande adoptée pour l'onduleur.

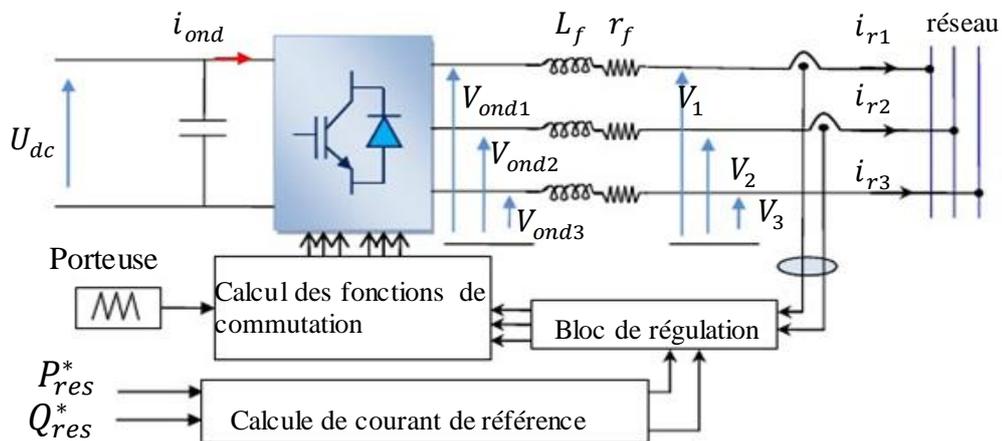


Figure (III.10) : Commande de l'onduleur du côté réseau électrique

#### III.7.1 Régulation des courants

Les équations électriques en aval de l'onduleur sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} v_{\text{ond1}} = V_1 + r_f i_{r1} + L_f \frac{d}{dt} i_{r1} \\ v_{\text{ond2}} = V_2 + r_f i_{r2} + L_f \frac{d}{dt} i_{r2} \\ v_{\text{ond3}} = V_3 + r_f i_{r3} + L_f \frac{d}{dt} i_{r3} \end{cases} \quad \text{III.38}$$

On considère un système de tensions triphasé équilibré, par conséquent on peut écrire :

$$i_{r1} + i_{r2} + i_{r3} = 0$$

Donc

$$i_{r3} = -(i_{r1} + i_{r2}) \quad \text{III.39}$$

En introduisant l'opérateur de Laplace dans les deux premières équations du système (III.34) les courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} i_{r1} = \frac{1}{r_f + L_f s} (v_{\text{ond1}} - v_{r1}) \\ i_{r2} = \frac{1}{r_f + L_f s} (v_{\text{ond2}} - v_{r2}) \end{cases}$$

En partant du modèle mathématique de l'onduleur (équation III.33), on définit les fonctions de conversion  $m_1$  et  $m_2$  comme suit [Aim04, Ham08]:

$$[m_1 \ m_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} [F_1 \ F_2 \ F_3] \quad \text{III.40}$$

Tel que :  $m_1, m_2 \in \{-1, 0, 1\}$

Les tensions composées modulées dans ce cas sont exprimées par :

$$\begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{pmatrix} = U_{dc} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} \quad \text{III.41}$$

Tel que :

$$\begin{cases} U_{13} = V_{\text{ond1}} - V_{\text{ond3}} \\ U_{23} = V_{\text{ond2}} - V_{\text{ond3}} \end{cases}$$

Les tensions simples modulées peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{\text{ond1}} \\ V_{\text{ond2}} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{pmatrix} \quad \text{III.42}$$

La qualité d'onde des tensions modulées dépend des performances de la régulation de la tension du bus continu. Les tensions de références sont obtenues par inversion direct de la relation (III.42), ce qui donne [Ham 08]:

$$\begin{pmatrix} U_{13}^* \\ U_{23}^* \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_{ond1}^* \\ V_{ond2}^* \end{pmatrix}$$

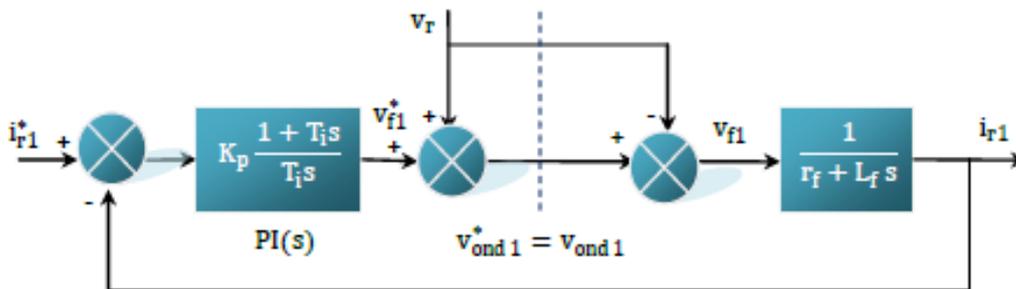
Les tensions simples de références, sont exprimées par la relation suivante [Ham08]:

$$\begin{pmatrix} V_{ond1}^* \\ V_{ond2}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{f1}^* \\ U_{f2}^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \end{pmatrix} \quad \text{III.43}$$

La régulation des courants envoyés au réseau, donne à la sortie des PI les tensions de références  $V_{f1}^*$  et  $V_{f2}^*$ , en effet [Ham 08]:

$$\begin{pmatrix} V_{f1}^* \\ V_{f2}^* \end{pmatrix} = \text{PI}(s) \begin{pmatrix} i_{r1}^* - i_{r1} \\ i_{r2}^* - i_{r1} \end{pmatrix} \quad \text{III.44}$$

La boucle de régulation du courant réseau est donnée sur la figure (III.11).



**Figure III.11:** Régulation du courant envoyé au réseau

Pour la synthèse des correcteurs PI, on respecte l'hypothèse suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{ond1}^* \\ V_{ond2}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ond1} \\ V_{ond2} \end{pmatrix} \quad \text{III.45}$$

Les paramètres des régulateurs et les détails de leur calcul sont donnés en annexe.

### III.7.2 Calcul des courants de références

La puissance réactive de référence est imposée nulle, en vue d'un fonctionnement à facteur de puissance unitaire du côté réseau électrique :

$$Q_{res}^* = 0 \quad \text{III.46}$$

La référence de la puissance active injectée au réseau est la puissance de la MSAP

$$P_{res}^* = P_a \tag{III.47}$$

Les puissances active et réactive sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} P = V_d i_d + V_q i_q \\ Q = V_q i_d - V_d i_q \end{cases}$$

Les courants de références du réseau électrique, exprimés dans le référentiel de Park, sont donnés par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} i_{rd}^* \\ i_{rq}^* \end{pmatrix} = \frac{1}{V_{rq}^2 + V_{rd}^2} \begin{pmatrix} P_{res}^* & -Q_{res}^* \\ Q_{res}^* & P_{res}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{pmatrix} \tag{III.48}$$

### III.8. Résultats de simulation

Une simulation de la chaîne complète sous matlab\simulink est effectuée, les résultats de simulation obtenus sont représentés par les figures (III.12)-(III.22). les paramètres de toute la chaîne sont donnés en annexe. La vitesse du vent est variable autour de la vitesse nominale selon le profil présenté sur la figure (II.7).

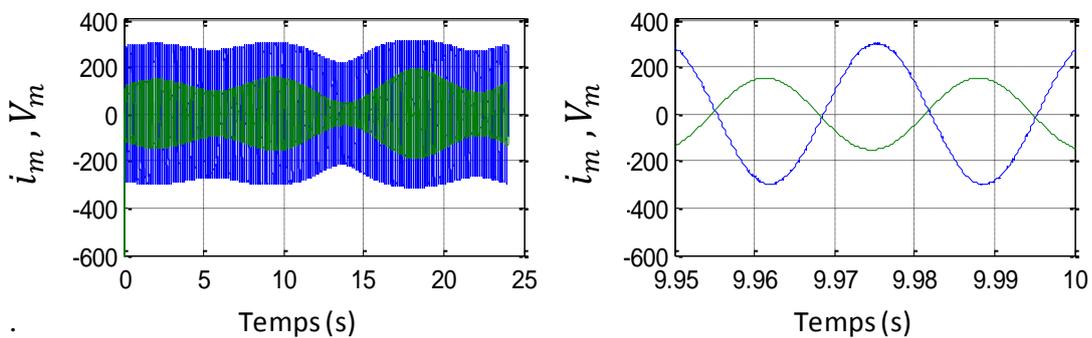


Figure III.12: Allure de tension et de courant de la machine

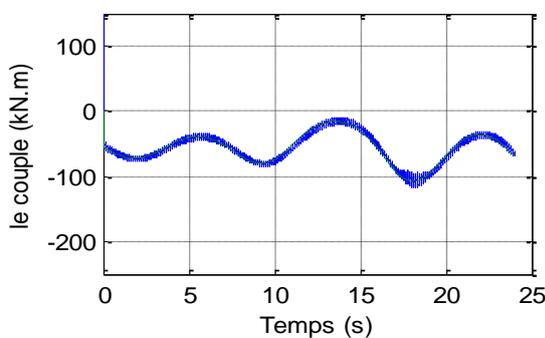


Figure III.13 : Allures du couple ( $C_{em}$ ,  $C_m$ )

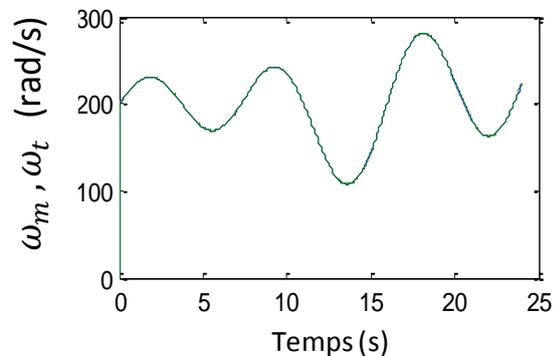


Figure III.14 : Allure de la vitesse de référence et la vitesse de la génératrice

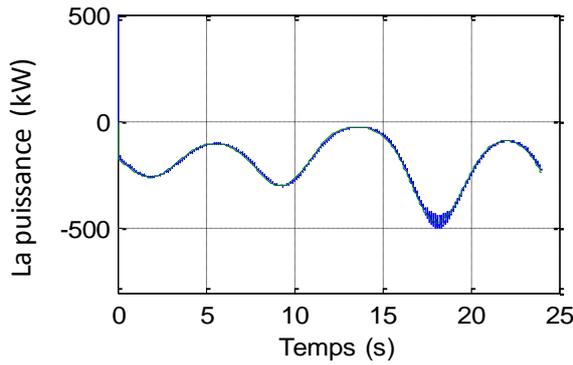


Figure III.15 : Allures du couple ( $P_{ref}$ ,  $P_m$ )

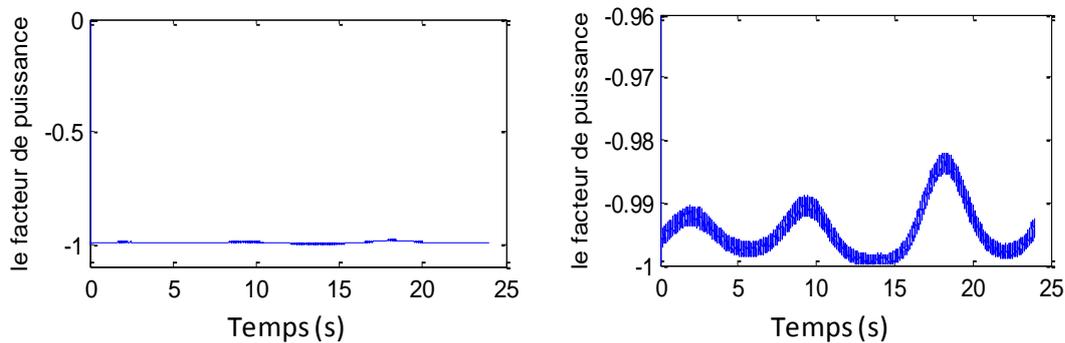


Figure III.16 : Facteur de puissance côté machine

La tension d'une phase raccordée au réseau ainsi que le courant sont présentés sur la figure(III.12), leur fréquence est de 50 Hz (fréquence du réseau électrique). Le déphasage angulaire de  $180^\circ$  entre l'onde du courant et celle de la tension est justifié par le fonctionnement à facteur de puissance unitaire imposé par la commande. Le couple électromagnétique de la MSAP suit le couple mécanique délivré par la turbine figure(III.13), ainsi la vitesse est maintenue au tour de la vitesse de rotation à la sortie du turbine figure(III.14), le facteur de puissance figure (III.16) proche de l'unité.

Les tensions, les courants au niveau du bus continu sont présentés sur la figure (III.17) .

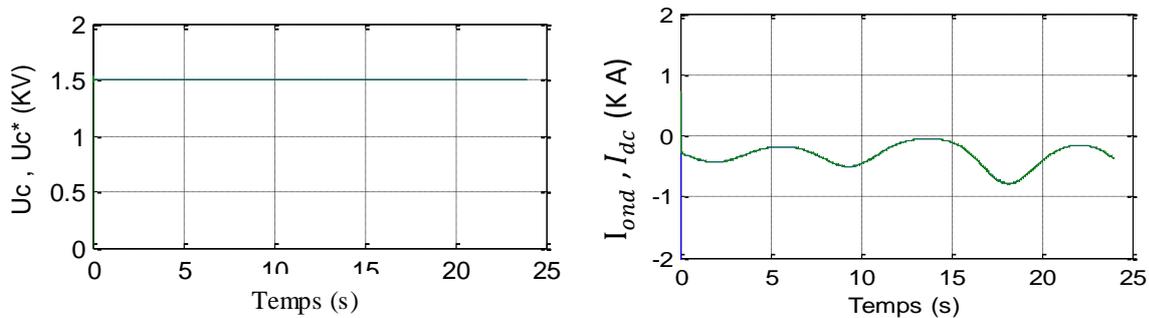
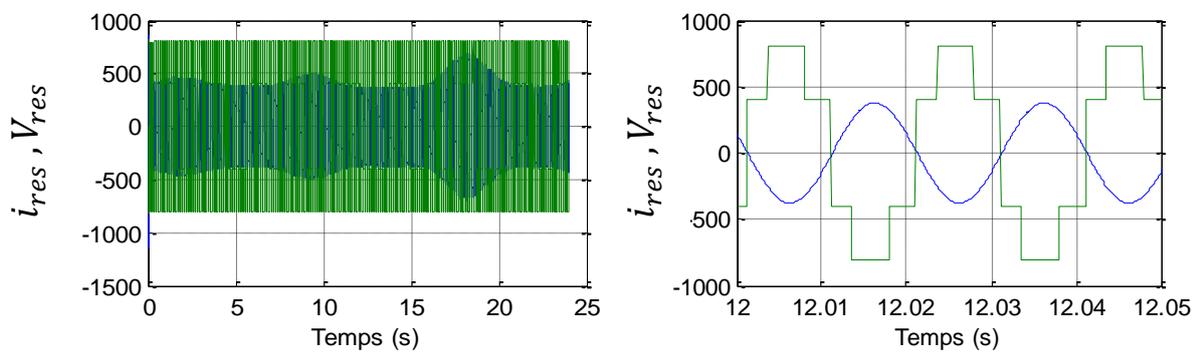


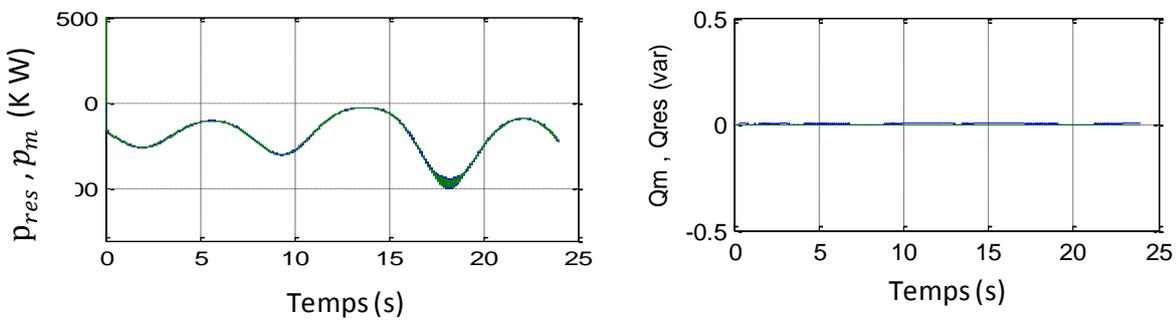
Figure III.17 : Allure de courant et de tension de bus continu

Les signaux de commande imposés à l'onduleur sont obtenus grâce à la comparaison des tensions de références avec une porteuse triangulaire caractérisée par un indice de modulation et un coefficient de réglage égaux à 21 et 0,8 respectivement.

La tension d'une phase raccordée au réseau ainsi que le courant sont présentés sur la figure(III.18), leur fréquence est de 50 Hz (fréquence du réseau électrique). Le déphasage angulaire de  $180^\circ$  entre l'onde du courant et celle de la tension est justifié par le fonctionnement à facteur de puissance unitaire imposé par la commande , à cet effet on constate bien que la puissance réactive est nulle selon sa référence imposée et la puissance active suit également sa référence figure(III.19).

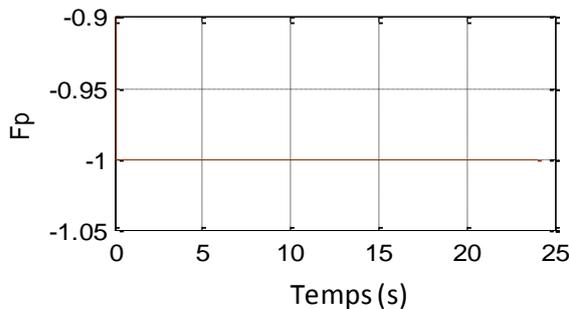


**Figure III.18):** Allure de tension et de courant de coté réseau



**Figure III.19 :** Allure du puissance ( $P_{res}$ '  $P_m$ )

**Figure III.20 :** Allure du puissance ( $Q_{res}$ '  $Q_m$ )



**Figure III.21 :** Facteur de puissance côté reseau

### III.9. Résultats de simulation et interprétations

Nous avons opté pour le profil de vent donné sur la figure (III.22). Les résultats de simulation obtenus sous Matlab sont donnés sur les figures suivantes :

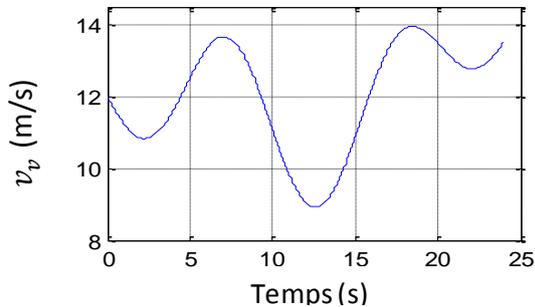


Figure III.22 : vitesse du vent

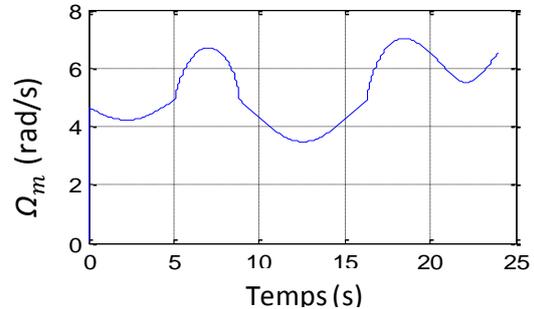


Figure III.23 : la vitesse da la machine

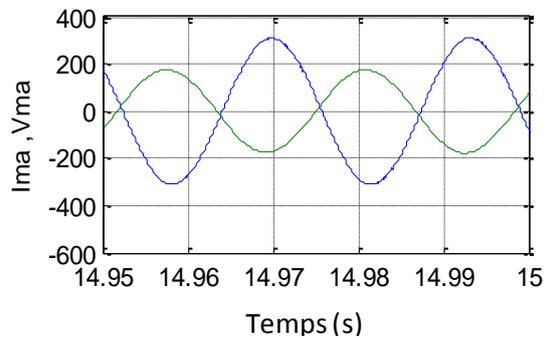
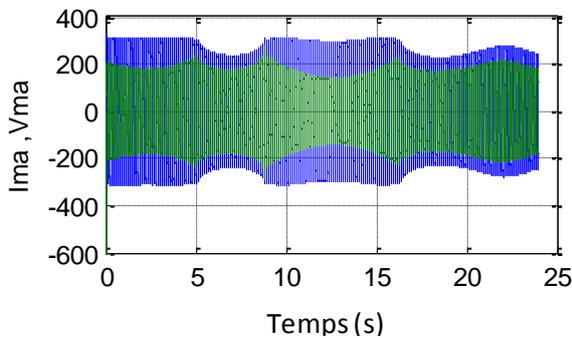


Figure III.24: Allures de la tension et du courant de la machine

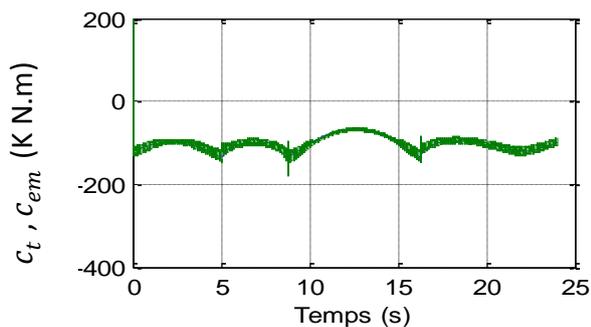


Figure III.25 : Allures du couples ( $C_t, C_{em}$ )

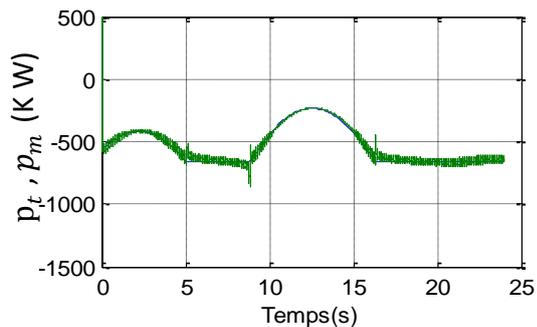
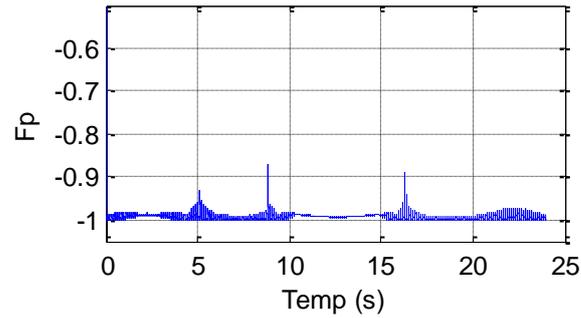


Figure III.26 : Allures du puissance ( $P_t, P_m$ )

L'augmentation de la vitesse de rotation dans les zones où la puissance est limitée (figure III.26) occasionne une diminution du couple électromagnétique et une augmentation de la tension de la MSAP (accompagnée d'une diminution du courant) comme on peut le constater sur la figure (III.25). La puissance réactive diminue également dans ces zones, ce qui contribue à améliorer le facteur de puissance (figure III.27).



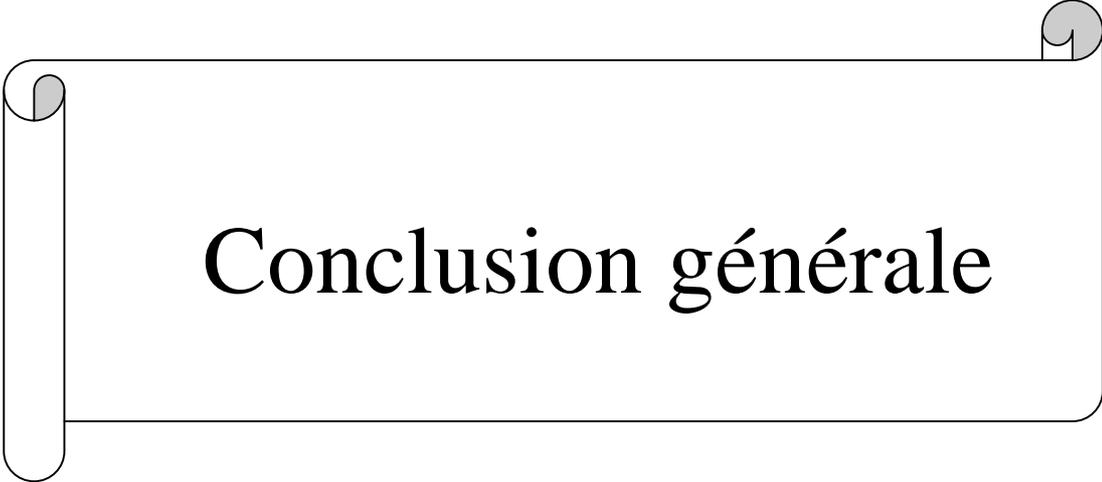
**Figure III.27** : Facteur de puissance côté machine

### III.10. Conclusion

Dans ce chapitre une étude et une simulation numérique ont été menées sur un aérogénérateur basé sur une MSAP raccordé au réseau électrique.

L'optimisation de puissance a été effectuée par la méthode conventionnelle, basée sur la mesure de la vitesse du vent et la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne.

---

A decorative scroll graphic with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, containing the text "Conclusion générale".

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié le fonctionnement d'un aérogénérateur basé sur une MSAP. Nous avons abordé la problématique de maximisation et de limitation de la puissance captée par la turbine éolienne dans une chaîne de conversion d'énergie raccordée au réseau électrique .

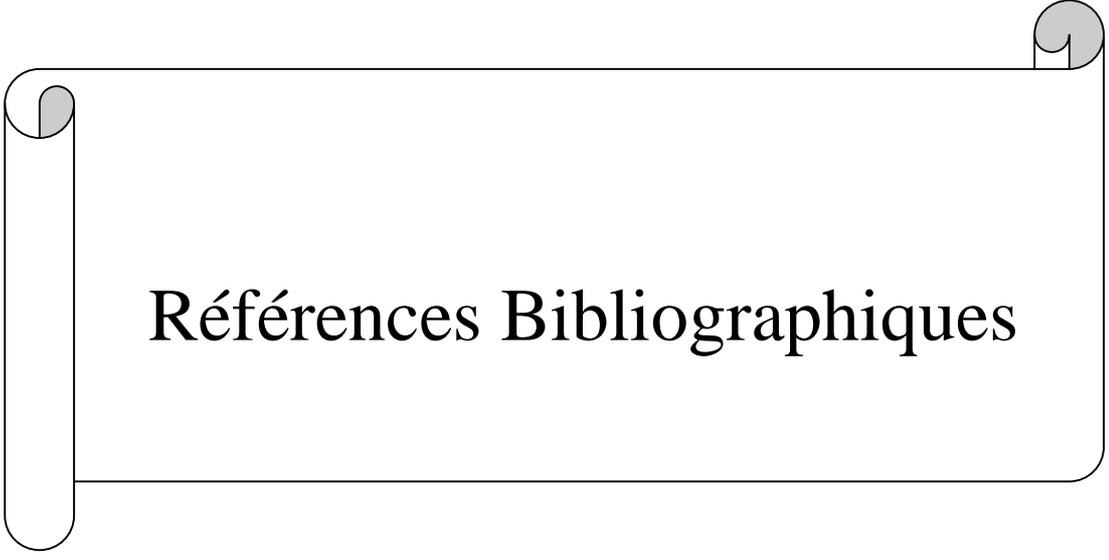
Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de l'éolien et des différents type d'aérogénérateur est présenté dans le premier chapitre. La production d'électricité d'origine éolienne est de plus en plus importante et les performances des aérogénérateurs sont en évolution permanente afin d'améliorer le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques, d'améliorer la qualité de l'énergie produite et de diminuer le coût d'exploitation. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement des matériaux de construction et de l'électronique de puissance. Le pouvoir politique est aussi en grande partie moteur du développement durable.

Afin d'améliorer le rendement énergétique d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, l'optimisation de la puissance captée par la turbine est nécessaire et à cause des contraintes mécaniques et électriques qui pèsent sur l'aérogénérateur pour les forts vents, la limitation de cette puissance est indispensable.

L'utilisation de la MSAP à nombre de pôles élevé, permet de supprimer le multiplicateur de vitesse (réduire la taille et la maintenance du système), avoir un fonctionnement à vitesse variable et aux faibles vitesses, et offre l'avantage de ne pas avoir besoin d'une alimentation électrique au rotor. Cela contribue largement à augmenter l'efficacité énergétique du système.

En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants :

- La réalisation d'un système global de contrôle de la tension et de la puissance réactive, à partir de sous système.
- Etude d'une chaîne de conversion d'énergie de cogénération raccordée au réseau avec prise en compte d'autres paramètres (saturation de la machine, réseau réel, prise en compte de toutes les pertes).



**Références Bibliographiques**

[**Abd 07**] : Abdenour Abdelli, optimisation multicritère d'une chaîne d'éolienne passive thèse doctorat, INP de TOULOUSE, 2004

[**Aim 04**] : S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'École Centrale de Lille, 2004.

[**Bou 07**] : O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs trois niveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique", thèse de doctorat en cotutelle entre l'école centrale de Lille et l'école nationale polytechnique d'Alger, 19-04-2007.

[**bour 99**] :C. Bourillon, "Wind Energy – Clean Power for Generations", Renewable Energy, Vol. 16, pp. 948-953, 1999.

[**bou 06**] : boumezouer Faouzi, « Modélisation et commande d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », mémoire d'ingénieur de l'université de bejaia.

[**boy 06**] : A. Boyette, "Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double alimentation avec Système de Stockage pour la Production Eolienne", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2006.

[**Cha 02**] : L Change « système de conversion d'énergie éolienne »,IEEE Canadian Review-summer / Eté 2002 .

[**cam 03**] : H. Camblong, "Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable", Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[**Féd**] : Fédération romande pour l'énergie. [http : // www. frenergie.ch](http://www.frenergie.ch).

[**Ham 08**] :Hamrouni N. and all, « New Control Strategy for 2-Stage Grid-Connected Photovoltaic System», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 2212-2221, 2008.

[**Jea99**]: Jean Paul L, Claude B, « Commande Numérique des Machines Synchrones», Techniques d'Ingénieur, Référence D3644.

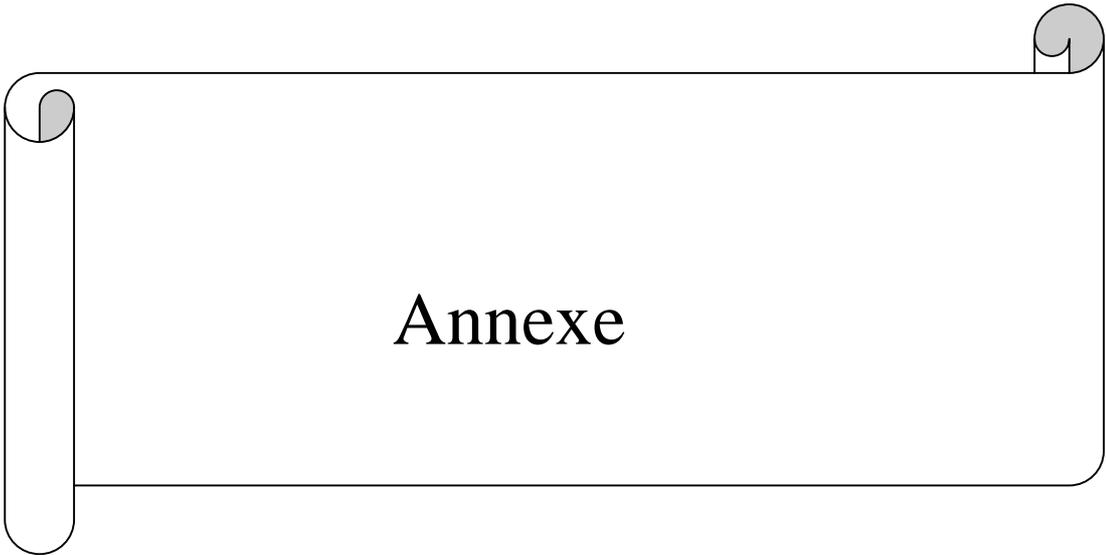
[**khet 07**] L. Khettache, "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2007.

[**Hou 08**] : Houari Azzedine « Etude et simulation d'une petite éolienne à base d'une Génératrice synchrone à aimant permanent », mémoire d'Ingénieur, Université de Bejaia, 2008.

- [Lop 00]** :M. Lopez. Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée. Thèse de doctorat de l'université de Paris-sud 11, 2000.
- [Rog 04]** V. Rogez. Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Thèse de Doctorat Université d'Artois, 2004.
- [Mir05]**: Mirecki A., « Etude Comparative de Chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », Thèse de Doctorat, INPT, France, Avril 2005.
- [Moh03]**: Mohan N., «First Course on Power Electronics and Drives », Département du Génie Electrique et Informatique, Université de Minnesota, Edition MNPERE, USA, 2003.
- [Mul 00]** S. Muller, M. Deicke, R. W.De Doncker, "Doubly-Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines", IEEE Industry Applications Magazine, 2000.
- [Mor 05]**: Luc MOREAU, modélisation, conception et commande de la génératrice à reluctance variable basse vitesse, these doctorat, université de Nantes, 2005
- [Mun 08]** :I. Munteanu . «Optimal control of wind energy systems», Springer-Verlag London,2008.
- [Nah01]**: Nahid M. B., « Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants: Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification en Ligne des Paramètres », Thèse de Doctorat, INPL, France, Décembre 2001.
- [Nik 94]** :C. Nichita, E. Ceanga, A. Piel, J.J. Belhache, L. Protin, "Real Time Servosystem for a Wind Turbine Simulator", IEEE 3rd International. Workshop on Advanced Motion Control, USA, pp. 1039-1048, 1994.
- [poi 03]** : Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes , 2003.
- [Pou95]**: Poul C.K., Oleg W., Scott D.S., « Analysis of Electric Machinery», IEEE Press, New York, 1995.
- [Ram10]** :RAMLI-Aziz « Contribution à l'amélioration des performance d'un aérogénérateur basé sur une MSAP », Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2010 .
- [Rog 04]** : V. Rogez. Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Thèse de doctorat de l'université d'Artois, 2004.
- [Ros09]**: Rostami A., Asaei Behzad., «A Novel Method for Estimating the Initial Rotor Position of PM Motors without the Position Sensor », Science Direct, Energy Conversion and Management Journal, Vol. 50, pp. 1879-1883, 2009.
- [Tar 11]** :Tarak Ghennam thèse « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apport des convertisseurs multi niveaux au réglage des

éoliennes à basse vitesse d'une machine asynchrone », thèse de doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.

**[Tou10]** : Toual Belkacem « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », thèse de doctorat de Université de Batna, 2010.



Annexe

## 1. Paramètres de la turbine utilisée dans la simulation

Les principaux paramètres de la turbine éolienne 660Kw traitée dans ce travail sont [Ram10]:

$$N \text{ (tr/min)} = 46.875$$

$$R \text{ (m)} = 20.41$$

$$J \text{ (Kg.m}^2\text{)} = 222963$$

$$f \text{ (N.m.s/rad)} = 743.21$$

$$\lambda_{opt} = 7.95$$

$$c_{p-max} = 0.411$$

La fonction  $C_p(\lambda)$  relative à l'éolienne 660Kw est :

$$c_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left( 116 \frac{1}{\delta} - 0.4\beta - 5 \right) \text{Exp} \left( -21 \frac{1}{\delta} \right) \text{ [Ram 10]}$$

Avec :

$$\frac{1}{\delta} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\lambda + \beta^3}$$

## 2. Paramètres de MSAP [Ram 10] :

$$R_s(\Omega) = 0.01$$

$$L_d = L_q \text{ (H)} = 0.001$$

$$J \text{ (Kg.m}^2\text{)} = 3800$$

$$f \text{ (N.m.s/rad)} = 26.75$$

$$p = 64$$

$$\Phi_f \text{ (Wb)} = 2.57$$

$$V_n \text{ (V)} = 690$$

## 3. Calcul des régulateurs PI

### 3.1. Structure du régulateur

La fonction de transfert d'un régulateur PI classique est donnée par l'expression suivante :

$$c(s) = k_p + k_i \frac{1}{s} \dots\dots\dots \text{A.1}$$

$k_p$ : Gain proportionnel du correcteur ;

$k_i$ : Gain intégral du correcteur ( $s$  est l'opérateur de Laplace).

L'expression (A-1) peut se mettre aussi sous la forme suivante :

$$c(s) = k_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \dots\dots\dots \text{A.2}$$

Tel que :  $T_i = \frac{k_p}{k_i}$  est la constante de temps du régulateur

Le schéma bloc du correcteur PI correspondant aux schémas bloc de la Figure 1

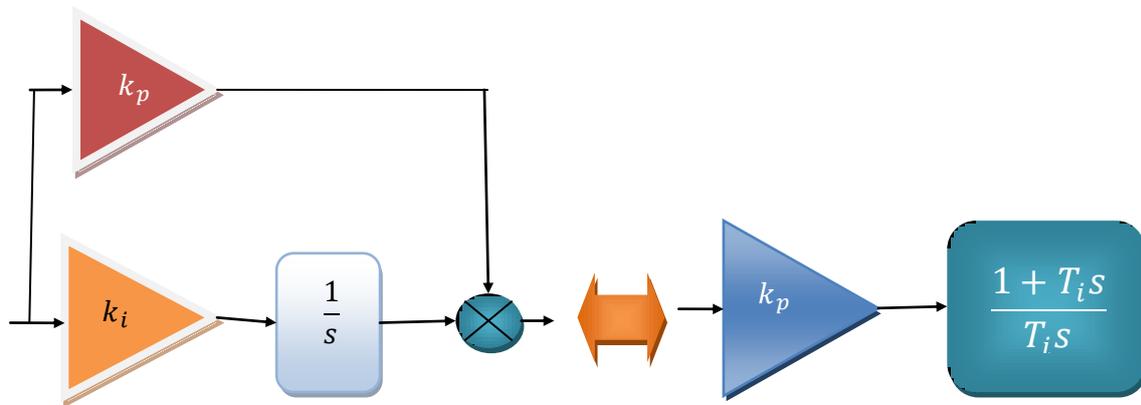


Figure 1 : Schéma bloc d'un régulateur PI

### 3.2. Calcul des paramètres

On considère un processus dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$$

Tel que :  $k$  est le gain statique,  $\tau$  est la constante de temps du processus.

La régulation du processus en utilisant un correcteur PI est présentée par la figure (A-2).

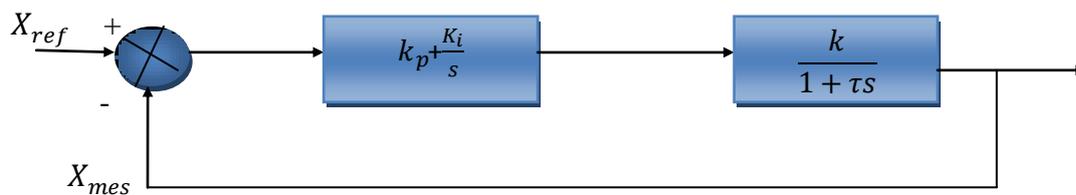


Figure 2 : Schéma bloc d'un régulateur PI

Afin de calculer les régulateurs de vitesse, on a considéré une fonction de transfert de second ordre. En effet, la fonction de transfert en boucle fermée relative au schéma de la figure (A-2) est exprimé par :

$$H(s) = \frac{1 + T_i s}{1 + T_i \frac{1 + K K_P}{K K_P} s + \frac{T_i \tau}{K K_P} s^2} \dots \dots \dots (A-3)$$

Le dominateur de la fonction de transfert  $H(s)$  (de second ordre) est de la forme :

$$D(s)=1+\frac{2\tau}{\omega_n}s+\frac{1}{\omega_n^2}s^2 \dots\dots\dots(A-4)$$

Tel que :  $\tau$  est le coefficient d'amortissement,  $\omega_n$  est la pulsation propre.

$$\begin{cases} K_i = \frac{\tau \omega_n^2}{K} \\ K_i = \frac{2\tau K_i}{\omega_n} - \frac{1}{k} \end{cases} \dots\dots\dots(A-5)$$

Les paramètres  $\tau$  et  $\omega_n$  sont choisis pour avoir une réponse stable, rapide et précise, en effet :

Pour  $\tau = 0.7$ , on a  $t_r \omega_n = 3$  ( $t_r$  est le temps de réponse choisi), alors  $\omega_n = \frac{3}{t_r}$ .

Pour le calcul des autres régulateurs, on a considéré une fonction de transfert en boucle fermée du premier ordre qui s'exprime par :

$$F(s) = \frac{1}{1+T_f s}$$

D'autre part :

$$F(s) = \frac{C(s)G(s)}{1+C(s)G(s)}$$

On en déduit alors l'expression de  $c(s)$  qui s'identifie à un régulateur PI :

$$C(s) = \frac{1+\tau s}{K T_f s} = \frac{\tau}{K T_f} \frac{1+\tau s}{\tau s} \dots\dots\dots(A-6)$$

En comparant les expressions (A-2) et (A-6), on déduit :

$$\begin{cases} T_i = \tau \\ K_p = \frac{\tau}{K T_f} \end{cases}$$

Les paramètres des régulateurs utilisés dans ce travail :

**4. Régulation de vitesse de la turbine 660Kw**

$$T_i = 0.22$$

$$K_p = 400$$

**5. Régulation de la tension du bus continu**

$$T_i = 0.1$$

$$K_p = 20$$

**6. Régulation des courants envoyés au réseau électrique**

$$T_i = 0.001$$

$$K_p = 100$$

**7. Mots clés :** turbine éolienne, MSAP, convertisseur MLI, vitesse variable, stratégie de commande, commande vectorielle, réglage de tension réseau.