

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commande des systèmes électriques**

## **THÈME**

**Commande d'une génératrice asynchrone dédiée à la production  
d'énergie par éolienne**

**Préparé par :**

- **Salah kheira**
- **Moukah yasmin**

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Meme.LARIBI.S</b>	<b>MCB</b>	<b>Président</b>
<b>Mr.BESOLTANE.L</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur</b>
<b>Meme.ZINE.SOUHILA</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Mr.BELABBAS.B</b>	<b>MAA</b>	<b>Encadreur</b>

**PROMOTION 2018 /2019**

On remercie ALLAh tout puissant pour nous avoir donné la patience et la force  
d'accomplir ce modeste travail.

On tient à remercier toutes les personnes qui ont contribué de façon directe ou  
indirecte à l'aboutissement de ce travail, particulièrement notre encadreur  
Madame **ZINE Souhila**, pour sa qualité humaine et sa compétence  
professionnelle et son soutien moral.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, Madame **Laribi  
Souaad**, Monsieur **Bensoltane Laid**, pour avoir accepté d'examiner le présent  
travail.

On remercie aussi Monsieur **ALLAOUI**, et Monsieur **BELABBES** ainsi que les  
enseignants du département de génie électrique de l'université de Tiaret pour  
leur soutien et leur aide précieuse.

Sans oublier toute Notre famille et Nos amis pour leurs encouragements, leur  
soutien moral et leur dévouement.

## Sommaire

<i>Introduction générale</i> .....	1
<i>chapitre I</i>	
<i>Généralité sur les éoliennes</i>	
<i>I.1 Introduction</i> .....	5
<i>I.2 Evolution de la production de l'énergie électrique dans le monde</i> .....	5
<i>I.3 Les types d'énergies renouvelables</i> .....	7
<i>I. 3.1 L'énergie hydraulique</i> .....	8
<i>I.3.2 L'énergie de la biomasse</i> .....	8
<i>I.3.3 L'énergie de la géothermie</i> .....	8
<i>I.3.4 L'énergie solaire</i> .....	9
<i>I.3.5 L'énergie éolienne</i> .....	9
<i>I.4 Production éolienne</i> .....	9
<i>I.5 Situation de l'énergie éolienne en Algérie</i> .....	11
<i>I.6 Fonctionnement d'une éolienne</i> .....	12
<i>I.7 Constitution d'une éolienne</i> .....	13
<i>I.8 Différents Types d'aérogénérateurs</i> .....	14
<i>I.8.1 Les turbines à axe vertical</i> .....	14
<i>I.8.2 Eoliennes à axe horizontal</i> .....	15
<i>I.9 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne</i> .....	16
<i>I.9.1 Les systèmes à vitesse fixe</i> .....	16
<i>I.9.2 Les systèmes à vitesse variable</i> .....	18
<i>I.10 L historique des machines électriques</i> .....	19
<i>I.11 Types de machine électrique utilisée dans la production d'énergie éolienne</i> .....	20
<i>I.11.1 Eolienne à machine asynchrone à cage</i> .....	20
<i>I.11.2 Eolienne à machine asynchrone à double alimentation</i> .....	20
<i>I.11.3 éolienne à machine synchrone</i> .....	21
<i>I.11.4 Autres machines</i> .....	21
<i>I.12 Aérogénérateur étudié</i> .....	22
<i>I.13 L'utilisation de l'aérogénérateur asynchrone à cage</i> .....	22
<i>I.13.1 Moteur asynchrone</i> .....	22
<i>I.13.2 Générateur asynchrone</i> .....	22

<i>I.14 Avantages et inconvénients de la MAS.....</i>	<i>23</i>
<i>I.14 Conclusion .....</i>	<i>23</i>

## *Chapitre II*

### *Modélisation de l'aérogénérateur asynchrone à cage d'écureuil*

<i>II.1 Introduction.....</i>	<i>25</i>
<i>II.2 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable.....</i>	<i>25</i>
<i>II.2.1 Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique .....</i>	<i>25</i>
<i>II.2.2. Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .....</i>	<i>25</i>
<i>II.2.3. Production d'énergie mécanique .....</i>	<i>27</i>
<i>II.2.4. Modélisation du vent .....</i>	<i>28</i>
<i>II.2.5 Bilan des forces sur une pale.....</i>	<i>29</i>
<i>II.2.6 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine .....</i>	<i>29</i>
<i>II.2.7. Equation dynamique de l'arbre.....</i>	<i>31</i>
<i>II.2. 8 Modèle du multiplicateur.....</i>	<i>32</i>
<i>II.2.9 Résultats de simulation de la turbine en boucle ouverte .....</i>	<i>33</i>
<i>II.3 Modélisation de la GAS .....</i>	<i>35</i>
<i>II.3.1 Description de la GAS .....</i>	<i>35</i>
<i>II.3.2 Principe de fonctionnement de la GAS .....</i>	<i>35</i>
<i>II.3.3 Modélisation dans le repère triphasé .....</i>	<i>37</i>
<i>II.4 Transformation de Park .....</i>	<i>38</i>
<i>II.5 Puissance absorbée et couple électromagnétique .....</i>	<i>40</i>
<i>II.6. Conclusion.....</i>	<i>41</i>

## Chapitre III

### *Stratégies de commande appliquées à l'aérogénérateur asynchrone à cage*

<b>III.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>43</b>
<b>III.2</b>	<b>Stratégie de commande de la turbine.....</b>	<b>43</b>
III.2.1	Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....	43
III.2.2	Technique d'extraction du maximum de puissance.....	44
III.2.2.1	Bilan des puissances .....	44
III.2.3	Maximisation de la puissance par asservissement de la vitesse .....	45
III.2.4	Conception du correcteur de vitesse .....	46
III.2.4.1	Dimensionnement du régulateur de la vitesse (MPPT) .....	46
III.2.5	Résultats de la simulation de la MPPT.....	47
<b>III.3</b>	<b>La Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF) .....</b>	<b>49</b>
III.3.1	Principe du contrôle par flux orienté .....	50
III.3.2	Types de la commande vectorielle.....	51
III.3.2.1	Commande vectorielle directe.....	51
III.3.2.2	Commande vectorielle indirecte.....	52
III.3.3	Structure de la CVOFR de la machine asynchrone alimentée en tension.....	52
III.3.3.1	Expression générale .....	52
III.3.3.2	Découplage par compensation.....	53
III.3.4	Dimensionnement des régulateurs .....	54
III.3.4.1	réglage du courant $i_{sd}$ .....	54
III.3.4.2	réglage du courant $i_{sq}$ .....	55
III.3.5	Résultats de simulation de la commande vectorielle .....	55

<b>III.4 Commande en vitesse de la turbine par Logique Flou</b> .....	<b>56</b>
<b>III.4.1 Historique</b> .....	<b>56</b>
<b>III.4.2 Les avantages et les inconvénients de la commande par logique floue</b> .....	<b>57</b>
<b>III.4.3 ensembles flous</b> .....	<b>57</b>
<b>III.4.4 Opération sur les ensembles flous</b> .....	<b>58</b>
<b>III.4.5 Variables linguistiques</b> .....	<b>60</b>
<b>III.4.6 Fonction d'appartenances</b> .....	<b>60</b>
<b>III.4.7 Univers de discours</b> .....	<b>61</b>
<b>III.4.8 Systèmes flous</b> .....	<b>61</b>
<b>III.4.9 Commande floue</b> .....	<b>62</b>
<b>III.4.10 Contrôleur flou</b> .....	<b>62</b>
<b>III.4.10.1 Interface de fuzzification</b> .....	<b>63</b>
<b>III.4.10.2 Base des règles</b> .....	<b>63</b>
<b>III.4.10.3 Mécanisme d'inférence</b> .....	<b>63</b>
<b>III.4.10.4 Interface du Défuzzification</b> .....	<b>64</b>
<b>III.4.11 Conception du régulateur de vitesse par PI flou adaptatif</b> .....	<b>66</b>
<b>III.4.11.1 Description du contrôleur flou utilisé</b> .....	<b>66</b>
<b>III.4.12 Résultats de simulation</b> .....	<b>69</b>
<b>III.4.13 Comparaison entre les deux régulateurs utilisés</b> .....	<b>70</b>
<b>III.5 Conclusion</b> .....	<b>71</b>

## **Chapitre IV**

### **Simulation de la chaine complète**

<b>IV.1 Introduction</b> .....	<b>73</b>
<b>IV.2 La commande MLI</b> .....	<b>73</b>
<b>IV.2.1 Modélisation du convertisseur MLII (le redresseur)</b> .....	<b>74</b>

<i>IV.3 : Modélisation du bus continu</i> .....	76
<i>IV.3.1 Régulation du bus continu</i> .....	76
<i>IV.4 modélisation de convertisseur MLI2 (l'onduleur):</i> .....	77
<i>IV.5 Modélisation du filtre</i> .....	78
<i>IV.6 Contrôle de la liaison au réseau</i> .....	79
<i>IV.6.1 Contrôle des courants envoyés au réseau</i> .....	80
<i>IV.6.1.1 Régulation des courants</i> .....	80
<i>IV.7 Résultats de simulation de la chaine complète</i> .....	83
<i>IV.8 Conclusion</i> .....	85
<i>Conclusion générale</i> .....	86
<i>Annexe</i> .....	87

**Chapitre I**

**Généralités sur les éoliennes**

**Figure I.1** : Production d’électricité par habitant à travers les régions du monde.....5

**Figure I.2** : Répartition des sources d’énergie dans le monde.....6

**Figure I.3** : taux de croissance annuel moyen 2000-2012.....7

**Figure I.4** : Première éolienne créée par Charles F. Brush.....10

**Figure I.5** : Carte annuelle des vents (m/s).....12

**Figure I.6** : Principe de la conversion de l’énergie éolienne.....13

**Figure I.7** : Exemple de système éolien.....13

**Figure I.8** : Eolienne à axe vertical.....14

**Figure I.9** : Eolienne à axe horizontal.....16

**Figure I.10** : Eolienne directement liée au réseau.....17

**Figure I.11** : Eoliennes à vitesse variables.....18

**Figure I.12** : éolienne à MAS piloté au stator.....20

**Figure I.13** : Eolienne à MADA pilotée au rotor.....20

**Figure I.14** : Système éolien basé sur la génératrice synchrone.....21

**Figure I.15** : Evolution de la configuration électrique.....22

**Chapitre II**

**Modélisation du l’aérogénérateur asynchrone à cage d’écureuil**

**Figure II.1** : Principe de la théorie de Betz.....25

**Figure II.2** : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent.....26

**Figure II.3** : Coefficient de puissance pour différents types d’éolienne.....27

**Figure II.4** : Bilan des forces sur une pale.....29

**Figure II.5** : Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne.....30

**Figure II.6** : modèle mécanique simplifié de la turbine.....31

**Figure II.7** : schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine.....32

**Figure II.8** : Résultats de simulation de la turbine en boucle ouverte.....32

<b>Figure II.9 :</b> Description d'une machine asynchrone.....	35
<b>Figure II.10 :</b> glissement d'une génératrice asynchrone.....	36
<b>Figure II.11 :</b> Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	38
<b>Figure II.12 :</b> Représentation de la machine dans le repère diphasé.....	39
<b>Figure II.13 :</b> Schéma bloc simulink du modèle de la GAS.....	41

### *Chapitre III*

#### *Stratégies de commandes appliquées à l'aérogénérateur asynchrone à cage*

<b>Figure III.1 :</b> puissance extraite en fonction de la vitesse du vent.....	43
<b>Figure III.2:</b> Diagramme de conversion de puissance.....	44
<b>Figure III.3 :</b> Fonctionnement optimale de la turbine.....	46
<b>Figure III.4 :</b> schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de vitesse.....	46
<b>Figure III.5 :</b> Schéma fonctionnel de régulateur de la vitesse.....	46
<b>Figure III.6 :</b> Résultats de la simulation de la MPPT.....	47
<b>Figure III.7 :</b> Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer).....	48
<b>Figure III.8 :</b> Description des couplages.....	49
<b>Figure III.9 :</b> Algorithme d la commande vectorielle.....	53
<b>Figure III.10 :</b> Schéma blocs de réglage de $i_{sd}$ .....	54
<b>Figure III.11 :</b> Schéma regroupant les régulateurs de courants.....	55
<b>Figure III.12 :</b> Résultats de simulation de la commande vectorielle.....	56
<b>Figure III.13 :</b> Représentation schématique de l'univers de discours.....	58
<b>Figure III.14 :</b> Opération NON.....	58
<b>Figure III.15 :</b> Opérateur ET.....	59
<b>Figure III.16 :</b> Opérateur OU.....	59
<b>Figure III.17 :</b> Représentation schématique d'un ensemble flou d'une variable linguistique.....	60
<b>Figure III.18 :</b> Formes usuelles des fonctions d'appartenance.....	61
<b>Figure III.19 :</b> Élément de la logique floue.....	61
<b>Figure III.20 :</b> Schéma général d'un système flou.....	62

<b>Figure III.21</b> : Structure d'un contrôle flou.....	62
<b>Figure III.22</b> : Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé.....	66
<b>Figure III.23</b> : Formes des fonctions d'appartenance des entrées.....	67
<b>Figure III.24</b> : Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI Flou adaptatif.....	69
<b>Figure III.25</b> : résultats de simulation de PI flou adaptative.....	70
<b>Figure III.26</b> : la vitesse mécanique et le zoom sur l'erreur obtenu avec un PI classique.....	70
<b>Figure III.27</b> : la vitesse mécanique et le zoom sur l'erreur obtenu avec le PI flou adaptatif.....	71

## *Chapitre IV*

### *Simulation de la chaine complète*

<b>Figure VI.1</b> : Principe de MLI sinus-triangulaire.....	73
<b>Figure VI.2</b> : Pont redresseur.....	74
<b>Figure VI.3</b> : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.....	75
<b>Figure VI.4</b> : Schéma électrique du bus continu.....	76
<b>Figure VI.5</b> : Boucle de la régulation du bus continu.....	77
<b>Figure VI.6</b> : le schéma global de l'onduleur.....	78
<b>Figure VI.7</b> : Schéma d'un filtre.....	79
<b>Figure VI.8</b> : schéma globale du système étudié.....	79
<b>Figure VI.9</b> : Schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park.....	81
<b>Figure VI.10</b> : Structure de la chaine globale.....	83
<b>Figure IV.11</b> : la vitesse spécifique.....	84
<b>Figure IV.12</b> : coefficient de puissance.....	84
<b>Figure VI.13</b> : La vitesse mécanique.....	84
<b>Figure IV.14</b> : La composante directe et en quadratique des courant statoriques, tension du bus continu et les courants triphasés coté réseau.....	85
<b>Figure IV.15</b> : La puissance active injectée au réseau.....	85

<b>Tableau II.1:</b> Coefficients définissant l'évolution de $C_p$ .....	27
<b>Tableau III.1</b> Méthodes usuelles de l'inférence floue.....	64
<b>Tableau III.2 :</b> Matrice d'inférence pour la sortie $K_p$ .....	68
<b>Tableau III.3 :</b> Matrice d'inférence pour la sortie $K_i$ .....	68
<b>Tableau III.4 :</b> tableau comparatif de l'erreur obtenu avec les régulateurs utilisés.....	71
<b>Tableau VI.1 :</b> les huit états possibles des interrupteurs.....	75

## Notations

---

Gas	Génératrice asynchrone. ;
$m$	Masse d'air traversant l'hélice par seconde ;
$\rho$	Densité de l'air ;
$S$	Surface balayée par les pales de l'éolienne ;
$V_1$	Vitesse du vent en amont ;
$V_2$	Vitesse du vent en aval ;
$P_m$	La puissance extraite ;
$C_p$	Coefficient de puissance ;
$\lambda$	vitesse spécifique;
$\beta$	Angle de décalage;
$R$	Le rayon des pales de la turbine ;
$\Omega_{\text{turbine}}$	Vitesse de rotation du générateur (avant le multiplicateur) ;
$G$	Gain du multiplicateur ;
$\Omega_{\text{mec}}$	Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur) ;
$J$	Moment d'inertie total sur l'arbre ;
$J_t$	Moment d'inertie de la turbine ;
$J_g$	Moment d'inertie de la génératrice;
$J_m$	Moment d'inertie de la machine ;
$C_{\text{mec}}$	Couple mécanique total ;
$C_{\text{em}}$	Couple électromagnétique du génératrice ;
$C_g$	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;
$C_{\text{vis}}$	Couple des frottements visqueux;
$f_m$	Le coefficient de frottement visqueux ;
$V_v$	Vitesse du vent ;

## Notations

---

$\Omega_S$	Vitesse de synchronisme (tr/min);
$\omega_s, \omega_r$	Pulsation statorique et rotorique (rad/s);
P	Nombre de pair de pole ;
$R_s$	Résistance statorique ( $\Omega$ ) ;
$R_r$	Résistance rotorique ( $\Omega$ ) ;
$L_s$	Inductance statorique (H) ;
$L_r$	Inductance rotorique (H) ;
$\Omega$	Vitesse de rotation mécanique (rad/s);
g	Glissement ;
$M_{Sr}$	Inductance cyclique mutuelle(H);
$V_{sdq}$	Les composantes de la tension statorique dans le repère d-q (V) ;
$V_{rdq}$	Les composantes de la tension rotorique dans le repère d-q (V) ;
$i_{sdq}$	Courants statorique instantanée dans l'axe d et q (A) ;
$i_{rdq}$	Courants rotorique instantanée dans l'axe d et q (A) ;
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Les composantes des flux statoriques dans le repère d-q (Wb);
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Les composantes des flux rotoriques dans le repère d-q (Wb);
$\theta$	Position du rotor par rapport au stator (rad);
$\theta_S$	Angle électrique entre l'axe $\mathbf{d}$ et le stator ( $S$ ) lié au stator (rad);
$\theta_r$	Angle électrique entre le rotor et l'axe « $\mathbf{d}$ » (rad);
J	Moment d'inertie ( $kg.m^2$ );
F	Coefficient de frottement ( $N.m.s^2/rad^2$ ) ;
$C_{em}$	Couple électromagnétique (N.m);
$C_r$	Couple résistant;

## Notations

---

$\omega$	Vitesse de rotation (rad/s);
$T_r$	Constante de temps rotorique (sec);
$T_s$	Constante de temps statorique (sec);
$\sigma$	Coefficient de dispersion;
$K_p$	Constante du gain proportionnel ;
$K_i$	Constante du gain intégrateur;
$P_a$	Puissance absorbé (W);
$c$	Capacité du bus continu;
$[P(\theta)]$	Matrice de transformation de Park.;
$u(x)$	Degré d'appartenance ;
MPPT	Maximum Power Point Tracking;

## *Introduction générale*

---

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18<sup>e</sup> siècle, puis le pétrole au milieu du 20<sup>e</sup> siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités; L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne ; la lumière solaire excitant les photopiles ; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau,....etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie [1].

Par rapport à ces énergies, l'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente au niveau mondial un gisement considérable. Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre) et aucun déchet. Par ailleurs, le site d'implantation des éoliennes reste toujours exploitable, pour l'agriculture par exemple. Enfin, les petites installations permettent d'électrifier les lieux isolés et donnent une certaine indépendance à des petites communautés (un village, un regroupement d'industries...), mais le principal inconvénient de cette source d'énergie est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on a besoin [2].

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne a connu une forte croissance, cela conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à augmenter l'efficacité de la conversion électromécanique d'une part et à améliorer la qualité de l'énergie fournie d'une autre part.

Au début, les éoliennes avaient une durée de vie courte et étaient limitées à une vitesse fixe qui n'était pas cohérente lorsque la variation du vent était importante. De ce fait, des fluctuations de tension et de puissance du réseau ont été générées. Pour surmonter cette limitation et améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, beaucoup de chercheurs ont eu recours à des structures éoliennes à vitesse variable, qui ont rendu ses systèmes de conversion plus attractifs. Ceci permet l'extraction de l'énergie optimale pour différentes vitesses du vent, la réduction des contraintes mécaniques par élimination du multiplicateur, ce qui améliore la fiabilité du système, et la réduction des frais d'entretien.[6], [8].

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs évolue. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable utilisant des générateurs asynchrone (GAS), des générateurs à double induction (MADA), ou à aimant permanents (GSAP).

Les aérogénérateurs asynchrones ont pris leurs places dans les systèmes éoliens grâce au développement de l'électronique de puissance. La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de

## *Introduction générale*

---

l'électronique de puissance. La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, train, automobiles électrique,.....etc.), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Dans les premier temps elle était utilisée en moteur mais, avec le développement de l'électronique de puissance, elle est de plus en plus utilisée en génératrice [3].

La machine asynchrone ne disposant pas de bobinage d'excitation il est nécessaire de lui fournir l'énergie magnétisante. Dans le cas d'un fonctionnement en générateur cette énergie peut être générée par une batterie de condensateurs connectés en parallèle au bobinage statorique ou en utilisant un convertisseur et une capacité connectée du côté continu du convertisseur. Toutefois, en n'étant pas fixes, la tension statorique peut varier dans de grandes proportions. Il devient alors nécessaire d'utiliser un système de régulation approprié afin de maintenir la tension de sortie à une amplitude et une fréquence constantes. Des travaux ont été réalisés dans ce sens en contrôlant le dispositif constitué d'une génératrice asynchrone connectée à un redresseur et un onduleur commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (M.L.I)[4].

Vu que les systèmes de conversion éolienne sont à vitesses variables, leur puissance disponible dépend principalement de la vitesse du vent. Pour en tirer profit au maximum, il existe un point de fonctionnement optimal. Ce point est ajusté en agissant sur la vitesse transmise à l'arbre ainsi que le couple électromagnétique.

Dans le but d'extraire le maximum de puissance, la commande d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée au niveau de la turbine et la commande vectorielle au niveau de la génératrice, ceci permet d'avoir de bonnes performances dynamiques, et assure un couple même en basses vitesses.

Pour améliorer les performances du système, on introduit des techniques modernes basées sur l'intelligence artificielle qui permettent de reproduire le raisonnement humain, et des commandes non linéaires telles que la commande par mode glissant ou la commande synergétique.

La logique floue, est une des grandes familles qui constitue l'intelligence artificielle. Les bases théoriques de cette logique ont été établies en 1965 par le Professeur Lotfi Zadeh à l'Université de Berkeley en Californie, qui a introduit la notion de l'ensemble flou [12]. Sa particularité réside dans son pouvoir de reproduire le comportement humain plus tôt que de réaliser un modèle mathématique du système [13]. Elle peut être utilisée pour solutionner certain problèmes liées aux erreurs de modélisations, ou de la méconnaissance du modèle du système, et aussi à la sensibilité paramétrique du modèle de la machine qui a un impact sur les performances et la robustesse de sa commande.[14]

Après avoir transformé l'énergie éolienne en énergie électrique, il est nécessaire de l'adapter au réseau au quel est connecté notre système, car les éoliennes sont considérées comme des génératrices à puissance variable, elles n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance fréquence, et donc perturbent d'autant plus la stabilité du réseau que leur taux de pénétration est

## *Introduction générale*

---

important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies de commandes sont apparues pour optimiser cette nouvelle génération d'énergie. [19]

Dans ce contexte, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. L'objectif de ce travail dans un premier temps est de présenter un modèle global d'un aérogénérateur asynchrone à cage d'écureuil. L'utilisation du logiciel MATLAB nous a permis de vérifier le fonctionnement de ce modèle. Dans un but permettant à la fois d'optimiser la puissance produite, de réguler la tension du bus continu, et de contrôler les puissances transmises au réseau, des stratégies de commande ont été appliquées. Les résultats obtenus sont analysés et comparés, en particulier ceux obtenus avec le Flou.

### *Structure de mémoire*

Le premier chapitre, expose quelques généralités sur les éoliennes, un état de l'art des énergies renouvelables est présenté. Il comprend une description du domaine des énergies renouvelables. Quelques notions principales sur la technologie éolienne sont données telles que, la conception des turbines, les différents types des éoliennes utilisés, leur fonctionnement, ainsi que l'architecture de chaînes de conversion d'énergie en association avec les différents types de génératrices. On termine par un état de l'art sur les différentes configurations électriques utilisées et leurs effets sur le fonctionnement des aérogénérateurs.

Le second chapitre est dédié à l'étude et à la modélisation du système regroupant la turbine et la génératrice asynchrone à cage. Après énumération des hypothèses simplificatrices, un modèle simulink est établi dans le but de vérifier le fonctionnement.

La commande de vitesse et de courant de l'aérogénérateur asynchrone à cage fait l'objet du troisième chapitre. On commence par l'application de la MPPT munie d'un PI pour la turbine et la commande vectorielle pour la génératrice asynchrone à cage d'écureuil. On introduit une nouvelle stratégie de commande avancée qui est (Logique Floue). Les résultats de simulation sont analysés et comparés dans un but de montrer l'efficacité des commandes appliquées et les améliorations apportées.

Dans le quatrième chapitre. La modélisation des deux convertisseurs et du bus continu, est établie. Les résultats de simulation de la chaîne complète sont présentés pour mettre en évidence la validité de la stratégie choisie face aux fluctuations du vent.

*Chapitre I*

*Généralités sur les éoliennes*

## I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, Ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [5].

## I.2 Evolution de la production de l'énergie électrique dans le monde

L'électricité est un facteur important au développement économique à l'échelle mondiale, l'augmentation de sa production s'accroît avec l'industrialisation, les progrès techniques et le besoin d'améliorer la qualité de vie. De nos jours cette production est ramenée au nombre d'habitants, permettant ainsi de mieux mesurer l'écart de développement entre les différentes régions du monde, comme le montre la Figure (I.1).

L'Amérique du Nord est la région où l'on produit le plus d'électricité par habitant environ (14 167 Kwh/hab), ce qui représente deux fois plus qu'en Europe de l'Ouest (6 646 Kwh/hab), trois fois plus qu'en Europe centrale (4 411 Kwh/hab), quatre fois plus qu'en Asie de l'Est et du Sud Est (3400 Kwh/hab) et huit fois plus qu'en Afrique du Nord (1771 Kwh/hab) et trente fois plus qu'en Afrique subsaharienne (490 Kwh/hab). [6]

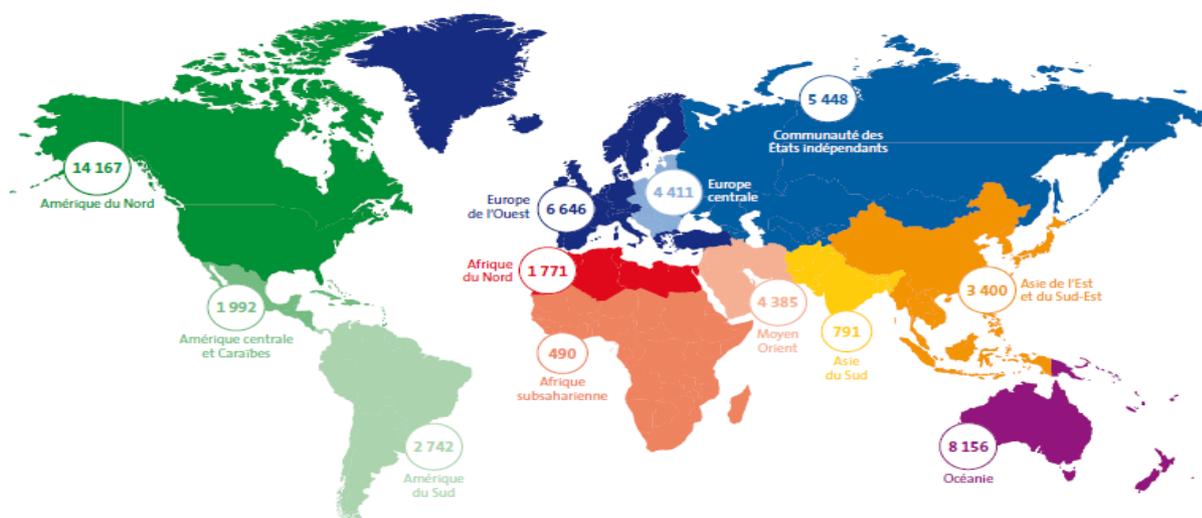
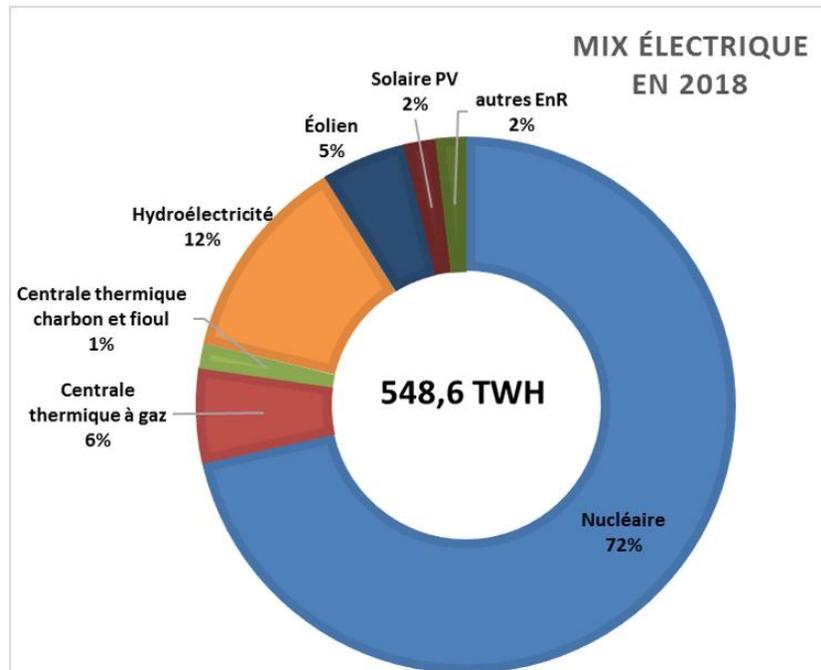


Figure I.1 : Production d'électricité par habitant à travers les régions du monde [6].

La production d'électricité à recours aujourd'hui à deux types de ressources énergétiques : les énergies épuisables (non renouvelable) sur lesquelles elle se base principalement et qui représentent environ 68.1% de l'énergie produite, tel que les combustibles fossiles (le pétrole, le charbon ou le gaz naturel) et fissiles (nucléaire), et les énergies renouvelables qui représentent 21% de l'énergie produite. La Figure (I.2) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. [6] [7]



**Figure I.2 :** Répartition des sources d'énergie dans le monde [6].

Les énergies dites épuisables (fossiles) sont à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, ce qui provoque un changement climatique irréversible. Dans le cas des combustibles fissiles (nucléaire), le risque d'accident peut s'avérer désastreux puisque que la radioactivité reste élevée durant de nombreuses années causant de graves problèmes (humains, environnemental...), de plus le traitement des déchets issues de cette production est très coûteux. [7] [8] [9]

Pour remédier à ces problèmes, deux solutions sont envisageable; la première est d'augmenter la productivité des centrales et de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie, ce qui s'avérera difficile dans le courant du 21ème siècle puisque plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître. Quant aux recherches dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui peuvent représenter une solution énergétique du futur, sont en cours, mais leur avènement n'est pas assuré. La deuxième solution consiste à développer de nouvelles sources d'énergie propres et inépuisables (renouvelables) associées à des technologies performantes pour tenter de maintenir le niveau de production énergétique mondiale. [6]

Dans l'immédiat, le développement et l'exploitation de nouvelles sources d'énergie représente la solution la plus adéquate et la plus prometteuse, qui connaît ces dernières années une très forte croissance.

### I.3 Les types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine.

Il existe différents types d'énergie renouvelable à travers le monde : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. [7]

Etant fournie par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes, participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère [10]. Ce sont des énergies inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de diminution tel que : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel. [9]

Naturellement décentralisées, le développement et l'exploitation de ces énergies a connu une forte croissance ces dernières années (Figure I.3), pour les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, en chaleur, ou en électricité, selon les besoins, ce qui offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. [8] [11]

Cependant, le caractère aléatoire de ces sources ainsi que leur stockage se présentent comme les inconvénients majeurs des énergies renouvelables, Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés. Les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées. [7] [12]

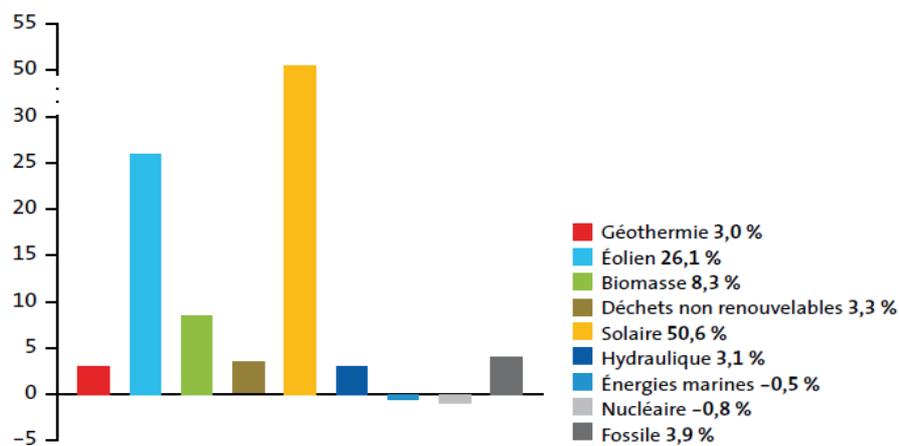


Figure I. 3 : taux de croissance annuel moyen 2000-2012 [6].

### I. 3.1 L'énergie hydraulique

L'énergie fournie par le mouvement de l'eau, tel que : les chutes d'eau, les cours d'eau, les courants marins, les marées, les vagues est appelée énergie hydraulique. Elle peut être utilisée directement, comme dans un moulin à eau, ou converti, en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique est actuellement la première source d'énergie renouvelable, la production en électricité pour l'année 2012 est estimée à environ 78% de la production électrique d'origine renouvelable comme le montre . [6]

### I.3.2 L'énergie de la biomasse

L'énergie biomasse permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion des matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses. Elle est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme et peut être répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) [8] [13].

### I.3.3 L'énergie de la géothermie

L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée la géothermie. Elle peut être utilisée pour produire de l'électricité ou pour produire de la chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples.

D'après le critère de température, la géothermie peut être qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

la géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée exploite des sources hydrothermales très chaudes, des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité [8].

La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. [8]

La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain. [8]

La géothermie de très basse énergie : géothermie de faibles profondeurs au niveau de température compris entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle. [8]

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc

une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. [8]

### **I.3.4 L'énergie solaire**

Le soleil est une source d'énergie quasiment inépuisable à l'échelle des temps humains. Cette énergie est transmise à la terre sous la forme de lumière et de chaleur et peut être utilisée par l'homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques. [14]

### **I.3.5 L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, du fait que l'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent, qui peut être utilisé par l'homme pour produire de l'électricité par l'intermédiaire d'aérogénérateur, plus généralement appelé « éolienne ».

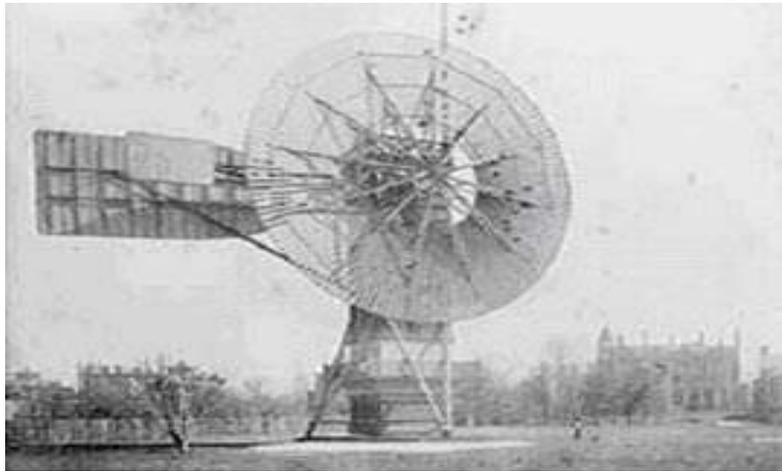
## **I.4 Production éolienne**

L'énergie éolienne représente la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde, au cours de la dernière décennie avec une moyenne de 30% par ans pour ces 10 dernières années [9] [15]. Le développement de la production par énergie éolienne a connu depuis environ 30 ans un grand progrès qui est attribué à six qualités principales : « L'énergie éolienne est abondante, bon marché, inépuisable, disponible presque partout, propre et sans impact sur le climat. Aucune autre source d'énergie ne possède toutes ces qualités. ». Elle représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique de sorte qu'elle constitue une alternative économique et technologique aux différentes sources d'énergie épuisables.

Y compris l'énergie du bois, le vent a été la première source d'énergie renouvelable exploitée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau [9] [7] [16].

On estime que la première utilisation des éoliennes remonte à 200 avant J-C. Elles étaient utilisées chez les Perses comme des moulins à vents afin de moulinier le grain. Au cours du XII<sup>e</sup>, siècle les premiers moulins s'installent en Europe, utilisés par les paysans pour échapper aux impôts taxant l'utilisation des cours d'eau sur les terres seigneuriales. Vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle le nombre des moulins estimés en Hollande et Danemark, respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000 [16]. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. Mais c'est surtout au Moyen Age que les moulins à vent se sont énormément développés particulièrement aux Pays Bas qui s'en servaient (encore aujourd'hui) pour pomper l'eau des rivières et des canaux. [15] [17] [18]

C'est en 1802 que l'idée de transformer l'énergie éolienne en énergie électrique voyait le jour. Lord Kelvin tenta d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs » [7], [16]. La première éolienne destinée à produire de l'électricité fut construite par Charles F. Brush en 1887. Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 kW.



**Figure I. 4 :** Première éolienne créée par Charles F. Brush [19].

Le météorologue danois Poul La Cour (1846-1908) fit des recherches pour améliorer l'efficacité des moulins à vent et améliorer l'invention de Charles F. Brush. Il découvrit grâce à ses recherches dans une soufflerie aérodynamique qu'une éolienne à rotation rapide ayant un nombre de pâles limité produisait plus d'électricité. Ces nouvelles applications de l'énergie éolienne ont connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. [19]

Malheureusement, à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

Il faudra attendre la seconde guerre mondiale pour booster à nouveau le marché de l'éolienne. En effet, la pénurie de charbon et de pétrole va présenter l'énergie éolienne comme une véritable alternative et permettre à l'éolien de trouver des fonds pour se développer. Johannes Juul, un des élèves de Poul la Cour, va construire en 1956 la première éolienne à produire du courant alternatif, composée de 3 pâles et d'une puissance de 200 kW.

En 1983, Darrieus, un ingénieur français fit construire la première éolienne à axe vertical. Cette éolienne dite de type Darrieus dont le fonctionnement repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (effet qui s'exerce sur les ailes d'un avion). Cette configuration présente un important avantage sur les éoliennes classiques: sa capacité à fonctionner quelle que soit la direction du vent. Des recherches sont en cours actuellement visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vents trop violents. [19]

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.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses de L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative variable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant large plus faible).

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mat, pales et multiplicateur) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux [14].

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

### **I.5 Situation de l'énergie éolienne en Algérie**

L'Algérie accuse un retard important dans la course aux énergies renouvelables, été élaboré dans le plan d'action '2011-2030', dans l'objectif d'installation d'une puissance de 1.5 GW de source éolienne [20]. A ce jour, une première et unique ferme éolienne de 10MW a été installée dans la région de KABERTEN dans la wilaya d'Adrar.

Il est cependant à noter que les tentatives de l'exploitation de l'énergie éolienne dans le territoire national ne datent pas d'hier. En effet, l'analyse d'un ensemble de comptes rendu et d'archives provenant du comité d'énergie du vent du service d'Hydraulique a montré que plusieurs essais ont été menés entre 1930 et 1974 dans l'objectif de promouvoir l'utilisation de l'énergie éolienne et ce pour la production électrique ou pour le pompage [21].

Les premiers travaux étaient liés à la prospection des sites favorables à l'installation d'aérogénérateurs. En effet, un premier atlas a été établi en 1930 par P.Seltzer [22] dans une étude climatologique de l'Algérie comparant un ensemble de 57 stations de mesure de données de vent, de température, de pression atmosphérique et de précipitations.

En 1951 la comité de l'énergie des vents départemental d'Alger [23], en collaboration avec M.Medinger [24], ont lancé des campagnes de mesures sur le potentiel éolien pour les stations de Bakhadda (Tiaret), Bugeaut (Anaba), Ain Skhoua (Saida), Boughzoul, Ain Temouchent, Tadjemout (Laghouat), Cap Carbon, Tébessa et Biskra. Avec une puissance de 1130Kwh/m<sup>2</sup> enregistrées dans les trois premiers sites respectivement, ces derniers ont été déjà définis comme des sites intéressants en termes de potentiel éolien. Il a été aussi prévu d'étendre les mesures à une vingtaine de stations



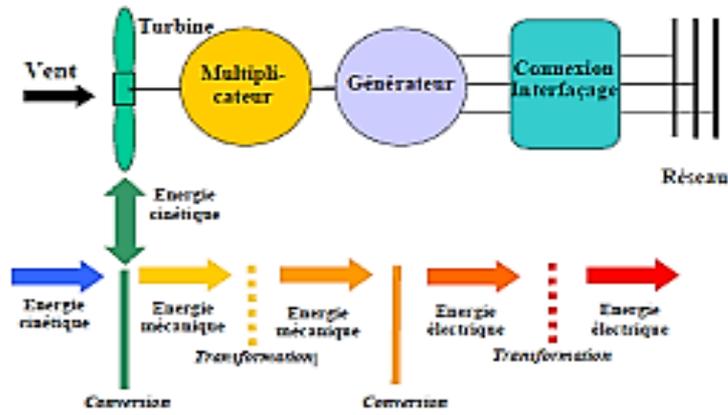


Figure I.6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.

### I.7 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments, les principaux présentés dans la figure I.7 :

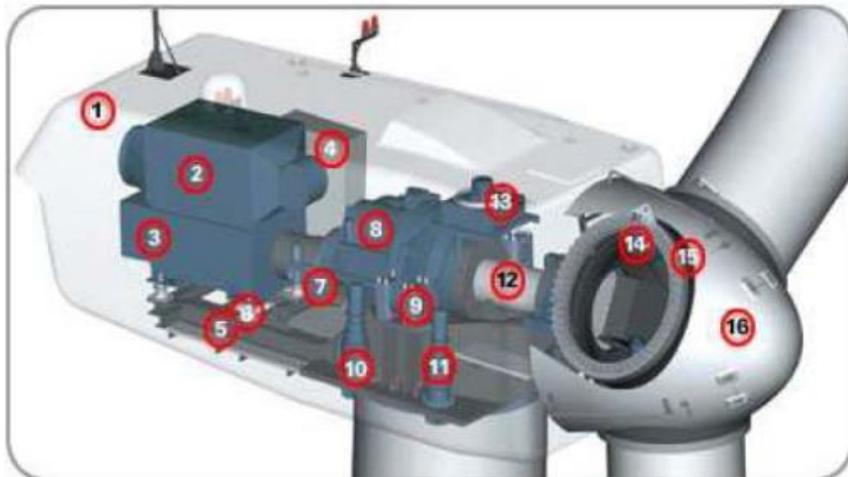


Figure I.7 : Exemple de système éolien

1: Nacelle, 2,13: Systèmes de refroidissement, 3: Génératrice, 4: Système de contrôle, 5: Armature métallique, 6,9: insonorisant, 7 : Frein à disque, 8: Multiplicateur de vitesse, 10,11: Servomoteurs, 12 : Arbre lent, 14 : Système d'orientation des pales, 15 : Les pales, 16 : Rotor de la turbine.

Un mat ou tour, supporte la nacelle et la turbine. Il est important qu'il soit haut du fait l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle partiellement insonorisée, avec une armature métallique, accueille la génératrice et son système de refroidissement, le multiplicateur de vitesse et différents équipements électroniques de contrôle qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement globale de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent supportant la turbine et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours /min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque, auquel est

accouplé le générateur. Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement à huile.

La turbine possède trois pales qui permettant de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique ou hydraulique permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par "mise en drapeau" ou seulement par rotation de leur extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électrique permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre ou bien deux et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent [27].

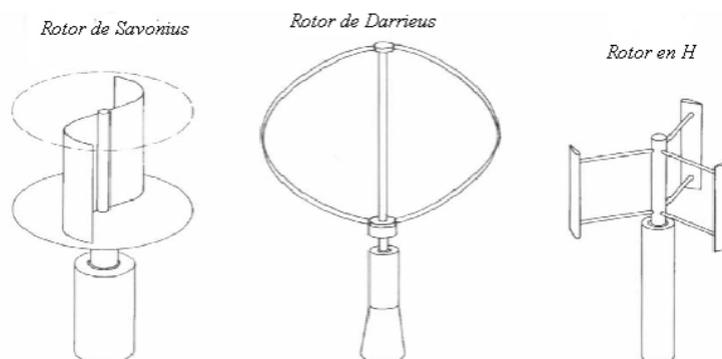
## I.8 Différents Types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Il existe deux grandes catégories d'éolienne, qui se réfèrent à la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice: les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT) [27].

### I.8.1 Les turbines à axe vertical

Les turbines à axe vertical sont très peu répandues et assez mal connues. Le rotor de ce type de turbine fonctionne grâce à la poussée axiale et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple de démarrage de ce type d'éolienne est faible ce qui constitue un avantage.

Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage du fait que, le palier supporte le poids de l'ensemble de la turbine [28].



**Figure I.8 :** Eolienne à axe vertical.

**Avantages des éoliennes à axe vertical [27]**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre les organes de commande, le générateur sol.
- Son axe vertical possède une symétrie adéquate ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.
- Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles)
- Intégrable au bâtiment.

**Inconvénient des éoliennes à axe vertical [27]**

- Elles ont un faible rendement que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement, en effet le poids du rotor pèse sur son socle, générant des frottements.

**I ..2 Eoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation [28].

La turbine peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne face au vent est nécessaire.

Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique s'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind).

Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont à noter qui sont dues au passage des pales derrière la mat (effet d'ombre de tour) [27].

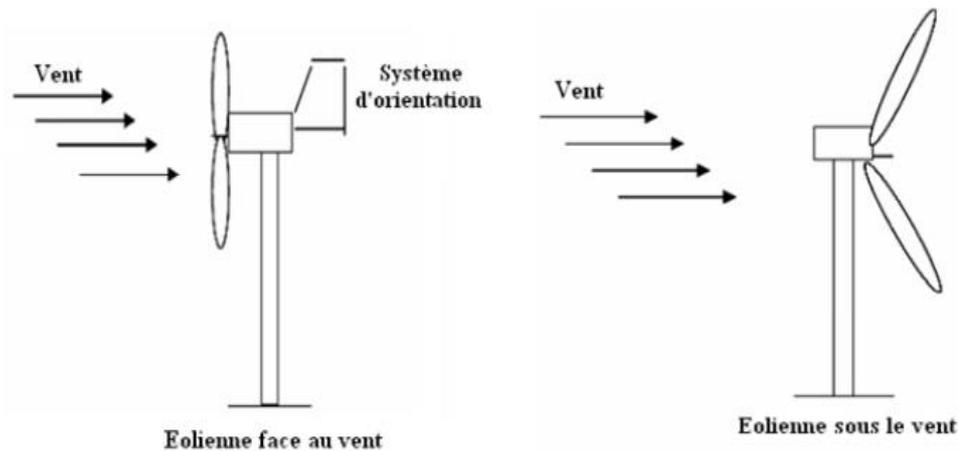


Figure I.9 : Eolienne à axe horizontal

### avantage des éoliennes à axe horizontal [27]

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur qui est plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- L'ajout d'un local pour l'appareillage n'est pas nécessaire puisque le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

### Inconvénients des éoliennes à axe horizontal [27]

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

## I.9 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne

En vue de l'exploitation de l'énergie fournie par le vent, plusieurs systèmes peuvent être utilisés. Nous pouvons classer en deux catégories :

- Les systèmes à vitesse fixe
- Les systèmes à vitesse variable

### I.9.1 Les systèmes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence de réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité, d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de

certaines de KW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui développeront à l'avenir pour cette gamme de puissance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la figure (Figure I.8). La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et la génératrice [28].

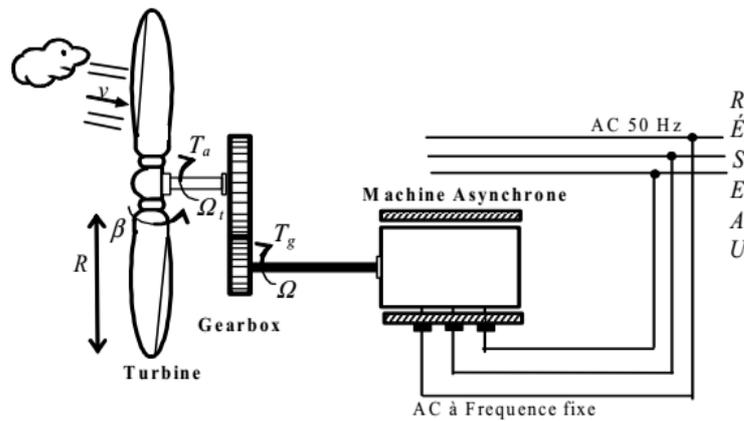


Figure I.10: Eolienne directement liée au réseau.

### Avantage du fonctionnement à vitesse fixe [9] [15]

Les avantages du fonctionnement à vitesse fixe sont représentés comme suit :

- Un système électrique plus simple.
- Utilisation d'une machine standard robuste et pas chère, et une fiabilité plus élevée.
- Une faible probabilité d'excitation des fréquences de résonances des éléments de l'éolienne.
- Absence d'interface d'électronique de puissance.
- Un cout moins cher.

### Inconvénient du fonctionnement à vitesse fixe. [9] [15]

- La puissance extraite n'est pas optimisée.
- Maintenance de la boîte de vitesse.
- Magnétisation de la machine non gérée.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc des applications limitées.
- En raison de tous ces inconvénients, les industriels ont été poussés à développer d'autres systèmes plus performants et fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large.

### I.9.2 Les systèmes à vitesse variable

Pour garantir un captage maximal de l'énergie incidente et d'améliorer le rendement et la qualité de la conversion de l'énergie, il faut ajuster en permanence la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent. L'optimisation de la puissance dans la charge ou le réseau récepteur peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I.11) [28].

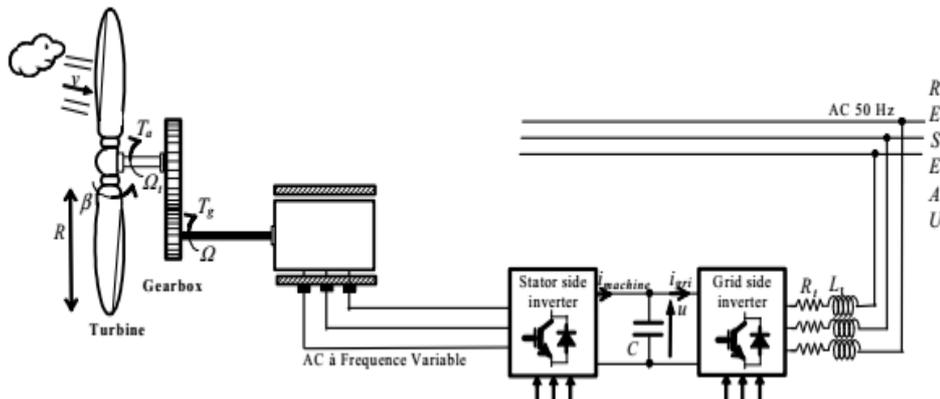


Figure I.11 : Eoliennes à vitesse variables.

#### Avantages de l'énergie éolienne :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre, elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets contrairement à l'énergie nucléaire.

#### Inconvénients de l'énergie éolienne :

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

- Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue.
- Les oiseaux : les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par le mauvais temps ou la nuit, les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celle-ci [27].

### I.10 L historique des machines électriques

Avant de s'étendre sur les différentes machines utilisées au sein des turbines, il convient de faire un petit détour sur les prémices, leur histoire qui ont été importantes et intéressantes dans notre vie de tous les jours.

L'histoire des machines électriques débuta avec le professeur Pacinotti (1841-1912) qui effectua des travaux sur un anneau tournant dans un champ magnétique. Bien que restée au stade expérimental, il a envisagé une utilisation en mode générateur et moteur. Cependant certaines voix se sont levées pour réfuter cette théorie car l'effet magnétique du courant électrique a été découvert un peu plus tôt par Oersted en 1820 et l'induction magnétique par Faraday en 1831.

En 1869, le belge Zénobe Gramme réalisa les premières génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Ses travaux furent présentés à l'Académie des Sciences de Paris et cette première machine a reçu le nom de machine de Gramme

En 1887 Nikola Tesla (1856-1943), ingénieur yougoslave en électronique, fonde une société de construction d'alternateurs. Grâce à ses travaux, l'utilisation du courant alternatif va se trouver profondément bouleversée et gagner la bataille du transport à distance. C'est donc dans les années 1890 que la première expérience de transport d'électricité s'est faite vers l'Allemagne sur une distance de 175 km avec un rendement de 75 %.

Tesla recommande d'abord l'utilisation des courants polyphasés et réussit à créer un champ magnétique tournant qui permet d'entraîner en rotation une armature mobile tournante.

Grâce à l'électricien Russe Michail Ossipowitsch Dolivo-Dobrowolski, l'invention du moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil intervient en 1889. Cette machine ne sera construite industriellement que deux ans plus tard. La paternité de cette invention est contestée et souvent attribuée à Tesla. Avant le début du vingtième siècle la plupart des machines électriques que nous connaissons actuellement avaient été mises en œuvre ou leur principe avait été déjà posé.

Les machines synchrones, asynchrones et à collecteur constituent l'essentiel du parc des machines électriques depuis un siècle et demi. Cependant, l'évolution de l'électronique de puissance, comme la découverte du transistor en 1948 et du thyristor en 1958, a permis au domaine des machines

électriques de ne pas rester figé, des progrès immenses ont été effectués dans ce domaine conduisant à d'importants développements théoriques et technologiques.

### I.11 Types de machine électrique utilisée dans la production d'énergie éolienne

#### I.11.1 Eolienne à machine asynchrone à cage [30]

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique, voir la (Figure I.12).

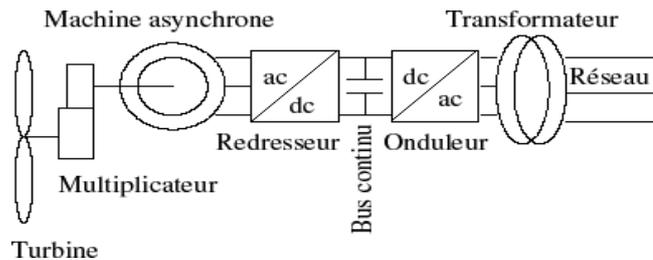


Figure I.12 : éolienne à MAS piloté au stator.[30]

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur ce qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu (représenté par une capacité sur la (Figure I.12)). Les pales de la turbine éolienne sont orientables (commandable) pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes [10].

#### I.11.2 Eolienne à machine asynchrone à double alimentation [30]

Dans cette conception le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique (Figure I.13). Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la 1ère configuration [10]

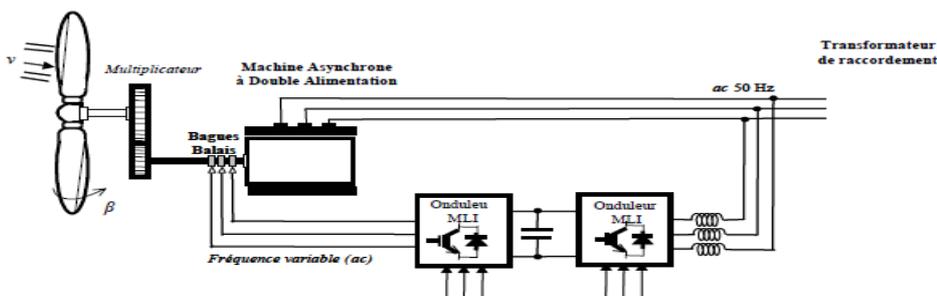


Figure I.13 : Eolienne à MADA pilotée au rotor [30]

### I.11.3 éolienne à machine synchrone [31]

L'intérêt croissant pour l'amélioration de performances des génératrices synchrones, a fait que depuis de nombreuses années elles sont largement répandues dans l'industrie plus connues sous le nom d'alternateurs. Il existe plusieurs types d'alternateurs qui peuvent se distinguer les uns des autres par leur inducteur (aussi appelé le rotor), qui peut être soit bobiné à pôles lisses ou saillants, ou à aimants permanents. Pour ce qui est de l'induit (généralement le stator), il est obligatoirement bobiné.

L'avantage du générateur synchrone par rapport au générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable.

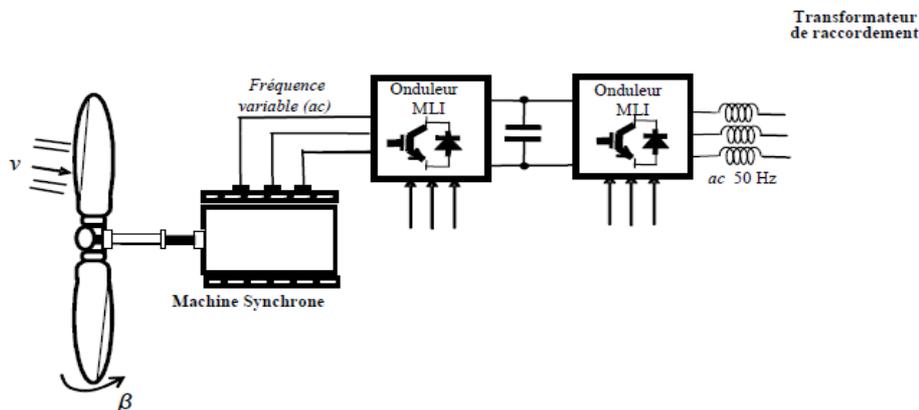


Figure I. 14 : Système éolien basé sur la génératrice synchrone.[31]

### I.11.4 Autres machines [30]

D'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids. Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple mais la puissance produite par ces éoliennes est généralement faible. Ce type de machine pourrait être un candidat de futures éoliennes.

## I.12 Aérogénérateur étudié

La technologie des aérogénérateurs s'est diversifiée en même temps qu'elle progressait. Ainsi, de nos jours, il existe de nombreuses sortes d'aérogénérateur. La machine asynchrone à cage d'écureuil, par ses qualités de robustesse, de coût et de simplicité, semble bien adaptée à l'utilisation dans un système éolien. Lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme.

Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées [32]. Une solution consiste à insérer un convertisseur entre la machine et le réseau. Le dispositif peut alors fonctionner à vitesse variable car quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension est redressée puis un onduleur côté réseau est chargé d'assurer la cohérence entre la fréquence du réseau et celle délivrée par le dispositif. Ainsi elle permet d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite et de son rendement énergétique comme on l'a indiqué sur la (Figure I.15).

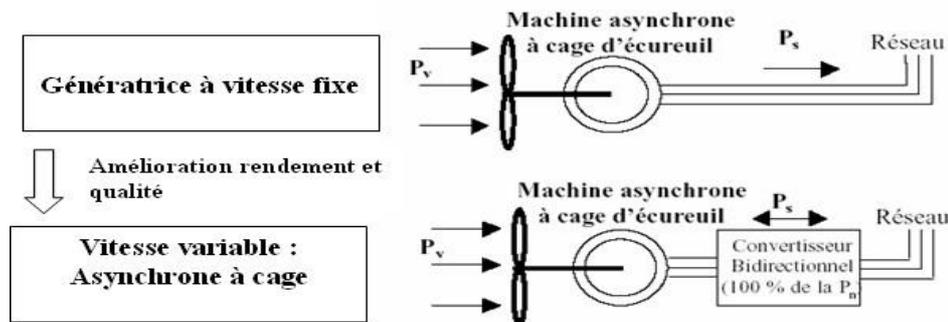


Figure I.15: Evolution de la configuration électrique [32]

Aujourd'hui, des nouveaux aérogénérateurs contiennent des Générateurs Asynchrones C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans cette thèse.

## I.13 L'utilisation de l'aérogénérateur asynchrone à cage [33]

### I.13.1 Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est le moteur industriel par excellence, les moteurs asynchrones ont, pour leur grande majorité, un rotor à cage.

Les progrès accomplis ces dernières années dans l'alimentation et la commande des machines n'ont fait que réduire la part des moteurs asynchrone à rotor bobiné par rapport à leurs homologues à cage d'écureuil.

### I.13.2 Générateur asynchrone

Le générateur asynchrone est beaucoup plus rare que l'alternateur, mais on le trouve dans quelques applications de puissance limitée comme les microcentrales hydrauliques, il occupe surtout la plus

grande part du marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage d'écureuil pour les puissances modestes, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour les installations plus importantes .

#### **I.14 Avantages et inconvénients de la MAS [34]**

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie; il est peu coûteux, on le fabrique en grande série, il est robuste, fiable et économique.

- Il fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transformations préalables de l'énergie électrique qui l'alimente, c'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organes délicats comme le collecteur du moteur à courant continu et qui n'utilise pas de contacts glissants comme le moteur synchrone (pour l'excitation du rotor).
- Les courants qui circulent dans le stator, constituent l'unique source externe du champ magnétique. Sa vitesse varie un peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissement est en générale ne dépasse pas quelques centièmes de la vitesse à vide, il est négligeable le plus souvent. Le démarrage des moteurs asynchrones ne pose pas de problèmes pour les unités de petite puissance. Par contre, pour les moteurs de forte puissance, il faut démarrer sous tension réduite pour éviter un appel de courant trop élevé.
- Par contre dans le moteur asynchrone les courants statoriques sont à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe pas. D'autre part on ne peut connaître les variables internes du rotor à cage qu'à travers le stator.
- L'inaccessibilité du rotor nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator. La simplicité structurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle due aux caractéristiques qui viennent d'être évoquées mais également aux non linéarités, à la difficulté d'identification et aux variations des paramètres ( $R_r$  en particulier) .

#### **I.14 Conclusion**

Dans ce chapitre une brève description du domaine des énergies renouvelables, ainsi que l'évolution de la production d'électricité dans le monde ont été montrées, Quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la conception des turbines, les différents types des éoliennes utilisés, ainsi que leur fonctionnement.

Ce chapitre a été clos par un état de l'art sur les différentes configurations électriques utilisées et leurs influences sur le fonctionnement des aérogénérateurs. Le chapitre qui suit, sera consacré à l'étude et la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion.

**Chapitre II**

**Modélisation de**

**l'aérogénérateur asynchrone**

**à cage d'écureuil**

## II.1 Introduction [28]

Comme tout système, l'étude de l'ensemble turbine-machine s'appuie sur un modèle de représentation. Ainsi, la modélisation est primordiale pour l'étude et la commande de cet ensemble, suivant les buts visés, cette dernière pourra être plus ou moins complexe et précise.

L'objectif de ce chapitre est la modélisation de l'ensemble turbine-machine où nous intéresserions à la machine asynchrone à cage qui est la plus utilisée dans les systèmes éoliens.

## II.2 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable

### II.2.1 Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

La nacelle a le rôle de capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie électrique. Cette opération est basée sur un certain nombre de lois physiques qui sont présentées dans ce qui suit.

### II.2.2. Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

#### Loi de Betz [35]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.2) sur le quel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$ , soit  $V_{12}$

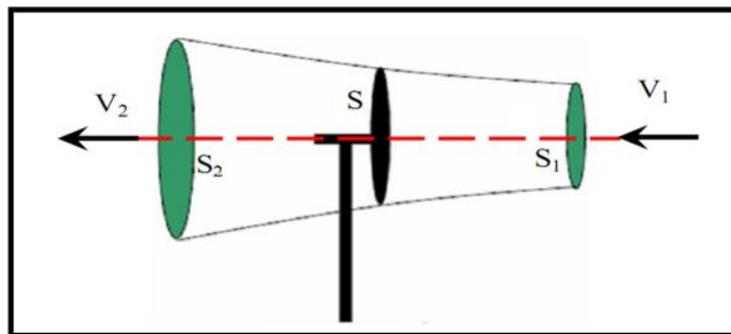


Figure II.1 : Principe de la théorie de Betz[35].

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est

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

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression (équation II.1)

$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.3})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance théorique  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

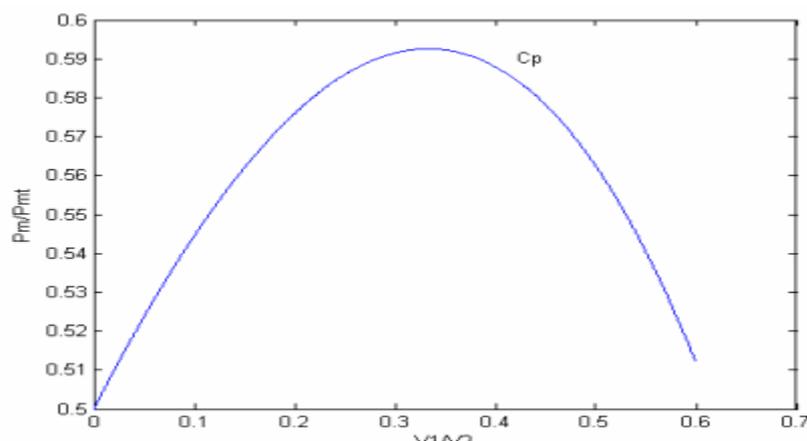
$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors donné par :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} = C_p \quad (\text{II.5})$$

La figure II.2 représente l'évolution du ratio  $\frac{P_m}{P_{mt}}$  en fonction de  $\frac{V_1}{V_2}$ . On s'aperçoit que ce ratio appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maximum de  $16/27$  soit 0.59. C'est cette limite théorique appelé la limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible

Pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [28].



**Figure II.2** : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent[28].

Dans des cas réels, l'éolienne aura toujours un plus petit coefficient maximum de puissance que le facteur de Betz ; à cause des pertes aérodynamiques qui dépendent de la conception du rotor et de la construction (nombre de pales, poids, rigidité, etc...) comme le montre la figure II.3. Le coefficient de puissance et l'efficacité d'un système d'éolienne sont différents. L'efficacité d'une éolienne inclut la

perte dans la transmission mécanique, la production d'électricité, les pertes du convertisseur, etc., où le coefficient de puissance est l'efficacité de convertir la puissance du vent en puissance mécanique dans l'arbre du rotor.

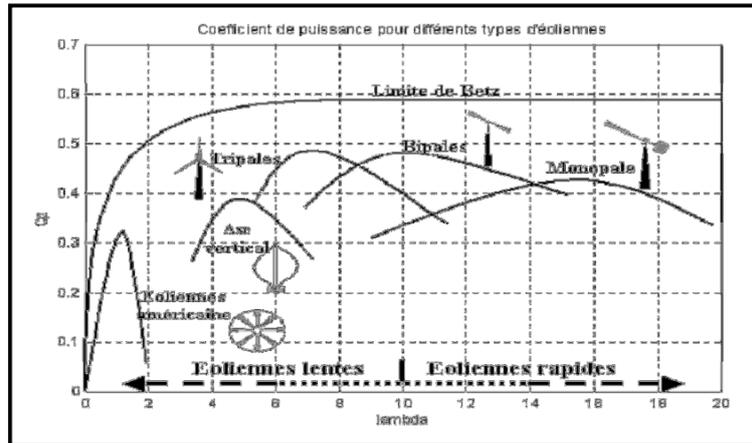


Figure II.3: Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne [9].

L'expression de coefficient de puissance de note éolienne est donnée par :

$$C_p = C_1 \left( C_2 \cdot \frac{1}{\lambda} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \exp \left( C_5 \cdot \frac{1}{\lambda} \right) + C_6 \cdot \lambda \tag{II.6}$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{II.7}$$

Et :

$C_1$	0.05176
$C_2$	116
$C_3$	0.4
$C_4$	5
$C_5$	21
$C_6$	0.0068

Tableau II.1: Coefficients définissant l'évolution de Cp

### II.2.3. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations II.1, II.4, II.5, la puissance mécanique Pm disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime par[28] :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^2 \cdot V_1^2 \tag{II.8}$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_{\text{turbine}} \cdot R}{V_1} \quad (\text{II.9})$$

$\Omega_{\text{turbine}}$  : vitesse de rotation de la turbine (avant multiplicateur) et R le rayon de l'aérogénérateur.

La relation (II.9) 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.

#### II.2.4. Modélisation du vent [28]

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente.

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- Développer et affiner la modélisation du rotor.
- Evaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- Fournir une aide pour l'implantation des machines.

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par (II.8) [28].

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \cdot \sin(w_k t) \quad (\text{II.10})$$

Avec :

A : la vitesse moyenne du vent

$a_k$  : amplitude de l'harmonique d'ordre K

$w_k$  : pulsation de l'harmonique de l'ordre K

i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

Dans notre cas l'équation du vent serait :

$$V_v = 6.5 + 0.2 * \sin(0.1047t) + 2 * \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 * \sin(3.6645t) \quad (\text{II.11})$$

### II.2.5 Bilan des forces sur une pale [31]

La Figure II.5 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $\vec{F}_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\vec{F}_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée.

Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

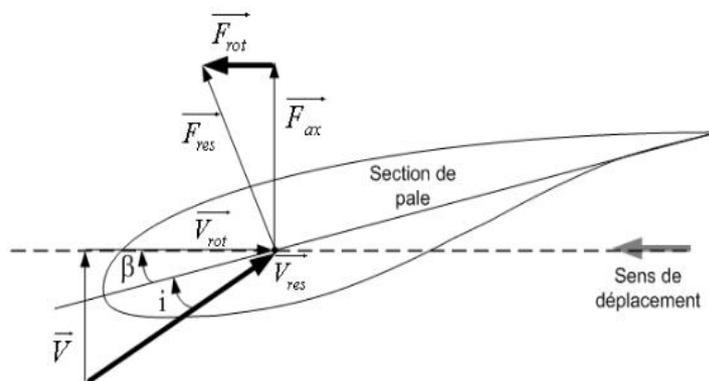


Figure II. 4: Bilan des forces sur une pale [31].

### II.2.6 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Considérons une turbine éolienne à trois pales orientables, fixées sur l'arbre de la turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie du vent. Ceci permet de déduire que chaque partie de ces ensemble subites trois contraintes à savoir sa propre inertie. D'une manière générale l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui, à son tour est lié à l'arbre de la génératrice. La figure (II.5) illustre d'une manière détaillée le schéma équivalent de la turbine éolienne [36].

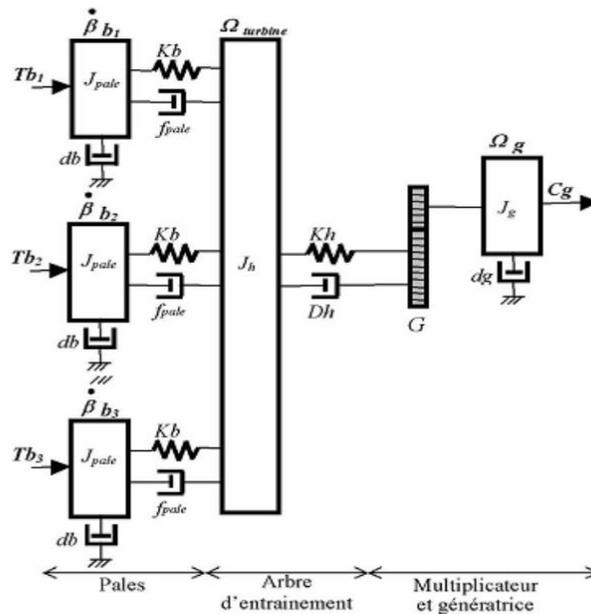


Figure II.5 : Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne [35].

Les trois pales sont considérées de conception identique et possède donc :

- La même inertie  $J_{pale}$
- La même élasticité  $K_b$
- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $d_b$

Ces pales sont orientables et présentent un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ .

Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées  $\dot{\beta}_{b1}$   $\dot{\beta}_{b2}$   $\dot{\beta}_{b3}$ .

Chaque pale reçoit une force  $T_{b1}$ ,  $T_{b2}$ ,  $T_{b3}$  qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Son inertie  $J_h$
- Son élasticité  $K_h$
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $D_h$

Le rotor de la génératrice possède :

- Une inertie  $J_g$
- Un coefficient de frottement  $d_g$

Ce rotor transmet un couple entraînant  $C_g$  à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée  $\Omega_{mec}$ . La turbine comporte également un multiplicateur de vitesse noté  $G$ .

Si l'en considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toute les forces de poussée ( $T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$ ) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leurs coefficient de frottement par rapport à l'air  $d_b$  est très faible et peut être ignoré.

De même, les pertes par frottement coté turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement coté génératrice.

En tenant compte de ses considérations, le modèle mécanique de la figure (II.5) devient celui donné dans la figure (II.6) comportant deux masses tournantes grâce aux couple aérodynamique  $C_{aer}$  [35].

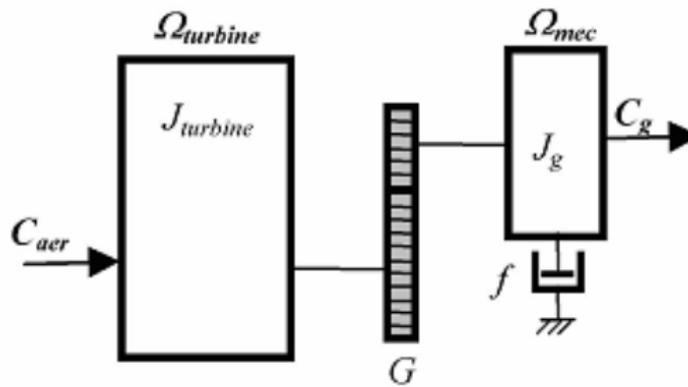


Figure II.6: modèle mécanique simplifié de la turbine [35].

### II.2.7. Equation dynamique de l'arbre[28]

La mase de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie notée  $J = J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reporté sur le rotor de la génératrice et l'inertie de cette dernière

$$J = J_{turbine} + J_{génératrice}$$

(II.12)

Il est à noté que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.13}$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.14})$$

$J$  : L'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

$C_{mec}$  : le couple mécanique.

$C_{em}$  : le couple électromagnétique produit par la génératrice.

$C_{vis}$  : le couple des frottements visqueux.

$C_g$  : Couple de la génératrice.

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

$$C_{vis} = f_m \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.15})$$

La modélisation d'une turbine éolienne revient à connaître le couple qu'elle développe au niveau du rotor, et qu'elle extrait de la puissance éolienne, suivant ces équation :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^2 \quad (\text{II.16})$$

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{mec}}{V_v} \quad (\text{II.17})$$

$$C_{éol} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_v^2 \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (\text{II.18})$$

Afin d'obtenir la vitesse de rotation de la turbine, on utilise l'équation mécanique de l'arbre de la turbine solidairement lié à celui de la machine utilisée.

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{éol} - C_{em} - f_m \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.19})$$

$P_{éol}$  : la puissance éolienne,  $\lambda$  : la vitesse relative de la turbine,  $\Omega$  : la vitesse de rotation,

$V_v$  : vitesse du vent,  $\rho$  : la densité de l'air,  $C_p$  : le coefficient de puissance,  $C_{éol}$  : le couple éolien,  $J_t$  : inertie de la turbine,  $J_m$  : inertie de la machine,  $C_{em}$  : couple électromagnétique,  $f_m$  : coefficient des frottements visqueux dans la machine.

**Remarque** : le coefficient de frottement dans la turbine est négligeable.

## II.2. 8Modèle du multiplicateur [28] :

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (\text{II.20})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{II.21}$$

On établit à partir des équations précédentes, un schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine (figure II.7)

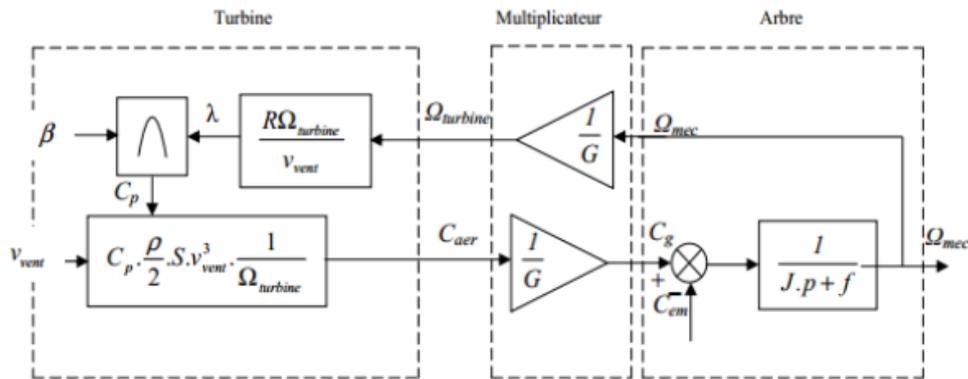


Figure II.7 : schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine [28].

Le schéma bloc nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée par action sur l'angle de calage des pales et sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

### II.2.9 Résultats de simulation de la turbine en boucle ouverte :

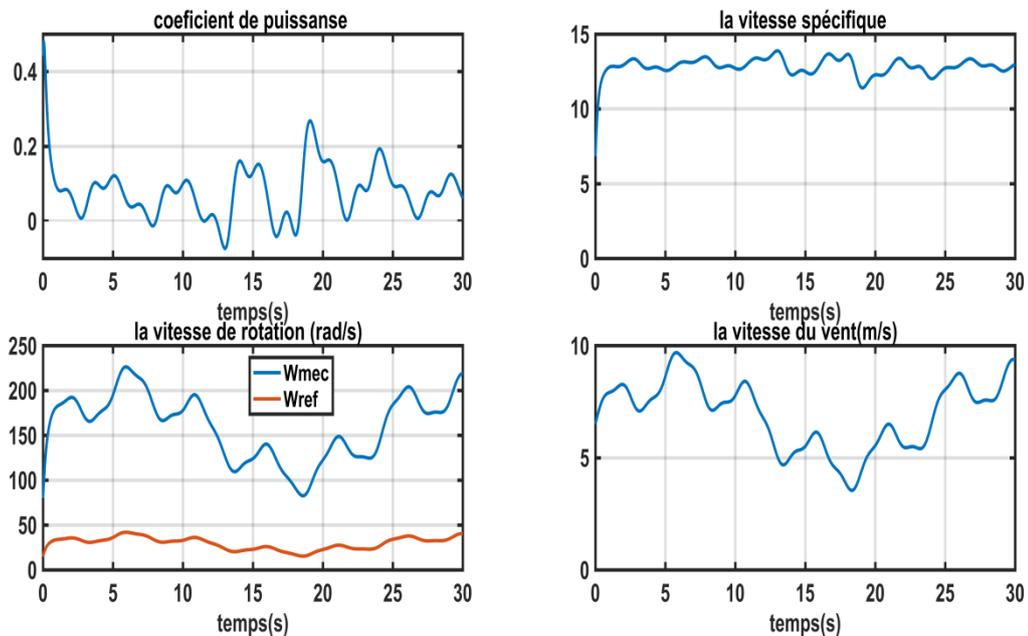


Figure II.8 : Résultats de simulation de la turbine en boucle ouverte.

Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats présentés sont obtenus pour une turbine de 10kW dont les paramètres sont définis dans l'annexe. Ils sont réalisés en boucle ouverte afin d'observer le comportement de la turbine face aux fluctuations du vent.

- La Figure de profil du vent a une valeur moyenne de (6.5 m/s) appliqué à la turbine.
- Les Figures du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique montrent leur évolution au cours du temps. On constate qu'ils ne sont pas maintenues à leur valeur nominale ( $C_{pnom}=0.48$ , et  $\lambda_{nom}=8.1$ ) et qu'ils varient avec la variation du vent.
- D'après la figure de la variation de la vitesse mécanique on remarque qu'elle est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre. On note aussi un grand écart entre la vitesse mécanique et sa valeur de référence.
- Les performances dynamiques obtenues montrent que la puissance extraite n'est pas optimisée.

## II.3 Modélisation de la GAS

### II.3.1 Description de la GAS :

Un moteur asynchrone à cage est essentiellement constitué de deux parties principales, le stator et le rotor comme il est montré sur la (Figure II.8) :

- Le stator, représente la partie statique de la machine. Il est constitué d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont bobinées trois enroulements formant les enroulements statoriques.
- Au centre de ce cylindre, on trouve le rotor de la machine dont le circuit magnétique est composé de tôles isolées entre elles pour empêcher la circulation de courants de Foucault [4], [5].

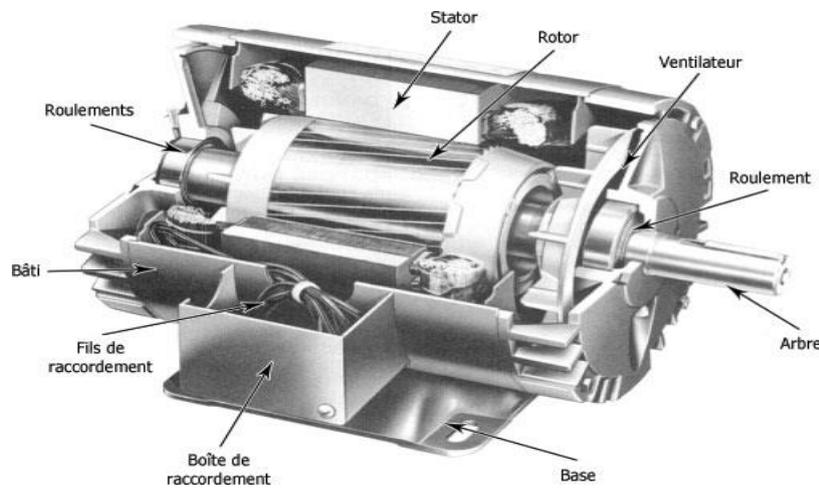


Figure II.9 Description d'une machine asynchrone [37]

### II.3.2 Principe de fonctionnement de la GAS [37]

L'application adéquate d'une tension de pulsation  $\omega_s$  aux enroulements statoriques d'une machine asynchrone, crée dans l'entre fer du moteur un champ magnétique statorique tournant à la vitesse de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II.22})$$

L'enroulement du rotor est donc balayé par ce champ tournant, ce qui induit une force magnétomotrice qui donnera naissance à des courants rotoriques. Ces courants donnent naissance à un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement.

Le rotor se met donc à tourner avec une vitesse  $\Omega_r$  pour tenter de suivre le champ statorique. Quand cette vitesse est additionnée à la vitesse électrique de rotation du rotor  $\Omega$ , on obtient selon la relation interne de la machine asynchrone, la pulsation statorique  $\Omega_s$  [6]:

$$\Omega = \Omega_s - \Omega_r \quad (\text{II.23})$$

### Fonctionnement en génératrice [38]

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant).

Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique. Lorsque cette génératrice est connectée au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »). Si la vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator. Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, il se développe alors une force électromagnétique similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone. La différence (adimensionnée) entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement, sa valeur ne dépassant pas en pratique quelques pour-cent. Pour une augmentation limitée de la vitesse de rotation de l'éolienne, le couple et donc la puissance fournie sont proportionnels au glissement. Toutefois, à partir d'une certaine vitesse de rotation, une diminution sensible du flux dans la génératrice se produit, ce qui nécessite plus de courant pour un couple équivalent. Passée une valeur maximale de couple, une diminution du couple et donc de la puissance est observée (Figure II.9). Il est dangereux que l'éolienne soit amenée à fonctionner dans cette zone, car d'une part la diminution du couple résistant pourrait entraîner une survitesse de la machine et d'autre part la dissipation de puissance dans la génératrice risquerait d'endommager certains éléments par surchauffe. Il faut souligner l'intérêt de ce type de fonctionnement de la génératrice asynchrone car il permet à l'éolienne de subir de faibles variations ponctuelles de la vitesse du vent (rafales) sans solliciter exagérément la transmission (multiplicateur notamment).

Dans ce cas, le glissement  $g$  de la machine définie par  $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$  est négative.

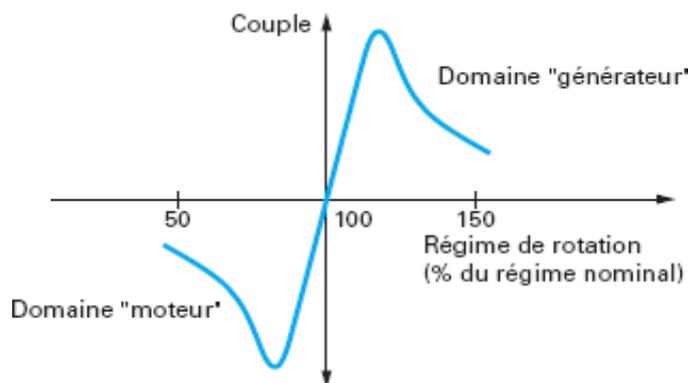


Figure II.10 : glissement d'une génératrice asynchrone [38]

### II.3.3 Modélisation dans le repère triphasé :

La modélisation consiste à mettre en équation les différents paramètres d'un système. Toute fois cette opération nous met face au problème suivant : plus le modèle se rapproche de la réalité, plus il devient complexe et demande un moyen de calcul très important, par contre si le système est simplifié, les calculs deviennent faciles mais on s'éloigne de la réalité. Un choix judicieux consiste à idéaliser la machine et par conséquent garder les phénomènes les plus importants et négliger les phénomènes secondaires. Il est donc important que le modèle soit utilisable aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique.

#### II.3.3.a Equations générales de la machine :

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_{Sabc}] = [R_S][I_{Sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{Sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Avec  $[R_S]$  et  $[R_r]$  sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques par phase.

$[V_{Sabc}]$ ,  $[V_{rabc}]$ ,  $[I_{Sabc}]$  et  $[I_{rabc}]$  sont respectivement les vecteurs tensions et courants statoriques et rotoriques

$[\varphi_{Sabc}]$  et  $[\varphi_{rabc}]$  sont les matrices de flux statoriques et rotoriques suivant les axes a, b, c.

Les flux s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$L_S, L_r$  : Inductances propres statorique et rotorique ;

$L_m$  : Inductances mutuelles entre une phase statorique et une phase rotorique ;

$[M_{Sr}]$  : Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$\begin{cases} [\varphi_{Sabc}] = [L_S][I_{Sabc}] + [M_{Sr}][I_{rabc}] \\ [\varphi_{rabc}] = [M_{Sr}][I_{Sabc}] + [L_r][I_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Avec :  $[L_S], [L_r]$  sont représentés respectivement les matrices inductances statorique et rotorique exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

$$[V_{Sabc}] = \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix}, [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, [I_{Sabc}] = \begin{bmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{bmatrix}, [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[\varphi_{Sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{Sa} \\ \varphi_{Sb} \\ \varphi_{Sc} \end{bmatrix}, [\varphi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}, [L_S] = \begin{bmatrix} l_{Saa} & l_{Sab} & l_{Sab} \\ l_{Sab} & l_{Saa} & l_{Sab} \\ l_{Sab} & l_{Sab} & l_{Saa} \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_{raa} & l_{rab} & l_{rab} \\ l_{rab} & l_{raa} & l_{rab} \\ l_{rab} & l_{rab} & l_{raa} \end{bmatrix}$$

$$[M_{Sr}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, [R_S] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

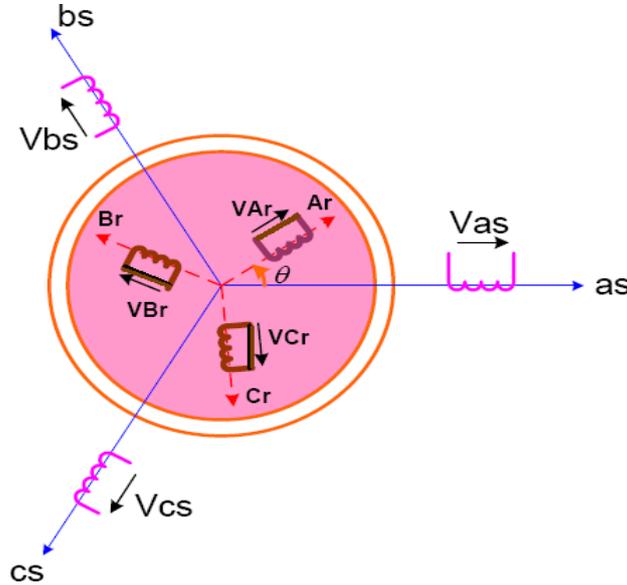


Figure II.11 Représentation de la machine asynchrone à cage d'écurueil [38]

### II.4 Transformation de Park

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales, pour cela on applique les matrices de passage de Park directe et inverse suivantes :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Avec :

$\theta = \theta_s$  : Grandeurs statoriques ;  $\theta = \theta_r$  : grandeurs rotoriques

Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux est donné par la transformation suivante:

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

X: tension, courant ou flux; o: indice de l'axe homopolaire.

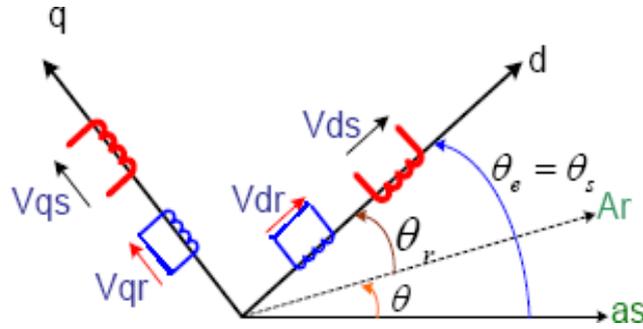


Figure II.12 Représentation de la machine dans le repère diphasé [39]

Le modèle classique de la machine asynchrone dans le repère de Park :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \times i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \times \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \times i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_s \times \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \times i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \times \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \times i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \times \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{(II.26)}$$

Tel que  $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}, i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$  sont respectivement les tensions et les courants dans le modèle de Park.

$R_s, R_r, L_s$  et  $L_r$  sont respectivement les résistances et les inductances statorique et rotorique et  $M_{sr}$  l'inductance magnétisante.

$\omega_r = p \times \Omega_{mec}$  Où  $p$  est le nombre de paire de pôles

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \times i_{sd} + M_{sr} \times i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \times i_{sq} + M_{sr} \times i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r \times i_{rd} + M_{sr} \times i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \times i_{rq} + M_{sr} \times i_{sq} \end{cases} \quad \text{(II.27)}$$

En introduisant le système d'équations (II.26) dans (II.27), et en posant  $\omega = \omega_s - \omega_r$

On trouve :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_S i_{sd} + L_S \frac{di_{sd}}{dt} + M_{Sr} \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_S (L_S i_{sq} + M_{Sr} i_{rq}) \\ V_{sq} = R_S i_{sq} + L_S \frac{di_{sq}}{dt} + M_{Sr} \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_S (L_S i_{sd} + M_{Sr} i_{rd}) \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} + M_{Sr} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega (L_r i_{rq} + M_{Sr} i_{sq}) \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + M_{Sr} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega (L_r i_{rd} + M_{Sr} i_{sd}) \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

### II.5 Puissance absorbée et couple électromagnétique :

La puissance absorbée par le MAS selon le système d'axes (d, q) tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par :

$$P_a = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \quad (\text{II.29})$$

En remplaçant les tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  par leur expressions (II.26) dans (II.29), on aura

$$P_a = [R_S (i_{sd}^2 + i_{sq}^2)] + [i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt}] + [\omega_S (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd})] \quad (\text{II.30})$$

L'expression (II.30) se compose de trois termes :

le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;

le second représente la variation de l'énergie électromagnétique ;

le dernier terme est la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ) .

Sachant que :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_S} = p \frac{P_{em}}{\omega_S} \quad (\text{II.31})$$

Alors, l'expression de couple électromagnétique est égale à :

$$C_{em} = p \times (\varphi_{sd} \times i_{sq} - \varphi_{sq} \times i_{sd}) \quad (\text{II.32})$$

En remplaçant les flux ( $\varphi_{sd}$ ,  $\varphi_{sq}$ ) donnés par la relation (II.27) dans la relation (II.32) on obtient :

$$C_{em} = p M_{Sr} \times (i_{sq} \times i_{rd} - i_{sd} \times i_{rq})$$

En substituant les courants rotoriques par leurs expressions (II.27) :

$$C_{em} = p \frac{M_{Sr}}{L_r} (\varphi_{rd} \times i_{sq} - \varphi_{rq} \times i_{sd}) \quad (\text{II.33})$$

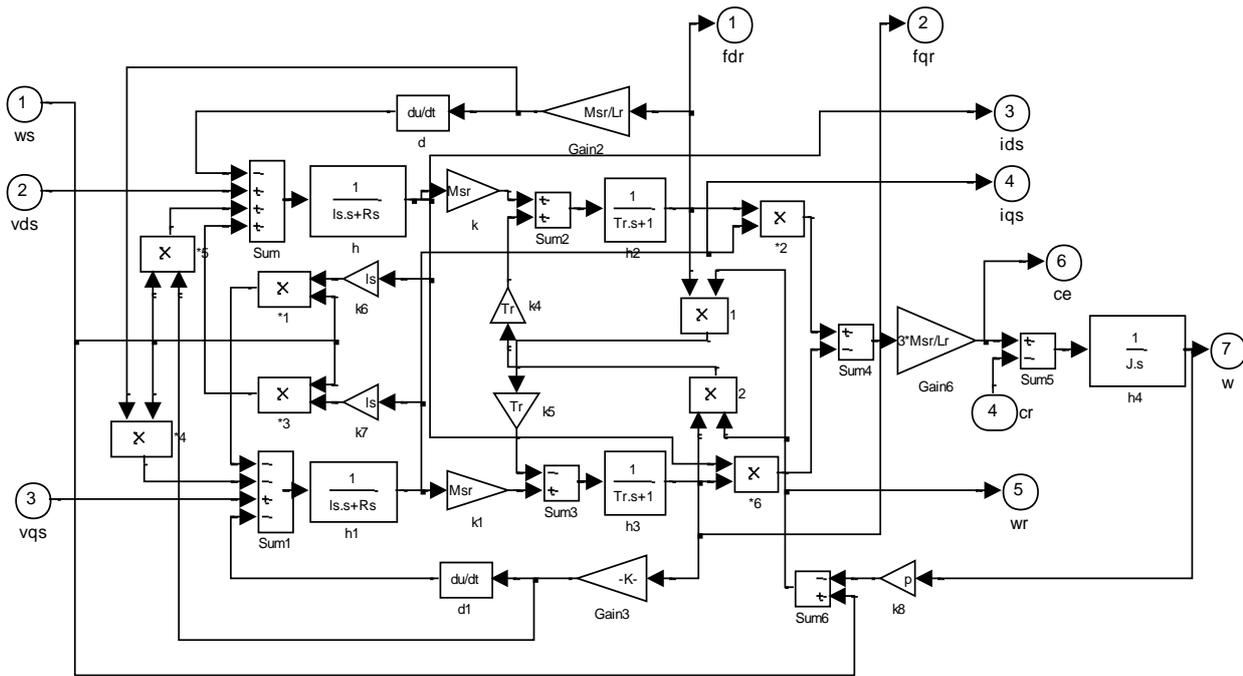


Figure II.12 : Schéma bloc simulink du modèle de la GAS

### II.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir un modèle pour la turbine et un modèle mathématique de la machine asynchrone à travers des équations simples à l'aide de la transformation de Park. Celles-ci nous faciliteront par la suite l'établissement des différents modèles que nous allons utiliser dans la simulation de l'éolienne.

# ***Chapitre III***

## ***Stratégies de commande appliquées à l'aérogénérateur asynchrone à cage***

### III.1 Introduction [40]

Comme tout système, l'étude d'un ensemble turbine, machine et convertisseur s'appuie sur un modèle de représentation. Ainsi, la modélisation est primordiale pour l'étude et la commande de cet ensemble, suivant les buts visés, cette dernière pourra être plus ou moins complexe et précise. La recherche d'une très bonne précision mène souvent à des systèmes mathématiques relativement difficile à résoudre, ce qui nécessite des temps de calculs conséquents. En revanche, un modèle basé sur un nombre d'hypothèses simplificatrices requiert certes des temps de calculs limités mais aboutit dans la plupart des cas à une précision restreinte.

Avec les différentes technologies appliquées aux éoliennes pour la production d'énergie électrique d'origine éolienne, ce chapitre nous donne une petite introduction sur la zone de fonctionnement (zone de l'extraction maximale de la puissance MPPT) dont nous allons nous concentrer pour la suite de notre travail, et de présenter les orientations du flux dans une machine asynchrone triphasé. La simulation à été faite pour l'orientation du flux rotorique seulement, pour une machine alimentée en tension.

### III.2 Stratégie de commande de la turbine

#### III.2.1 Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable demande la définition d'une stratégie de commande globale de la turbine. Il faut donc indiquer les variations de la vitesse de rotation, couple ou puissance souhaitées en fonction des variations de la vitesse du vent [41].

La figure (III.1) représente une courbe typique de la puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent.

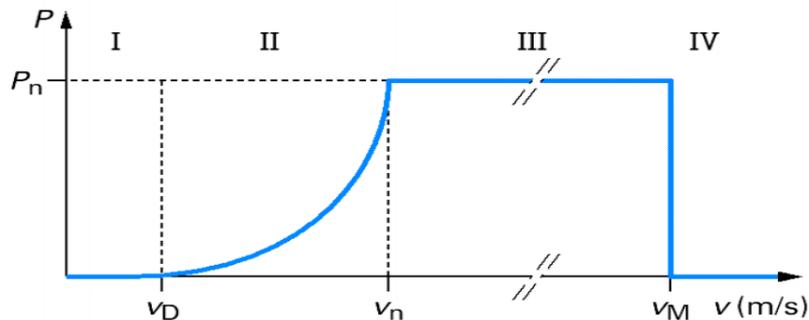


Figure III.1 : puissance extraite en fonction de la vitesse du vent [42].

Sur la caractéristique de l'exploitation de l'éolienne de la figure précédente, il existe quatre zones principales :

- **Zone I** : la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage de l'éolienne  $V_D$ , et dans ce cas l'éolienne est en arrêt et ne produit aucune énergie.

- **Zone II :** La vitesse du vent est comprise entre  $V_D$  et la vitesse nominale du vent  $V_n$ , elle correspond à la zone où il est possible d'optimiser la conversion de l'énergie éolienne, et où il est intéressant de faire varier la vitesse de rotation.
- **Zone III :** La puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale  $P_n$ .
- **Zone IV:** Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale  $V_M$  admissible par l'éolienne, la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence afin de protéger la partie mécanique de l'éolienne et d'éviter son endommagement.

En travaillant à vitesse variable (adaptée à la vitesse du vent), le lieu des points de fonctionnement à puissance maximale décrit la courbe de puissance de la zone II [42].

### III.2.2 Technique d'extraction du maximum de puissance

#### III.2.2.1 Bilan des puissances

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être 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. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la 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  $P_{aer}$  diminuée des pertes (représenté par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique (figure)

$$P_{elec} = P_{aer} - Pertes \tag{III.1}$$

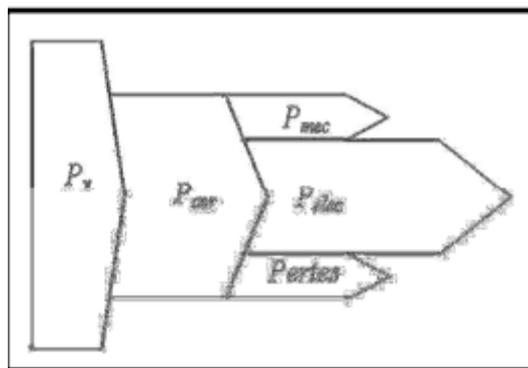


Figure III.2: Diagramme de conversion de puissance [9].

La puissance mécanique stocké dans l'inertie totale  $J$  et apparaissant dans sur l'arbre de la génératrice  $P_{mec}$  est exprimé comme étant le produit entre le couple mécanique  $C_{mec}$  et la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$  :

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \tag{III.2}$$

Nous allons présenter différents stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande qui sont maintenant expliquées :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

### **III.2.3 Maximisation de la puissance par asservissement de la vitesse**

#### **Principe**

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuant. Les fluctuations du vent constituant la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine et son variateur sont idéaux et donc, quel que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égale à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em\_ref} \quad (III.3)$$

La technique d'extraction du maximum de puissance consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir la maximum de puissance générée. La vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{j} (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (III.4)$$

Le couple électromagnétique de référence  $C_{em\_ref}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em\_ref} = C_{ass}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (III.5)$$

$C_{ass}$  : Régulateur de vitesse

$\Omega_{ref}$  : vitesse mécanique de référence

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ( $\Omega_{turbine\_ref}$ ) pour maximiser la puissance extraite. En prenant compte le gain de multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine\_ref} \quad (III.6)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale de ratio de vitesse  $\lambda_{Cpmax}$  (à  $\beta$  constant égale à 0) permettant d'obtenir la valeur maximale de  $C_p$  Figure(III.3)

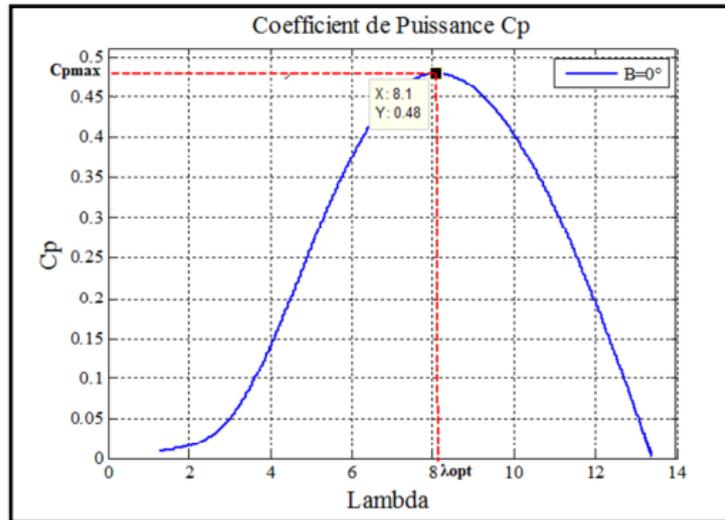


Figure III.3 : Fonctionnement optimale de la turbine [9].

### III.2.4 Conception du correcteur de vitesse

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux taches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui consiste une entrée perturbatrice.

Différents topologies de correcteur peuvent être utilisées pour l'asservissement de la vitesse.

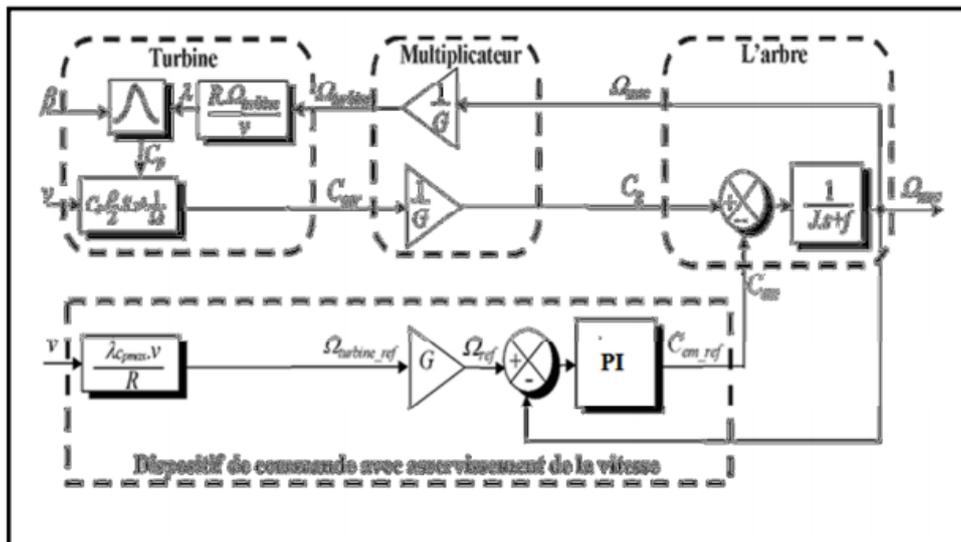


Figure III.4 : schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de vitesse [9].

### III.2.4.1 Dimensionnement du régulateur de la vitesse (MPPT)

Le calcul des régulateurs est basé sur la dynamique en boucle fermée à l'aide du principe de compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est présentée par le schéma bloc de la (Figure III.5) :

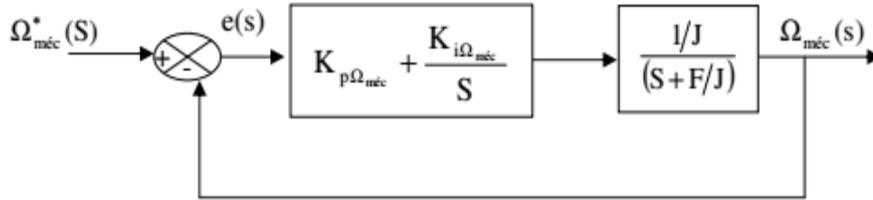


Figure III.5 : Schéma fonctionnel de régulateur de la vitesse.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$G(s) = \frac{K_{p\Omega_{méc}}}{s} \left( s + \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \right) \quad (III.7)$$

Par Compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (III.8)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{\Omega_{méc}}{\Omega^*_{méc}} = \frac{1}{\frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}}s + 1} \quad (III.9)$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{\Omega_{méc}}{\Omega^*_{méc}} = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (III.10)$$

$$\tau = \frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (III.11)$$

Le régulateur de la vitesse  $\Omega_{méc}$ , est:

$$K_{p\Omega_{méc}} = \frac{J}{\tau} \quad (III.12)$$

$$K_{i\Omega_{méc}} = \frac{F}{J} = \frac{F}{J} \quad (III.13)$$

### III.2.5 Résultats de la simulation de la MPPT

Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, les résultats présentés dans la suite sont obtenus pour une turbine de 10KW dont les paramètres sont définis dans l'annexe A. Ils sont réalisés dans la Zone 2 afin d'exploiter le maximum d'énergie du vent

disponible, cette énergie est maximisée en réglant le coefficient de puissance  $C_p$ , qui dépend de la vitesse de la génératrice ou encore du ration de la vitesse  $\lambda$ .

Le maintien du coefficient de puissance nécessite la conception d'une stratégie de commande (MPPT) permettant la maximisation de la puissance électrique générée, en ajustant la vitesse de rotation à sa valeur de référence par le biais d'un régulateur classique de type PI, quelle que soit la vitesse considérée et le degré de perturbation du vent. La figure qui présente le profil du vent a une valeur moyenne de (6.5 m/s) appliqué à la turbine. Cette valeur été estimée dans le sud-ouest de l'Algérie.

- La figure de coefficient de puissance montre que l'application de la commande MPPT permet de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur nominale égale à 0.48.
- La figure de la vitesse spécifique montre son évolution au cours du temps, on constate que cette vitesse oscille légèrement autour de la vitesse spécifique nominale ( $\lambda_{nom}=8.1$ ) avec la variation du vent et garde cette valeur dans le but d'augmenter la production.
- D'après la Figure de la vitesse mécanique on remarque qu'elle est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre, on constate aussi que la vitesse mécanique suit parfaitement sa valeur de référence, ce qui confirme l'efficacité de la commande appliquée.

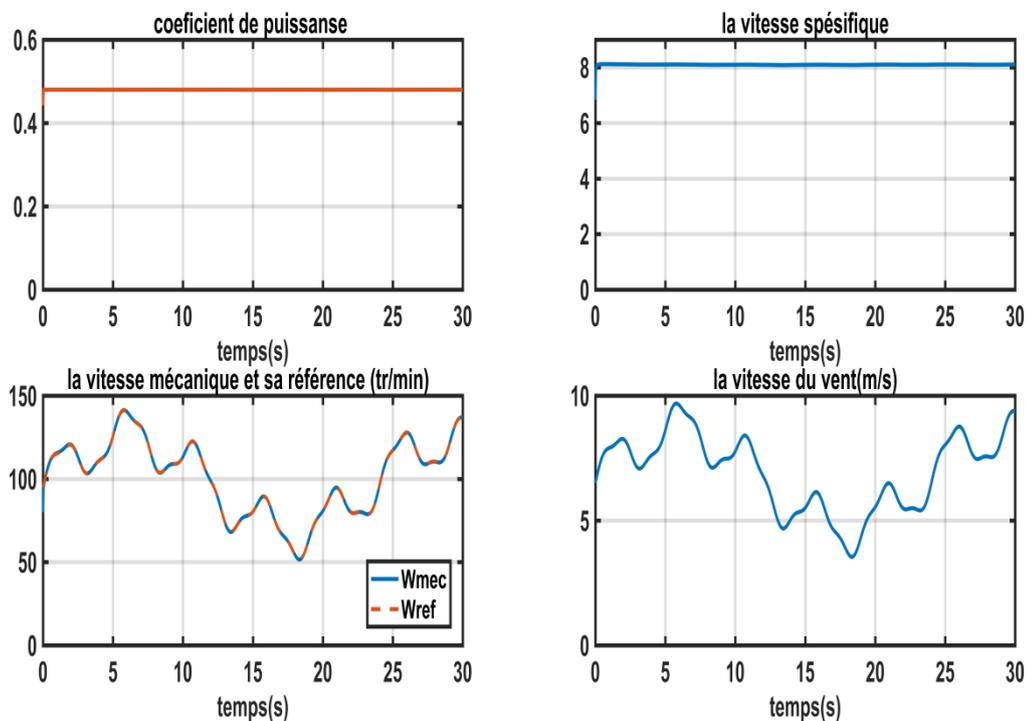


Figure III.6 : Résultats de la simulation de la MPPT

### III.3 La Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF)

L'examen de l'expression du couple de la machine asynchrone montre qu'elle résulte d'une différence de produits de deux composantes en quadrature, des flux rotoriques et des courants statoriques qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine [43].

L'objectif de la commande par orientation du flux est le découplage des grandeurs responsables de la magnétisation de la machine et de la production du couple. Mathématiquement, la loi de la commande consiste à établir l'ensemble des transformations pour passer d'un système possédant une double non linéarité structurelle à un système linéaire qui assure l'indépendance entre la création du flux et la production du couple comme dans une machine à courant continu à excitation séparée[43].

Commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe «d, q». Un choix judicieux de l'angle d'orientation du repère «d, q» entraîne l'alignement de l'axe «d» sur la résultante du flux, cet alignement permet l'annulation de la composante transversale du flux comme l'indique dans (Figure III.7) [44].

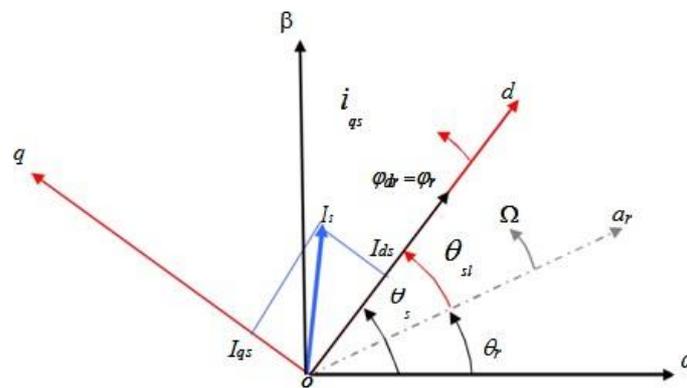


Figure III. 7 Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer) [45]

- **Choix d'orientation de flux**

Le choix des axes d'orientation peut être fait selon l'une des directions des flux de la machine à savoir le flux rotorique, statorique ou d'entrefer.

- $\varphi_{rq} = 0$  et  $\varphi_r = \varphi_{rd}$  : c'est le flux rotorique qui orienté.
- $\varphi_{sd} = 0$  et  $\varphi_s = \varphi_{sq}$  : c'est le flux statorique qui orienté.

Dans les deux cas le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statorique en quadrature avec le flux.

L'orientation du flux rotorique permet d'obtenir un couple de démarrage important et nécessite la connaissance des paramètres rotorique. [44]

Dans tout ce qui va suivre l'orientation du flux rotorique est la méthode qui sera retenue.

### III.3.1 Principe du contrôle par flux orienté

Dans ce cas le flux rotorique est orienté sur l'axe «d» d'une référence solidaire au champ tournant de vitesse( $\omega_c$ ), donc on peut remarquer les propriétés suivantes :

- La composante transversale du flux rotorique est nulle. ( $\varphi_{rq} = 0$ )
- L'axe «d» est aligné systématiquement sur le vecteur du flux rotorique. ( $\overline{\varphi_r} = \varphi_{rd}$ )
- La composante longitudinale du courant rotorique est nulle si le flux rotorique est maintenu constant

$$(\varphi_r = cst \rightarrow i_{rd} = 0)$$

Le couple électromagnétique instantané résulte d'une différence de produit de deux grandeurs scalaires, par exemple, réalisés à partir des composantes du courant statorique  $i_{sd}, i_{sq}$  et du flux rotoriques  $\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$  :

$$C_{em} = p \frac{M_{Sr}}{L_r} (\varphi_{rd} \times i_{sq} - \varphi_{rq} \times i_{sd}) \quad (III.14)$$

Cette expression exprime clairement le couplage entre le contrôle des deux grandeurs  $\varphi_r$  et  $C_{em}$  par les deux composantes du courant statorique.

- L'action sur  $i_{sd}$  agit en même temps sur le couple et sur le flux  $\varphi_{rq}$  .
- La même chose pour le courant  $i_{sq}$  qui agit en même temps sur  $C_{em}$  et  $\varphi_{rd}$  .

$$\text{Avec } (\varphi_{rq} = 0) \text{ et } (\varphi_r = \varphi_{rd})$$

Le couple devient :

$$C_{em} = p \frac{M_{Sr}}{L_r} \varphi_{rd} \times i_{sq} \quad (III.15)$$

Le modèle vectoriel de la machine asynchrone est décrit par les équations suivantes :

A partir de les tensions rotoriques , on trouve :

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_r \rightarrow i_{rd} = -\frac{1}{R_r} \frac{d}{dt} \varphi_r \quad (III.16)$$

$$0 = R_r i_{rq} + \omega_r \varphi_r \rightarrow \omega_r = -\frac{R_r}{\varphi_r} i_{rq} \quad (III.17)$$

En déduit également à partir de l'équation du flux  $\varphi_{rq}$  une relation entre les courants de l'axe "q" :

$$\varphi_{rq} = 0 = L_r i_{rq} + M_{Sr} i_{sq} \rightarrow i_{rq} = -\frac{M_{Sr}}{L_r} i_{sq} \quad (III.18)$$

Et à partir de l'équation du flux rotorique  $\varphi_r = \varphi_{rd}$  on tire une relation entre les courants de l'axe "q" et  $\varphi_r$  :

$$\varphi_{rd} = L_r i_{rq} + M_{Sr} i_{sq} \rightarrow i_{rd} = -\frac{1}{L_r} (\varphi_{rd} - M_{Sr} i_{sq}) \quad (\text{III.19})$$

- La relation entre  $\omega_r$ ,  $i_{sq}$  et  $\varphi_r$  :

$$\omega_r = R_r \frac{M_{Sr}}{L_r \varphi_r} i_{sq} \quad (\text{III.20})$$

- La relation entre  $i_{sd}$  et  $\varphi_r$  :

$$i_{sd} = \frac{L_r}{R_r M_{Sr}} \left( \frac{R_r}{L_r} \varphi_r + \frac{d}{dt} \varphi_r \right) \quad (\text{III.21})$$

Après la transformation de Laplace on trouve :

$$\varphi_r = \frac{M_{Sr}}{1 + T_r s} i_{sd} \quad (\text{III.22})$$

### III.3.2 Types de la commande vectorielle

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux principales méthodes, la première appelée méthode directe qui à été développé par F.Blaschke, la seconde connue par la méthode indirecte développée par K.Hasse [43].

#### III.3.2.1 Commande vectorielle directe

Pour déterminer le position et la norme du flux (contrôler par contre réaction) il faut utiliser les capteurs à effet HALL placés sur les dents de stator (ceci nécessite des moteur spéciaux), ils sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans les conditions sévères telles que les vibrations et. Les échauffements excessifs, et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables.

L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes:

- La non fiabilité de la mesure du flux
- problème de filtrage du signal mesuré.
- précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs+filtre) [46].

Afin de pouvoir utiliser une machine standard les capteurs de flux doivent être remplacés par estimateur de flux. Nous appliquons la commande vectorielle directe à la machine asynchrone alimentée en tension avec convertisseur.

### III.3.2.2 Commande vectorielle indirecte

Cette méthode n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor. Cette dernière peut être développée par deux groupes principaux :

- Le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées.
- Dans le deuxième groupe, le vecteur de flux rotorique est estimé à partir de la mesure des courants statoriques et de la vitesse du rotor, en se basant sur les équations du circuit rotorique du moteur asynchrone dans un système de référence tournant en synchronisme avec le vecteur de flux rotorique.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation en vers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique  $T_r$ . En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué [47]

### III.3.3 Structure de la CVOFR de la machine asynchrone alimentée en tension

#### III.3.3.1 Expression générale

La commande vectorielle à flux rotorique orienté que nous mettons en œuvre est basée sur une orientation du repère tournant d'axes (d, q) tels que l'axe d soit confondu avec la direction de  $\varphi_r$  [48]. Le flux étant orienté sur l'axe d, l'équation d'état  $[\dot{X}] = [A][X] + [B][U]$  nous permet d'exprimer  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$ ,  $\varphi_r$  et  $\omega_s$  avec  $\varphi_{rq} = 0$  et  $\overline{\varphi_{rd}} = 0$  :

$$\begin{cases} V_{sd} = \sigma L_S \frac{di_{sd}}{dt} + \left( R_S + R_r \frac{M_{Sr}^2}{L_r^2} \right) i_{sd} - \omega_s \sigma L_S i_{sq} - \frac{M_{Sr}}{L_r^2} R_r \varphi_r \\ V_{sq} = \sigma L_S \frac{di_{sq}}{dt} + \left( R_S + R_r \frac{M_{Sr}^2}{L_r^2} \right) i_{sq} + \omega_s \sigma L_S i_{sd} + \frac{M_{Sr}}{L_r^2} p \Omega \varphi_r \\ 0 = -R_r \frac{M_{Sr}}{L_r} i_{sd} + \frac{d\varphi_r}{dt} + T_r \varphi_r \\ 0 = -R_r \frac{M_{Sr}}{L_r} i_{sq} + \omega_r \varphi_r \end{cases} \quad (III.23)$$

Ces expressions peuvent être exploitées telles quelles pour réaliser la commande vectorielle à flux orienté des machines asynchrones alimentées en tension mais  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  influent à la fois sur  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  donc sur le flux et le couple, Il est donc nécessaire de réaliser un découplage :

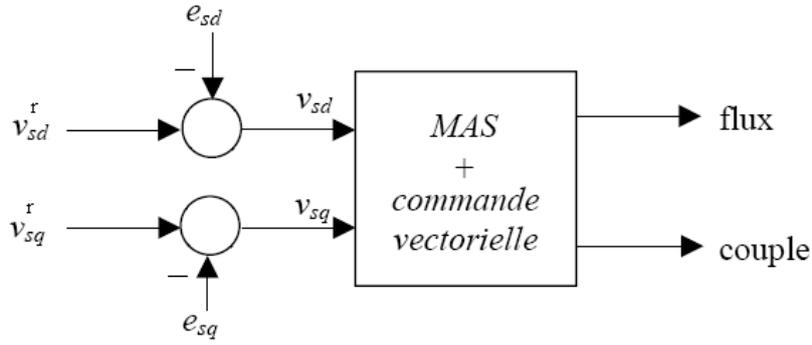


Figure III.8 Description des couplages.

### III.3.3.2 Découplage par compensation

On peut écrire les équations de tensions statoriques (III.23) après l'application de la transformation de Laplace sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = \left( \sigma L_S S + R_S + R_r \frac{M_{Sr}^2}{L_r^2} \right) i_{sd} - \omega_S \sigma L_S i_{sq} - \frac{M_{Sr}}{L_r^2} R_r \varphi_r \\ V_{sq} = \left( \sigma L_S S + R_S + R_r \frac{M_{Sr}^2}{L_r^2} \right) i_{sq} + \omega_S \sigma L_S i_{sd} + \frac{M_{Sr}}{L_r^2} p \Omega \varphi_r \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Définissons deux nouvelles variables de commande  $V_{sd}^*$  et  $V_{sq}^*$  tel que :

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd}^* + e_{sd} \\ V_{sq} = V_{sq}^* + e_{sq} \end{cases} \quad \begin{cases} V_{sd}^* = V_{sd} - e_{sd} \\ V_{sq}^* = V_{sq} - e_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Avec les tensions  $V_{sd}^*$ ,  $V_{sq}^*$  sont :

$$\begin{cases} V_{sd}^* = \left( \sigma L_S S + R_S + R_r \frac{M_{Sr}^2}{L_r^2} \right) i_{sd} = \frac{1}{A(S)} i_{sd} \\ V_{sq}^* = \left( \sigma L_S S + R_S + R_r \frac{M_{Sr}^2}{L_r^2} \right) i_{sq} = \frac{1}{A(S)} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

$$\text{Où } A(S) = \frac{i_{sd}}{V_{sd}^*} = \frac{i_{sq}}{V_{sq}^*} = \frac{1}{\sigma L_S S + R_S + R_r \frac{M_{Sr}^2}{L_r^2}} \quad (\text{III.27})$$

Et les f.é.m. de couplage sont :

$$\begin{cases} e_{sd} = -\omega_S \sigma L_S i_{sq} - \frac{M_{Sr}}{L_r^2} R_r \varphi_r \\ e_{sq} = \omega_S \sigma L_S i_{sd} + \frac{M_{Sr}}{L_r} p \Omega \varphi_r \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

La (Figure III.9) résume l'algorithme de la commande vectorielle adoptée :



L'éq (III.16) est une fonction de Transfer de 1<sup>ère</sup> ordre de constante de temps :  $\tau_{id} = \frac{1}{K_{p\_id} \times b}$  et de temps de réponse :  $t_{r\_id\_BF} = 3 \times \tau_{id} = \frac{3}{K_{p\_id} \times b}$

On impose un temps de réponse généralement par rapport à celui du courant en boucle ouverte

$$t_{r\_id\_Bo} = 3\tau_{id\_Bo} = \frac{3}{a}, \quad t_{r\_id\_BF} = t_{r\_id\_Bo} \times h \quad (III.31)$$

$$\text{Avec } h > 1 \text{ et on détermine } K_{p\_id} = \frac{3}{t_{r\_id\_BF} \times b} \quad (III.32)$$

$$\text{Et le régulateur intégrateur se détermine par } K_{i\_id} = a \times K_{p\_id} \quad (III.33)$$

### III.3.4.2 réglage du courant $i_{sq}$

De la même manière que le réglage du courant  $i_{sd}$

On impose :

$$t_{r\_iq\_BF} = t_{r\_iq\_Bo} \times h \quad (III.34)$$

Et on détermine :

$$K_{p\_iq} = \frac{3}{t_{r\_iq\_BF} \times b} \quad (III.35)$$

$$K_{i\_iq} = a \times K_{p\_iq} \quad (III.36)$$

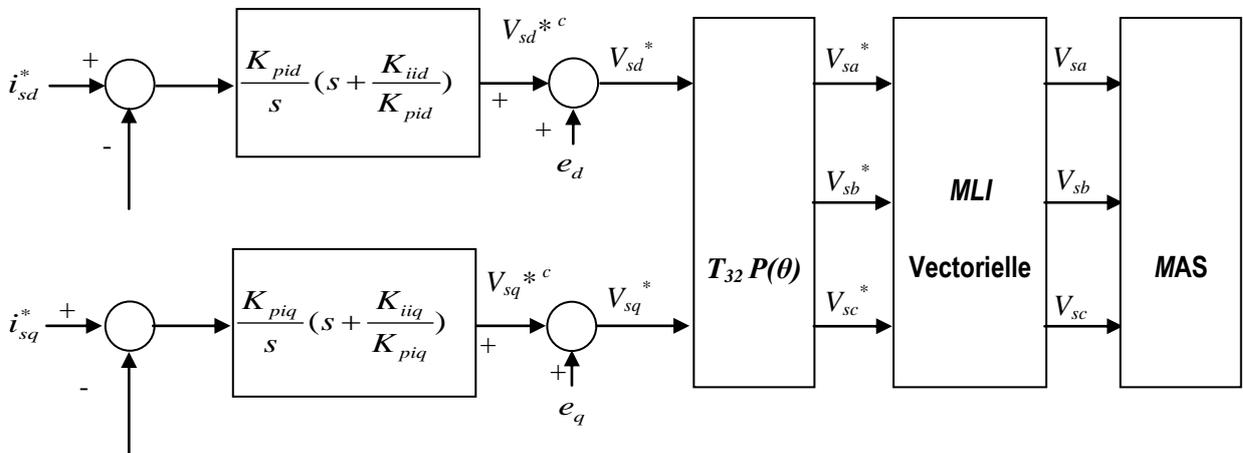


Figure II.11 : Schéma regroupant les régulateurs de courants.

### III.3.5 Résultats de simulation de la commande vectorielle

D'après Les résultats obtenus on remarque que :

- Que le courant en quadrature est à l'image du couple, et que le courant direct est à l'image du flux direct, ce qui montre que le but de la commande vectorielle a été atteint

- Le flux direct poursuit sa référence et le flux en quadratique est nul, cela est dû à l'orientation du flux rotorique réalisé.

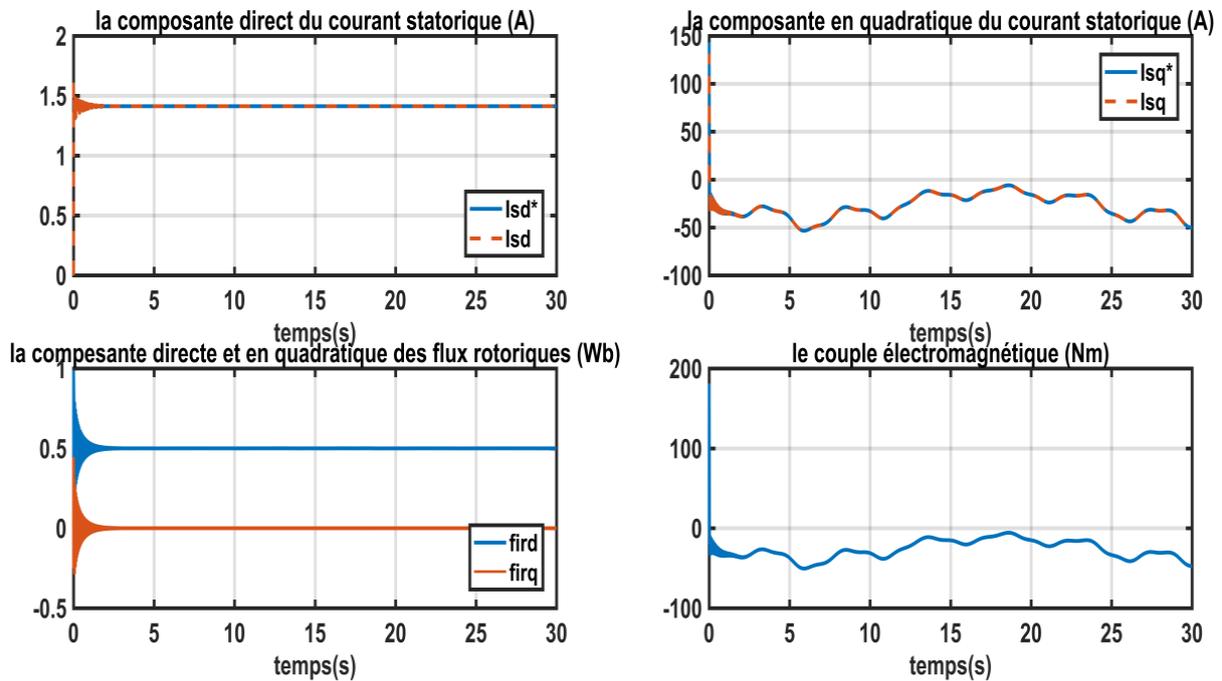


Figure III.12 : Résultats de simulation de la commande vectorielle

### III.4 Commande en vitesse de la turbine par Logique Floue

L'homme perçoit, raisonne, imagine et décide à partir des modèles ou de représentation. Sa pensée n'est pas binaire. L'idée de la logique floue est de capturer l'imprécision de la pensée humaine et de l'exprimer avec des outils mathématiques appropriés.[49]

La logique floue est fondée sur un principe d'incompatibilité, énoncé par le père fondateur L.Zadeh, qui stipule « plus la complexité d'un système croit, notre aptitude à donner des explications précises et significatives de son comportement diminue, jusqu'à ce que précision et signification deviennent deux propriétés mutuellement exclusives, plus on veut tendre vers les problèmes du monde réel, plus le flou devient la solution » [50]

#### III.4.1 Historique [51]

L'intérêt de faire entrer l'approche floue dans la régulation ou l'asservissement des processus industriels, pour lesquels les informations disponibles sont souvent imprécises, incertaines et parfois qualitatives, dans des boucles de régulations parfois incomplètes. Le savoir-faire de l'opérateur, constitué entre autres souvent des règles simples, lui permet de conduire chaque machine plus correctement parfois qu'un algorithme classique.

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs américains, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de

sous ensemble flou soit proposé par A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkley en Californie, qui a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société F. L. Smidt-Fuller. Grace au chercheur japonais M.Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985.

#### III.4.2 Les avantages et les inconvénients de la commande par logique floue [51]

##### ➤ *Les avantages*

- Le non-nécessite d'une modélisation (Cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable).
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non-linéaire).
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus.
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser).

##### ➤ *Les inconvénients*

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).
- L'approche artisanale et en systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile).
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non-linéaire.

#### III.4.3 ensembles flous

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas ...) ou 1 (...appartient à l'ensemble).

Un ensemble flou est défini par une fonction qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1 [52]. C'est l'élément de base de la logique floue. Il a été introduit pour la première fois par Zadeh en 1965. Le concept de ce dernier a pour but d'éviter le passage brusque d'une classe à une autre et de

permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe ; c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à une classe [53] [54].

L'appartenance d'un élément à un ensemble est une question qui ne présente pas d'ambiguïté. Cependant, dans le cas réel, on rencontre fréquemment des situations complexes. Un ensemble flou sera alors utilisé pour modéliser l'incertitude et les imprécisions. Il est défini sur un ensemble de valeur appelé l'univers du discours  $X$  par une fonction d'appartenance  $\mu(x)$  comprise généralement entre 0 et 1 et qui quantifie le degré avec lequel chaque élément  $x$  de  $X$  appartient à cet ensemble.

A partir de cela, on pourrait dire que dans la théorie des ensembles appartenir à un ensemble ne se fait que d'une manière complète «soit cet élément appartient à un ensemble ou il ne lui appartient pas». Cependant, dans la théorie de la logique floue, on prend en compte le degré d'appartenance de l'élément. Ce degré d'appartenance, noté  $\mu(x)$ , est normalisé entre «0» et «1».

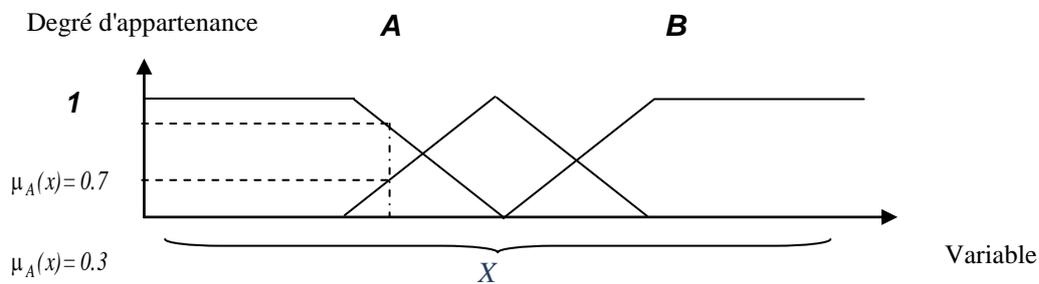


Figure III.13 Représentation schématique de l'univers de discours

### III.4.4 Opération sur les ensembles flous

Les règles d'inférences font appel aux opérateurs «NON » « ET » et « OU » qui s'appliquent aux variables floues.

- **Opérateur NON**

Selon la théorie des ensembles, l'ensemble complémentaire :

$$c = \bar{a} = \text{NON} (a) \tag{III.37}$$

Est défini par les éléments de  $x$  qui n'appartiennent pas à l'ensemble  $a$ . Dans le cas de la logique floue, cette définition peut être exprimée par les fonctions d'appartenance de la manière suivante :

$$\mu_c (x) = 1 - \mu_a (x) \tag{III.38}$$

La figure met en évidence cette relation

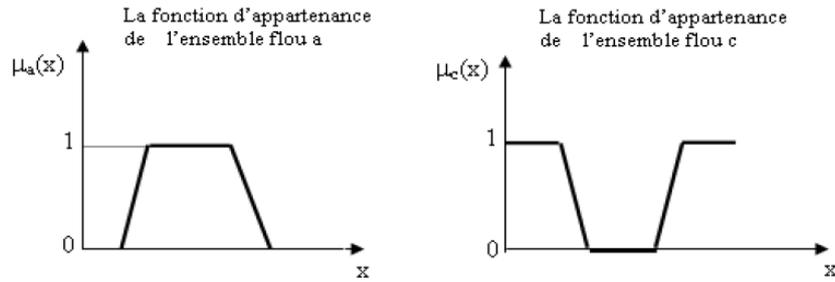


Figure III.14 Opération NON

• **Opérateur ET :**

L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensembles a et b on écrit :

$$c = a \cap b = a \text{ ET } b \tag{III.39}$$

Dans la logique floue, l'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la formulation du minimum, appliqué aux fonctions d'appartenance  $\mu_a(x)$  et  $\mu_b(x)$  des deux ensembles a et b, à savoir :

$$\mu_c(x) = \min [\mu_a(x), \mu_b(x)] \tag{III.40}$$

On parle alors de l'opérateur minimum. Cette opération est représentée à la figure suivante

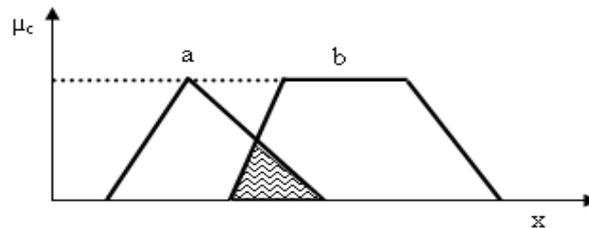


Figure III.15 :Opérateur ET

• **Opérateur OU :**

L'opérateur OU correspond à l'union de deux ensembles a et b. on a donc :

$$c = a \cup b = a \text{ OU } b \tag{III.41}$$

La réalisation de l'opérateur ou au niveau de la logique floue se fait en général par la formulation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_a(x)$  et  $\mu_b(x)$  des deux ensembles a et b On a donc l'opérateur maximum :

$$\mu_c(x) = \max [\mu_a(x), \mu_b(x)] \tag{III.42}$$

Cette opération est représentée à la figure suivante

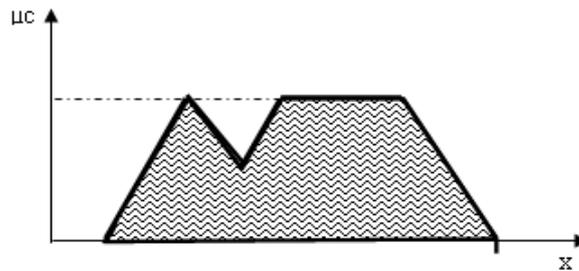


Figure III.16 Opérateur OU

### III.4.5 Variables linguistiques

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues à savoir [55] :

- Quelque Q, Beaucoup B, Souvent S,
- Chaud C, Froid F, Rapide R, Lent L,
- Grand G, Petit P, etc.

Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques.

Une variable linguistique est caractérisée par un triplé  $(U, T(U), X)$  où :

U est le nombre de variable.

$T(U)$  l'ensemble des termes primaire affectés à la variable.

X est le référentiel sur lequel les sous-ensembles (termes).

Considérons la vitesse de rotation d'une machine électrique comme une variable linguistique définie sur un univers de discours ou bien référentiel  $U= 0,100 \text{ rd/s}$ , et son ensemble de catégories floues

$T \text{ vitesse} = (\text{Lente}, \text{Rapide}, \text{Moyenne})$ .

Ces trois ensembles flous de T vitesse peuvent être représentés par des fonctions d'appartenance. Comme le montre la figure suivante :

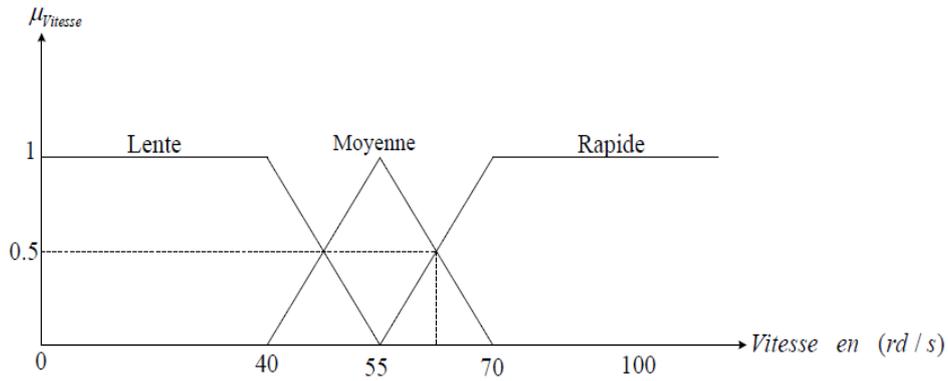


Figure III.17 Représentation schématique d'un ensemble flou d'une variable linguistique.

### III.4.6 Fonction d'appartenances

Afin de permettre un traitement numérique il est indispensable de soumettre les variables linguistiques à des fonctions d'appartenances, qui permettent de définir le degré de vérité de la variable floue en fonction de la grandeur d'entrée comprise entre 0 et 1, appelée aussi degrés d'appartenance, ou coefficient d'appartenance, ou degrés de possibilité [50].

On peut utiliser pour les fonctions d'appartenance des formes différentes (figure II.2), le plus souvent, des formes triangulaires ou trapézoïdales, il s'agit des formes les plus simples. Composées par morceaux de droites [56], [57]. La forme rectangulaire est utilisée pour représenter la logique classique. Dans la plupart des cas, en particulier pour le réglage par logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour déterminer des ensembles flous.

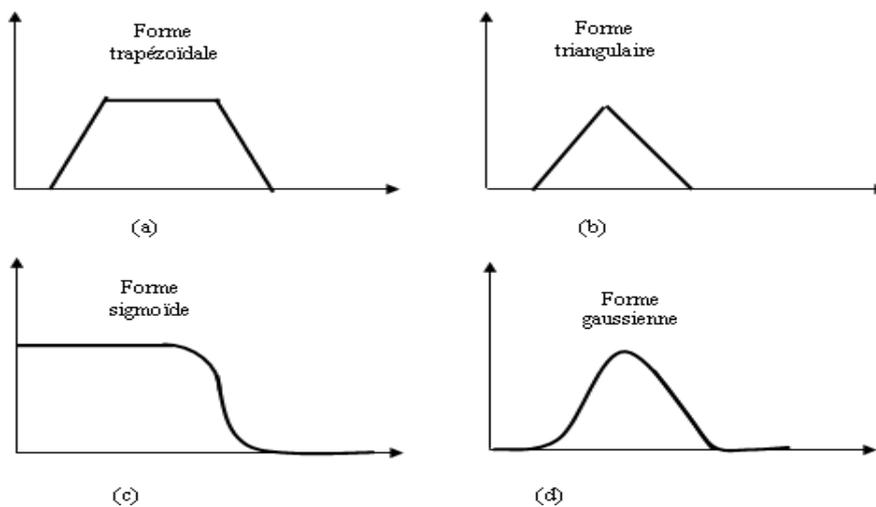


Figure III.18 Formes usuelles des fonctions d'appartenance

### III.4.7 Univers de discours

L'univers de discours est le domaine de variables ou le référentiel. Le schéma suivant montre la structure qui reliant ces valeurs :

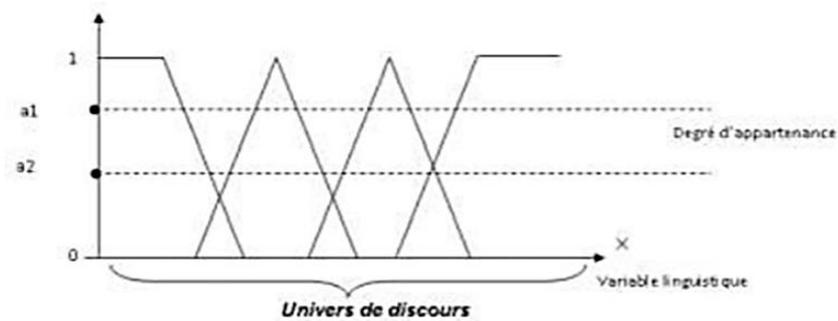


Figure III.19 Élément de la logique floue

### III.4.8 Systèmes flous

Un système flou (SF) est une relation non linéaire qui permet de prendre des données numériques (entrées nettes), les faire passer dans un système flou, et puis d'avoir une sortie scalaire (sortie nette).

La structure de ce traitement est présentée par la figure suivante :

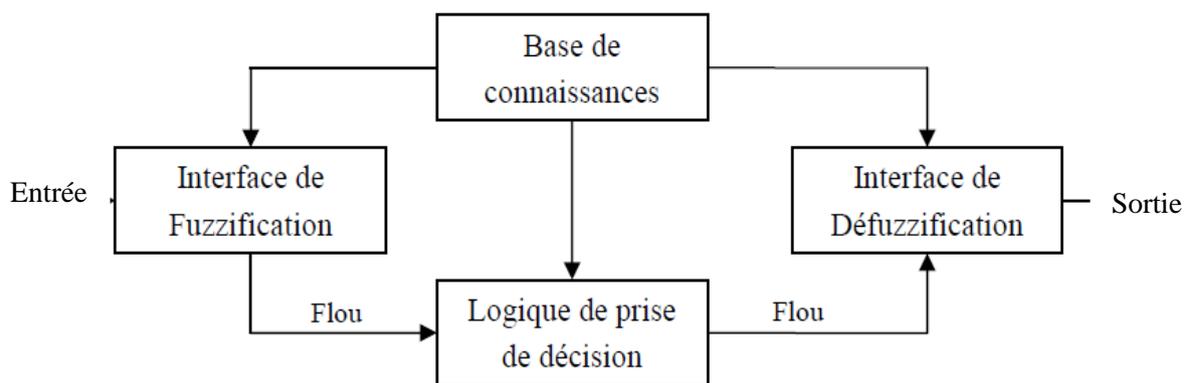


Figure III.20 : Schéma général d'un système flou

### III.4.9 Commande floue [49] [50]

La commande par la logique floue permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Comme en automatique classique, son but est de traiter des problèmes de commandes par processus, c'est-à-dire de gérer un processus, mais son approche est différente par les points suivants :

La connaissance mathématique du fonctionnement du processus n'est pas nécessaire ;

La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (non linéaire) ou mal connu, à l'aide d'un contrôleur flou s'avère très intéressante ;

Les contrôleurs flous restent clairs pour tous les opérateurs et les utilisateurs de la machine ;

L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire) ;

Piloter un processus en utilisant les connaissances et l'expérience d'un opérateur qualifié « expert » ;

Le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques.

### III.4.10 Contrôleur flou [51]

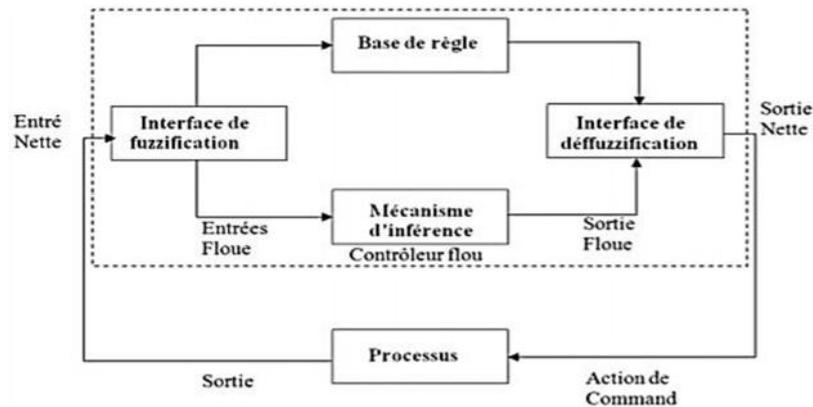


Figure III.21 : Structure d'un contrôle flou.

Un contrôleur flou est un système flou construit pour commander un processus permettant de déterminer la commande appliquée à un processus. La valeur de cette commande est résolue à partir des variables d'entrée par des relations d'entrée et par des relations floues, ou règles floues. Généralement, la structure d'un système de contrôle flou est constituée de quatre parties principales distinctes, comme montré sur la figure suivante.

#### III.4.10.1 Interface de fuzzification

C'est la première étape du traitement d'un problème par la logique floue, il est nécessaire de convertir des variables réelles en variables floues, cette opération est appelée fuzzification, qui permet de fournir les degrés d'appartenance de la variable floue à ses sous ensemble flous en fonction de la valeur réelle de la variable d'entrée. Généralement, on utilise des fonctions d'appartenance de forme triangulaire et trapézoïdale. Ces deux formes à caractère linéaire facilitent l'étape de fuzzification et le temps de calcul.

#### III.4.10.2 Base des règles

Le système de contrôle flou contient un nombre de règles reliant les ensembles flous à base de règles logique par cette forme « si-alors ».

Ce bloc est généralement basé sur la connaissance qui correspond à l'expérience ou au savoir-faire de l'opérateur du système. Elle permet de déterminer le signal de sortie du contrôleur flou et exprime la relation qui existe entre les variables d'entrées transformées en variables linguistiques. Ainsi que les variables de sortie qui est converties en variables linguistiques

On peut distinguer deux types [24] :

- Mamdani : La méthode Mamdani consiste à utiliser l'opérateur Min pour le ET et Max pour le OU.
- Sugeno : La règle générale de cette méthode est donnée sous une forme de composition d'opérateurs arithmétique.

### **III.4.10.3 Mécanisme d'inférence**

Dans cette étape, il s'agit de définir comment le système transforme les variables linguistiques floues, ces variables [entrée/sortie] sont reliées par les règles d'inférence.

Il existe deux règles d'inférence :

- Méthode Max-Min (contrôle de type Mamdani).
- Méthode Somme-Prod (contrôleur de type Larsen).
- Méthode d'inférence Somme - Prod (contrôleur de type Zadeh).
- **Méthodes d'inférence Max-Min**

La Méthode d'inférence Max-min, réalise l'opérateur ET par la fonction Min, la conclusion ALORS de chaque règle est réalisé par la fonction Min et la liaison entre toutes les règles (opérateur OU) par la fonction Max. La dénomination de cette méthode, dite Max-min ou " implication de Mamdani ", est due à la façon de réaliser les opérateurs ALORS et OU de l'inférence. [58]

- **Méthodes d'inférence Max-Prod**

La méthode d'inférence Max-Prod réalise en générale, au niveau de la condition, l'opérateur "OU" par la formation du maximum et l'opérateur " ET " par la formation du minimum. Par contre, la conclusion dans chaque règle, introduite par " ALORS ", qui lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur "ET", est réalisée cette fois-ci par la formation du produit. D'où la désignation de cette méthode d'inférence par max- Prod.

- **Méthode d'inférence Somme-Prod**

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, la méthode d'inférence Somme-prod réalise, au niveau de la condition, l'opérateur " OU " par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur "ET" est réalisé par la formation du produit. La conclusion de chaque règle, précédée par "ALORS ", liant le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur " ET", est réalisée par la formation du produit. Ainsi s'explique la désignation par somme-prod de cette méthode d'inférence.

Le tableau suivant résume la façon utilisée par ces trois méthodes d'inférence pour représenter les trois opérateurs de la logique floue " ET, OU et Alors".

**Tableau III. 1 :** Méthodes usuelles de l'inférence floue

Opérateurs Méthodes flous D'inférence	ET	OU	ALORS
MAX-Min	Minimum	Maximum	Minimum
MAX-Produit	Minimum	Maximum	Produit
Somme-Produit	Produit	Moyenne	Produit

#### **III.4.10.4 Interface du Défuzzification**

C'est la dernière étape dans la commande floue qui permet de convertir les informations floues établies par le mécanisme d'inférence sous forme d'une grandeur physique ou numérique pour définir la loi de commande du processus. Ils existent plusieurs méthodes de défuzzification. Parmi les plus couramment, On cite :

- Méthode du centre de gravité.
- Méthode de maximum.
- Méthode de la moyenne des maximums.
- Méthode des hauteurs pondérées.
- **Méthode de Maximum**

Cette méthode génère une commande qui représente l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette méthode est simple, rapide et facile, mais présente certains inconvénients lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale et ne tient pas compte de l'effet de toutes les règles ;

- **Méthode de la moyenne des maximums**

Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de tous les maximums, dans le cas où il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

- **Méthode du centre de gravité**

Cette méthode génère une commande égale à l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette abscisse de centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante :

$$X_G = \frac{\int x \mu_{res}(x) dx}{\int \mu_{res}(x) dx} \quad \text{(III.43)}$$

Cette méthode est la plus utilisée dans les systèmes de commande floue, (car elle tient compte de toutes les règles et ne présente pas une confusion de prise de décision), malgré sa complexité, puisqu'elle demande des calculs importants.

- **Méthode des hauteurs pondérées**

La méthode des hauteurs pondérées n'est rien d'autre qu'un cas particulier de celle du centre de gravité simplifiée, en considérant uniquement le milieu de la base de chaque fonction d'appartenance contributive.

L'abscisse du centre de gravité  $X_G$  se calcule alors à l'aide de la relation :

$$X_G = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \mu_{res}(\bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{res}(\bar{x}_i)} \quad \text{(III.44)}$$

### III.4.11 Conception du régulateur de vitesse par PI flou adaptative

Le succès de la commande par la logique floue trouve en grande partie son origine dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en ensemble de règles linguistiques facilement interprétables, ainsi que sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague [59]. On note que les concepts de base de la logique floue sont énoncés dans l'annexe B. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons au régulateur de vitesse au sein de la MPPT.

La structure du régulateur que nous allons utiliser est à caractère adaptatif, c'est une solution qui a été appliquée sur un modèle non linéaire [60]. L'objectif du contrôleur flou utilisé est d'adapter les paramètres des régulateurs PI. La sortie du FLC donnera le poids convenable aux PI afin d'améliorer les conditions de fonctionnement, spécialement en régime transitoire.

#### III.4.11.1 Description du contrôleur flou utilisé

Généralement, la conception d'un régulateur flou pour la commande des entraînements électriques exige les choix des paramètres suivants [61]:

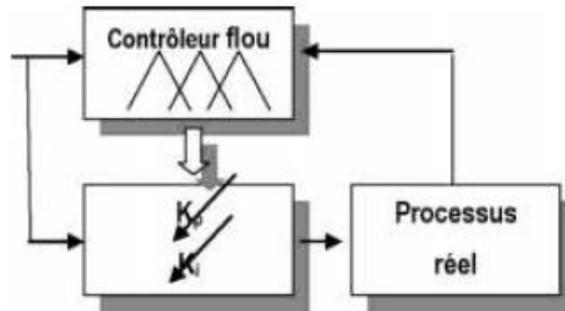
Choix des variables linguistiques ;

Choix des fonctions d'appartenance ;

Choix de la méthode d'inférence ;

Choix de la stratégie de défuzzification.

La majorité des contrôleurs flous utilisent des algorithmes se basant sur le schéma simple de Mamdani [6]; pour un système mono-variable, ce schéma est représenté par la figure suivante :



**Figure III.22 :** Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé.

- **Fuzzification :**

Les entrées du contrôleur FLC sont :

E : l'erreur, elle est définie par :

$$E(k) = \Omega_{ref}(k) - \Omega_{mec}(k) \tag{III.45}$$

dE : la dérivée de l'erreur, elle est approchée par :

$$dE(k) = \frac{E(k) - E(k-1)}{T_e} \tag{III.46}$$

$T_e$  : période d'échantillonnage.

Le régulateur admet pour chaque variable d'entrée les cinq ensembles flous :

- Gand Négatif : BN ; Petit Négatif : SN ; Zéro : Z ; Petit Positif : SP ; Gand Positif : BP

Les sorties de ce contrôleur flou est les poids attribués aux paramètres du régulateur PI.

Pour la sortie on a les ensembles flous suivants :

- Zero : ZE ; Moyen: MS ; Petit: S ; Moyen: M ; Grand : B ; Moyen : MB ; Très Grand :VB

Pour les fonctions d'appartenance, on utilise généralement les formes triangulaires et trapézoïdales.

Les fonctions des entrées et de la sortie sont représentées par les figures suivantes :

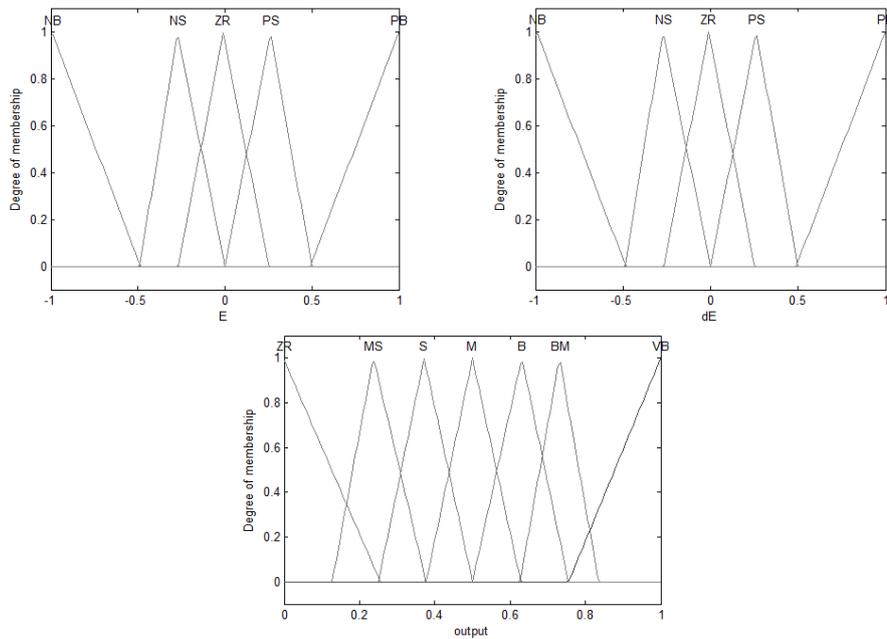


Figure III.23 : Formes des fonctions d'appartenance des entrées.

• **Inférence**

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Il s'agit souvent d'inférence avec plusieurs règles qui peuvent être activées en même temps. Ces règles doivent tenir compte du comportement du système à régler, ainsi que des buts du réglage envisagé.

Notre matrice d'inférence prendra la forme suivante :

Tableau III.2 : Matrice d'inférence pour la sortie  $K_p$ .

$K_p$		$\Delta E$				
		NB	NS	ZR	PS	PB
E	NB	VB	VB	VB	VB	VB
	NS	B	B	B	BM	VB
	ZR	ZR	ZR	NM	S	S
	PS	B	B	B	BM	VB
	PB	VB	VB	VB	VB	VB

Tableau III.3 : Matrice d'inférence pour la sortie  $K_I$

$K_I$		$\Delta E$				
		NB	NS	ZR	PS	PB
E	NB	M	M	M	M	M
	NS	S	S	S	S	S
	ZR	NM	NM	ZR	NM	N M
	PS	S	S	S	S	S
	PB	M	M	M	M	M

• **Défuzzification**

La méthode d'inférence utilisée est la méthode Max-Min, on prendra comme critère de défuzzification la méthode de centre de gravité.

La structure de la commande est représentée sur la figure suivante :

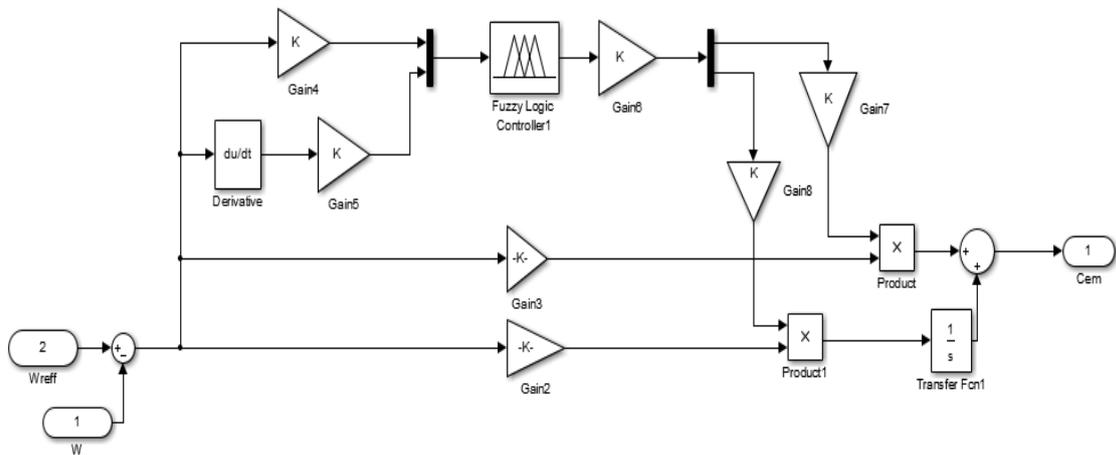


Figure III.24 : Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI Flou adaptatif.

**III.4.12 Résultats de simulation**

Le maintien du coefficient de puissance nécessite la conception d'une stratégie de commande (MPPT) permettant la maximisation de la puissance électrique générée, en ajustant la vitesse de rotation à sa valeur de référence par le biais d'un régulateur classique de type PI qui a été appliqué précédemment,

quelle que soit la vitesse considérée et le degré de perturbation du vent. Les résultats suivants sont obtenus avec l'application d'un PI flou adaptatif pour un profil du vent d'une valeur moyenne de (6.5 m/s) est appliqué à la turbine. Cette valeur été estimée dans le sud-ouest de l'Algérie.

- La Figure (III.26) montre que l'application de la commande MPPT permet de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur nominale égale à 0.48. Toutes fois les performances dynamiques obtenues avec le régulateur flou adaptatif, sont plus stables et coïncident avec leur référence.

- La Figure (III.26) montre l'évolution de la vitesse spécifique au cours du temps, on constate que cette vitesse oscille légèrement autour de la vitesse spécifique nominale ( $\lambda_{nom}=8.1$ ) avec la variation du vent et garde cette valeur dans le but d'augmenter la production. Cette variation se voit considérablement atténuée avec l'application des régulateurs, flou adaptatif.

- la variation de la vitesse mécanique est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre, on constate aussi que la vitesse mécanique suit parfaitement sa valeur de référence, ce qui confirme l'efficacité de la commande appliquée.

- Les performances dynamiques obtenues lors de l'application des régulateurs Flou adaptatif sont meilleures, ce qui met en évidence l'efficacité du réglage par les commandes avancées par apport au réglage par PI classique.

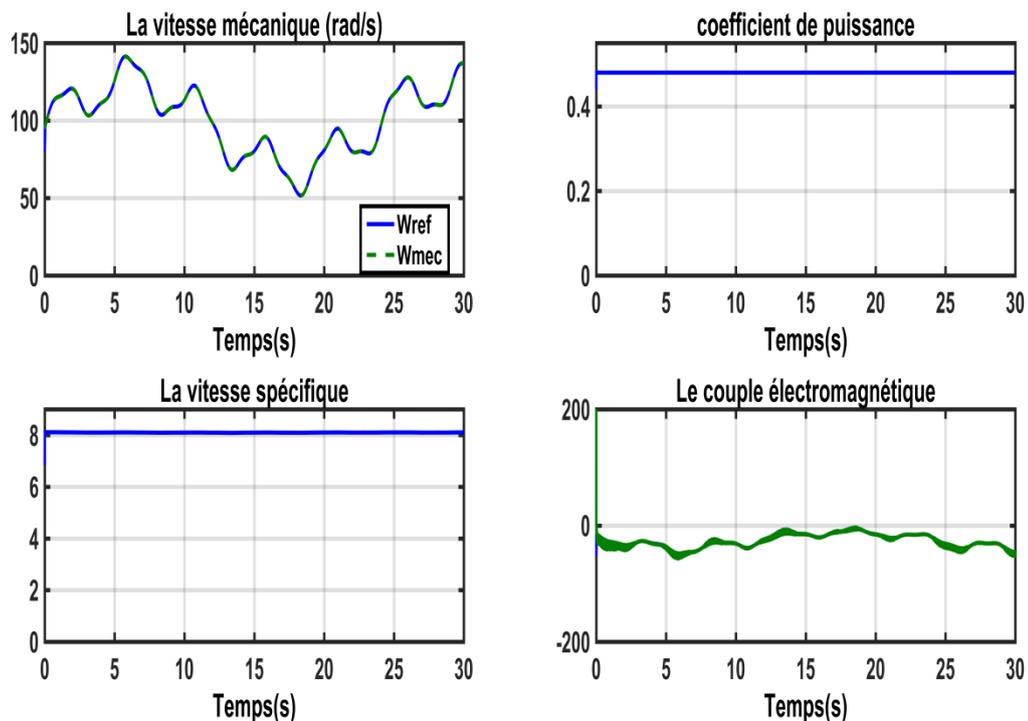


Figure III.25 : résultats de simulation de PI flou adaptative.

### III.4.13 Comparaison entre les deux régulateurs utilisés

Les deux figures suivantes représentent un zoom sur la vitesse obtenu avec le régulateurs PI classique et le PI flou adaptatif où l'erreur entre la vitesse mécanique et sa référence est représenté. La valeur de l'erreur est représentée dans le tableau III.4.

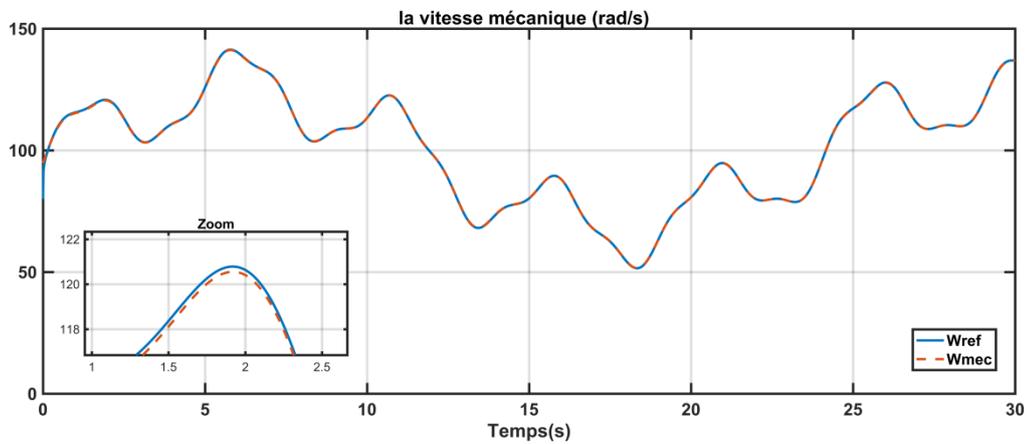


Figure III.26 : la vitesse mécanique et le zoom sur l'erreur obtenu avec un PI classique.

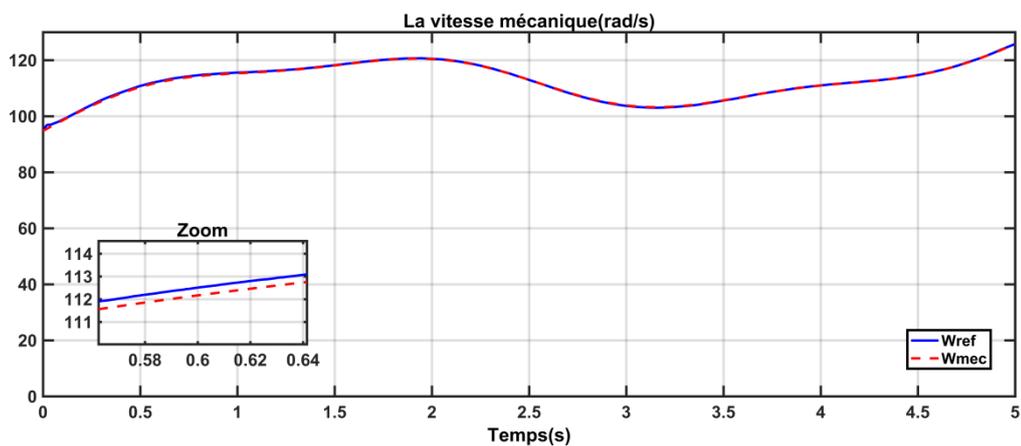


Figure III.27 : la vitesse mécanique et le zoom sur l'erreur obtenu avec le PI flou adaptatif.

Tableau III.4 : tableau comparatif de l'erreur obtenu avec les régulateurs utilisés.

Type de régulateur	Valeur de l'erreur
PI classique	2.26
PI flou adaptatif	0.1

### **III.5 Conclusion**

Les éoliennes à vitesse variable, ont l'avantage d'imposer leur vitesse ce qui nécessite la mise en œuvre d'une stratégie de commande (MPPT) pour extraire le maximum de puissance. Dans cette partie, différentes stratégies de commande ont été appliquées à la turbine, en comparant les résultats obtenus, nous constatons que les meilleures performances dynamiques ont été notées avec l'application de la commande floue adaptative.

# ***Chapitre IV***

## ***Simulation de la chaîne complète***

## IV.1 Introduction

Après avoir transformé l'énergie éolienne en énergie électrique, il est nécessaire de l'adapter au réseau au quel est connecté notre système de production, car les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable connecté au réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposant pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance-fréquence, autrement dit, elles ne participent pas aux service système, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important [62] .

Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération d'énergie.

Il est nécessaire de recourir à l'électronique de puissance par l'intermédiaire d'un redresseur à MLI et d'un onduleur à six bras commandé également par une commande à MLI.

Nous allons d'abord présenter la commande MLI, puis le redresseur à MLI on donnant son modèle mathématique qui permet de simuler sous MATLAB. Ensuite nous allons détailler le fonctionnement de l'onduleur à MLI et son modèle également afin de liée notre système au réseau électrique.

## IV.2 La commande MLI [61]

Le principe de la technique de modulation de largeur d'impulsion est basé sur la comparaison d'un signal dit la modulante et un autre dit la porteuse.

Avec la MLI sinus-triangle, les signaux de commande des interrupteurs du l'onduleur sont donnée par la comparaison entre la tension de référence sinusoidal  $V_{ref}(t)$  et une onde triangulaire appelée porteuse  $V_p(t)$  d'une fréquence  $f_p$  très élevée .Le signal de commande de l'interrupteur d'un bars de l'onduleur triphasé  $K_i K_i (i=1,2,3)$  est fermé si l'onde de référence de la phase correspondante est supérieure ou égale à la porteuse triangulaire ,et vice versa ,**La figure(IV.1)** illustre le principe d'une MLI sinus -triangle

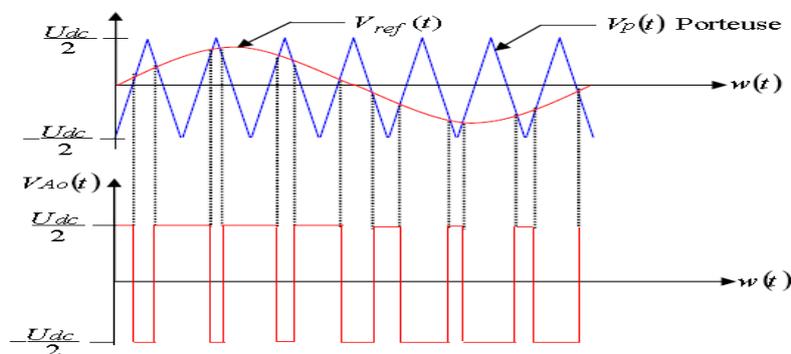


Figure IV.1 : Principe de MLI sinus-triangulaire

IV.2 Modélisation du convertisseur MLI (le redresseur)

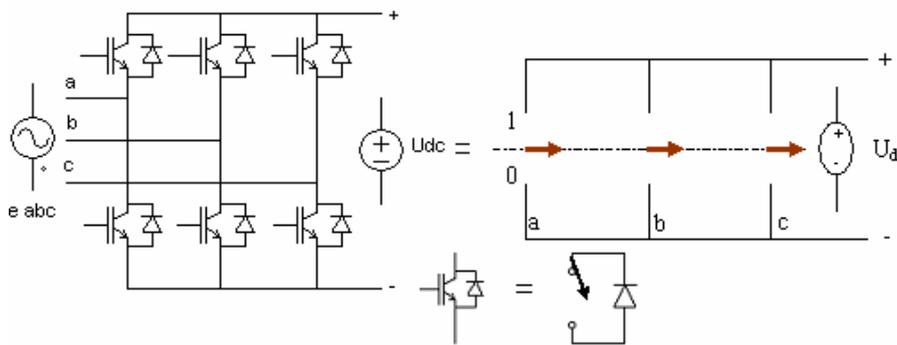


Figure IV.2 : Pont redresseur.

Avant de modéliser le redresseur à MLI, il est utile de rappeler qu’un redresseur est un convertisseur statique. Il sert comme son nom l’indique à redresser un signal alternatif et le transformer en un signal continu.

Pour l’étude de l’ensemble (génératrice - redresseur MLI – onduleur - réseau), on s’intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine [63].

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d’interrupteurs idéaux: c’est-à-dire résistance nulle à l’état passant, résistance infinie à l’état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande (pas d’empiètement).

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d’une diode et d’un transistor en antiparallèle. Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens.

Contrairement à un redresseur à diodes qui fournit une valeur de la tension égale à celle de la tension redressée (interrupteurs idéaux), le redresseur à MLI doit fournir une tension constante quel que soit la tension produite par la génératrice [64].

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l’étude du convertisseur en trois parties: le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs, et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d’établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu. Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S = \begin{cases} +1 & \text{si } i_j = -I \\ -1 & \text{si } i_j = +I \end{cases} \quad j \in (a, b, c) \tag{IV.1}$$

Les tensions de phase d’entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction des fonctions  $S_j$ , de la tension redressée  $U_{dc}$  et les courants d’entrée  $i_a, i_b, i_c$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{IV.2}$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites à partir de tableau IV.1:

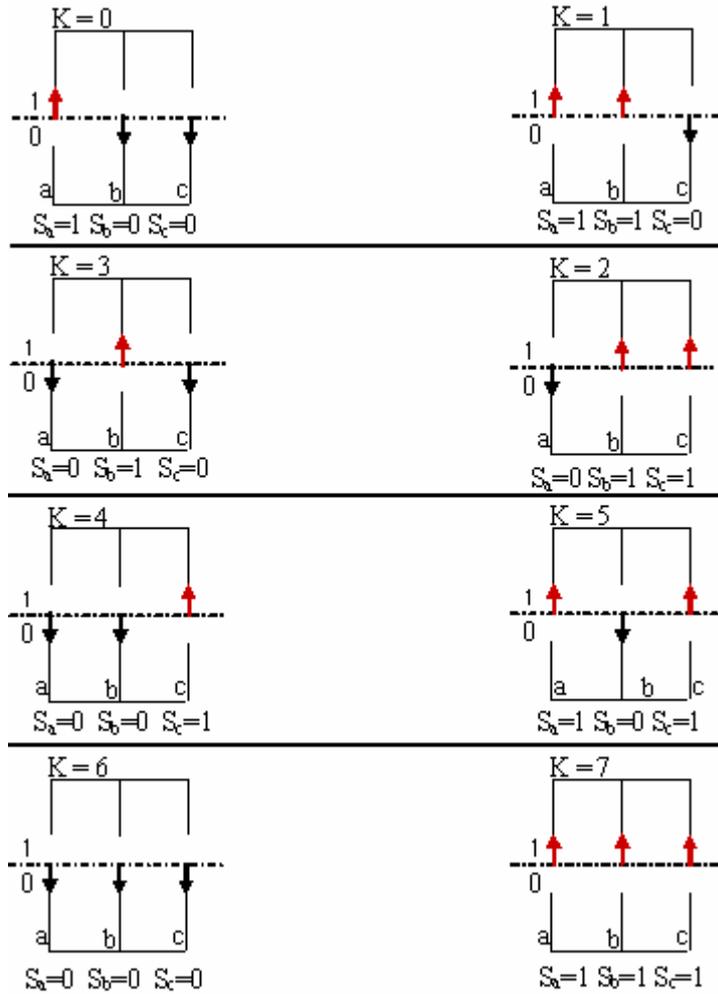
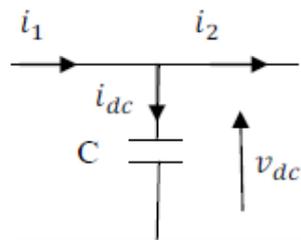


Figure IV.3 : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

Tableau IV.1 : les huit états possibles des interrupteurs.

K	S <sub>q</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>c</sub>	V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>
0	1	0	0	v <sub>dc</sub>	0	- v <sub>dc</sub>
1	1	1	0	0	V <sub>dc</sub>	- v <sub>dc</sub>
2	0	1	0	- v <sub>dc</sub>	V <sub>dc</sub>	0
3	0	1	1	- v <sub>dc</sub>	0	v <sub>dc</sub>
4	0	0	1	0	- v <sub>dc</sub>	v <sub>dc</sub>
5	1	0	1	v <sub>dc</sub>	- v <sub>dc</sub>	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

**IV.3 : Modélisation du buscontinu**



**Figure IV.4 :**Schéma électrique du bus continu.

Le schéma électrique de la figure IV.4 permet par la loi des mailles d’établir la relation suivante:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc}(t) \tag{IV.4}$$

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \tag{IV.5}$$

$i_{dc}$  : Le courant de charge du condensateur.

$i_1$  : Le courant ondulé.

$i_2$  : Le courant redressé.

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int_{t_2}^{t_1} i_{dc} dt + V_{dc0} \tag{IV.6}$$

Avec :

$V_{dc0}$  La valeur de la tension à l'instant initial  $t=0$ .

### IV.3.1 Régulation du bus continu

Vu que la puissance fournie par la génératrice est fluctuante, un réglage de la tension du bus continu s'impose via une boucle de régulation avec un correcteur proportionnel intégral.

La régulation de la tension du bus continu a pour but de la maintenir à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur.

Le contrôle de la tension continue exige une boucle d'asservissement fermée comme le montre l'équation ci-dessous, la tension continue est mesurée est comparée à une référence et le signal d'erreur obtenu à partir de cette comparaison est employé pour produire une forme d'onde pour la référence du courant.

$$I_{max} = G_c (V_{dc-ref} - V_{dc}) \tag{IV.7}$$

Où  $G_c$  représente un correcteur de type PI.

La boucle de régulation de la tension  $V_{dc}$  est représentée sur le schéma bloc suivant :

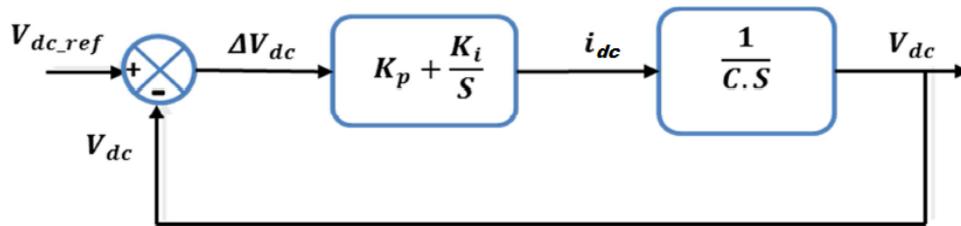


Figure IV.5 : Boucle de la régulation du bus continu.

Le calcul des paramètres du régulateur sera déduit de la Fonction de transfert en boucle fermée :

$$G_c(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{C s^2 + K_p s + K_i} \tag{IV.8}$$

Le calcul des paramètres du régulateur seront calculés en comparant la FTBF avec celle d'un deuxième ordre, On trouve :

$$G_c(s) = \frac{\frac{K_i}{C}}{s^2 + (K_p \frac{1}{C})s + \frac{K_i}{C}} \tag{IV.9}$$

On obtient :

$$K_p = 2\xi \omega_n C K_i = \omega_n^2 C \tag{IV.10}$$

### IV.4 Modélisation de convertisseur MLI (l'onduleur):

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif. Il a la même structure que le redresseur à MLI.

La commande des états passant et bloqué des transistors permet d'obtenir une tension alternative caractérisée par la fréquence nécessaire pour la charge alimentée. Le signal de commande de ces derniers est fourni par la commande MLI [39]

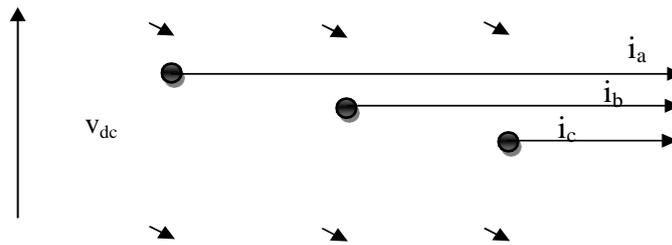


Figure IV.6 : le schéma global de l'onduleur.

Soit les fonctions \$C\_1, C\_2, C\_3\$ qui représentent l'état des interrupteurs \$K\_1, K\_2, K\_3\$. La loi des mailles permet d'obtenir les tensions composées entre phases :

$$\begin{cases} U_{ab} = (C_1 - C_2) \\ U_{bc} = (C_2 - C_3) \\ U_{ca} = (C_3 - C_1) \end{cases} \quad (IV.11)$$

Si on suppose la charge équilibrée, les tensions simples forment alors un système triphasé équilibré

$$V_{SA} + V_{SB} + V_{SC} = 0 \quad (IV.12)$$

Avec

$$\begin{cases} V_{SA} = \frac{V_{dc}}{3} (2 \cdot C_1 - C_2 - C_3) \\ V_{SB} = \frac{V_{dc}}{3} (2 \cdot C_2 - C_3 - C_1) \\ V_{SC} = \frac{V_{dc}}{3} (2 \cdot C_3 - C_1 - C_2) \end{cases} \quad (IV.13)$$

Où \$V\_{SABC}\$ est le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur, donné par:

$$[V_{SABC}] = \begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (IV.14)$$

#### IV.5 Modélisation du filtre

L'onduleur est raccordé au réseau par le moyen d'un filtre passif série (Rt, Lt) pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique, comme le montre la figure ci-dessous [64]:

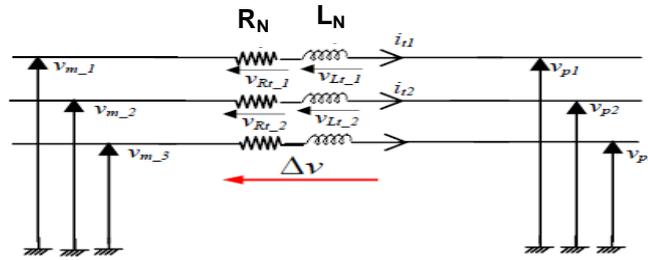


Figure IV.7 : Schéma d'un filtre

Les équations différentielles définissant le filtre peuvent être écrites comme suit [65]:

$$\begin{pmatrix} V_{m-1} \\ V_{m-2} \\ V_{m-3} \end{pmatrix} = R_N \begin{pmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{pmatrix} + L_N \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \end{pmatrix} \tag{IV.15}$$

L'application de la transformation de Park sur le système d'équations précédant donne :

$$\begin{cases} V_{Nd} = V_{id} - R_N i_{Nd} - L_N \frac{d}{dt} i_{Nd} + L \omega_N i_{Nq} \\ V_{Nq} = V_{iq} - R_N i_{Nq} - L_N \frac{d}{dt} i_{Nq} + L \omega_N i_{Nd} \end{cases} \tag{VI.16}$$

### IV.6 Contrôle de la liaison au réseau

La topologie du convertisseur MLI2 (situé entre le bus continu et le filtre (voir figure VI.8)) permet de générer et également d'appeler un courant provenant du réseau. L'objectif du convertisseur relié au réseau électrique est de maintenir la tension du bus continu constante quel que soit l'amplitude et le sens de la puissance. Ce dernier est commandé de manière à contrôler les courants transités par le filtre. A partir de la mesure de la tension de bus continu, Le convertisseur est commandé de façon à imposer des références aux tensions simples [66].

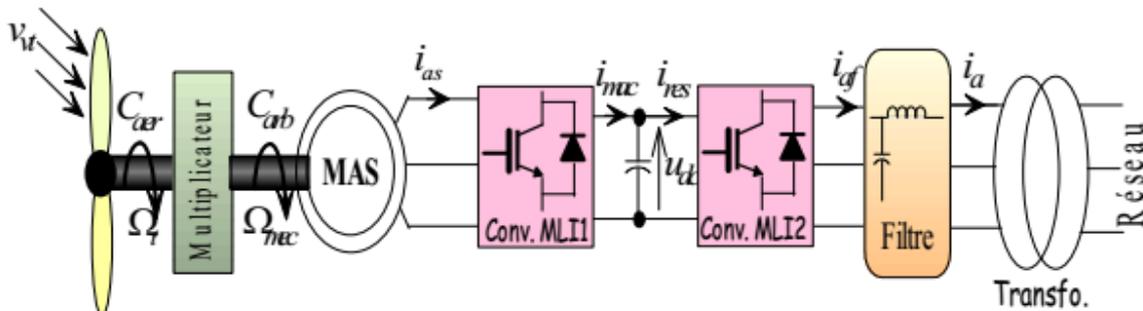


Figure IV.8 : schéma globale du système étudié.

La tension du bus continu est définie par la relation suivante :

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{red} - i_{ond}) \quad (IV.17)$$

La puissance active de référence injectée dans le réseau est exprimée par la formule suivante :

$$P^* = u_{dc}^* * i_{ond}^* \quad (IV.18)$$

Avec

$$i_{ond}^* = i_{max} * i_{max}^* \quad (IV.19)$$

Et

$$i_{max}^* = PI(u_{dc}^* - u_{dc}) \quad (IV.20)$$

Les expressions des courants de références en fonction des puissances actives et réactives et des tensions mesurés sont données dans la repère de Park (d,q) par :

$$\begin{cases} i_{Nd}^* \\ i_{Nq}^* \end{cases} = \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{pmatrix} P^* & Q^* \\ -Q^* & P^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \quad (IV.21)$$

Afin de maintenir le coefficient de puissance du réseau unitaire, la puissance réactive de référence injectée au réseau est fixée à une valeur nulle.

#### IV.6.1 Contrôle des courants envoyés au réseau

Les puissances active et réactive transitées par le réseau sont données dans le modèle de Park par les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_g = V_{Nd} i_{Nd} + V_{Nq} i_{Nq} \\ Q_c = V_{Nq} i_{Nd} + V_{Nd} i_{Nq} \end{cases} \quad (IV.22)$$

D'après l'équation précédente, on remarque que les puissances active et réactive dépendent des courant injectés, il est donc possible de contrôler ces dernières en régulant les courant  $i_{Nd}$  et  $i_{Nq}$ .

##### IV.6.1.1 Régulation des courants

Les équations (IV.16) présentent un couplage causé par les deux derniers termes de tensions de compensation, ce qui rend difficile de contrôler les deux courants indépendamment. Pour avoir les courants désirés, les tensions de compensation sont considérées comme des grandeurs de perturbation, et les tensions de référence peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{cases} \Delta V_d^* = \Delta V_d - L_N \omega_n i_{fq} \\ \Delta V_q^* = \Delta V_q + L_N \omega_n i_{fd} \end{cases} \quad (IV.23)$$

Avec :  $\Delta v_d, \Delta v_q$  les termes de compensation

$$\begin{pmatrix} \Delta v_d = R_N i_{Nd} + L_N \frac{d}{dt} i_{Nd} \\ \Delta v_q = R_N i_{Nq} + L_N \frac{d}{dt} i_{Nq} \end{pmatrix} \quad (IV.24)$$

En appliquant la transformée de Laplace sur les équations, on fait apparaître deux fonction de transfert identiques.

$$F(s) = \frac{i_N(s)}{\Delta V_d(s)} = \frac{1}{R_N + L_N s} \quad (IV.25)$$

Le schéma bloc du dispositif de contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park est représenté par la (Figure IV.9) :

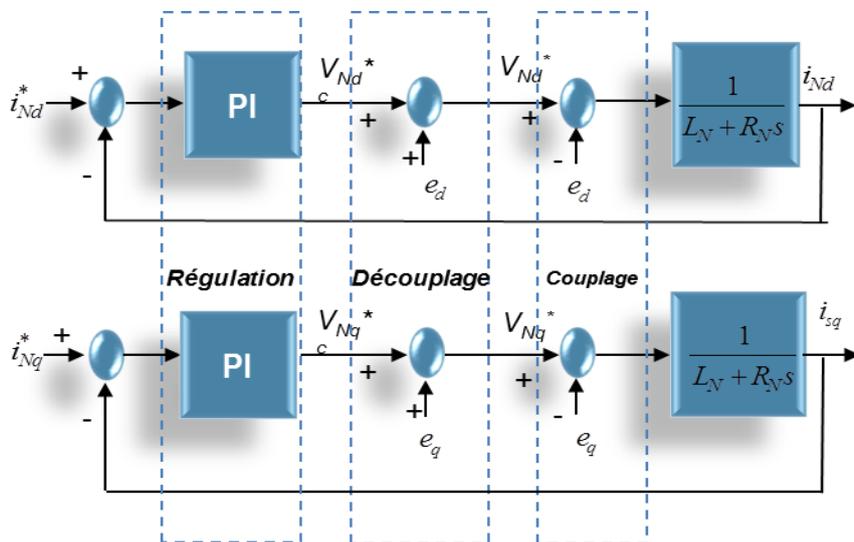


Figure IV.9 : Schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park.

Avec  $e_{Nd} : p \omega_N L_d i_{Nq}$ ,  $e_{Nq} : p \omega_N L_N i_{Nd}$

Le calcul des paramètres des régulateurs se fera de la même manière que celui de la commande vectorielle.

La fonction de transfert est égale à:

$$A(s) = \frac{1}{L_N s + R_N} = \frac{b}{a + s} \quad (IV.26)$$

Où

$$a = \frac{R_N}{L_N} \text{ et } b = \frac{1}{L_N}$$

La constante de temps en boucle ouverte est :

$$\tau_{iNd\_BO} = \frac{1}{a} \rightarrow t_{riNd\_BO} = 3\tau_{iNd\_BO} = \frac{3}{a} \quad (IV.27)$$

Par compensation on trouve :

$$\frac{K_{i_{iNd}}}{K_{p_{iNd}}} = a \quad (IV.28)$$

La fonction de transfert du régulateur devient :

$$\frac{i_{Nd}}{i^*_{Nd}} = \frac{K_{p_{iNd}} * b}{K_{p_{iNd}} * b + S} \quad (IV.29)$$

Avec une constante de temps :

$$\tau_{iNd\_BF} = \frac{1}{K_{p_{iNd}} * b} \quad (IV.30)$$

Et un temps de réponse :

$$t_{riNd\_BF} = 3\tau_{iNd\_BF} = \frac{3}{K_{p_{iNd}} * b} \quad (IV.31)$$

On impose généralement un temps de réponse en boucle fermé plus rapide que celui du courant en boucle ouverte, on trouve :

$$t_{riNd\_BF} = t_{riNd\_BO} / h \quad (IV.32)$$

h : coefficient supérieur à 1

Ce qui permet de déterminer :

$$K_{p_{isd}} = \frac{3}{t_{riNd\_BF} * b} \text{ et } K_{i_{isd}} = a * K_{p_{isd}} \quad (VI.33)$$

• **Synthèse du régulateur de courant  $I_{Nq}$**

De la même manière que le réglage précédant on trouve :

$$t_{riNq\_BF} = t_{riNq\_BO} / h \quad (IV.34)$$

$$K_{p_{iNq}} = \frac{3}{t_{riNq\_BF} * b} \quad (IV.35)$$

$$K_{i_{iNq}} = a * K_{p_{iNq}} \quad (IV.36)$$

En négligeant les pertes dans le condensateur, dans le convertisseur et dans le filtre. La représentation de la chaine complète sous forme d'un schéma bloc du dispositif de commande est donnée sur la figure (IV.10).

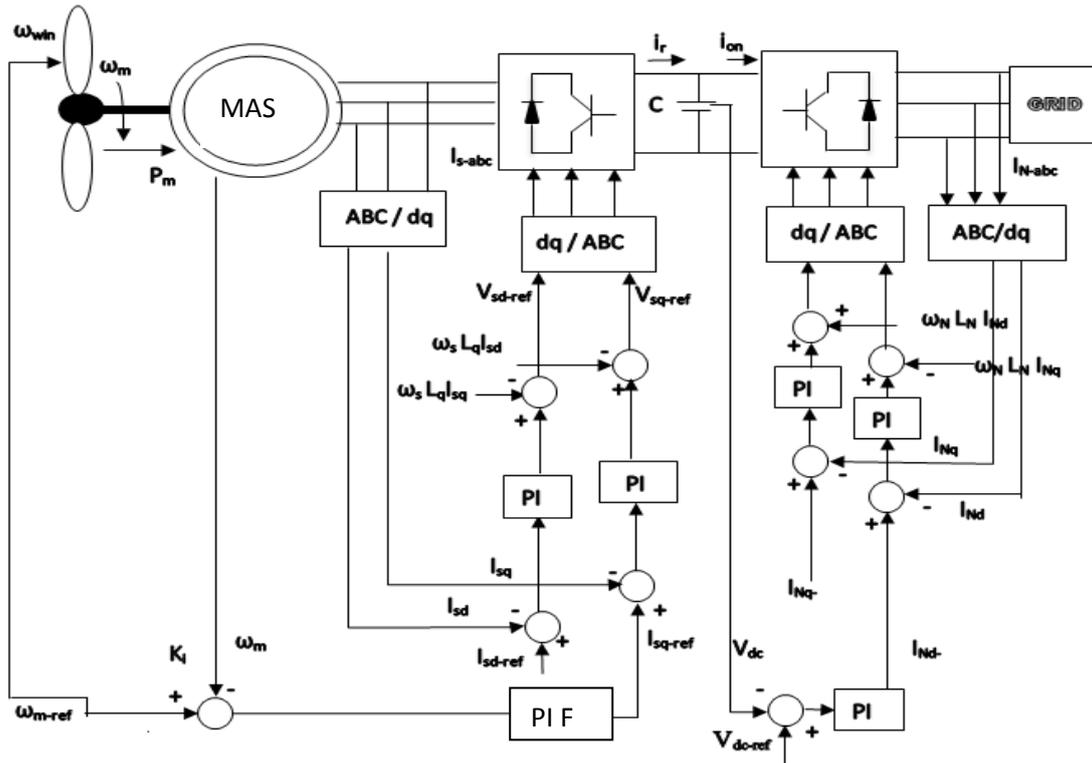


Figure IV.10: Structure de la chaîne globale.

### IV.7 Résultats de simulation de la chaîne complète

En appliquant le profil de vent illustré dans le précédent à la chaîne complète, l'objectif est de vérifier le fonctionnement de poursuite du point de maximum de puissance et d'examiner l'efficacité du réglage de vitesse associé au régulateur Synergétique. D'après les résultats obtenus, on remarque que :

- ♣ La vitesse spécifique  $\lambda$ , ainsi que le coefficient de puissance ne varient pas et gardent pratiquement leur valeur de référence optimale à savoir (8.1 pour la vitesse spécifique et 0.48 pour le coefficient de puissance). Figure (IV.11) Figure(IV.12) respectivement.

- ♣ L'allure de la vitesse de la GAS est à l'image du vent entraînant l'éolienne, avec un bon suivi de référence comme le montre la Figure (IV.13),

- ♣ Les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  de la figure (IV.14) suivent leur référence confirmant le fonctionnement de l'algorithme de la commande appliquée. L'allure du courant  $i_{sq}$  traduit la forme du couple électromagnétique qui lui est directement proportionnel.

- ♣ La tension du bus continu présentée par la Figure (IV.14),  $V_{dc}$  est assurée à sa consigne de 620V avec un temps de réponse égale à 0.12s.

- ♣ La Figure (IV.14), représente les allures des courants  $I_{abc}$  à la sortie de l'onduleur MLI2 injectés au réseau, avec une fréquence égale 50 Hz respectant la norme du réseau.

♣ La puissance active injectée au réseau est décrites par la Figure (IV.15). la puissance active est d'une valeur moyenne de 5000 W.

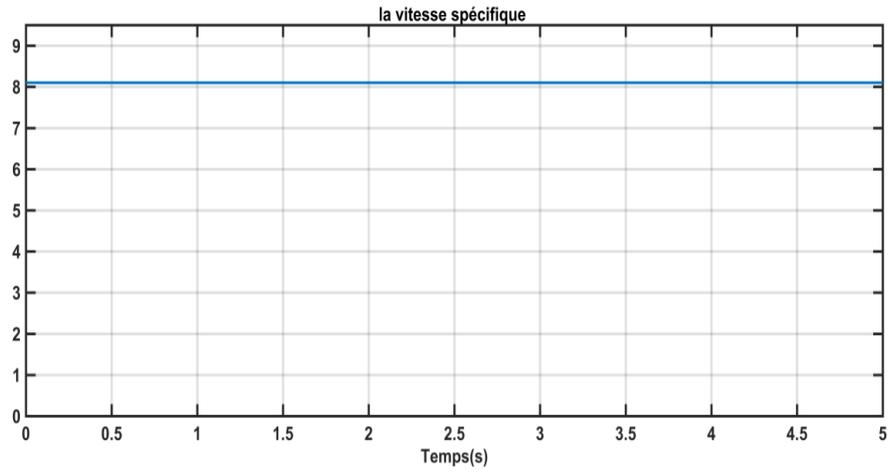


Figure IV.11 : la vitesse spécifique.

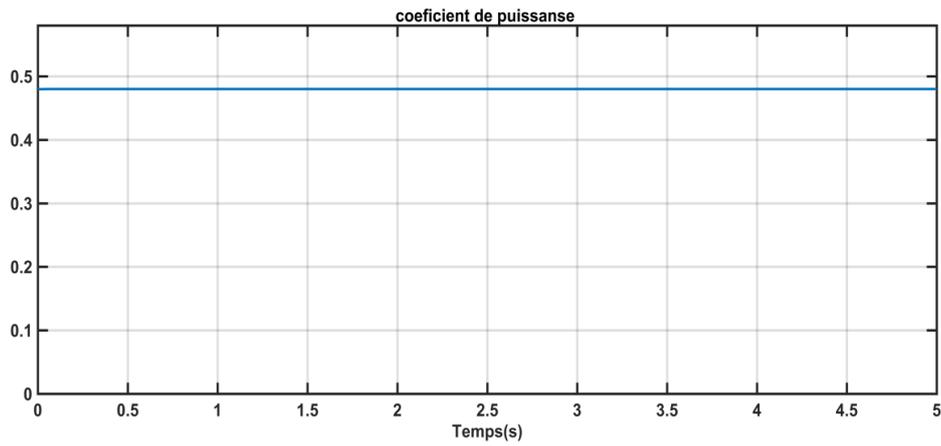


Figure IV.12 : le coefficient de puissance

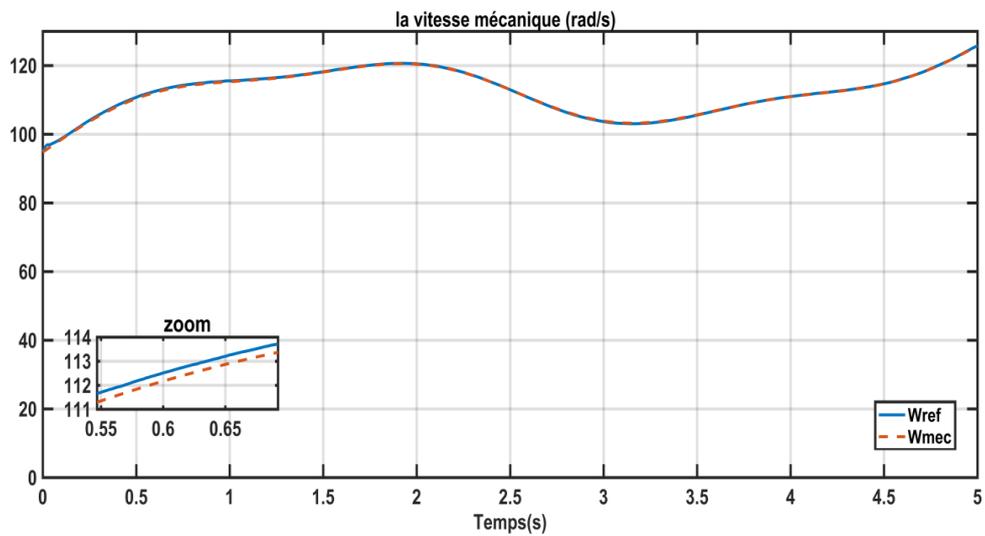


Figure IV.13 : La vitesse mécanique.

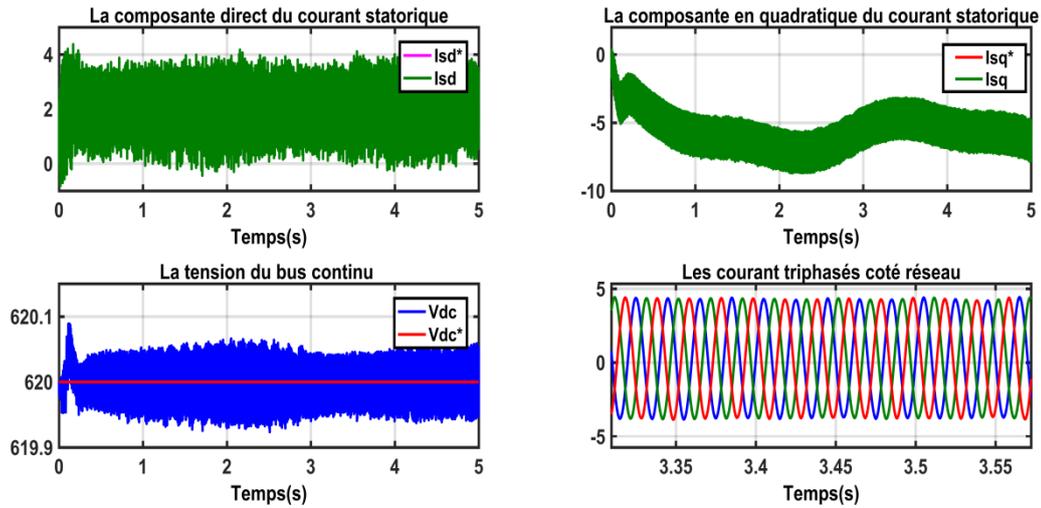


Figure IV.14 : La composante directe et en quadratique des courant statoriques, tension du bus continu et les courants triphasés coté réseau

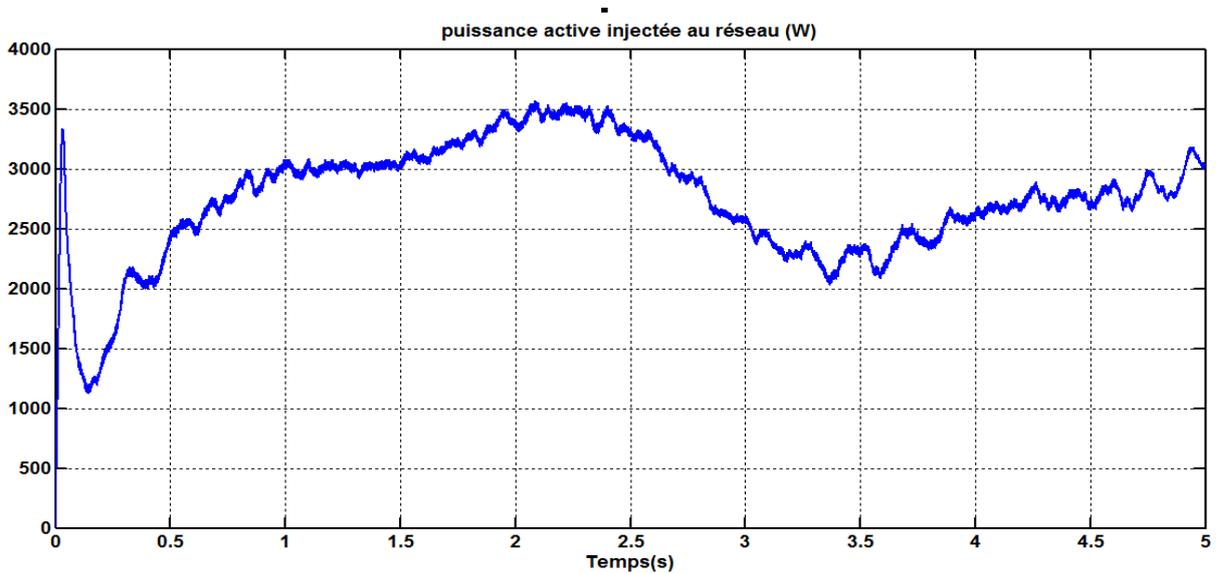


Figure IV.15: La puissance active injectée au réseau.

### IV.8 Conclusion

Après avoir décrit les différentes parties constituant la chaîne de conversion d'énergie éolienne, nous avons établi un modèle, des deux convertisseurs, l'ensemble de la chaîne est relié au réseau via un bus continu, un filtre et un transformateur. Nous avons ensuite, construit un dispositif de commande de la chaîne de conversion proposée.

Le système global a été simulé pour un profil de vent bien précis. Les résultats de simulation ont démontré la possibilité d'extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent, de réguler la tension du bus continu, et de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau, en employant la commande Floue adaptative.

## **Conclusion générale**

---

L'objectif principal de ce travail est l'exploitation de l'énergie éolienne qui exige son adaptation au réseau auquel elle doit être connectée. Considérées comme génératrices à vitesse variable, les éoliennes n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règle pas le rapport puissance fréquence, ce qui a pour effet de perturber la stabilité du réseau. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies de commandes sont apparues pour optimiser cette nouvelle génération d'énergie

Afin d'exploiter ce type d'énergie, il est impératif de modéliser et de commander les différentes parties de ce système. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation, l'analyse de fonctionnement et la commande.

A travers l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne présenté dans le premier chapitre, on constate que la production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie moteur de développement durable.

Ceci nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Deux grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machines synchrones. Le fonctionnement connecté au réseau, suscite que la génératrice puisse fonctionner à vitesse variable. La présence de convertisseurs entre la génératrice et le réseau nuit au rendement global de l'installation.

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

La modélisation du système de conversion éolienne traite deux parties essentielles ; la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice, la deuxième partie, inclue le modèle de la GAS, basé sur des équations différentielles périodiques, est simplifié par la transformation de PARK.

L'objectif principal de notre travail consiste d'un côté à l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" avec régulateur PI pour la turbine, et d'un autre côté la commande vectorielle de la machine asynchrone à cage. Pour améliorer cette extraction afin d'avoir un meilleur rendement, d'une nouvelle stratégie de commande avancée (Logique Floue) est appliquée et des essais de simulation sont effectués et commentés.

## ***Conclusion générale***

---

Les résultats de simulations ont donné des performances dynamiques très satisfaisantes avec un bon suivi confirmé par la superposition des courbes de la vitesse réelle de la GAS et de sa référence. Les meilleures performances ont été obtenues avec le régulateur Flou.

L'adaptation au réseau nécessite de recourir à l'électronique de puissance par l'intermédiaire de convertisseurs statiques. La modélisation des deux convertisseurs, leur principe de fonctionnement et la technique de commande MLI., ainsi que la modélisation du bus continu, ont été traité en dernier. Les résultats de simulation de la chaîne complète réalisés en utilisant l'outil MATLAB, montrent la faisabilité de connecter un système à vitesse variable à un réseau stable, et confirment l'efficacité de la stratégie choisie à savoir le mode Flou, ainsi que son bon suivi face aux fluctuations du vent.

En perspective, beaucoup de points peuvent être envisagés tels que :

- L'implémentation de ces algorithmes dans un banc d'essai pratique ;
- La combinaison du système éolien au système photovoltaïque.

## Références bibliographiques

---

- [1] :M. Messaoud, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent». Thèse de Magistère de l'université de Batna. 2008
- [2] : Sadkine Smail, Rachedi Aghiles , « Etude d'un système éolien connecté au réseau,basé sur une GAS auto-excitée » , mémoire de master ,Université de Abderrahmane Mira de Bejaia,2017
- [3] :Kasedi Rafik ,Hantat Brahim « commande d'une génératrice asynchrone intégrée dans un système éolien connecté au réseau ». mémoire de master, université A/Mira de Bejaia, 2011/2012 .
- [4] : k.Idjdarene « contrôle de génératrice asynchrone à cage dédiée à la conversion de l'énergie éolienne ».université de Bejaia ,2008 .
- [5] : Frédéric Poitiers « etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne ».thèse de doctorat , l'école polytechnique de l'université de Nantes,2003 .
- [6] : E. R. Observ, «EDF, Fondation Énergies pour le Monde: La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde», Quinzième Inventaire, 2013.
- [7] : M. Messaoud, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent». Thèse de Magistère de l'université de Batna. 2008.
- [8] : S.Belakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», Thèse de Doctorat de l'université de Constantine. 2010
- [9] : B.Belabbas «Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local» Thèse de Magistère de l'université de Tiaret. 2012
- [10] H.E. Medouce «Modélisation et Simulation d'un générateur éolien connectée au réseau électrique» , mémoire de Master de l'université de Constantine. 2012
- [11] : O. Gergaud, " Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Docteur de l'École Normale Supérieure de Cachan 2002
- [12] : A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.
- [13] : Recherche ECRIN entreprise, « L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables», rapport de synthèse, mai 2002.

## Références bibliographiques

---

- [14] : A. Attar, «Les énergies renouvelables», ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau.
- [15] : K. Rouchdi, «Alimentation et commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multi niveaux». Thèse de Magistère, N° d'ordre: 23/2009-M/EL. Université des sciences et de la technologie Hourai Boumediene.
- [16] : Guy Cuntty, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aixen- Provence, 2001, [www.edisud.com](http://www.edisud.com)
- [17] : A. Mirecki, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», Thèse de Doctorat, 2005, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT). [18] : F. Messai, «Contribution à l'étude d'une génératrice à reluctance variable», Thèse de Magistère. 2009, université de Constantine.
- [19] : [http://tpe.samron.free.fr/TPESamRon/I\\_Histoire\\_et\\_fonctionnement\\_de\\_leolienne.html](http://tpe.samron.free.fr/TPESamRon/I_Histoire_et_fonctionnement_de_leolienne.html)
- [20] : CREG. Programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. <http://www.creg.gov.dv/images/stories/PDF/creg-15mars.pdf>
- [21] : Seltzer P., Lasserre A., le climat de l'Algérie, Institut de méthodologie de physique du globe de l'Algérie, 04272, 1930.
- [22] : Energie éolienne documentation service de la colonisation et de l'hydraulique 12-1951 .
- [23] : Zaoui rapport mesure de l'énergie éolienne service de la colonisation et de l'hydraulique mai 1954.
- [24] : Aillere P, l'énergie éolienne et sa valeur, general review of electricity March 1946.
- [25] : Houdet Ed. ; l'établissement des hélices d'éolienne électrique à usage domestique, extrait de génie civil du 1 er juin 1951.
- [26] : Verit M., mise en service d'une éolienne en vue de l'alimentation en eau potable de la ville de mécheria, Compte rendu d'essai service de la colonisation et l'hydraulique, W335/28-2-1956 .
- [27] : AKEL fethi, "étude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne", thèse de magister, école militaire polytechnique, 200

## Références bibliographiques

---

- [28] : HAMECHA samira , « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents »,Thèse de magistar ,université mouloud mammeri Tizi-Ouzou ,2013.
- [29] : E. Bowendnéré Mouni, «contribution à l'amélioration des performances des génératrices synchrones : nouvelle structure d'excitation basée sur une machine à aimants et combinée à des lois de commande avancées.». Thèse de Doctorat, 2008, Université de Poitiers.
- [30] : N. Abu-Tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : Modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de doctorat de l'école doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, 2008.
- [31] : Zine Souhila Rached « commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone a aiment permanent », thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf ,2016/2017.
- [32] : Kelkoul Bahia « etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation », thèse de magister API, Université de TLEMCEM,2011
- [33] : Jean-Pierre Caron, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », vol. 7,TECHNIP, coll. « Méthodes et pratiques », 1995.
- [34] : Abed Khoudir, « Techniques de commande avancées appliquées aux machines de type asynchrone », Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 22/06/2010.
- [35] : Hallouz Mohamed ,Kherchouche Abdelkader , « Stratégie de commande DPC appliqué à une MADA utilisé pour la production d'énergie éolienne », mémoire de master ,Université d'Ibn khaldoun de Tiaret ,2016-2017.
- [36] : Naouel HAMDI , «modélisation et commande des génératrices éoliennes », Thèse de magistar ,Université MENTOURI de Constantine ,2008
- [37] : Y. A. Chapuis, « Contrôle Direct du couple d'une machine Asynchrone par l'orientation de son flux statorique, »Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble, France, 1996.
- [38] : MOUSSA SIDDO Abdoulaziz , « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » , mémoire de fin d'études , Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie ,2007.

## Références bibliographiques

---

[39] : benslimane-hadfin, « étude et modélisation d'une génératrice asynchrone double cage », mémoire de master, université kasdi merbah Ouargla, 2016.

[40] : REDJEM Radia, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, » thèse de magister, université MONTOURI de Constantine, 2009.

[41] : F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double à double alimentation reliée au réseau », thèse de doctorat, 19 Décembre 2003, école polytechnique de l'université de Nantes.

[42] : Bernard MULTON, « Aérogénérateurs électriques ». L'Université de Paris 6, Universités à l'Antenne de Bretagne de l'ENS de Cachan/SATIE.

[43] : Chekima Djamel, « Commande d'une machine asynchrone par logique floue », mémoire de master, Université de El-Oued 2014.

[44] : Y. D. Landau, "Adaptive Control ". The Modèle Référence Approche.Inc.,NewYorck, 1979

[45] : MezianSalima , « Commandes adaptative et prédictive de la machine asynchrone », Thèse de doctorat ,Mentouri de Costantine 2009.

[46] : ChoubarKhoutir "modélisation de la machine asynchrone" Mémoire d'ingénieur l'universite de m'sila ,2006.

[47] : P.Krishnamurthy, F.Khorrami, « Adaptive Partial-State Feedback Control for Induction Motors » , American control conférence, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.

[48]: Faddane Mohamed Sadadik, « Commande optimale d'une moteur asynchrone muni d'un pilotage vectoriel » , mémoire de master, université de KasdiMerbah Ouargla,2016.

[49] : Elbia Youcef, « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté, » Magister En Electrotechnique, Université de Batna, 2009.

[50] : D. BOUALI et T. TADJER, « Commande floue d'un moteur asynchrone, »PFE, Université de Tiaret.

[51] : Bouasria samira khadidja, Bouzergata chafia, « Etude et commande d'un aérogénérateur synchrone à aimant permanent, »PFE, Université de Tiaret ,2017/2018.

## Références bibliographiques

---

- [52] : F. Chevie et F. Guély, « La logique floue, » Institut Schneider Formation, » Cahier Technique Schneider, 1998.
- [53] : A. L. Nemmour, « Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation, »Mémoire de Magister, Université de Batna, 2002.
- [54] : F. Zidani, R. Nait-Said, « Introduction à la Logique Floue / Conception d'un Contrôleur Flou, » Cours de Magister, Université de Batna, 2005.
- [55] : S. Chekroun et S. Djebbar, « Modélisation et application de la logique floue pour la commande en vitesse d'une machine asynchrone triphasée, » PFE, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran USTO, 2006.
- [56] : Y.Miloud, « Etude de l'estimation de la résistance rotorique dans la commande vectorielle d'un moteur asynchrone en utilisant la logique floue, »Thèse de doctorat es-sciences, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran USTO, 2002.
- [57] : A.Hazzab, « Commande des systèmes par logique floue, Réseau de neurones et Algorithmes géniques, »Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran USTO, 2006
- [58] : S. CHEKROUN, "COMMANDE NEURO-FLOUE SANS CAPTEUR DE VITESSE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE," thèse de Magister, 2009.
- [59] : L. Baghli, «Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques» thèse de Doctorat 1999.
- [60] : Y. Mihoub, « Commande neuro-floue d'une machine asynchrone » thèse de Magister, USTO, 2002.
- [61] : K. Kouzi, «Contribution des Techniques de la Logique Floue pour la Commande d'une Machine Induction sans Transducteur Rotatif, » thèse de Doctorat Batna, 2008.
- [62] : S.M.Muyeen, R.Takahashi, T.Murata, J.Tamura et M.H.Ali,"Transient stability analysis of permanent magnet variable speed synchronous wind generator, Proceeding of international conference on electrical machines and systems", Oct 8-11, 2007, Seoul, Korea.
- [63]: J. Larouche, « Cours et exercices corrigés , » Livre de l'électronique de puissance et des convertisseurs, Lycée E. Belin de Visoul 2003.
- [64]: M. Chinchilla, J.C. Burgos," Control of permanent magnet generator applied to variable speed wind energy systems connected to the grid ," IEEE Transactions on energy

## Références bibliographiques

---

conversion, Vol 1, pp.130-135, March 2006.

[65] : S. El Aimani, «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», Thèse de Doctorat, 2004, Ecole centrale de Lille.

[66] :Kasdi Rafik, Hantat Berahim, « commande d'une génératrice asynchrone intégré dans un système éolien connecté au réseau » ,mémoire de master, université A/Mira de Bejaia,2011/2012.

## **Résumé**

*Ce travail traite la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne connecté au réseau électrique. L'énergie éolienne est devenue la plus compétitive, par le fait de l'impact positif sur l'environnement, le développement économique, la propagation rapide, l'innovation technologique et l'abondance des nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables. Le système de conversion d'énergie éolienne est composé d'une turbine éolienne à trois pales, d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil (GAS) qui est reliée au réseau par deux convertisseurs, le convertisseur côté stator (SSC) raccordé par le bus de bus continu au convertisseur coté réseau (GSC). L'objectif est d'augmenter l'efficacité, améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, et extraire l'énergie optimale pour différentes vitesses de vent. On applique des techniques de commande usuelles, telles que la MPPT muni d'un régulateur PI à la turbine et la commande vectorielle à la génératrice asynchrone à cage d'écureuil. On introduit une nouvelle stratégie de commande avancée (Logique Floue). Les résultats de simulation confirment l'efficacité des stratégies appliquées dans le traitement des systèmes non linéaires avec des caractéristiques attrayantes. On note des améliorations apportées avec l'utilisation des méthodes de contrôle avancées, en particulier le Régulateur Flou.*

## **Mots clef**

*Turbine, génératrice asynchrone à cage d'écureuil, MPPT, commande vectorielle, commande floue.*

## **Abstract**

*This works deals with the control scheme of a wind energy conversion system connected to the electrical grid. Wind energy has become most competitive; this is due to the positive impact to the environment, economic development, fast propagation, technologic innovation, and large use of new methodologies of wind turbine at variable speed. The system is composed by a three blade horizontal wind turbine, squirrel cage Induction generator (GAS) which is connected to the network through two converters the Stator Side Converter (SSC) by Direct Current bus and The Grid Side Converter (GSC). The objective is to increase the efficiency, improve the quality of the electrical energy produced, and extract the optimum energy for different wind speeds; we apply usual control techniques, such as MPPT equipped with a PI regulator for the turbine and the vector control for the squirrel cage Induction generator. We introduce new advanced control strategies (Fuzzy Logic Mode). Simulation results confirm the effectiveness of the strategies applied in the treatment of nonlinear systems with attractive features. We note the improvements with the use of the advanced control methods, particularly synergistic mode.*

## **Keywords**

*Wind turbine, squirrel cage Induction generator, MPPT, Vector Control, Fuzzy control.*